

**지능정보사회 시대에 필요한 나노기술 도출을 위한
기획연구**

(Study on Key Nanotechnologies for Smart Information
Society)

연구기관 : (재)나노융합2020사업단

2018. 2. 2.

과 학 기 술 정 보 통 신 부

안내문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의
개인적 견해이며 미래창조과학부의 공식견해가
아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 유영민

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

본 보고서를 “지능정보사회 시대에 필요한 나노기술 도출을 위한
기획연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 2. 2.

요약문

□ 기획 연구의 필요성

광범위한 영역에 걸쳐 빠른 속도로 진행될 4차 산업혁명이 몇 가지 기술만으로 발전할 수는 없다. 여러 가지 기술이 다양한 경로를 통해 적절한 시기에 상호작용을 통해 큰 시너지를 창출함으로써 4차 산업혁명이 진전될 것이다. 우리가 현재로서는 예상할 수도 없는 기술들을 개발하여야 할 필요성(수요)이 점점 더 커질 것이다.

빅데이터, 인공지능(AI), 클라우드 컴퓨팅 등 4차 산업혁명을 추동하는 기술(driving technology)의 발전으로 새로운 기술의 개발 속도가 전반적으로 더욱 가속되겠지만 몇몇 분야, 예를 들면, ‘소재’ 분야와 ‘공정’ 분야는 여전히 기술 개발에 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 드는 분야로 남아 있게 될 것이다. 미국의 Materials Genome Initiative(MGI, 2012), 일본의 신원소 프로젝트 등 국가 차원의 소재 개발 프로그램은 이러한 문제의식에 기반을 둔 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 연구개발의 패러다임을 전환하고 데이터를 디지털화하고 디지털 데이터를 이용(빅데이터)하여 소재와 (제조)공정을 설계하고 실험을 최소화할 수 있는 체제를 구축하는 것이 필요하다.

나노기술(NT)은 나노크기 영역에서 나타나는 새로운 물성들에 기반을 둔 다양한 신기술의 창출을 가능하게 하는 기술(enabling technology)이지만 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 드는 소재•공정 기술의 특성을 갖고 있다. 또한 소재•공정 기술은 제조업의 근간이기도 하여 나노기술은 제조업의 혁신과도 밀접한 관련이 있다. 제조업, 특히 소재산업은 고용창출 효과가 큰 사업으로 소재산업에서 하나의 일자리는 연관되어 있는 다른 영역에서 0.5~4 개의 일자리를 추가로 창출한다. 나노기술은 일반 제조업(6.0)보다 높은 9.0의 고용유발계수를 갖는다.

나노기술은 제조업 혁신에 기여함은 물론 물류, 서비스업 등 다양한 영역의 발전에 기여한다. 나노기술은 이러한 산업 부문 외에도 범지구적 문제인 에너지 문제의 해결, 자원의 보존 및 효율적 활용, 환경 보존 등 지속가능한 발전을 위한 이슈를 해결하는데 결정적인 기여를 하고 있으며 향후 중요성이 더욱 커질 전망이다.

우리나라는 미국이 착수한 NNI(National Nanotechnology Initiative, 2000년)보다 약간 늦은 2001년부터 정부 정책(나노기술종합발전계획)으로 나노기술을 개발하여

왔다. 나노기술 분야의 연구 개발, 인프라 구축, 인력 양성을 15년 이상 지속해온 결과 세계 수준의 기술개발 경쟁력을 보유하게 되었고 사업화 성과도 나타나고 있다. 최근 몇 년 사이 4차 산업혁명에 대한 관심이 높아지고 정책적으로 드라이브가 걸리면서 나노기술이 4차 산업혁명에 기여할 수 있는 부분, 기여 방법 등을 체계적으로 살펴볼 필요가 있게 되었다.

□ 연구 내용 및 범위

분야	연구 내용	연구 범위
지능정보사회 동향 분석	지능정보사회의 성격, 핵심 요소, 진전 현황을 분석하고 시사점 및 이슈 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 지능정보사회의 특징 분석 • 지능정보사회의 추진전략 및 현황 • 시사점 및 이슈 도출
나노기술 수요 도출	사이버-실제 공간 경계 영역에서 요구되는 나노기술 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 초연결 관련 나노기술 • 신지능 관련 나노기술 • 디지털 데이터 관련 나노기술 • 혁신제조 관련 나노기술
수요 나노기술 현황 분석	수요 나노기술 개발 동향 /수준/전망, 산업화 동향 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 관련 나노기술별 개발 현황 • 나노기술별 국내외 기술수준 비교 • 공백기술의 분석
수요 나노기술 개발 및 지능 정보사회 접목 전략 수립	수요 나노기술별 개발 및 지능정보사회 접목 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 수요 나노기술별 시기별 요구 수준(사양) 및 활용방안 수립 • 수행 중인 과제들과의 정합성 확대 방안 • 지능정보사회 적용 전략 수립

□ 연구결과 요약

- 4차 산업혁명이 궁극적으로 사회 전반을 변혁시키게 될 전망이지만 초기 제조혁신, 생산혁명으로부터 출발할 것이므로 제조혁명의 진전에 나노기술이 기여할 영역을 도출하는데 연구의 초점을 맞추었다.
- 이전 산업혁명의 진행과정 분석을 통하여 4차 산업혁명은 여러 가지 선도기술들이 융복합하는 패턴으로 진전될 것이라는 것을 제시하였다.
- 제조혁명 관련한 외국 및 우리나라의 동향을 요약하였으며 시사성이 있는 산업계의 활동도 조사하여 정리하였다.
- 디지털 데이터(정보)를 기본으로 하는 제조혁명은 CPS(cyber-physical system, 사이버-실제 시스템) 체제를 기반으로 하므로 CPS 체제 구축에 필요

한 기술요소를 분석하였다. 대규모의 데이터 생산, 대용량 데이터를 전송, 실시간 처리, 저장하기 위해서는 지금보다 훨씬 더 발달된 수준의 기술이 필요한 것으로 나타났다(현재 수준에서 대응이 가능하더라도 점차 한계에 부딪히게 됨). 디지털 데이터의 전송, 처리, 저장에 고속화, 대용량화, 저전력화의 기술 혁신이 필요하며 데이터 생산을 위한 새로운 센서 제작에 신기능 소재가 필요함을 설명하였다.

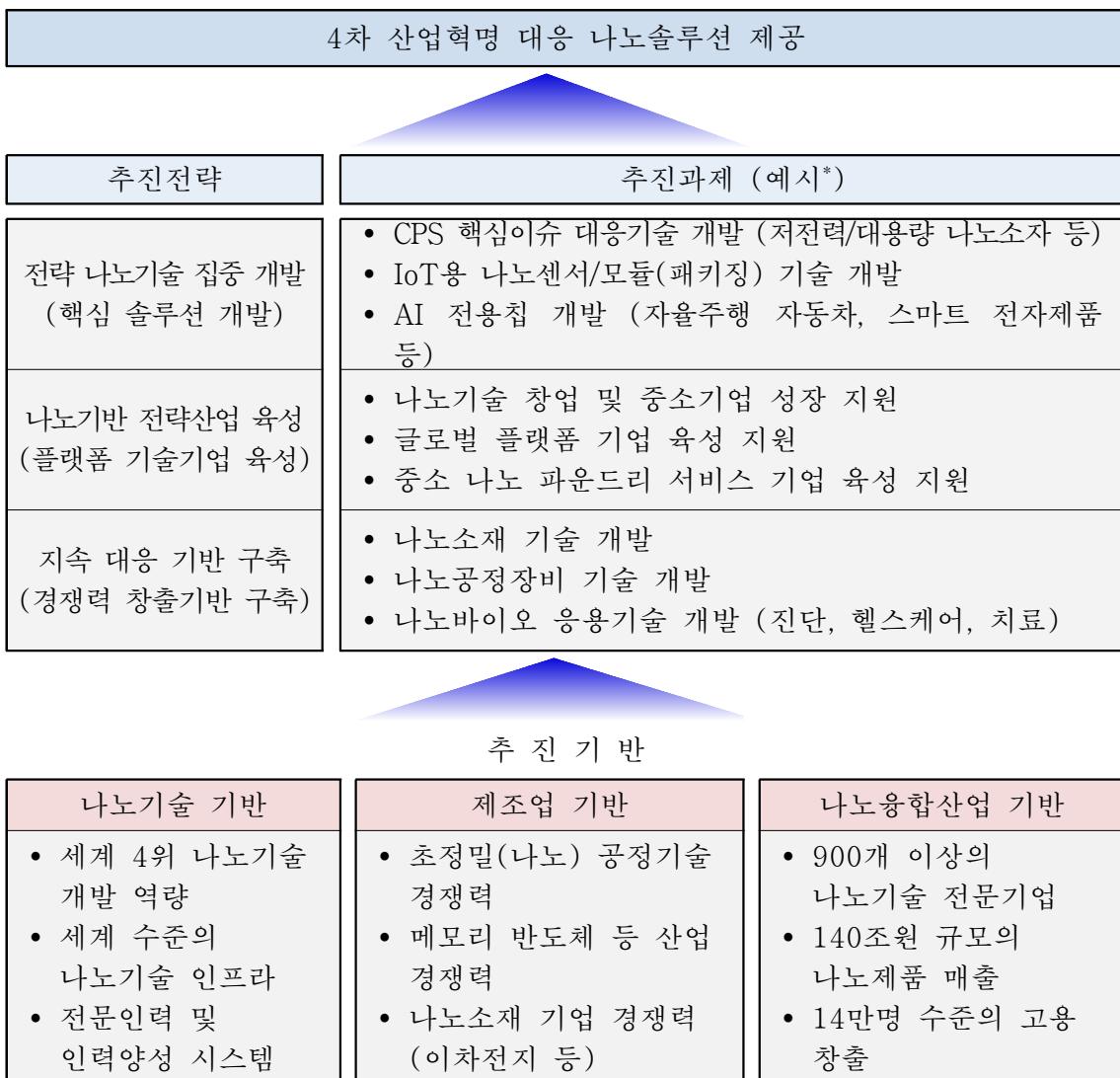
- 10 개 대분류 수준의 나노기술이 4차 산업혁명의 각 분야에 기여할 수 있는 역할을 각각 분석하였다(고속화, 대용량화, 저전력화, 신기능 창출 관점). 나노기술이 4차 산업혁명에 가장 크게 기여하는 부분은 신기능 창출을 통해서이며, 고속화, 저전력화에도 기여하는 것으로 분석되었다.



- 중분류 이하의 나노기술에서 기술개발 대상이 되는 80개 기술 영역을 도출하였으며 CPS를 구성하는 영역과 연결하여 분석하였다. 도출한 대상기술 영역은 정보 수집, 정보 처리·저장, 정보 실행 분야에 골고루 분포하였으며 정보 수집 분야와 관련된 기술이 가장 많았다.
- 4차 산업혁명과 연결 지어 나노기술 개발을 전략적으로 추진하여야 하는 당위성(조기 착수 및 별도 추진의 필요성, 예상 성과, 성공 요인)을 SWOT 분석 결과

와 함께 제시하였다. 또한 이러한 검토의 배경이 되는 우리의 기술개발 경쟁력을 제시하였다(4기 나노종합발전계획 자료 인용).

- ‘4차 산업혁명 대응 나노솔루션 제공’의 비전을 제시하고 9 개의 추진과제(예시)가 포함된 전략 나노기술 집중 개발, 나노기반 전략산업 육성(플랫폼 기술기업 육성), 지속 대응 기반 구축 등 세 가지 추진전략을 제시하였다.



□ 정책 제안

나노기술의 전략적인 개발을 포함하여 4차 산업혁명 관련 정책에 포함되기를 희망하는 4 개의 정책을 제안하였다.

첫째, 4차 산업혁명에 대한 국가적인 청사진이 조속히 완성되어야 한다. 4차 산업혁명의 이슈별 단편적인 대응으로는 선도국이 되기 어려운 것은 물론 현재의 위치도 지키기 어렵다. 실질적인 논의와 사회경제적 합의 과정을 거쳐 수십 년 장기적인 추진이 가능한 국가전략이 수립되어야 한다.

둘째, 목표와 수단을 혼동하지 않고 정교하게 조화시킨 세부 추진방안이 조속히 마련되어야 한다. 4차 산업혁명은 이전의 어떤 산업혁명보다 많은 선도기술들이 이 합집산하면서 발전할 것인바 세밀한 계획을 장기간 체계적으로 실행하지 않는 한 성공할 수 없다. 하나의 기술, 산업만으로 승부를 걸 수 없으며 분야별 경쟁력이 곧 전체 경쟁력이 되는 것도 아니다.

셋째, 연구개발 패러다임의 대전환이 필요하다. 기초연구가 곧 사업화이고 사업화가 곧 연구개발이며, 제품이 서비스이고 서비스가 제품이며, 실제 공간과 디지털 공간이 동기화되는 4차 산업혁명 체제에서는 속도가 생명이다. 속도 경쟁에 동승하기 위하여 연구개발은 필수적이지만 연구개발 시스템의 혁신 없이는 대응이 어려워 보인다. 선형 모델을 기본으로 하는 현재의 연구개발 체계를 대체하고 우리에게 맞는 연구개발 모델이 필요하다.

넷째, 우리가 할 수 있는 부분, 우리가 가진 강점으로부터 출발하는 실질적인 실행계획을 짜야한다. 선진국들에 비하여 미흡한 점이 많은 것이 사실이지만 우리가 가진 장점도 많다. 디지털 데이터 체계는 초정밀 세계, 초정밀 기술과 연결될 수밖에 없다. 우리는 세계 최고의 초정밀 공정기술(반도체 제조공정)을 갖고 있다. 이 초정밀 가공기술을 4차 산업혁명의 여러 부문이 필요로 하는 플랫폼 기술로 확산하면 우리는 적어도 하드웨어적인 요소를 축으로 하는 부분에서 세계를 선도할 수 있을 것이다. 나노기술을 제조혁신을 위한 기반기술로 활용하는 것이 하나의 예가 될 것이다.

다섯째, 나노기술은 완전 디지털화에 필요한 핵심기술로서의 역할을 할 것은 분명하지만 전략적 접근 없이는 성과로 연결되기 어렵다. 우리가 유리한 환경을 갖고 있다고 하더라도 4차 산업혁명 추진의 한 부분으로 적극적인 방법으로 추진할 필요가 있다. 나노기술이 4차 산업혁명에 이용될 수 있게 하는 상향식 접근은 정부가 그간 추진해온 기술개발 과정을 통해서 진행하며 4차 산업혁명 추진에 필요한 니즈 중심의 나노기술 개발은 하향식 접근 방법을 선택하여 우리나라가 선도그룹이 되는데 일조할 수 있게 하여야 한다.

Executive summary

Backgrounds of present research

The fourth industrial revolution to be proceeded rapidly over a wide range of society cannot be supported by a few of technologies. Many kinds of technologies will be merged to make novel technologies through various routes, leading to big synergic effect on its progress. New demand for novel unprecedented technologies will increase in accordance with evolution of the fourth industrial revolution.

Along with rapid progress of big data, artificial intelligence (AI), and cloud computing which drive the fourth industrial revolution, development of novel technologies will be accelerated time by time. However, both materials and process technologies are expected to remain as a time-consuming and expensive barrier even in the fourth industrial revolution. Strategic programs of Materials Genome Initiative of United States and New Element Project of Japan, for example, aim to solve this rate-determining development of new materials and processes. Thus, it is necessary to transform a research paradigm which allows to digitize all the data and develop either novel materials or new processes from the digital data with help of minimized experiments.

Nanotechnology based on novel properties appearing at the nano-scale is one of key enabling technologies for creating new technologies, but it has a character of materials technology inseparably combined with process technology (materials-processes technology), *time-consuming and expensive*. Materials-processes technology is a backbone of manufacturing and therefore, nanotechnology is closely related to innovation in manufacturing. Manufacturing, especially materials industry, has a big influence on job creation, for example, one job in manufacturing industry creates additional 0.5 to 4 jobs in the other related areas. Nanotechnology is more influential on job creation than

manufacturing, in which one job is estimated to make additional nine jobs in the related areas.

Nanotechnology contributes to innovate manufacturing industry as well as to make progress in the various fields including the transportation and service business. In addition to contribution to the industrial sector, it helps to solve global issues such as energy, natural resources, environmental protection, necessary for sustainable growth and then, its role becomes more important in the future.

Korea launched the national nanotechnology development program in 2001 just after the National Nanotechnology Initiative (NNI) of the United States in 2000 and has developed a wide spectrum of nanotechnology longer than 15 years, including research and development (R&D) for nanotechnology, construction of infrastructures for researchers and industry, and human resource development. Thus, we have high-level competitiveness in the area of nanotechnology and have applied the research outcomes into the commercial products. Recently as the fourth industrial revolution has drawn much interest and the government drives several policies in order to participate an industrial revolution race, we need to determine the role of nanotechnology on the fourth industrial revolution.

The scopes of the research

Areas	Subjects
Trends of the industrial revolution	Analyzing the characters, key elements, and recent progress of the fourth industrial revolution to draw out implications and policy issues
Nanotechnology demand in the fourth industrial revolution	Finding nanotechnology required to link cyber system and physical systems
The state-of-the-arts of nanotechnology, specific to the fourth industrial revolution	Analyzing the current status, commercialization, and prospect of nanotechnology necessary for the fourth industrial revolution
Strategy for nanotechnology development for the fourth industrial revolution	Planning the strategy for nanotechnology development focusing on the evolution of the fourth industrial revolution

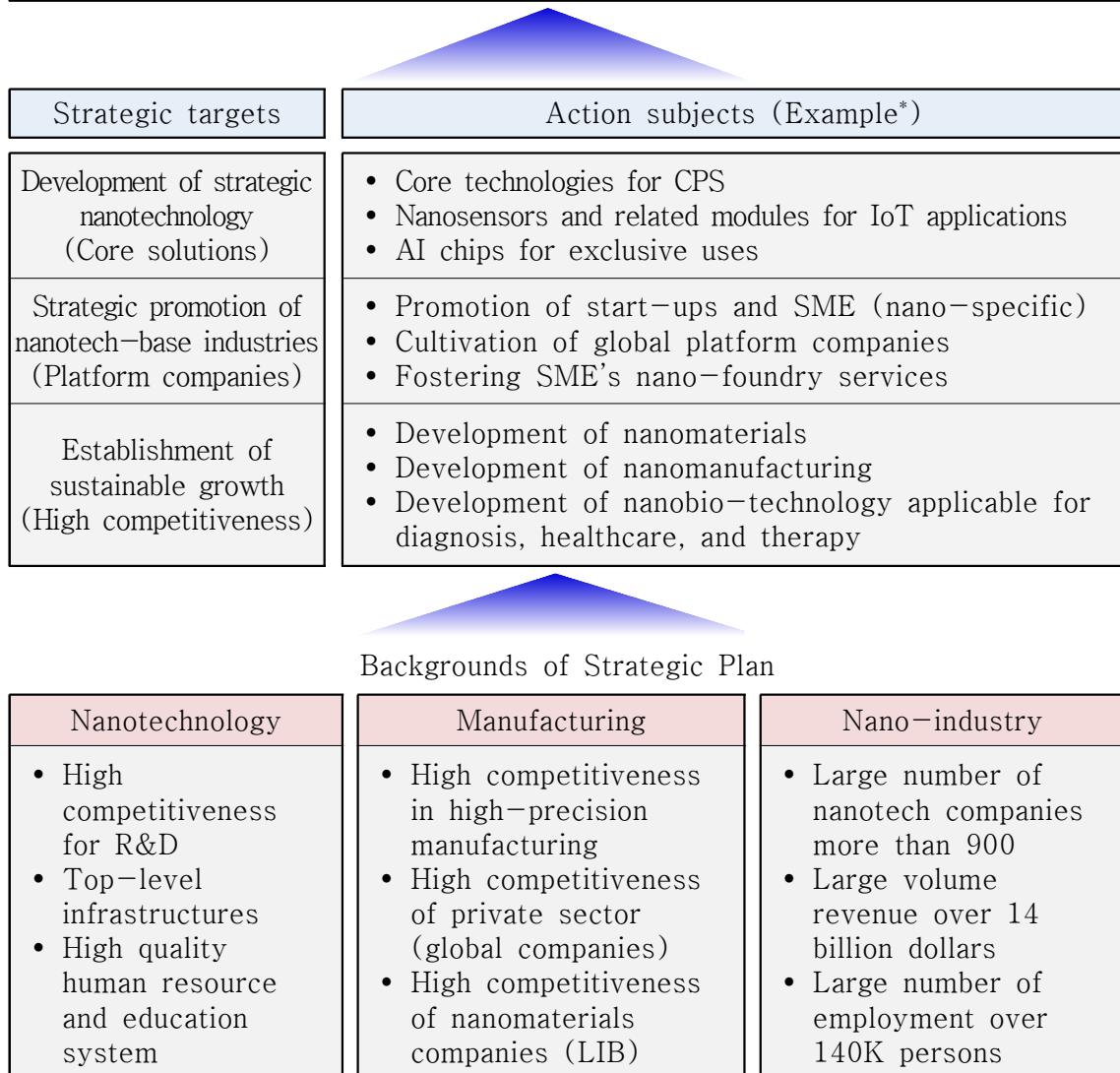
Brief description of the research

- The fourth industrial revolution will transform all the things in society in the end but begins from the innovation of manufacturing or production. This study focused to find out the roles of nanotechnology on the evolution of production revolution.
- It is provided from the review of the previous industrial revolutions that several leading technologies are to be merged in the various patterns and make big progress during the fourth industrial revolution.
- The activity for production revolution in the public sector was reviewed along with that of private sector.
- The core of production revolution based on digital data (information) is a cyber–physical system (CPS). The key technological elements comprising CPS were investigated. Generation of large scale data, high speed transfer of a large amount of data, real–time processing of large scale data, and mass storage of raw and processed data should be considerably improved to meet the requirements for practically available CPS, even though current technology can support the CPS *at the low level of applications*. Therefore, technological innovation is necessary for drastic improvement for high–speed transfer, processing, and storage of large amount of data. In addition, demand of new materials for sensors with high functionality will increase to digitize all the systems connected on the network of internet.
- The roles of nanotechnology on the fourth industrial revolution were determined at the level of 10 sub–categories, for example, nanomaterials, nanoelectronic devices, and computational nanoscience, in terms of high–speed transfer and processing of data, mass storage of data, reduction of power(or energy) consumption, and creation of novel functionality. Nanotechnology is verified to critically contribute to the creation of novel functionality followed by high–speed transfer and processing of data and low power consumption.



- Eighty research subjects to be required for the fourth industrial revolution were extracted from the ten sub-categories as a pool of candidate research topics. These eighty subjects are distributed over whole areas of CPS (collection, processing and storage, and execution). Largest number of candidate subjects belong to the field of data collection.
- Necessity of strategic nanotechnology development in response to the fourth industrial revolution was determined through strength-weakness-opportunity-threat (SWOT) analysis. As a background of strategic nanotechnology program, the data quoted from the fourth Korean Nanotechnology Initiative (2016) were provided, indicating the competitiveness of Korea in nanotechnology.
- Vision of 'Provision of nano-solutions for the fourth industrial revolution' was proposed, including three strategic targets and nine action subjects.

Provision of Nano-solutions for the Fourth Industrial Revolution



* The 'Example' means that the action subjects here can be modified or changed.

Policies proposed

Five policies including the strategic development of nanotechnology in response to the movement of the fourth industrial revolution are proposed as follow:

Firstly, the master plan covering all the range of the fourth industrial revolution should be prepared as soon as possible. We cannot participate in the race of the fourth industrial revolution with fragmentary response without government-level master plan. This master plan should be able to be supported for long time without drastic change. We need much discussion at every level of public and private sectors and then, have to draw out general vision of Korea in the time of the fourth industrial revolution.

Secondly, an executable, effective action plans should be made without confusing goals (targets) with tools (driving technologies). Unexpectedly large number of technologies will be involved, evolved, and merged dynamically during the fourth industrial revolution. Therefore, we need to develop a well organized policy framework for timely, adequate response in accordance with the progress of the fourth industrial revolution.

Thirdly, a big shift is necessary in the paradigm of research and development. There is a strong tendency of borderless transition in the fourth industrial revolution; fundamental research cannot be distinguished from commercialization, commercialization process itself is a kind of research, service is another form of physical products (servicification) and *vice versa*, and an event occurring in the real space is directly synchronized with digital imagery automatically realized in the cyber space. Speed is a crucial factor governing this new regime. We need to develop a new R&D system to catch up with speed.

Fourthly, practical action plans including what we can do and what we have to do should be prepared. We have many drawbacks against the developed countries, but on the other hand, have strong global competitiveness in several platform technologies necessary for the fourth industrial revolution. We need to take advantage of our competitiveness as a leverage for international collaboration with developed countries to overcome our weakness.

Fifthly, it is evident that nanotechnology will play an important role on digitization by providing key components. However, it cannot be simply achieved without strategic approach. We need to run a strategic development

program focusing on meeting the urgent demand at the beginning of the fourth industrial revolution.

목 차

1. 기획연구의 개요	1
(1) 연구의 배경	1
(2) 연구 목표	2
(3) 연구의 내용 및 범위	3
(4) 추진전략 및 방법	3
(5) 연구의 한계	7
2. 산업혁명의 이해 (1~3차 산업혁명)	9
(1) 산업혁명과 기술혁명 (요약)	9
(2) 산업혁명 중 선도기술의 전개 및 산업 변화	11
(3) 선도기술간의 상호작용	19
(4) 계층적 접근의 필요성	20
3. 4차 산업혁명의 배경으로서의 제조업 (현황 및 이슈)	23
(1) 제조업 혁신에 주목하여야 하는 이유	23
(2) 제조업 부문의 동향	31
(3) 제조업 부문의 최근 이슈	37
(4) 제조업 부문의 국가 정책	38
4. 제조혁신(생산혁명)과 4차 산업혁명	41
(1) 미래 제조업의 모습 (4차 산업혁명의 배경)	41
(2) 제조업 혁신과 4차 산업혁명	44
(3) 예상되는 4차 산업혁명의 모습 (제조 부문)	48
5. 4차 산업혁명의 이해 및 추진 현황	57
(1) 4차 산업혁명의 계층별 주요 변화 예측	58
(2) 4차 산업혁명을 선도할 기술들	63
(3) 핵심 선도기술 전망	64

(4) 각국 및 기업의 대응	69
6. 나노기술과 4차 산업혁명	99
(1) 나노기술과 4차 산업혁명의 관련성	99
(2) 산업 부문에서 나노기술과 4차 산업혁명의 관련성	100
(3) 4차 산업혁명에 나노기술이 기여하는 부분	110
(4) CPS 구현에 기여할 개발대상 나노기술 과제 도출	117
7. 4차 산업혁명 대응 나노기술 개발 추진 전략	127
(1) 기술개발 경쟁력 분석	127
(2) 나노기술 개발 현황 분석 (4차 산업혁명 관련성 분석)	132
(3) 나노기술 개발 전략 검토를 위한 SWOT 분석 및 대응 전략	136
(4) 나노기술 개발 추진 전략	144
8. 요약 및 정책 제언	153
(1) 요약	153
(2) 정책 제언	154
[첨부]	157
[첨부 1] 상위 계획 및 수행 중인 사업들과 도출된 개발대상 나노기술 개발 영역의 비교	159
[첨부 2] 나노기술 분야별 4차 산업혁명 기여 내용 분석 결과	165
I. 선도기술과-나노기술 영역별 관련성	165
II. 4차 산업혁명 영역별 나노기술 기여 내용 및 개발대상 기술 후보과제 목록	175
[첨부 3] 10대 나노기술 영역별 개발대상 기술 후보과제	185
I. 후보과제별 세부 내용	187
II. 후보과제별 중복성 검토를 위한 검색어	311
[첨부 4] 수정·보완 요구사항 반영 내역	315

1. 기획연구의 개요

(1) 연구의 배경

4차 산업혁명(4차 산업혁명)은 혁명이라는 의미가 그렇듯이 지금까지의 형태와 전혀 다른 형태로 산업 전반을 변모시킬 것이고 이러한 변화는 사회 전반으로 확산되어 세상의 형태, 삶의 방식까지 바꿔놓게 될 것이다.

광범위한 영역에 걸쳐 빠른 속도로 진행될 4차 산업혁명이 몇 가지 기술만으로 이뤄질 수는 없다. 여러 가지 기술이 다양한 경로를 통해 적절한 시기에 상호작용을 통해 큰 시너지를 창출함으로써 4차 산업혁명이 진전될 것이다. 우리가 현재로서는 예상할 수도 없는 기술들을 개발하여야 할 필요성(수요)이 점점 더 커질 것이다. 몇몇 가지 핵심기술의 개발이 지연되어 중요한 영역의 발전이 늦어지는 경우도 발생할 것이다.

빅데이터, 인공지능(AI), 클라우드 컴퓨팅 등 4차 산업혁명을 추동하는 기술(driving technology)의 발전으로 새로운 기술의 개발 속도가 전반적으로 더욱 가속되겠지만 몇몇 분야, 예를 들면, ‘소재’ 분야와 ‘공정’ 분야는 여전히 기술 개발에 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 드는 분야로 남아 있게 될 것이다. 이들 기술분야에서의 신기술 개발 지연이 장애요소가 되는 분야가 분명히 생길 것이다. 미국의 Materials Genome Initiative(MGI, 2012), 일본의 신원소 프로젝트 등 국가 차원의 소재 개발 프로그램은 이러한 문제의식에 기반을 둔 것이다. 예를 들어 MGI 프로그램이 지향하는 것처럼 새로운 소재 개발에 소요되는 기간을 1/2, 비용을 1/2로 줄일 수 있으면 신소재를 기점으로 하는 가치사슬과 관련이 있는 시장을 선점하는 효과를 얻게 될 것이다. (물론 제기된 목적을 달성하기 위하여 연구의 패러다임을 전환하고 데이터를 디지털화하고 디지털 데이터를 이용(빅데이터)하여 소재와 (제조)공정을 설계하고 실험을 최소화할 수 있는 체제를 구축하는 것이 필요하다.)

나노기술(NT)은 기본적으로 원자나 분자, 즉 물질을 다루는 기술이므로 소재기술의 성격을 띠고 있다. 또한 물질을 나노미터 크기 수준으로 가공하는 공정 개발이 반드시 동반되어야 하므로 공정기술의 성격을 동시에 갖고 있다. NT는 나노기술 영역에서 나타나는 새로운 물성들에 기반을 둔 다양한 신기술의 창출을 가능하게 하는 기술(enabling technology)이지만 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 드는 소재•공정 기술의 특성을 갖고 있다. 또한 소재•공정 기술은 제조업의 근간이기도

하여 나노기술은 제조업의 혁신과도 밀접한 관련이 있다. 제조업, 특히 소재산업은 고용창출 효과가 큰 사업으로 소재산업에서 하나의 일자리는 연관되어 있는 다른 영역에서 0.5~4 개의 일자리를 추가로 창출한다. 나노기술은 일반 제조업(6.0)보다 높은 9.0의 고용유발 계수를 갖는다.

나노기술은 제조업 혁신에 기여함은 물론 물류, 서비스업 등 다양한 영역의 발전에도 기여한다. 나노기술은 이러한 산업 부문 외에도 범지구적 문제인 에너지 문제의 해결, 자원의 보존 및 효율적 활용, 환경 보존 등 지속가능한 발전을 위한 이슈를 해결하는데 결정적인 기여를 하고 있으며 향후 중요성이 더욱 커질 전망이다.

우리나라는 미국이 착수한 NNI(National Nanotechnology Initiative, 2000년)보다 약간 늦은 2001년부터 정부 정책(나노기술종합발전계획)으로 NT를 개발하여 왔다. NT 분야의 연구 개발, 인프라 구축, 인력 양성을 15년 이상 지속해 온 결과 세계 수준의 기술개발 경쟁력을 보유하게 되었고 사업화 성과도 나타나고 있다. 최근 몇 년 사이 4차 산업혁명에 대한 관심이 높아지고 정책 드라이브가 걸리면서 나노기술이 4차 산업혁명에 기여할 수 있는 부분, 기여 방법 등을 체계적으로 살펴볼 필요가 있게 되었다.

(2) 연구 목표

지능정보사회의 진전에 핵심적으로 기여할 나노기술들을 도출하고 이들의 개발 전략을 수립하여 제4차 산업혁명 대응전략 수립 및 실행에 활용할 수 있게 함.

지능정보사회의 진전에 핵심적으로 기여할 나노기술들을 도출하고 이들의 개발 전략을 수립하여 제4차 산업혁명 대응 전략 수립 및 실행에 활용할 수 있게 함.

- 지능정보사회의 계층별(단계별) 나노기술 수요 도출
- 도출 나노기술의 개발 및 지능정보사회 접목 전략 도출

(3) 연구의 내용 및 범위

분 야	연구 내용	연구 범위
지능정보사회 동향 분석	지능정보사회의 성격, 핵심 요소, 진전 현황을 분석하고 시사점 및 이슈 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 지능정보사회의 특징 분석 • 지능정보사회의 추진전략 및 현황 • 시사점 및 이슈 도출
나노기술 수요 도출	사이버-실(實) 공간 경계 영역에서 요구되는 나노기술 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 초연결 관련 나노기술 • 신지능 관련 나노기술 • 디지털 데이터 관련 나노기술 • 혁신제조 관련 나노기술
수요 나노기술 현황 분석	수요 나노기술 개발 동향 /수준/전망, 산업화 동향 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 관련 나노기술별 개발 현황 • 나노기술별 국내외 기술수준 비교 • 공백기술의 분석
수요 나노기술 개발 및 지능 정보사회 접목 전략 수립	수요 나노기술별 개발 및 지능정보사회 접목 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 수요 나노기술별 시기별 요구 수준(사양) 및 활용방안 수립 • 수행 중인 과제들과의 정합성 확대 방안 • 지능정보사회 적용 전략 수립

(4) 추진전략 및 방법

① 추진전략

○ 연구진의 구성

- 지능정보사회 관련 정책연구기관의 전문가 및 주요 분야 전문가들(STEPI, KIET, KISTEP; IoT, 빅데이터, AI, 3D 프린팅(산업계 포함))과
- 나노기술 부문 주요 기관의 전문가들(나노기술연구협의회, 나노융합산업연구 조합, 나노인프라협의체, 나노기술정책연구센터)로 기획위원회를 구성

○ 관련조직과의 협력

- 나노기술연구협의회, 나노융합산업연구조합, 산업연구원 등 관련조직과의 협력(기획위원 참여 및 작성안 검토)
- 나노융합공공연구기관협의회*와의 협력을 통하여 공공부문의 전문가 풀(pool) 및 이들이 보유하고 있는 해외 네트워크를 활용하여 국외 동향을 수집 및 분석

* 나노융합공공연구기관협의회: KIST, ETRI, 생기연, 화학연, 기계연, 전기연,

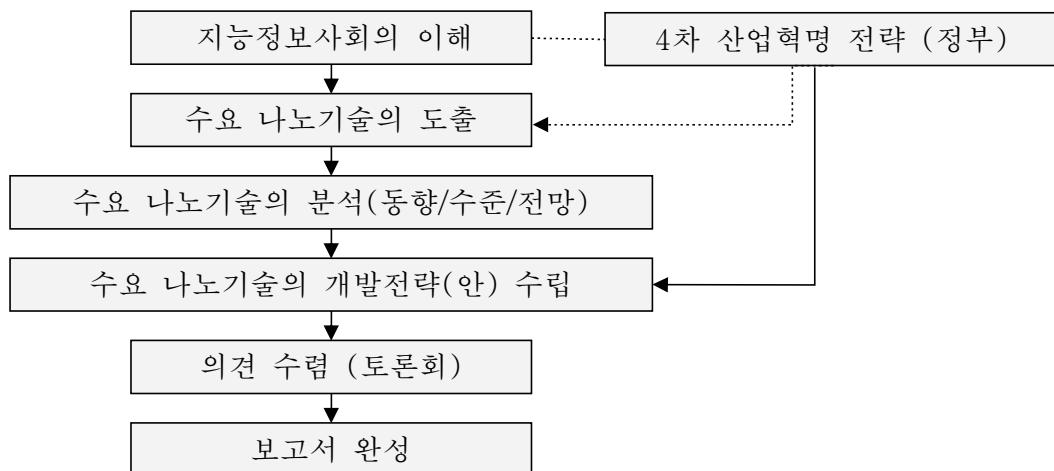
재료연, 전품연, 세라믹기술원, 나노종합기술원 등 10 개 연구기관이 참여하고 있으며 나노기술 담당 최고 부서장을 위원으로 하고 있음(회장 나종주 박사(재료연)). 나노기술 분야의 거대 융합기술 발굴, 4차 산업혁명에서의 나노 기술 역할 등 공통관심 사항에 대한 의견 수렴 등을 수행하고 있음.

○ 추진전략

- 지능정보사회와 연결되는 나노기술을 중심으로 전략을 수립하여 실천적 방안을 도출하는 것에 초점을 둠.
- 나노기술 전문가, 나노기술 기업, 정책부서(및 관리기관)와의 체계적인 교류(세미나, 공청회 등)를 통하여 이해당자사들이 공감할 수 있는 방안 도출

② 연구추진 방법

○ 연구단계



○ 연구방법

- 지능정보사회 전반에 관한 이해나 개발 중이거나 개발 중인 나노기술들에 관한 분석은 공개된 자료를 기반으로 수행
- 수요 나노기술의 분석은 나노기술 분야별 전문가 그룹의 도움을 받아 수행
- 수요 나노기술 개발 전략은 수요기술의 분석결과를 바탕으로 기획위원회에서 수립하며 전문가 그룹에 환류하여 내용을 보완함.
- 핵심 전문가 혹은 산업계 전문가를 초청하여 주요 내용을 확인하고 기획에 반영

③ 기획결과 보완을 위한 의견 수렴

가. 의견수렴을 위한 토론회 개최

- 일시 및 장소 : 2017년 11월 9일 14:00 (한국과학기술회관 아나이스홀)
- 참석 인원 : 산학연 부문에서 40여 명 (나노기술 분야와 관련이 있는 학계·연구계 참가자 외에도 센서학회, 산업계, 언론계에서 참석하였음)
- 주요 내용 : 기획결과(내용)에 대한 발표가 있었으며 발표내용에 대한 참가자들의 의견 개진이 있었음.
- 제시된 의견 (요약) :
 - 나노기술의 역할을 조금 더 구체화할 필요 있음
 - 초감각, 초연결 등 나노기술이 기여할 수 있는 경계 영역에서의 역할
 - 사회경제적 난제 해결 등에 기여할 수 있는 부분
 - IoT 등 실물 중심 부분과 실물의 내부(이면)에 해당하는 디지털화/ 시뮬레이션 부분에서의 나노기술의 역할 제시
 - 나노기술 관점에서 4차 산업혁명에 대응할 수 있는 방안 추가 필요
 - 4차 산업혁명을 기회로 만들기 위해 필요한 '속도'를 따라잡기 위하여 정보를 공유하고 참여할 기회를 부여하는 컨소시엄 구성 등 검토 필요
 - 4차 산업혁명은 생존의 문제일 수 있고 시장을 어떻게 만들어내느냐가 관건이므로 비즈니스 전략이나 방법에 대한 고민 필요
 - 상위계획, 기술지도 등과의 차별성 및 본 기획연구의 한계 설명 필요
 - 4기 나노종합발전계획, 작성 중인 기술지도 등과 구분할 필요
 - 기획내용이 제조혁명에 맞춰져 있는 것에 대한 설명 필요 (고령화 문제, 교육 문제 등에 대한 의견 제시가 있었으나 기획범위를 정할 때 산업혁명의 시작이 제조혁명이라는 것에 초점을 맞추었고 이를 보고서에 설명할 계획이라고 밝힘).

※ 토론회 사진



나. 나노융합공공연구기관협의회를 통한 의견 수렴

- 일시 및 장소 : 2017년 12월 6일 16:00 (나노융합2020사업단 회의실)
- 참석 인원 : 나노융합공공연구기관협의회 소속 7 개 기관 (나노기술 담당 부서장; KIST, 표준연, 에기연, 기계연, 생명연, 생기원, 화학연)
 - * 나머지 기관은 자료 파일을 제공하고 온라인상으로 의견 수렴
- 주요 내용 : 기획결과(내용)에 대한 요약발표(기획자료(ppt 파일) 사전 제공)와 보고서 초안 검토 후 기획내용에 대한 참가자들의 의견 개진이 있었음.
- 제시된 의견 (요약) :
 - 필립스, 지멘스, GE 등 외국 기업의 활동은 소개되어 있는데 국내 기업의 활동도 소개할 필요 있음
 - 현대자동차, 포스코, 두산인프라코어 등 실제로 4차 산업혁명 관련 기술을 도입하고 있는 회사들이 있음.
 - 새롭게 개발해야 할 기술에 대한 언급은 있으나 확보(보유)기술을 활용하는 것도 필요하므로 내용에 추가할 필요 있음.
 - 반도체 기술 등 우리나라가 확보하고 있는 플랫폼 기술도 다수 있음.
 - 원자재(자원) 부족, 기후변화 대응 등을 개요에서 언급하는 것이 좋겠음.
 - 4차 산업혁명에 대한 설명 부분과 나노기술이 필요한 부분을 연결하는 문맥을 부드럽게 할 필요 있음.
 - 굳이 나노기술을 크게 부각시키지 않더라도 문맥을 통해서 중요성이 전달될 수 있도록 할 필요 있음.

※ 나노융합공공연구기관협의회 검토회의 사진



(5) 연구의 한계

- ① 본 기획연구는 지능정보사회시대(4차 산업혁명 시대) 진입에 필요한 나노기술을 도출하는 것을 목표로 진행되었다. 따라서 넓은 범위를 갖는 지능정보화사회 관련 내용 중 나노기술과 직간접으로 관련이 있는 부분이 연구의 대상이다.
- ② 나노기술과 관련되어 있는 지능정보사회 영역이 또한 범위가 넓지만 4차 산업혁명이 새로운 생산혁명(제조혁명)으로부터 출발한다는 점을 고려하여 생산 부문의 혁신, 새로운 제조업 혁신과 관련된 나노기술의 역할에 초점을 두었다.
- ③ 4차 산업혁명을 선도하는 기술들이 다양하고 이들 선도기술 역시 다른 기술들과 복잡한 융복합 관계를 갖고 있다. 나노기술은 자체가 갖고 있는 원천성 때문에 독자적으로 4차 산업혁명에 기여하기보다는 선도기술의 발전 혹은 관련이 있는 주변기술의 발전을 통하여 기여하는 부분이 크다. 따라서 4차 산업혁명에서 나노기술이 담당할 영역은 4차 산업혁명을 수행하기 위한 프레임을 어떻게 짜느냐에 달려 있다. 본 연구에서는 나노기술이 기여할 분야가 드러나는 수준에서 4차 산업혁명 전반에 나노기술이 기여할 수 있는 역할을 찾고자 하였다.
- ④ 연구를 통하여 도출한 개발대상 기술(4차 산업혁명에 기여할 것으로 예상되는 기술)은 나노기술의 범위가 넓은 점을 고려하여 대분류 수준의 기술 영역별로 도출되었다. 기술 개발을 위한 실행계획 수립 시에는 활용 영역(수요 부문)이 요구하는 실제 사양(특성, 가격), 채택시기 등을 고려하여 구체화할 필요가 있다.

2. 산업혁명의 이해 (1~3차 산업혁명)

(1) 산업혁명과 기술혁명

1770년경 영국에서 시작된 기계화 중심의 산업혁명은 모두에게 익숙한 역사 지식의 하나이다. 불과 몇 년 사이 4차 산업혁명에 관한 논의가 봇물 터지듯 활발해지면서 2차, 3차 산업혁명에 대한 관심이 높아졌다. 산업혁명이라는 용어도 1차 산업혁명이 시작된 지 1세기를 넘긴 1885년 아놀드 토인비가 영국의 급격한 산업화 과정을 '산업혁명'으로 표현하면서 보편화된 말이다.¹⁾ 아직도 1차 산업혁명에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 즉 2차, 3차 산업혁명에 대해서는 아직까지 일치된 연구결과는 없다. 1차 산업혁명 전후의 큰 변화와 달리 그 이후의 산업혁명들을 명확히 구분 지을 수 있는 변화를 찾아보기 어렵다.

2차, 3차 산업혁명간의 경계가 모호한 것 이상으로 4차 산업혁명의 도래에 대한 논의 또한 분분하다. 3차 산업혁명이 여전히 진행 중이라는 견해로부터 이미 4차 산업혁명이 시작되었다는 견해까지 매우 다양하다. 본 연구는 4차 산업혁명에 대한 견해에 대한 고찰에 초점을 두지 않았고 4차 산업혁명이 진행 중이거나 곧 도래할 것을 전제로 하고 나노기술이 기여할 영역을 찾는데 초점을 두었다. (이는 향후 급격히 진행될 제조업 혁신에 나노기술이 어떤 기여를 할 수 있을지를 찾는 것으로 일반화하여 생각할 수 있다.)

2장에서는 산업혁명별 특징과 각 산업혁명을 선도한 기술들이 전개된 과정을 정리하였다. 이러한 정리를 통하여 여러 차례의 산업혁명이 이어지면서 나타나는 변화들을 추적함으로써 4차 산업혁명의 방향을 가늠하고자 할 때 어떤 사항들에 주목하여야 할지를 찾는데 목적이 있다.

① 산업혁명

지금까지 있었던 1차 산업혁명으로부터 3차 산업혁명까지의 주요 내용은 다음의 표 1과 같이 요약할 수 있다.

1차 산업혁명과 2차 산업혁명이 시작된 시기를 각각 1770년, 1870년경으로 보는

1) Arnold Toynbee (1852~1883): Lecture in the industrial revolution in England. (아놀드 토인비 (경제학자)가 1875년 옥스퍼드대에서 강의한 내용을 사후인 1885년 출간하였음). * 역사학자로 잘 알려진 Arnold J. Toynbee(1885~1975)는 그의 조카임.

것에 관해서는 많은 전문가들이 공감하고 있지만 3차 산업혁명이 시작된 시기에 대해서는 이견이 많다. 여기서는 반도체 발명(1948년) 이후 본격적인 정보통신 혁명 시대를 연 마이크로프로세서가 개발된 시점을 3차 산업혁명이 시작된 시점으로 보았다. (마이크로프로세서 기술은 반도체 기술의 연장선상에 있으므로 3차 산업혁명의 시점을 1950년으로 보아도 큰 무리는 없다.)

표 2. 1~3차 산업혁명의 요약

산업혁명	1차	2차	3차
기간	1770~	1870~	1970~
주도국	영국	독일·미국	미국
기술의 발전	기계 발명(노동력 대체) 철강기술의 발전 수송기술 (기차/선박) 도로·철도 기술 통신·인쇄 기술	철강산업의 발전 내연기관(자동차·비행기) 분업의 체계화 (공장 시스템) (표준화)/대량생산) 석유화학산업	초고집적 반도체 기술 인터넷 및 정보통신 산업의 급속한 발전 수송기술: 고속화/대형화 에너지·바이오기술
대표산업	섬유산업	철강, 철도, 자동차	자동차, 전자
산업 변화 키워드	기계화 (공장체제)	전기화/분업화	전자화/자동화
* 기술 변화(수단)	수차/증기기관 인위적 동력	대량생산 및 소비 전기 및 모터	초정밀 제조 기술 자동화
에너지 형태	증기기관	전기(집중형)	전기(집중형)
* 에너지원(源)	석탄	석탄, 석유	석탄, 가스, 원자력
연결(connectivity)	거점간 연결 (철도) * 연결범위 제한	지역간 연결 (도로·철도) * 연결범위 확대	사람간 연결(인터넷) (실시간)
* 연결속도	시속 150 km(철도)	시속 350 km(철도)	시속 780 km(철도)
* 의미	자원(입자) 제약 극복 ⇒ 물류 확산	공간 제약(철도의 한계) 극복 ⇒ 물류 보편화	공간 제약 탈피 실시간 연결
커뮤니케이션	활자(책, 신문) 등	전화, TV 등	인터넷, 모바일 기기
사회 변화	도시화	산업화	네트워크화

② 기술혁명

표 1은 산업혁명 중 생산방식에서의 급격한 변화로부터 출발하여 사회 변화로 이어진 결과들을 보여준다. 즉 산업혁명은 생산혁신에 뿌리를 두고 있으며 생산혁신에 기여하는 것은 기술 발전이다. 따라서 산업혁명은 혁신 기술의 개발 없이는 일어날 수 없다. 기술 발전 역사에서의 급격한 발전, 즉 기술혁명은 그동안 다섯 차례에 걸쳐 일어났다(농업기술, 금속기술(청동기, 철기 등) 등 역사 이전의 기술 혁신을 제외하고 1770년대 이후 산업적인 의미를 부여할 수 있는 기술혁명만을 대상으

로 함)(표 2).

다섯 차례의 기술혁명이 일어나는 동안 세 차례의 산업혁명이 있었다. 이는 모든 기술혁명이 산업혁명, 즉 산업뿐만 아니라 사회 전반에 걸친 급격한 변화로 이어지는 않는다는 것을 의미한다. 기술혁명이 일어난 시기를 산업혁명이 진행된 시기와 연결 지으면 산업혁명이 진행되는 약 50년 동안 대략 두 차례의 기술혁명이 일어났다. 즉 생산혁명을 바탕으로 하는 산업혁명은 동력이 되는 기술혁신을 지속적으로 필요로 한다.

표 3. 다섯 차례 기술혁명(1770대 이후 현재까지)의 내용 요약

기술혁명	명칭(통칭)	촉발기술(장소)	핵심요소	탄생한 기술	새로운 인프라
1차 (1771)	증기기관 기계화의 시대	아크라이트의 방적기 (크롬 포드; 영국)	철, 원면, 석탄	기계화, 공장, 단조기기(철강)	운하, 유료(고속) 도로, 범선, 수차
2차 (1829)	증기엔진 철도의 시대	로켓 증기엔진 (맨체스터, 리버풀; 영국)	철, 석탄	표준 부품, 건설, 증기 엔진 및 기계류	증기력, 증기선, 철도, 전보, 항구, 집적(산업단지)
3차 (1875)	철강·전기 공학의 시대	카네기 베찌머 강철 공장 (피츠버그; 미국)	전기, 강철 구리, 합금	철강, 구리, 화학, 전기 장치 및 장비, 과학(R&D)	철강건설(증기선, 철도, 교량, 대형 구조물), 전화, 표준화
4차 (1908)	석유·자동차 대량생산의 시대	포드 T 모델 컨베이어시스템 (디트로이트; 미국)	석유, 가스, 합성소재	대량생산(규모의 경제), 제품 표준화, 정제, 합성, 가전	항공기·공항, 자동차 (전용)도로, 전기 보급, 저유가, 무선 및 아날로그 통신
5차 (1971)	반도체·인터넷 정보·통신의 시대	인텔 마이크로 프로세서(산타 클라라; 미국)	집적회로	정보통신기술, 컴퓨터, 소프트 웨어, 제어기기	디지털 통신(인터넷, 웹), 고속 여행

(2) 산업혁명 중 선도기술의 전개 및 산업 변화

① 1차 산업혁명

1차 산업혁명을 대표하는 기술은 증기기관이다. 증기기관 기술도 장기간에 걸쳐 발전되어온 기술인 것은 물론 제철기술의 발전에 의존하고 제철기술은 다시 코크스 제조기술 등 다른 기술의 발전과 이들이 융합됨으로써 진화하게 되었다. 1차 산업 혁명의 진전에 기여한 기술들을 그림 1에 요약하였다. 1차 산업혁명이 시작된 1775년 이전 에너지 효율이 매우 낮았지만 이미 증기기관이 존재하였다

(Newcomen의 증기기관(1712년) 이전부터 증기기관 기술이 발전하여 오고 있었음). 숯(목탄) 대신 코크스를 사용하는 용광로법(1709년)이 개발되어 제철기술에 혁신을 가져옴으로써 삼림의 훼손 없이 철(선철)을 대량으로 제조할 수 있게 되었다. 선철 중 과잉의 탄소 성분을 제거하여 철의 가공성을 향상시킨 연철로법(1785년)이 개발되어 안정적인 증기기관을 대량으로 제조할 수 있게 되었다. 증기기관의 핵심부품인 실린더를 가공하는데 필요한 선반(lathe)이 개발된 것도 이 시기의 일이다. 1차 산업혁명을 대표하는 섬유산업과 관련된 기술들이 1730년대부터 비약적으로 발전하고 있었다. 때마침 고효율 운전 수준에 도달한 안정한 증기기관이 방적 기술에 필요한 동력을 제공하여 섬유산업이 비약적으로 발전하게 되었다. 증기기관(엔진)이 대량으로 사용되면서 급격히 늘어난 석탄 수요에 대응(석탄 생산량이 1800년 1천만 톤에서 1905년 2억 3천 6백만 톤으로 늘어남)하고 석탄을 광산으로부터 공장지대로 효율적으로 수송하기 위하여 증기기관차와 철도기술이 발전하였다. 섬유산업의 원료인 면화와 생산품인 면직물을 다른 지역(나라)으로 운송하기 위하여 증기선이 건조되었다.



그림 1. 1차 산업혁명 기간 중 주요 기술의 발전 경로.

그림 2는 1차 산업혁명 전후 생산형태의 변화를 나타낸 사진이다. 왼쪽 사진은 1차 산업혁명 전 베를 짜는 가내수공업의 모습을 보여주며 오른쪽은 증기기관이 만들어낸 동력을 이용하여 여러 대의 방직기를 가동하는 1차 산업혁명 후의 공장 모습이다. 증기기관이 산업에 본격 활용되기 직전에도 수차의 동력(power loom)을 이용하여 오른쪽 그림과 비슷한 형태의 공장 모습을 갖추고 있었기 때문에 수차를 증기기관으로 대체하여 1차 산업혁명이 빠르게 확산될 수 있었다. 계절에 따른 수량 변화와 지형 조건에도 영향을 받지 않게 되어 인구가 많은 도시 인근에 생산시설이 들어설 수 있게 되었다.

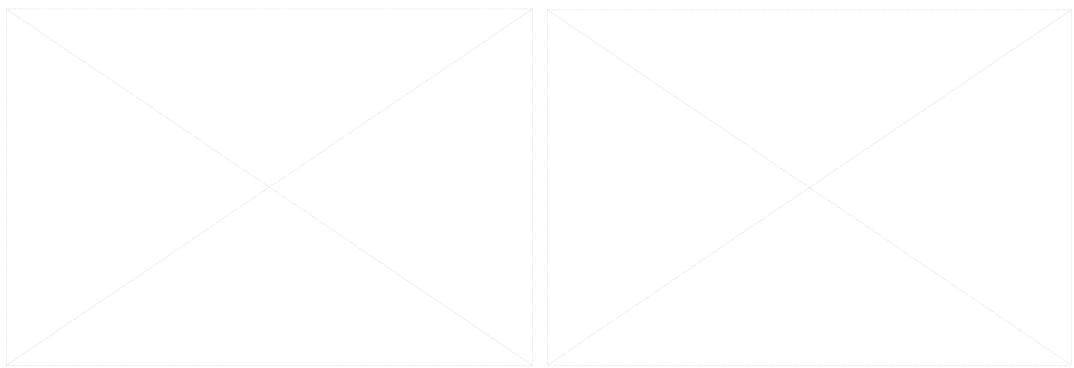


그림 2. 1차 산업혁명 전후의 변화: 가내수공업(전, 왼쪽), 방직공장(후, 오른쪽)

② 2차 산업혁명

전기혁명으로 평가하는 2차 산업혁명은 대략 1870년에 시작된 것으로 보고 있다 (그림 3). 전기에 관련된 기술은 개발역사가 길지만 1830년경부터 빠르게 발전하기 시작하였다. 1855년 직류 전기가 실용화된 이후 1870년 전후의 시기에는 이미 전기를 가로등 조명에 사용하기 시작하였으며 직류 발전기와 모터가 개발되었다. 수명이 긴 백열전구의 발명(에디슨, 1879년) 이후 전기 수요가 폭발적으로 증가하였으며 상업 발전소의 수가 급격히 증가하였다. 장거리 송전기술의 발전 또한 전기 수요가 급증하는 원인이 되었다. 전기를 안전하게 효과적으로 사용할 수 있게 하는 변압기, 모터, 퓨즈, 오실로스코프, 정류기(다이오드), 발진기 등의 기술도 동반 발전하여 전기의 보급에 기여하였다.

2차 산업혁명 중 대표산업으로 성장한 산업은 분업화를 채용한 대량생산 체제의 산물인 자동차 산업이다. 자동차 산업은 1876년 내연기관이 발명(Nikolaus Otto)된 이후 1908년 포드 자동차의 T 모델까지 빠르게 발전하였다. 자동차 기술의 발전

역시 내연기관(엔진) 기술과 함께 연료 기술(석유(정제)산업), 고무타이어(화학산업)의 바탕이 된 가황고무 기술 등 관련 기술의 발전이 큰 봇을 하였다.



그림 3. 2차 산업혁명 기간 중 주요 기술의 발전 경로.

그림 4는 1차 산업혁명(왼쪽)과 2차 산업혁명(오른쪽)의 차이를 보여주는 사진이다. 1차 산업혁명에서는 동력실(power loom)에서 증기기관이 발생시킨 동력을 축으로 전달하고 벨트를 써서 각 기계로 분배하여 생산기계를 가동하였다. 반면에 전기를 사용하게 된 2차 산업혁명에서는 각각의 기계 혹은 생산라인의 각 부분에 설치된 전기 모터를 이용하여 생산시설을 가동하였다. 오른쪽 사진은 포드 자동차의 벨트컨베이어 방식 조립라인에서 자동차가 제작되고 있는 모습을 보여주는 사진이다.

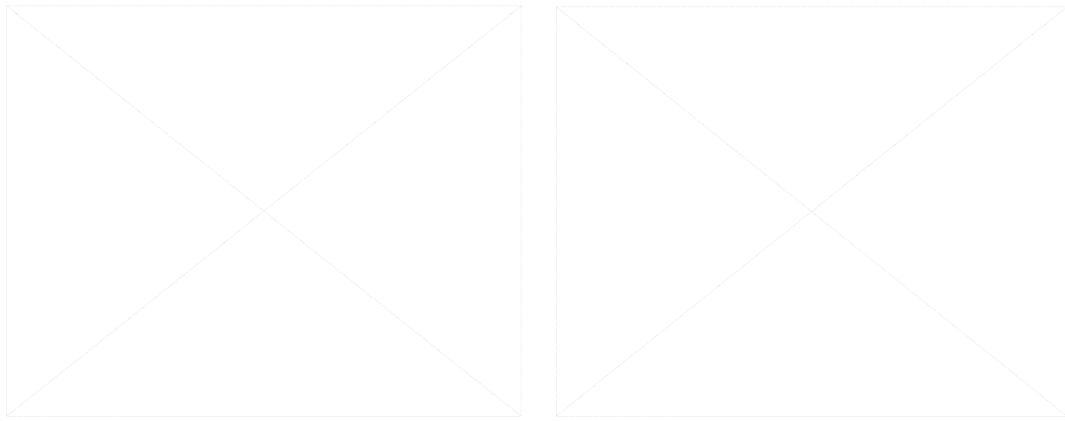


그림 4. 1차(왼쪽) 및 2차(오른쪽) 산업혁명에서의 전형적인 생산공장 모습.

그림 5는 포드자동차가 벨트컨베이어 방식을 도입함으로써 값싼 자동차를 대량으로 공급함에 따라 짧은 기간 동안에 달라진 거리의 모습을 보여주는 사진이다. 뉴욕 5번가의 부활절 행진 모습을 보여주는 사진이다. 왼쪽 사진은 1900년, 오른쪽 사진은 1913년 부활절 때의 모습이다. 포드자동차가 벨트컨베이어 방식으로 T 모델 자동차를 대량 생산하기 시작한 것은 1908년의 일이다. 새로운 생산방식의 도입으로 마차 중심의 거리 모습이 자동차가 거리를 꽉 메운 모습으로 바뀌었다.

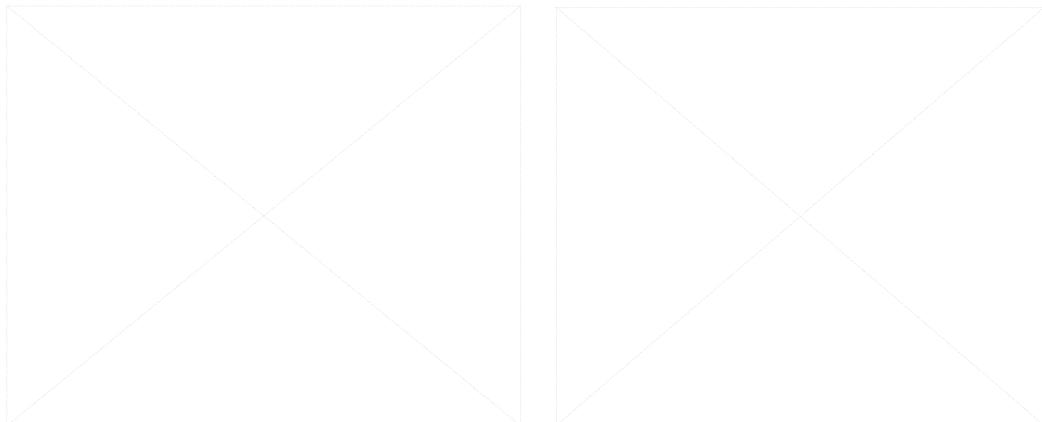


그림 5. 뉴욕 5번가의 부활절 행진 모습: 왼쪽 1900년, 오른쪽 1913년.

③ 3차 산업혁명

디지털 혁명으로 부르는 3차 산업혁명의 꽃은 반도체 기술이다. 트랜지스터의 발명(1947년) 이전에 이미 2극, 3극 진공관이 발명되어 전기의 정류, 증폭, 변조가

가능하였으며 라디오 방송은 물론 텔레비전 방송까지 이뤄지고 있었다. 심지어는 전공관을 사용하여 크기가 대단히 큰 컴퓨터까지 개발되어 사용되고 있었다.

반도체 기술이 급속히 발전하면서 전화(통신), 방송, 컴퓨터 분야들의 발전 역시 더욱 가속되게 되었다. 1969년 인터넷의 전신인 알파넷(ARPANET)이 개발되어 정보 네트워크의 시대가 열렸다. 1985년 네트워크를 기반으로 하는 닷컴(Dot com)의 붐을 시작으로 www(1993), 넷스케이프와 야후(1994), 구글(1998), 페이스북과 유튜브(2005), 트위트(2006) 등 포털들이 탄생하여 정보 검색, 정보 전달이 매우 용이하게 되었다. 그림 6의 기술들을 묶어서 정보통신기술(information communication technology, ICT)이라고 하며 모든 부분에 나타난 이러한 변화를 통틀어 정보통신 혁명이라고도 한다.



그림 6. 3차 산업혁명 기간 중 주요 기술의 발전 경로.

이러한 정보통신 혁명 혹은 디지털 혁명의 이면에는 반도체 기술, 컴퓨터 기술(하드웨어 및 소프트웨어)과 함께 고속의 정보 네트워크로 묶을 수 있게 한 광통신

기술이 자리하고 있다. 1880년대 유리섬유로 시작된 광전달 소재 기술은 전자기파에 대한 이해, 레이저 기술 등 물리학에 바탕을 둔 기술과 융합되어 대용량 정보를 고속으로 전달할 수 있도록 하는 광케이블 기술로 발전하였다(그림 7). 코닝(Corning)이 상업용 광섬유를 개발한 1975년은 네트워크 혁명이 시작된 시점에 해당한다. 1996년 광케이블이 태평양을 가로질러 깔리고 1997년 세계 전체를 광케이블로 연결하게 됨으로써 광케이블 기술은 명실 공히 ICT 혁명을 떠받치는 강력한 플랫폼이 되었다. 만약 광케이블 기술이 개발되지 않았고 구리 전선을 이용하여 ICT를 발전시켜야 했다면 아마도 지금의 수준에는 크게 미치지 못하였을 가능성이 크다.



그림 7. 광섬유 및 광통신 기술의 발전 경로.

디지털 혁명이라고 부르는 3차 산업혁명은 생산 측면에서는 자동화 혁명이라고 할 수 있다. 즉 생산자동화, 자동화된 생산이 3차 산업혁명의 중심이이며 자동화의 이면에 생산로봇이나 생산라인을 전자적으로 제어할 수 있게 한 반도체 혁명이 자리하고 있다. 그림 8은 작업자의 노동력에 의존하는 조립라인의 모습(왼쪽; 2차 산

업혁명)과 작업용 로봇이 사람을 대신하여 일을 하는 자동화된 조립라인의 모습(오른쪽; 3차 산업혁명)을 보여주는 사진이다. 생산라인의 자동화로 제품의 품질이 일정한 수준으로 유지되고 생산성이 급격히 높아지게 되었다.

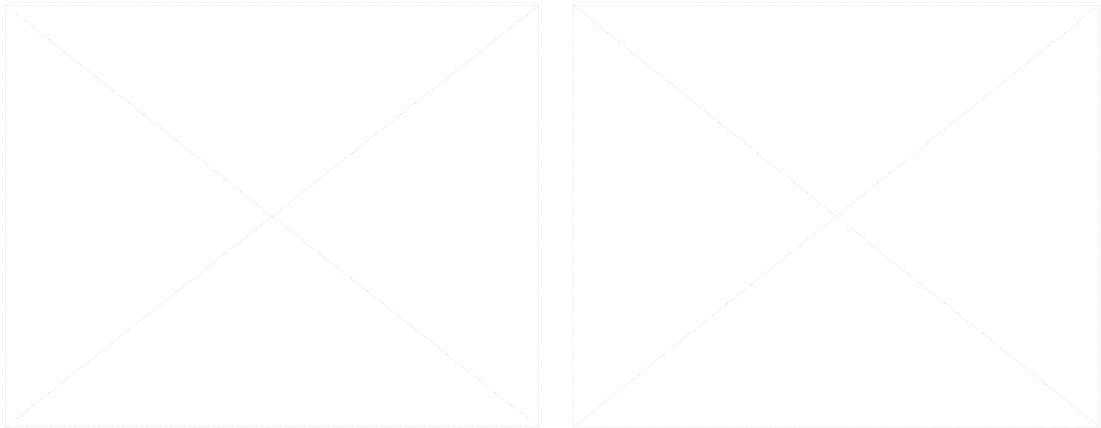


그림 8. 작업자에 의한 수동 조립라인(왼쪽)과 자동화된 조립라인(오른쪽).

« 산업혁명별 핵심기술 분석으로부터 얻을 수 있는 시사점 »

- 산업혁명을 주도하는 핵심기술(key technology)은 완성된 상태로 출발하는 것이 아니라 스스로 진화하는 종합목적기술(general purpose technology, GPT)의 성격을 갖고 있다.
- 산업혁명의 핵심기술은 단기간에 완성되어 산업혁명을 촉발시키는 것이 아니라 오랜 기간 완성과정을 거쳐 사회경제적 혹은 산업적인 종합적인 요구(수요)를 해결할 수 있는 수준에 도달하였을 때 산업혁명을 촉발시킨다.
- 산업혁명은 하나의 선도기술만으로 완성되지 않는다. 개별적으로 진화하는 독립적인 선도기술들이 상호 상승작용(융합)을 통하여 산업을 가속적으로 변화시킨다. 선도기술이 사회경제적 혹은 산업적 요구를 충족할 수 있는 시점에 이르렀을 때 다른 선도기술(들) 역시 핵심기술과의 상호작용으로 시너지를 낼 수 있을 만큼의 상당한 수준으로 성숙되어 있어야 한다.
- 1차 → 3차 산업혁명으로 이어지는 동안 산업혁명을 구동하는 선도기술의 수가 많아지고 선도기술간 상호작용이 복잡해진다.
- 같은 맥락으로 4차 산업혁명을 이끌어갈 선도기술들의 발달 수준, 상호연계 가능성 등을 검토하면 4차 산업혁명을 전망하는데 도움이 될 것이다.

(3) 선도기술간의 상호작용

1차~3차 산업혁명이 진행되는 동안 그 이전부터 발전해오던 기술들이 서로 융합되어 새로운 큰 기술을 형성해감을 살펴보았다. 바꾸어 말하면 각 산업혁명을 대표하는 기술은 스스로 발전해가지만 어느 시점(수준)까지 무관하게 발전해오던 다른 기술과 융합됨으로써 산업적 실용성을 확보하고 진화를 가속하게 된다. 그림 1에서 보듯이 증기기관 기술의 성숙에 때맞추어 질 좋은 철이 대량으로 생산될 수 없었다면 증기기관은 널리 보급될 수 없었을 것이며 1차 산업혁명은 나타나지 않았거나 훨씬 뒤에 나타났을 것이다. 석탄을 코커스로 만드는 기술이 없었다면 유럽의 삼림이 완전히 훼손되게 되었을 것이며 그 이후에는 철을 생산하기 어려워졌을 것이며 값이 매우 비싸게 되었을 것이다.

2차, 3차 산업혁명으로 이어감에 따라 줄기를 형성하는 기술이 다양해지고 기술간 융합도 복잡해지는 경향이 있다. 축적을 필요로 하는 기술 발전의 속성이 반영된 결과로 볼 수 있다. 철도 기술과 같이 새로운 필요에 의해 개발²⁾되어 발전한 기술도 많지만 각 산업혁명을 주도하는 기술들은 대부분 해당 산업혁명이 태동하기 훨씬 이전부터 서서히 발전해온 것들이었다. 장기간에 걸친 과학적 발전과정이 필요했고 공학적인(기술적인) 여건이 성숙되어 있어야 했다는 것을 알 수 있다. 실제로 전기 혁명으로 일컫는 2차 산업혁명은 ‘전기(전자기)’ 현상을 이해하고 관련 기기들을 개발하는데 소요된 거의 2 세기 동안의 노력(수많은 기초연구)의 결과물로 나타난 것이다. 기초연구가 당대에 인정을 받기 어려운 이유이기도 하다. 전기혁명 내지 이후의 통신혁명에 이르기까지 바탕이 되었던 ‘전자기 이론’과 관련이 있는 일화가 있다³⁾.

1850년 전기와 자기에 대한 많은 기초연구가 이뤄지고 있던 시기의 일이다.⁴⁾ 영국에서 마이클 패러데이(Michael Faraday)는 전자기에 관한 연구를 하는 거

2) 철도 기술은 수요가 급격히 늘어난 석탄을 광산으로부터 공장지대까지 대량으로 수송할 필요에 의해 발전하였으며 철도 기술의 발달은 생산품(섬유제품)을 다른 지역으로 수송하는 수단으로 영역을 활용 확대하였음.

3) Burton Richter: The Role of Science in Our Society, SLAC-PUB-9284 (June 2002).

인 중의 한 사람이었으며 전기와 자리를 연결하는 수많은 기초적인 발견을 하였다. 당시의 재무상이던 글래드스톤(Gladstone)(후에 수상이 됨)이 그의 연구실을 방문하였다. 패러데이의 연구내용과 정돈되지 않은 연구실을 들러본 후 글래드스톤이 “모두가 매우 흥미롭기는 하지만 무엇이 좋다는 것입니까?”라고 패러데이에게 물었다. 패러데이는 “장관님, 저도 모릅니다만 언젠가 장관님이 세금을 부과하게 될 겁니다.”라고 대답했다.

4차 산업혁명을 어떤 기술들이 주도할 것인지를 알기 위해서는 후보기술들이 발전해온 과정과 선도기술간 융합으로 어떤 결과들이 창출될 수 있는가에 주목할 필요가 있다. 후보기술의 발전 가능성과 다른 기술(이것 역시 후보기술일 수 있음)과의 융합 결과를 살펴보는 것이 필요하다. 특히 1~3차 산업혁명을 주도하였던 기술들에서 살펴보았듯이 4차 산업혁명은 3차 산업혁명보다도 더 많은 수의 기술들이 선도해갈 것이다. 이미 태동하고 있는 기술들이 현실로 나타나겠지만 기술간 융합을 거쳐 탄생하는 기술들이 새로운 선도기술로 자리 잡게 될 것이다. (기술의 진화와 기술간 융합이 상당한 기간 동안에 나타날 것에 주목하여야 하고 적절한 기술개발 정책으로 뒷받침하여야 한다.)

(4) 계층적 접근의 필요성

산업혁명이 기술혁명과 구별되는 것은 그 범위가 기술 영역, 좁은 의미의 산업 영역에만 국한되지 않기 때문이다. 산업혁명은 기술혁명을 바탕으로 하여 새로운 생산혁명(생산성의 급격한 변화)으로부터 시작된다. 하지만 이전의 세 차례 산업혁명에서 보았듯이 기술혁명의 시작 자체도 당시의 기술, 경제, 사회 환경과 무관하지 않다. 새로운 기술의 산업화 운명을 결정하는 가격 혹은 비용을 결정하는 요소들과 관련이 있는 주변 환경이 중요하게 작용한다. 산업혁명이 시작되는 시점에서도 주변 환경은 중요하지만 산업혁명이 진행되는 동안 주변 환경 역시 동시에 변해가기 때문에 주변 환경의 변화(산업혁명의 파급효과)를 단계별(시기별), 영역별(범위별)로 고려해볼 필요가 있다. 이미 역사가 되어버린 지난 산업혁명의 과정은 분석하는 것 혹은 분석한 결과로 다음 산업혁명을 예측하는 것에 활용하는 것에 의미를 둘

4) 1850년은 2차 산업혁명이 태동하기 임박한 시기였음에 주목할 필요가 있음. (큰 성과로 이어질 수 있는 유망한 과학 업적도 실제로 현실이 되기 전까지는 인정받기 어려움.)

수 있을 것이다. (이전의 산업혁명들이 미리 예측하고 경험한 것들이 아니었으므로 이전의 학습효과가 다음 산업혁명을 예측하는 것에 도움이 될지는 알 수 없다. 5))

수많은 불확실한 것들 가운데서도 한 가지 확실한 것은 다음 산업혁명은 이전의 어떤 산업혁명보다도 빠르게 진행될 것이며 파급효과도 더욱 클 것이라는 점이다. 비록 예측이 크게 빗나가게 되더라도 기술(산업)의 발전과 이와 연관된 사회경제적 변화(파급효과)를 예측해둔다면 미리 대비하는 전략을 세울 수 있고 예측이 빗나갔을 때 효과적으로 대응할 수 있다. 다만 4차 산업혁명의 결과로 고용이 대폭 줄어들 것이라는 전망(우려)과 같이 4차 산업혁명이 전개과정을 고려하지 않은 예측은 대응 전략을 세우는 것을 어렵게 한다. 따라서 경험해보지 않은 4차 산업혁명을 정확히 알 수는 없지만 기술, 산업, 경제, 사회 부문에서 나타날 변화를 영역별로 검토해 보면 4차 산업혁명의 모습을 조금 더 구체적으로 이해하고 대비하는데 도움이 될 것이다.

1차 산업혁명에서 경험하였던 러다이트 운동(Luddite movement)⁶⁾, 아동 노동 및 노동 착취 문제, 교육제도 개선 등의 사례처럼, 4차 산업혁명으로 일자리를 잃게 될지 모른다는 우려와 같이 생산혁명으로부터 시작된 산업혁명은 사회 전반은 물론 국제 질서에 이르기까지 영향을 미치게 될 것이다.

5) Richard G. Lipsey (2007): 이전 GPT에 의해서 만들어진 가격 변화의 결과로부터 새로운 GPT에 대한 대응을 모델화할 수 없음. (GPT(general purpose technology): 기술혁명(혹은 산업혁명)을 선도하는 증기기관, 전기, 반도체 등과 같은 기술을 말함.)

6) 1811~1816년 사이 영국 노팅엄에서 일어난 기계 파괴 운동(기계가 자신들의 일자리를 빼앗아간다고 노동자들이 일으킨 기계 파괴 운동).

3. 4차 산업혁명 배경으로서의 제조업 (현황 및 이슈)

(1) 제조업 혁신에 주목하여야 하는 이유

① 제조업이 중요한 이유

산업혁명은 앞서 언급했듯이 산업혁명의 최종 모습이 어떻던 예외 없이 ‘생산혁명’으로부터 비롯된다. 무엇 때문에 생산혁명, 제조혁신으로부터 출발하는 ‘산업혁명’을 말하는 것일까? 여러 가지 다른 견해들이 있을 수 있고 같은 견해라고 하더라도 설명이 각기 다를 수 있다. 한 사람의 경영학자의 고백과 더 늦기 전에 제조업을 미국의 제조업을 살려야 하는 이유를 제시하는 루즈벨트 연구소의 견해로 제조업의 중요성을 장황하게 설명하는 것을 대신할 수 있을 것이다.

서비스업과 금융업이 다음 세대의 먹거리라고 주장했던 수년전 시대의 흐름을 똑똑히 기억한다. 너도 나도 경영학을 배우고, 마케팅과 전략, 재무 과목들이 인기 있었으며, 그걸 배우면 기업을 경영할 수 있고, 세상을 흔들고 바꿀 광고를 만들고 브랜드를 탄생시킬 수 있고, 금융업을 통해 기존의 제조업과 서비스업 중심의 부가가치 생산효율을 획기적으로 향상시킴으로써, 적어도 나의 자식 세대까지 책임질 부를 획득할 것이라고 대부분이 그렇게 생각했던 것 같다.

근데 그동안의 보고 듣고 익힌 많은 지식과 경험들을 가지고 생각을 곱씹어 보면 볼수록, 과거에도 지금도 많은 사람들의 변함없는 지지와 충성도를 보장하고 있는 서비스나 브랜드들의 대부분은 세상에 없던 기가 막힌 새로운 제품이거나 그동안의 가려웠던 부분을 완벽히 긋어주는 보완적인 제품, 즉, 제조업으로부터 출발하고 있다는 확신이 든다. 당장에 지금 내 주위를 둘러싸고 많은 브랜드들만 보더라도 이러한 사실은 금방 눈치 챌 수 있을 것이며, 미래 성장잠재력이 크다고 국가가 장려하고 재벌들이 앞장서 투자하고 있는 많은 사업들 역시 제조업의 영역에 속한다.

경영학 전공자로서 참 아픈 깨달음이다. 영업이든 기획이든 연구든 소셜이든, 세상을 바꾸거나 사람들을 열광하게 만들 무언가는 반드시 제조업의 관점에서 시작되고 접근해야 한다는 점을 또렷하게 새기고 싶다.

[장하준: ‘나쁜 사마리아인들’ 중에서]

[제조업이 경제의 중심이 되어야 하는 여섯 가지 이유] (* 직역하지 않았음)

1. 제조업은 그동안 개발(발전)에 이르는 길이 되어왔다. 지난 수백 년간 부강한 나라를 만드는 전략적인 방법은 고급 제조업을 일으키는 것이었다. 19세기 영국으로부터 미국, 독일, 일본, 20세기의 소비에트연합, 최근의 한국, 타이완, 중국의 번영의 열쇠는 제조업이었다.
2. 제조업은 “Great Power(강대국)”의 기반이다. 강대국들은 제조기술의 세계적 생산을 통제하는 국가들이었다. 단순히 공장을 짓고 더 많은 상품을 제조하는 것이 아니라 상품을 만드는 생산기계(machinery)를 어떻게 만드는지를 아는 것을 말한다. 강대국의 핵심은 생산수단을 만드는 것(to make the “means of production”)이다. 강대국들은 세계 공장기기 생산의 약 80%를 차지하고 있다.
3. 제조업은 경제 성장의 가장 중요한 원천이다. 생산기기 제조의 성장과 생산 기기의 기술 향상이 경제발전의 중심이다. 기계 산업이 없으면 지속가능한 장기적인 성장은 없다. 생산기기가 있어야 아이폰, 반도체 같은 제품을 만들고 이들이 더 좋은 생산기기를 만드는 것으로 이어지고 새로운 생간기기는 다음 제품을 만드는 것으로 연결된다.
4. 세계 무역은 서비스가 아니라 제품을 기반으로 하고 있다. 어떤 나라든 서비스를 그 나라 상품의 대부분으로 교역할 수는 없다. WTO에 따르면 세계 무역의 80%는 공산품이며 나머지 20%만이 서비스이다. 서비스업을 대부분으로 하는 국가의 화폐는 가치가 거의 없다.
5. 서비스는 공업제품에 의존한다. 서비스는 대부분 공업제품을 사용하는 활동이다. 2010년 부가가치 기준으로 전체 경제에서 도소매업은 11%, 부동산을 포함한 자산 부문은 13%, 의료보건은 8% 정도를 차지한다. 금융조차도 제조업을 중심으로 하는 사이클의 일부이다. 경제의 건강은 제조업 부문의 건강에 결정적으로 달려 있다.
6. 제조업은 고용을 창출한다. 대부분의 직업은 제조업과 직간접으로 연결되어 있다. 제조업에서 하나의 일자리는 다른 부분에서 세 개의 일자리를 창출한다. 2005년 OECD 자료에 의하면 제조업 비중이 일본, 독일은 각각 20.2%, 23.2%인데 비해 미국은 13.4%였다. 미국이 일본이나 독일과 같은 수준이었다면 7백만 내지 1천만 개의 직업을 더 만들었을 것이다.

* *Six Reasons Manufacturing is central to the Economy,*
Roosevelt Institute (2011. 5. 23.)

② 제조업 현황

가. 세계

1700년 이후 2010년까지 1인당 GDP는 지속적으로 성장해왔다. 산업혁명을 주도한 영국과 미국은 물론 대부분의 나라들에서 산업혁명과 관계없이 GDP가 높아져왔다(산업혁명으로 GDP의 급격한 증가는 없었음)(그림 9). 선진국들에서 점차 가속화된 GDP 증가가 2000년 이후 증가세가 점차 둔화되는 경향을 보이고 있다. 선진 산업국들에서 지금까지의 성장 패러다임이 GDP 성장을 이어가는데 한계를 드러내고 있는 것으로 보인다.



그림 9. 1700~2010년 기간 중 각국의 1인당 GDP 변화 추이.

1970년대 이후 거의 모든 선진국들에서 전체 산업에서 제조업이 차지하는 비중이 지속적으로 줄어들어 왔다(그림 10)⁷⁾. 1970년대에는 독일과 일본이 30% 이상의 비중을 유지하였으나 1990년 이후 2007년까지 30%를 넘는 국가는 중국 이외에는 하나도 없다. 제조업 비중이 20% 미만인 국가들이 늘어나고 있다. 전체 고용 중 제조업 부문 고용이 차지하는 비중도 거의 같은 패턴으로 감소하여 왔다(그림

7) Douglas S. Thomas: The current state and trends of the U.S. manufacturing industry, NIST Special Publication 1142 (December 2012).

11). 1990년대 중반 이후 대부분의 국가들이 20% 미만의 고용을 제조업에서 얻고 있다. 그림 11에서 제조업 고용 비중은 2004~5년까지 급격하게 줄어들다가 그 이후 줄어드는 속도가 현저히 둔화되었음을 보여준다. 2015년 각 국가의 GDP에서 제조업이 차지하는 비중을 보면 그림 12와 같다.⁸⁾ 우리나라(29%), 중국(27%), 독일(23%), 인도네시아(22%) 등 네 개의 국가만이 20%를 상회하고 있으며 나머지 국가들은 10~20% 범위에 들어있다.

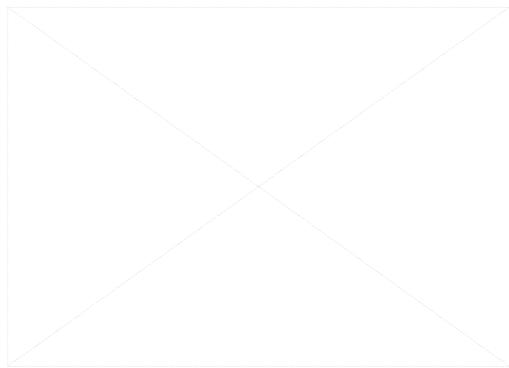


그림 10. GDP 중 제조업 생산 비중.



그림 11. 전체 고용 중 제조업 고용 비중.



그림 12. 전체 GDP에서 제조업이 차지하는 비중 (2015년).

8) Marc Levinson: U.S. Manufacturing in International Perspective, Congressional Research Service 7-5700 R42135 (January 18, 2017).

나. 미국

세계 경제를 주도하고 있는 미국의 제조업 현황을 고용(직업의 수)과 생산가치의 측면에서 보면 그림 13과 같다. 1972~2010년 기간 동안 제조업이 생산하는 가치는 거의 선형적으로 빠르게 성장하여 왔다. 다만 2008년 세계 경제 위기 때 크게 감소한 후 빠른 회복세를 보이고 있다. 반면에 제조업 고용은 2000년까지 느린 속도로 감소되어 오다가 2000년 이후 급격한 감소를 보이고 있다. 2008년 세계 경제 위기 이후 가속되었던 고용 감소가 회복되지 않고 있다.



그림 13. 미국 제조업의 고용 및 생산가치 변화 추이.

1980년대 이후 미국의 고용변화(그림 14)를 보면 2000년대 들어 대단히 심각한 상황에 빠져 있음을 알 수 있다. 1990년대까지는 제조업 고용이 한 자리 수준으로 줄어들고 있었으나 전체 고용은 20% 수준으로 늘고 있었다. 하지만 2000년대 들어 전체 고용 증가가 거의 '0'에 접근하였으며 제조업 고용은 -30% 이하로 떨어졌다. 전문가들은 이러한 고용 사정의 악화를 대공황(Great Depression) 때보다도 더 나쁜 상황으로 분석하고 있다. 이렇게 고용 사정이 악화된 것은 제조업 부문에서 하나의 일자리가 사라질 때 다른 부문에서 약 1.9 개의 일자리가 동시에 없어졌기 때문이다. (제조업에서 하나의 일자리가 만들어질 때 다른 부문에서 3 개의 일자리가 만들어지는 것만큼이나 고용이 감소할 때 역시 큰 파급효과를 나타낸다.)



그림 14. 미국의 전체 및 제조업 부문에서의 고용률 변화.

그림 14에서의 고용률 변화를 제조업 생산성 변화와 비교하면 그림 15처럼 나타난다. 1990년대에서 2000년대 사이에 고용률은 -2.4%에서 -33.2%로 감소하는 동안에도 제조업의 생산성은 53.0%에서 65.6%로 높아졌다. 그림 15에서 알 수 있는 것처럼 같은 기간 동안 절대 생산가치가 늘어났고 생산성 또한 높아졌음에도 제조업 고용은 크게 감소하였다. 제조업에서의 생산성 향상이 고용 창출로 연결되지 않음을 알 수 있다.



그림 15. 1990년대~2000년대 미국 제조업의 고용 및 생산성 변화.

다. 우리나라

우리나라의 사정도 미국의 경우와 크게 다르지 않다. 1970년 이후 전체 산업에서 제조업이 차지하는 부가가치 비중은 지속적으로 증가하여 2010년 32%를 차지하고 있다. 반면에 제조업의 고용 비중은 1990년까지 빠르게 증가하여 약 28%에 이른 다음 지속적으로 감소하여 거의 1970년 수준으로 떨어지고 있다(그림 16).



그림 16. 우리나라의 1970년 이후 전체 산업에서 차지하는 제조업의 부가가치 및 고용의 비중 (부가가치는 2005년 가격 기준).

제조업 부문의 부가가치 비중은 지속적으로 높아지고 있지만 그 증가율을 보면 1970년대 정점을 찍은 이후 연속으로 감소하여 현재 약 5% 수준을 보이고 있다 (그림 17). 제조업 고용 비중이 줄고 있고 부가가치 증가율 또한 감소하고 있는 현재 우리의 상황 역시 미국처럼 좋지 않은 방향으로 가고 있는 것으로 보인다. (미국은 제조업의 생산성이 계속 높아지고 있는 점에서 우리보다 형편이 나을 수 있다.)



그림 17. 1960년대 이후 우리나라 제조업의 비중 및 부가가치 증가율 변화.

③ 제조업과 경기 변화

2008~2009년 세계 경제 위기 이후 선진국들의 경제 사정은 거의 비슷하다고 볼 수 있다. 선진 경제의 경우 2008년 경제 위기 이후 매출 증가율이 둔화되고 있으며 운영 수익률이 줄어들고 있다. 프라운호퍼 연구소는 독일통계국 자료(2013년)를 이용하여 제조업의 비중이 경기 변동에 미치는 영향을 분석하였다(그림 18). 제조업 비중이 높은 독일이나 제조업 비중이 낮은 프랑스가 모두 2008년 이후 경기 침체로 성장률(전년도 대비 성장률)이 급격히 떨어졌다. 제조업 비중이 큰 독일의 성장률 침체가 프랑스보다 커다. 경기 침체 후 회복되는 과정에서 독일은 침체 이전 수준으로 빠르게 회복한 반면 프랑스는 침체 이전 수준으로 회복하지 못하였다. 이러한 결과는 앞에서 두 가지 사례를 들어 설명을 대신한 바 있는 경제에 있어서 제조업이 갖는 중요성과 상통하는 것으로 볼 수 있다.



그림 18. 세계 경제 위기 전후의 경제 성장 패턴 비교 (독일, 프랑스).

(2) 제조업 부문의 동향

고도로 발달한 자동화(정밀제어) 기술, 공정 설계 기술, 컴퓨터 설계 기술, 정밀 가공(정밀공정) 기술, 첨단소재 기술 등의 융복합으로 첨단 제조업은 “한계비용 ‘0’”을 논하는 수준으로 성숙하였다. 특히 선진산업국들에서는 지금까지의 높은 생산성 증가를 더 이상 기대할 수 없는 수준에 이르렀다. 물론 지금도 계속해서 새로운 방식이 개발되고 있고 정체되고 있는 생산성을 높이기 위한 시도들이 이어지고 있다. 새로운 생산혁명인 4차 산업혁명의 배경을 이해하기 위해서는 첨단 제조업의 동향을 짚어볼 필요가 있다.

① 빨라지고 있는 제품 수명 주기

제조업이 첨단화되면서 자동화 기반의 대량생산 제품의 보급 속도가 급격히 빨라지고 있다. 그림 19는 새로운 가정용 전자제품이 1천만 대 보급될 때까지 소요된 기간을 보여준다.⁹⁾ 1876년 개발된 전화는 40년이 걸렸으며 케이블 TV(1954년)

9) ENABLING THE NEXT PRODUCTION REVOLUTION: ISSUES PAPER Background document prepared for the Danish Production Council conference “Shaping the Strategy for Tomorrow’s production, DSTI/IND(2015)2, OECD. 09-Mar-2015.

30년, 팩스(1964년) 25년, 이동전화(1979년) 15년, 개인용 컴퓨터(1981년) 10년, 인터넷(1981년) 5년으로 보급 속도가 급격히 빨라졌다. 이미 보편화되어 세상을 바꾸고 있는 스마트폰은 2007년 6월말 출시된 그 해 말까지 6개월 동안 830만 대 이상에 도달하는 수준으로 빨라졌다. 이러한 결과는 제조업이 빠르게 첨단화된 결과이기도 하지만 신제품의 수명 주기가 빨라진 만큼 계속해서 새로운 제품을 개발해야 하는 숙제를 안겨주는 것이기도 하다.



그림 19. 새로운 가정용 전자제품이 1천만 대 보급될 때까지의 소요기간.

같은 제품군 내에서도 기능이나 디자인이 끊임없이 변하기 때문(고객의 요구가 변하거나 경쟁에서 우위를 점하기 위함)에 제조업은 신모델을 개발하는 기간을 단축하는 것은 물론 비용(신모델 실패에서 오는 시장 리스크를 포함한 비용)을 최소화해야 하는 압박을 받고 있다. 삼성전자가 2014년 한 해 동안에 제조한 스마트폰들(그림 20)을 보면 첨단 제조업이 얼마나 고도화되어 있는지와 첨단 제조업이 안고 있는 고민을 동시에 알 수 있다. 한 해 동안 50 가지 이상의 제품(모델)을 제조하였다. 모든 제품이 모두 많이 팔린 것은 아니고 일부 제품들이 성공을 거두었다. 생산기술의 관점에서 보면 이렇게 많은 제품을 상업 수준으로 양산할 수 있다는 점과 일부 제품의 성공으로도 이익을 남길 수 있다는 것이 놀라운 점이다. 즉, 생산기

술이 그만큼 고도화된 결과로 해석할 수 있다. (더욱 중요한 점은 경쟁사인 애플은 극소수의 제품만으로 더욱 큰 수익을 올렸다는 것이다.)



그림 20. 삼성전자의 스마트폰 관련 생산제품들 (2014년 생산).

② 가치사슬의 변화 (글로벌 가치사슬의 형성, 스마일 곡선의 형성)

제조업이 거의 대부분의 산업을 차지하였던 1차 산업혁명을 거쳐 20세기 전반 이후 제조업이 고도화되면서 제조업의 가치사슬을 구성하는 각 단계의 상대적인 부가 가치(value-added) 혹은 수익성(profitability)에 변화가 생기게 되었다. 특히 가치사슬이 한 기업, 한 지역(국가)에서 기업간 협업, 지역(국가)간 협업으로 확대되어 글로벌한 형태(global value chain, GVC)를 갖추게 되었다. 즉 전문제조 영역인 조립(생산시스템) 영역과 제조 이전에 해당하는 연구개발(R&D), 제품 설계(디자인), 소재 개발의 영역, 제조 이후에 해당하는 물류, 마케팅, 서비스(after-sale service) 영역이 분화되어 품질 향상과 생산비(원가) 절감이 가속화(생산성 향상의 가속)되었다. 단순조립 형태의 생산시스템은 고도화된 공정 자동화로 부가가치를 증대하거나 수익성 개선에 더 이상 큰 기여를 하지 못하고 오히려 R&D나 제품 디자인, 생산된 제품의 적기 공급이나 마케팅에서의 경쟁력이 부가가치나 수익성을 향상시키는데 더 큰 기여를 하게 되었다. 즉 기업이나 국가가 생산하는 전체 부가가치나 수익 중 단순제조 부문이 차지하는 비중이 상대적으로 줄게 되어 가치사슬의 형태가 제조 중심에서 제조 이전 영역과 제조 이후 영역이 높아지는 스마일 곡선(smile curve) 형태로 변하게 되었다(그림 21).¹⁰⁾ 가치사슬의 형태는 정보통신기술(ICT)

10) Gary Gereffi (Duke Univ.): Global Value Chains and Development – Concepts and

이 본격화되기 전인 1980년대 이후 스마일 곡선 형태로 변하기 시작하였으며 ICT 붐이 본격화된 이후에는 제조 영역의 기여가 더욱 줄어들게 되었다.



그림 21. 산업의 고도화에 따른 가치사슬 형태의 변화.

보잉 787을 구성하는 주요 부분들은 세계 도처에 있는 생산거점에서 제작되어 보잉사로 공급되어 조립된다(그림 22). 보잉사는 제품(보잉 787)과 이에 필요한 부품 혹은 모듈을 설계(디자인)하고 사양을 결정(R&D의 결과)한다. 전문 제조업체를 통해 생산(혹은 공동 개발)하여 공급받은 부품(혹은 모듈)을 조립하여 제품을 완성한다. 완성된 보잉 787은 보잉사의 제품으로 판매한다. (물론 제품 완성 이전에 이미 구매자를 확보하고 제작에 들어가는 마케팅이 진행된다.)

Methodologies, GVC Workshop on Technical Tools and Operations, Washinton, DC (June 17, 2016), World Bank Group, Trade & Competitiveness.



그림 22. 보잉사의 공급사슬 (보잉 787).

이러한 가치사슬 변화는 제조업의 혁신적인 발전(전문화)과 글로벌화의 결과로 나타난 자연스러운 귀결이라고 할 수 있다. 제조 부문의 전문화(플랫폼화)와 한계 비용의 최소화는 비록 수익 창출 면에서는 상대적으로 적은 기여를 하는 것처럼 보이지만 새로운 기업의 진입을 막는 진입 장벽의 역할을 한다. 경쟁의 폭이 점차 축소되면서 제조업 기반이 흔들리게 되며 기술 개발(생산기술 개발)이 둔화되고 독점의 가능성이 높아진다. 또한 GVC이 국가 이익(예를 들면 고용 창출, 기술 보호 등과 같은)과 상충할 때 고객(소비자)들은 상당한 피해를 입을 수도 있다. 최근의 제조업 회귀(re-shoring; 해외로 옮겼던 생산기지를 본국으로 옮기는 것)과 같은 것이 사례가 될 것이다. 노동 비용 절감을 위해서 해외로 기지를 옮긴 경우에는 제조업 회귀 이후 인건비 증가를 상쇄할 수 있는 기술 혁신이 있기까지는 원가 상승으로 인한 부담을 감수하여야 한다.

그림 21과 같은 가치사슬의 변화는 제조업 패러다임을 변화시키는 중요한 동인(drive)으로 작용하고 있다. 최근 스마일 곡선의 깊이를 줄이기 위한 방안들이 다양하게 연구되고 있다. 제품(혹은 중간제품)과 서비스를 결합하는 ‘servicification(서비스화)¹¹⁾’이 하나의 예이다(일반적인 가치사슬에서 서비스는 제품을 제조한 이후 설치, 유지, 보수 단계에서의 서비스 활동을 말하며 서비스화는 가치사슬 전반에 걸

쳐 서비스 활동이 개입되는 것을 말함). 특히 4차 산업혁명의 핵심인 맞춤 생산 혹은 고객중심 생산을 위해서는 서비스화 부문이 매우 중요하다.

③ 새로운 제조기술의 출현 (3D 프린팅, 나노기술, 자연모사기술 등)

제조업의 바탕이 되는 제조기술은 산업 혹은 고객의 니즈에 따라 기존 기술이 고도화되어 왔다. 새로운 제조공정 기술이 개발되어 기존 공정을 대체함으로써 생산성이 획기적으로 향상되고 생산비용을 크게 축소해왔다. 때로는 그 때까지 존재하지 않았던 제조공정 기술이 개발되어 새로운 수요를 창출해왔다.

현재의 대용량 초고속 반도체를 가능하게 한 초정밀 공정 기술도 새로운 수직 적층 방식을 도입하여 새로운 시대(3D V-NAND 메모리)에 접어들었다. 3차원 전자회로를 구성하는 장을 열었기 때문에 초정밀 공정 분야에서 디자인의 한계를 뛰어 넘은 것으로 볼 수 있다. 매크로 영역에서는 디자인의 한계에 부딪혀 정밀주조 (investment casting)를 이용하거나 수가공(手加工)의 방법을 이용하여 제조하던 복잡한 형상의 제품을 3차원 적층 방식으로 쌓아올려 제조하는 3D 프린팅 기술이 개발됨으로써 제한 없이 제조할 수 있게 되었다. 3D 프린팅 기술은 고객의 요구에 가장 효과적으로 대응할 수 있는 생산기법으로 제조 혁신의 전형적인 사례가 되었다.

새로운 제조공정은 신소재의 개발과 융합되어 더욱 가능성을 제시하고 있다. 나노(분말)소재와 잉크 기술, 고분자(플라스틱) 기술이 융합하여 자유롭게 훨 수 있는 유연한 전자제품들이 만들어지고 있으며 조만간 접하는 스마트폰이 출시될 전망이다. 투명하면서 전기를 잘 통하는 소재, 투명하지만 열은 차단하는 소재, 소리(혹은 공기)는 통과하지만 물은 통과하지 못하는 소재 등 열핏 보면 모순되어 보이는 성능을 가진 소재들이 등장하면서 기존 제품들의 혁신에 기여하고 있다. 이러한 새로운 재료는 새로운 제조공정의 개발의 결과로 나타나는 경우가 많으며 개발된 새로운 소재는 (기존 제조공정에 투입되기도 하지만) 다시 새로운 제조공정과 융합하여 혁신 제품으로 나타난다. 새로운 제조공정을 개발하는 것은 대부분 재료공정과 맞물려 있다. 예를 들어 20세기 후반의 가장 중요한 기술개발 성취인 반도체 제조 공정 역시 재료공정 개발의 과정이었다고 해도 무방할 만큼 소재공정 기술의 역할

11) Servicizing 혹은 manuservice의 표현을 사용하기도 함(Low, 2013); 서비스가 제품과 통합되거나 묶여서 상품 생산의 중간 투입 요소로 간접 거래되는 것을 말함(Pacific Economic Cooperation Council (PECC), 2011).

이 컸다(그림 23).¹²⁾



그림 23. 반도체 공정에서 사용되는 소재의 변화.

(3) 제조업 부문의 최근 이슈

2008년의 세계 금융 위기는 많은 선진국들이 제조업을 다시 생각하게 하는 계기가 되었다. 국가의 장기적인 부(부), 고용 창출, 수출과 투자로 이어지는 재원이 어디서 오는지에 대한 고민을 하게 하였다. 제조업을 경제의 실질적인 인프라로 보게 되었고 과학, 건설, 물류 등 다른 부문에 큰 파급효과를 내는 것에 주목하게 되었다. 세계 금융 위기 이후 세계 제조업 부문의 현재 이슈를 참고문헌¹³⁾에서 짚겨 살펴보자. (우리나라 제조업은 세계 10위권에 들어 있어서 우리도 예외는 아니다.)

① 서구의 많은 정책당국자들이 서비스, 특히 금융 서비스에 과도하게 의존하고 있

12) Advanced wafer processing with new materials, ASM International, Analyst and Investor Technology Seminar, Semicon West July 15, 2015.

13) The global manufacturing sector: current issues, CIMA(Chartered Institute of Management Accountants) sector report (August 2010).

는 경제의 균형을 재조정할 필요가 있다고 주장하고 있다. 제조업을 더욱 강하고 지속가능한 성장에 필요한 원천으로 보고 있다.

- ② 제조업 부문은 대출 부족, 현금 유동성, 공급 사슬의 지속가능성에 대한 두려움, 가격 하락 압력 등의 몇 가지 상당한 도전에 직면해 있다.
- ③ 세계 제조업의 중심이 서(양으)로부터 동(양)으로 옮아가고 있다. 제조업 부문이 인도와 중국에서는 빠르게 성장하고 있고 대부분의 선진국에서는 줄어들고 있다.
- ④ 서구의 기업들은 과거 수십 년에 걸쳐 점진적으로 규모를 줄여온 결과 제조업 생산성 향상으로 나타났다. 소규모 제조 기술(lean manufacturing techniques)을 거의 일반적인 것으로 받아들이고 있다.
- ⑤ 새로운 시장은 대량 생산과 가격 경쟁에 집중되어 있다. 글로벌 경쟁력 지수에서 상위 세 나라가 아시아 국가이며 G7 국가들은 지수가 떨어지고 있다.
- ⑥ 서구의 제조업 종사들은 가치사슬을 기술적으로 더욱 첨단화된 산업이나 제품에 집중하는 것으로 움직이고 있다. 고객 수요에 대응하는 경쟁, 혁신과 유연성을 통하여 저임금 국가(경제)와 경쟁하고 있다.
- ⑦ 혁신은 성장을 위한 주된 요인 중의 하나로 확인되고 있다.
- ⑧ 첨단 경제는 고객에게 ‘솔루션(solution)’을 제공하기 위하여 생산 구조와 시스템을 구축하고 제품과 서비스를 통합(묶음)하는데 집중하고 있다. 종종 순수 생산 요소만을 외부에 위탁하고 있다.
- ⑨ 원가 계산은 더 좋은 생산 결정을 지원하는 규칙으로 시작된다. 규칙은 서비스 산업과 비영리 기구를 지원하기 위하여 발전하여 왔지만 생산 기술과 실행에 있어서 새로운 개발에 보조를 맞추어 동시에 발전하여 왔다.
- ⑩ 경쟁은 제조업 가치사슬의 가장 상위에 있는 영역에서 심화될 것이며 관세, 보조금, 환율 조작과 같은 보호무역 정책으로 이어질 것이다. 그러나 이런 보호주의는 글로벌화된 제조업의 전체 동향(trend)을 심각하게 방해하지는 않을 것이다.

(4) 제조업 부문의 국가 정책

주요 선진국들 중 제조업의 경쟁력을 강화하기 위한 프로그램을 지원하고 있지 않고 있는 나라는 거의 없다. 미국을 포함한 몇 나라들의 관련 프로그램들을 간략

히 정리하였다.

주요 선진국들 중 제조업 경쟁력 강화에 가장 주력하고 있는 나라는 미국이다.¹⁴⁾ 미국은 2020년 다시 세계 1위의 제조업 강국으로 복귀하는 것을 목표로 일련의 국가 프로젝트(National Initiatives)를 이어가면서 체계적으로 제조업 부문의 경쟁력을 키워가고 있다. 미국이 추진하고 있는 대표적인 제조업 강화 프로그램은 표 3과 같다(상세한 내용은 참고문헌¹⁵⁾을 참조하기 바람).

표 4. 미국의 제조업 관련 주요 정부지원 프로그램

프로그램명	착수	주요내용 (정책 취지)
새로운 미국혁신전략 (New Strategy for American Innovation)	2015	9대 전략 기회 분야를 추진하고 있음 (첨단 제조업, 첨단 자동차 분야 포함) * 1차 미국혁신전략(2009년) 및 2차 미국혁신전략(2011년)의 연장
국가제조혁신네트워크 (NNMI)	2012	15개의 제조혁신센터(MII)를 신설하여 연결 (800여개의 산학기관 참여); 연구성과를 공유하여 국가 R&D 투자와 기술 사업화 사이의 간격(gap) 축소 * 3D 프린팅을 포함하는 부가제조(AM, additive manufacturing) 프로젝트 수행 * 현재(2016)까지 9개 센터 신설
첨단제조파트너십 (AMP)	2011	전국적인 제조업 혁신기구를 구성하고 첨단 제조업 연구 및 사업화를 위한 산학 협력 강화, 양질의 일자리 창출, 궁극적으로 제조업의 글로벌 경쟁력 강화 (세금 등 관련 정책을 종합적으로 적용)
MGI (Materials Genome Initiative)	2011	첨단 제조업 육성을 위한 핵심요소인 신재료 개발의 기간 및 비용을 획기적으로 줄이기 위한 연구개발 지원 (재료정보의 디지털화 및 공유, 계산재료과학 육성, 신소재 개발을 위한 첨단 데이터 통합 관리 등)
NNI (National Nanotechnology Initiative)	2000	나노기술이 국가 경쟁력을 제고할 요소로 인식하고 기초연구로부터 인프라 구축, 인력 양성 등 전방위적인 기술 개발 수행; 2010년부터 나노기술을 실제 산업화하기 위한 NSI(Nanotechnology Signature Initiative) 수행

14) Revitalizing American Manufacturing – The Obama Administration’s Progress in Establishing a Foundation for Manufacturing Leadership, National Economic Council, The White House (October 2016).

15) 전정하: 미국의 신산업 육성정책과 시사점, Weekly KDB Report (2016.10.4.).

미국이 추진하고 있는 정책에서 얻을 수 있는 시사점은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 기초적인 연구부문의 투자(예: NNI)로부터 점차 실제 산업(예: NSI)으로 연결해가며 산학 협력을 포함한 국가 전체 프로그램으로 진행한다. 제조업이 여러 기술 단계(가치사슬)에 걸쳐 있고 관련 영역이 매우 넓은 것을 반영한 것으로 보인다. 둘째, 제조업 관련 기술은 개발에 기간이 많이 소요되기 때문에 장기적으로 지원(종료 시점이 정해져 있지 않음)하며 관련 프로그램을 단계적으로 착수하고 이전 사업과 중첩되게 하여 기술개발 성과를 효율적으로 활용할 수 있게 하고 있다는 점이다.

독일은 제조업의 디지털화를 지향하는 ‘인더스트리 4.0(Industry 4.0)’을 2006년부터 추진하고 있는 ‘하이테크 전략 2020’의 10대 프로젝트 중의 하나로 포함시켜 추진하고 있다. 인더스트리 4.0은 민관 협동으로 진행되고 있으며 2011년 하이테크 전략 2020에 포함되었다. 일본은 과학기술 이노베이션 종합전략(2015년 계획)에 IoT, 빅데이터, 인공지능 로봇 등을 활용하여 새로운 제조 시스템을 구축하는 ‘혁신적인 생산기술 개발’을 포함시켜 추진하고 있다. 중국은 2015년 착수한 국가전략인 ‘중국제조2025’를 통하여 제조업 혁신을 추진하고 있다. 국가 제조업 혁신센터, 스마트 제조공정, 공업기반 강화 공정, 녹색 제조공정, 공급 장비 혁신 공정 등 제조업 혁신에 초점을 맞춘 5대 중점 프로젝트를 추진하고 있다.

우리나라는 2014년 정보기술(IT)과 소프트웨어(SW)를 결합해 신산업을 창출하고 기업이 제조혁신을 주도할 수 있게 하는 것을 전략으로 하는 ‘제조업 혁신 3.0’을 발표하였다. ‘제조업 혁신 3.0’은 융합형 신제조업 창출, 주력산업 핵심역량 강화, 제조혁신기반 고도화를 주요 내용으로 하고 있다. 스마트센서, CPS, 3D 프린팅, 에너지 절감, IoT, 빅데이터, 클라우드, 홀로그램 등 8대 스마트 제조기술 개발을 전략적으로 추진하고 있다(2015년 12월 각 분야의 로드맵 작성).

« 제조업 분야 현황 요약 »

- 자동화 기반의 고도화된 첨단 제조업을 통한 추가적인 생산성 향상 및 고용 창출은 어렵게 되었다.
- 제조업 중심(지역적 중심)의 이동으로 선진국들의 경쟁력 기반이 약화되었다.
- 제품 수명 주기의 극단적인 단축, 소비 패턴의 변화, 지구 온난화 등 글로벌 이슈의 영향으로 제조업 혁신의 필요성이 대두되었다.
- 2007~8년 세계 금융 위기 이후 제조업에 대한 선진국들의 시각이 달라졌으며 제조업 혁신을 위한 경쟁이 가열되고 있다.

4. 제조혁신(생산혁명)과 4차 산업혁명

(1) 미래 제조업의 모습 (4차 산업혁명의 배경)

세계 금융 위기 혹은 경제 위기를 겪으면서 선진국들을 중심으로 제조업 혁신에 대한 많은 논의가 있어 왔다. 고도화된 현재 생산시스템의 추가적인 발전으로 국가, 특히 선진산업국의 경쟁력을 유지 내지 강화하는 것이 용이하지 않으며 생산성을 향상시키고 고용을 창출하여야 하는 사회(혹은)의 요구, 변화하고 있는 제조업을 둘러싼 환경들에 대응하기 어렵다는 인식이 확산되고 있다. 기존 제조업의 바탕이었던 가격 중심의 비교우위에 초점을 맞춘 대량 생산, 자동화 생산, 글로벌 가치사슬 형성을 뛰어넘는 새로운 생산 방식을 모색해 왔다. 새로운 생산 방식은 기존의 제조업이 갖고 있는 장점은 물론 제조업을 둘러싸고 있는 변화들을 수용할 수 있는 혁신적인 생산 방식, 즉 새로운 ‘생산혁신(생산혁명)’이어야 한다. 또한 새로운 생산 혁신은 그것을 뒷받침할 수단(기술)들이 산업적으로 활용 가능한 수준으로 발달되어 있어야 가능하다. 따라서 새로운 생산혁명은 현재 제조업의 단순한 혁신이 아니라 사회 전반의 요구를 수용하고 새로운 발전을 이끌어낼 수 있는 것이어야 한다.

4차 산업혁명이 본격 거론되기 이전부터 제조업 혁신에 관한 다양한 분석이 있어 왔다. 설명하는 방법이나 범위에 따라 조금씩 다르기는 하지만 상당히 공통되는 부분이 많다. UNIDO(유엔산업개발기구), OECD(경제협력개발기구)가 예측한 내용을 통하여 4차 산업혁명의 배경이 되는 제조업 혁신, 생산혁명의 범위를 살펴본다.

UNIDO(그림 24)¹⁶⁾는 글로벌 산업시스템을 변화시킬 메가트렌드로 글로벌화, 지속가능성, 인구구조 변화(고령화), 도시화, 글로벌 안정을 위협하는 요소, 제품수명 주기의 급격한 단축, 소비패턴의 변화 등을 제시하고 있다. 이러한 트렌드에 대응할 수 있는 제조방식(생산방식)으로 분산 제조 등 일곱 가지 방식을 제시하고 있다. 새로운 제조방식을 뒷받침하게 될 유망한 과학기술로는 포토닉스, 바이오기술, 나노 기술, 부가제조기술, 마이크로기술, 첨단소재, 환경/에너지 기술 등 일곱 가지를 꼽고 있다.

각각의 제조방식에 포함되는 핵심내용은 다음과 같다. 분산형 제조(distributed

16) Emerging trends in global manufacturing industries, United Nations Industrial Development Organization (Vienna 2013) (IfM (Management Technology Policy), Univ. of Cambridge)

manufacturing)에는 다양한 수준의 동적인 협력, 민첩한 공급 사슬, 제품/공정에 대한 투명한 정보 제공이 포함된다. 신속 대응 제조(rapidly responsive manufacturing)는 민첩성/수용성/반응성/경쟁력이 큰 제조 기술, 유연한 제조 시스템 및 공급사슬 흐름, 신속한 제품 구현을 포함한다. 복잡성이 큰 제조(complex manufacturing)에는 높은 효율성을 가진 제조 수단, 통합 능력, 첨단기술의 활용 능력을 포함된다. 맞춤식 제조(customized manufacturing)는 맞춤식 제조의 수용능력, 지역적/세계적 경쟁을 대비한 맞춤식, 특수 수요 그룹에 대한 제품 활용성, (세계) 저소득층을 위한 제조 기술을 포함한다. 인간 중심의 제조(human-centered manufacturing)의 내용에는 사람 및 사용자에 초점을 맞추는 것과 인구분포(연령분포)를 감안한 공장 시스템을 포함된다. 지속가능한 제조(sustainable manufacturing)에는 지속가능 가치기반 회사, 효과적이고 효율적인 제조, 지속가능 세계적 가치 등 포괄적인 내용이 포함된다. 혁신수용 제조(innovation-receptive manufacturing)는 개방형 혁신, 사용자 중심의 혁신 촉진, 사회적 혁신을 위한 대비 등 전반적인 내용을 포함한다.



그림 24. 제조업 혁신의 배경, 새로운 제조 방식, 관련 기술 (UNIDO).

새로운 제조방식으로 제시한 분산 제조, 신속 대응 제조, 복잡(복합) 제조, 맞춤 제조, 인간중심 제조, 지속가능 제조, 혁신수용 제조 역시 각각 독립적인 것이 아니라 상호 연결되어 있는 부분이 많다. 생산원가 절감 및 물류에 드는 비용이나 시간

을 단축하기 위하여 필요한 분산 제조는 다른 여섯 가지 제조방식과 밀접하게 연관되어 있다. 다른 제조방식들도 마찬가지이다.

OECD가 분석한 제조업의 트렌드(그림 25)¹⁷⁾도 UNIDO가 분석한 내용과 유사하다. 미래 제조업 변화의 배경이 되는 동향을 인구구조의 변화, 녹색·지속 가능성, 지속적으로 가속되고 있는 글로벌화로 압축하고 있다. 이러한 환경변화(동향)에 대응하여 제조업에 혁신적인 변화를 가져올 기술로 부가제조 기술, 나노기술, 바이오기술, 첨단소재(기술), 녹색기술, ICT 기술 등 여섯 가지 기술을 제시하고 있다. 향후 제조기술의 혁신적인 발전으로 고객(소비자)이 개별적으로 원하는 복잡한 제품을 가장 가까운 지역에서 값싸고 신속하게 제조하여 제공함으로써 물류에 소요되는 시간, 비용을 획기적으로 축소하게 될 것이다. 또한 제품 혹은 제조과정을 완전 디지털화·지능화함으로써 고객 혹은 제조과정으로부터의 피드백이 실시간 반영할 수 있게 될 것이며 제품(상품)과 서비스가 결합될 것이다. 제조기술이 고객의 개별적인 요구를 실시간 가장 가까운 거리에서 저비용으로 충족시켜줄 수 있는 수준으로 발전함에 따라 제조기술 자체가 더욱 창조적이게 될 것이며 한편으로는 더욱 많은 창조성을 요구하게 될 것이다. 3D 프린팅과 같은 새로운 제조기술이 계속해서 등장하게 될 것이다.

그림 24와 25에서 맨 왼쪽에 있는 항목들은 새로운 생산혁명으로 옮아갈 수밖에 없도록 하는 추동 인자(pushing factors)로 볼 수 있으며 중간 부분에 있는 제조기술 혹은 제조기술과 관련이 있는 항목들은 이러한 요구를 가능하게 하는 가능자(enablers)로 볼 수 있다.

17) Enabling the next production revolution: Issue paper (Background document prepared for the Danish Product Council conference “Shaping the Strategy for Tomorrow’s Production”), DSTI/IND(2015)2, OECD (09-Mar-2015).



그림 25. 제조업 혁신의 배경, 혁신에 필요한 기술, 미래 제조업의 특징 (OECD).

(2) 제조업 혁신과 4차 산업혁명

독일은 인더스트리 4.0을 ‘디지털 혁명의 기반 위에 인공지능, 로봇, 사물인터넷, 자율주행 자동차, 3D 프린팅, 나노기술 등 새로운 혁신기술을 접목함으로써 현실(물리적) 세계와 가상 세계를 융합하여 자동화 중심의 대량생산 체계의 한계를 돌파하고 경제, 산업 등 모든 영역에 급격한 변화를 불러오게 될 새로운 생산혁명’으로 말하고 있다. 즉 인더스트리 4.0이 추구하는 것은 현재의 ‘자동화 중심 대량생산 체계가 갖고 있는 한계’를 넘어서는 것이 목표이며 구축되어 있는 디지털 혁명을 기반으로 새로운 혁신기술들을 수단으로 활용하는 것이다. 따라서 선언적인 의미의 4차 산업혁명이 아니라 현재의 문제점 및 기술 수준(technological readiness)에 대한 인식을 바탕으로 실현 가능한, 예측 가능한 생산 혁신을 추구하는 것이다.

현재의 제조업, 자동화 중심의 대량생산 체제가 직면하고 있는 문제들에 관해서는 3장에서 설명한 바 있다. 그림 24 및 25가 보여주는 제조 기술 혹은 대응해야 하는 이슈는 자동화 시스템의 발전만으로는 해결할 수 없다. 새로운 생산체계를 구축하여야 하는 이유이다. 인더스트리 4.0은 이러한 새로운 생산체계의 출발점은 구축되어 있는 디지털 혁명의 기반이며 여기에 인공지능, 로봇, 사물인터넷, 자율주행

자동차, 3D 프린팅, 나노기술 등 새로운 기술들이 접목되는 생산체계를 제시하고 있다. 그림 26은 인더스트리 4.0의 생태계를 보여주는 그림이다. 제조업 혁신의 중심이 되는 첨단 제조시스템(advanced manufacturing system)이 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅과 연결되는 것을 보여주며 이들과의 연결에서 점점의 역할을 하는 나노센서가 갖추어야 하는 특성(무결점/무편차(zero defect/deviation), 반응성(대응성)(reactivity), 추적 가능성(traceability), 예측 가능성(predictability))을 제시하고 있다. 빅데이터와 연결되는 첨단 제조시스템은 나노센서를 매개로 하여 실제 시스템(physical system)과 사이버(혹은 가상) 시스템(cyber system)을 연결한 'CPS(cyber physical system)'와 완전 자동화, 시스템 전체의 연결, 기계-기계간 연결에 필요한 '수치 명령(numerical command)'이 핵심이다. 첨단 제조시스템을 구성하는 실제 요소로는 3D 프린팅/부가 제조, 나노기술/첨단소재, 로봇, 자율 이동기기 등이다. 최종으로는 공급자들의 클러스터인 물류 4.0과 수요자(클라이언트)들이 필요로 하는 대량 맞춤(mass customization)을 IoT의 도움을 받아 연결하는 것이다.



그림 26. 인더스트리 4.0의 생태계.

그림 26의 생태계에서 가장 중요한 것은 장비(기계)간(기계-기계)은 물론 사람-기계(제조시스템), 물류-제조시스템 등 모든 요소들간을 완전하게 연결하는 것(사물인터넷(IoT))이다. 각각의 연결에는 나노센서가 포함되어 있어서 모든 데이터들이 실시간 수집되고 저장되며 실시간 해석되어 제조시스템 운전이나 물류 등으로

피드백한다. 따라서 인더스트리 4.0, 4차 산업혁명은 현재의 자동화된 기계, 생산시스템 중 연결이 되지 않은 부분을 모두 연결(기존 연결을 향상된 것으로 대체하는 것 포함)하는 것에서 시작된다. 이러한 연결을 위해서는 모든 기계 혹은 구성 부품에 센서가 내장(imbedding)되어 연결되고 초고속 데이터 전송이 가능한 인터넷이 구현되어야 한다.

고객의 니즈에 대응하여 다양한 전기면도기를 생산하는 필립스의 예는 새로운 생산혁신 내지 생산혁명의 한 모습을 보여주는 사례이다.¹⁸⁾

« 필립스의 전기면도기 생산라인 »

필립스는 60 개의 서로 다른 면도기 생산라인에서 약 600 개 모델의 전기면도기를 제조하고 있다. 수요 물량이 다른 다양한 모델을 효율적으로 생산하고 새로운 요구에 대응하여 새로운 모델을 즉시에 개발하여 시장에 내놓을 수 있는 유연한 생산시스템을 구축하여 운영하고 있다.

3 개의 헤드를 가진 면도기는 각각 5 개 내지 8 개의 셀로 구성된 9 개 라인에서 조립된다. 플러그-앤플레이(plug-and play) 방식으로 연결되거나 분리될 수 있는 자율 셀로 구성된 독립적인 라인들이 시스템의 유연성과 유용성을 극대화한다. 지능형 조립라인에서 핵심인 유연한 부품공급을 해결하기 위하여 통합시각 시스템을 갖춘 로봇이 일정하게 놓여있지 않은 부품들이 놓인 형태를 인식하고 조립라인으로 정확하게 공급하고 있다.

필립스의 생산시스템은 생산하고 있는 모델(제품)을 바꾸고자 할 때 생산시스템이 자율적으로 대응하여 단 몇 분 내에 다른 모델의 제품을 생산할 수 있다. 이러한 유연 생산시스템은 생산라인의 수를 최소화할 수 있으며 모델별 생산량의 차이를 가장 효율적으로 라인에 배정하여 생산효율을 극대화할 수 있다. 특히 기존 장비의 성능을 최대한 활용할 수 있으므로 새로운 장비의 도입을 최소화할 수 있다.

각각의 부품 혹은 기계에 내장된 센서로부터 실시간 수집된 디지털 정보는 저장되고 가공(처리)되어 (입력정보(input data)로) 활용된다. 산업 혹은 산업망 전체에 걸쳐 생산되는 데이터는 향후 천문학적인 규모로 빠르게 늘어날 것이며 이와 연관되어 있는 요소들 역시 폭발적으로 늘어날 전망이다(표 4).¹⁹⁾ 인터넷에 연결된 기

18) Automation Profiles: Robots Help Philips Shave Assembly Costs, Assembly Magazine (John Sprovieri), June 1, 2012.

기의 수는 2015년 150억 개에서 2020년 500억 개로 3 배 이상 늘어날 전망이다. 같은 기간 동안 이들로부터 생산되는 데이터 양은 15 ZB²⁰⁾에서 60 ZB로 4 배 늘어날 것으로 예측하고 있다. 데이터를 저장하는 데이터 센터의 수는 2015년 현재 55만 개(500 K)에서 2020년 67만 개(670 K)로 늘어날 전망이며 같은 기간 동안 이들 데이터 센터들이 소모하는 전력 규모는 650 TWh²¹⁾에서 950 TWh로 50% 가까이 늘어날 전망이다. 기계간 연결(M2M)이 확대됨에 따라 관련 시장도 2015년 5.2조 원에서 2020년 16.5조 원으로 약 3 배 늘어날 전망이며 인공지능 시장은 2 억 달러에서 2024년 111억 달러로 50 배 이상 늘어날 전망이다.

표 5. 데이터 관련 주요 항목의 변화

항 목	2015년	2020년
인터넷에 연결된 기기 수	150억 개	500억 개
데이터 양	15 ZB	60 ZB
데이터 센터 수	550 K	670 K
데이터 센터의 소비전력	650 TWh	950 TWh
M2M 시장	5.2조원	16.5조원
인공지능 시장	2억 달러	111억 달러(2024)

표 4에 제시된 수치는 디지털 데이터를 축으로 하는 4차 산업혁명에서 중요하게 고려하여야 할 영역들이 무엇일 지에 대한 힌트를 준다. 2020년까지 예측되는 변화를 현재의 기술로 감당하는 데는 한계가 있으므로 다음과 같은 검토가 필요하다.

19) 김기남: The 1st International Conference of Engineering Institutions in South Korea and Germany (Sept. 4, 2017).

20) 1 ZB = 10^{21} bytes = 1,000,000,000,000,000,000 bytes.

21) 1 T(테라)Wh = 1,000 G(기가)Wh = 1,000,000 M(메가)Wh = 1,000,000,000 K(킬로)Wh.

- ① 기계 부품에 내장 가능한 소형화된 센서소자(모듈)가 제조되어야 한다(센서 동작(감지), 데이터 송수신에 필요한 전원이 확보되어야 함). 요구조건을 충족하는 성능을 가져야 하며 대량 수요에 적합한 수준의 낮은 가격을 가져야 한다.
- ② 급증하는 센서가 소비하는 전력 규모를 축소하기 위하여 저전력으로 동작하는 고성능 센서의 제조가 필요하다.
- ③ 천문학적인 양의 정보를 효과적으로 전송하고 저장, 처리할 수 있는 고속, 대용량, 저전력 소자(혹은 시스템)의 개발이 이뤄져야 한다.

(3) 예상되는 4차 산업혁명의 모습 (제조 부문)

4차 산업혁명이 추구하는 제조업의 모습을 그림 27과 같이 개략적으로 나타낼 수 있다. 스마트 공장 내에 있는 기계 M1, M2, M3은 각각에 내장되어 있는 IoT 센서 소자로 서로 연결된다. 기계간 통신(M2M 통신)을 통하여 기계들의 자율 운전이 실행된다. 또한 이때의 디지털 운전 정보는 사이버(가상공간) 상에 구현(디스플레이)되어 관리자가 모니터링하고 발생하는 문제는 자율 해결 또는 관리자가 해결을 지시한다(공장별 CPS 관리). 스마트 공장 간에도 디지털 데이터가 교환되어 작업 조건 혹은 제품 사양의 변화에 실시간 대응하여 운전 조건이 조정된다. 제품 정보가 제품과 함께 고객에게 전달되는 것은 물론 제품의 사용 정보가 실시간 스마트 공장에 피드백 되어 제품 설계나 공정 조정에 활용된다.



그림 27. 스마트 제조의 형태 (거시적).

그림 27에서의 데이터 흐름은 그림 28과 같이 도식화할 수 있다. 소재→부품→완제품으로 이어지는 각 공장(혹은 공정)에서 생산되는 데이터는 기계 혹은 작업라인에 붙어있는 IoT 센서소자를 통하여 수집되어 데이터 센터로 전달되어 제품 설계, 공정 설계, 경영 전략(가격, 수량 등)의 변경에 반영된다(초기의 고객 니즈를 변경). 빅데이터(정보 가공), 인공지능(문제 및 해결방안 도출)의 도움을 받아 작성된 새로운 수치(실행 데이터)는 IoT(액추에이터)에 전달되어 소재→부품→완제품 공장에서 실행된다. 미세한 공정의 변화는 정보수집 단의 IoT와 정보실행 단의 IoT간의 데이터 교환으로 자율 조정된다. 고객이 사용 중인 완제품으로부터의 데이터가 IoT에 입력되어 설계 및 제조공정에 활용된다. (오른쪽 하단의 점선 부분은 엔지니어에 의한 전통적인 최적화 피드백 과정을 나타낸다.)



그림 28. 스마트 공장에서의 데이터 흐름.

그림 27에서의 기계간 통신(M2M 통신)은 현재 기계 자동화의 바탕이 되는 (단일)기계 내 모듈간 통신으로부터 공장 자동화(시스템 자동화)의 바탕이 되는 생산라인에 구축되어 있는 기계간 통신으로 확장되어 갈 것(공장 자동화)이다(그림 29). 향후에는 공장 자동화를 넘어 공장 간, 지역 혹은 산업간으로 확대되고 물류 시스템과 연결될 것이다. 자동차, 반도체, 디스플레이 등 첨단산업에서는 이미 생산라인간 통신에 기반을 둔 공장 자동화가 성숙되어 있다.



그림 29. 모듈간 및 기계간 통신의 발전 방향 및 영향의 크기.

그림 27~29에서의 첨단 자동화가 현재의 자동화와 다른 점은 크게 두 가지이다. 하나는 단순한 자동화가 아니라 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 빅데이터, 인공지능 등 디지털 기반을 활용할 수 있는 수단들이 결합되어 자율화(자율 운전)된다는 점이다. 생산라인이 공정 변화를 스스로 최적화하고 변화되는 조건(예: 제품 모델간의 변화 등)에 최단 시간 내에 대응할 수 있게 됨으로써 시설에 대한 투자를 최소화할 수 있고 장비 운전 효율을 극대화할 수 있다(필립스의 예 참조; 4차 산업혁명에 대한 기업의 대응). 다른 하나는 현재의 자동화는 실제 공간에서의 생산 활동에 국한된 것인 반면 첨단 자동화(자율화)는 실제 공간을 그대로 디지털화한 가상공간에서의 생산 활동이 같은 수준으로 이뤄진다는 점이다(CPS 생산시스템).

CPS는 제조 영역에서만 유용한 것이 아니다. 제품과 서비스가 결합되어 변하고 있는 비즈니스 모델에도 매우 유용하다. GE의 발전 비즈니스가 예이다. 가스터빈을 판매하던 비즈니스 모델에서 가스터빈의 운전 시간 혹은 발전소를 운전하여 나오는 전력으로 비즈니스 대상이 바뀌고 있다. GE는 CPS를 통하여 발전기의 운전 상태를 실시간 모니터링할 수 있고 운전 상태를 최적의 상태로 유지할 수 있다. 이상이 있는 신호를 미리 탐지하여 최적 보수 시기를 결정하고 보수에 소요되는 시간을 단축

함으로써 정지 시간을 최소화할 수 있다. GE는 이미 이러한 CPS를 80만 개 이상 운영하고 있다.

그림 30은 CPS 기반의 예측식 정비가 가능해지면서 신뢰도가 매우 높아지는 것을 나타내는 그림이다.²²⁾ 빅데이터와 인공지능을 활용하여 최적의 정비 시점에 최적의 방법으로 가장 단시간에 정비를 완료함으로써 장비의 운전 시간을 단축함으로써 정비에 소요되는 비용을 줄이고 생산성을 높일 수 있다. McKinsey의 분석에 따르면 예측식 정비로 10~40%의 유지비용을 절약할 수 있으며 장비의 정지시간은 최대 50%까지 단축할 수 있다.²³⁾ 예측식 정비로 얻을 수 있는 큰 이득의 하나는 신뢰도가 높아짐으로써 대형 사고를 미리 방지할 수 있다는 점이다(발전소나 화학 공장 등에서의 대형 사고는 경제적인 손실은 물론 사회, 환경 측면에서도 큰 손실을 가져옴).



그림 30. 정비 방법의 발전에 따른 신뢰도 변화.

-
- 22) Jaap Bloem, Menno van Doorn, Sander Duivestein, David Excoffier, René Maas, Erik van Ommeren: The fourth industrial revolution – Things to tighten the link between IT and OT, VINT Research Report, Sogeti VINT (2014).
- 23) James Manyika, Michael Chui, Peter Bisson, Jonathan Woetzel, Richard Dobbs, Jacques Bughin, and Dan Aharon: “The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype”, McKinsey & Company (June 2015).

생산시스템 관점에서 생산혁명(4차 산업혁명)의 핵심은 생산시스템의 ‘완전 디지털화’, ‘초연결(superconnectivity)’, 클라우드 기반의 ‘자율화(자율 운전)’이다. 생산시스템에는 생산장비, 생산라인 혹은 공장으로 대별되는 생산시설은 물론 원료, 부품, 제품의 공급이나 배송을 포함하는 물류시스템이 포함된다. 생산시스템 디지털화의 최종적인 목표는 생산시스템, 물류시스템에서 시시각각 생산되는 모든 데이터를 빠짐없이 수집하고 이 데이터를 분석·활용하여 전체 가치사슬을 가장 효율적으로 관리하고 변화하는 시장(고객)의 니즈에 신속하게 대응하는 것이다. 이러한 관리에는 에너지(주로 전기) 관리가 포함되어 에너지 사용 효율을 극대화하여 비용을 축소할 수 있다(그림 26). 생산시스템은 장비(라인), 공장의 운전조건을 최적화하고 예측 관리를 통하여 운전중단을 최소화함으로써 전체 생산시스템의 효율을 극대화하는 것이다. 도구적인 측면에서는 실제 생산시스템의 모든 데이터를 활용하여 실제 시스템(physical system)과 똑같은 디지털 시스템(사이버 시스템(cyber system))을 가상공간에 구현(디지털 트윈(digital twin)이라고도 함; 그림 31(왼쪽)²⁴⁾)하고 두 시스템을 인터넷으로 연결하여 실시간 피드백(feedback) 기반의 자율 운전을 가능하게 하며 고장 징후를 미리 감지하고 최적 정비 시점을 예측하여 생산시스템의 정지시간을 최소화하여 실제 시스템을 최고의 효율로 운전하는 것이다. 최적의 운전조건이나 정비시점을 판단하고 실행하기 위하여 인터넷, 빅데이터, 인공지능(AI), 클라우드 컴퓨팅 등의 기능이 사이버 시스템을 구성하는 요소가 되며 데이터의 초고속 처리 및 전송, 대용량 데이터의 저장을 가능하게 하는 고성능 통신, 컴퓨터, 데이터 관리 시스템 등 하드웨어 요소가 사이버 시스템을 지원하여야 한다. 그림 31의 오른쪽 그림은 GE의 디지털 트윈 모델(발전소 적용 모델)을 보여주는 것이다.²⁵⁾ 디지털 모델은 통제실의 모니터에 나타나며 이상이 있는 부분의 데이터는 실시간 화면에 나타난다. 또한 같은 데이터가 모바일 기기에도 전달되어 원거리에서도 명령 입력이 가능하다.

그림 32는 발전소의 가스터빈을 대상으로 한 디지털 모델을 보여주는 것이다. 고객이 관리하고 싶어 하는 지표와 입력 데이터, 운전 중의 데이터 해석에 사용되는 모델들과 함께 디지털 트윈이 활용되는 비즈니스 영역을 보여준다. 그림 33은 이러한 실행이 이뤄지는 동안 데이터가 흘러가는 경로(데이터 처리 모델 및 인공지능을

24) Industry 4.0 and the digital twin – Manufacturing meets its match, Deloitte University Press (2017).

25) GE Digital Twin: Analytic engine for the digital power plant, GE Power Digital Solutions (2016).

활용하는 해석 과정)를 보여주며 얻게 되는 산출물을 나타낸다. 실제 현장에서 생산되는 방대한 양의 데이터를 디지털 시스템(공간)에서 처리하기 위해서는 통합적인 데이터 처리 시스템이 필요하다. 이러한 디지털 트윈 혹은 CPS를 운용하기 위하여 개발된 통합시스템으로는 GE의 ‘Predix’, 지멘스(Siemens)의 ‘Mindsphere’가 대표적이다.



그림 31. 제조과정의 디지털 트윈 모델(왼쪽; Deloitte) 및 발전소 적용 모델(오른쪽; GE).



그림 32. GE의 디지털 트윈 (가스터빈의 예).



그림 33. GE 디지털 트윈의 핵심 기술.

« 제조업 혁신 트렌드 요약 »

- 미래의 제조업은 단순한 제품 생산이 아니라 글로벌화, 고령화, 지속가능화 등 사회·경제적 요구조건을 충족할 수 있는 제조업이어야 한다.
- 미래 제조업을 이끌어갈 부가제조(AM)(3D 프린팅 포함)와 같은 새로운 제조기술은 디지털 데이터 기반을 필요로 하므로 제조업에 현재보다 훨씬 진전된 디지털 혁신이 도입될 전망이다.
- 현재의 고도화된 자동화를 뛰어넘어 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능 등이 융합된 자율화(첨단 자동화)로 진전될 것이다. 실제 체계(physical system)와 사이버(디지털) 체계(cyber system)가 조합된 CPS 혹은 디지털 트윈(digital twin), IT(정보기술)과 OT(운영기술)이 융합된 (IT+OT)가 일반화될 것이다.
- 제조과정의 유연화 및 자율화, 유지보수의 효율화로 생산성이 획기적으로 개선될 것이며 제조업 회귀(re-shoring)가 촉진될 전망이다.
- 서비스가 융합된 제품으로 돌아갈 전망이므로 제조업의 비즈니스 모델이 제품 판매 중심으로부터 서비스 판매 중심으로 전환될 전망이다.
- 현재의 디지털 기술 수준은 미래 제조업이 필요로 하는 조건을 충족하는데 한계가 있기 때문에 제조업 혁신(4차 산업혁명)을 이루기 위해서는 지속적인 기술 개발이 필요하다.

« 제조업 혁신을 위해 요구되는 것들 »

- 제조업 전체의 디지털화가 필요하므로 모든 기기들을 인터넷으로 연결하는 것이 필요하다(새로운 생산 장비의 제작²⁶⁾ 혹은 기존 장비의 변경 필요).
- 부품(모듈) 혹은 기계에 설치(내장) 가능한 고성능의 소형화된 센서들이 낮은 가격으로 대량 제조되어야 한다. 2020년까지 약 300억 개 이상의 장비가 인터넷에 새로 연결될 것이며 이 수의 몇 배에 해당하는 센서들이 장비에 설치될 것이다. 센서들이 사용하는 전력양이 급격하게 증가될 전망이므로 저전력 센서 혹은 IoT 모듈에 대한 요구가 증가할 것이다.
- 인터넷에 연결될 수백억 개의 기기와 여기에 내장된 센서들이 생산하는 데이터 양이 폭발적으로 증가할 것이다(2015년 15 ZB에서 2020년 60 ZB로 증가). 막대한 양의 데이터를 저장하는 데이터 센터의 수가 급증하고 데이터 센터가 소비하는 전력이 2015년 대비 50% 이상 늘어날 전망이다. 대용량 저전력 소자 및 시스템 개발에 대한 요구가 커질 것이다.
- 빅데이터나 인공지능의 활용 보편화됨에 따라 성능 향상, 저전력화가 필요하므로 초고속·대용량·저전력의 조건을 갖춘 소자 및 시스템 개발이 필요하게 될 것이다. *

26) 4차 산업혁명 중에는 기존 장비(3차 산업혁명에서의 장비)의 40~50%가 새로운 장비로 대체될 전망 (1차 산업혁명 중에는 100%, 2차 산업혁명 중에는 10~20%, 3차 산업혁명 중에는 80~90% 장비를 대체). (그림 45 참조)

5. 4차 산업혁명의 이해 및 추진 현황

고용이 줄어들 것이라는 염려와 함께 인공지능의 위험성까지 4차 산업혁명에 대한 논의는 매우 혼란스러울 정도로 다양하다. 논의되는 내용들이 나름대로 의미가 있는 것들이긴 하지만 모두가 공감하고 4차 산업혁명을 만족스럽게 설명하기에는 부족함이 있다. 아마도 미래에 전개될 예측 부분이 많고 시차를 두고 발전(진화)하고 범위가 확대되어 갈 것이기 때문에 관심 있는 시점이 다르기 때문일 것이다. 4차 산업혁명에 대한 많은 논의들이 문제가 되는 이유를 요약하여 나타내면 그림 34와 같다.

현재의 산업과 기술을 바탕으로 새로운 기술을 무기로 출발하는 4차 산업혁명은 시간이 지나면서 산업 전반, 사회 전반으로 확산되어 갈 것[시간]이며 4차 산업혁명이 진전됨에 따라 영향을 미치는 영역[범위]은 확장될 것이다. 그림 34의 왼쪽 부분과 같이 영역이 확연히 구분되어 진전되기는 어려울 것이며 오른쪽 같이 나누낼 수도 있을 것이다(동심의 중심으로부터 외부로 진전). 이미 성숙도가 높아 산업 영역이나 사회 영역에 미치는 유망기술이 있는가하면 성숙되는데 시간이 좀 더 필요한 기술도 있기 때문이다. 따라서 시간(시기)과 범위를 고려하지 않고, 즉 발전단계를 감안하지 않고 4차 산업혁명의 한 부분을 언급하는 것은 상당한 혼란을 줄 수 있다.



그림 34. 4차 산업혁명의 진전 방향.

본 기획연구에서는 4차 산업혁명이 기술, 산업, 사회 영역(계층)에 미칠 영향을 개략적으로 살펴보았다. 영역별로 제시된 자료는 4차 산업혁명 관련하여 공개된 자료들을 조사하여 정리한 것이다.

(1) 4차 산업혁명의 계층별 주요 변화 예측

① 사회 변화 (Society domain)

표 6. 현재와 미래(2020년 이후)의 사회 변화 예측

영역	현재	미래	특기사항
경제	공유경제 150억불(2014)	공유경제 3,350억불(2025)	자동차시장 80% 소멸(2030)
	디지털경제 지수 49%(2015) 디지털경제 지수 37%(2015)	디지털경제 지수 58%(2021) 디지털경제 지수 38%(2021)	독일 (상업부문) (제조부문)
	도시생활 폐기물 재활용 25%(2011)	도시생활 폐기물 재활용 70%(2030)	순환경의 확대 * 제도적 규제
	선진국 잠재성장률 2.25% (2001~2007)	선진국 잠재성장률 1.6 % (2015~2020)	IMF * 성장둔화→사회문제
	세계인구 72억명 (2015) (60세 이상 12.3%)	세계인구 90억명 (2050) (60세 이상 21.5%)	UN 보고서 ²⁷⁾ * 근로조건 변화
	대량생산/대량소비	대량 맞춤생산	소비가 생산에 영향을 미침
	단순물류 비교우위 기반의 GVC 확대	스마트 물류 중간재 교역 및 GVC 축소	3D 프린팅 등 맞춤형 제조 디지털 정보교환 확대
	경제적 양극화 우려	경제적 양극화 심화	남북간 갈등 심화
사회	집중형 사회	분산형/분권형	분산과 지역화의 장점 결합
	전체 데이터(4.4 타바이트)에서 활용 가능한 데이터의 비중 22% (2013)	전체 데이터(44 테타바이트)에서 활용 가능한 데이터의 비중 37% (2020)	정보량 폭증과 함께 유효정보 비중도 증가 ²⁸⁾
	인터넷에 연결된 기기 150억 개 (2015)	인터넷에 연결된 기기 500억 개 (2020)	IoT의 제어 및 보안 이슈 ²⁹⁾
	(연결) 인간-인간 중심	인간-사물/사물-사물 중심	초연결 (IoT)
	디지털 양극화 우려	디지털 양극화 심화	디지털 사각지대(소외세대)
고용/ 노동/ 개인	직업과 여가의 분리	직업과 여가의 병행	프로슈머/비정형직업 확대
	제한적 국가간 이동	글로벌 이동	노동인력
	여성의 경제활동 저조	여성의 경제활동 참여 확대	출산율 저하 심화
	생산인구 (15~64세)	은퇴가 없는 삶	고령인력을 위한 노동환경
	보안의 단편적 규제	보안과 사생활 보호 강화	공공과 개인의 이해 상충
국제 관계	지역요인의 느린 확대	지역요인의 글로벌 이슈화	정치/경제/사회적 요인
	민족/종교/국가 간 갈등 증가	민족/종교/국가 간 갈등 심화	남북간 양극화
	국가 중심의 안전체제	비국가적 안보체제 확대	사이버 테러 등 비국가적 요소 확대
	세계화	세계화 가속	제품·자금·인력·정보의 교역 확대
	다국적기업의 영향력 확대	다국적기업의 국가권력 추월	정보·재원의 기업 집중

② 산업 변화 (Industry domain)

27) UN, Department of Social Affairs Population Division(2015), 『World Population Prospects, the 2015 Revision』, United Nations.

28) Turner, V. et al.(2014), 『The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things』, Dell EMC & International Data Corporation

29) Cisco

표 7. 미래(2030년까지)의 산업 변화 예측

영역	영역	현재	미래 (~2030)	특기사항
생산	제조방식	자동화 (수치제어) * 산업용 로봇	자율화 * 자율형 로봇	AI+빅데이터+IoT+ Hybrid Manufacturing
	생산방식	소품종 대량 생산	대량 맞춤 생산	3D프린팅 기술 적용
	생산지역	거점생산 (생산기지)	현지생산(수요지역)	물류 시간/비용 축소
	생산형태	계획생산 (창고시스템)	주문생산 (즉시 출하)	실시간 물류 연계
	부품공정	설계·공정 한계 (복잡형상/구조→복수부품)	설계·공정 한계 극복 (부품·공정 수 축소)	3D 프린팅 비용/시간 축소
	유지보수	데이터 기반 진단	빅데이터 기반 예측 진단	자동중지 시간 단축
	품질제어	통계기반의 완제품 중심	실시간 정보기반의 공정 중심	소비자(수요) 요구 대응
	개발방식	자본/기술 투입 중심 (대기업 유리)	정보/인프라(플랫폼) 중심 (중소기업 혹은 개인에게 기회)	CPS로 비용/시간 절감 플랫폼 경쟁
	생산효율	생산성 증가 정체 (물적자본 투입의 수확 제한)	지능화/연결성의 증가로 부가가치 증가 및 비용 절감 (2030~)	다양한 GPT 활용
연결/ 연계	연결범위	단일 기계 혹은 공장	(공장 내) 기계간 혹은 공장간 공급사슬 연결 공장	IoT, 빅데이터
	가치사슬	생산부문 대비 R&D, 마케팅 등이 중요	공정혁신/제품혁신으로 생산부문의 중요성 상향	스마일 곡선의 변화
	서비스 연계	생산-유통-소비의 선형적 연결 (생산-소비 간접 연결)	제조업과 서비스업의 융합 생산-소비의 직접 연결	IoT, 빅데이터
	산업연계	수직적 분업관계	수평적 협업관계	
	국제분업	Off-shoring (비용, 시장)	Re-shoring (제조업 강화)	고용·연계효과 중시
		GVC 확대	GVC 축소 (중간재 유통 축소)	새로운 생산수단 (3D 프린팅)
소비/o 의	이윤창출	잉여 노동 중심	기술혁신 중심	
	소비역할	생산의존형 소비	소비(수요)가 생산 주도	(제품+서비스) 결합
	소비패턴	가격 중심 (대량 소비)	수요 중심 (개별 성능 맞춤)	가격 상승 감수
	BM	저가격-고품질-고신뢰도	고가격-맞춤형 (O2O)	소비 중심으로 전환
	경쟁방식	생산요소의 결합방식	개방형/융합형 생태계	통합적 의미의 효율성
	경쟁원천	제조/조립, 기술/품질	SW/플랫폼	성능/속도/비용 이슈
고용/ 노동	고용구조	인간(주)-기계(부)	AI(주)-기계(부)-인간(보조)	자율화된 생산체계
	노동형태	숙련공 중심(단순 노동) 사업체 중심의 고용	개발인력 중심 (지식 노동) 개인사업자형 고용 (1인 기업)	지속적 재교육 시스템 프로슈머형 고용

③ 기술 변화 (Technology domain)

표 8. 미래의 기술 변화 예측

영역	유망기술 분야	특기사항	관련 선도기술	관련 나노기술
인터넷	>1 Tbp (초고속 인터넷)	장거리 광통신 및 중단거리 무선통신의 대용량화 및 초고속화	IoT (연결: 송·수신)	통신 모듈의 대용량화 (나노소재 복합화에 의한 방열효과 향상)
전자소자	포스트 실리콘 반도체 (2024)	주요 반도체 제조 기업에서 포스트 실리콘 반도체를 초기 양산 시제품으로 생산하는 시점, 실리콘보다 100 배 빠르고, 낮은 에너지 소모속도/용량/소모전력 ³⁰⁾	빅데이터/AI (정보저장)	저차원 나노소재 (그래핀 등)
	시냅스형 소자	인간의 뇌 수준의 소모전력 (~20 W) 수준의 대용량/초고속 뉴로모픽 소자 * AI 용도별 전용칩 사용		나노박막 증착 및 식각 기술 등 소자 시뮬레이션 기술 생체모사형 소자(뉴로모픽) 비생체모사형 소자
컴퓨팅	양자컴퓨팅 (2025)	기상예측에 양자컴퓨팅을 처음으로 도입하는 시점	빅데이터 (정보처리)	단광자 생성기·탐지기 양자 컴퓨팅 프로세서
	인지 컴퓨팅 (2024)	인지컴퓨팅을 기반으로 사람과 자연언어로 소통하는 맞춤형 개인비서 인공지능 서비스를 활용하는 인구의 비중이 스마트폰 사용 인구 중 16%에 도달하는 시점	빅데이터·AI (정보처리)	메모리소자(나노소자) 나노전자소자(프로세서) 음성인식소자(시스템)
	빅데이터	부품(모듈) 및 제조공정의 산업적 설계, 제조-사용-폐기 전과정 분석 및 결과의 피드백(자율운전 데이터 제공)	빅데이터	메모리소자(나노소자) 전용 프로세서(나노소자)
디스플레이	롤러블 디스플레이 (2023)	상용 모바일 제품에 최초로 적용되는 시점	IoT·빅데이터·AI (정보 입력·출력)	기판 소재 OLED 나노소재 투명전극 나노소재 유기 나노반도체 소재
	VR/AR (2020)	게임 등 상호작용형(참여형) 엔터테인먼트 시장에서 실감형 가상·증강 현실용 콘텐츠의 점유율이 11%가 되는 시점		나노소재(나노패턴) 나노복합소재(경량/방열/차폐) 디스플레이(나노)소자 및 소재
수송기기	자율주행 자동차 (2023)	자율주행 자동차가 자동차 신차 판매의 12%를 점유하는 시점	로봇·IoT·빅데이터·AI	고감도 나노센서/저전력 소자 메모리 및 AI용 소자(나노소자) 통신소자(IoT) 자세/위치 제어(nano-MEMS)
	화물배송 드론 (2020)	운용 중 발생 사고율 100만 비행 당 2회 이하 시점		탄소나노섬유복합재료 등 나노소재 기반 배터리 소재 고감도 나노센서/통신소자(IoT) 나노소자(메모리, 프로세서) 자세/위치 제어(nano-MEMS)

30) Data centres in the USA consumed 2.2% of its total electricity in 2011. Because power plants take time to build, we cannot sustain past trends of doubled power consumption per year. (Nature 512, 147-154, 2014)

영역	유망기술 분야	특기사항	관련 선도기술	관련 나노기술
로봇	웨어러블 보조 로봇 (2023)	하반신 마비 장애인의 보행을 보조하는 웨어러블 로봇의 렌탈 가격이 월 100만 원 이하가 되는 시점	로봇	탄소나노섬유복합재료 등 나노소재 기반 배터리 소재 고감도 나노센서/통신소자(IoT) 나노소자(메모리, 프로세서) 자세/위치 제어(nano-MEMS)
	지능형 로봇 (2024)	네트워크 기반 지능형 로봇의 일반가정 보급률이 8%를 돌파하는 시점		탄소나노섬유복합재료 등 나노소재 기반 배터리 소재 고감도 나노센서/통신소자(IoT) 나노소자(메모리, 프로세서) 자세/위치 제어(nano-MEMS)
환경	이산화탄소 포집 및 저장 (2024)	화력발전의 1%에 CCS가 적용되는 시점	나노소재	나노촉매(전환) 나노소재(저장)
	인공 광합성 (2026)	인공광합성 기술을 이용한 제품 생산이 기존 시장을 대체하는 비율이 3%가 되는 시점		나노촉매(인공효소) 나노멤브레인
의료/ 헬스케어	빅데이터 기반 질병예방 관리 (2021)	10만명 이상의 데이터 기반 서비스 시점	빅데이터·AI (정보처리·활용(예방))	대용량 정보저장 메모리 및 장치 나노바이오 센서 전용소자(메모리/프로세서/통신)
	진단 및 치료 (2020)	암·유전병 등의 진단 및 치료		나노조영제 나노기반 진단기기 나노의약품
	인공장기 (2024)	인체에 삽입되어 완전하게 독립적으로 기능하는 인공 신장이 개발되어 인공신장 이식 건이 16%가 되는 시점	IoT·빅데이터·AI (정보 수집(모니터링)·정보처리(진단)·활용(처방))	나노센서 초소형 배터리(나노소재) 생체적합 나노소재
	뇌-컴퓨터 인터페이스 (2025)	사지마비 장애인의 16%가 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술을 사용하는 시점		생체적합 나노소재 나노센서 초소형 배터리(나노소재)
생산기술	3D 프린팅 (2021)	3D 프린터의 일반 가정 보급률이 3%가 되는 시점	3D 프린팅	나노소재 3D 프린터 (IoT 연계)
AI	제조공정 혁신 (2025)	조립라인의 자율화, 오류 축소, 제품 수정(결함 수정) 최소화, 소재 공급 기간 단축 등에 본격 활용되는 시점	AI (소프트웨어) * AI 탑재 자율 로봇	메모리 내 분석소자 (In-memory analytics) 메모리 내 데이터관리시스템 (In-memory DMS)

표 9. 미래기술(유망기술)의 최고 선진국과의 기술수준 비교 (정성적)

미래기술 (유망기술 분야)	관련 나노기술(복수일 수 있음)	기술수준 (한국●, 선진국○)			
		높음	보통	낮음	아주 낮음
초고속 인터넷	-	●○			
포스트 실리콘 반도체	저차원 나노소재 (그래핀 등)			●○	
	나노박막 증착 및 식각 기술 등		●○		
	소자 시뮬레이션 기술			○	●
시냅스형 소자	저차원 나노소재 (그래핀 등)				●○
	나노박막 증착 및 식각 기술 등	●○			
양자컴퓨팅	양자점 등			○	●
인지 컴퓨팅	나노소재, 나노공정	○		●	
빅데이터	나노소재, 나노공정	○		●	
롤러블 디스플레이	기판 소재		●○		
	OLED 나노소재	●○			
	투명전극 나노소재		●○		
	유기 나노반도체 소재	○		●	
VR/AR	나노소자		●○		
	나노복합소재 기술		●○		
자율주행 자동차	고감도 나노센서 기술	○		●	
	고성능 나노소자 기술	○	●		
화물배송 드론	탄소나노섬유복합재료 등	○	●		
	나노소재 기반 배터리 소재	●○			
	고감도 나노센서	○		●	
웨어러블 보조 로봇	탄소나노섬유복합재료 등	○	●		
	나노소재 기반 배터리 소재	●○			
	고감도 나노센서	○		●	
지능형 로봇	탄소나노섬유복합재료 등	○	●		
	나노소재 기반 배터리 소재	●○			
	고감도 나노센서	○		●	
	고성능 나노소자 기술	○	●		
이산화탄소 포집 및 저장	나노촉매 기술	○	●		
인공 광합성	유기 나노염료 소재 기술		●○		
	나노촉매 기술	○	●		
	나노멤브레인 기술		●○		
빅데이터 기반 질병예방 관리	대용량 정보저장 장치	●○			
	나노바이오 센서	○	●		
유전자 치료	-		●○		
줄기 세포 치료	세포분화유도용 나노기판 기술		●○		
인공장기	생체 적합 나노소재 기술	○		●	
뇌-컴퓨터 인터페이스	생체 적합 나노소재 기술	○		●	
3D 프린팅	나노소재	○		●	
제조공정 혁신	AI (소프트웨어)	○		●	

* 기술수준: 미래기술이 실제로 사용될 수 있는 수준에 근접한 경우(3년 이내 활용 (2020))를 기준('높음')으로 상대적 평가 (보통: 3~5년, 낮음: 5~10년, 아주 낮음: 10년 이상)

(2) 4차 산업혁명을 선도할 기술들

4차 산업혁명에 관한 자료들이 수많은 핵심기술들을 제시하여 왔으나 자료마다 제시하는 핵심기술이 다를 뿐만 아니라 제시된 기술간의 관계도 분명하지 않다. 아직까지 4차 산업혁명 선도기술에 대하여 특별히 정의된 바는 없고 (굳이 4차 산업 혁명과 관련짓지 않더라도) 미래에 유망한 기술로 보아도 큰 무리가 없는 정도라고 할 수 있다. 본 보고서에서는 앞서 살펴본 1~3차 산업혁명의 진전과정에서 선도기술 스스로의 진화³¹⁾뿐만 아니라 선도기술간의 융합으로 전체 기술이 빠르게 발전하게 되었다는 점에 주목하였다. ‘독립적인 영역을 가진 기술로서 지속적(스스로)으로 진화가 가능하며 다른 기술과의 융합으로 4차 산업혁명의 발전에 핵심적으로 기여할 새로운 기술 혹은 산업적 가능성을 창출할 수 있는 기술’을 “4차 산업혁명 선도기술”로 정의하였다(진화와 융합의 관점에서 정의). 이러한 정의를 사용할 경우 다른 문헌들이 제시한 기술들을 포용할 수 있으며 빅데이터 기술과 같이 일부 기술은 디지털 정보(DB)와 컴퓨팅으로 세분되는 기술로 보는 차이가 나타날 수 있다. 물론 4차 산업혁명 선도기술 자체가 고정된 것이 아니라 계속해서 새로운 기술들이 추가되어 갈 것이기 때문에 선도기술 역시 변해갈 전망이다.

- 인터넷 (초고속 인터넷, 유•무선 인터넷)
- 컴퓨팅 (초고속 컴퓨팅, 클라우드 컴퓨팅)
- 인공지능
- 로봇 (작업로봇, 이동로봇 등; 유•무선 인터넷에 연결된 로봇)
- 스마트 센서
- 디지털 소재 (모든 정보가 디지털화된 소재)
- 디지털 공정 (모든 정보가 디지털화된 공정; 제조 및 조립의 공정뿐만 아니라 시스템 운전 공정을 포함)
- 디지털 정보 (디지털화된 정보 혹은 이의 데이터베이스(DB))

그림 35는 선도기술을 핵심 요소기술로 하는 4차 산업혁명 발전(진화)을 동적인 측면에서 설명하기 위한 4차 산업혁명 유전자 구조(기술 이중 나선(technology double helix))를 나타낸다(그림 35는 다양한 조합이 존재하는 유전자의 일부를 예

31) 범용기술(general purpose technology, GPT)로서의 특징.

시로 나타낸 것이다). 유전자는 생명체의 유전자와 같은 이중나선(double helix) 구조를 하고 있으며 한 가닥은 이미 존재하는 기술을 활용하는 것(기반 기술, technology strand)을 나타내며 다른 한 가닥은 기반 기술의 각 요소와 결합하여 새로운 기술이 창출되게 하는 활용 수단(tool strand)을 나타낸다. 하나의 기술은 기반 기술이기도 하지만 다른 기술의 활용 수단이 되기도 한다(인터넷은 디지털 공정과 융합하여 ‘현장생산’을 가능하게 하는 기반 기술이지만 (클라우드) 컴퓨팅이라는 수단을 활용하기 위한 기반 기술에 해당한다. 두 나선간의 연결 영역(회색 표시 영역)은 양단의 선도기술이 조합되어 나타나는 신기술을 의미한다. 그림 6과 같이 선도기술간의 조합으로 4차 산업혁명의 DNA가 계속해서 만들어지고 복제과정을 통하여 4차 산업혁명이 발전하게 된다.

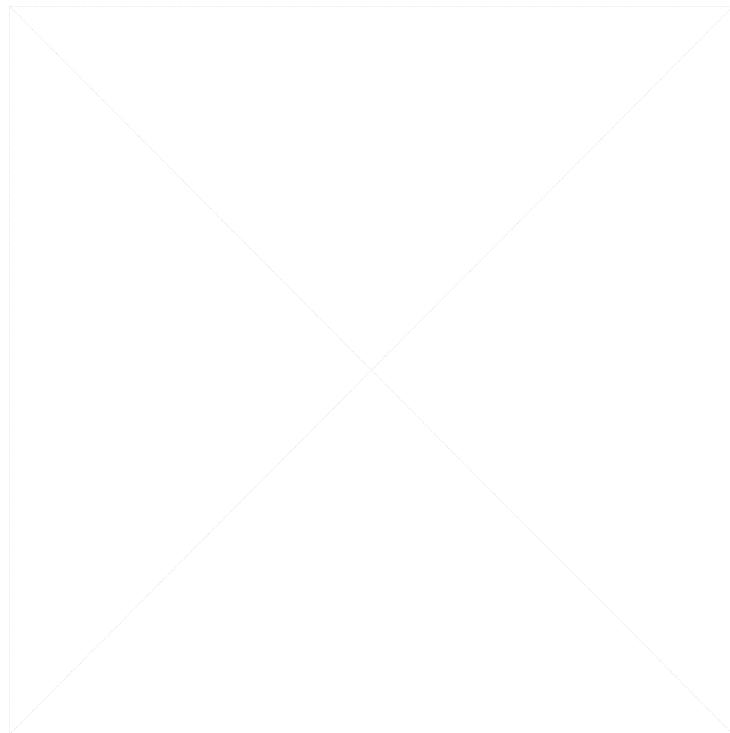


그림 35. 4차 산업혁명 선도기술의 이중 나선 구조(기반-활용)
(Double helix of technologies in the 4th industrial revolution).

(3) 핵심 선도기술 전망

4차 산업혁명의 발전 방향을 정확히 예측하기는 어렵다. 각각의 선도기술도 기술

성숙도가 모두 다르기 때문에 4차 산업혁명 초기 산업혁명을 촉발시키는 역할을 하는 역할을 하는 선도기술이 있는가 하면 어떤 선도기술은 기술 성숙이나 주변 환경이 갖추어진 이후 4차 산업혁명에 기여하게 될 것이다. 또한 선도기술들간 융합으로 새로운 기술들이 출현하면서 4차 산업혁명이 진전될 것이다. 그림 36은 핵심기반인 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅, 사물인터넷이 시뮬레이션, 인공지능, 시스템 통합으로 나타나고 3D 프린팅을 포함하는 부가제조(AM, additive manufacturing), 자율기계 및 시스템, 인간-기계 통합의 생산방식 변화로 이어지는 것을 도식적으로 보여준다.



그림 36. 3차 산업혁명으로부터 4차 산업혁명으로의 발전 과정.

4차 산업혁명의 바탕이 될 인터넷은 이와 연결되는 IoT, 일반 기기, 모바일 기기들이 스마트화함에 따라 더욱 강력한 기반이 될 것이다. 스마트화는 2000년대 들어 웹 2.0, 페이스북이 출현한 이후 급격히 진화하였다(그림 37). 스마트화는 개인이 사용하는 기기들로부터 시작되었으나 현재는 사회 전체로 확산되고 있다. 2012년 빅데이터의 활용에 본격적인 시동이 걸렸고 2016년 현재 많은 업무들이 클라우드 환경에서 이뤄지고 있지만 클라우드의 경제 효과는 아직까지 IT 영역에 집중되어 있다. 2020년 500억 개 이상의 사물이 연결되는 초연결 환경에서는 생산, 물류, 소비의 모든 영역이 스마트화된 환경에 놓이게 될 것이다. 이러한 초연결 환경이 인더스트리 4.0(4차 산업혁명)을 가능하게 된 배경이 되었다.



그림 37. 2000년 이후 스마트화의 진행 과정.

4차 산업혁명의 특징 중의 하나인 자율 생산, 자율 운전을 뒷받침하게 될 인공지능(AI)의 기술 성숙도를 알아보기 위하여 관련기술들을 요약하여 정리하면 그림 38과 같다. AI의 바탕이 되는 논리학(논리/수학/언어(프로그램))은 매우 오랜 역사를 갖고 있다. 1940년대 후반 이후 컴퓨터 기술의 발전과 함께 AI는 빠르게 발전 하였으며 인간과의 게임에서 승리함으로써 지능을 높여왔다. 특히 2016년 이세돌과 알파고(AlphaGo)의 대결은 AI의 존재감을 일반인들에게까지 인식시키는 계기가 되었다. 이러한 AI의 발전에는 1950년대 후반부터 본격 발전해온 지식활용 알고리즘, 자연언어 처리 기술(1960년대 중반 이후), 전문가용 시스템 기술(1960년대 후반 이후)이 큰 기여를 하였다. 그림 38은 AI 기술이 오랜 기간 동안 체계적으로 발전 하여 왔으며 4차 산업혁명이 필요로 하는 수준으로 성숙되었다는 것을 보여준다.



그림 38. AI(인공지능) 및 관련기술의 발전 과정.

또 다른 4차 산업혁명 선도기술인 ‘로봇 기술’ 역시 매우 오랜 기간(100 년 이상)에 걸쳐 발전되어 왔으며 높은 기술 성숙도를 갖고 있다(그림 39). 이미 1940년대 초반 로봇산업을 예측하였으며 로봇법 관련 내용이 제안된 바 있다. 로봇 제품은 1939년 처음 출시된 이래 1990년대 지능형 로봇으로 발전하였으며 복잡한 작업을 수행하는 산업용 로봇으로부터 생활 지원 로봇, 헬스케어 지원 로봇 등 다양한 형태로 활용되고 있다.



그림 39. 로봇 기술 및 로봇 제품의 발전과정.

가트너(Gartner)의 2013년, 2016년 미래 유망기술 전망을 요약하여 정리하면 4차 산업혁명과 관련이 있는 기술들이 산업화되는 시기를 예측해볼 수 있다. 가트너 보고서에 제시되어 있는 기술들을 4차 산업혁명을 선도할 기술군으로 분류하여 산업화될 시기로 나타내면 그림 40과 같다(거시적 로드맵). 예를 들어 3D 프린팅 기술은 기업형 3D 프린팅은 이미 산업화가 진행 중이며 일반 소비자용 3D 프린팅이나 3D 스캐너는 조만간 산업화될 전망이다. 4D 프린팅 기술은 2025년 이후 산업화가 진행될 것으로 보인다. 언어 인식, 자율 주행, 통신, 컴퓨팅 및 분석 등 여러 핵심기술 분야에서 일부 기술들이 산업화되고 있어서 대부분 상당한 수준의 기술 성숙도를 갖고 있음을 알 수 있다. 특히 2023년까지는 대부분의 기술이 산업화될 것으로 예측되므로 4차 산업혁명이 빠르게 진전될 것이라는 추측을 할 수 있다.



그림 40. 주요 핵심기술의 산업화 시기 (Gartner 2013/2016).

(4) 각국 및 기업의 대응

가. 공공부문의 대응

독일이 2010년 이후 ‘인더스트리 4.0(Industry 4.0)’을 본격 추진하기 시작한 것이 도화선이 된 이후 주요 선진국들은 예외 없이 차세대 생산혁신에 관한 국가 차원의 프로그램을 추진 중에 있다(그림 41). 명칭에 관계없이 생산혁신(제조혁신)을 통하여 성장 동력을 확보하고 국가 경쟁력을 높이는데 초점이 맞춰져 있다. 미국과 영국은 2011년 ‘첨단제조파트너십 2.0(Advanced Manufacturing Partnership 2.0)’, ‘Catapult Centers’ 프로그램에 각각 착수하였다. 이탈리아와 벨기에에는 ‘지능형 공장 클러스터(Intelligent factories clusters)’의 이름으로 2012년, 2014년에 각각 착수하였다. 일본은 ‘재홍/로봇 전략(Revitalization/Robots strategy)’을 2014년, 중국은 ‘중국제조 2025(Made in China 2025)’를 2015년, 프랑스는 ‘미래 산업(Industrie

du futur)'을 2015년, 우리나라는 '제조혁신 3.0'을 2015년에 각각 착수하였다. 이러한 국가 차원의 대형 프로그램 외에도 단독 혹은 이들 프로그램과 연결하여 추진하고 있는 프로그램들이 다수 있다.



그림 41. 주요 선진국들이 추진 중인 생산혁신(제조혁신) 프로그램.

① 유럽(EU)의 대응

EU의 선진 산업국들은 자국 사정에 맞춘 생산혁신 프로그램들을 추진하고 있다 (그림 41). 각국의 프로그램과는 별도로 EU는 EU 전체 차원에서 독일의 인더스트리 4.0을 인정하고 공동보조를 맞춰가고 있다.

그림 42는 독일이 인더스트리 4.0을 추진해온 과정을 요약한 것이다. 독일은 세계 경제 위기가 발생하기 훨씬 전부터 제조업 혁신을 위한 준비를 해왔다. 1999년의 IoT, 2000년 맞춤형 수요 증가에 대한 대응 논의, 2004~5년의 스마트 공장(팩토리), 2006년의 CPS, 2007년의 서비스 인터넷(Internet of Service) 등을 통한 이해당사자들간의 논의를 거쳐 2010년 인더스트리 4.0을 발의하고 2011년 착수하였다. 인더스트리 4.0을 출범한 이후 실행계획(2012), 실현전략(2015), 10대 강령(2017년 6월)을 차례로 추진해가고 있다.



그림 42. 독일의 인더스트리 4.0 추진 과정.

인더스트리 4.0은 IoT-서비스-데이터-사람 간을 초고속으로 연결(네트워크화)하여 미래 제조업을 변화시키는 것을 추구하며 완전히 새로운 것이 아니라 제조업과 관련이 있는 전체 가치사슬 과정의 조직화와 경영에 있어서 진보된 단계를 말한다. 인더스트리 4.0은 표 9와 같은 네 가지 특징을 갖고 있다.³²⁾ 수직적 통합의 결과물이 가상-실제 (통합) 시스템(cyber-physical systems, CPS)이라고 할 수 있다. PCS는 서비스 인터넷과 사물 인터넷(IoT) 사이에 있는 모든 영역에 적용된다 (그림 43).

32) Industry 4.0 – Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies, Deloitte (Audit. Tax. Consulting. Corporate Finance.).

표 10. 인더스트리 4.0의 특징

특징	대상	특기사항
수직적 네트워킹	스마트 생산시스템(스마트 공장 및 스마트 제품), 스마트 물류/생산/마케팅의 네트워킹, 스마트 서비스	수요지향적, 개인화된, 고객맞춤식의 생산 운영
수평적 통합	새로운 세대의 글로벌 가치창출 네트워크를 통하여 실시간 최적화된 네트워크 구축(사업 파트너와 고객의 통합, 새로운 사업 협력 모델)	통합된 투명성, 높은 수준의 유연성, 글로벌 최적화
통합적 엔지니어링	전체 가치사슬(전체 제품수명주기)	생산과정뿐만 아니라 최종제품까지 포함
급속히 발전 하는 기술*을 통한 가속	새로운 기술이 아니더라도 대규모 시장에 적용 가능한 기술 (데이터 및 정보)	개인별 맞춤식 솔루션, 유연성, 비용절감 가능

* Exponential technologies: 가격이나 크기를 줄일 수 있거나 계산능력을 크게 키울 수 있는 기술 (예시: AI, 첨단 로봇 및 센서 기술, 기능성 나노소재 및 나노센서, 3D 프린팅(AM) 등)



그림 43. 사이버-실제 통합 시스템의 적용 영역.

인더스트리 4.0의 주요 내용을 그림으로 나타내면 그림 44와 같다.³³⁾ 핵심요소인 수직 및 수평 가치사슬의 디지털화와 통합, 제품 및 서비스 제공의 디지털화, 디지털 사업모델 및 고객 접촉을 핵심 역량인 데이터 및 해석과 접목함으로써 모바일 기기 등 여러 가지 산업에 혁신을 불러온다. 그림 44와 같이 여러 산업 부문에서 디지털화가 가능하게 되는 것은 표 10에 나타낸 것과 같은 디지털 기술과 관련이 있는 파괴적 기술들이 빠르게 발전하고 있기 때문이다.



그림 44. 인더스트리 4.0의 프레임과 여기에 기여하는 디지털 기술.

33) Industry 4.0: Building the digital enterprise (2016 Global Industry 4.0 Survey – What we mean by Industry 4.0 / Survey key finding / Blueprint for digital success) (www.pwc.com/industry40).

표 11. 제조업 부문의 디지털화를 가능하게 할 파괴적 기술들 (McKinsey)

기술영역	데이터, 계산 능력, 연결도	분석 및 지능	인간-기계 상호작용	디지털-실제 변환
세부기술	빅데이터/개방 데이터 계산, 저장, 센서의 획기적인 비용 축소	지식작업의 디지털화 및 자동화 인공지능 및 기계학습의 발전에 돌파구	터치 장치 및 차세대형 GUI 소비자형 장치를 통한 빠른 확산	부가 제조(AM) (예: 3D프린팅) 소재영역 확장, 프린터 가격의 빠른 하락, 향상된 정밀도/품질
	IOT/M2M 소규모 하드웨어 및 연결 비용 축소	첨단 분석 개선된 알고리즘 및 크게 향상된 데이터 활용성	가상 및 증강 현실 머리 착용형 광학 디스플레이의 돌파구	첨단 로봇(예: 인간-로봇 협력) 인공지능, 기계시각, M2M 통신, 값싼 액튜에이터 분야의 발전
	클라우드 기술 데이터의 집중화 및 저장의 가시화			에너지 획득 및 저장 점증하는 저렴한 에너지 저장, 혁신적인 에너지 획득 방법

지금까지의 인더스트리 4.0에 관한 설명 전반에 깔린 전제는 지금 현재 구축되어 있는 제조설비 혹은 현재의 제조기술과 디지털 기술을 접목하거나 통합하는 것이다. 따라서 인더스트리 4.0은 이전의 인더스트리 1.0~3.0(1차~3차 산업혁명)에 비하여 적은 장비 대체율로 큰 파급효과를 거둘 수 있는 환경을 갖고 있다. McKinsey 분석에 따르면 인더스트리 4.0은 2차 산업혁명 시 수차 혹은 증기기관으로 돌리던 기기를 전기로 동작시킬 때 전기모터를 설치하는 것만으로 효과를 볼 수 있었던 것(장비 대체율 10~20%) 다음으로 낮은 장비 대체율(40~50%)을 보일 것으로 예상된다(그림 45).³⁴⁾

34) Industry 4.0 – How to navigate digitization of the manufacturing sector, McKinsey Digital 2015, McKinsey & Company.



그림 45. 제4차 산업혁명은 그 이전의 산업혁명에 비해 상대적으로 장비 대체 수준이 낮기 때문에 상대적으로 큰 파급효과를 줄 것임.

인더스트리 4.0으로 얻을 수 있는 경제적 효과는 2020년 기준 약 90조 달러가 될 것으로 예측하고 있다(그림 46).³⁵⁾ 이는 3차 산업혁명이 거둔 경제적 효과(약 20조 달러)의 4.5 배에 해당하는 것이다. 또한 인더스트리 4.0의 결과로 얻게 될 고용 창출 효과는 2015년 대비 2025년 기준 약 6% 증가한 규모가 될 것으로 예측하고 있다(그림 47).³⁶⁾ 디지털화에 따라 여러 부문에서 새로운 기술자 혹은 숙련공을 필요로 할 것이기 때문에 기계공학 분야 등에서 상당한 고용이 창출될 것으로 예상되며 이미 디지털화가 많이 진행된 자동차산업 부문에서는 상대적으로 적은 고용 창출 효과를 나타낼 것으로 전망된다.

35) Stefan Heng: Industry 4.0 – Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon, Deutsche Bank Research (April 23, 2014).

36) Michael Rüßmann et al.: Industry 4.0 – The future of productivity and growth in manufacturing industries, The Boston Consulting Group(BCG) (April 2015).



그림 46. 산업혁명별 세계 총생산(GDP) 규모 (미국 달러화 기준; 구매력으로 환산한 값).



그림 47. 인더스트리 4.0의 추진으로 얻게 될 독일 내 고용 창출 효과.

독일은 그림 43에 나타낸 다양한 CPS 부문을 실행에 옮기기 위하여 분야별로 지속적인 지원을 하고 있다. 그림 48은 2005년부터 2021년까지 독일이 추진해갈 IoT(internet of things), IoS(internet of service), IoE(internet of energy) 분야의 현황을 나타낸 것이다. 4~5년 기간의 지원 프로그램을 이어가고 있는 것을 알 수 있다(대략 5 년 주기로 사업성과를 분석하여 변하는 환경을 반영하여 성과를 제고하기 위한 것으로 보임).



그림 48. 인더스트리 4.0 프로그램 관련 IoT, IoS, IoE 부문의 사업 추진 현황.

② 미국의 대응 : 산업 인터넷 컨소시엄 (IIC)

인더스트리 4.0과 거의 같은 내용으로 미국이 추진하고 있는 산업 인터넷 컨소시엄(IIC)을 인더스트리 4.0과 비교하면 상당한 차이를 발견할 수 있다(많은 부분에서 유사성이 있으므로 IIC에 관한 상세한 내용을 설명할 필요는 없어 보임)(표 11 참조³⁷⁾). 가장 큰 차이는 인더스트리 4.0은 중소기업을 대상으로 한 정부 주도형이며 IIC는 다국적 대기업을 중심으로 하는 민간 주도형이라는 점이다. 인더스트리 4.0이 제조업 부문을 대상으로 한 것이라면 IIC는 제조업뿐만 아니라 에너지에서 농업에 이르기까지 많은 산업 부문을 대상으로 하고 있다. 따라서 인더스트리 4.0의 주된 관심사가 생산(제조)이라면 IIC의 주된 관심사는 자산이다. 인더스트리 4.0과 IIC의 비교에서 흥미로운 점은 독일은 인더스트리 4.0을 추진하면서 4차 산업혁명을 염두에 두고 있지만 미국이 추진하고 있는 IIC는 여전히 3차 산업혁명의 틀 내에서 고려되고 있다는 점이다.

37) Kris Bledowski: The internet of things: Industrie 4.0 vs. the industrial internet, MAPI Foundation ((July 23, 2015).

표 12. 인더스트리 4.0과 산업 인터넷 컨소시엄의 비교 (출처: MAPI 재단)

비교 대상	인더스트리 4.0	산업 인터넷 컨소시엄 (IIC)
핵심 주도자	독일 정부	다국적 대기업
핵심 이해관계자	정부, 학계, 업계	업계, 학계, 정부
산업혁명 구분	제4차 산업혁명	제3차 산업혁명
지원 플랫폼	정부의 산업 정책	개방형 회원제의 비영리 컨소시엄
집중 영역	산업	제조업, 에너지, 수송, 헬스케어, 유틸리티, 도시, 농업
집중 기술	공급사슬 조정, 내재형 시스템, 자동화, 로봇	소자 통신, 데이터 흐름, 소자 제어 및 통합, 예측 분석, 산업 자동화
전반적 대상	하드웨어	소프트웨어, 하드웨어, 통합
지리적 대상	독일 및 독일 기업	글로벌 시장
대상 기업	중소기업	모든 기업
최적화 대상	생산 최적화	자산 최적화
표준화 대상	과제에 따라	표준관련 기구의 추천
경제적 접근	규범적 경제	낙관적 경제
전반적인 업계 접근	대응적	선행적

세계경제포럼이 제시하고 있는 산업 인터넷 프로젝트의 프레임은 그림 49와 같다. 산업 인터넷의 최종적인 관심은 새로운 비즈니스 모델이나 산업 생태계를 창출해내고 전반적인 경제 성장으로 이어가는 것이다. 실행할 영역과 공공 정책을 선택한 이후 산업 인터넷을 도입함에 따라 새로운 기회가 생기는 반면 기존의 산업이나 비즈니스가 붕괴되는 전환과정을 거치게 된다. 전환과정 동안에는 새로운 제품과 서비스를 창출하는 것으로부터 작업방식을 변형하는 것까지 다양한 실행방안들의 수행이 필요하다. 현재 시점에서 산업 인터넷의 추진이 가능한 것은 클라우드 등 여섯 가지 핵심 요인이 성숙되어 있기 때문이다. 반면에 보안, 현재의 운용기술(OT) 및 인프라, 낮은 상호 운용성, 프라이버시, IT 대기업 외의 낮은 신규 투자, 높은 위험도 등 극복하여야 할 장애요인들도 있다.



그림 49. 세계경제포럼의 산업 인터넷 프로젝트 프레임.

산업 인터넷의 추진으로 거둘 수 있는 경제 성과는 글로벌 총생산 기준 약 70조 달러로 추산된다. 이중 29조 달러는 개발 경제에서 오게 될 것이며 첨단 경제 부문에는 41조 달러의 효과가 있게 될 전망이다. 즉 산업 인터넷이 큰 영향을 미치게 될 부분은 개발 부문보다는 첨단 경제 부문이다. 또한 산업 인터넷은 전체적으로 경제 부문보다는 경제 외적인 부문에 큰 영향을 미치게 될 것이다. 현재를 기준으로 평가했을 때 산업 인터넷으로 얻게 될 기회는 글로벌 경제의 46% 수준이다. 산업 인터넷에서 예측하는 성과(70조 달러)는 인더스트리 4.0이 예상하고 있는 경제 성과인 90조 달러(2020년) 규모보다는 적다(그림 50).



그림 50. 산업 인터넷의 잠재적 세계 총생산 규모.

③ 일본의 대응

4차 산업혁명에서 리더십을 갖고자 하는 일본의 전략은 ‘새로운 산업구조의 비전’에 압축되어 있고 이는 2015년 내각이 결정한 ‘일본재통전략’을 수정한 것이다. 전략 수립의 전체 배경이나 필요성은 인더스트리 4.0과 크게 다르지 않다. 일본은 다음의 7 개의 전략을 추진 중에 있다.

- 데이터 활용을 촉진하는 환경 구축
- 인적 자원의 개발 및 채용, 고용 시스템의 유연성 향상
- 혁신 및 기술개발의 가속 (Society 5.0)
- 재정 역량 강화
- 산업 및 고용 구조의 전환 촉진
- 4차 산업혁명 효과의 중소기업 및 지역경제로의 확산
- 4차 산업혁명을 위하여 복잡한 경제 및 사회 시스템의 확립

7 개의 전략 중 인더스트리 4.0에 직접 대응하는 부분이 ‘혁신 및 기술개발의 가

속’이며 ‘Society 5.0’의 명칭으로 특별한 전략으로 추진 중에 있다. Society 5.0은 기업, 대학, 연구기관들에서의 폐쇄적인 연구개발로 기관간 연구비 확보, 인적 자원, 기술, 데이터의 이동이 효율적이지 못하다는 것과 일본 창업기업(start-up)이 아직 까지 글로벌 수준에서 경쟁할 역량을 갖고 있으며 일본이 글로벌 창업가 및 지원가 네트워크에서 배제되어 있음을 인식하여야 한다는 문제의식을 바탕으로 하고 있다. 전략을 추진하는 기본 방향은 산학 협력 부문에서 향후 10년간 대학 및 연구기관에 대한 투자규모를 3 배로 늘리며 창업기업을 지역 시장에서 글로벌 시장으로 연결하는 지원시스템을 강화하고, 글로벌 창업가 및 지원가 네트워크의 허브가 되도록 하며, 대기업과 창업기업간 전략적인 협력을 강화하는 것이다. (글로벌 네트워크 분석의 방법으로 2003년 및 2013년 국제공동 저작 논문을 분석한 결과(그림 51에서 왼쪽이 2003년 자료이며 오른쪽이 2013년 자료임)에서 중국의 급격한 성장과 함께 미국, 독일, 영국, 프랑스 역시 상당한 성장을 보였다. 우리나라도 상당한 성장을 보이긴 하였으나 주요 경쟁국들보다는 낮은 성장을 보였다.)



그림 51. 국제공동 저작 논문 분석을 통한 글로벌 네트워크 구축 현황
(2003년(왼쪽), 2013년(오른쪽)).

새로운 산업구조의 비전에서 나노기술에 관한 직접 언급은 없지만 Society 5.0 전략을 추진하는 내용은 일본의 ‘과학기술기본계획’에 담겨 있다(그림 52). 제5기 과학기술기본계획(2016~2020년)에서는 제4기에 도입한 ‘과제해결형 접근’에 ‘미래 창생형 접근’에 대한 고려를 추가하고 특히 나노기술·재료과학을 초스마트 사회의 바탕이 되는 ‘중요한 기반기술’로서의 위치에 두고 있다.



그림 52. 일본의 과학기술기본계획에 담긴 나노기술•재료 부문의 성격 변화.

일본이 말하는 초스마트 사회는 「필요한 물건•서비스를, 필요한 사람에게, 필요한 시간에, 필요한 만큼을 제공하여 사회의 다양한 니즈에 효율적으로 섬세하게 대응할 수 있고 모든 사람이 양질의 서비스를 받을 수 있고, 연령, 성별, 지역, 언어 등에 관계없이 편안하게 살 수 있는 사회」이다. ICT를 최대한 활용하여 사이버 공간과 물리적 공간(현실 세계)을 융합시킨 활동을 통해 사람들에게 풍요로움을 가져다주는 미래사회의 모습으로 공유하고 미래사회 실현을 위한 일련의 활동으로서 “Society 5.0”을 강력하게 추진하고 있다.

실현 활동으로 초스마트 사회의 경쟁력 향상을 위한 기반기술 등의 강화를 위하여 ① 초스마트 사회 서비스 플랫폼 구축에 필요한 IoT 시스템 구축 기술, 빅 데이터 기술, AI 기술 등 기반기술을 개발하고 ② 개별 시스템에서 새로운 가치 창출의 핵심 강점을 갖는 혁신적인 구조재료 및 신기능 재료 등 다양한 구성 요소의 고도화에 따라 시스템의 차별화된 ‘소재•나노기술’을 기반기술로 개발하며 ③ 10년 정도 앞을 내다보는 중장기 시각에서 각 기술별 높은 성취 목표를 설정, 특히 기초연구로부터 사회 실현까지 선형모델로 진행하는 것이 아니라 서로 자극하는 나선형 연구개발을 통하여 새로운 과학을 창출하고 혁신 기술의 실현, 실용화, 사업화를 동시에 병행하여 추진할 수 있는 환경을 정비하여 기반기술을 강화하고 있다.

일본은 제2기 및 제3기 과학기술기본계획 수행 기간 중에는 나노기술•재료 부문

을 4대 중점분야에 포함시켜 연구개발을 추진하였다. 제4기 과학기술기본계획 이후 (2011년 이후)에는 재료 부문은 나노기술·재료에서 분리하여 산업경쟁력을 강화하는 ‘공통기반’으로, 나노기술은 여러 분야에 걸쳐있는 횡단적(cross-cutting) 성격을 갖는 ‘기반기술’로 분류하여 추진하고 있다. 나노기술이 Society 5.0에 기여하는 부분은 사회과제 해결 부분이다.

실제로 2017년도 예산 시책에 반영된 나노기술·재료기반기술 영역의 사업들을 보면 Society 5.0 실현에 관한 사업과 경제·사회의 니즈 과제에 대응하는 내용을 담고 있다(표 12). 계획 추진에 참여하고 있는 내각의 부처도 공업성(工), 경제성(經), 총무성(總), 농업성(農), 내각과학성(內科), 환경성(環), 후생성(フ), 임업성(林) 등 다양하다. 2002년에 시작된 사업부터 최근에 시작된 사업까지 다양하며 2018~2021까지 추진할 예정으로 있다. 하나의 분야, 예를 들어 ‘전자소자’ 같은 경우는 여러 기술 분야를 동시에 개발을 수행하고 있다. 사업기간도 5년에서 10년 이상 14년까지 다양하며 2020년 이후에 수렴되는 것으로 보인다.

표 13. 2017년도 중심을 둔 시책 ‘나노기술·재료기반기술 영역’

영역	분류	시책기호	기간	시책명
Society 5.0의 실현에 중요한 기술 영역	전자 소자	工·經18 (계속)	2013~17	차세대 스마트 소자 개발 프로젝트
		工·經17 (계속)	2012~21	초저소비전력 형광전자(electronics) 실장시스템 기술 개발
		工·總01 (계속)	2002~20	‘Photonic network 기술에 관한 연구개발’ 및 ‘빅데이터 유통의 기반이 되는 차세대 광 네트워크 기술의 연구개발’
		工·總02 (계속)	2011~20	‘초고주파 ICT의 연구개발’ 및 ‘테라헤르츠파 소자 기반기술의 연구개발’
		工·文04 (신규)	2017~	스커미온(Skyrmion)을 이용한 초저소비전력 소자 기술의 개발
		①·經01 (계속)	2016~20	IoT 축진을 위한 기술(cross- cutting) 기술 개발 프로젝트
	로봇 & 액추에이터	も·經04 (계속)	2015~19	로봇 활용형 시장화 적용기술 개발 프로젝트
		①·經02 (계속)	2015~19	차세대 인공지능·로봇 중핵기술 개발
		地·經02 (계속)	2013~17	로봇 간호기기 개발·도입 축진 사업
	기반·공통 기술	①·文05 (신규)	2008~22	광·양자 기술에 관계된 연구기반 강화
		フ·農06 (신규)	2017~21	잠업혁명으로 신산업 창출 프로젝트
		①·文02 (신규)	2012~21	나노기술·재료에 관한 최첨단 연구기기의 공용 플랫폼 형성
경제·사회의 다양한 니즈·과제에 의 대응	구조 재료	工·內科03(계속)	2014~18	SIP ‘혁신적 구조재료’
		工·經01 (계속)	2013~22	수송기기의 발본적인 경량화에 도움이 되는 신구조재료 등의 기술개발 사업
		工·環03 (계속)	2015~20	셀룰로즈 나노섬유(CNF) 등의 차세대 소재 활용 축진 사업
		工·文14 (계속)	2012~21	효율적 에너지 이용을 위한 혁신적 구조재료의 개발
		工·文12 (계속)	2004~19	저연비·저환경 부하에 관계된 고효율 항공기 기술 개발
	전력 반도체	工·內科02(계속)	2014~18	SIP ‘차세대 전력 반도체’
		工·經04 (계속)	2013~19	전기기기 성능 향상을 위한 차세대 전력 반도체기술 개발 사업
		工·文05 (신규)	2016~20	에너지 절약 사회의 실현에 도움이 되는 차세대 반도체의 연구개발 촉진
	기능성 재료	工·經01 (계속)	2013~22	수송기기의 발본적인 경량화에 도움이 되는 신구조재료 등의 기술개발 사업
		工·文15 (계속)	2012~21	희소원소에 의존하지 않는 신규 고성능 영구자석 재료의 연구 개발
	촉매 기술	工·經09 (계속)	2012~21	혁신적 촉매에 의한 화학제품 제조 프로세스 기술 개발
	통합형 재료 개발 시스템	材·內科01 (계속)	2014~18	SIP ‘혁신적 구조재료’: 소재 통합
		材·文01 (계속)	2015~19	정보통합형 물질·재료 개발 촉진
		材·經01 (계속)	2016~21	계산과학 등에 의한 첨단 기능성 재료 기술개발 사업
		材·經02 (신규)	2017~21	기능성 재료의 사회적용에 기반이 되는 고속·고효율 안전성 평가 방법의 개발
		①·文04 (계속)	2012~25	AIP: 인공지능/빅데이터/IoT/사이버보안 통합 프로젝트

④ 중국 : 중국제조 2025 (Made in China 2025) (중국)

독일의 인더스트리 4.0에 상응하는 중국의 제조업 혁신 전략은 ‘중국제조 2025’이다(2015년 5월 18일 발표). 중국제조 2025는 중국의 제조업 수준을 독일, 일본 수준으로 끌어올리는 1단계(2015~2025), 글로벌 제조강국(미국)의 중간 수준까지 높이는 2단계(2025~2035), 세계 시장을 선도하는 세계 제조업 제1강국이 되는 3단계(2035~2049)로 구성되어 있다. 중국제조 2025는 중국의 성장동력이 될 10대 산업을 지정하여 육성하고 있다.³⁸⁾ 이러한 목표를 달성하기 위하여 중국은 산업구조 고도화를 위한 제조업 혁신력 강화, IT와 제조업의 융합을 지속적으로 확대, 제조업 품질향상으로 브랜드 창출, 친환경 제조업 육성을 추진하고 있다. 2025년까지 목표로 하는 주요 지표는 표 13과 같다.

중국은 제조 역량을 끌어올려 중국제조 2025의 목표를 달성하기 위하여 법률에 기반을 둔 정부행정을 활용하여 전면적으로 촉진하는 등 구조적인 체계들을 재편하고 공정한 시장 환경을 조성하며 재정지원 정책, 회계 및 조세 정책을 강화하는 전략을 실행하고 있다. 또한 여러 수준의 재능 육성 체계를 구축하고 중소기업 정책을 강화하며 제조업 부문의 개방성을 높이는 전략을 추진하고 있으며 이러한 전략을 수행하기 위하여 필요한 조직과 적용 체계를 구축하고 있다.

38) 중국제조 2025의 10대 산업 분야: ① 차세대 정보기술(반도체, 정보통신, OS 및 산업용 S/W), ② 고정밀 수치제어 및 로봇(고정밀 수치제어, 로봇), ③ 항공우주장비(항공장비, 우주장비), ④ 해양장비 및 첨단기술선박, ⑤ 선진 체도교통설비, ⑥ 에너지 절약 및 신에너지 자동차, ⑦ 전력설비, ⑧ 농업기계장비, ⑨ 신소재, ⑩ 바이오의약 및 고성능 의료기기.

표 14. 중국제조 2025의 연도별 주요 지표

분류	지표	2013	2015	2020	2025
혁신역량	규모 이상 제조업체 매출액 대비 R&D 지출 비중(%)	0.88	0.95	1.26	1.68
	규모 이상 제조업체 매출 1억 위안당 발명특허수(건)	0.36	0.44	0.7	1.1
질적 성과	제조업 품질경쟁력 지수 ¹⁾	83.1	83.5	84.5	85.5
	제조업 부가가치 증가율 제고 (2015년 대비 증가 비율(%))	—	—	2.0	4.0
	제조업 노동생산성 증가율(%)	—	—	7.5 ²⁾	6.5 ³⁾
IT 제조업 융합	인터넷 보급률 ⁴⁾ (%)	37	50	70	82
	디지털 R&D 설계 도구 보급률 ⁵⁾ (%)	52	58	72	84
	핵심공정 CNC 비중 ⁶⁾ (%)	27	33	50	64
친환경 성장	규모 이상 기업의 산업생산량 단위당 에너지 소모 감축 비율(%) (2015년 이후)	—	—	18	34
	산업생산량 단위당 이산화탄소 배출 감축 비율(%) (2015년 이후)	—	—	22	40
	산업생산량 단위당 수자원 사용 감축 비율(%) (2015년 이후)	—	—	23	41
	공업용 고체폐기물 사용률(%)	62	65	73	79

자료: 「중국제조 2025」

- * 주: 1) 중국 제조업의 수준을 평가한 경제·기술 종합지수
 2) 13차 5개년 계획 기간(2016~2020년) 중 연평균 증가율
 3) 14차 5개년 계획 기간(2021~2025년) 중 연평균 증가율
 4) 인터넷 보급률은 유선 인터넷 보급률을 의미:
 - 유선인터넷 보급률=유선인터넷 사용 가구수/총 가구수
 5) 디지털 R&D 설계도구 보급률=디지털 R&D 설계도구를 보유한 규모 이상 기업수/총 규모 이상 기업수(샘플조사 기업수: 3만 개)
 6) 핵심공정 CNC 비중은 규모 이상 기업의 핵심공정 CNC 비중의 평균치

⑤ 우리나라의 대응

우리나라도 독일의 인더스트리 4.0과 유사한 내용을 담은 '제조업 혁신 3.0'을 2015년부터 추진하고 있다. 제조업 혁신 3.0은 제조업과 IT 융합을 통해 생산 현

장, 제품, 지역 생태계를 혁신하고 성공사례를 조기에 창출하여 제조업 전반으로 확산시켜 제조업을 혁신하는 목표를 갖고 있다. 이를 위하여 4대 추진 방향과 13대 세부 추진과제를 설정하고 실행에 옮기고 있다(표 14). 2020년까지 1만 개 공장의 스마트화, 빅데이터·클라우드·홀로그램·CPS·스마트센서·IoT·3D 프린팅 등 스마트 제조기술 개발, 제조업 소프트파워 강화, 지능형 소재·부품 개발, 규제 개선, 인력 양성 등을 추진 중에 있다. 제조업 혁신 3.0은 정부가 주도하지만 민관이 공동재원을 마련하는 등 산업계가 참여하는 프로그램이다.

표 15. 제조업 혁신 3.0의 추진방향 및 세부 추진과제

4대 추진방향	13대 세부 추진과제
1. 스마트 생산방식 확산	① 스마트공장 보급·확산
	② 8대 스마트 제조기술 개발
	③ 제조업 소프트파워 강화
	④ 생산설비 고도화 투자 촉진
2. 창조경제 대표 신산업 창출	① 스마트 융합제품 조기 가시화
	② 30대 지능형 소재·부품 개발 및 사업화
	③ 민간 R&D 및 실증 투자 촉진
3. 지역 제조업의 스마트 혁신	① 창조경제혁신센터를 통한 제조업 창업 활성화
	② 지역 거점 산업단지의 스마트화
	③ 지역별 특화 스마트 신산업 육성
4. 사업재편 촉진 및 혁신기반 조성	① 기업의 자발적 사업재편 촉진
	② 융합신제품 규제시스템 개선
	③ 제조업 혁신을 뒷받침하는 선제적 인력 양성

4차 산업혁명을 선도하는 주요 기술 분야에서 우리나라의 수준은 표 15와 같다(한국경제 2017년 4월 28일). 최고 선진국인 미국 대비 75~85% 수준에 해당하는 기술력을 갖고 있다. 우리나라가 선도하고 있는 기술 영역(80% 이상의 기술력 보유 영역)은 5세대 이동통신, 지능형 반도체, 실감형 콘텐츠, 웨어러블 스마트 디바이스 등이다. 우리가 선도하는 영역의 기술 격차는 2~3 년이다. 75~80% 범위에 있는 추격그룹에 속한 기술 영역들은 약 4 년 정도의 기술 격차를 갖고 있다. (지금과 같이 빠른 기술 발전 속도를 감안하면 일차적으로는 기술 격차를 좁히는데 역량을 집중하여야 하며 최소한 더 벌어지지 않도록 하여야 한다. 4차 산업혁명에 대한 대응이 본격화되면서 선진국들의 집중 투자로 이들 영역들의 발전속도가 더욱

가속되고 있어서 우리 역시 적극적인 대응을 할 필요가 있다.)

표 16. 4차 산업혁명 관련 주요 기술 수준 비교 (한국경제 2017. 4. 28.)

산업명	최고 기술 보유국	최고 기술 보유국 대비 한국 수준		
		기술수준 그룹	기술수준 (%)	기술격차 (년)
5세대 이동통신	미국	선도	84.7	2.1
지능형 반도체	미국	선도	83.8	3.1
실감형 콘텐츠	미국	선도	83.1	2.8
웨어러블 스마트 디바이스	미국	선도	82.5	2.9
스마트 자동차	미국	추격	79.2	3.7
융복합소재	미국	추격	79.0	3.7
신재생에너지 하이브리드시스템	미국	추격	78.5	4.0
빅데이터	미국	추격	78.4	3.7
지능형 사물인터넷	미국	추격	77.7	4.2
맞춤형 웰니스케어	미국	추격	76.7	4.3
지능형 로봇	미국	추격	74.8	4.2

우리나라는 최근 제조업 혁신 3.0에 착수하였으므로 우리의 수준이나 4차 산업혁명에서의 성공 가능성을 가늠하기 힘들다. 우리보다 먼저 착수한 독일이나 미국도 비교적 최근에 추진을 시작하였으므로 상호 비교가 큰 의미가 없을 수 있으며 오히려 현재의 경쟁력이 반영될 가능성이 높다. 이러한 한계에도 불구하고 세계경제포럼(World Economic Forum, WEF)은 각국의 상대적인 경쟁력을 평가한 바 있다. WEF가 4차 산업혁명의 영역(4 개 영역³⁹⁾)을 사용하여 평가한 상대적인 글로벌 경쟁력 순위를 보면 표 16과 같다(표 16에서 각 항목의 세부내용은 각주 40의 참고문헌을 참고하기 바람).⁴⁰⁾ 표 16에서 상대적인 수치(등위) 값이 작을수록 경쟁력이 높은 것에 해당한다. 우리나라는 전반적 파급효과에서 25번째 위치에 있다. 가장 순위가 낮은 항목은 노동구조의 유연성(83위)으로 다른 항목에 비하여 특히 낮

39) WEF가 제4차 산업혁명에서 경제적인 성공 여부를 판단하기 위하여 분류한 영역: ① 노동 대체를 위한 자본, ② 기술 및 불평등, ③ 인프라구조 및 관성(기존 환경을 쉽게 버리지 못하는 것), ④ 법체계의 견고함 및 유연성.

40) Extreme automation and connectivity: The global, regional, and investment implications of the fourth industrial revolution, UBS White Paper for the World Economic Forum Annual Meeting 2016 (January 2016).

은 위치에 있다. 법적인 보호 부문에서도 낮은 수준(62.25; 최고 수준은 3.4)에 있다. 반면에 기술(skill) 수준과 새로운 직업 선택을 위한 적응기술 교육 항목은 20 위권으로 비교적 높은 위치에 있다. 인프라 구조의 적절성 역시 높은 수준(20.0; 최고 수준은 3.5)에 있다. 4차 산업혁명에서 가장 크게 변하게 될 부분으로 노동(직업) 부문이 거론되고 있다. 많은 직업이 사라지고 새로운 직업이 출현하겠지만 전체 직업의 수가 줄어들 것이라는 전망이 많다. 새로운 직업을 선택할 수 있게 하는 적응기술 교육을 허용하는 항목에서 비교적 상위(19위)에 있는 기반을 노동구조의 유연성에서의 불리함을 극복하는데 어떻게 활용할 것인가가 4차 산업혁명에서의 성공을 위해 풀어야 할 숙제 중의 하나이다.

표 17. 4차 산업혁명의 영역을 활용하여 분석한 각국의 상대적 경쟁력 순위
(세계경제포럼 글로벌 경쟁력 보고서에서 인용한 자료를 재인용)

국가	노동구조 유연성	기술 수준	적응기술 교육	인프라구조 적절성	법적 보호	전반적 파급효과	시장: 개발(DM). 부상(EM). 개척(FM)
스위스	1	4	1	4.0	6.75	3.4	DM
싱가포르	2	1	9	3.5	9.00	4.9	DM
네덜란드	17	3	8	6.5	12.50	9.4	DM
핀란드	26	2	2	19.0	1.25	10.1	DM
미국	4	6	4	14.0	23.00	10.2	DM
영국	5	18	12	6.0	10.00	10.2	DM
홍콩	3	13	27	4.5	10.00	11.5	DM
노르웨이	9	7	13	19.0	11.50	11.9	DM
덴마크	10	9	10	15.5	17.75	12.5	DM
뉴질랜드	6	10	24	21.5	6.25	13.6	DM
스웨덴	20	12	7	12.0	19.75	14.2	DM
일본	21	21	5	12.0	18.00	15.4	DM
독일	28	17	6	9.5	18.75	15.9	DM
아일랜드	13	15	21	19.0	11.50	15.9	DM
캐나다	7	19	22	16.0	20.50	16.9	DM
대만	22	14	11	20.0	31.25	19.7	EM
호주	36	8	23	18.5	17.75	20.7	DM
오스트리아	40	16	17	19.5	17.25	22.0	DM
벨기에	54	5	16	17.5	21.5	22.8	DM
프랑스	51	25	18	12.0	31.00	27.4	DM
이스라엘	45	28	3	26.0	38.50	28.1	DM
말레이시아	19	36	20	35.5	34.50	29.0	EM
포르투갈	66	26	28	24.5	32.25	35.4	DM
체코	47	29	35	35.0	44.75	38.2	EM
한국	83	23	19	20.0	62.25	41.5	EM
칠레	63	33	50	42.0	39.25	35.4	EM
스페인	92	30	37	17.5	61.25	47.6	DM
중국	37	68	31	56.5	64.25	51.4	EM
카자흐스탄	18	60	72	59.5	68.25	55.6	FM
폴란드	81	31	64	48.5	58.00	56.5	EM
러시아	50	38	68	47.5	114.00	63.5	EM
태국	67	56	57	51.0	88.00	63.8	EM
이탈리아	126	45	32	31.5	87.75	64.5	DM
헝가리	77	57	51	48.0	90.25	64.7	EM
남아공	107	83	38	59.0	42.75	66.0	EM
그리스	116	43	77	35.0	67.00	67.6	FM
필리핀	82	63	48	79.0	78.00	70.0	EM
인도네시아	115	65	360	73.5	70.25	70.8	EM
터키	127	55	60	58.5	77.75	75.7	EM
콜롬비아	86	70	76	77.0	102.75	82.4	EM
인디아	103	90	42	100.5	81.50	83.4	EM
멕시코	114	86	59	66.0	100.00	85.0	EM
브라질	122	93	84	64.0	97.75	92.2	FM
페루	64	82	116	88.5	113.25	92.8	EM
아르헨티나	139	39	93	78.0	125.75	95.0	FM

나. 민간부문(기업부문)의 대응

① 외국의 기업 대응 동향

ⓐ 선도기업간 경쟁 (Siemens vs. GE)⁴¹⁾

4차 산업혁명은 독일이 주도하는 인더스트리 4.0의 개념에 바탕을 둔 그룹과 미국이 주도하는 산업인터넷(컨소시엄)에 바탕을 둔 그룹 등 두 진영이 선도하고 있다. 세부적으로는 국가별 특성을 반영한 추진 방안을 갖고 있다. 각 진영을 대표하는 기업은 지멘스(Siemens)와 GE(General Electric)이다. 두 진영을 대표하는 기업이라고 하는 이유는 4차 산업혁명에 참여하고 기업들 중 규모가 큰 것 때문이 아니라 각 진영이 표방하는 개념을 반영하고 있는 변화를 추구하고 있기 때문이다. 두 기업은 향후 전개될 4차 산업혁명 시대의 세계 시장을 두고 이미 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 현재는 지멘스가 선점한 영역을 GE가 파고들고 있는 상황이다. 예를 들어 GE가 베를린에서 'Minds+Machines Conference'를 개최하고 'Predix'를 소개한 지 몇 주 후 지멘스는 Predix에 대응하는 클라우드 기반의 IoT 운영시스템인 'Mindsphere'를 미국 현지의 R&D 센터에서 공개하였다. Mindsphere를 사용하여 기계를 네트워크화하고 앱(apps)을 개발할 수 있으며 예측 유지보수와 같은 것들에 대한 디지털 서비스를 제공할 수 있다. GE나 지멘스 모두 IoT 분야와 4차 산업혁명의 시장을 장악하기 위하여 경쟁하고 있다. GE는 2018~2020년 사이 수익성이 높은 디지털 비즈니스로 전환하는 것을 목표로 하고 있으며 지멘스는 생산의 디지털화 및 자동화에서 구축한 입지를 바탕으로 철도, 의료기술 등 다른 분야의 디지털화에 집중하고 있다.

GE는 본부를 코네티컷에서 MIT와 하버드대가 있는 보스톤으로 옮겼다. GE는 제품의 품질이나 공정에서의 결함을 없애는 Six Sigma로부터 종업원들을 스타트업(startup, 창업기업)과 같이 민첩하게 하는 'FastWork' 시스템(자체 개발)으로 옮아가고 있다. GE는 2020년까지 세계 10대 소프트웨어 개발자 중의 하나가 되는 것을 목표로 하고 있다.

지멘스는 스타트업 아이디어에 첫 5년 동안 10억 달러를 지원하는 새로운 Next47 사업단에 민첩한 사고방식을 강하게 불어넣고 있다. 지멘스는 디지털 비즈

41) GE, Siemens fight for automation advantage, Handelsblatt Global (Thomas Jahn), June 19, 2017.

니스로부터 매년 두 자리 이상의 성장을 기대하고 있다. 2015/16 회계연도에 전년 대비 12% 증가한 48억 달러(43억 유로)의 매출을 올렸다. 이 중 33억 유로는 소프트웨어 솔루션을 제공하는 디지털 서비스를 통해 올린 매출이다.

아직까지 기업들이 두 회사의 소프트웨어 플랫폼을 얼마나 사용하고 있는지를 정확하게 알 수는 없으나 약 700 개 기업이 Predix를 사용(GE 자료)하고 있다. 이는 Mindsphere를 사용하는 기업보다는 많은 숫자이나 최근 Mindsphere를 사용하는 기업들이 두 자리 이상의 속도로 급격하게 늘고 있다. 지멘스 제품은 디지털 모형(mockup)에 변화가 생겼을 때 생산라인에서 나타날 모든 변화를 자동으로 계산할 수 있다.

⑤ 사업 방향 전환 (GE, 소프트웨어에 투자)⁴²⁾

세계적인 기업인 GE는 최근 소프트웨어 기업인 애플, 마이크로소프트(MS), 구글 등에 추월당하였다. GE는 연간 40억 달러의 산업용 소프트웨어를 팔고 있으나 여러 분야에 분산되어 있고 항상 최첨단을 유지하는 것도 아니었다. GE는 제트엔진이나 의료용 스캐너의 소재나 장치를 잘 알고 있기 때문에 어느 누구보다 잘 할 수 있다고 믿고 있었다. 그러나 IBM과 같은 분석을 전문으로 하는 회사들이 돈이 많이 드는 가스터빈이 고장날 것을 계산해 냄으로써 GE를 점점 더 위협하고 있다. GE는 연간 600억 달러 어치의 산업용 장비를 팔고 있으나 가장 수익성이 높은 비즈니스는 기계들에 대한 서비스 부문이다. 그런데 이 서비스 부문의 한 부분을 소프트웨어 기업들이 차지하여 나눠먹고 있다. 자신의 산업에서 모은 데이터를 다른 기업들이 사용하는 것을 인정할 수 없다(Immelt 회장)는 생각으로 GE가 2012년 내놓은 대안이 ‘Industrial Internet(산업인터넷)’이다. GE는 실리콘밸리 주변에 새로운 연구소를 만들고 800 명의 프로그래머와 데이터 과학자를 채용하였다.

GE는 많은 기업들이 더 많은 분석 소프트웨어를 사용함으로써 경제 수익 1% 향상을 추구하는 ‘The Power of 1 Percent(1%의 힘)’를 추진하고 있다. 많은 기업들이 차 혹은 사람들을 연결하는 것에 관심을 갖는 동안 GE는 세계 GDP의 대부분을 제조업이 차지하고 있다는 점에 주목하였다. GE에게 운영 소프트웨어나 제어 시스템에서 새로운 것은 없다. GE는 이런 시스템들을 재발명(reinvent)하여 산업인터넷 Version 1.0을 만들었다. 사무실에 앉아 다른 나라에 설치된 터빈이나 유정으로부

42) GE's \$1 Billion Software Bet, MIT Technology Review (Antonio Regalado), May 20, 2014.

터 오는 데이터를 확인하고 문제를 인식할 수 있으며 예측 기반의 유지보수를 함으로써 설비의 정지시간을 최소화하고 비용을 획기적으로 줄일 수 있다. 하루에 약 5 테라바이트의 데이터가 GE로 들어온다. 제트 엔진 하나에 수백 개의 센서가 설치되어 있다. 이륙 및 착륙 때와 운항 중 1회만 데이터를 수집해 왔으나 최근에는 모든 운항 데이터를 확보할 수 있는 방법을 찾았다. GE는 다른 회사가 개발한 소프트웨어를 채택하거나 스스로 개발한 소프트웨어를 사용하고 있다. GE가 빅데이터 분야로 움직이는 이유는 구글처럼 되고 싶어서가 아니라 빅데이터를 활용하면 제조 기술을 획기적으로 발전시킬 수 있기 때문이다. 그림 53은 GE의 산업 소프트웨어 플랫폼을 구성하는 요소들과 이들 간의 데이터 흐름을 개략적으로 보여준다.



그림 53. 산업 소프트웨어 플랫폼 개요 (GE).

④ 공정 유연성의 필요성 (필립스 전기면도기 제조공정의 예)43)

필립스는 고객의 다양한 요구에 대응하기 위하여 약 600 개 모델의 전기면도기를 제조하고 있다. 수요 물량이 다른 다양한 모델을 효율적으로 생산하고 새로운 요구에 대응하여 새로운 모델을 즉시에 개발하여 시장에 내놓기 위해서 생산시스템이 갖추어야 할 형태는 어떤 것일까?

필립스는 새로운 생산시스템의 해답을 유연성에서 찾았다. 모델(제품)을 바꾸고자 할 때 하드웨어(기계 및 생산라인)를 바꾸는 것이 아니라 단 몇 분 내에 시스템이 새로운 부품을 받아들일 수 있도록 교육시켜 생산할 수 있게 하는 것이다. 생산라인의 수를 최소화할 수 있으며 모델별 생산량의 차이를 가장 효율적으로 라인에 배정하여 생산효율을 극대화할 수 있다. 특히 기존 장비의 성능을 최대한 활용할 수 있으므로 새로운 장비의 도입을 최소화할 수 있다.

면도기를 사용하는 고객들은 면도기의 성능에 매우 민감하게 반응하기 때문에 높은 수준의 품질을 일정하게 유지하여야 한다. 필립스는 면도기의 수많은 모델 변화와 높은 품질의 요구에 대응하기 위하여 수동조립 방식 대신 품질 제어가 가능한 자동조립을 선택하였다. 필립스는 최근 60 개의 서로 다른 면도기 라인을 판매하고 있다. 각 면도기 라인에서 약간씩 모델 변화가 있으므로 전체 모델은 약 600 개 정도이다. 따라서 매일매일 생산라인의 조정이 필요하다.

필립스가 주목한 점은 현재의 복잡한 생산체계 문제를 해결하는 것과 미래형 조립 개념을 도입하는 것이었다. 미래의 면도기가 어떤 형태를 갖게 될 것인가를 생각할 필요 없이 10년 후에도 경제적으로 면도기를 생산할 수 있는 장비를 갖추는 투자에 확신을 가질 필요가 있었다. 아직까지 존재하지 않는 조립기계를 만드는 것이 도전과제였다. 도전과제 해결을 위해 필립스는 로봇과 부품 공급기(feeder)를 제작하는 Adept Technology(Adept)와 시스템 통합을 전문으로 하는 Bremer Werk fur Montagesysteme GmbH(BWM)와 협력하였다. BWM의 엔지니어들은 새로운 생산라인 구축에 6축 로봇, SCARA 로봇, 시각 시스템, 부품 공급기, 제어기가 필요함을 파악하고 요구되는 모든 조건을 충족하는 Adept를 선택하였다(BWM은 이전의 다른 업무에서 Adept가 제공하는 기기들의 성능을 확인한 바 있음).

첫 번째 과제는 유연성을 극대화하는 방법을 찾는 것이었다. 면도기는 3 개의 주

43) Automation Profiles: Robots Help Philips Shave Assembly Costs, Assembly Magazine (John Sprovieri), June 1, 2012.

부품으로 구성되어 있고 서로 다른 라인에서 차례로 독립적으로 조립된다. (조립 시스템 자체가 모듈화되어 있었다.) 3 개의 헤드를 가진 면도기는 각각 5 개 내지 8 개의 셀로 구성된 9 개 라인에서 조립된다. 각 셀은 자율적으로 운전되며 플러그-앤-플레이(plug-and play) 방식으로 연결되거나 분리될 수 있다. 자율 셀을 가지고 있는 작고, 상호 독립적인 라인들이 시스템의 유연성과 유용성을 극대화한다.

두 번째 과제는 부품 공급기였다. 지능형 조립라인에서는 유연성을 가진 공급 시스템이 핵심이다. 복잡한 형상을 가진 부품들이 일정하게 놓여있지 않을 때에도 로봇이 각 부품이 놓인 형태를 인식하고 정확하게 조립라인으로 공급할 수 있어야 한다. 로봇에 부착된 시각 센서를 통해 들어온 부품 정보를 분석하여 부품을 집은 다음 얼마만큼 회전시켜 조립할지를 결정하여야 한다(이런 형식은 10 년 후에도 달라지지 않을 것임). 이러한 시각안내(vision guidance) 시스템을 로봇에 장착하였고 통합시각시스템을 갖춘 로봇은 다양한 작업에 완벽하게 대응하고 있다.

« 부품 공급기 작동 형태 (유연한 부품 공급 필요성에 대응하는 예) »

호퍼에 담긴 부품들을 트레이에 쏟은 다음 트레이에 진동을 주어 부품들을 흘려 놓는다. 부품들은 제각각 다른 방향으로 놓이게 된다. 트레이 위에 배치된 시각 시스템이 부품이 놓인 방향을 인식하고 로봇에게 정확한 방향으로 부품을 집을 수 있도록 정보를 제공한다. 로봇은 부품을 집어 정확한 조립 위치에 투입한다. 시각 시스템과 로봇(6축 동작)이 협업하여 제멋대로 놓인 부품들을 정확하게 집어 조립하는 일을 반복적으로 수행한다(부품이 놓인 방향이 제각각이기 때문에 똑같은 반복 작업은 아님). 부품을 트레이에 쏟아 놓은 방법(진동 형태 등), 시각 프로그램(부품 형태 정보) 등 몇 가지를 간단히 조정함으로써 다양한 작업조건 변화에 쉽게 대응할 수 있다.

② 국내 기업의 대응 동향

ⓐ 전반적인 동향

중소기업으로부터 대기업까지 대부분의 영역에서 4차 산업혁명 관련 기술들을 적용하는 사례가 빠르게 늘고 있다. 중소기업들은 인공지능(AI)을 이용한 제품 설계로부터 AI와 로봇을 융합한 기술을 이용하여 제품을 제작하는 등 최종제품 영역에 직접 활용하고 있는 경우가 많다. 대기업들은 제조공정 전체는 물론 물류시스템에

이르는 거대 영역에 4차 산업혁명 관련 기술을 본격 도입하기 시작하였다. 기업부문의 4차 산업혁명 관련 활동은 개발되어 있는 기술을 활용하고 있는 수준(스마트 팩토리)이 대부분이며 4차 산업혁명 관련 핵심기술 자체를 개발하고 있는 기업은 몇몇 대기업을 포함한 일부 기업에 한정되어 있다. 특히 전자산업, 가전산업 등의 산업에서 IoT, AI, VR/AR 등 4차 산업혁명 관련 기술을 도입하거나 개발하는 것이 매우 활발하다.

⑤ 관련 사례

단편적일 수 있지만 기업의 몇몇 사례를 들어 국내 기업들이 4차 산업혁명에 어떻게 대응하고 있는지를 살펴본다.

세계적인 철강회사(2014년 수출 기준 세계 3위)인 포스코는 지멘스나 GE가 채택하고 있는 것과 유사한 디지털 트윈을 생산라인에 적용하기 시작하였다(예시: 그림 54). 자동차용 주석도금 강판의 제조공정에서 도금층의 두께를 실시간 제어하는 인공지능 기반의 시스템을 운용하고 있다. 합금 성분, 공정 조건들의 다양한 조합으로부터 결정되는 철강제의 특성을 수요자(고객)의 니즈와 신속하게 일치시키기 위하여 축적된 데이터를 빅데이터화하여 신제품 개발에 활용하는 일도 추진하고 있다. 생산라인의 스마트화, 빅데이터의 활용 등에 필요한 기술은 포스텍(POSTECH)과의 협력을 통하여 얻고 있다.



그림 54. 포스코의 스마트 팩토리 (<http://globalblog.posco.com/>).

세계 1위의 메모리 반도체 기업인 삼성전자는 대규모 데이터 처리에 소요될 초대용량 메모리 반도체⁴⁴⁾ 부문의 선두를 유지하기 위한 노력과 함께 파운드리 서비스

스⁴⁵⁾를 주요 사업영역으로 확대하고 있다(SK 하이닉스 역시 파운드리 서비스 영역을 확대하고 있음). 삼성전자는 스마트폰에 음성서비스를 제공하는 인공지능(예: 빅스비(Bixby))을 탑재하였다. 삼성전자는 자체 혁신조직 중의 하나인 삼성넥스트를 통하여 빅데이터, 인공지능, 소프트웨어 등 60 개 스타트업(창업기업)에 적극적인 투자를 하고 있다. 그래픽처리장치(GPU)에서 사용할 수 있는 빅데이터 분석기술(SQL database)을 ‘블레이징DB(BlazingDB)’에 세계적인 GPU 업체인 엔비디아(NVIDIA)와 공동으로 투자하였다.

현대자동차는 신차 개발에 통합시뮬레이션 모델을 적용하여 제어시스템 개발, 새로운 시스템의 성능 설계, 문제현상의 분석 및 해결을 수행하고 있다. 가상환경을 이용하여 교통상황, 노면상태, 날씨 등의 영향을 분석하고 있다. IoT를 활용하여 실주행 시의 환경 영향을 예측하고 차량 상태의 사전예측을 통한 고장률 ‘0(zero)’에 도전하며 고객의 감성과 차량 성능이 조화된 고객 맞춤형 차량 개발을 추진하고 있다.

패키징 전문 중견기업인 네페스는 사람의 뇌를 본뜬 뉴로모픽 소자 전문업체인 General Vision과 협력하여 인공지능 전용칩인 NM500을 생산하고 있다. 두산인프라코어는 CPS를 건설장비 작업에 적용하여 대형 광산작업장의 무인 수송시스템, 무인운전 건설장비(작업물 및 장비특성(성능)을 통합한 시뮬레이션 필요) 등을 개발하고 있다.

4차 산업혁명에 대한 관심이 점점 높아져 왔고 2016년 이후 급격히 높아지고 있다 (그림 55). 국내기업들 또한 큰 관심과 변화의 필요성(생산성 향상, 생산 패러다임의 전환)에 대한 공감, IoT·AI·VR/AR 등의 신기술 채택으로 얻을 수 있는 효과가 상당하기 때문에 향후 국내 기업들의 변신이 더욱 빨라질 전망이다.



그림 55. 4차 산업혁명 관심도.

44) 현재 메모리 반도체는 선폭 기준 10 나노미터급 수준에 도달

45) 파운드리 서비스 : 외부 업체가 설계한 반도체 제품을 위탁 받아 생산·공급하는, 공장을 가진 전문 생산 업체를 파운드리(foundry)라고 하며 위탁 제품을 생산·공급하는 서비스를 파운드리 서비스라고 함(공장이 없이 파운드리에 위탁생산만을 하는 방식을 팩리스 생산이라고 함). * 4차 산업혁명 시대에 파운드리 서비스가 특히 중요한 이유는 거액의 투자 없이 새로운 반도체 제품(아이디어 제품)을 생산하는 것을 촉진할 수 있기 때문.

6. 나노기술과 4차 산업혁명

(1) 나노기술과 4차 산업혁명의 관련성

나노기술을 4차 산업혁명과 간단하게 연결하는 것은 용이하지 않다. 나노기술은 여러 단계를 거쳐 4차 산업혁명에 기여하기 때문이다. 그림 56은 나노기술이 여러 단계를 거쳐 4차 산업혁명과 연결되는 것을 간략하게 나타낸 것이다. 아래 부분의 나노기술 영역은 나노원천기술→나노중간재→나노소자/부품의 단계별 발전을 보여준다. 윗부분의 4차 산업혁명 영역은 나노소자/부품 등 나노제품과 연결되는 CPS 부분들을 나타낸다. 나노기술 영역에서 실선으로 연결된 실선 타원들은 실체가 있는 결과물들(4 개 계층)을 나타내며 각 계층 사이에 외곽선 없이 표시한 타원들은 아래 단계에서 위의 단계로 진행될 때 얻을 수 있는 기능(특성)들을 나타낸다. IoT, 로봇, AI, 빅데이터, 인터넷 등에 요구되는 초소형화, 저전력화, 초고속화, 대용량화는 나노구조(체), 나노패턴, 나노소재를 각각 고집적화, 고밀도화, 신기능(창출)화 함으로써 해결이 가능하다. 4차 산업혁명의 진전에 따라 선도기술들의 수준이 계속해서 높아질 것이므로 이와 연결된 나노기술 역시 지속적인 발전이 필요하다.



그림 56. 나노기술과 4차 산업혁명간의 관계.

그림 56에서 나노기술과 4차 산업혁명 간의 관계는 상향식(bottom-up; 나노기술의 개발 결과를 활용)으로 연결될 수도 있고 하향식(top-down; 4차 산업혁명의 필요 수준을 나노기술을 통하여 달성)으로 연결될 수도 있다. 중요한 점은 나노센서, 나노소자, 나노구조 부품/모듈, 나노시스템을 활용하는 선도기술들이 그림 54에서의 피드백을 통하여 발전하게 될 것이라는 것이다.

(2) 산업 부문에서 나노기술과 4차 산업혁명 간의 관련성

① 생산체계 측면의 관련성

생산혁명 관점에서 4차 산업혁명은 이른바 사이버-실제 시스템의 연결 (cyber-physical system, CPS로 칭함)로 요약될 수 있다. CPS는 완전히 디지털화된 실제공간의 생산시스템(physical system)을 가상공간에 구현한 디지털 시스템 (cyber system)과 일치시킨 것이다(실제 시스템과 똑같은 디지털 시스템이라는 의미로 ‘디지털 트윈(digital twin)’으로 부르기도 함). 즉 실제공간에서 나타나는 모든 정보(데이터)를 스마트센서가 감지(획득)하고 이 정보는 IoT(인터넷)를 통하여 디지털 공간으로 전송되어 형상화(디스플레이)된다. 빅데이터 기술을 이용하여 획득한 데이터를 분석하여 실제공간에서의 문제들이 확인되고 AI가 최적화된 해결책을 제시하며 최종 결과가 실제 정보와 함께 실시간 디스플레이 된다. 이러한 CPS는 생산시스템 뿐만 아니라 (거대)시설의 운영, 에너지 관리(스마트 그리드), 물류, 보건, 가정용 기기 등 거의 모든 부분에 적용된다. 그림 57은 항공기 엔진(가스터빈)의 디지털 트윈을 나타내는 그림이다(GE). 실제의 가스터빈에 온도센서, 압력센서, 속도센서, 진동센서 등 100 개 이상의 센서가 장착된다(그림의 왼쪽). 특정 항공기의 엔진으로부터 나오는 모든 데이터를 디지털 영상으로 구현한 것이 오른쪽 그림이다. 영상과 함께 데이터가 제시된다. 필요한 부분을 세부적으로 선택하여 데이터를 자세히 확인할 수 있다. 엔진에 이상(異常)이 감지될 경우 문제의 정도(문제를 일으킨 부품, 손상의 정도 등을 취합한 위험 수준), 정비 시점, 정비 방법 등이 곧바로 제시되므로 갑작스런 대형 사고를 막을 수 있다. GE는 현재 이러한 디지털 트윈을 80만 개 이상 운영하고 있다.



그림 57. 사이버-실제 시스템(cyber-physical system, CPS; 디지털 트윈(digital twin)이라고도 함)의 예 : 항공기 가스터빈 엔진.

CPS 구축의 전제가 되는 것(핵심)은 생산체계의 ‘완전 디지털화’이다. 모든 위치에서의 정보가 실시간 수집될 수 있어야 한다. 수집된 정보는 자연 없이 데이터 저장 시스템으로 전송되어 저장되고 동시에 클라우드 상에서 빅데이터 분석 혹은 AI에 의한 분석이 실시간 진행될 수 있어야 한다. 모든 센서 혹은 IoT 모듈이 유선(광케이블)으로 연결될 수는 없으므로 유무선 인터넷으로 실시간 연결될 수 있어야 한다. 그림 58은 CPS의 구성요소들을 보여주는 그림이다. 데이터 수집이 필요한 모든 부분에 스마트센서가 배치(혹은 부품에 내장)되고 센서들은 IoT 모듈을 통하여 인터넷과 연결된다. 클라우드 상에서 처리된 데이터는 대형 디스플레이 혹은 모바일 기기에 표시되며 필요한 명령(정보)을 곧바로 입력할 수 있다. 따라서 인터넷, 빅데이터, 인공지능(AI), 클라우드 컴퓨팅 등의 데이터 처리 기능이 사이버 시스템을 구성하는 소프트웨어(S/W) 요소가 되며 데이터의 생산, 초고속 처리 및 전송, 대용량 데이터의 저장, 데이터의 실시간 디스플레이를 가능하게 하는 고성능 통신, 컴퓨터, 데이터 관리 등의 사이버 시스템을 지원하는 하드웨어(H/W) 요소가 된다.

나노기술이 CPS에 기여할 수 있는 부분은 스마트센서, IoT 모듈, 모바일 기기, 인터넷 등의 감도 및 속도 향상, 에너지 소모량 축소 등이다.



그림 58. CPS 구성 요소.

그림 58의 CPS 구성요소를 도식화하여 그림 59와 같이 나타낼 수 있다. 실제 시스템과 사이버 시스템에서의 현재와 미래를 함께 나타내었다. 현재의 자동화된 생산시스템이 자동차 조립라인, 반도체 생산라인과 같은 첨단 영역에서 많이 디지털화되긴 하였지만 아직 완전 디지털화에는 이르지 못하고 있다. 생산라인을 구성하는 부품, 모듈, 시스템(라인) 전체에 IoT 모듈(스마트센서 포함)이 내장되어 통합되어야 한다(그림 58에서 IoT 통신 모듈). 모바일 기기를 이용하여 현장 혹은 원거리에서 명령정보를 입력할 수 있어야 하며 궁극적으로는 수치가 아닌 '자연언어'로 명령정보를 전달할 수 있어야 한다. 생산시스템뿐만 아니라 가치사슬 전체, 고객과 연결되는 물류시스템까지 디지털화되어 정보를 실시간 수집하여 사이버 시스템으로 전송할 수 있어야 한다. 물론 사이버 시스템으로부터 전송되어온 정보를 자동(자동)으로 실제 시스템에 입력되도록 하거나 확인한 후 처리할 수 있어야 한다.



그림 59. 사이버-실제 시스템(cyber-physical system)의 현재와 미래.

현재의 자동화된 생산시스템에서 생산되는 정보량보다 훨씬 더 많은 양의 정보가 완전 디지털화된 생산시스템으로부터 생산된다. 엄청난 양의 정보를 전송하고 저장하며 처리(빅데이터 혹은 AI 분석)하기 위해서는 인터넷(통신) 및 연산의 속도가 획기적으로 빨라져야 하며 데이터 저장 용량 또한 더욱 커져야 한다. 즉, 실제 시스템에서 생산되는 데이터를 자연 없이 실시간 처리할 수 있는 수준으로 초고속화, 대용량화가 필요하며 이에 소요되는 에너지(전력) 양은 축소되어야 한다.

현재의 실제 시스템은 생산시스템이나 물류시스템의 일부분이 디지털화되어 있으며 낮은 수준의 데이터 최적화를 활용하는 단계에 있다. 생산체계에 빅데이터나 AI를 도입하는 초기에 있다. 생산시스템은 장비별 혹은 생산라인별 낮은 수준으로 최적화된 데이터를 기반으로 한 자동운전이 대부분이며 예방진단 중심으로 관리되고 있다. 장비의 운전에 필요한 정보(명령)는 훈련된 (전문)인력이 기계언어로 코딩된 정보 또는 수치 형태로 입력하고 있다. 생산체계를 완전 디지털화하기 위해서는 생산체계를 구성하는 모든 부분으로부터 실시간 정보를 받을 수 있도록 정보 획득이 필요한 모든 부분에 감지센서와 통신기능을 갖춘 IoT 소자들이 배치(해당 부분에 내장)되어야 하며 이들을 연결하는 네트워크가 구축되어야 한다. 실시간으로 대용

량의 정보를 생산하여 곧바로 전달하기 위해서는 고성능 센서(나노센서)와 초고속 통신기능을 갖춘 IoT 소자가 필요하다. 네트워크로 연결된 생산체계 내의 요소들(대개의 경우 다른 언어를 사용)에게 필요한 정보를 각각 입력하는 것은 대단히 어렵기 때문에 자연언어로 된 총괄 명령을 장소에 구애 받지 않고 입력할 수 있는 입력장치가 필요하다. 자연언어를 인식할 수 있는 휴대용 또는 착용형 입력장치인 모바일, 웨어러블 기기들이 필요하다.

한편 사이버 시스템도 현재 사용하고 있는 수준의 인터넷(통신), 빅데이터, AI, 클라우드 컴퓨팅으로는 완전 디지털화된 생산체계가 생산하는 초대용량의 데이터를 처리하여 최적화된 데이터로 가공하고 이를 실행하는데 한계가 있다. 따라서 초대용량 데이터 처리가 가능할 수 있도록 초고속화, 대용량화에 필요한 하드웨어 요소 기술의 발전이 필요하다. 최소량의 실시간 데이터로부터 실행 데이터를 만들어낼 수 있는 AI용 전용칩의 개발도 필요하다. 대용량 데이터를 처리하는데 많은 양의 전기가 소모되므로 디지털화에 따라 폭증하게 될 전력량을 줄일 수 있도록 사이버 시스템을 구성하는 요소들이 저전력화되어야 한다. 소프트웨어(알고리즘) 기술만으로는 저전력화에 한계가 있으므로 나노소자, 나노패키징 등 하드웨어 기술의 개발이 동반되어야 한다. 4차 산업혁명에서 우려되는 사이버 안전 역시 소프트웨어 방식만으로는 한계가 있기 때문에 양자암호 등 나노기술에 기반을 둔 하드웨어 기술의 발전이 필요하다.

② 가치사슬 측면의 관련성 (실제 시스템(physical system)과의 관련성)

실제 시스템(physical system) 내 생산시스템(가치사슬)이 나노기술(나노기술의 가치사슬)과 연관되는 과정은 그림 60과 같이 요약할 수 있다. 나노기술의 가치사슬은 4차 산업혁명과 상호 밀접하게 연관되어 있다. 4차 산업혁명을 선도하는 (자율)로봇, 인공지능, 빅데이터 등 주요 기술은 나노기술 가치사슬 전반에 걸쳐 활용되어 생산성을 크게 높인다(그림의 왼쪽; 4차 산업혁명 활용영역). 고도의 정밀한 제어를 필요로 하는 복잡한 장비나 공정을 오류 없이 운전할 수 있도록 하며(품질 안정, 신뢰도 향상), 공정 변경에 유연하게 대응할 수 있도록 함으로써 소량 다품종 생산(수요변화 대응)을 가능하게 한다. 물론 가치사슬 상의 장비들은 이미 필요한 데이터를 생산하고 명령을 수행할 수 있는 나노기술 기반의 요소들(나노센서, 나노액츄에이터)을 장착하고 있다.



그림 60. 나노기술이 4차 산업혁명에 기여하는 영역 (가치사슬 측면).

나노기술 가치사슬 상의 각 단계에서 산출되는 나노소재, 나노부품, 나노제품은 4차 산업혁명의 발전에 필요한 신물성, 신기능, 신수요, 친환경화의 수요에 대응할 수 있는 기술 기반을 제공한다(그림 60의 오른쪽; 4차 산업혁명 촉진 영역). 나노기술이 4차 산업혁명에 가장 핵심적으로 기여하는 분야는 고감도와 높은 선택성 등 신기능을 이용하는 나노센서, 초대용량 데이터의 고속 처리와 전송과 관련이 있는 초고속화, 대용량화, 저전력화 분야이다. 즉 나노기술은 소프트웨어 요소의 성능을 강화시키는 것과 직결되는 하드웨어 분야의 발전에 기반이 된다. 여기에 활용되는 대표적인 나노기술은 나노소재를 제조하거나 나노소재를 사용하여 나노센서를 제조하는 것과 같은 나노소재공정, AI용 전용칩이나 대용량 메모리칩 등 나노소자를 제조하는 나노제조공정이다. 나노기술 가치사슬 전반에 걸쳐 4차 산업혁명의 주요 기술을 효과적으로 활용하기 위해서는 나노소재(나노물질), 나노공정에 관한 정보가 디지털화되어 있어야 한다.

나노기술은 소프트웨어 요소와 결합하여 상승효과를 낼 수 있는 분야 외에도 3D 프린팅을 포함하는 부가제조(additive manufacturing, AM) 방식을 위한 특수 소재,

고객이 요구하는 기능의 제품을 낮은 가격으로 제조할 수 있는 소재와 공정을 제공 (대량 맞춤 제조, mass customization)할 수 있는 기술 기반을 제공한다.

③ 비생산 부문의 수요 대응

4차 산업혁명이 초기에는 새로운 생산혁명에 초점이 맞춰져 있지만 생산혁명이 진점됨에 따라 산업(생산) 부문 외에 에너지/자원/환경, 이동성, 보건, 가정/개인 등 의 영역으로 확대되어 갈 것이다. 이러한 4차 산업혁명의 확대에 많은 나노기술이 필요하게 될 것이다. 값싼 신재생 에너지 사용, 희소자원의 대체나 자원 활용 효율의 향상, 오염 환경의 복원 및 오염 방지, 고용 창출, 물류의 효율화, 고령화 대응, 건강사회 실현, 편리한 생활, 개인 만족 등 여러 분야에 나노기술이 기여하게 될 것이다.

« 나노기술이 4차 산업혁명에 기여할 부분 (기능) »

- **초고속화** : 인터넷(IoT), (클라우드)컴퓨팅(AI, 빅데이터)
- **대용량화** : 대용량 데이터 저장(개별소자, 데이터센터), 고밀도 에너지 저장(모바일 및 자율동작 기기)
- **저전력화** : 컴퓨팅(AI, 빅데이터), 대용량 메모리, 데이터센터
- **신기능** : 신기능 센서(IoT 영역 확장), 신기능 나노소자(AI 전용칩, 유연소자 등), 에너지 하베스팅, 웨어러블 기기(인터넷, 데이터 입/출력 단말기), 나노바이오 진단장비 등

« 초고속화/저전력화 : 초전력 고성능 칩 »

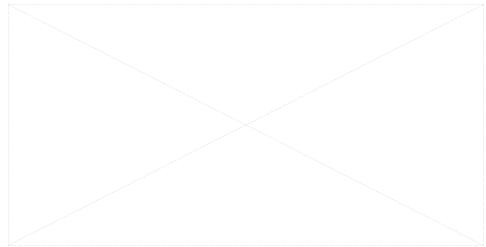
2016년 3월 9~15일 서울에서 열린 이세돌 구단과 구글의 인공지능(DeepMind)인 알파고(AlphaGo)와의 대결은 인공지능이 사람들의 뇌리에 깊이 자리 잡는 계기가 되었다. 이때 이세돌의 뇌(인간의 뇌)가 소모하는 에너지는 약 20 W(와트) 수준인데 비해 알파고(1,202 개의 CPU와 176 개의 GPU 사용)는 약 1 MW의 전력을 사용하여 이세돌의 뇌가 사용한 에너지보다 약 50,000 배 이상의 에너지를 사용하였다. 인공지능의 위력과 함께 인공지능을 활용할 때 막대한 양의 에너지가 필요함을 일깨워 주었다. 하지만 곧이어 나온 알파고의 후속 버전들은 에너지 이슈도 충분히 해결될 수 있음을 보여주고 있다. 알파고에 이어 알파고 마스터(AlphaGo Master), 알파고 제로(AlphaGo Zero)가 개발되었다. 알파고 제로는 기존의 기보를 참고하지 않고 사람의 도움도 받지 않고 3일, 21일 만에 각각 이세돌, 커제의 수준에 도달하고 40일 후에는 세계 최강의 수준에 도달하였다. 알파고의 지능이 급격히 발달한 것과는 반대로 후속 버전들이 사용한 전력량은 급감하였다(열설계 전력(TDP) 기준 비교).

알파고의 성능은 획기적으로 향상시키면서 전력소모량은 대폭 축소할 수 있었던 이유는 전기를 많이 소모하는 여러 개의 GPU 대신에 TPU(tensor processing unit)를 개발하여 사용했기 때문이다. 같은 TPU라도 여러 개가 분산된 형태(AlphaGo Lee)일 때보다 단일 모듈 형태(AlphaGo Master, AlphaGo Zero)일 때 소비전력을 더욱 줄일 수 있었다.

자율주행자동차, 가전제품 등에 소요되는 인공지능 칩의 수요가 폭발적으로 증가하고 동시에 사고방지 등을 위하여 초고속으로 정보를 처리할 필요성이 증가하고 있어서 초고속화와 저전력화를 동시에 달성할 수 있는 대책이 필요하다.



[알파고 제로와 이전 알파고와의 학습능력 비교]



[알파고 버전별 전력소모량 (TDP 기준)]



[구글의 TPU 모듈]

≪ 저전력화 : IoT ≫

IoT와 연결된 대상물은 2013년 70~100억 개이었는데 2020년에는 260~300억 개로 증가하여 약 3 배 이상 증가할 전망이다(Harald Bauer, Mark Patel, and Jan Veira: The Internet of Things: Sizing up the opportunity, McKinsey & Company Semiconductors (December 2014)). 설치기준 IoT의 수요는 2015년 약 7.2억 개에서 2020년 약 23억 개, 2025년 약 57억 개로 늘어날 전망이다(아래 그림의 왼쪽). IoT 하나의 대기전력은 약 0.4~8.0 W 범위에 있다. 인터넷 연결에 필요한 게이트웨이(gateways) 대기전력은 1.6~1.7 W 수준이다. 이러한 데이터를 기반으로 연간 세계의 대기전력 소모량을 산출하면 대기전력은 연평균 20%씩 증가한다(아래 그림의 오른쪽). 2015년 대기전력 소모량은 약 7.5 TW이었으며 2025년에는 45 TW에 이를 전망이다(Energy efficiency of the Internet of Things - Technology and Energy Assessment Report, Prepared for IEA 4E ENDA (April 2016)). 참고로 2015년 우리나라의 전기소비량은 505 TWh이다. 2025년에는 우리나라가 사용하는 전체 전기량의 약 9%에 해당하는 전기가 IoT 소자를 운용하는데 쓰이게 될 전망이다.



[IoT 응용 확대 전망]



[IoT 응용 대기전력 전망]

IoT의 보급이 확대되면서 늘어나는 소요되는 전력을 상쇄시킬 수 있는 기술 개발이 필요하다. IoT 칩의 설계는 물론이고 저전력으로 동작시킬 수 있는 센서 모듈, 통신 모듈의 개발이 필요하다. 용도에 따라서는 자체적으로 정보를 처리할 수 있는 저전력 프로세서의 개발도 필요하다.

IoT의 핵심요소는 특정요소를 감지하는 ‘센서’이다. 향후 감지영역이 넓어지는 것에 대응하여 더욱 높은 민감도를 가진 센서가 요구될 것이며 새롭게 감지 필요성이 대두되는 요소들을 모니터링하기 위한 새로운 특성을 가진 센서에 대한 요구가 증가할 것이다. 즉 신기능 센서 제작에 필요한 다양한 소재 개발이 필요하게 될 것이다.

« 대용량화/저전력화 : 데이터센터 »

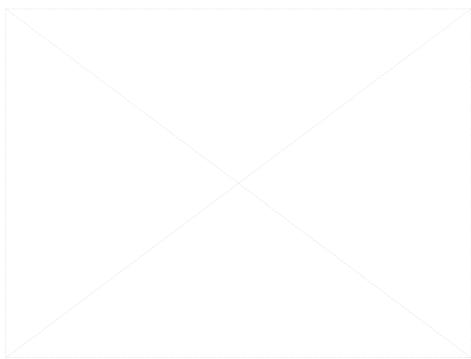
2015년 15 ZB이던 데이터 양은 2020년 60 ZB로 4 배 이상 증가할 전망이다. 데이터 양이 크게 증가함에 따라 데이터를 저장할 수 있는 데이터센터 역시 늘어날 수밖에 없다. 2015년 55만 개였던 데이터센터는 2020년 67만 개로 늘어날 것으로 예측하고 있다. 이들 데이터센터들이 사용하는 전력은 2015년 650 THW에서 2020년 950 THW로 늘어날 전망이다. 따라서 데이터센터들이 필요로 하는 전력량은 데이터센터를 운영하는 국가들의 전력 정책에서 큰 부분을 차지한다.

데이터센터는 데이터를 저장하고 관리하는 장비(IT 장비) 뿐만 아니라 시설을 유지하는데 필요한 공조, 냉각 시설로 구성되어 있다.⁴⁶⁾ 위의 그림은 데이터센터의 구조를 나타내는 개략도이며 중간 그림은 타이완에 있는 구글 데이터센터의 공조시설을 보여주는 사진이다. IT 장비뿐만 아니라 공조 및 냉각 시설을 가동하는데 대규모 전력이 필요하다. IT 장비 부분에서 가장 큰 에너지를 사용하는 영역은 메모리(저장, memory) 영역이다 (아래 그림). 저전력으로 구동되는 대용량 메모리 칩을 사용하면 메모리 자체가 소비하는 전력도 줄지만 메모리가 동작할 때 나오는 열을 식히기 위한 냉각 부하도 줄기 때문에 에너지 소비량을 더욱 줄일 수 있다.

데이터센터를 신재생 에너지만으로 운영하기 위한 방안이 검토되고 있다. 태양광이나 풍력을 이용하는 경우에는 생산된 에너지를 대용량으로 저장하는 것이 필요하다(위의 그림에서 ‘에너지 저장’ 부분). 나노소재를 사용하는 고용량 이차전지가 활용될 수 있는 부분이다. 우리나라에 대규모 데이터센터가 없다고 하더라도 초대용량 메모리 소자(나노소자), 고성능 이차전지의 시장을 염두에 둘 수 있다. 데이터센터가 사용하는 에너지양을 획기적으로 줄일 수 있으면 운영에 드는 비용이 줄어들기 때문에 데이터센터를 여러 지역에 설치할 수 있다.



[데이터센터의 구조]



[데이터센터의 냉각 파이프]



[데이터센터 구성요소들의 전력소모량]

46) M. Arlitt et al.: Towards the design and operation of net-zero energy data centers.

(3) 4차 산업혁명에 나노기술이 기여하는 부분

그림 56에서 나노기술이 4차 산업혁명 전반(여러 부문의 CPS)과 어떻게 연결되는지를 설명하였다. 제조혁명은 그림 56에서 여러 CPS 중 산업 CPS와 관련된다. 4차 산업혁명과 나노기술의 관련성은 산업 CPS와 나노기술간의 관계를 통하여 찾아 볼 수 있다. 초연결의 결과로 생산되는 엄청난 양의 데이터를 기반으로 하는 CPS가 기대하는 수준으로 동작하기 위해서는 초고속화(정보 전송, 정보 처리(빅데이터, 클라우드 컴퓨팅)), 대용량화(정보 저장, 에너지 저장)의 문제를 해결해야 하는 것과 함께 새로운 센서의 개발에 필요한 신기능의 창출, 대용량의 데이터를 처리하고 저장하는데 소요되는 에너지(전기) 양을 줄이는데 필요한 저전력화의 문제를 해결하여야 한다. 고속화와 저전력화 부분의 일부 문제는 알고리즘(회로 혹은 시스템 설계)으로 해결할 수 있지만 궁극적인 해결은 상당 부분 하드웨어적인 요소들에 의존할 수밖에 없다. 문제는 이러한 해결에 필요한 하드웨어 요소들 역시 현재의 기술 수준으로는 기대하고 있는 CPS를 구축하는데 한계가 있다는 점이다. 지금보다 훨씬 더 전력소모가 적고 동작속도는 빠르며 정보저장 용량이 획기적으로 늘어난 전자소자 기술이 필요하다. 지금의 반도체보다 집적도가 높고 속도가 빠른 나노전자소자가 필요하다. 실리콘 반도체가 갖지 못하는 특성을 갖는 나노소자의 개발도 필요하다. 새로운 대상을 감지(센싱)하거나 감지 한계를 넓히는데 필요한 나노센서 제작에 쓰일 나노소재 기술도 지속적으로 개발되어야 한다. 2020년까지 500억 개 이상의 기기를 인터넷에 물리는데 필요한 나노센서처럼 대량으로 값싸게 제조할 수 있는 나노공정 기술의 개발도 중요하다. 그림 61은 새로운 생산 패러다임 구축을 뒷받침할 CPS 구성요소들과 관련이 있는 나노기술을 표시한 그림이다. 나노기술은 부품이나 모듈을 거쳐 생산 패러다임 변화에 기여한다. 제조업의 미래 트렌드(4장)에서 살펴본 내용으로부터 새로운 생산 패러다임은 자율생산(디지털 생산), 대량 맞춤 제조, 현장 제조로 요약할 수 있다. 물론 생산되는 제품은 신속하게(適時에) 제조되어야 하며 가격은 싸야하며 반면에 기능은 훨씬 좋아야 하고 복잡한 형상을 가질 수도 있다. 게다가 탄소배출이 적고 환경 부담이 적은 친환경 조건을 만족하여야 한다.

그림 61은 이러한 미래 산업(제조업)의 실현과 관련이 있는 나노기술 기반의 CPS를 나타낸 개략도이다(그림 56의 5 개 CPS 부분 중 ‘산업’ 부분). IoT를 매개(연결고리)로 하여 센서/액츄에이터를 중심으로 하는 실제 시스템의 생산수단(3D

프린팅, (작업용) 자율로봇 등이 클라우드 기반의 빅데이터/해석, 인공지능과 연결된다. 실제 시스템의 데이터를 가상공간에서 처리한 후 이를 다시 실제 공간으로 환류하여 제조공정의 효율성을 획기적으로 높인다. 고객의 요구를 실시간으로 반영한 맞춤 제품을 자율적으로 생산한다. 경우에 따라서는 고객과 가까운 위치에 있는 장비를 원격 조정하여 현지에서 제조하여 짧은 기간 내에 제공한다.



그림 61. 새로운 생산 패러다임을 구축할 CPS를 구성하는 주요 선도기술과 이와 관련되어 있는 나노기술.

그림 62는 4차 산업혁명이 진점됨에 따라 주요 나노기술들(나노소재로부터 나노시스템까지)이 4차 산업혁명 선도기술(자율화로부터 사이버 안전)과 어떻게 연결되는지를 보여준다. 자동화 기반의 대량 생산을 특징으로 하는 규모의 경제로부터 자율 생산, 대량 맞춤 생산을 특징으로 하는 새로운 산업 패러다임으로 선도할 기술들은 대부분 나노기술을 기반으로 하고 있다. 나노소재, 나노소자, 나노센서 및 액츄에이터, 나노부품, 나노시스템 분야의 발전속도가 새로운 산업 패러다임의 진전에 상당한 영향을 미치게 될 전망이다.



그림 62. 새로운 산업 패러다임 형성에 기여하는 나노기술 및 연관 관계.

① 나노기술 역할을 분석한 방법

그림 61에 들어있는 선도기술들을 포함하여 4차 산업혁명이 큰 영향을 미치게 될 분야(기술 측면에서 검토대상이 되는 분야) 및 각 분야에서 나노기술과 연관되어 있는 기술 영역들을 요약하면 표 17과 같다.⁴⁷⁾ 4차 산업혁명은 모든 영역에 영향을 미치게 될 것이고 원천성 혹은 기반성이 매우 큰 나노기술 또한 대부분의 기술 영역에 영향을 주게 될 것이므로 특별한 기준을 채택하기 어렵고 같은 기준을 적용하여 구분하는 것 역시 쉽지 않다. 나노기술이 영향을 미치는 범위도 직접 영향을 미치는 영역으로부터 간접적으로 영향을 미치는 영역까지 다양하기 때문에 같은 기준으로 구분될 수 있는 영역은 산업 부문과 같은 일부에 불과하다.

47) 4차 산업혁명에 관한 여러 가지 자료들에서 내용을 추출하고 기획위원회에서 논의를 거쳐 압축한 결과임.

표 18. 4차 산업혁명에서 검토 대상 분야(CPS 영역) 및 나노기술 관련 기술 영역

검토대상 분야	나노기술 관련 영역	특기 사항
산업 (industry)	IoT/인터넷	센서 및 송수신 모듈 등 H/W 요소
	로봇/자율기기	자율 운전 및 이송 (드론 등 포함)
	빅데이터/알고리즘(AI)	전용칩, 전용센서 등
	클라우드 컴퓨팅	—
	웨어러블/모바일 기기	스마트폰/테블릿/웨어러블 인터넷 등
	3D 프린팅(AM)	부가제조(additive manufacturing)
	센서/액츄에이터	단독 혹은 복합모듈
	첨단소재	나노소재(원소재~중간재~부품)
에너지/자원/환경 (energy/resource/environment)	신재생에너지	나노구조를 이용하여 효율 향상
	스마트그리드	에너지 전송/활용 등 (저장은 제외)
	에너지 절약	단열(보온), 절전 등
	에너지 저장	고용량 저장 (2차전지)
	에너지 하베스팅/저장	저밀도 에너지 수확 및 저장
	자원 절약/재활용	성능혁신에 의한 절약, 재사용/재활용
	환경 모니터링	환경보호, 환경복원
이동성(mobility)	고용(직업)	※ 나노기술이 직접 기여하는 부분이 크지 않으므로 간접 기여 부분을 포함
	운송/물류	
	자본(서비스)	
보건 (healthcare)	맞춤의학	
	고령화 대응	
	사회적 대응(전염병)	
가정/개인	가전제품(생활가전)	
	소비제품	

나노기술이 4차 산업혁명과 어떻게 연관되는지를 분석하는 작업에서 표 17의 첫째 열(검토대상 분야) 및 둘째 열(나노기술 관련 기술 영역)의 항목을 기본 틀로 사용하였다. 이 기본 틀에 대응될 나노기술 영역으로는 대부분류 수준의 나노기술을 대상으로 하였다. 다만 대부분류 나노기술의 하나인 나노소자 분야는 산업에서 차지하는 비중이 클 뿐만 아니라 몇 가지 4차 산업혁명 선도기술로 나눠지므로 나노정보소자, 나노광전소자, 나노센서/액츄에이터의 중분류 수준의 나노기술을 대상으로 하였다(나노기술 10대 분야). 나노기술 10대 분야별로는 중분류 혹은 중분류 이하 수준의 세부기술 영역별로 4차 산업혁명과의 관련성을 분석하였다(표 18). (분야별 분석 중 중첩되는 부분, 예를 들어 나노소재, 나노의학에서 다룰 수 동시에 다를 수 있는 유사 기술은 양쪽에서 각 분야의 시작으로 기술하도록 하였다.)

표 19. 4차 산업혁명과의 관련성 분석을 위한 나노기술 대상 영역

10대 분야	세부 나노기술 영역	
나노소재 (NM)	<ul style="list-style-type: none"> 탄소나노튜브 그래핀 나노광소자 (양자점/광결정 등 포함) 1차원 나노소재 (나노섬유 등) 2차원 나노소재 (판/층/필름) 	<ul style="list-style-type: none"> 세라믹 나노분말 금속 나노분말 나노촉매 나노기공소재 나노복합소재
나노정보소자 (NED)	<ul style="list-style-type: none"> 초저전력 메모리소자 대용량 스토리지 소자 초고속 논리소자 초저전력 논리소자 	<ul style="list-style-type: none"> 신경세포 모방소자 나노 유연소자 차세대 통신 및 전력 소자
나노광전소자 (NOD)	<ul style="list-style-type: none"> 나노 스트레처블 소자 나노 유연 TFT 소자 나노 투명 TFT 소자 나노 헐로그램 양자 나노 반도체 소자 	<ul style="list-style-type: none"> 나노발광소자 (LED-OLED 포함) 용액형 나노소자 기술 나노발광소자 봉지 기술 나노 액정셀 기술 나노반사형 디스플레이
나노센서/ 액츄에이터 (NS)	<ul style="list-style-type: none"> 나노환경센서 나노바이오센서 나노오감센서 나노물리센서 나노유연·신축센서 	<ul style="list-style-type: none"> 나노 에너지 하베스팅 나노전지 나노 광 액츄에이터 나노바이오 액츄에이터 나노 로봇 액츄에이터
나노바이오 (NB)	<ul style="list-style-type: none"> 환경감시 나노바이오센서 생체신호 인지기술 생체모사기술 인공생체소재 정밀 나노바이오 분석기기 	<ul style="list-style-type: none"> 농수축산 식품용 나노바이오센서 식품 및 농수축산용 나노소재 화장품용 나노기술 항균용 나노소재
나노의학 (NBM)	<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지 나노정밀의료장비 나노영상소재 나노약물전달체 	<ul style="list-style-type: none"> 나노치료소재 뇌기능 제어 기술 나노기반 재생의료
나노공정 (NF)	<ul style="list-style-type: none"> 나노패터닝장비 나노점·선 합성 및 공정 장비 나노박막장비 	<ul style="list-style-type: none"> SPM 광융합 나노측정장비 나노화학·구조 분석장비 나노물성측정장비
나노측정/분석/ 평가 (NMT)	<ul style="list-style-type: none"> 나노화학·구조분석 나노물성측정 SPM 계측분석 고분해능 전자현미경 	<ul style="list-style-type: none"> 나노광측정 나노하이브리드 계측 분석 나노안전성 평가기술
나노인포메틱스 (NI)	<ul style="list-style-type: none"> 나노 빅데이터 생성 DB 구축 및 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 데이터 가시화 분석 기술 정보학 원천기술 개발
계산나노과학 (NC)	<ul style="list-style-type: none"> 제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술 메소스케일 시뮬레이션 기술 계산결과 가시화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 멀티스케일 시뮬레이션 기술 계산나노과학 플랫폼 기술 계산나노과학 한계 극복 기술 HT 계산 및 분석 기술

② 나노기술 분야별 4차 산업혁명 관련성 분석 결과

10대 나노기술 분야별로 4차 산업혁명과의 관련성을 분석하였다. 세부 나노기술 영역이 4차 산업혁명에서 나노기술 관련 기술 영역(표 17의 첫째와 둘째 열에 해당)과 얼마나 연관되어 있는지를 해당 전문가 그룹이 10분위(1~10) 기준으로 상대 평가하였다. 관련되어 있는 영역이 대단히 넓기 때문에 나노기술이 기여할 수 있는 대표적인 항목인 ① 초고속화, ② 대용량화, ③ 저전력화, ④ 신기능, ⑤ 기타 등 다섯 가지 범주에서 상대적인 기여도를 평가하였다(부득이한 경우는 같은 기여도를 부여하는 것도 허용). 가장 큰 기여도를 부여한 항목을 기반으로 5 개 항목 중의 하나를 선택하고 대표적인 기여 내용을 제시하였다.⁴⁸⁾ 이와 같은 방법으로 나노기술의 여러 영역이 4차 산업혁명 관련 각각의 기술에 미치는 영향을 평가하고 대표 기여내용을 정리하면 다섯 개 중 가장 큰 빈도를 보이는 기여 항목이 나온다 (IoT/인터넷에 미치는 대표 기능으로 나노소재와 나노바이오는 ‘신기능’, 나노정보 소자와 나노공정은 ‘초고속화’, 나노광전소자와 나노센서/액츄에이터와 나노측정/분석/평가는 ‘저전력화’임). 다음 단계로 대표 기여 항목을 중심으로 이를 달성하기 위하여 개발대상이 되는 나노기술을 도출하고 도출된 나노기술의 내용을 한 쪽 분량으로 정리하였다.

10대 대분류 나노기술 전체의 분석자료는 부록 2에 첨부하였다. 본문에서는 나노소재 분야에 대한 평가내용을 제시한다. 표 20은 나노소재의 세부기술이 4차 산업혁명 각 영역에 기여하는 정도를 상대적으로 평가한 표이다. IoT/인터넷 영역에 가장 큰 기여를 하는 분야는 세라믹 나노분말이며 그 다음은 나노복합소재, 나노광소재, 2차원 나노소재, 1차원 나노소재, 그래핀, 탄소나노튜브, 금속 나노분말, 나노기공소재, 나노촉매 순이다. 나노소재가 IoT/인터넷 영역에 기여하는 부분은 초고속화이다. 같은 방법으로 로봇/자율기기로부터 소비제품 영역에 세부 나노기술이 기여하는 정도를 평가하고 대표적인 기여 항목(표 19의 오른쪽 열)을 도출한 것이 표 21이다. 오른쪽 열에서 가장 높은 빈도를 보인 기여 항목은 ‘신기능’이며 이 ‘신기능’이 나노소재가 4차 산업혁명에 기여할 핵심 항목이다. 한편 1위(내지 2위) 기여도를 가장 많이 나타낸 세부기술을 조사하면 나노복합소재와 세라믹 나노분말이 나온다. 나노소재 분야에서는 이 두 기술 분야가 4차 산업혁명이 큰 기여를 하게 될 것이다.

48) (예시) 나노소재의 여러 분야(10 개) 중 IoT/인터넷에 가장 큰 기여를 하는 기술 영역은 ‘세라믹 나노분말’임, 대표적인 기여는 ‘초고속화’이며 기여 내용은 ‘초고속 통신; IoT 부품/소자’임.

표 20. 나노소재 기술 세부영역별 4차 산업혁명 영역에 대한 상대 기여도 평가



표 19로부터 4차 산업혁명의 여러 부문에 대분류 수준의 나노소재 기술이 기여하는 부분 및 가장 크게 기여하는 기술을 확인할 수 있다. IoT/인터넷 부문에 나노기술이 기여하는 부분은 초고속화이며 세라믹 나노분말 기술이 가장 큰 기여를 한다. 나노기술이 로봇/자율기기 부문에 기여하는 대표적인 항목은 신기능 창출(제공)이며 나노복합소재 기술이 가장 크게 기여한다. 같은 방법으로 CPS 분야별 나노기술의 역할을 도출하였다. 가장 많은 수의 기여 항목을 확인하면 4차 산업혁명에 대한 나노소재 기술의 대표 기능은 '신기능'으로 나타난다(표 19의 아래에서 두 번째 줄). 대표적으로 기여도가 높은 나노소재 기술은 나노복합소재와 세라믹 나노분말이다.

표 19와 같은 과정을 거쳐 나노정보소자, 나노광전변환소자, 나노센서/액츄에이터 등 10대 나노기술 분야에서 도출한 내용을 하나의 표로 정리한 것이 표 20이다.

표 21. 대분류 수준의 나노기술 영역들과 4차 산업혁명 주요 영역간의 관계 (요약).



(4) CPS 구현에 기여할 개발대상 나노기술 과제 도출

표 17에서 도출된 4차 산업혁명 관련 CPS 영역별로 대표적인 나노기술 역할(기여 항목)을 구현하는데 필요한 개발대상 기술을 도출하였다(표 21; 나노소재 분야를 예시로 한 것). IoT/인터넷 영역의 경우 나노소재가 기여할 부분은 ‘초고속화’이며 개발대상 기술(예시)은 ‘초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재’이다 (IoT 통신(근거리 통신)용 모듈 혹은 소자로 활용). (나노기술 분야에 따라서는 4차 산업혁명 여러 분야에 공통적으로 기여하는 기술도 있는 것으로 나타났다.)

표 22. 4차 산업혁명 영역별 개발대상 나노소재 기술 (예시)



나노소재(NM) 분야를 포함한 10 개 나노기술 분야에서 도출한 개발대상 기술 영역을 표 22에 요약하였다. 나노기술 영역별로 4차 산업혁명에의 기여도가 높은 2 개 분야 및 도출한 개발대상 기술영역 수를 표시하였다. 도출한 과제 수는 모두 80 개였다. 나노소재 분야(NM)에 17 개 과제, 나노센서/액츄에이터 분야(NS)에 12 개 과제가 도출되어 전체에서 차지하는 비중이 높았다.

표 23. 나노기술 영역별 기여도 상위 세부기술 분야 및 도출 개발대상 기술영역 수



① 도출한 개발대상 기술의 CPS 영역별 분포

도출된 개발대상 기술 영역들이 CPS 상의 어느 부분에 포함되어 있는지를 보기 위하여 CPS의 영역을 그림 62와 같이 나누었다. 소재, 장치/시설, 물류 등이 실재하는 실제 공간과 공유 DB, 클라우드 환경과 같이 데이터를 처리하고 저장하는 사이버 공간 사이에는 정보를 수집하는 기능을 담당하는 영역, 수집된 정보를 저장하고 처리(가공)하는 정보 저장·처리 영역, 처리된 정보를 실행으로 옮기는 영역이 존재한다. 정보는 이들 영역간을 순환하며 보완되고 최적화된다. 즉, 사람의 개입을 최소화하고 자율적으로 운전된다.

80 개의 개발대상 기술을 정보 수집, 정보 저장·처리, 정보 실행 영역에 연결시켜 표시하였다(그림 63). CPS 영역에 포함되지 않는 기술은 기반기술로 분류하여 표시하였다. CPS의 각 영역 및 기반기술에서 세부적으로 신기능, 저전력, 대용량, 초고속으로 분류하여 4차 산업혁명이 요구하는 특성별 분포도 함께 볼 수 있게 하였다. 그림 64는 기반기술로 분류된 개발대상 기술을 제외하고 나머지 기술들의 핵심어를 바로 확인할 수 있도록 한 그림이다(그림 63의 일부).



그림 63. CPS의 각 영역 구분 (정보 수집/정보 저장·처리/정보 실행).



그림 64. 도출된 개발대상 기술의 CPS 영역별 분포 (분류코드) (CPS에 포함되지 않는 기술은 기반기술로 분류).



그림 65. 도출된 개발대상 기술의 CPS 영역별 분포 (핵심어).

② 도출과제의 중복성 검토

10대 나노기술 분야에서 도출한 80 개의 과제를 대상으로 기존과제와의 중복성 (유사성)을 조사하였다. 중복성 검토는 중복성 검토의 기준(중복도 60% 이상의 과제를 검색)을 적용하고 NTIS 자료를 활용하여 수행하였다. 필수항목인 연구목표에는 ‘과제 목표’, 연구내용에는 ‘개발 내용(세부과제 혹은 세부내용)’, 기대효과에는 ‘목표시장(제품)’의 자료를 입력하였다. 검색어는 과제별로 3~4 개의 우리말 검색어와 이에 상응하는 영문 검색어 3~4 개를 동시에 입력하여 검색하였다. 표 23은 10대 나노기술분야 중 나노소재 분야에서 도출된 17 개 과제의 중복성 검토를 위해 입력한 검색어를 정리한 것이다. 3 개의 검색어를 사용하여 검색한 경우가 대부분이었으며 일부과제는 4 개의 검색어를 사용하여 검색하였다. 표 23은 10대 나노기술 분야의 예시이며 전체 검색어를 정리한 표를 부록에 첨부하였다.

표 23의 검색어를 입력하여 검색한 결과를 그림 66에 제시하였다(유사과제 검색 결과 요약이 포함된 첫 쪽). 10대 나노기술 분야에서 도출한 전체 80 개 과제의 중복성 검토 결과 모든 과제들이 기준 미만의 중복도를 갖는 것으로 확인되었다.

표 24. 나노소재 기술분야 도출과제의 유사성 검토를 위한 과제별 검색어

과제명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)				
초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재	나노소재	무선통신	초고주파 통신	유전율 변조	
고감도 전자피부(압력, 온도) 소재	나노소재	전자피부	피부 대체	압력 온도	
고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재	나노소재	2차원 소재	트랜지스터 용	고밀도	고이동도
실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체	나노소재	생체신호 모니터링	나노섬유	착용형	
자유곡면 3D 프린팅용 나노소재	나노소재	3D 프린팅	자유곡면	나노 분말	
환경센서용 하이브리드 나노선 소재	나노소재	하이브리드 나노선	환경센서	환경 오염물질	
에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투파가능 투명전극	나노소재	전기장 투파	에너지 효율	투명전극	
태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재	나노소재	무전원	광전극	물분해용	
고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술	나노소재	양자점	실리콘	태양전지	
제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재	나노소재	나노코팅	저방사	제로에너지	
세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재	나노소재	이차전지용	전극소재	고용량	
태양열 집열을 통한 고성능 열전 소재	나노소재	열전 소재	태양열 집열	광반도체	
철 기반 고효율 나노촉매 소재	나노소재	나노촉매	철	수소에너지	
초소형 미세먼지 감지센서 소재	나노소재	미세먼지 센서	초소형	모바일	
상·소리 동시 구현 유연소재	나노소재	유연소재	영상	소리	유연 디스플레이
친환경 양자점 발광소재	나노소재	발광소재	양자점	친환경	
패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재	나노소재	자가진단	색변조	플렉시블	



그림 66. 유사과제 검색결과 보고서의 첫 쪽.

③ 상위 계획 및 추진 중인 사업과의 비교

4차 산업혁명에 기여하게 될 나노기술 분야별 개발대상 기술 영역은 수행 중이거나 상위 계획에 포함된 기술개발 과제를 염두에 두지 않고 도출하였다. 도출한 개발대상 기술 영역을 상위 계획(4기 나노종합발전계획 상의 미래 나노기술 30)과 수행 중인 나노소재기술개발사업, 나노융합산업핵심기술개발사업의 과제들과 비교하면 표 24와 같다. (표 24는 전체 비교 내용의 일부를 보여주는 것이며 전체 비교 내용은 「첨부자료 1」을 참조하기 바람.) 미래 나노기술 30 중 초저전력 메모리(D1), 초고속·저전력 논리소자(D2), 나노광소자(D6), 생체모방소재(M4), 스마트공정(F6) 분야는 현재 개발을 진행하고 있는 과제가 없기 때문에 기술개발을 적극 검토할 필요가 있다.

표 25. 상위 계획 및 추진 중인 사업과 도출 개발대상 기술 영역의 비교 (첨부자료 1에 전체 내용 제시)

미래 나노기술 30	나노소재기술개발사업	나노융합산업핵심기술 개발사업	도출된 개발대상 과제 영역
D1. 초저전력 메모리			<ul style="list-style-type: none"> (NEDI3) 고속 비휘발성 메모리 기반 차가 구조변경 시스템 (NEDI5e) 웨어러블/모바일 기기의 유연 기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자
D2. 초고속·저전력 논리소자			<ul style="list-style-type: none"> (NEDI1a) 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) (NEDE3b) 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
D3. 나노환경센서	<ul style="list-style-type: none"> 나노기반 촉각센서를 이용한 생체 모방형 촉감 구현 시스템 기술 개발 나노소재 기반 현장 실시간 곰팡이 모니터링 시스템 개발 나노소재 기반 현장 실시간 모니터링용 환경센서 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 금속 나노패턴 센서 기반 식품유해화학물질 현장 정량검사기기 제품화 기술개발 인체신호 감지용 나노소재 복합섬유기반 편직물 센서 제조와 이를 이용한 위험환경 작업자용 언더셔츠 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NMI7) 환경센서용 하이브리드 나노선 소재 (실시간 환경 모니터링) (NME7) 초소형 미세먼지 감지센서 소재 (환경 개선) (NSI1) 실내환경 모니터링용 나노 MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서 (NBI1a) 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서
D4. 신개념 나노물질·구조 나노소자	<ul style="list-style-type: none"> 2차원 소재의 대면적 저온공정 및 적층소자의 집적화로 기술 개발 나노전자소자 기술을 응용한 신경세포 모방 시냅스 소자어레이 및 아키텍처 원천기술 개발 재구성로직 소자 및 아키텍처 기술 개발 그래핀 배리스터 기반 삼진로직 소자 개발 및 집적공정, 아키텍쳐 연구 신경세포 모방 소자용 3차원 집적 공정 플랫폼 기술 개발 나노전자소자 기술을 응용한 신경세포 모방 뉴런소자 및 시스템 원천기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NMI4) 고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재 (유연 트랜지스터) (NODI8) 스트레쳐블 전자소자용 첨단 나노소재 (NSI6) 폴라즈모닉 메타 소재·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 센서

7. 4차 산업혁명 대응 나노기술 개발 추진 전략

(1) 기술 개발 경쟁력 분석

4차 산업혁명에서 나노기술이 아무리 핵심적인 역할을 하게 될지라도 우리나라가 경쟁에서 우위에 설 수 있고 산업적 성과로 이어질 수 있어야 한다. (현재는 기술 개발 경쟁력이 낮다하더라도 4차 산업혁명 수행에 핵심적인 분야이며 성공 가능성 이 있는 분야는 전략적으로 추진할 필요가 있다.) 4차 산업혁명을 염두에 두고 우리나라의 나노기술 수준을 평가한 분석결과는 아직 없다. 2001년부터 5년 주기로 수립하여온 정부의 나노종합발전계획에 포함된 나노기술 수준 평가자료가 참고가 될 것이다. 가장 최근의 자료는 2016년 제4기 나노종합발전계획(안)이다(2016. 4. 11.). 본 보고서에서는 제4기 나노종합발전계획(안)에 담긴 내용을 요약하여 나노 기술 경쟁력 자료로 삼았다.⁴⁹⁾

가. 우리나라의 나노기술 수준

우리나라의 나노기술 수준은 최고 수준인 미국 대비 2001년 25%, 2008년 75%, 2014년 81.5%로 빠르게 높아져왔다.⁵⁰⁾⁵¹⁾ 세계적으로는 4위의 수준에 있는 것으로 평가되고 있다. 최고 선진국인 미국과의 기술 격차는 3.0 년으로 평가된다(표 25).⁵²⁾

표 26. 최고 선진국(미국) 대비 상대 기술 수준 및 기술 격차

구 분	한국		미국		일본		독일		중국	
	상대 수준	격차 기간								
(%, 년)	81.5	3.0	100	0	91.9	1.3	89.4	1.6	71.0	4.4

나노소재, 나노소자, 나노바이오 등 대분류 수준의 나노기술별 국가간 기술력을

49) 제4기 나노종합발전계획(안) - 대한민국 나노혁신 2025 (2016~2025) (2016. 4. 11.)

50) 미국 대비 기술 수준 변화: 25%(2001년) → 75%(2008년) → 81%(2014년)

51) 2014년 국가별 기술 수준: 미국(100%), 일본(90.3%), 독일(88.1%), 한국(80%), 중국(69.1%)

52) 나노기술수준 비교 분석(2016, 국가나노기술정책센터)

비교하면 표 26과 같다. 1위 기술국인 미국과 비교하여 가장 큰 기술 수준 차이가 나는 분야는 나노안전성 분야이다. 나노안전성 분야의 기술 수준은 미국의 72.3%이며 기술 격차는 3.1 년이다. 나노바이오 분야는 기술 수준은 미국의 83% 수준으로 나노안전성 분야보다 높지만 기술 격차는 3.7 년으로 오히려 더 크다. 어느 수준까지는 빠르게 기술 격차를 줄일 수 있지만 그 이상으로 줄이는데 시간이 많이 걸린다는 것을 의미한다. 기술 격차가 가장 큰 분야는 나노공정 분야이다. 기술 수준은 미국의 78.6%이지만 기술 격차는 3.8 년으로 가장 길다.

표 27. 대분류 수준의 나노기술 분야별 주요국간 기술력 비교 (단위: %, 년)

구분	한국		미국		일본		독일		중국	
	상대 수준	격차 기간								
나노소재	83.7	2.8	100	–	93.5	1.0	86.2	2.1	77.0	3.8
나노소자	81.3	2.5	100	–	94.0	0.9	88.0	1.5	65.0	4.2
나노바이오	83.0	3.7	100	–	85.2	2.9	88.3	2.7	75.8	5.0
나노에너지	84.0	2.3	100	–	97.0	0.4	92.0	1.0	70.5	4.1
나노공정	78.6	3.8	100	–	93.2	1.2	94.6	0.9	70.8	4.8
나노안전성	72.3	3.1	100	–	81.2	2.2	89.1	1.2	60.7	5.5

우리나라의 나노기술 논문(SCI 저널) 게재 건수는 매년 증가하고 있다(그림 67). 논문 발표 건수가 세계 3위(2011~2012년)까지 올라갔었으나 2013년 이후 인도에 추월당하여 현재는 세계 4위 수준에 있다. 나노기술 논문의 피인용 수(8.45)는 세계 6위이며 우리나라 논문 전체의 피인용 수(4.55, 세계 32위)보다는 높다(2013년 기준).



그림 67. 우리나라 및 세계의 SCI 논문 게재 건수 및 우리나라 순위 변화.

미국 특허청(USPTO)에 등록된 우리나라의 특허 건수는 2008년 이후 3위를 유지하고 있다(그림 68).⁵³⁾ 2000년 이후 2014년까지 미국 등록 특허 누적 건수는 총 2,879 건으로 전체의 3.9%를 차지하고 있다(미국이 63.4% 차지).



그림 68. 우리나라의 미국 특허 등록 건수(당해년도 및 누적) 및 국가별 순위 변화.

53) 미국 특허 등록 건수 변화 : 25건(2001년, 6위) → 3,947건(2008년, 3위) → 522건(2014년, 3위)

나. 나노기술 인프라 현황

나노기술 개발이 진행되면서 나노기술 인력 또한 급격히 증가하였다. 2001년 1,100 명 수준이던 연구인력이 2014년에는 8,548 명 수준으로 늘어났다. 나노학과를 개설하고 있는 대학(나노기술 관련 학과 수)이 2001년 3 개 대학(3 개 학과)에서 2015년 78 개 대학(234 개 학과)으로 늘어났다. 나노기술 관련 학과에 재학 중인 학생의 수도 2004년 1,804 명에서 2015년 34,146 명으로 대폭 증가하였다.

나노기술 연구자 및 기업의 기술 개발을 지원하기 위한 나노종합기술원, 한국나노기술원 등 7 개의 나노기술 인프라(나노팹)가 운영되고 있다. 운영실적으로는 연간 이용 건수 50,621 건 이상, 이용자 수 4,959 명, 이용기관 수 1,315 개, 인력양성 수 1,817 명을 기록(2014년 기준)하고 있으며 기술개발 인프라로서의 역할을 확대해가고 있다. 기술개발 관련 나노기술 인프라 외에도 나노안전성기술지원센터를 설치·운영하여 나노제품의 안전성에 관한 이슈에 대응하고 있다.

다. 나노융합산업 현황

나노융합산업 조사 결과(920 개 기업을 대상으로 조사)⁵⁴⁾에 따르면 산업분야별로는 나노전자기 121.6조원(87.7%)으로 가장 많고, 나노소재 14.4조원(10.4%), 나노장비·기기 2.3조원(1.6%), 나노바이오·의료 4,126억원(0.3%) 순으로 나타난다(표 27). 나노융합기업들의 총매출에서 점하는 나노융합제품 매출 비중(A/B)은 2012년 42.2%에서 2013년 41.2%로 소폭 감소하였으나 매출 비중이 높은 나노전자기의 증가율이 낮아서 나타난 현상이며 대부분의 분야에서 나노융합제품의 매출 비중은 상승하였다. 특히 대기업군에서 나노소재, 나노바이오·의료, 나노장비·기기 모두 나노융합제품 매출이 37~53%의 높은 증가율을 보여 대기업들이 나노융합산업의 성장을 주도하고 있는 것으로 나타났다.

54) 나노융합산업 협력기구/산업연구원: 2014년 나노융합산업조사 (조사대상기간 : 2012년 1월 1일~ 2013년 12월 31일 (2년간)).

표 28. 우리나라 나노융합산업 현황 (단위: 억 원, %)

	2012년			2013년			나노 매출액 증감율 (%)	
	나노매출액 (A)	총매출액 (B)	비중 (A/B)	나노매출액 (A)	총매출액 (B)	비중 (A/B)		
나노소재	97,103	792,514	12.3	144,391	902,651	16.0	48.7	
나노전자	1,184,225	2,249,361	52.6	1,215,753	2,412,884	50.4	2.7	
나노 바이오·의료	3,211	11,619	27.6	4,126	14,340	28.8	28.5	
나노 장비·기기	17,029	30,339	56.1	22,669	37,818	59.9	33.1	
합 계	1,301,569	3,083,834	42.2	1,386,939	3,367,693	41.2	6.6	
중소 기업	나노소재	9,483	33,816	28.0	10,313	34,584	29.8	8.8
	나노전자	8,459	12,800	66.1	8,973	12,813	70.0	6.1
	나노 바이오·의료	2,056	6,528	31.5	2,432	6,558	37.1	18.3
	나노 장비·기기	8,328	18,750	44.4	10,759	22,212	48.4	29.2
	소계	28,325	71,894	39.4	32,478	76,167	42.6	14.7
대기업	나노소재	87,620	758,698	11.5	134,078	868,067	15.4	53.0
	나노전자	1,175,766	2,236,562	52.6	1,206,779	2,400,071	50.3	2.6
	나노 바이오·의료	1,155	5,091	22.7	1,694	7,782	21.8	46.7
	나노 장비·기기	8,702	11,589	75.1	11,910	15,606	76.3	36.9
	소계	1,273,244	3,011,940	42.3	1,354,461	3,291,526	41.1	6.4

기업군별로는 대기업 부문의 매출이 135조 4,461억 원으로 전체 나노융합제품 매출액의 97.7%를 차지하며 중기업 부문이 2조 6,887억 원(1.9%), 소기업 부분이 5,590억 원(0.4%)을 차지하는 것으로 나타났다(표 28). 나노융합기업 중 12.8%를 차지하는 대기업(69 개)의 매출 규모가 전체 매출의 97.7%로 대부분을 점하는 반면, 중소기업은 기업체 수에서 472 개로 87.2%를 차지하고 있지만 매출 비중은 2.3%로 매우 미미하다. 중소기업은 자체적으로 성장할 수 있는 규모에 도달하지 못하고 있는 것으로 보인다.

표 29. 기업군별 나노융합제품 매출 및 상대 매출 비중 (단위: 억 원, %)

	2012년		2013년		매출액 증감율		
	나노융합제품 매출	비중	나노융합 제품매출/ 총매출 비중	나노융합제품 매출	나노융합 제품매출/ 총매출 비중		
소기업	5,659	0.4	46.8	5,590	0.4	47.2	-1.2
중기업	22,666	1.7	37.9	26,887	1.9	41.8	18.6
대기업	1,273,244	97.9	42.3	1,354,461	97.7	41.1	6.4
합 계	1,301,569	100.0	42.2	1,386,939	100.0	41.2	6.6

우리나라는 발표 논문, 특히 등록(미국 등록 기준), 연구개발 인력, 연구개발 지원 인프라 등 나노기술의 여러 면에서 세계 4위 이내의 기술 경쟁력을 갖고 있다. 산업 측면에서도 대기업 편중이 심한 문제는 있으나 나노기술을 활용하는 산업 활동이 활발하여 이미 산업의 경쟁력을 결정하는 요소가 되었다. 특히 나노융합산업 전체 매출의 대부분을 차지하는 대기업들이 반도체, 이차전지 등 4차 산업혁명과 관련이 큰 사업영역을 갖고 있어서 4차 산업혁명의 동력을 확보하는데 상당히 유리한 조건을 갖추고 있다.

« 경쟁력 분석 요약 »

- 우리나라의 나노기술 경쟁력은 세계 4위 수준이며 미국과 약 3년 정도의 기술 격차를 갖고 있다(전체적으로는 미국의 약 82% 수준).
- 나노기술 인력(대학의 나노기술 관련 학과 포함) 및 나노기술 인프라(나노팹 및 나노안전성평가센터)는 세계 최고 수준이다. 연구자는 물론 중소기업들의 기술개발을 지원할 수 있는 여건을 구축하고 있다. 10여 년의 운영으로 노하우가 축적되었으며 장비 가동률이 올라가고 있다.
- 나노기술에 종사하는 전업기업은 대략 900 개 이상이며 중소기업이 대부분을 차지하고 있다. 가장 많은 기업들이 분포하고 있는 영역은 나노소재 분야이다. 나노제품 개발 및 생산은 가치사슬의 최종단계에 있는 대기업들이 주도하고 있다. 나노기술 부문 생산액은 2013년 기준 약 139조 원 규모이며 13만 명 이상의 고용을 창출하고 있다.

(2) 나노기술 개발 현황 분석 (4차 산업혁명 관련성 분석)

정부지원으로 수행하고 있는 나노기술 개발 과제들이 4차 산업혁명이 요구하는 기술 수요에 얼마나 대응하는지를 조사하였다. 조상대상은 2015년과 2016년(4차 산업혁명이 본격 거론되기 시작하기 전에 해당; 2016년의 지원 계획은 대부분 2015년에 수립된 것임)에 수행된 나노기술 과제로서 NTIS(국가과학기술정보서비스)에 등록된 과제들을 대상으로 하였다. 조사방법은 NTIS 등록 내용을 검색어(key words)로 검색하였다. 1차로는 전체 과제를 대상으로 나노기술 해당 여부를 검색하였다(검색어: 나노/nano/초미세/극미세). 검색된 과제(나노기술 과제에 해당하는 것으로 간주)를 대상으로 2차로는 나노기술이 4차 산업혁명에 기여하는 역할

인 초고속화, 대용량화, 저전력화, 신기능(창출)의 각각에 해당하는 과제들을 검색하였다. 3차로는 1차 검색과제(나노기술 과제)들이 10대 나노기술 영역에 어떻게 분포하는지를 검색하였다.

표 29는 2015년(1.1.~12.31.) 정부지원 10개 연구개발 사업으로 수행된 과제들 중 나노기술 과제의 수 및 비중을 나타낸다. 검색대상 과제는 총 15,255 개였으며 검색된 나노기술 과제는 1,868 개로 전체의 12.3%를 차지하였다. 나노기술 과제 비중이 가장 높은 사업은 나노소재기술개발 사업으로 63.5%가 나노기술 과제였다 (나노기술 관련 사업임에도 63.5%만이 나노기술로 검색된 이유는 (나노기술에 국한하지 않는) 기초연구에 해당하는 과제이거나 검색어를 포함하지 않은 과제들이 다수 있기 때문). 첨단융합기술, 글로벌프론티어사업, 산업융합기술산업핵심기술 사업의 순으로 나노기술 과제 비중이 높았다. 융합기술 관련 사업이 나노기술과 관련성이 높은 것은 나노기술의 원천성 혹은 융합성이 반영된 결과로 볼 수 있다.

표 30. 2015년 정부지원 10개 연구개발 사업의 전체 과제 및 나노기술 관련 과제 수

사업명	전체과제 수 (건)	나노기술 과제 수 (건) (나노/nano/초미세/극미세)	나노비중 (%)
BK21플러스사업	1,289	157	12.18
글로벌프론티어사업	192	61	31.77
나노소재기술개발사업	115	73	63.48
산업융합기술산업핵심기술	164	43	26.22
선도연구센터지원	99	10	10.10
신진연구자지원	2,625	296	11.28
이공학개인기초연구지원	5,804	619	10.67
중견연구자지원	2,485	389	15.65
첨단융합기술	211	69	32.70
출연연 기관고유사업	2,271	151	6.65
합 계	15,255	1,868	12.25

1차 검색을 통해 얻은 1,868 개의 나노기술 과제를 4차 산업혁명 기여 영역별(2차 검색), 10대 나노기술 영역별(3차 검색)로 검색한 결과를 표 30에 정리하였다 (검색어 포함). 전체 나노기술 과제 중 4차 산업혁명의 기술수요와 관련이 있는 과제는 106 개(5.7%)로 검색되었다. 대용량화를 제외한 다른 세 분야에 비슷한 수의 과제들이 분포하고 있는 것으로 나타났다(대용량화에 관련된 과제 수가 적은 것은 산업계가 매우 앞서 있는 분야여서 연구개발 수요가 상대적으로 작기 때문). 전체

나노기술 과제 중 5.7%만이 4차 산업혁명과 관련이 있는 것으로 검색되므로 나노 기술의 역할을 반영할 수 있는 새로운 사업을 추진하거나 기존 사업의 방향을 일부 조정할 필요가 있어 보인다. 10대 나노기술 영역으로 분류되는 과제는 711 개로 전체 나노기술 과제의 약 38.1%를 차지한다. 나노소재 분야의 과제 수가 가장 많으며 나노정보소자, 나노바이오, 센서/액츄에이터 순으로 뒤를 이었다.

표 31. 4차 산업혁명 기술수요 연관 과제 및 10대 나노기술 영역별 과제 (2015년)

기능	과제 수	검색어 (Key words)			
초고속화	30	초고속	고속화	high speed	속도향상
대용량화	15	대용량	대용량화	용량 향상	고밀도화
저전력화	33	저전력	저전력화	에너지 소모	
신기능(창출)	28	신기능	novel	신물질	
합 계	106				

분야	과제 수	검색어 (Key words)			
나노소재	542	소재	신소재	첨단소재	신물질
나노정보소자	63				새로운 구조
– 전자소자	(60)	정보소자	전자소자		
– 스핀소자	(3)	정보소자	스핀소자		
나노광전소자	11	정보소자	광전소자		
센서/액츄에이터	26				
– IoT	(13)	IoT	사물인터넷		
– 나노센서	(12)	IoT	사물인터넷	나노센서	
– 액츄에이터	(1)	IoT	사물인터넷	액츄에이터	
나노바이오	39	나노바이오			
나노의학	4	나노의학	나노메디신		
나노공정	15	나노공정	나노장비		
나노측정	10	나노측정	나노분석		
나노인포메틱스	1	나노인포메틱스	나노정보		
계산과학	0	계산과학			
합 계	711				

표 29~30에서와 같은 과정으로 2016년 정부지원 과제를 검색한 결과를 정리하면 표 31~32와 같다. 선도연구센터지원사업, 신진연구자지원사업, 중견연구자지원 사업, 첨단융합기술사업 등 4 개 사업이 2015년도에 종료되어 6 개 사업의 9,572 개 과제를 대상으로 검색하였다. 1,049 개 나노기술 과제가 검색(전체의 11.0%)되어 2015년 대비 나노기술 과제 비중이 줄어들었다. 1,049 개 나노기술 과제 중 5.4%인 57 개 과제가 4차 산업혁명 기술수요에 대응되는 것으로 나타났다. 전체 나노기술 과제 중 10대 영역에 속하는 비율은 43.0%로 2015년에 비해 약간 늘어났다.

표 32. 2016년 정부지원 6개 연구개발 사업의 전체 과제 및 나노기술 관련 과제 수

사업명	전체과제 수 (건)	나노기술 과제 수 (건) (나노/nano/초미세/극미세)	나노비중 (%)
BK21플러스사업	1,346	159	11.81
글로벌프론티어사업	181	48	26.52
나노소재기술개발사업	180	100	55.56
산업융합기술산업핵심기술	176	27	15.34
이공학개인기초연구지원	5,249	553	10.54
출연연 기관고유사업	2,440	162	6.64
합 계	9,572	1,049	10.96

표 33. 4차 산업혁명 기술수요 연관 과제 및 10대 나노기술 영역별 과제 (2016년)

기능	과제 수	검색어 (Key words)				
초고속화	16	초고속	고속화	high speed	속도향상	
대용량화	4	대용량	대용량화	용량 향상	고밀도화	고집적화
저전력화	21	저전력	저전력화	에너지 소모		
신기능(창출)	16	신기능	novel	신물질		
합 계	57					

분야	과제 수	검색어 (Key words)				
나노소재	352	소재	신소재	첨단소재	신물질	새로운 구조
나노정보소자	30					
– 전자소자	(30)	정보소자	전자소자			
– 스핀소자	(0)	정보소자	스핀소자			
나노광전소자	8	정보소자	광전소자			
센서/액츄에이터	26					
– IoT	(16)	IoT	사물인터넷			
– 나노센서	(9)	IoT	사물인터넷	나노센서		
– 액츄에이터	(1)	IoT	사물인터넷	액츄에이터		
나노바이오	20	나노바이오				
나노의학	4	나노의학	나노메디신			
나노공정	4	나노공정	나노장비			
나노측정	6	나노측정	나노분석			
나노인포메틱스	0	나노인포메틱스	나노정보			
계산나노과학	1	계산과학				
합 계	451					

『나노기술 개발 현황 분석 요약』

- 정부가 지원하고 있는 연구개발사업의 전체 과제 중 나노기술 관련 과제의 비중은 약 11%이며 1,000 개 이상의 과제가 수행 중
- 연구개발 중인 나노기술 과제들 중 4차 산업혁명의 기술수요에 대응하는 과제 비중은 약 5.5%이며, 저전력화>초고속화>신기능>대용량화 순으로 분포하고 있음.
- 연구개발 중인 나노기술 과제들 중 4차 산업혁명과 관련이 있는 10대 나노 기술 분야에 해당하는 과제 비중은 약 40%이며, 나노소재>나노정보소자>센서/액츄에이터>나노바이오 순으로 분포하고 있음.
- 현재 수행 중인 나노기술 개발 과제들은 4차 산업혁명에 소요되는 나노기술과 관련된 부분은 많지만 핵심수요에 대응할 수 있는 부분은 크지 않음. 4차 산업혁명에 대응하기 위한 전략적인 추진의 필요성 있음.

(3) 나노기술 개발 전략 검토를 위한 SWOT 분석 및 대응 방안

가. SWOT 분석

4차 산업혁명에 대응하기 위하여 나노기술 영역에서 별도의 프로그램을 추진할 때의 전략을 도출하기 위하여 강점-약점-기회-위협 요인(SWOT)을 분석하였다 (표 33). 우리나라는 강한 제조업 기반, 초정밀 공정기술의 경쟁력, 나노기술 개발 역량(기술개발, 인력, 인프라), 나노기술 수요산업의 경쟁력 등 하드웨어(H/W) 요소 부문에 강점이 있는 반면 국내 4차 산업정책을 선두에서 끌고 갈 선도기업 (flagship enterprise), 즉 CPS 구축을 주도하는 기업이 국내에 없으며 빅데이터나 AI 등 소프트웨어(S/W) 요소 부문이 취약한 약점을 갖고 있다. 선진국의 빨빠른 움직임에 비해 아직까지 세밀한 그림을 그리지 못하고 있는 4차 산업혁명 정책도 약점이다.

새로운 나노제품 시장 창출, 선도기술 분야의 나노기술 수요 증가, 정부의 정책 (의지) 등이 기회이기도 하지만 선진국의 강한 정책 드라이브, 4차 산업혁명 주도의 의지를 갖고 있는 다국적기업들의 지배력 강화, 제조업 강화 정책으로 나타나고 있는 제조업 회귀 및 보호무역 경향, 우리의 취약한 국제협력 기반 등 위협요인을

어떻게 극복하느냐가 관건이다.

표 34. 4차 산업혁명 대응 나노기술 개발 전략 추진의 SWOT 분석 및 대응 전략

항목	항목별 요인	4차 산업혁명 대응 전략
강점 (Strength)	<ul style="list-style-type: none"> 강한 제조업 기반 (제조 혁신의 바탕) 초정밀 가공(공정)기술 경쟁력 <ul style="list-style-type: none"> 세계 최고의 나노소자 기술 경쟁력 나노기술 개발 경쟁력 (R&D) <ul style="list-style-type: none"> 인력/인프라/공정 나노기술 수요 산업의 경쟁력 <ul style="list-style-type: none"> (이차전지, 전기자동차 부품 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 첨단장비기술 집중 개발 (산학연 컨소시엄(테스트베드 포함), 시험 채택(구매) 지원) 핵심 선도기술 수요 대응 전략분야 선정 및 집중 개발 (초저전력 및 대용량 나노소자, 고성능 나노센서, AI 전용칩 등)
기회 (Opportunity)	<ul style="list-style-type: none"> 새로운 패러다임 구축으로 시장 창출 기회 (새로운 장비/부품/소재 수요 발생; 교체 및 신규 수요; niche 마켓) 선도기술 관련 나노기술 분야의 적용/확장 수요 증가 정부의 계획 (의지) (국가적 필요성) 	<ul style="list-style-type: none"> 중소·벤처 기업 지원 플랫폼 역량 강화 (인력/기술(자문)/인프라 제공(시제품 제작) 등) 중소 파운드리 서비스 기업 육성 (나노센서, 전용칩 등 전략제품 분야) 나노기반 H/W 부문 투자 명시
약점 (Weakness)	<ul style="list-style-type: none"> 핵심 선도기술 기업의 부재 디지털화 원천기술의 낮은 경쟁력 <ul style="list-style-type: none"> 초연결에 필요한 S/W 기술 취약 빅데이터, AI 기술의 낮은 경쟁력 통합적 추진 전략 부재 (나노기술의 활용 전략 부재) 기술력-산업화 연결 능력 취약 	<ul style="list-style-type: none"> 글로벌 경쟁력을 갖춘 플랫폼 기술 기업 육성 (제조업 회귀 및 무역장비 돌파) 핵심 소재·부품을 기반으로 해외 선진업체 혹은 다국적기업과 전략적 제휴 (AI, 빅데이터 등 S/W 분야; 로봇, 자율주행 자동차, 전기차 등의 선도기술 분야)
위협 (Threat)	<ul style="list-style-type: none"> 선진국의 전략적 집중 투자 (선진국/선진업체의 빠른 전환) 글로벌 다국적기업의 지배력 강화 (글로벌 가치사슬의 고착) 제조업 회귀 및 보호무역 정책 강화 낮은 국제화 수준 (국제 파트너십) 	<ul style="list-style-type: none"> 원천특허 확보 및 표준 선점을 위한 활동 강화 (국제협력) 기술사업화 시스템 구축 (기술/경영/금융 등 통합 체계)

나. 대응 방안

앞서 살펴본 대로 4차 산업혁명은 한두 가지 기술의 선도로 진행되지 않는다. 1차, 2차 산업혁명은 물론 디지털 혹은 자동화 혁명인 3차 산업혁명 때보다 더 많은 수의 선도기술들이 기여하게 될 것이다. 몇몇 선도기술들은 이미 성숙된 상태에서

4차 산업혁명 탄생에 기여할 것이며 산업혁명이 진행되는 동안 새로운 기술들이 등장하여 혁명을 가속시키게 될 것이다. 물론 4차 산업혁명이 시작되는데 큰 기여를 하고 있는 IoT, (자율)로봇, AI, 빅데이터 등의 기술도 산업혁명의 진전과 함께 발전해야만 한다. 6장에서 살펴본 것처럼 나노기술은 4차 산업혁명의 발전에 핵심적인 역할을 하게 될 것이다. 즉 나노기술은 그 자체가 4차 산업혁명을 선도하는 기술은 아니지만 4차 산업혁명을 선도하는 기술들은 나노기술의 지원을 받지 않고 발전하기 어렵다. 따라서 4차 산업혁명에 대응하는 나노기술을 전력적으로 개발하는 것은 4차 산업혁명 정책의 중심이 되어야 한다. 선진국들의 4차 산업혁명 관련 정책에 (나노)소재기술과 함께 나노기술이 빠짐없이 포함되어 있는 것도 같은 이유이다. 나노기술 측면의 적극적인 대응이 필요한 이유를 시기, 방법(틀, 사업), 예상 성과, 성공할 수 있는 요인, 선택가능한 추진방법으로 나누어 제시한다.

① 시기에 대한 분석 (왜 지금 추진하여야 하는가?)

독일이 인더스트리 4.0을 오래전부터 준비하고 착수한 지 몇 년이 지났지만 아직 4차 산업혁명 초기라고 할 수 있다. 4차 산업혁명 시대에 선두를 점하기 위해서는 1차 산업혁명 때 영국이 증기기관 기술을 선점하여 산업혁명을 주도한 것처럼 가장 핵심적인 기술분야를 선점하는 것이 중요하다. 나노기술은 선점효과가 큰 초고속 인터넷, IoT, AI 등의 기술이 발전하는데 핵심적인 요소이다. 새로운 생산혁명에서는 승자독식 혹은 시장 선점 효과가 더욱 커질 것으로 예상되므로 빨리 착수할 필요가 있으며 失期할 경우 새롭게 형성되고 있는 패러다임에서 강자로 부상할 기회를 잃게 된다. 현재는 기존 제조업의 혁신과 신제조업 창출을 동시에 추구해야하는 시점으로 기존 제조업에서 우리가 갖고 있는 강점을 잘 활용하면 신제조업 창출에서도 유리한 위치를 차지할 수 있다. 선진국들의 제조업 부활 경쟁이 매우 치열하므로 우리나라가 갖고 있는 초정밀공정(가공) 기술(나노기술)을 무기로 하여 제조업 부활 트렌드에 동승 내지 선도할 수 있는 전략을 실행에 옮길 시점이다. 우리나라가 강한 제조 역량을 글로벌 S/W 기업의 제조업 진출 전략과 전략적으로 결합하여 강점을 더욱 강화할 수 있는 시점이다. 글로벌 가치사슬(global value chain, GVC)이 고착되어 가는 경향(후발기업에게는 진입장벽이 높아짐)이 있으므로 GVC에 참여할 수 있는 나노기술 기반의 플랫폼 기업 육성이 시급하다.

② 새로운 사업으로 추진해야 하는 이유

4차 산업혁명은 ‘속도의 전쟁’이라고도 할 수 있다. 앞서 언급한 것처럼 승자 독식의 특성은 속도에서 뒤쳐짐은 곧 도태를 의미하기 때문에 선진국들을 앞지르거나 최소한 뒤쳐지지 않는 속도 이상으로 진전시켜야 한다. 따라서 광범위한 연구 주제, 다양한 연구단계를 포괄하는 기존의 기술개발 사업으로는 목표지향적인 집중 개발을 속도감 있게 추진하기 어렵다. 따라서 4차 산업혁명의 핵심영역에 필요한 기술을 집중 개발할 수 있는 전략 사업을 조속히 추진할 필요가 있다.

수행 중인 연구개발 사업에서도 4차 산업혁명에 큰 기여를 할 수 있는 기술들이 개발될 수 있다. 현재의 기술 공급 중심의 사업 체계에서는 개발된 기술을 별도로 분리하여 4차 산업혁명 관련 기술개발 체계에 담기 어렵다. 이러한 상황에서는 필요 이상의 기술 개발을 계속하거나 기술 보완이 필요한 부분(기술 공백)에 집중하기 어렵다. 따라서 CPS 구축, IoT, AI에 필요한 핵심기술을 추출하고 선행 혹은 진행 중인 연구개발 과제의 성과를 활용하여 핵심기술을 확보하게 할 수 있는 새로운 틀(사업)이 필요하다. 새로운 틀(사업)(가칭 나노기술 전략 프로그램)은 ‘속도’의 이슈에 대응하는 전략인 동시에 4차 산업혁명 관련 정책 내지 연구개발 정책의 효율성을 제고하는 방안이기도 하다.

③ 별도 사업 추진으로 얻을 수 있는 것 (지원의 타당성)

4차 산업혁명에 대응하는 나노기술 전략 프로그램을 통하여 얻을 수 있는 성과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

나노기술 전략 프로그램은 4차 산업혁명 관련 기술을 개발하는 구심 역할을 한다. 4차 산업혁명에 직결되는 기술이 개발되었을 때 즉시 수용하여 사업화까지 신속하게 진전시킴으로써 실질적인 성과 창출이 가능하다. IoT용 나노센서, 대규모 정보저장에 필요한 대용량 메모리 반도체, (자율주행 자동차용) 전용 AI 소자 등 4차 산업혁명에 소요되는 핵심기술을 조기에 개발함으로써 국제적인 리더십을 확보할 수 있다. 우리나라는 반도체 공정, 초정밀 패키징 등의 분야에서 세계 최고의 경쟁력을 갖고 있으며 인터넷 기술도 세계 최고 수준이다. 전략 프로그램을 통하여 기술을 한 단계 진전시킴으로써 현재의 산업적 강점을 더욱 강화할 수 있다.

나노기술 전략 프로그램으로 핵심기술이 조기에 사업화되어 신산업이 창출되면 새로운 패러다임(4차 산업혁명)으로 확장 혹은 새로운 시장을 선점할 수 있고 세계적인 경쟁력을 갖춘 강소기업(플랫폼 기업)이 육성된다. 예를 들면 센서의 중요성은 지금까지 계속 강조되어 왔고 기술력을 키우기 위한 여러 차례의 시도가 있었지

만 성공하지 못하였다. 세계적인 기업들이 강한 지배력을 갖고 시장을 장악하고 있었기 때문이다. 4차 산업혁명의 패러다임은 지금까지와는 전혀 다른 특성을 가진 (나노)센서들을 요구하고 있고 수요량도 엄청나게 많다. 많은 수량이 필요한 만큼 가격은 매우 낮아야한다. 즉, 새로운 센서기술을 가진 기업들의 시장 진출이 가능해 진다. 우리나라는 새로운 센서를 대량으로 제조할 수 있는 역량을 갖고 있기 때문에 글로벌 기업들의 지배력이 미치지 못하는 영역들을 공략하여 시장에 진입할 수 있다. 나노기술 전략 프로그램은 비단 4차 산업혁명 영역에만 유효한 것이 아니다. 신제품 개발에 필요한 새로운 기능을 제공(나노소재)하고 3D 혹은 4D 프린팅용 나노소재를 개발하며 자율주행 전기자동차용 전자파 차폐소재·배터리(이차전지)·나노 센서를 제공할 수 있게 됨으로써 글로벌 부품 공급기지의 입지를 강화할 수 있게 된다. 이는 제조업 경쟁력을 강화하고 있는 선진국과 중국, 인도 등과 경쟁할 수 있는 기반을 제공한다.

④ 성공할 수 있는 요인

우리나라가 나노기술을 활용하여 4차 산업혁명에 동참하여 성공할 수 있는 이유는 세 가지이다.

첫째는 나노기술 부문이 세계적인 경쟁력을 갖고 있다는 점이다. 메모리 반도체, 디스플레이 등 세계적인 수준에 올라있는 몇몇 특정 분야가 있긴 하지만 나노기술과 같이 넓은 영역의 기술 분야에서 기술개발 능력, 인프라 수준, 연구인력 등이 골고루 갖춰져 세계 수준에 도달한 분야는 거의 없다. 확보된 역량을 전략적으로 활용하면 세계적인 테스트베드로서의 입지 활용이 가능하고 창업 지원은 물론 세계적 강소기업 육성도 충분히 가능하다.

둘째는 우리나라는 여전히 제조업 강국이라는 점이다. 반도체 공정기술, 정밀소재 기술 등의 기반기술과 함께 자동차, 디스플레이 등 조립산업 역시 경쟁력을 갖고 있고 이러한 제조업 기반에 나노기술이 접목되어 새로운 산업을 이끌어낼 것이다.

셋째는 환경변화에 대한 대응 능력이다. 맞춤형 수요, 현장에서 즉시 제조 등 새로운 변화에 기존 생산방식으로 대응하는 데는 한계가 있다. 따라서 나노기술에 기반을 둔 다양한 새로운 제품들이 시장에 진입할 수 있는 기회가 나타나고 있다. 앞서 언급한 IoT용 나노센서의 새로운 시장이 예가 될 것이다. 제품-서비스, 개발-생산-판매가 결합되는 등 사업모델(business model, BM)이 달라지고 있으므로 유연성이 큰 핵심공정의 중요성은 더욱 커지고 있다. 우리나라가 강점이 있는 공정기

술에 나노기술이 더해지면, 즉 나노센서가 장착된 자율 작업로봇과 같은 기술이 완성되면 우리의 경쟁력은 더욱 높아질 것이다. 나노기술 분야의 나노인프라는 자본이 축약하고 전문인력이 부족한 중소·벤처기업들이 아이디어만으로도 사업을 시작할 수 있는 강력한 플랫폼의 역할을 할 수 있을 것이다.

⑤ 선택 가능한 추진방법

나노기술 전략 프로그램에서 선택할 수 있는 추진방법은 다음과 같다.

첫째, 우리의 강점인 반도체 기술 등 초정밀 공정기술을 더욱 심화하고 확산하는 것이다. 초정밀 공정기술을 AI 전용칩, 나노센서의 제조에 활용하여 대량 제조, 요구사양별 맞춤 제조(파운드리 서비스⁵⁵), 초저가 제조를 실현하여 글로벌 부품제조 플랫폼으로 육성한다.

둘째, 세계 4위 수준의 연구개발 능력, 나노인프라, 나노인력 등 기술개발 지원을 재배치하여 4차 산업혁명 관련 기술개발 지원, 창업 및 스타트업의 시제품 제조 지원 및 기술자문을 제공한다.

셋째, 전반적인 영역을 다루는 기존의 연구개발 사업 외에 CPS 수요 대응 나노기술 개발과 같은 4차 산업혁명의 기술수요(시장 니즈) 대응에 중심을 둔 기술개발 사업을 별도로 추진하는 정책을 추진한다.

넷째, 우리나라가 강점이 있는 분야(지렛대로 활용)를 중심으로 국제표준활동, 국제공동연구컨소시엄에 적극 참여하여 국제협력을 강화한다. 특히 우리의 강점 분야인 나노소자, 나노소재 등의 분야를 4차 산업혁명 플랫폼 분야로 육성하며 AI 전용칩 제작 역량을 활용하여 축약한 AI 관련 소프트웨어 분야의 국제협력을 이끌어낸다.

다. 나노기술 전략 프로그램 추진과 4차 산업혁명 대응 로드맵

4차 산업혁명에 대응하는 나노기술을 전략적으로 개발하기 위해서는 수요 분야(관련 분야)와 수요 기술을 먼저 파악하고 개발되어 있거나 개발 중인 나노기술을 대응시키는 것이 바람직하다(전혀 개발되어 있지 않다면 새로운 개발 계획을 수립). 즉 4차 산업혁명을 주도할 핵심영역의 로드맵을 이행해 가는데 필요한 나노기

55) 4차 산업혁명 체제에서 제조업 경쟁력은 민첩성(agility), 전문성(specialty), 경제성(reasonability), 책임성(responsibility)을 갖춘 신기술 기반의 중소형 파운드리 서비스 네트워크를 구축하는 것임.

술을 대응시켜 개발할 필요가 있다. 우리나라는 핵심분야별 로드맵이 아직 구체적으로 작성되어 있지 않기 때문에 빅데이터 분야의 연구 로드맵(유럽)을 참고하여 나노기술이 기여할 수 있는 영역을 표시하였다(그림 69의 아래쪽 7 개 기술 분야).⁵⁶⁾

56) M. Cuquet and A. Fensel: Big data impact on society: a research roadmap for Europe.



그림 69. 빅데이터 기술의 로드맵 및 나노기술 관련 세부기술

나노소자 기술 관점에서 빅데이터 기술에 기여할 수 있는 영역을 찾는 것보다는 빅데이터 기술이 필요로 하는 구체적인 요구사항에 대응하는 것이 효과적이다. 빅데이터 기술의 로드맵을 작성할 때 세부기술의 개발현황을 분석하는 단계에서 필요

한 나노기술을 도출하고 활용 방법, 시기 등을 구체화하는 것이 필요하다. 현재의 나노기술(주로 나노소자 기술)로 해결할 수 없을 경우에는 대체기술을 개발할 것인지 아니면 현재 기술의 수준을 어떻게 높여서 해결할 것인지를 로드맵에 담아야 한다. 나노기술 부문이 해야 할 일은 4차 산업혁명에 대응하는 주요 영역의 기술개발 로드맵을 작성할 때 참고할 수 있는 자세한 기술 정보들을 제공하는 일이다. 바람직하게는 나노기술 전문가들이 로드맵 작업에 참여하여 필요한 나노기술 정보를 제공하는 일이다. 적어도 다른 영역의 전문가들이 로드맵을 작성할 때 나노기술에 대한 관심을 갖도록 하여야 한다. 나노기술에 대한 정보가 없어 로드맵의 구체성이 떨어지거나 (우리가 충분한 기술을 보유하고 있음에도) 외국 기술에 의존하게 하지는 않게 하여야 한다.

그림 69는 하나의 예시이다. AI, 로봇(자율이동 기기 포함), 3D 프린팅 등 주요 분야의 로드맵 작성 시 통합 작업을 할 필요가 있다. 나노기술 측면에서 작성한 로드맵⁵⁷⁾은 기술 중심으로 작성된 것이므로 원천기술을 개발하는 목적으로는 적합하지만 4차 산업혁명 대응과 같은 용도로는 적합하지 않다. 유럽의 경우도 주요 영역 별로 전략 로드맵들이 있으나 작성된 시기가 다르고 4차 산업혁명을 염두에 두고 작성한 것이기 때문에 더욱 심도 있는 연구가 필요하다고 제시하고 있다.⁵⁸⁾

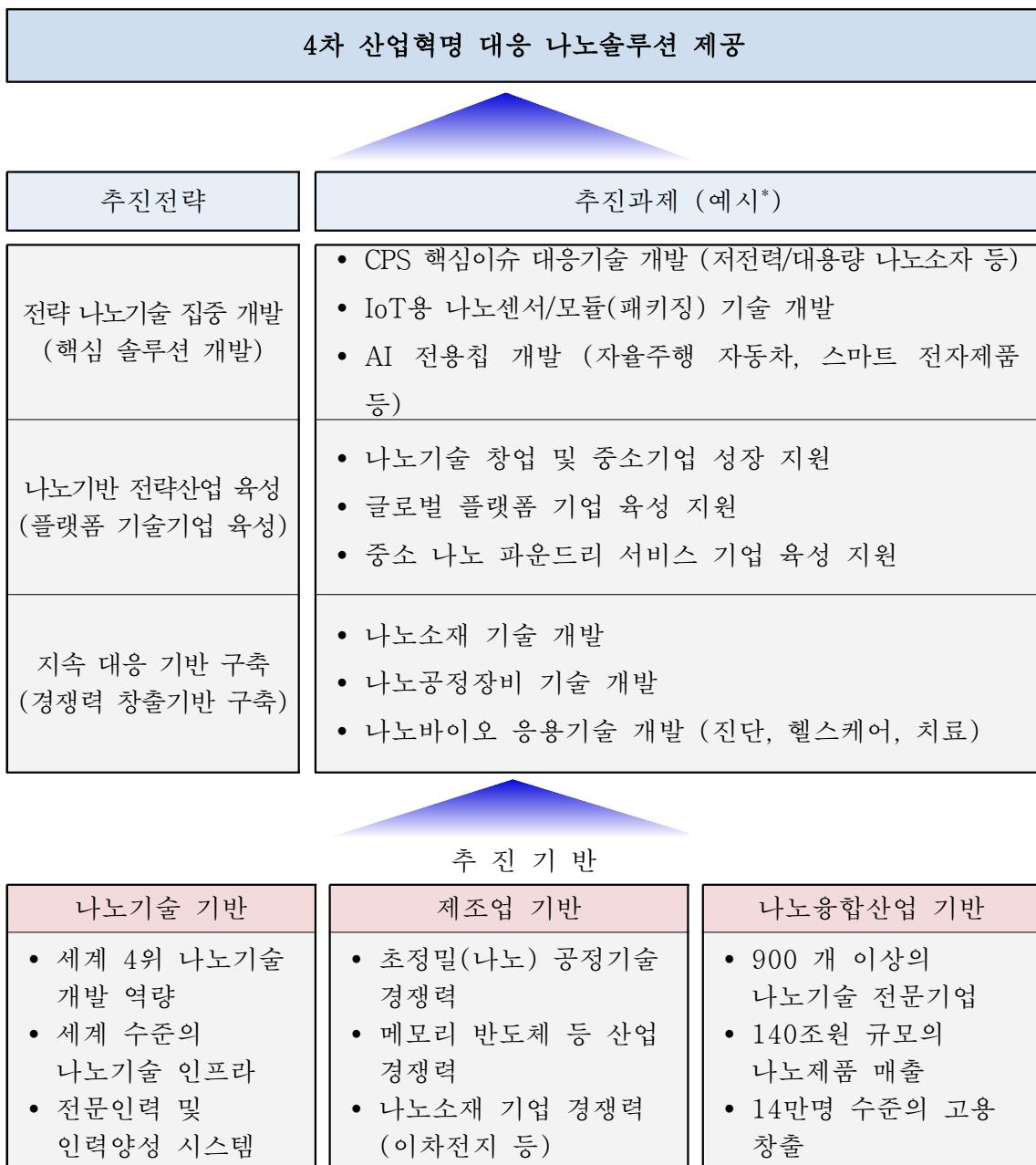
4차 산업혁명에 대응하는 나노기술을 전략적으로 개발한다는 의미는 ‘목표’를 갖고 연구를 하는 것이며 수요 영역이 가시권에 들어온 기술을 개발한다는 것이다. 또한 단기적으로는 이미 개발되어 있거나 개발 중인 기술을 대응시키는 것이므로 기술개발 로드맵의 작성이 필요한 부분이다. 다만 나노기술 개발을 위한 로드맵이 아니라 수요 영역의 목표를 달성하는 기술개발 로드맵의 세부내용으로 나노기술을 대응시키는 로드맵이 되어야 한다. 장기적인 나노기술 수요는 나노기술의 성숙도가 낮은 경우가 많으므로 나노기술 분야의 중장기 로드맵과 연결시켜 놓는 것이 필요하다.

57) 제2기 국가나노기술지도 (미래창조과학부) (2014. 2.).

58) C. Santos, A. Mehrsai, A.C. Barros, M. Araujo, E. Ares: Toward Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps, Procedia Manufacturing 13, 972 (2017).

(4) 나노기술 개발 추진 전략

가. 비전



* '예시'로 표시한 이유는 정부의 4차 산업혁명 추진계획에 따라 전략별 추진 과제가 달라질 수 있기 때문. 따라서 가급적 구체적인 과제보다는 사업 영역에 가까운 내용을 제시

나. 추진전략

추진전략 1	전략 나노기술 집중 개발 (핵심 솔루션 개발)
--------	---------------------------

□ 개요

- 4차 산업혁명 초기의 핵심 기술이슈를 해결하는데 필요한 나노기술을 전략적으로 개발하여 신속히 대응함으로써 초기 판도에서 입지를 굳힐 수 있도록 함.
- 기창출(혹은 기획보)된 나노기술을 CPS의 핵심 구성요소에 적용하는 등 응용내지 실용화 단계 이상의 목적지향적 기술 개발 추진
- 4차 산업혁명 관련 국내 산업계의 경쟁력 확보 혹은 글로벌 기업의 새로운 영역 개척에 동참(글로벌 가치사슬 참여)이 가능한 기술 영역의 전략적 개발

□ 추진방안

- 목적(산업적 니즈)지향적 추진의 효과성을 제고하기 위하여 기업이 주관하는 산학연 컨소시엄 형태의 사업 추진
 - 컨소시엄은 가치사슬상의 복수 기업의 참여로 하며 학연은 보유한 나노기술을 수요기업에 이전 혹은 수요기업과 공동개발(기존 성과의 보완)하는 역할을 함.
 - * (예시) 자율주행차용 AI 전용칩 개발 : 자율자동차를 개발하고 있는 기업이 주관하고 센서 제작 기업, 패키징 전문업체 등의 기업이 참여하며 시각(vision) 센서(나노센서) 관련 기술을 갖고 있는 연구소 혹은 대학이 참여함.
- 4차 산업혁명 초기의 신속한 대응을 목적으로 하므로 3~5년 이내의 단기 개발 과제로 추진하며 추진성과의 평가는 산업적 결과를 중심으로 함.
 - (기간) 1단계 추진(3년)을 원칙으로 하며 필요 시 2단계(2년)를 지원 (2단계 편성의 경우 기업의 참여범위(현금 부담)를 확대하여 성과목표를 높게 잡음).
 - (성과평가) 4차 산업혁명 핵심이슈의 해결 및 경제적 성과, 글로벌 경쟁력 확보 여부 등으로 평가

□ 추진과제 (후보과제)

- CPS 핵심이슈 대응 나노기술 개발
 - 대용량 정보의 고속 전송 및 처리, 대용량 저장에 필요한 초고속화, 대용량화,

저전력화 이슈에 대응하는 분야에 나노기술 적용 (초저전력 메모리 소자, 초고속 통신모듈 등)

○ IoT용 나노센서/모듈(패키징) 기술 개발

- 저전력 독립전원 나노센서(회전/가속도/온도/응력 등을 감지) 및 저전력 통신 모듈 개발 등
- 기존 생산장비 혹은 시스템에 설치 가능한 IoT 모듈 개발 (현재 시스템 업그레이드 수요 대응)

○ AI 전용칩 개발

- 자율자동차용 AI와 같이 신속한 데이터 처리를 필요로 하는 전용칩 개발
- * (예시) (거리센서+촉각센서+동작센서)의 기능을 하나의 시각(vision)센서와 알고리즘으로 대체

□ 예상성과 및 파급효과

○ 예상성과 : AI 전용칩 및 이를 이용한 4차 산업혁명 핵심제품 개발

○ 파급효과 : 4차 산업혁명 초기 관련 산업의 경쟁력 제고

□ 소요예산 및 수행시기 (5~6개 과제 추진 기준; 착수 과제 수 및 기간에 따라 달라짐)

연도		2018	2019	2020	2021	2022	(합계)
소요예산 (억원)	정부	30	30	30	30	30	150
	민간	5	5	5	10	10	35
	(합계)	35	35	35	40	40	185

추진전략 2 나노기반 전략산업 육성 (플랫폼 기술기업 육성)

□ 개요

- 나노기술은 첨단제조업을 재혁신(4차 산업혁명)하는데 촉매 역할을 할 기술임.
 - 첨단제조업의 생산성 추가 향상과 이로부터 생기는 고용창출에 기여
- 4차 산업혁명에 대한 나노기술의 역할은 창업과 글로벌 경쟁력을 갖춘 플랫폼 기업의 육성을 통하여 나타날 것임.
- 4차 산업혁명 초기 관련 산업의 전반적인 수준 향상을 도모하는 것으로는 급속 한 진전에 대응하는데 한계가 있으므로 산업 측면의 전략적인 접근 필요

□ 추진방안

- 4차 산업혁명과 연관성이 큰 산업군을 대상으로 중소·벤처 기업(창업 포함)의 글로벌 경쟁력 제고를 지원
 - 4차 산업혁명 관련 나노기술을 가진(혹은 나노기술이 필요한) 예비창업자를 위한 기술 및 시장 분석 지원으로 창업 성공률 제고 (나노기술 사업화 지원)
 - 나노기술 관련 사업 영역을 가진 기업의 기술경쟁력 제고 지원 (전문가 자문 제공(전담전문가 시스템), 특히 경쟁력 강화)
- 4차 산업혁명 관련 중소기업의 주력상품 발굴 및 주력상품의 글로벌 경쟁력 강화를 위한 기술개발 지원
 - 중소기업의 제품 포트폴리오 분석을 통한 글로벌 경쟁이 가능한 주력상품 후보 발굴 및 기술경쟁력 제고 지원
 - * (중소기업 현황(전략적 접근이 필요한 배경)) 중소기업들은 재원, 기술, 인력은 취약한 반면 제품 구성이 너무 단순하거나 필요 이상으로 훌어져 있어 경쟁력 제고에 걸림돌이 되고 있음.
 - 기업별 다양한 상황을 감안하여 기업 현안을 반영한 상향식(bottom-up) 과제 제안 방식으로 추진
- 중소·벤처 기업의 경쟁력 제고를 지원하여 4차 산업혁명 체제의 글로벌 기업으로 육성하는 것이 목적이므로 성과 중심의 단계적 접근
 - (기간) 2 단계(3년+2년)로 나누어 추진; 1단계(3년) 목표는 글로벌 경쟁력을 확보할 수 있는 제품 발굴 및 제품 사업화를 위한 기술개발 지원, 2단계(2년) 목표는 일정 수준 이상의 글로벌 시장 점유율(혹은 시장 점유 상위기업) 확대를 위한 기술개발 지원
 - (성과평가) 1단계 추진성과는 개발 제품의 시장 경쟁력*(혹은 기술 경쟁력(특히 경쟁력)으로 평가하며 2단계 추진성과는 일정 규모 이상의 세계시장에서 점유율 혹은 경쟁순위로 평가함.
 - * 시장 경쟁력 : 대상 시장 및 시장 성장 전망, 경쟁 구조, 제품의 경쟁요소 및 경쟁력 등으로 평가 (잠재 경쟁력을 평가)

□ 추진과제 (후보과제)

- 나노기술 창업 및 중소기업 성장 기술개발 지원
 - 창업 대상기술의 경쟁력(기술 경쟁력, 시장창출 가능성) 분석·평가 지원
 - 창업 혹은 성장에 필요한 목표 핵심기술(key technology)의 개발 지원

○ 글로벌 플랫폼 기업 육성 지원

- 전략품목(주력품목)의 글로벌 경쟁력 강화에 필요한 기술 개발 지원
- 신규 주력품목 발굴 및 관련 기술 개발 지원

○ 나노기술 서비스 혹은 나노기술 기반 파운드리 서비스 중소기업 육성

- 전문화된 나노기술 영역의 서비스를 중소·벤처 기업에 염가로 제공할 수 있도록 서비스 대상기술 개발 지원

* (예시) 성능 분석, 인증 대행 (성능, 표준화)

- 소량의 특수한 나노제품의 시제품(프로토형) 제작 혹은 시생산 서비스를 제공할 수 있는 특화된 중소기업 육성을 위한 기술개발 지원 (관련 인프라 구축을 병행, 기존 인프라 활용을 원칙^{*}으로 하고 최소한의 비용을 지원)

* 인프라 구축이 목표가 아니라 내외부의 인프라를 활용하여 시제품 제작 혹은 시생산을 할 수 있게 하는 엔지니어링 서비스 기업을 육성하는 것이 목표

□ 예상성과 및 파급효과

○ 예상성과 : 전문화된 서비스 제공 플랫폼 기업 창출

○ 파급효과 : 적은 비용(투자)으로 전문성이 요구되는 시도를 해볼 수 있게 됨으로써 다양한 모험적, 창의적 신제품 창출

□ 소요예산 및 수행시기 (5~6개 과제 추진 기준; 착수 과제 수 및 기간에 따라 달라짐)

연도		2018	2019	2020	2021	2022	(합계)
소요예산 (억원)	정부	30	30	30	30	30	150
	민간	10	10	10	15	15	60
	(합계)	40	40	40	45	45	210

추진전략 3	지속 대응 기반 구축 (경쟁력 창출 기반 구축)
--------	----------------------------

□ 개요

- 4차 산업혁명은 향후 진전이 가속될 전망이며 이에 필요한 신기술 수요도 확대될 것임. 세계적으로 확대될 신기술 수요에 지속 대응이 가능한 체계를 구축하는 것이 경쟁력 창출의 기반이 될 것임.
- 신기술 혹은 신산업 창출에 가장 큰 걸림돌이 되고 있고 향후 더욱 중요성이 커질 기술 영역은 소재·부품 기술 분야임. (첨단소재 기술 역시 극한영역에 접

근하고 있기 때문에 나노소재, (계산나노과학에 의한) 창조소재 등이 중점 개발대상임)

- 소재(·부품) 기술은 개발에 고급인력, 자본이 많이 들고 장기간이 소요*(고위험도(high risk)를 가짐)되므로 4차 산업혁명 체제의 가장 큰 병목기술 중의 하나

* 미국, 일본 등 선진국들이 MGI(Material Genome Initiative) 등 신소재 개발을 효율적으로 추진하기 위한 국가 프로그램을 수행하고 있음.

- 가까운 장래에 4차 산업혁명 시대의 주요 산업이 될 나노바이오 영역을 육성하기 위한 선제적인 응용기술 개발 필요

□ 추진방안

- 나노소재기술개발사업(과학기술정보통신부), 나노융합산업핵심기술개발사업(산업통상자원부), 정부가 지원하고 있는 연구개발사업에서 획득되는 연구성과 중 4차 산업혁명에 활용될 수 있는 연구결과의 사업화 기술개발 지원
 - 당초 수행하는 연구과제와는 별도로 사업화 중심 지원을 위한 fast track 신설
 - * 나노융합2020사업 혹은 4차 산업혁명 관련 사업의 재원으로 지원
- 나노기술 제품의 대량 생산(대면적/대형 제품 제조 포함), 품질 안정, 생산원가 축소에 필요한 완전 디지털화된 나노공정장비 기술 개발 지원
 - 새로운 생산혁명은 곧 새로운 생산수단(생산장비) 개발의 경쟁이므로 이에 대한 대응 필요
 - 기구축된 나노인프라를 새로 개발되는 장비의 테스트베드로 활용
- 고령사회 대응 핵심산업이 될 나노바이오 분야를 전략분야로 선정하고 개발된 나노기술을 융합하는 응용(사업화) 중심의 기술 개발 지원
 - 나노바이오 분야는 현재 느리게 성장하고 있지만 향후 큰 산업을 형성할 것임.
 - 나노바이오 분야는 나노기술이 가장 폭넓게 활용될 분야임.
- 4차 산업혁명의 진전에 지속적인 대응하기 위한 나노기술 기반을 구축하는 사업이므로 기초 혹은 원천 연구 이후의 기술 개발, 즉 응용연구 혹은 개발연구의 성격이므로 중장기 과제로 지원
 - (기간) 3 단계 8년(3년+3년+2년) 지원을 원칙으로 하며 필요 시 2단계에서 종료할 수 있음. 적어도 2단계 이후에는 기업 참여를 필수 조건으로 하고 특히 3단계는 기업이 주관하여 사업화를 달성함.

– (성과평가) 1단계 종료 시점에는 사업화(시장 창출) 가능성, 2단계 종료 시점에는 사업성(경제성) 확보 가능성, 3단계 종료 시점에는 실제 시장 창출 여부로 성과 평가

□ 추진과제 (후보과제)

- 4차 산업혁명 수요 대응 나노소재·부품 기술 개발
 - 나노센서용 나노소재, 유연전자 응용 나노소재, 3D 프린팅용 나노소재 등의 개발 (기술개발 과제를 통한 플랫폼 기업 혹은 연구그룹 육성)
 - 고효율 태양전지 모듈, 에너지 하베스팅 모듈(압전 혹은 열전 모듈 등), 고성능 이차전지 혹은 연료전지 셀 등 나노구조 이용 기술 개발
- 나노공정장비 기술 개발
 - 대면적 나노패턴 제조장비 기술 개발 (나노패턴 인쇄, 나노패턴 리쏘그래피 등)
- 나노바이오 응용기술 개발
 - 진단용, 치료용, 헬스케어용 나노바이오 소재 및 센서시스템 개발
 - * (예시) 암진단용 바이오이미징 소재 (나노조영제)

□ 예상성과 및 파급효과

- 예상성과 : 4차 산업혁명에 필요한 나노기술 지속 공급, 세계적 경쟁력을 가진 플랫폼 기업 혹은 연구그룹 육성
- 파급효과 : (초)고령사회에 대응하는 다양한 신산업 창출

□ 소요예산 및 수행시기 (10개 과제 추진 기준; 착수 과제 수 및 기간에 따라 달라짐)

연도		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	(합계)
소요예산 (억원)	정부	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	민간	–	–	–	15	15	15	25	25	95
	(합계)	50	50	50	65	65	65	75	75	495

다. 추진방안

- (다부처 사업으로 조기 착수) 4차 산업혁명 관련 사업 주관부처인 과학기술정보통신부 주관의 다부처 사업으로 추진하는 것이 바람직하다. 기획연구에서 제시

하는 추진 (기술)영역은 AI, 로봇, IoT 등 개별 영역에서도 제기되는 문제(다만, 나노기술의 역할 관점이 아닌 일반적인 관점)이므로 비슷한 내용의 과제들이 중복 추진될 가능성이 있다. 따라서 다부처 사업의 형태로 조기에 착수할 필요가 있다.

- (과제 중복 이슈) 제안하는 사업내용들은 수행 중이거나 종료된 연구과제 내용과 일부 중복되는 부분이 있을 수 있다. 제안하는 사업내용은 4차 산업혁명 초기의 기술 이슈 해결에 초점이 맞춰져 있으므로 구체적인 목표가 중복되지 않는 경우하면 일부 내용의 중복을 허용할 필요가 있다.
- (정책 혼합) 제안하는 전략들이 성과로 연결되기 위해서는 세부적인 요소기술 개발 사업, 소재·부품 기술 개발 사업, 로봇 등 (거대)시스템 기술 개발 사업, 부품 혹은 시스템의 실증 사업들과의 연계가 필수적이다. 단순한 정책 혼합(policy mix)을 넘어 연구결과 공유⁵⁹⁾, 성과 연계 fast track⁶⁰⁾ 등 통합적인 접근이 필요하다.
- (제조업과의 연계 강화) 제조부문의 기업들이 글로벌 경쟁력을 갖춘 플랫폼 기업으로 성장할 수 있도록 주력제품(cash cow item)의 발굴과 개발에 필요한 나노기술을 제공하고 후속기술을 지속적으로 개발할 수 있도록 지원한다.
 - 시장 수요(4차 산업혁명 관련 산업) 중심의 맞춤형 기술 개발 및 제공
 - 주력제품 개발 혹은 핵심기술 영역 경쟁력 강화를 지원하기 위하여 나노전문 인력 및 나노인프라 제공

라. 기대효과

- (4차 산업혁명 관련) 4차 산업혁명 초기의 주요 이슈를 조기에 해결할 수 있도록 지원함으로써 새로운 산업 패러다임에서 우리나라의 지위를 확고히 할 수 있다.
 - 초고속 인터넷, IoT 등에 소요되는 핵심 부품의 조기 사업화
 - 대용량 데이터센터에 소요된 대용량 및 저전력 메모리 소자 시장 점유 확대
 - AI 전용칩, 블록체인 전용칩 등 4차 산업혁명 특수 대응 시장 선점 및 자율주행 차, 데이터 보안 시스템 구축 등 관련 산업 선도

59) 기술완성도 제고, 조기 산업화를 위한 피드백을 위함.

60) 다른 연구개발 사업(수행 중인 사업 포함)의 통해 얻은 성과 중 활용 가능한 결과를 곧바로 수용

- (혁신 제조업 관련) CPS 구축, 플랫폼 기업 육성에의 기여로 우리나라 제조업의 국제 경쟁력이 높아질 수 있게 할 것이다.
 - 생산설비의 완전 디지털화에 필요한 맞춤형 부품(소자, 모듈)을 제공할 수 있게 됨으로써 CPS의 자체 설계·구축·운영이 가능하게 되어 선진국 업체에의 의존도를 줄일 수 있게 될 것임.
 - 주문형 센서, 주문형 전용칩 등의 생산을 위한 플랫폼 기업(파운드리 서비스 제공 기업)의 기술 경쟁력 강화로 첨단 부품(소자, 시스템)의 글로벌 공급기지가 될 것임.
- (나노기술 분야 관련) 기초원천 나노기술의 조기 사업화 및 신규 시장 창출 달성으로 나노기술 기초연구로부터 사업화까지의 선순환 구조가 정착될 것이며 기술개발 속도가 빨라지게 될 것이다.
 - 나노기술 개발에서 획득한 성과들이 조기에 사업화됨으로써 연구개발의 효율성 제고
 - 원천기술 개발 중심인 현재의 나노기술 개발 패턴에 활용성 혹은 응용성을 강화하는 방향 강화

8. 요약 및 정책 제언

(1) 요약

4차 산업혁명의 출발은 데이터 기반의 제조혁신이다. 4차 산업혁명 초반 국가 혹은 기업의 경쟁력은 제조 영역에 디지털 데이터 기술을 어떻게 융합하느냐에 달려 있다. 모든 제조장비들을 디지털 데이터 영역으로 끌어들이기 위해서는 2020년 500억 개 이상으로 예측되는 고성능 센서가 제조장비, 심지어는 제조장비를 구성하는 주요 부품(혹은 모듈)에 내장되어야 한다. 수많은 센서로부터 송출되는 대규모 데이터를 대량으로 전송하고 실시간 처리하며 저장하는 기술이 개발되어야 한다. 지금의 데이터 전송(속도), 처리(속도 및 용량), 저장(용량) 수준으로는 감당하기 어려우며 획기적인 초고속화(전송 및 처리), 대용량화(저장), 저전력화(처리 및 저장)가 필요하다. 값싸고 성능 좋은 초소형 센서 모듈을 대량으로 제조할 수 있는 신기능 소재의 개발이 이어져야 한다.

4차 산업혁명 초기에 당면한 초고속화, 대용량화, 저전력화의 이슈는 시스템 설계나 알고리즘을 포함한 소프트웨어적인 접근만으로는 해결하기 어렵다. 나노소자(전자/광/스핀), 나노센서, 전용소자(칩), 새로운 나노소자(실리콘 반도체가 아닌 다른 물질 기반의 소자) 등 하드웨어적인 접근을 가미하여야 해결할 수 있다. 우리나라에는 새로운 접근에 필요한 정밀제조 공정기술 기반과 함께 세계적 수준의 나노기술 개발 능력, 고급 나노기술 인력, 다양한 나노인프라를 갖추고 있어서 하드웨어적인 접근에 유리한 위치에 있다.

우리가 갖고 있는 강점을 4차 산업혁명 초기 국가적인 경쟁력 확보에 필요한 지렛대로 활용하기 위하여 나노기술 전략 개발을 추진할 필요가 있다. 첫째, CPS 구축에 장애가 되고 있는 초고속화·대용량화·저전력화에 대응하는데 필요한 솔루션 개발을 위한 전략 나노기술의 집중 개발에 착수하여야 한다. IoT용 나노센서/모듈, AI 전용칩도 개발 착수가 시급한 분야이다. 둘째, 4차 산업혁명은 향후 몇십 년 이상 지속될 급속한 변화이다. 장기간 계속될 산업혁명에 지속적으로 동력을 제공할 나노기반 플랫폼 기술기업을 육성하는 것이 필요하다. 특히 4차 산업혁명이 요구하는 빠른 ‘속도’에 대응하기 위해서는 플랫폼 기업이 육성되어야 한다. 4차 산업혁명 관련 산업부문의 나노기업 창업을 촉진하고 성장을 지원하여야 한다. 핵심기술 부문에서 글로벌 경쟁력을 가진 플랫폼 기술기업으로 육성하고 나노기술 기반

파운드리 서비스 중소기업을 많이 육성하여 핵심부품(혹은 장비)의 글로벌 공급기지가 될 수 있게 하여야 한다.셋째, 나노소재·부품, 나노공정장비 등 개발로부터 사업화까지 긴 기간과 큰 비용이 소요되고 성공 가능성이 낮은 기술분야에서 기술개발의 효율성을 높이기 위한 적극적인 정책 추진이 필요하다. 기존 연구성과의 활용은 물론 수행 중인 연구과제의 성과도 활용할 수 있게 하는 연구개발 fast track이 필요하며 개발 내용의 중복을 일부 용인하는 유연성이 필요하다. 사회구조가 변함에 따라 나타나게 될 나노바이오 분야와 같은 신산업에 미리 투자하고 육성하는 것이 필요하다.

(2) 정책 제언

주지하고 있는 대로 4차 산업혁명은 속도의 경쟁이다. 특히 산업혁명 초기에 앞선 경쟁력을 확보하는 것은 이후의 산업혁명 체제에서 우위를 점할 수 있는 계기가 된다. 나노기술만으로 글로벌 경쟁력을 확보할 수는 없겠지만 적어도 나노기술의 뒷받침 없이 글로벌 경쟁력을 확보하는 것도 어렵다. 특히 우리가 가진 강점도 제대로 살리지 못하게 된다면 매우 안타까운 일이 될 것이다. 기획연구에서 검토한 내용들을 바탕으로 다음과 같은 정책을 제안한다.

첫째, 4차 산업혁명에 대한 국가적인 청사진이 조속히 완성되어야 한다. 4차 산업혁명의 이슈별로 단편적인 대응을 하는 것으로는 선도국이 되기 어려움은 물론 현재의 위치도 지키기 어렵다. 실질적인 논의와 사회경제적 합의 과정을 거쳐 수십 년 장기적인 추진이 가능한 국가전략이 수립되어야 한다.

둘째, 목표와 수단을 혼동하지 않고 양자가 조화를 이루는 세부 추진방안이 조속히 마련되어야 한다. 4차 산업혁명은 이전의 어떤 산업혁명보다 많은 선도기술들이 이합집산하면서 발전할 것인바 세밀하게 짠 계획을 유연하게 장기간 체계적으로 실행하지 않는 한 성공할 수 없다. 하나의 기술, 산업만으로 성공할 수 없으며 분야별 경쟁력이 곧 전체 경쟁력이 되는 것도 아니다.

셋째, 연구개발 패러다임의 대전환이 필요하다. 기초연구가 곧 사업화이고 사업화가 곧 연구개발이며, 제품이 서비스이고 서비스가 제품이며, 실제 공간과 디지털 공간이 동기화되는 4차 산업혁명 체제에서는 속도가 생명이다. 속도 경쟁 흐름에 동승하기 위하여 연구개발은 필수적이지만 연구개발 시스템의 혁신 없이는 대응이 어

려워 보인다. 선형 모델을 기본으로 하는 현재의 연구개발 체계를 대체하고 우리에게 맞는 연구개발 모델이 필요하다.

넷째, 우리가 할 수 있는 부분, 우리가 가진 강점으로부터 출발하는 실질적인 실행계획을 짜야한다. 선진국들에 비하여 미흡한 점이 많은 것이 사실이지만 우리가 가진 장점도 많다. 디지털 데이터 체계는 초정밀 세계, 초정밀 기술과 연결될 수밖에 없다. 우리는 세계 최고의 초정밀 공정기술(반도체 제조공정)을 갖고 있다. 이 초정밀 가공기술을 4차 산업혁명의 여러 부문이 필요로 하는 플랫폼 기술로 확산하면 우리는 적어도 하드웨어적인 요소를 축으로 하는 부분에서 세계를 선도할 수 있을 것이다. 나노기술을 제조혁신을 위한 플랫폼 기술로 활용하는 것이 하나의 예가 될 것이다.

다섯째, 나노기술은 완전 디지털화에 필요한 핵심기술로서의 역할을 할 것은 분명하지만 전략적 접근 없이는 성과로 연결되기 어렵다. 우리가 유리한 환경을 갖고 있다고 하더라도 4차 산업혁명 추진의 한 부분으로 인식하고 적극적인 방법으로 추진할 필요가 있다. 나노기술이 4차 산업혁명에 이용될 수 있게 하는 상향식 접근(원천기술 개발 중심)은 정부가 그간 추진해온 기술개발을 계속해서 진행하는 한편 4차 산업혁명 추진에 필요한 니즈 중심의 나노기술 개발은 하향식 접근(시장 수요 대응 중심)을 선택하여 우리나라가 선도그룹이 되는데 일조할 수 있게 하여야 한다.

[첨 부]

[첨부 1] 상위 계획 및 수행 중인 사업들과 도출된 개발대상 나노기술 개발 영역의
비교

[첨부 2] 나노기술 분야별 4차 산업혁명 기여 내용 분석 결과

- (1) 선도기술-나노기술 영역별 관련성
- (2) 4차 산업혁명 영역별 나노기술 기여 내용 및 개발대상 기술 후보과제 목록

[첨부 3] 10대 나노기술 영역별 개발대상 기술 후보과제

- (1) 과제별 세부 내용
- (2) 유사성 검토를 위한 검색어

[첨부 1] 상위 계획 및 추진 중인 사업과 도출된 개발대상 나노기술 영역의 비교

미래 나노기술 30	나노소재기술개발사업	나노융합산업핵심기술 개발사업	도출된 개발대상 기술 영역
D1. 초저전력 메모리			<ul style="list-style-type: none"> (NEDI3) 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 (NEDI5e) 웨어러블/모바일 기기의 유연 기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자
D2. 초고속·저전력 논리소자			<ul style="list-style-type: none"> (NEDI1a) 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) (NEDE3b) 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
D3. 나노환경센서	<ul style="list-style-type: none"> 나노기반 측각센서를 이용한 생체 모방형 측감 구현 시스템 기술 개발 나노소재 기반 현장 실시간 곰팡이 모니터링 시스템 개발 나노소재 기반 현장 실시간 모니터링용 환경센서 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 금속 나노패턴 센서 기반 식품유해화학물질 현장 정량검사기기 제품화 기술개발 인체신호 감지용 나노소재 복합섬유기반 편직물 섬유센서 제조와 이를 이용한 위험환경 작업자용 언더셔츠 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NMI7) 환경센서용 하이브리드 나노선 소재 (실시간 환경 모니터링) (NME7) 초소형 미세먼지 감지센서 소재 (환경 개선) (NSI1) 실내환경 모니터링용 나노 MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서 (NBI1a) 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서
D4. 신개념 나노물질·구조 나노소자	<ul style="list-style-type: none"> 2차원 소재의 대면적 저온공정 및 적층소자의 집적화로 기술 개발 나노전자소자 기술을 응용한 신경세포 모방 시냅스 소자어레이 및 아키텍처 원천기술 개발 재구성로직 소자 및 아키텍처 기술 개발 그래핀 배리스터 기반 삼진로직 소자 개발 및 집적공정, 아키텍처 연구 신경세포 모방 소자용 3차원 집적 공정 플랫폼 기술 개발 나노전자소자 기술을 응용한 신경세포 모방 뉴런소자 및 시스템 원천기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NMI4) 고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재 (유연 트랜지스터) (NODI8) 스트레처블 전자소자용 첨단 나노소재 (NSI6) 플라즈모닉 메타 소재·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 센서

D5. 유연소자	<ul style="list-style-type: none"> 자유곡면 부착형 소프트 IoT 플랫폼용 탈평면 나노전자 소재 및 소자 핵심 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 유기 나노소재 기반 적외선 이미지센서 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NEDI1d) 초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩 (3차원 집적기술)
D6. 나노 광소자			<ul style="list-style-type: none"> (NMI8) 에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투과가능 투명전극 (광전변환 소자의 전기장 효과 제거) (NEDI7) 3차원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서 (NODI5) 웨어러블 전자소자 제작을 위한 나노기반 스트레처블 기판/TFT/발광소자 및 설계 기술
B1. 농수산 제품 고도화	<ul style="list-style-type: none"> 식품 나노소재 기준물질 제조, 분석, 효능 및 안전성 평가 원천기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 식품 및 의약품 포장재용 산소투과도 0.5/수분투과도 1.0 이하급 고차단성 셀룰로오스 나노파이버 기반 친환경 투명 복합필름 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NBI1c) 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서 (NBI3b) 나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기 (NBI6c) 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재
B2. 웰빙 제품	<ul style="list-style-type: none"> 형광 디지털 이미징 기반 식품 유해물질의 고정확성 다중검출 IoT 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 나노촉매를 이용한 주름 개선용 바르는 인조 피부막 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NODI1) 오감인지형 센서 내장된 표시장치 (NSI3) AI 음성비서용 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이 (NSI5b) AR/VR 기기용 양방향 피드백 UI 센서/액추에이터 (NSH2) 헬스케어 모니터링 센서 및 생체 자극 액추에이터 용복합 웨어러블 기기 (NSP1) 제스처 인식 UI용 압전 MEMS형 초음파 ToF 센서 어레이 (NBI1b) 생체신호 인지기술을 이용한 감성인식 연구 (NBI1d) IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재 (NMTH2) 환경 및 영양소의 세포영향 평가 기술
B3. 나노진단	<ul style="list-style-type: none"> 난검출성 질병유발인자 진단용 복합 나노구조체 기반 집적 센서시스템 기술 개발 예방 의학용 피부 부착형 고감도 나노 복합 센서 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 임상 진입을 위한 1 nM 이하의 타겟 선택성을 가진 정밀 종양진단 및 15 mm 이상의 영상 심도를 보유한 치료지침용 생체안전 질병특이 나노조영소재 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NMI5) 실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체 (웨어러블 기기) (NMP2) 패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재 (개인용 질병 진단) (NODH1) 스트레처블/유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치

			<ul style="list-style-type: none"> (NODH2) 네트워크 활용한 고감도 스마트 진단 센서 표시장치 (NBMI3a) 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) (NBMI3b) 정밀의료기기(인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기) (NBMI3c) 고선택성 정밀의학용 나노조영제
B4. 생체분자 나노분석		<ul style="list-style-type: none"> 나노기술 기반 생체 저분자물질 정량 표면 질량분석 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NSI5a) Plug-In형 문자 스캐너용 나노-MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서
B5. 지능형 나노치료	<ul style="list-style-type: none"> 고형암 치료용 나노섬유 기반 3차원 복합구조 담체 및 전달 원천기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 곡면 나노패턴 공정 기반 백내장 치료용 기능성 인공수정체 및 나노체계 기반 약물치료 융합 시스템 상용화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NBMI6b) 뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술 (NBMI6c) 동반진단 나노테라노시스 기술 (NBMH1c) 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학소재
E1. 나노태양전지	<ul style="list-style-type: none"> 유도 자기조립을 이용한 계층형 이종 나노구조의 고효율 광전변환 소재 기술 개발 나노스케일 광흡수체 기반 장기 안정적 15% 박막태양전지 기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NME1b) 고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술 (양자점 태양전지) (NIE1) 데이터 기반 태양전지 소재
E2. 나노구조 이차전지		<ul style="list-style-type: none"> 차량 ISG 전원용 나노구조 탄소소재 기반 하이브리드 슈퍼커패시터 제품화 기술 개발 거대 다원자 이온 기능기 그래핀 잉크를 이용한 장범위 규칙성을 갖는 확장형 층상 나트륨 이온 이차전지 음극소재 개발 슈퍼 커패시터 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NME4) 세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재 (고성능 이차전지) (NSE2) 나노구조 제어 기반 고효율/고속 충전 이차전지 (NSE4) 나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지밀도 이차전지 (NCE3) Beyond LIB형 나트륨 이차전지 소재 설계용 시뮬레이션 플랫폼
E3. 나노구조 연료전지			
E4. 열전소자	<ul style="list-style-type: none"> 포논 제어 기반 고효율 열전 소재 및 소자 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NME5) 태양광 집열용 고성능 열전 소재 (에너지 효율 향상)
E5. 극미소전원	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 발생/저장소자 임베디드 고신뢰성 웨어러블 직물소재 연구 자가발전 복합기능 패브릭을 위한 압전성 		<ul style="list-style-type: none"> (NSE1) 대면적 유연 나노구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자 (NSP2) 압전 나노복합체 기반 에너지 자립형

	<ul style="list-style-type: none"> 나노섬유 고속·대량생산 기술 개발 기능성 압전 나노섬유 및 에너지 하베스팅 기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> 플렉서블 압력센서 (NCE4) 초소형 소자용 고효율 단원자 나노촉매 소재 설계 및 최적화
E6. 나노 분리막	<ul style="list-style-type: none"> 능동형 이온 이송 원천 기술 및 응용 소자 개발 		
E7. 해수기반 나노융합에너지			
M1. 양자점 소재	<ul style="list-style-type: none"> 나노촉매와 발광 양자점 설계용 테마형 전산모사 웹 플랫폼 개발 고효율, 고색순도, 고안정성의 친환경 양자구조 광소재의 양산공정기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 나노양자소재 복합체의 양자효율 측정 및 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NMM3) 친환경 양자점 발광소재 (에너지 소모 축소; 모바일기기 사용시간 연장)
M2. 나노탄소소재	<ul style="list-style-type: none"> 선택적 산화 그래핀 기반 기능성 나노복합소재 개발 고분산/고농도 전도성 그래핀 중간재 개발 저순도 천연흑연을 이용한 양산성 있는 저가격·고품질 산화 그래핀/환원 그래핀 제조 기술 결합엔지니어링을 통한 그래핀 특성제어 및 품질개선 기술 개발 고기능성 그래핀 산화물 액정섬유 및 섬유소자 개발 그래핀 성장·결합제어 및 혁신 전자소자 개발 대면적 균일 그래핀의 비파괴적 고속 품질 평가 기술 및 장비 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 350 x 350 mm^2 단결정 그래핀의 결합최소화를 위한 CVD 성장 및 전사 공정 기술 개발 	
M3. 인쇄전자용 소재	<ul style="list-style-type: none"> 유기 투명전극용 고전도성 고분자 나노입자 제조 및 공정 원천기술 연구 탈평면 전자소자 구현을 위한 나노소재 및 인쇄공정 원천기술 개발 		
M4. 생체모방소재			<ul style="list-style-type: none"> (NMI2) 고감도 전자피부(압력,온도) 소재 (전자 피부) (NBI2c) 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용

			나노소재 <ul style="list-style-type: none"> (NBI2d) 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술 (NBMI6a) 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술
M5. 환경측매 소재	<ul style="list-style-type: none"> 수처리 및 동시 수소 발생용 귀금속 대체 저가격 전기촉매 개발 귀금속 대체 저가 전기촉매 기반 수처리 동시 수소 발생 폐수전해 기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NME1a) 태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재 (친환경 수소 생산) (NME6) 철 기반 고효율 나노촉매 소재 (귀금속 성분 대체)
M6. 희유금속 대체물질	<ul style="list-style-type: none"> 고기능성 폐로브스카이트 나노소재용 기상 중착 전구체 개발 및 소재 응용 원천기술 개발 		
F1. 유연소자공정			
F2. 나노구조 패터닝	<ul style="list-style-type: none"> Top-down과 bottom-up 기술이 융합된 10 nm급 대면적 나노구조 형성 기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NFI1a) 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 (NFI1c) 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
F3. 고분해능 측정		<ul style="list-style-type: none"> 30 nm 이하 나노소자용 인라인 3D-AFM 	<ul style="list-style-type: none"> (NMTI1) 3차원 나노소자 고정밀 측면 물성 분석 기술 (NMTE1) 폐로브스카이트 등 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술
F4. 나노적층공정	<ul style="list-style-type: none"> 분자층 중착기술을 이용한 유기-무기 나노복합 계면 형성 기술 개발 		<ul style="list-style-type: none"> (NMI6) 자유곡면 3D 프린팅용 나노소재 (3D 프린팅 적용 확대) (NME3) 제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재 (단열) (NFI8a) 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술
F5. 하이브리드 검사		<ul style="list-style-type: none"> 나노소재 기반 테라헤르츠 2D 어레이 이미지 센서 모듈 및 인라인 반도체 검사 장비 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NFI3c) 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사장비 (NMTI8a) 2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 분석 기술 (NMTI8b) 저차원 나노소재의 특성분석 하이브리드 기술
F6. 스마트공정			<ul style="list-style-type: none"> (NEDI1b) Monolithic 3D 집적 시스템 공정, 집적, 소자 기술 (3차원 집적기술) (NEDI1c) 3차원 집적을 위한 레이저 공정 및

			<p>장비/소재</p> <ul style="list-style-type: none"> (NFI1b) 섬유상에 유연소자의 임베디드 제조 기술
기타 (분류되지 않음)	<ul style="list-style-type: none"> 웹기반 계산과학 플랫폼 기능 고도화를 위한 선도·기반기술 개발 Green IT 구현을 위한 GaN/Si 나노 에너지 소자 개발 AMOLED용 청색인광 플랫폼 구축을 위한 원천기술 개발 미래소재 개발을 위한 신유기분자 합성연구 DNA 기반 신소재를 이용한 광전자소자 원천기술 개발 주거단지 내 위생적인 음식물쓰레기 수거용기 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 다중 나노박막을 이용한 자동차용 고성능 투명 발열소자 개발 산업적 활용도가 높은 나노물질의 흡입독성 평가 장비 개발 풀-컬러 구현을 위한 표면 3D 나노구조체 기반 회절광학소자 실용화 플랫폼 기술 개발 저비용 공정 기반 셀룰로오스 나노파이버 대량 제조 기술 개발 기존코팅소재보다 물성이 우수한 나노-마이크론 코팅소재 및 이를 적용한 난삭재 절삭공구 개발 에너지 효율 30% 향상을 위한 나노소재 활용 고효율, 고성능 레이저 프린터용 세라믹히터 모듈 및 정착롤러 개발 500 kHz에서 10 GHz의 주파수 대역에서 80 dB, in-plane 800 W/mK의 전자파 차폐와 방열 특성을 동시에 갖는 두께 80 μm 이하의 전자파 흡수체 적용 가능한 점-접착제 프리 일체형 차폐방열 롤 시트 개발 곡률반경 1 mm에서 저항 안정성을 확보할 수 있는 30 Ω/sq급 폴더블 은나노와이어 투명전극 필름 및 터치 센서 개발 나노압전소재 기반의 스마트기기용 고감도 고신뢰성 마이크로폰 개발 내충격성이 우수한 경량·고강도 열가소성 섬유강화 나노복합소재 및 수송기기용 부품 개발 나노소재를 적용한 고내열, 내마모성 엔지니어링 강화플라스틱 부품 개발 	<ul style="list-style-type: none"> (NMI1) 초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재 (IoT 통신, 모듈/소자) (NMM1) 영상·소리 동시구현 유연소재 (스피커 대체; 모바일 기기 소형화) (NODI2) 자율주행 차량용 고선명 표시장치 (NSI2) 협업 로봇용 압전 나노-변위 액추에이터 기반 MEMS형 초음파 근접센서 (NBI5d) 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 (NMTI6) 나노 3D 프린팅 요소 기술 (NII3) 나노정보학 기반 신재료 설계 프레임워크 기술 (NIE4) 메탄가스 저장용 다공소재 나노포어오믹스 (NanoporeOmics) (NIE5) 부생가스 에너지 수확을 위한 선택적 촉매물질 재료정보학 탐색 (NCI6) ICT 기반 능동형 기능성 (4D) 차세대 스마트 소재 (NCI8) 환경정화 및 감지용 2차원 재료 (NCE1) 이산화탄소 전환 광촉매 설계 기술

[첨부 2] 나노기술 분야별 4차 산업혁명 기여 내용 분석 결과

(1) 선도기술-나노기술 영역별 관련성

① 나노소재



② 나노정보소자



③ 나노광전소자



④ 나노센서/액츄에이터



⑤ 나노바이오



⑥ 나노의학



⑦ 나노공정•장비



⑧ 나노측정/분석/평가



⑨ 나노인포메틱스



⑩ 계산나노과학



(2) 4차 산업혁명 영역별 나노기술 기여 내용 및 개발대상 기술 후보과제 목록

① 나노소재 (NM)

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노소재 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	초고속화 (초고속 통신; IoT 부품/소자)	(I1) 초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹소재 (IoT 통신, 모듈/소자)
	로봇/자율기기	신기능 (고감도 (압력·온도); 전자피부)	(I2) 고감도 전자피부 (압력, 온도) 소재 (전자 피부)
	빅데이터/알고리즘		
	클라우드 컴퓨팅	초고속화/대용량화 (고이동도/고밀도; 유연 트랜지스터)	(I4) 고밀도 /고이동도 트랜지스터용 2차원 소재 (유연 트랜지스터)
	웨어러블/모바일 기기	저전력화 (실시간 정보수집; 생체신호 모니터링)	(I5) 실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체 (웨어러블 기기)
	3D 프린팅 (AM)	신기능 (공정 적용성 확대; 나노분말)	(I6) 자유곡면 3D 프린팅용 나노소재 (3D 프린팅 적용 확대)
	센서/액츄에이터	신기능/저전력화 (고감도/고선택성; 환경 모니터링 센서)	(I7) 환경센서용 하이브리드 나노선 소재 (실시간 환경 모니터링)
	첨단소재	신기능/저전력화 (광전변환 고효율화; 전기장 영향 배제)	(I8) 에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투과가능 투명전극 (광전변환 소자의 전기장 효과 제거)
에너지/자원/환경	신재생에너지	신기능 (친환경화; 무전원 수소 생산)	(E1a) 태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재 (친환경 수소 생산) (E1b) 고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술 (양자점 태양전지)
	스마트그리드		
	에너지 절약	신기능 (저방사; 단열용 나노코팅)	(E3) 제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재 (단열)
	에너지 저장	대용량화 (저비용·고용량; 이차전지 전극)	(E4) 세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재 (고성능 이차전지)
	에너지 하베스팅/저장	대용량화 (광반도체 성; 열전 반도체)	(E5) 태양광 집열용 고성능 열전 소재 (에너지 효율 향상)
	자원 절약/재활용	신기능 (커금속 대체; 철 기반 나노촉매)	(E6) 철 기반 고효율 나노촉매 소재 (커금속 성분 대체)
이동성	환경 모니터링	신기능 (고감도/고신뢰성 /장수명; 초미세 먼지 감지)	(E7) 초소형 미세먼지 감지센서 소재 (환경 개선)
	고용 (직업)	신기능 (저비용/고신뢰성; 모바일 기기의 스피커 대체 (휴대 편이성 향상))	(M1) 영상·소리 동시구현 유연소재 (스피커 대체; 모바일 기기 소형화)
	운송/물류		
	자본 (서비스)	저전력화 (친환경화 : 모바일기기용 디스플레이)	(M3) 친환경 양자점 발광소재 (에너지 소모 축소; 모바일기기 사용시간 연장)
보 건	맞춤의학		
	고령화 대응		
	사회적 대응 (진염병)		
가정/개인	가전제품 (생활가전)		
	소비제품	신기능 (바이오물질과의 반응성; 질병 진단기기)	(P2) 패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재 (개인용 질병 진단)

② 나노정보소자 (NED)

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노정보소자 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	저전력화 (초저전력 IoT 동작), 신기능 (초연결용 웨어러블 IoT 고도화)	(I1a) 미래 사물인터넷을 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) (I1b) Monolithic 3D 집적 시스템 공정, 집적 소자 기술 (3차원 집적기술) (I1c) 3차원 집적을 위한 레이저 공정 및 장비/소재 (I1d) 초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩 (3차원 집적기술)
	로봇/자율기기		
	빅데이터/알고리즘	초고속화 (초고속/초고용량 데이터 센터 구축)	(I3) 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템
	클라우드 컴퓨팅	저전력화 (초고속/초고용량 데이터 연결 시스템 구축 및 지능화)	(I4) (=I1a)
	웨어러블/모바일 기기	저전력화 (초연결용 유연소자) 신기능 (초연결용 웨어러블 기기 고도화)	(I5a) (=I1a, I4) (I5b) (=I1b) (I5c) (=I1c) (I5d) (=I1d) (I5e) 웨어러블/모바일 기기의 유연 기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자
	3D 프린팅 (AM)		
	센서/액츄에이터	저전력화 (초저전력 신호처리 및 초고속 통신소자 구현)	(I7) 3차원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서
	첨단소재		
	신재생에너지		
에너지/자원/환경	스마트그리드		
	에너지 절약	저전력화 (연산 및 데이터 저장)	(E3a) (=I1a, I4, I5a) (E3b) 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	에너지 저장		
	에너지 하베스팅/저장		
	자원 절약/재활용		
	환경 모니터링		
	고용 (직업)		
이동성	운송/물류	초고속화 (스마트 운송 물류 처리를 위한 초고속 /초고용량 소자 구현)	(M2a) (=I3) (M2b) (=E3b)
	자본 (서비스)		
보건	맞춤의학	초고속화 (맞춤의학을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)	(H1a) (=I3, M2a) (H1b) (=E3b, M2b)
	고령화 대응	초고속화 (고령화 대응을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)	(H2a) (=I3, M2a, H1a) (H2b) (=E3b, M2b, H1b)
	사회적 대응 (전염병)	초고속화 (사회적 재난 대응을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)	(H3a) (=I3, M2a, H1a, H2a) (H3b) (=E3b, M2b, H1b, H2b)
가정/개인	가전제품 (생활가전)	저전력화/신기능 (스마트 가정을 위한 초연결 초저전력 소자 구현)	(P1a) (=I3, M2a, H1a, H2a, H3a) (P1b) (=E3b, M2b, H1b, H2b, H3b)
	소비제품		

③ 나노광전소자

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노광전소자 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	신기능 (오감인지형 IoT 표시장치)	(I1) 오감인지형 센서 내장된 표시장치
	로봇/자율기기	신기능 (자율주행 차량용 윈도우 맞춤형 고성능 표시장치)	(I2) 자율주행 차량용 고선명 표시장치
	빅 데이터/알고리즘		
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기	신기능 (초연결이 가능한 웨어러블 전자•광소자)	(I5) 웨어러블 전자소자 제작을 위한 나노기반 스트레처블 기판 /TFT/ 발광소자 및 설계 기술
	3D 프린팅 (AM)		
	센서/엑츄에이터	신기능 (오감인지 센서)	(I7) (=I1)
에너지/자원/환경	첨단소재	신기능 (초연결 전자기기용 신축성 나노소재)	(I8) 스트레처블 전자소자용 첨단 나노소재 개발
	신재생에너지		
	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장		
	에너지 하베스팅/저장		
	자원 절약/재활용		
이동성	환경 모니터링		
	고용 (직업)		
	운송/물류		
보 건	자본 (서비스)		
	맞춤의학	신기능 (초연결 의료용 피부부착형, 생체 이식형)	(H1) 스트레처블 /유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치
	고령화 대응	신기능/고감도 (초연결 고령사회 대응용 스마트 진단 센서 표시장치)	(H2) 네트워크 활용한 고감도 스마트 진단 센서 표시장치 기술
가정/개인	사회적 대응 (전염병)		
	가전제품 (생활가전)		
	소비제품		

④ 나노센서/액츄에이터

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노센서/액츄에이터 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 센서)	(I1) 실내환경 모니터링용 나노·MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서
	로봇/자율기기	신기능 (초소형/저가격 로봇용 센서)	(I2) 협업 로봇용 압전 나노-면위 액추에이터 기반 MEMS 형 초음파 근접센서
	빅데이터/알고리즘	신기능 (초소형/고성능 음성 인식용 센서)	(I3) AI 음성비서용 초소형/고신호잡음 비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기	신기능 (초소형/저가격 분자스캐너), 고성능 (양방향 피드백 UI 센서)	(I5a) Plug-In 형 분자 스캐너용 나노·MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서 (I5b) AR/VR 기기용 양방향 피드백 UI 센서/액추에이터
	3D 프린팅 (AM)		
	센서/액츄에이터	신기능 (초고속/고감도 테라헤르츠 센서)	(I6) 플라즈모닉 메타 소재 ·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 센서
	첨단소재		
에너지/자원/환경	신재생에너지	대용량화 (고효율 태양전지)	(E1) 대면적 유연 나노구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자
	스마트그리드	초고속화 (고에너지밀도 이차전지)	(E2) 나노구조 제어 기반 고효율/고속 충전 이차전지
	에너지 절약	대용량화 (고효율 태양전지)	(E3) (=E1)
	에너지 저장	대용량화 (고에너지밀도 이차전지)	(E4) 나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지밀도 이차전지
	에너지 하베스팅/저장	대용량화 (고밀도 마찰대전 에너지 하베스터)	(E5a) (=E1, E3) (E5b) (=E4)
	자원 절약/재활용	저전력화 (초소형/저가격 분자스캐너)	(E6) (=I5a)
	환경 모니터링		
이동성	고용 (직업)	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 모니터링 기기)	(M2) (=I1)
	운송/물류		
	자본 (서비스)		
보 건	맞춤의학		
	고령화 대응	신기능 (유연·신축, 센싱/자극 응복합 웨어러블 기기)	(H2) 헬스케어 모니터링 센서 및 생체 자극 액추에이터 융복합 웨어러블 기기
	사회적 대응 (전염병)		
가정/개인	가전제품 (생활가전)	신기능/저전력화 (제스처 인식 UI 센서)	(P1) 제스처 인식 UI 용 압전 MEMS 형 초음파 ToF 센서 어레이
	소비제품	신기능 (유연·신축성 에너지 자립형 플렉서블 센서)	(P2) 압전 나노복합체 기반 에너지 자립형 플렉서블 압력센서

⑤ 나노바이오

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노바이오 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	신기능 (고감도화, 유해인자/생체신호 감지)	(I1a) 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 (I1b) 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 연구 (I1c) 작품 재배환경 장류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서 (I1d) IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노재
	로봇/자율기기	신기능 (고감도 센서)	(I2a) (=I1b); (I2b) (=I1a) (I2c) 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재 (I2d) 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술
	빅데이터/알고리즘	대용량화 (고밀도)	(I3a) (=I1a, I2b) (I3b) 나노바이오 식품안전 정밀고속 분석기 (I3c) (=I1b, I2b); (I3d) (=I1c)
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기	신기능 (웨어러블 IoT)	(I5a) (=I1b, I2b, I3c) (I5b) (=I1a, I2b, I3a); (I5c) (=I1d) (I5d) 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술
	3D 프린팅 (AM)	신기능 (생체친화 나노소재)	(I6a) (=I2c); (I6b) (=I2d) (I6c) 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재; (I6d) (=I5d)
	센서/엑츄에이터	신기능 (고감도화, 유해인자/생체신호 감지)	(I7a) (=I1a, I2b, I3a, I5b) (I7b) (=I1b, I2b, I3c, I5a) (I7c) (=I2d, I6b); (I7d) (=I1c, I3d)
	첨단소재	신기능 (탈부착 나노소재)	(I8a) (=I2c, I6a); (I8b) (=I2d, I6b, I7c) (I8c) (=I6c); (I8d) (=I1d, I5c)
에너지/자원/환경	신재생에너지		
	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장		
	에너지 하베스팅/저장		
	자원 절약/재활용	신기능 (고효율)	(E6a) (=I6c, I8c) (E6b) (=I1b, I2b, I3c, I5a, I7b) (E6c) (=I2c, I6a, I8a)
이동성	환경 모니터링	신기능 (현장진단)	(E7a) (=I1c, I3d); (E7b) (=I6c, I8c, E6a) (E7c) (=I2d, I6b, I7c, I8b) (E7d) (=I2c, I6a, I8a, E6c)
	고용 (직업)		
운송/물류	운송/물류	신기능 (나노 레이블)	(M1a) (=I6c, I8c, E6a, E7b) (M1b) (=I1a, I2b, I3a, I5b, I7a) (M1c) (=I1d, I5c, I8d) (M1d) (=I1c, I3d, E7a)
	자본 (서비스)		
	맞춤의학		
보건	고령화 대응	신기능 (고감도)	(H2a) (=I1b, I2b, I3c, I5a, I7b, E6b) (H2b) (=I1d, I5c, I8d, M1c) (H2c) (=I1a, I2b, I3a, I5b, I7a, M1b) (H2d) (=I5d, I6d)
	사회적 대응 (전염병)	신기능 (고감도)	(H3a) (=I5d, I6d, H2d) (H3b) (=I1a, I2b, I3a, I5b, I7a, M1b, H2c) (H3c) (=I3b); (H3d) (=I1c, I3d, E7a, M1d)
	맞춤의학		
가정/개인	가전제품 (생활가전)	신기능 (초고속)	(P1a) (=I5d, I6d, H2d, H3a) (P1b) (=I1d, I5c, I8d, M1c, H2b) (P1c) (=I1a, I2b, I3a, I5b, I7a, M1b, H2c, H3b) (P1d) (=I3b, H3c)
	소비제품	신기능 (IoT)	(P2a) (=I1d, I5c, I8d, H2b, P1b) (P2b) (=I5d, I6d, H2d, H3a, P1a) (P2c) (=I6c, I8c, E6a, E7b, M1a) (P2d) (=I1c, I3d, E7a, M1d, H3d)

⑥ 나노의학

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노의학 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷		
	로봇/자율기기		
	빅데이터/알고리즘	대용량화/초고속화 (인체정보, 의료 정보)	(I3a) 체외진단용 나노검지 (고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) (I3b) 정밀의료기기 (인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기) (I3c) 고선택성 정밀의학용 나노조영제
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기	신기능 (신기능 센서, 고감도 센서, 인체신호 검지)	(I5a) (=I3a) (I5b) (=I3b) (I5c) (=I3c)
	3D 프린팅 (AM)	신기능 (신기능 소재, 개인맞춤/고정밀 인공장기 소재)	(I6a) 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술 (I6b) 뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술 (I6c) 동반진단 나노테라노시스 기술
	센서/엑츄에이터		
	첨단소재	신기능 (고감도/개인맞춤 의료용 소재, 신기능 소재)	(I8a) (=I3c, I5c) (I8b) (=I3a, I5a) (I8c) (=I6a) (I8d) (=I6b)
	신재생에너지		
에너지/자원/환경	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장		
	에너지 하베스팅/저장		
	자원 절약/재활용		
	환경 모니터링		
이동성	고용 (직업)		
	운송/물류		
	자본 (서비스)		
보 건	맞춤의학		
	고령화 대응	신기능 (개인맞춤 고감도 센서, 생체친화 소재, 초고감도 분석, 인체정보)	(H1a) (=I3a, I5a, I8b) (H1b) (=I6c) (H1c) 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학소재 (H1d) (=I3c, I5c, I8a)
	사회적 대응 (전염병)	신기능 (웨어러블, 조직재생 소재, 모니터링)	(H2a) (=I6a, I8c) (H2b) (=H1c) (H2c) (=I6c, H1b) (H2d) (=I3a, I5a, I8b, H1a)
	가전제품 (생활가전)	초고속화 (고감도 초고속 진단, 현장진단, 맞춤치료, 원격진료)	(H3a) (=I3a, I5a, I8b, H1a, H2d) (H3b) (=I6c, H1b, H2c) (H3c) (=H1c, H2b)
가정/개인	소비제품	신기능 (원격진료, 상시 모니터링)	(P1a) (=I3a, I5a, I8b, H1a, H2d, H3a) (P1b) (=I3b, I5b)

⑦ 나노공정•장비

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노공정•장비 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	초고속화 (초고속 IoT 소자 제조/측정/분석)	(I1a) 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 (I1b) 삼유상의 유연소자의 암베디드 제조 기술 (I1c) 가능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	로봇/자율기기	초고속화 (고성능 나노센서 제조/측정/분석)	(I2a) (=I1a); (I2b) (=I1b) (I2c) (=I1c)
	빅데이터/알고리즘	초고속화 (초고속 빅데이터 저장/처리장치 제조/측정/분석)	(I3a) (=I1a, I2a); (I3b) (=I1b, I2b) (I3c) 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사장비
	클라우드 컴퓨팅	초고속화 (초고속 연산소자 제조/측정/분석)	(I4a) (=I1a, I2a, I3a) (I4b) (=I1b, I2b, I3b); (I4c) (=I3c)
	웨어러블/모바일 기기	초고속화 (고성능 웨어러블/모바일 기기 제조/측정/분석)	(I5a) (=I1a, I2a, I3a, I4a) (I5b) (=I1b, I2b, I3b, I4b); (I5c) (=I1c, I2c)
	3D 프린팅 (AM)	초고속화 (고성능 3D 프린팅공정/장비 개발)	(I6) (=I1c, I2c, I5c)
	센서/액츄에이터	초고속화 (고성능 연산소자 제조/측정/분석)	(I7a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a) (I7b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b) (I7c) (=I1c, I2c, I5c, I6)
	첨단소재	대용량화 (고성능 저가 첨단 소재 제조)	(I8a) 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술 (I8b) (=I1c, I2c, I5c, I6, I7c)
에너지/자원/환경	신재생에너지	대용량화 (고성능 신재생에너지 소자 제조/측정/분석)	(E1a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a, I7a) (E1b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b, I7b) (E1c) (=I8a); (E1d) (=I3c, I4c)
	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장	대용량화 (고성능 에너지 저장 소자 제조/측정/분석)	(E4a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a, I7a, E1a) (E4b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b, I7b, E1b) (E4c) (=I8a, E1c)
	에너지 하베스팅/저장	대용량화 (고성능 에너지 하베스팅 소자 제조/측정/분석)	(E5a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a, I7a, E1a, E4a) (E5b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b, I7b, E1b, E4b) (E5c) (=I8a, E1c, E4c)
	자원 절약/재활용		
이동성	고용 (직업)		
	운송/물류		
	자본 (서비스)	초고속화 (고성능 스마트 패키징 소자 제조/측정/분석)	(M3a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a, I7a, E1a, E4a, E5a) (M3b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b, I7b, E1b, E4b, E5b) (M3c) (=I8a, E1c, E4c, E5c)
보 건	맞춤의학		
	고령화 대응	신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)	(H1) (=I1c, I2c, I5c, I6, I7c, I8b)
	사회적 대응 (진염병)	"	(H2) (=I1c, I2c, I5c, I6, I7c, I8b, H1)
가정/개인	가전제품 (생활가전)	"	(H3) (=I1c, I2c, I5c, I6, I7c, I8b, H1, H2)
	소비제품	"	(P1a) (=I1a, I2a, I3a, I4a, I5a, I7a, E1a, E4a, E5a, M3a) (P1b) (=I1b, I2b, I3b, I4b, I5b, I7b, E1b, E4b, E5b, M3b) (P1c) (=I8a, E1c, E4c, E5c, M3c)

⑧ 나노측정/분석/평가

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노측정•분석•평가 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷	신기능 (신기능 나노소자 분석평가), 저전력화 (3차원 나노소자 계측)	(I1a) 신기능 나노소자 성능 평가 기술 (I1b) 3차원 나노소자 고정밀 측면 물성 분석 기술
	로봇/자율기기	신기능 (신기능 부품 구조 및 물성 분석)	(I2) 신기능 구동부품의 고정밀 표면구조 및 물성 분석 기술
	빅데이터/알고리즘	대용량화 (초고용량 메모리 소자)	(I3) 3D 나노구조물 고속 대면적 하이브리드 계측 기술
	클라우드 컴퓨팅	대용량화 (초고용량 정보저장장치 소자)	(I4) (=I3)
	웨어러블/모바일 기기	신기능 (웨어러블 소재 분석)	(I5) 신기능 웨어러블 소재 나노특성 분석 기술
	3D 프린팅 (AM)	신기능 (나노 3D 프린팅 기술)	(I6) 나노 3D 프린팅 요소 기술
	센서/액츄에이터	신기능 (성능평가 (초정밀도))	(I7) 고정밀도 센서/액튜에이터 성능 평가 기술
	첨단소재	신기능 (2차원 소재 특성분석)	(I8a) 2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 분석 기술 (I8b) 저차원 나노소재의 특성분석 하이브리드 기술
에너지/자원/환경	신재생에너지	대용량화/고효율화 (고공간 분해능 에너지 변환특성 측정)	(E1) 페로브스카이트 등 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술
	스마트그리드		
	에너지 절약	저전력화 (나노소자 분석)	(E3a) (=I1b) (E3b) 초저전력 나노소자 특성분석 기술
	에너지 저장	대용량화 (초고용량 배터리 기능성 평가)	(E4) 배터리 전극, Redox flow cell 등 의 전기 효율성 측정 기술
	에너지 하베스팅/저장	대용량화 (나노에너지 변환 소자 효율 평가)	(E5) 나노 에너지 변화소자 고정밀 효율 평가 기술
	자원 절약/재활용	신기능 (재활용 나노소재 평가)	(E6) 재활용 나노소재 물성 평가 기술
	환경 모니터링	기타/나노안전성 (나노물질 환경안정성 평가)	(M1) 나노물질 환경 안전성 평가 기술
이동성	고용 (직업)		
	운송/물류		
	자본 (서비스)		
보건	맞춤의학	기타/나노안전성 (맞춤형 시약 안전성 평가)	(H1) 맞춤 의약품 평가 시스템 기술
	고령화 대응	기타/나노안전성 (환경 및 영양소의 세포영향 평가)	(H2a) 환경 및 영양소의 세포영향 평가 기술 (H2b) 단일세포의 노화 이미징 및 검지 기술
	사회적 대응 (전염병)	기타/나노안전성 (세포수준 전염병 진단)	(H3) 세포 수준의 전염병 진단 기술
가정/개인	가전제품 (생활가전)	신기능 (나노신뢰성 평가)	(P1) 가전제품 적용 나노소자 신뢰성 평가 기술
	소비제품	기타/나노안전성 (나노소재 안전성 및 신뢰성 평가)	(P2) 소비제품 적용 나노소재의 나노안전성 및 나노신뢰성 평가 기술

⑨ 나노인포메틱스

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노인포메틱스 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷		
	로봇/자율기기		
	빅데이터/알고리즘	기타 (R&D 데이터 관리 활용 기반)	(I3) 나노정보학 기반 신재료 설계 프레임워크 기술
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기		
	3D 프린팅 (AM)		
	센서/엑츄에이터		
에너지/자원/환경	첨단소재		
	신재생에너지	신기능 (고효율 소재 탐구), 초고속화 (에너지용 칩단 나노소재 개발)	(E1) 데이터 기반 태양전지 소재
	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장	대용량화 (저장시스템의 성능강화), 신기능 (저장용 신소재 발굴)	(E4) 메탄가스 저장용 다공소재 나노포어오믹스 (NanoporeOmics)
	에너지 하베스팅/저장	초고속화 (에너지 하베스팅 소재 발굴), 신기능 (신소재 개발)	(E5) 부생가스 에너지 수확을 위한 선택적 촉매물질 재료정보학 탐색
	자원 절약/재활용		
이동성	환경 모니터링		
	고용 (직업)		
	운송/물류		
보 건	자본 (서비스)		
	맞춤의학		
	고령화 대응		
가정/개인	사회적 대응 (진염병)		
	가전제품 (생활가전)		
	소비제품		

⑩ 계산나노과학

4차 산업혁명 관련영역	관련 기술 영역	4차 산업혁명 기여 내용	개발대상 나노계산과학 기술 (예시, 우선순위별)
산 업	IoT/인터넷		
	로봇/자율기기		
	빅데이터/알고리즘		
	클라우드 컴퓨팅		
	웨어러블/모바일 기기		
	3D 프린팅 (AM)	신기능 (3D 프린팅용 나노 소재 설계)	(I6) ICT 기반 능동형 기능성 (4D) 차세대 스마트 소재
	센서/액츄에이터		
에너지/자원/환경	첨단소재	대용량화 (첨단 나노소재 및 공정 최적화)	(I8) 환경정화 및 감지용 2 차원 재료
	신재생에너지	초고속화 (고효율 에너지 전환용 나노소재)	(E1) 이산화탄소 전환 광촉매 설계 기술
	스마트그리드		
	에너지 절약		
	에너지 저장	대용량화 (에너지 저장시스템의 용량 확대)	(E3) Beyond LIB형 나트륨 이차전지 소재 설계용 시뮬레이션 플랫폼
	에너지 하베스팅/저장	신기능 (신개념 에너지 하베스팅 시스템)	(E4) 초소형 소자용 고효율 단원자 나노촉매 소재 설계 및 최적화
	자원 절약/재활용		
이동성	환경 모니터링		
	고용 (직업)		
	운송/물류		
보 건	자본 (서비스)		
	맞춤의학		
	고령화 대응		
가정/개인	사회적 대응 (전염병)		
	가전제품 (생활가전)		
	소비제품		

[첨부 3] 10대 나노기술 영역별 개발대상 기술 후보과제

- (1) 후보과제별 세부 내용
- (2) 후보과제별 중복성 검토를 위한 검색어

(1) 후보과제별 세부 내용

[나노소재]

1. 4차 산업혁명에서 나노소재의 기여

- 제4차 산업혁명은 빅데이터와 인공지능 등의 첨단 ICT 기술을 기반으로 하여 물리적, 생물학적, 디지털적 세계를 통합시키고 제조업을 포함한 각종 산업, 에너지 및 환경 등의 사회 기반 자원, 개인의 일상과 사회공동체 운영에 큰 변화를 가져오는 새로운 산업혁명 시대를 의미
- 제4차 산업혁명 시대를 성공적으로 맞이하고 선도하기 위해서는 초고속, 초대용량, 초저전력, 신기능, 친환경(지속가능) 등의 기술적 니즈를 해결해야 함.
- 나노소재를 활용하게 될 경우, 아래와 같이 각종 분야에서 4차 산업혁명에 기여할 수 있을 것으로 전망
 - 초저전력, 저비용, 초소형 센서용 나노소재 개발을 통해 웨어러블 소자 및 모바일 기기의 기능성과 성능이 증대되고 IoT, 로봇 및 자율주행 자동차의 대중화를 유도
 - 초고속 연산 처리 및 대용량 데이터 저장이 가능한 나노소재 기반의 클라우드 컴퓨팅이 가능해져 빅데이터 활용이 증대되고 인공지능을 이용한 제조업과 의료 산업이 크게 발전
 - 활용도가 높은 세라믹 및 금속 기반의 3D 프린팅 소재가 개발되어 매우 제한적으로 사용되던 3D 프린팅이 맞춤형 다품종 소량생산에 널리 활용되어 개인 스마트 팩토리가 실현
 - 소재 물성의 획기적 향상을 통해 친환경 고효율 에너지 생산 및 저장이 가능해져 에너지와 자원의 획기적 절약이 가능해져 지속가능한 사회 발전에 구현
 - 신기능 나노복합소재, 3D 프린팅 나노분말소재, 의료용 첨단 나노소재의 개발로 신산업이 발생되어 고용이 창출되고 자본의 유동성이 증대
 - 개인 맞춤형 기능성 나노소재의 응용이 확대되고 신기능 나노소재가 개발되어 기존에 없었던 새로운 성능이 추가된 가전제품과 소비제품의 시장이 확대
- 이와 같이 나노소재는 4차 산업혁명을 실현하는 각종 핵심 기술을 구현하기 위한 근간이므로 선제적이고 지속적인 연구개발 투자와 실행이 요구

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노소재 분야별 연관관계

영역	주제	나노소재										설명
		탄소나노튜브	그래핀	나노광소재 (양자점/광결정 등)	1차원 나노소재 (나노섬유 등)	2차원 나노소재 (판/층/필름)	세라믹 나노분말	금속 나노분말	나노촉매	나노기공소재	나노복합소재	
사회 영역	관련기술 영역											
산업	IoT/인터넷	7	6	3	5	4	1	8	10	9	2	초고속화 (초고속 통신; IoT 부품/소자)
	로봇/자율기기	2	3	6	5	7	8	4	9	10	1	신기능 (고감도(압력, 온도); 전자피부)
	빅데이터/알고리즘(AI)											
	클라우드 컴퓨팅	7	6	5	4	1	8	9	10	2	3	초고속화/대용량화 (고이동도/고밀도; 유연 트랜지스터)
	웨어러블/모바일 기기	5	4	6	3	2	7	8	10	9	1	저전력화 (실시간 정보수집; 생체신호 모니터링)
	3D 프린팅(AM)	9	8	10	7	6	2	1	5	4	3	신기능 (공정 적용성 확대; 나노분말)
	센서/액튜에이터	7	6	5	4	3	2	8	10	9	1	신기능/저전력화 (고감도/고선택성; 환경 모니터링 센서)
	첨단소재	8	7	3	2	1	10	9	5	6	4	신기능/저전력화 (광전변환 고효율화; 전기장 영향 배제)
에너지/자원/환경	신재생에너지	6	7	2	10	5	3	8	1	9	4	신기능 (친환경화; 무전원 수소 생산)
	스마트그리드											
	에너지 절약	5	6	2	3	4	8	7	10	9	1	신기능 (저방사; 단열용 나노코팅)
	에너지 저장	6	5	10	9	4	1	7	2	3	8	대용량화 (저비용·고용량; 이차전지 전극)
	에너지 하베스팅/저장	7	4	10	2	5	1	8	9	6	3	대용량화 (광반도체성; 열전 반도체)
	자원 절약/재활용	10	9	5	8	7	1	2	3	6	4	신기능 (커금속 대체; 철 기반 나노촉매)
	환경 모니터링	8	7	10	5	6	1	3	2	4	9	신기능 (고감도/고신뢰성/장수명; 초미세 먼지 감지)
이동성	고용(직업)	9	10	4	5	7	2	3	5	8	1	신기능 (저비용/고신뢰성; 모바일 기기의 스피커 대체 (휴대 편이성 향상))
	운송/물류											
	자본(서비스)	4	1	2	5	3	8	9	6	7	10	저전력화 (친환경화: 모바일기기용 디스플레이)
보건	맞춤의학											
	고령화 대응											
	사회적 대응(전염병)											
가정/개인	가전제품(생활가전)											
	소비제품	8	7	2	3	6	5	9	10	4	1	신기능 (바이오물질과의 반응성; 질병 진단기기)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노소재 분야 및 기여 내용

사회 영역	관련기술 영역	나노소재 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	세라믹 나노분말	나노 복합소재	나노광소재	2차원 나노소재	초고속화 (초고속 통신; IoT 부품/소자)
	로봇/자율기기	나노 복합소재	탄소 나노튜브	그래핀	금속 나노분말	신기능 (고감도(압력, 온도); 전자피부)
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅	2차원 나노소재	나노 기공소재	나노 복합소재	1차원 나노소재	초고속화/대용량화 (고이동도/고밀도; 유연 트랜지스터)
	웨어러블/모바일 기기	나노 복합소재	2차원 나노소재	1차원 나노소재	그래핀	저전력화 (실시간 정보수집; 생체신호 모니터링)
	3D 프린팅(AM)	금속 나노분말	세라믹 나노분말	나노 복합소재	나노 기공소재	신기능 (공정 적용성 확대; 나노분말)
	센서/액튜에이터	나노 복합소재	세라믹 나노분말	2차원 나노소재	1차원 나노소재	신기능/저전력화 (고감도/고선택성; 환경 모니터링 센서)
	첨단소재	2차원 나노소재	1차원 나노소재	나노광소재	나노 복합소재	신기능/저전력화 (광전변환 고효율화; 전기장 영향 배제)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노촉매	나노광소재	세라믹 나노분말	나노 복합소재	신기능 (친환경화; 무전원 수소 생산)
	스마트그리드					
	에너지 절약	나노 복합소재	나노광소재	1차원 나노소재	2차원 나노소재	신기능 (저방사; 단열용 나노코팅)
	에너지 저장	세라믹 나노분말	나노촉매	나노 기공소재	2차원 나노소재	대용량화 (저비용·고용량; 이차전지 전 극)
	에너지 하베스팅/저장	세라믹 나노분말	1차원 나노소재	나노 복합소재	그래핀	대용량화 (광반도체성; 열전 반도체)
	자원 절약/재활용	세라믹 나노분말	금속 나노분말	나노촉매	나노 복합소재	신기능 (커금속 대체; 철 기반 나노촉매)
	환경 모니터링	세라믹 나노분말	나노촉매	금속 나노분말	나노 기공소재	신기능 (고감도/고신뢰성/장수명; 초미세 먼지 감지)
이동성	고용(직업)	나노 복합소재	세라믹 나노분말	금속 나노분말	나노광소재	신기능 (저비용/고신뢰성; 모바일 기기의 스피커 대체 (휴대 편이성 향상))
	운송/물류					
	자본(서비스)	그래핀	나노광소재	2차원 나노소재	탄소 나노튜브	저전력화 (친환경화: 모바일기기용 디스플레이)
보건	맞춤의학					
	고령화 대응					
	사회적 대응(전염병)					
가정/개인	가전제품(생활가전)					
	소비제품	나노 복합소재	나노광소재	1차원 나노소재	나노 기공소재	신기능 (바이오플라스틱의 반응성; 질병 진단기기)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노소재 기술 (예시)

사회 영역	관련기술 영역	관련 나노소재 (우선순위)				개발대상 나노소재 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	세라믹 나노분말	나노 복합소재	나노광소재	2차원 나노소재	• 초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재 (IoT 통신, 모듈/소자)
	로봇/자율기기	나노 복합소재	탄소 나노튜브	그래핀	금속 나노분말	• 고감도 전자피부(압력, 온도) 소재 (전자 피부)
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅	2차원 나노소재	나노 기공소재	나노 복합소재	1차원 나노소재	• 고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재 (유연 트랜지스터)
	웨어러블/모바일 기기	나노 복합소재	2차원 나노소재	1차원 나노소재	그래핀	• 실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체 (웨어러블 기기)
	3D 프린팅(AM)	금속 나노분말	세라믹 나노분말	나노 복합소재	나노 기공소재	• 자유곡면 3D 프린팅용 나노소재 (3D 프린팅 적용 확대)
	센서/액튜에이터	나노 복합소재	세라믹 나노분말	2차원 나노소재	1차원 나노소재	• 환경센서용 하이브리드 나노선 소재 (실시간 환경 모니터링)
	첨단소재	2차원 나노소재	1차원 나노소재	나노광소재	나노 복합소재	• 에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투과가능 투명전극 (광전변환 소자의 전기장 효과 제거)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노촉매	나노광소재	세라믹 나노분말	나노 복합소재	• 태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재 (친환경 수소 생산) • 고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술 (양자점 태양전지)
	스마트그리드					
	에너지 절약	나노 복합소재	나노광소재	1차원 나노소재	2차원 나노소재	• 제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재 (단열)
	에너지 저장	세라믹 나노분말	나노촉매	나노 기공소재	2차원 나노소재	• 세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재 (고성능 이차전지)
	에너지 하베스팅/저장	세라믹 나노분말	1차원 나노소재	나노 복합소재	그래핀	• 태양광 집열용 고성능 열전 소재 (에너지 효율 향상)
	자원 절약/재활용	세라믹 나노분말	금속 나노분말	나노촉매	나노 복합소재	• 철 기반 고효율 나노촉매 소재 (커금속 성분 대체)
이동성	환경 모니터링	세라믹 나노분말	나노촉매	금속 나노분말	나노 기공소재	• 초소형 미세먼지 감지센서 소재 (환경 개선)
	고용(직업)	나노 복합소재	세라믹 나노분말	금속 나노분말	나노광소재	• 영상·소리 동시구현 유연소재 (스피커 대체; 모바일 기기 소형화)
	운송/물류					
보건	자본(서비스)	그래핀	나노광소재	2차원 나노소재	탄소 나노튜브	• 친환경 양자점 발광소재 (에너지 소모 축소; 모바일기기 사용시간 연장)
	맞춤의학					
	고령화 대응					
가정/개인	사회적 대응(전염병)					
	가전제품(생활가전)					
	소비제품	나노 복합소재	나노광소재	1차원 나노소재	나노 기공소재	• 패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재 (개인용 질병 진단)

5. 개발대상 나노소재 내용 요약

(1) 초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> IoT 환경에 필요한 소형/고속 초고주파(0.5~30 GHz) 무선통신 부품의 크기 한계를 극복하고 전기적으로 기능을 변화시킬 수 있는 재구성 기술 확보를 위해서는 전기적 재구성이 가능한 초고주파 소자를 제작할 수 있는 소재 필요 현재 사용되는 유전체 기판(FR-4, 테플론, 알루미나)은 전기적 물성 변조가 불가능하여 임피던스 가변, 위상천이(phase shift)에 의한 빔조향 등 초고주파 재구성 소자(적응형 임피던스 가변기, 누설파 빔조향 안테나, 위상천이기) 구현 불가 실온에서 저전압 인가로 저손실, 높은 유전율 변조비 특성의 박막 세라믹 소재 개발을 통해 다기능 초고주파 재구성 소자의 응용가능성 모색이 필요함. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - IoT 환경 대응형 초고주파 무선통신 소자용 유전율 변조소재 개발 - 상업화 가능형 (대면적 일괄 공정 구현 가능 및 특성평가 기술 확보) 소재 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 0.5~30 GHz 주파수 범위에서 유전율 변조 시 다음 특성의 세라믹 소재 개발 (유전율 변조비 3.5:1 이상, 유전손실 계수 0.02 이하, 인가전압 100 V 이하) - 유전율 변조 세라믹 소재의 박막화(대면적 증착, 신뢰성 확보)를 통한 박막형 재구성 소자 구조 설계 - 다기능 재구성 소자를 위한 물성 분석 기술 확보. 유전율 변조 소재로 구성된 평면 수동형 전자기 도파로의 인가 전계에 따른 물성의 주파수(0.5~30 GHz) 변조율, 손실계수 특성이 측정 및 소자 적용 시 주파수, 임피던스, 위상 등의 제어 기술 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명의 핵심요소중 하나인 초고속 연결 사회 구현의 위한 네트워크망의 고속화 (임피던스 변환기 이득 상승, 위상천이기, 빔조향 안테나 등의 고성능화) IoT 환경에 필수적인 센서 간 초고속 무선통신을 위한 핵심 부품용 소재 다양한 무선 운용환경(무인기, 인공위성, 의료 시스템 IoT 장비, 스마트폰)에 적용 가능함과 동시에 차세대 무선통신의 새로운 시장 창출이 가능할 것으로 예상 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 고주파 무선통신 시장 <ul style="list-style-type: none"> - 응용제품: 능동 위상배열 레이더, 5세대 이상의 무선통신 안테나, 적응형 임피던스 가변기, 위상천이기 등 시장 실현 시기 : 2025년 이내 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) 고감도 전자피부(압력, 온도) 소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 인간 친화적 로봇/자율기기의 확대 적용에 필요한 고감도의 전자피부 소재 개발은 압력과 온도 등 주변 환경의 미세한 변화를 감지하여 사용자에게 안전과 편의를 제공할 수 있는 원천기술로 4차 산업 및 개인 맞춤형 의료 산업에 고부가가치를 창출할 것으로 기대됨. 전자피부 소재는 사고 및 질병으로 손상된 인체의 피부를 대체하거나 고위험 환경으로부터 인간의 생존을 보호하고 편리를 제공하는 역할을 하므로 생체 친화적 재료에 기반을 둔 개발이 진행되어야 함. 압력 및 온도의 변화를 즉각적으로 인식하는 기술을 넘어 생체 피부가 갖는 민감도의 한계를 넘어서는 고감도 나노소재 기술 개발이 필요함. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 생체 친화형 고민감도 나노소재를 이용한 압력 및 온도 센서 개발과 이를 탑재한 전자피부 소재 개발 전자피부 적용을 위한 나노소재의 대면적 및 일괄공정 구현이 가능한 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 광범위 압력 감지(kPa~MPa) 및 초미세 압력(1 Pa 이하) 변화의 인식이 가능한 전자피부 소재 개발 극한 환경 온도 (-50~150°C) 감지 및 초미세 온도 변화 (0.5°C 이하) 인식이 가능한 전자피부 소재 개발 온도 및 압력을 동시 다발적으로 인식할 수 있는 전자피부 소재 제어 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 고감도 전자피부의 개발을 통해 압력과 온도 등 주변 환경의 미세한 변화를 감지하여 사용자에게 안전과 편의를 제공할 수 있으며 IoT 기술과 융합을 통해 관련 빅데이터를 수집하고 분석하여 인간 친화적 로봇/자율기기 개발에 활용할 수 있음. 사용자의 질병 이력 및 직업 환경에 따른 전자 피부를 개발하여 개인 맞춤형 의료 산업을 개척할 수 있음. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 인공 피부 및 웨어러블 로봇/자율기기 시장 시장 실현 시기 : 2025년 이내 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(3) 고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재

개발 개요									
<ul style="list-style-type: none"> 클라우드 컴퓨팅은 인터넷 기반 컴퓨팅의 일종으로 서버, 저장소, 데이터베이스, 네트워킹, 소프트웨어, 분석 등의 컴퓨팅 서비스를 소비자에게 제공하는 것으로 빅데이터 및 인공지능을 중심으로 하는 4차 산업혁명의 대중화에 필요한 핵심 기술이라고 할 수 있음. 효율적인 클라우드 컴퓨팅 환경을 구축하기 위해서는 대용량의 저장소 개발과 함께 데이터 입출력의 고속화가 필수적인 기술 요소임. 또한 클라우드 컴퓨팅은 웨어러블/모바일 기기의 지속적인 개발을 통해 컴퓨팅 공간의 제약을 극복하고자 하는 추세임. 2차원 반도체 나노소재 기반의 고밀도/고이동도 트랜지스터 개발은 이러한 기술적 요구사항을 해결할 수 있는 미래 소재 기술로 지속적인 연구가 필요함. 									
개발 목표 및 내용									
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 2차원 반도체 나노소재를 기반으로 한 고밀도/고이동도($>500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$) 유연 트랜지스터 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 2차원 반도체 단일 소자에 대한 기초 연구 (2차원 반도체 나노소재 선정, 결정성, 이동도, 유연성 등)를 통해 2차원 반도체 소재의 고품위 성장기술 제시 2차원 반도체 트랜지스터 제작 및 고집적도를 위한 2차원 소재 배열 및 선택적 성장에 대한 기술 제안 대면적(>4 인치 기판) 유연 기판 적용 (2차원 반도체 선택 성장 면적 $>90\%$) 									
4차 산업혁명과의 연관성									
<ul style="list-style-type: none"> 2차원 반도체 재료를 이용한 고밀도/고이동도 유연 트랜지스터의 개발은 클라우드 컴퓨팅의 효율을 극대화하는 동시에 컴퓨팅 공간의 제약을 극복시켜 4차 산업혁명의 대중화 기반을 조성 클라우드 컴퓨팅의 대중화를 통해 빅데이터 활용이 증대되고 인공지능을 이용한 다양한 신산업이 창출되어 개인의 일상과 사회공동체의 발전에 기여 									
초고속화	✓	대용량화	✓	저전력화		신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기									
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 다양한 웨어러블/모바일 클라우드 컴퓨팅 하드웨어 시장 시장 실현 시기 : 2025년 이내 									
소요 기간 및 예산									
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 									

(4) 실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 현재 착용형 생체신호 감지 기술은 피부 직접 부착형 또는 의복 부착형 센서 시스템 형태로 개발이 이루어지고 있음. 특히 섬유 및 IT 기술의 융합이 가속되면서 향후 다양한 생리학적 데이터를 실시간으로 수집/전송할 수 있는 기능을 일체형으로 집적한 직물 내장형(in-cloth) 센서 시스템 형태로 발전될 전망 이러한 섬유 기반 생체신호 모니터링 기술은 세계적으로 아직 개발 초기 단계이며 생체신호의 실시간 수집, 전송, 전원 공급 및 관리 등 난제가 산재해 있는 실정임. 따라서 섬유 자체를 활용한 센서 기술 및 핵심 모듈 집적 기술의 개발은 착용형 생체신호 모니터링 분야의 기술우위 선점 및 신시장 창출의 가능성성이 높아 집중적인 개발 필요 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 생체신호 감응형 스마트 나노섬유 복합체 합성 및 다기능 센서 기술 개발 초박형 뉴로모픽 회로 기반 스마트 전원 관리 기술 개발 직물형 센서/발전기/배터리 및 초박형 전자회로 일체형 집적 및 신축성 연결 기술 개발 인체 친화형 고분자 기반 패키징 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 다양한 고분자 및 기능성 나노물질 방사 기반 나노섬유 복합체 합성 기술 개발 스마트 나노섬유 복합체 기반 압저항/정전용량형 물리 센서 구현 기술 개발 직물형 마찰 전기 및 압전 나노발전기 구현 및 집적 기술 개발 임계치 이상의 외부 자극 감지 시 신호 전송을 명령하는 인공지능 전자회로 기술 개발 고신축성 나노섬유 전도체 합성 및 미세 패터닝 기술 개발 생체 친화형 고분자 대면적 코팅기술 기반 시스템-온-패키지(SoP) 기술 개발 인체 적용 생체신호 모니터링 성능 평가 및 사물인터넷(IoT) 연계 기술 개발 고신축성 전기적 연결기술 기반 일체형 시스템 집적기술 개발 직물형 마찰 전기 및 압전 나노발전기 구현 및 집적기술 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 건강한 100세 시대를 맞이하기 위해 웰에이징(well-aging)에 대한 사회적 관심이 증대됨에 따라 건강관리의 중요성이 부각되고 있음. 이러한 건강관리에 있어서 병원과 사용자 간의 IoT 기술을 이용한 환경 조성이 필요함. 실시간 생체 정보 제공 및 맞춤형 의료 서비스 제공은 4차 산업혁명의 근본 개념임. 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM(IoT·Cloud·Big data·Mobile)에서 IoT와 관련됨. 							
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 직물 내장형 센서 시스템 시장 시장 실현 시기 : 2025년 이후 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(5) 자유곡면 3D 프린팅용 나노소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 소비자 맞춤형 생산과 유통, 물류 서비스에 기반을 둔 3D 프린팅 기술은 4차 산업혁명의 핵심 기술이라고 할 수 있으나 현재까지는 고분자 소재 중심의 3D 프린팅이 제한적으로 사용되고 있음. 소비자의 다양한 요구와 3D 프린팅을 통해 생산되는 제품의 다변화를 위해 금속 및 세라믹 재료를 이용한 3D 프린팅 기술의 개발이 요구됨. 유동성이 우수한 균일한 나노크기의 구형 분말을 제작하는 것이 3D 프린팅에 적용되는 금속 및 세라믹 소재 개발의 핵심임. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 3D 프린팅용 금속 및 세라믹 나노분말 소재 제조 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 가스분무(gas-atomizing) 기반의 금속 및 세라믹 분말의 입자분포 개선 및 선택적 입자크기 선별기술 개발 (50 nm ~ 10 μm) 플라즈마 회전 전극 공정(plasma rotating electrode process) 기반의 금속 및 세라믹 분말의 입자분포 개선 및 선택적 입자크기 선별 기술 개발 (50 nm ~ 10 μm) 금속-세라믹 복합재료 및 금속 합금별 분말 제조 기술 개발 (입자크기 차이에 따른 합금 및 복합재료 비율 변화) 및 이종재료 분말 균일화 기술 3D 프린팅용 나노분말의 폭발 안정성 확보를 위한 코팅제 및 코팅기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 활용도가 높은 세라믹 및 금속 기반의 3D 프린팅 소재의 개발은 개인 스마트 패토리와 같은 소비자 맞춤형(개인 의료 포함), 다품종 소량(고부가 가치)의 제품 개발에 직접 응용되어 4차 산업혁명이 추구하는 다양한 신산업의 개발에 응용될 수 있음. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 국내외 3D 프린팅 시장 시장 실현 시기 : 2022년 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(6) 환경센서용 하이브리드 나노선 소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 세계적으로 건강과 환경 문제에 대한 관심이 많아 사회적 이슈가 되는 대기오염(미세먼지, 오존, NO_x, CO_x 등), 수질오염(폐수, 하수, 기온 등), 토양오염(방사성물질, 유기·무기 폐기물 등)을 실시간으로 모니터링하고 이를 대중이 공유할 수 있는 시스템 필요 센서와 이를 계측하기 위한 인터페이스에 필요한 모든 기능을 내장하여 상시 모니터링이 가능한 디지털 센서를 개발하면 전자재료, 검출재료, 바이오재료 등의 다양한 응용 가능 현재 개발되고 있는 FET(field effect transistor) 형태의 센서는 주어진 환경에서 오염 물질을 장기적으로 측정하는데 한계를 보이고 있음. 따라서 기존 한계를 극복하면서 지속적 고감도/고선택성 환경 오염물질 탐지가 가능한 새로운 센서 기술이 필요함. 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 고감도 센서 및 인공 리셉터 제조 (모니터링 수준: $SO_x(<0.15 \text{ ppm/h})$, $CO(<25 \text{ ppm/h})$, $NO_x(<0.1 \text{ ppm/h})$, $PM10(<50 \mu\text{g/m}^3)$, 수온($<0.001 \text{ ppm}$), 납($<0.1 \text{ ppm}$), 카드뮴($<0.01 \text{ ppm}$) 등) 정보전달 기술을 포함한 풀(full) 셀 제작 복잡한 환경에서의 센서 특성 유지 및 샘플 재활용 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> Top-down, bottom-up 방식의 나노구조 제작 마이크로 패터닝 및 집적 기술 개발 장기간 모니터링을 위한 센서 유지 기술 개발 목표 타겟 감지를 위한 인공 리셉터 제조 및 인공 리셉터와 고감도 센서 기술의 조합 내장 인터페이스에서의 데이터 처리 및 이의 원격 전송 기술 확보 복잡한 환경 적용 회로 기술 및 탐지 후 오염원 배출 기술 확보 센서 수거, 분해 및 재활용 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명의 키워드 중의 하나인 빅데이터 확보를 위해 top-down이나 bottom-up 방법으로 단일 또는 일련의 타겟을 감지 또는 특성을 측정할 수 있는 고감도 센서의 개발이 필요함. 나노, MEMS 기술로 전자회로와의 직접화 및 감지부의 어레이화를 통한 지능화 및 다기능화. 이를 활용한 초소형 및 저전력 지능형 센서 개발은 4차 산업혁명의 도래를 앞당길 수 있을 것임. 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM에서 빅데이터와 관련됨. 						
초고속	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 3차원의 나노구조물을 이용하여 환경 자체를 회로로 포함시키는 3차원 나노선 하이브리드 회로센서 개발, 탐침부가 감지하고자 하는 환경 속에 위치하여 실시간으로 변하는 환경오염 요인을 장기적으로 검출하는 센서 시장 시장 실현 시기 : 2026년 이후 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(7) 에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투과가능 투명전극

개발 개요					
<ul style="list-style-type: none"> 빛에 투명하면서 비교적 높은 전기전도도를 갖는 투명전극 재료(TC)는 디스플레이, LED, 태양전지 등의 광전소자에 활용도가 커서 활발한 개발이 진행되고 있으나 현재 전기장의 투과가 가능한 전극소재에 대한 연구는 전무함. 빛에 투명할 뿐만이 아니라 전기장도 투과할 수 있는 차세대 전극재료를 전기장 투과 전극으로 정의함. 이러한 소재를 활용한다면 기존의 전극재료의 전기장 차폐라는 물리적 제약에서 벗어나 광전소자를 포함한 다양한 에너지 변환소자의 효율 극대화 가능 					
개발 목표 및 내용					
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 나노패턴, 1D 소재, 2D 소재 기반의 전극 소재 개발 외부전계를 이용한 고효율 태양전지 개발 전기장 투과 전극을 이용한 태양광 수소생산 효율 향상 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노크기의 메쉬/홀 패턴 도입으로 우수한 전기전도성과 함께 전기장 투과도를 향상 나노선이 배열된 공간 사이로 빛 또는 전기장 투과를 최적화 높은 전기전도도를 가지며, 재료적 특성으로 전기장이 투과 가능하며 홀/메쉬 패턴을 이용하여 전계효과를 극대화 전계효과를 통해 그래핀의 일함수 조절을 이용하여 그래핀/실리콘 접합 특성(쇼트키 장벽 높이, 공핍층 증가) 향상 및 효율 증가 원자층 두께의 2D 물질에 전계효과를 이용하여 일함수를 조절, 전기적 특성 향상 및 촉매 특성 향상 금속산화물과 전기장투과 전극을 하이브리드화함으로써 촉매의 반응면적을 넓히는 동시에 외부전계를 통한 전하 수집능력 향상 					
4차 산업혁명과의 연관성					
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM 중 모바일 기기의 전원 증대를 위해서는 에너지 효율의 증대가 필요함. 제안된 차세대 전극소재 개발에 대한 체계적인 개발과 지속적인 투자를 통해 물리적인 한계로 인해 구현이 불가능하거나 지금까지 제안된 적이 없는 새로운 구조의 신개념 광전소자를 개발함으로써 제한되었던 효율의 한계를 돌파하고 에너지 변환기술의 새로운 성장 동력화가 가능함. 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM에서 모바일과 관련됨. 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기					
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 새로운 기후변화체제 등장에 따른 온실가스 감축 이슈로 선진국들의 개도국 신재생 에너지 투자가 늘어날 것으로 예상되며 신재생 에너지 수요가 아시아, 중남미 등 개도국으로 빠르게 확산될 전망이므로 시장 창출 가능 시장 실현 시기 : 2024년 이후 					
소요 기간 및 예산					
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 					

(8) 태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 독일, 미국, 일본을 중심으로 세계적인 움직임은 수소를 미래 주력 에너지원으로 규정하고 2025년까지 약 3,000 개의 수소 스테이션 구축을 통한 수소 인프라를 확충하는 것임. 세계적인 흐름과 맞물려 수소 생산 기술은 미래의 청정에너지 중심사회 구현을 위해 필수적이며 단기적으로는 화석연료로부터 수소를 생산하여 수소 경제로의 전환을 촉진해야 하지만 궁극적으로는 태양 에너지나 물과 같은 풍부한 친환경 자원을 이용하여 수소를 생산하는 진정한 수소 경제로의 진입이 필요 현재 대부분의 수소 생산은 80% 이상이 화석연료를 이용하기 때문에 생산과정에서 친환경적인 에너지가 아니라는 분명한 한계점이 존재 4차 산업혁명에 핵심적으로 필요한 지속가능한 청정에너지 확보 방안으로 광전기화학셀 기반 태양광 물분해 방식을 이용한 수소 생산이 필요 이를 위해 광전기화학셀의 성능을 좌우하는 핵심요소인 광전극 구조의 개발 필요 장수명을 확보하기 위해 나노구조체가 아닌 박막 형태, 고효율을 유지하기 위해 기능성 층을 적용한 이종접합구조 형태의 광전극 구조 개발 필요 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 친환경 수소생산 기술의 상업화에 근접한 기준을 갖춘 무전원 박막형 이종접합 광전극 개발(효율: STH 8% 이상, 수소 포집 유지 시간: 50 시간 이상) 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 단일 광전극 박막에 대한 기초 연구(광전극 박막의 결정 방향별 기본 물성, 안정성, 광활성 등의 비교)를 통해 이종접합 박막형 광전극 구조 설계의 가이드라인을 제시 장수명 확보를 위한 광전극 보호층, 고효율 확보를 위한 강유전체 삽입층 등의 기능성 물질들을 광전극 물질에 접합한 구조를 개발하여 STH 목표치 도달 및 신뢰성 확보 광전기화학셀과 솔라셀 시스템의 융합으로 무전원(unassisted) 수소 생산 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 친환경 에너지 자원을 실시간으로 활용함으로써 공간적, 시간적 제약 초월 응용 및 적용에 상당한 장점을 가지고 있는 박막형 광전극 소재 개발을 통해서 단순히 수소 생산에만 국한되지 않고 스마트 전자제품과의 직간접적인 융합 다양한 친환경 에너지 생산 방법의 융복합을 통해서 획일적인 에너지 생산이 아닌 다양한 방법을 이용한 수평적인 에너지 생산에 의한 스마트한 에너지 흐름 및 관리 학계 및 기업 연계를 통한 생산부터 소비까지의 통합시스템 구축 기반 마련 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 태양광을 이용한 수소 생산 점유율이 전체 수소 생산의 5~6% 도달 <ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명에 발맞춰 인공지능 및 IoT 등의 분야에 무전원 박막형 광전극 소재 적용 시장 실현 시기 : 10년 이내 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(9) 고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술

과제 개요	<ul style="list-style-type: none"> 실리콘 양자점을 기반으로 하는 광전소자의 효율 극대화를 위해 직경 3~5 nm 내외의 작고 균일한 실리콘 양자점을 제작하는 기술 개발 고밀도 실리콘 양자점 층을 이용하여 고효율 실리콘 양자점 태양전지를 구현하고 광전변환 효율을 극대화함. 						
과제 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 과제 목표 <ul style="list-style-type: none"> 실리콘 양자점 정밀 제어를 위한 레이저 표면 열처리 기술 개발 고효율 실리콘 양자점 태양전지 개발 과제 내용 <ul style="list-style-type: none"> (1) 레이저 표면 열처리를 이용한 고밀도 실리콘 양자점 정밀제어 공정기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> 작고 균질한 실리콘 양자점 제작을 위한 초급속 열처리 기술 실리콘 기판의 열화 방지를 위해 표면영역만 고온으로 가열하는 표면 열처리 기술 형성된 작고 균질한 실리콘 양자점의 안정화를 위한 저온 진공 열처리 기술 (2) 실리콘 양자점 응용 차세대 태양전지 개발 <ul style="list-style-type: none"> 실리콘 양자점 층의 양자구속 효과에 의한 밴드갭 에너지 제어 기술 작고 균질한 양자점에 의한 광흡수, 광전변환 및 캐리어 이동 극대화 기술 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 수 nm의 균질한 고밀도 실리콘 양자점 층은 차세대 메모리 및 차세대 태양전지 등 4차 산업혁명을 위한 핵심 소자에 활용될 수 있음. 						
초고속화	대용량화	✓	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 차세대 태양전지 시장 실현 시기 : 2025년 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(10) 제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 세계적으로 건축물 에너지 절감을 위한 기준 강화 추세로 에너지 손실이 가장 큰 창호에 단열 성능이 우수한 저방사 유리 사용 급증 (유럽 전체 유리시장의 40%) 관공서 및 업무용·주상복합 등 고층 건물 중심으로 고가의 강화 저방사 유리를 채택하고 있으나 주택으로의 확대를 위해서는 저가의 소재 개발 필요 다기능성(UV·IR 차단 및 색감 적용) 나노코팅 유리 개발 필요 고안정성 나노분산 용액 및 고내구성 접착 기술 개발 필요 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - UV 및 IR 80% 이상 차단 및 색감 적용 유리 - 최소 12개월의 분산 안정성 용액 개발 - 나노코팅의 균일성, 접착성 및 내구성 향상 유리 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - UV와 IR을 동시에 차단할 수 있는 다양한 세라믹/금속 나노입자 또는 복합물질 개발 - 세라믹/금속 나노입자의 용매 안에서의 분산안정성을 위한 표면작용기 선정 및 도입 - 코팅 균일성, 접착성, 내구성 향상을 위한 분산용액 내 적절한 결합제(접착제) 선정 및 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 에너지 절약형 친환경 건설 소재 도입을 통한 분산형 에너지 관리 효율 극대화 태양열 집광판용 유리에도 적용 가능하여 관련 에너지 장비의 효율 향상 가능 시장규모가 큰 일반 주택용 유리를 대상으로 하여 국내 에너지 절감 효과 극대화 가능 기존 고가의 대형장비에 의한 저방사 유리의 생산자 중심의 대량생산 방식이 아닌, 저가이면서도 소비자 중심의 생산방식 가능(연결성) 소재 기술(나노코팅액 제조기술)과 물리 기술(코팅 공정기술)의 융합(융합성) 							
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 <ul style="list-style-type: none"> - 건축물 에너지 소비량 중 창호를 통한 열 손실 45% (약 7.6조원) 절감 - 국내 저방사 유리 시장(3,400억원 규모), 국외 저방사 유리 시장(70조원 규모) 시장 실현 시기 : 2021년 말 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(11) 세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 리튬 이차전지용 음극재 국산화율은 2.7% 수준으로 리튬 이온전지 4대 핵심소재 중 가장 낮으며 음극재 국산화를 통해 장기적으로 50~60%까지 확대할 필요가 매우 큼. 전기자동차용 및 ESS용 중대형 배터리 시장에서 고용량 음극 소재를 필요로 하면서 기존에 쓰이던 탄소계, 흑연계 음극재에서 최근 금속복합계인 실리콘(Si/SiO_x), 주석(Sn) 음극재가 주목받고 있음. 자연계에 풍부하고 값싸며 유용한 작용기를 가져 다양한 분야에 응용 가능한 나노셀룰로오스를 활용하고자 하는 연구가 활발히 시작되고 있음. 나노셀룰로오스를 활용, SiO_x 세라믹 계열의 전극 활물질을 담지하여 저비용 초고용량 하이브리드 전극소재 기술 개발을 이루고자 함. 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 탄화 및 흑연화를 통한 고전도성 나노셀룰로오스(crystal nanocellulose (CNC), crystal nanofiber (CNF) 등) 소재 기술 개발 나노셀룰로오스 표면 제어 및 in-situ 합성법 등을 통한 안정성이 극대화된 CNC/SiO_x 초고속 충전가능 고용량 전극 소재 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노셀룰로오스 탄화 및 흑연화 최적화 기술 나노셀룰로오스/SiO_x 전구체 조성, 열처리 조건 최적화 기술 및 이를 통한 SiO_x 크기 및 형상 제어 기술 나노셀룰로오스 대비 SiO_x의 고함량(≤75%) 분산 기술 및 free standing 필름 제조 기술 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 환경 친화형으로 생산된 전기 에너지를 충분히 공급받고 효율 높게 활용할 수 있는 전극 소재 개발로 스마트폰, 전기자동차, AI 로봇의 시공간 제약이 없는 효율적 에너지 소비 구현 나노셀룰로오스/세라믹형 고성능 음극소재 개발은 EV 자동차 보급을 가속화할 것이며 이를 통해 기존 내연기관 자동차 대비 자율주행(SW, AI 등) 자동차 구현에 매우 유리 						
초고속화	대용량화	✓	저전력화	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 <ul style="list-style-type: none"> 리튬 이온전지 시장 64조원 이상 (2020년 이후) 전기자동차용 리튬 이온전지 시장 16조원 시장 실현 시기 : 2022년 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(12) 태양열 집열을 통한 고성능 열전 소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 태양열 집열을 통해 태양 에너지를 활용하는 방법은 광반도체를 이용하여 전자-전공을 생성시키는 태양광 발전 방식과 달리 태양열을 통해 얻은 고온의 온도(~700°C)를 발전에 사용하는 방식으로 최근 태양광 발전과 병행하여 태양 에너지 사용 효율을 증가시키기 위하여 연구가 진행되고 있음. 열전 소자는 제작 효과를 이용하여 열에너지를 전기 에너지로 바꾸는 소자로서 열전소자를 태양열 집열 부위에 사용하면 전기 에너지를 생산할 수 있음. 효율적인 열전 소자 발전을 위해서는 열전소자가 배치되는 집열부와 대기 냉각부의 온도차가 커야 하며 이를 위해서는 표면적이 큰 고성능의 열전 나노소재의 개발 필요 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 태양열 집열 발전을 위한 고성능 열전 반도체 나노소재 성장기술 개발 열전 반도체 나노소재 제어 및 고효율 전극 배치를 통한 소자 제작 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 단결정 나노 열전 반도체 기초 연구(열전 재료 선정, 성장기술 개발, 전극재료 최적화 등)를 통한 단위 소자 최적화 기술 열전 나노소재 대면적(>20 인치) 성장 및 배치 기술 개발 태양 집열 노출 시 집열 온도(-20~700°C)에 따른 내구성 및 신뢰성 기술 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 열전 나노소재 기반의 물성 향상을 통해 친환경 태양 에너지를 효율적으로 사용할 수 있게 되므로 지속가능한 사회 발전을 위한 산업이라는 4차 산업혁명의 기술 이슈와 연관됨. 기존의 태양광 발전에 태양 집열 기술 및 열전소자 기술을 융합해 신산업 창출을 유도할 수 있음. 							
초고속화		대용량화	✓	저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 태양열 발전 시장 및 열전 반도체 응용 시장 시장 실현 시기 : 2022년 							
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(13) 철 기반 고효율 나노촉매 소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 초연결 데이터망 시대에서 발생될 에너지 부족을 해결하기 위해 친환경적인 수소에너지 생산을 위한 저비용, 고효율 촉매의 개발 촉매의 조성 조절 및 표면 제어를 통한 귀금속 촉매의 대체 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 지구상에 풍부한 철을 이용하여 기존의 귀금속을 사용한 촉매에 준하는 특성을 확보 새로운 원소 조합을 이용한 다원 조성 촉매 설계 및 표면 상태의 원자층 단위 구조 제어를 통하여 최적의 촉매 특성을 확보 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 철을 기반으로 한 촉매 물질에 기존의 우수한 촉매 특성을 보이는 니켈, 망간, 코발트 등의 전이 금속을 첨가하여 수소, 산소 발생 반응에 최적화된 조성을 탐색 표면의 나노구조화, 양극산화 등의 방법을 이용하여 촉매의 비표면적을 극대화하여 더욱 향상된 촉매 특성을 확보 위의 방법을 통한 우수한 특성에 장기적인 안정성이 확보된 철 기반의 저비용, 고효율 촉매의 개발이 가능 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대에서는 각종 모바일 기기의 활용이 더욱 증대되어 전기 에너지 사용량이 급격히 늘어나고 그로 인해 기후변화가 가속화될 가능성이 매우 높음. 저비용 고효율 촉매의 개발을 통해 기존의 수소 생성 비용을 획기적으로 낮춰 CO₂ 발생이 전혀 없는 수소 에너지의 활용 폭을 극대화 저비용의 수소 생성은 수소 연료전지의 활용을 더욱 용이하게 하여 가정용/발전용 연료전지, 수소 자동차 산업의 활성화에 기여할 수 있음. 궁극적으로 태양전지와의 연결을 통해 전력을 사용하지 않는 친환경적인 신재생 에너지 산업에 기여 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 수소 에너지 산업 시장 실현 시기 : 2030년 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 7억원/년 (35억원) 						

(14) 초소형 미세먼지 감지센서 소재

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> ● 모바일 실시간 미세먼지 모니터링이 가능한 장수명, 고감도, 고신뢰성 센서소재 개발 ● 기존의 광학식 미세먼지 센서의 단점(크기, 가격 측면)을 극복한 초소형 미세먼지 감지 센서 개발 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 실내/외 미세먼지 모니터링 센서의 상용화에 필요한 고감도, 고신뢰성, 고선택성, 장수명, 초소형화, 저소비전력 등과 같은 특징을 갖는 미세먼지 감지센서용 소재 개발 - 다양한 화학적 조성 및 크기의 미세먼지 입자를 감지할 수 있는 센서 소재 및 어레이 기술 확보 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 국소 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용하여 나노입자의 흡착 정도에 따른 색상의 변화로 화학물질 감지가 가능한 비색 플라즈몬 미세먼지 감지 센서 소재 개발 - 다양한 표면 장식을 통해 각각 특정 크기의 입자에 대해 높은 선택성과 감도를 갖는 단일 미세먼지 감지 소재 개발 - 단일 센서 소재 개발 및 미세먼지 감응 특성 파악 후 이를 이용한 센서 어레이 구현을 통해 모바일 실시간 환경 모니터링 구현 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> ● 장수명, 고감도, 초소형 미세먼지 감지 센서 소재의 개발을 통해 스마트폰과 같은 기존 모바일 기기 산업에 적용 가능한 미세먼지 센서 개발 및 응용 분야의 대폭적 확대 ● 실시간 환경 모니터링 기술은 실내/외 스마트 환경 센서의 상용화에 기여하고 스마트홈 소자와 스마트 자동차 센서 시장의 활성화에 기여할 수 있음. ● 최종적으로는 센서 기술이 필수적인 사물인터넷 전반에 도입되고 빅데이터 기술과 연계한 데이터 수집, 분석 및 예측 기술로 다양한 산업에 기여 							
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	√	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : IoT 나노센서 시장 ● 시장 실현 시기 : 2028년 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) ● 소요 예산 : 6억원/년 (30억원) 							

(15) 영상·소리 동시 구현 유연소재

개발 개요						
● 자체 진동을 통해 소리를 내는 유연한 나노소재 개발 ● 모바일 기기에 적용 가능하며 외부 스피커 없는 유연한 디스플레이 제작 가능						
개발 목표 및 내용						
● 개발 목표 - 영상과 소리가 동시에 구현되는 유연한 나노소재의 개발 - 디스플레이에 내장된 고음질의 스피커를 통해 기존 소자의 저음질 문제 해결 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) - 탄소재료와 2차원 소재의 물성을 제어하여 유연하며 투명한 디스플레이 패널 전극 및 기판 소재 개발 - 유연한 나노소재로 이루어진 디스플레이 패널 자체를 스피커에 필요한 진동판으로 활용하여 디스플레이에 스피커를 내장 - 디자인과 이동성 및 고음질을 모두 갖춘 저비용·고신뢰성의 디스플레이 개발 가능						
4차 산업혁명과의 연관성						
● 영상과 소리를 동시에 구현하는 다기능 소재를 개발함으로써 소자에 필요한 부품의 수가 감소하여 초경량의 저전력 소자 개발 가능 ● 유연한 디스플레이를 스마트폰 및 태블릿 PC 등에 사용하여 사물과 인간 간의 연결을 보다 수월하게 함으로써 초연결 사회에 기여 ● 디스플레이 패널 전체를 스피커로 활용하므로 이어폰 또는 헤드폰을 사용하지 않고도 고음질의 음성을 들을 수 있으며 소재가 유연하므로 디자인의 폭이 넓어짐. ● 따라서 감각적인 디자인과 신기능·고성능을 추구하는 소비자의 요구를 모두 충족시킬 수 있음.						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
● 목표시장 : 스마트폰, 태블릿 PC 및 디스플레이 산업 ● 시장 실현 시기 : 2030년						
소요 기간 및 예산						
● 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) ● 소요 예산 : 7억원/년 (35억원)						

(16) 친환경 양자점 발광소재

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="background-color: #e6eaf2;">개발 개요</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> ● 실리콘은 친환경성, 원재료의 풍부함, 무독성, 우수한 공정 적합성으로 인해 II-VI족 물질의 독성이나 III-VI족 물질의 희귀성을 극복할 수 있는 물질로 각광받고 있음. ● 최근 들어서 Si/SiO₂ 나노복합체로부터 습식 에칭 방법으로 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)을 합성한 후 표면을 유기기능화(organo-functionalization)하여 가시광선 영역에서 60% 이상의 형광 양자 수율을 얻은 결과들이 보고되고 있음. </td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="background-color: #e6eaf2;">개발 목표 및 내용</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 형광양자효율 75% 이상의 적색/녹색/청색 실리콘 양자점 개발 - 실리콘 양자점 성능 평가 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 실리콘 양자점용 Si/SiO₂ 나노복합체 합성 기술 - Si/SiO₂ 나노복합체 습식 에칭을 통한 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD) 합성 기술 - 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)의 표면 유기기능화 기술/열 유기기능화 기술 (thermal organo-functionalization)/광 유기기능화 기술(photo organo-functionalization)/촉매반응 유기기능화 기술(catalysis organo-functionalization) - 형광 특성 분석 및 QD의 전자구조 분석 기술 - 실리콘 양자점-고분자 매트릭스 복합체 합성 기술 - 실리콘 양자점 용액 및 고분자 복합체에서의 형광 특성 확인: 형광 양자 효율 $\geq 75\%$, 반치폭 20 nm(@R, G, B) </td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="background-color: #e6eaf2;">4차 산업혁명과의 연관성</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> ● 디스플레이는 모바일 환경에 필수적인 장비임. ● 본 과제는 디스플레이의 핵심기술인 친환경 양자점 소재를 개발하는 것임. ● 이러한 친환경 양자점 개발은 4차 산업혁명 발전의 기초연구에 해당함. ● 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM(IoT, Cloud, Big data, Mobile)에서 모바일과 관련됨. </td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">초고속화</td><td style="text-align: center;">대용량화</td><td style="text-align: center;">저전력화</td><td style="text-align: center;">✓</td><td style="text-align: center;">신기능</td><td style="text-align: center;">✓</td><td style="text-align: center;">기타</td><td style="text-align: center;"></td></tr> <tr> <td colspan="8" style="background-color: #e6eaf2;">목표시장 및 시장 실현 시기</td></tr> <tr> <td colspan="8"> <ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 양자점을 활용한 디스플레이 시장 ● 시장 실현 시기 : 2022년 이후 </td></tr> <tr> <td colspan="8" style="background-color: #e6eaf2;">소요 기간 및 예산</td></tr> <tr> <td colspan="8"> <ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) </td></tr> </table>	개발 개요								<ul style="list-style-type: none"> ● 실리콘은 친환경성, 원재료의 풍부함, 무독성, 우수한 공정 적합성으로 인해 II-VI족 물질의 독성이나 III-VI족 물질의 희귀성을 극복할 수 있는 물질로 각광받고 있음. ● 최근 들어서 Si/SiO₂ 나노복합체로부터 습식 에칭 방법으로 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)을 합성한 후 표면을 유기기능화(organo-functionalization)하여 가시광선 영역에서 60% 이상의 형광 양자 수율을 얻은 결과들이 보고되고 있음. 								개발 목표 및 내용								<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 형광양자효율 75% 이상의 적색/녹색/청색 실리콘 양자점 개발 - 실리콘 양자점 성능 평가 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 실리콘 양자점용 Si/SiO₂ 나노복합체 합성 기술 - Si/SiO₂ 나노복합체 습식 에칭을 통한 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD) 합성 기술 - 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)의 표면 유기기능화 기술/열 유기기능화 기술 (thermal organo-functionalization)/광 유기기능화 기술(photo organo-functionalization)/촉매반응 유기기능화 기술(catalysis organo-functionalization) - 형광 특성 분석 및 QD의 전자구조 분석 기술 - 실리콘 양자점-고분자 매트릭스 복합체 합성 기술 - 실리콘 양자점 용액 및 고분자 복합체에서의 형광 특성 확인: 형광 양자 효율 $\geq 75\%$, 반치폭 20 nm(@R, G, B) 								4차 산업혁명과의 연관성								<ul style="list-style-type: none"> ● 디스플레이는 모바일 환경에 필수적인 장비임. ● 본 과제는 디스플레이의 핵심기술인 친환경 양자점 소재를 개발하는 것임. ● 이러한 친환경 양자점 개발은 4차 산업혁명 발전의 기초연구에 해당함. ● 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM(IoT, Cloud, Big data, Mobile)에서 모바일과 관련됨. 								초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타		목표시장 및 시장 실현 시기								<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 양자점을 활용한 디스플레이 시장 ● 시장 실현 시기 : 2022년 이후 								소요 기간 및 예산								<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							
개발 개요																																																																																								
<ul style="list-style-type: none"> ● 실리콘은 친환경성, 원재료의 풍부함, 무독성, 우수한 공정 적합성으로 인해 II-VI족 물질의 독성이나 III-VI족 물질의 희귀성을 극복할 수 있는 물질로 각광받고 있음. ● 최근 들어서 Si/SiO₂ 나노복합체로부터 습식 에칭 방법으로 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)을 합성한 후 표면을 유기기능화(organo-functionalization)하여 가시광선 영역에서 60% 이상의 형광 양자 수율을 얻은 결과들이 보고되고 있음. 																																																																																								
개발 목표 및 내용																																																																																								
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 형광양자효율 75% 이상의 적색/녹색/청색 실리콘 양자점 개발 - 실리콘 양자점 성능 평가 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 실리콘 양자점용 Si/SiO₂ 나노복합체 합성 기술 - Si/SiO₂ 나노복합체 습식 에칭을 통한 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD) 합성 기술 - 수소 종결 실리콘 양자점(H-Si QD)의 표면 유기기능화 기술/열 유기기능화 기술 (thermal organo-functionalization)/광 유기기능화 기술(photo organo-functionalization)/촉매반응 유기기능화 기술(catalysis organo-functionalization) - 형광 특성 분석 및 QD의 전자구조 분석 기술 - 실리콘 양자점-고분자 매트릭스 복합체 합성 기술 - 실리콘 양자점 용액 및 고분자 복합체에서의 형광 특성 확인: 형광 양자 효율 $\geq 75\%$, 반치폭 20 nm(@R, G, B) 																																																																																								
4차 산업혁명과의 연관성																																																																																								
<ul style="list-style-type: none"> ● 디스플레이는 모바일 환경에 필수적인 장비임. ● 본 과제는 디스플레이의 핵심기술인 친환경 양자점 소재를 개발하는 것임. ● 이러한 친환경 양자점 개발은 4차 산업혁명 발전의 기초연구에 해당함. ● 4차 산업혁명의 키워드인 ICBM(IoT, Cloud, Big data, Mobile)에서 모바일과 관련됨. 																																																																																								
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타																																																																																		
목표시장 및 시장 실현 시기																																																																																								
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 양자점을 활용한 디스플레이 시장 ● 시장 실현 시기 : 2022년 이후 																																																																																								
소요 기간 및 예산																																																																																								
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 																																																																																								

(17) 패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> ● 질병 표적 화학 물질과 상호작용을 할 수 있는 플렉시블, 웨어러블, 고속 반응 소재 ● 친환경 유기-고분자 복합 화학물질 기반 패치형 컬러 맵핑 소재 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 현재 질병 진단 시 의료장비 사용의 불편함 등으로 질병 진단에 많은 시간이 소요되는 문제를 해결할 수 있는 질병 표적 문자를 이용, 화학적 맵핑을 통해 빠르고 간편하게 질병 진단하는 방법 개발 - 많은 표적 문자를 진단할 수 있는 소재군 개발 및 맵핑 기술 및 방법 개발 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 특정 화학물질에 민감히 반응하는 유기-고분자 염료를 이용한 빠른 색변화 구현 - 특정 화학물질에 민감히 반응하는 유기-금속염 염료를 이용한 빠른 색변화 구현 - 표적 물질 맵핑을 위한 생체 신화적 패치형 질병 조기 자가진단 소재 기술 실증화 <ul style="list-style-type: none"> 1) 질병 조기 자가진단 소재와 양립 가능한 생체 친화적 패치형 소재 개발 2) 표적 물질 감지를 위한 맵핑 및 감지 기술 - 질병 표적 문자 감지(Arginase, Carboxypeptidase, Interleukin, NO₂, Musin, AFP, Trichloromethane and Etc.) - 독성 가스 물질 감지(Ammonia, Arsine, chlorine, Diborane, Fluorine, HCN, HF, H₂S, Hydrazine, SO₂, Purine and etc.) - 웨어러블, 플렉서블, 인장-압축 및 생체 친화성을 겸비한 소재 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> ● 산업적으로 생체 친화적인 웨어러블/모바일 기기, 3D 프린팅 및 개인 맞춤형 디자인 구조 개발의 응용을 통한 에너지 및 이동성을 갖춘 산업 영역에 적용 가능 ● 군사용 기능성 소재로서 화학 물질의 빠른 감지와 휴대성을 겸비하여 위급 상황에 빠르게 대처 가능하도록 함. ● 고령화 시대에 맞추어 빠른 질병 진단을 통해 기대 수명 향상과 노인 복지 향상에 기여할 수 있음. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
(1) 목표시장 : 암, 종양 및 호르몬 분비 이상 등 휴대용 질병 자가진단 키트 시장 시장 실현 시기 : 2028년 (2018년 이후 5년 연구 및 2023년부터 5년 상용화)						
(2) 목표시장 : 군사용 기능성 소재 시장 시장 실현 시기 : 2028년 (2018년 이후 5년 연구 및 2023년부터 5년 상용화)						
(3) 목표시장 : 고령화 시대 노인 의료복지 시장 시장 실현 시기 : 2030년 (2018년 이후 5년 연구, 2023년부터 5년 상용화, 2028년부터 보급)						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) ● 소요 예산 : 6억원/년 (30억원) 						

[나노정보소자]

1. 4차 산업혁명에서 나노정보소자의 기여

- 나노정보소자는 시스템 반도체(연산, 통신 등), 메모리 등 반도체 기술을 통해 구현되며 4차 산업혁명을 이끄는 IT 기술의 핵심으로 산업과의 연관효과가 대단히 큼.
- 기존 나노정보소자 기술의 기본 원리인 폰 노이만 아키텍처와 무어의 법칙은 한계에 이르렀으며 현재의 발전을 유지하기 위해서는 새로운 패러다임으로의 전환이 요구되고 있음.
- 4차 산업혁명의 핵심인 인공지능 및 초연결 사회를 구현하기 위해서는 현재의 폰 노이만 아키텍처는 비효율적이므로 새로운 형태의 아키텍처와 이에 맞는 소자가 개발되어야 함.
- 또한 소자의 성능을 scaling을 통해 증가시켰던 기존 방식이 물리적 한계에 도달하였으므로 산업의 발전 속도를 유지하기 위해서는 새로운 형태의 성능 향상이 이루어져야 함.
- 인공지능의 보편화 및 초연결 사회의 구현은 필연적으로 처리되고 통신되고 저장되는 데이터 양의 기하급수적인 증가를 가져올 수밖에 없고 이는 나노정보소자를 구동하는 전력의 증가를 의미함. 그러나 전력 생산의 기하급수적인 증가는 있을 수 없으므로 전체 전력 소모량을 감소시킬 수 있는 새로운 형태의 소자가 필요함.

* 4차 산업혁명의 발전에 장애(병목)가 되는 부문의 해결 혹은 4차 산업혁명을 선도(촉진)할 수 있는 기능을 간략하게 기술 (도출한 과제들의 목표를 요약한 것)

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노정보소자 분야별 연관관계

사회 영역	관련기술 영역	나노정보소자								
		초저전력 메모리 소자	초고용량 스토리지 소자	초고속 놀리소자	초저전력 놀리소자	신경세포 모방 소자	나노 유연소자	차세대 통신 및 전력 소자		
산업	IoT/인터넷	2	6	7	1	5	4	3		저전력화 (초저전력 IoT 동작), 신기능 (초연결용 웨어러블 IoT 고도화)
	로봇/자율기기	4	7	2	6	1	5	3		
	비데이터/알고리즘 (AI)	5	1	2	6	3	5	4		초고속화 (초고속/초고용량 데이터 센터 구축)
	클라우드 컴퓨팅	5	3	2	4	6	7	1		저전력화 (초고속/초고용량 데이터 연결 시스템 구축 및 지능화)
	웨어러블/모바일 기기	4	7	6	2	5	1	3		저전력화 (초연결용 유연소자), 신기능 (초연결용 웨어러블 기기 고도화)
	3D 프린팅(AM)									
	센서/액튜에이터	2	7	5	1	6	3	4		저전력화/초고속 (초저전력 신호처리 및 초고속 통신소자 구현)
에너지/자원/환경	첨단소재									
	신재생에너지									
	스마트그리드	3	6	2	5	4	7	1		
	에너지 절약	2	4	7	1	3	6	5		저전력화 (연산 및 데이터 저장)
	에너지 저장									
	에너지 하베스팅/저장									
	자원 절약/재활용									
이동성	환경 모니터링									
	고용(직업)									
	운송/물류	3	6	2	5	4	7	1		초고속화 (스마트 운송 물류 처리를 위한 초고속/초고용량 소자 구현)
보건	자본(서비스)									
	맞춤의학	3	6	2	5	4	7	1		초고속화 (맞춤의학을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)
	고령화 대응	3	6	2	5	4	7	1		초고속화 (고령화 대응 초고속/초고용량 소자 구현)
가정/개인	사회적 대응(전염병)	3	6	2	5	4	7	1		초고속화 (사회적 재난 대응 초고속/초고용량 소자 구현)
	가전제품(생활가전)	2	6	4	5	1	7	3		저전력화/신기능 (스마트 가정을 위한 초연결 초저전력 소자 구현)
	소비제품									

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노정보소자 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노정보소자 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	차세대 통신 및 전력 소자	나노 유연소자	저전력화 (초저전력 IoT 동작), 신기능 (초연결용 웨어러블 IoT 고도화)
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)	대용량 스토리지 소자	초고속 논리소자	차세대 통신 및 전력 소자	초저전력 메모리 소자	초고속화 (초고속/초고용량 데이터 센터 구축)
	클라우드 컴퓨팅	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	대용량 스토리지 소자	초저전력 논리소자	저전력화 (초고속/초고용량 데이터 연결 시스템 구축 및 지능화)
	웨어러블/모바일 기기	나노 유연소자	초저전력 논리소자	차세대 통신 및 전력 소자	초저전력 메모리 소자	저전력화 (초연결용 유연소자), 신기능 (초연결용 웨어러블 기기 고도화)
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	나노 유연소자	차세대 통신 및 전력 소자	저전력화/초고속 (초저전력 신호처리 및 초고속 통신소자 구현)
	첨단소재					
에너지/ 자원/환경	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	대용량 스토리지 소자	저전력화 (연산 및 데이터 저장)
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	초고속화 (스마트 운송 물류 처리를 위한 초고속 /초고용량 소자 구현)
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	초고속화 (맞춤의학을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)
	고령화 대응	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	초고속화 (고령화 대응을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)
	사회적 대응(전염병)	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	초고속화 (사회적 재난 대응을 위한 초고속/초고용량 소자 구현)
가정/개인	가전제품(생활가전)	신경세포 모방소자	초저전력 메모리 소자	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	저전력화/신기능 (스마트 가정을 위한 초연결 초저전력 소자 구현)
	소비제품					

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노정보소자 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	나노정보소자 (우선순위)				개발대상 나노정보소자 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	차세대 통신 및 전력 소자	나노 유연소자	<ul style="list-style-type: none"> 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) Monolithic 3D 집적 시스템 공정, 집적, 소자 기술 (3차원 집적기술) 3차원 집적을 위한 레이저 공정 및 장비/소재 초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩 (3차원 집적기술)
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)	대용량 스토리지 소자	초고속 논리소자	차세대 통신 및 전력 소자	초저전력 메모리 소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템
	클라우드 컴퓨팅	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	대용량 스토리지 소자	초저전력 논리소자	<ul style="list-style-type: none"> 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자)
	웨어러블/모바일 기기	나노 유연소자	초저전력 논리소자	차세대 통신 및 전력 소자	초저전력 메모리 소자	<ul style="list-style-type: none"> 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) Monolithic 3D 집적 시스템 공정, 집적, 소자 기술 (3차원 집적기술) 3차원 집적을 위한 레이저 공정 및 장비/소재 초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩 (3차원 집적기술) 웨어러블/모바일 기기의 유연 기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	나노 유연소자	차세대 통신 및 전력 소자	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서
	첨단소재					
에너지/ 자원/환경	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약	초저전력 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	대용량 스토리지 소자	<ul style="list-style-type: none"> 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자 (슈퍼 스티프 소자) 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	고령화 대응	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	사회적 대응(전염병)	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	초저전력 메모리 소자	신경세포 모방소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
가정/개인	가전제품(생활가전)	신경세포 모방소자	초저전력 메모리 소자	차세대 통신 및 전력 소자	초고속 논리소자	<ul style="list-style-type: none"> 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리
	소비제품					

5. 개발대상 나노정보소자 내용 요약

(1) 미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> IoT(Internet of Things)로 대변되는 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 동작 특성의 소자 개발 소자의 동작 전압(V_{DD})을 0.1~0.5 V 수준으로 낮추어 초저전력 반도체 소자 구현 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 스위치 소자의 성능 개선 성능에 대한 trade-off 없이 V_{DD} 감소를 실현하기 위한 핵심적인 방법은 상온에서 subthreshold slope(SS)의 물리적 한계(60 mV/decade)를 극복 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> 에너지 비용의 절감을 위한 Super Steep Switching 트랜지스터 개발 Hysteresis가 없고, 신뢰성이 우수한 새로운 구조와 물질을 활용한 트랜지스터 기술을 개발 고성능/고주파수 디지털 제품에 사용 가능한 수십 피코 초(ps)의 동작이 가능한 트랜지스터 소자를 개발 초저전력 트랜지스터 소자의 전력 소모/스위칭 특성을 평가 초저전력 트랜지스터 소자의 신뢰성 평가 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 초연결 사회의 진입으로 사물 인터넷, 모바일, 서버에 기반한 스마트 그리드, 스마트 홈, 자율주행 차량, VR, AR, 유비쿼터스 헬스 케어 등 분야에서 발생되는 폭발적인 정보 처리 수요 예상 4차 산업혁명을 이끄는 핵심 중 하나인 IoT로 대변되는 사물인터넷 기기는 대용량의 정보량을 활용하고 이를 위해 초절전 소자가 필요함. 착용형/모바일 기기의 결제 기능, 헬스케어 기능 등은 주변의 사물인터넷과의 연동을 통해 방대한 양의 연산 및 처리를 위한 초절전 소자가 필요 더 많은 기술이 추가될수록 처리되고 통신되며 저장되는 데이터양의 증가를 가져올 수밖에 없고 이는 소자를 구동하는 전력의 증가를 의미함. 데이터양의 기하급수적인 증가에 비해 전력 생산의 기하급수적인 증가는 있을 수 없으므로 전체 전력 소모량을 감소시킬 수 있는 초저전력 구동 소자가 필요함. 한계에 도달한 기존 소자 미세화 접근이 아닌 초저전력 컴퓨팅 기술 구현을 위한 새로운 초절전 스위칭 대안 기술 개발이 필요함. 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 반도체 시장 시장 실현 시기 : 2021년~2023년 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) Monolithic 3D 집적 시스템 공정·집적·소자 기술

개발 개요							
● Monolithic 3D 공정 구현을 위한 공정 및 관련 회로 기술 개발 ● 이종 소자 결합을 통한 M3D 시스템 구현 및 전력 절감 구현							
개발 목표 및 내용							
● 개발 목표 - 초절전 소자의 구현을 위한 Monolithic 3D 집적 시스템 반도체 소자 플랫폼 형성 - 이종 소자의 집적을 통한 Monolithic 3D 집적 시스템 시현 ● 개발 내용 - Monolithic 3D 공정 구현을 위한 적층 공정 및 관련 회로 기술 개발 · 실리콘 및 화합물 반도체 기판을 응용한 저온 공정 기반 기판 간 적층 및 연결 · M3D 구현을 위한 회로 설계 및 모델링 - Monolithic 3D 공정에 적합한 저온 공정 및 관련 장비 개발 · 소자 성능 감소를 위한 저온 공정 개발 · 저온공정 가능한 본딩 장비 개발 - 초절전 Monolithic 3D 시스템 반도체 소자 플랫폼 개발 · 검증 소자를 통한 소자의 수직적 다층 적층 및 성능 평가 - 이종 소자 결합을 통한 M3D 시스템 구현 및 전력 절감 구현 · 성능 및 전력 소모 최적화를 위한 M3D 시스템 구현							
4차 산업혁명과의 연관성							
● 다양한 종류의 소자를 한 칩에 집적함으로써 IoT, 뉴로모픽 소자 등 4차 산업혁명 연관 나노정보소자의 제작을 가능케 해줌.							
초고속화	✓	대용량화		저전력화	✓	신기능	
목표시장 및 시장 실현 시기							
● 목표시장 : 반도체 로직 및 융합 소자 시장, IoT, 뉴로모픽 반도체 시장 ● 시장 실현 시기 : 1단계 2020년도 (IoT 등), 2단계 2025년도 (초미세기술)							
소요 기간 및 예산							
● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원)							

(3) 3차원 집적을 위한 레이저 공정 및 장비/소재

개발 개요							
● Monolithic 3D 또는 3D stacked IC 공정을 위한 레이저 공정 및 장비 소재 개발 ● 저온 열처리를 이용한 소자 제작 기술 개발 및 관련 장비/소재 개발							
개발 목표 및 내용							
● 개발 목표 : 레이저를 이용하여 하층 소자부에 열 충격을 주지 않는 열처리 공정 기술 개발 및 이에 필요한 장비/소재 개발 ● 개발 내용 - M3D 소자 제작 시 상층부 소자의 채널 형성/접합 형성/gate stack 열처리 기술 개발 (하층부 소자의 온도 <400°C) - 3D stacked IC, 플렉서블 기판 소자 제작을 위해 필요한 공정용 레이저 기술 개발 (하층부 온도 <400°C) - 위의 공정을 가능하도록 하는 장비 및 레이저 응용 부품, 소재의 개발							
4차 산업혁명과의 연관성							
● 3차원 시스템을 구현하기 위한 초저온 공정 개발로 이를 통해 다양한 종류의 소자를 한 칩에 집적이 가능하여 초저전, 초집적, High bandwidth 구현 ● 웨어러블 등에 쓰이는 유연소자 제작 가능							
초고속화	대용량화	✓	저전력화	✓	신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기							
● 목표시장 : 반도체 로직 및 메모리 소자 시장, IoT, 웨어러블 시장 ● 시장 실현 시기 : 2020년도							
소요 기간 및 예산							
● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원)							

(4) 고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● Monolithic 3D 공정 구현을 위한 공정 및 관련 회로 기술 개발 ● 이종 소자 결합을 통한 M3D 시스템 구현 및 전력 절감 구현 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 : 고속 비휘발성 메모리 기반 초저전력, 고성능 자가 구조변경 시스템용 프로그래머블 로직 시스템 및 플랫폼 개발 ● 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 프로그래머블 로직에 적합한 고속 비휘발성 메모리 기반 소자 개발 및 프로그래머블 회로 설계 - 고속 비휘발성 메모리 기반 프로그래머블 로직에 적합한 아키텍처 개발 및 CAD tool chain 설계 - 자가 구조변경 시스템의 플랫폼 개발 - 프로그래머블 로직 시스템의 어플리케이션 탐색 - 프로그래머블 로직의 프로토타입 제작 및 자가 구조변경 시스템 구축 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 한 종류의 시스템을 이용하여 다양한 종류의 소자로 변경 사용이 가능하도록 하고 시스템을 사용하지 않는 부분의 전력 공급을 중단하여 초저전력을 구현함. 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 반도체 로직 및 메모리 소자 시장, IoT, 뉴로모픽 반도체 시장 ● 시장 실현 시기 : 1단계 2020년도 (미세기술), 2단계 2025년도 (초미세기술) 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(5) 초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명을 선도할 웨어러블 소자에 필수적인 초저전력 유연소자를 위한 3차원 집적 기술 개발 3차원 집적을 위한 본딩 기술 개발을 통한 소자 미세화의 물리적 한계 해결 및 초저전력 동작 특성 확보 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 나노유연소자를 구성하는 각 요소들의 초저전력 특성을 위한 본딩 기술 확보 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> 웨어러블 소자를 위한 나노유연소자의 3차원 집적 형태 고안 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩 기술 및 인터커넥트에 대한 핵심 기술 개발 3차원 집적 기술에 필요한 본딩 공정 조건 확보 및 새로운 기술 개발 3차원 본딩 기술을 사용한 나노 유연소자의 자체적 특성 평가 1차원 나노 유연소자와 3차원 집적 나노 유연소자간의 전력 특성 비교 평가 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명의 핵심 중 하나인 초연결 사회의 구현을 위해서는 웨어러블 소자가 필수적이며 이는 필연적으로 처리되고 통신되며 저장되는 데이터양의 기하급수적인 증가를 가져옴. 이러한 데이터양의 기하급수적인 증가는 나노정보소자를 구동하는 전력의 증가를 의미하며 전력 생산의 기하급수적인 증가는 있을 수 없으므로 전체 전력 소모량을 감소시켜야 함. 전체 전력 소모를 감소시키기 위해서는 초저전력 소자의 개발이 필수적이며 웨어러블 소자에 사용하기 적합한 소자로는 나노유연소자가 있음. 나노유연소자를 이용하여 초연결 사회를 구현하기 위해서는 현재의 폰 노이만 아키텍처는 효율적이지 못하므로 새로운 형태의 아키텍처인 3차원 집적기술의 개발 필요 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 웨어러블 시장 시장 실현 시기 : 세계 웨어러블 시장의 경우 2017년 현재부터 2020년까지 연평균 16.4%의 성장을 예상하고 있으며 2013년부터 실현되어 옴. 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(6) 웨어러블/모바일 기기의 유연기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자

개발 개요							
● 웨어러블/모바일 기기를 위한 초저전력 유연 메모리/로직 소자를 개발함.							
● 소자의 성능은 유지하면서 에너지와 비용을 절감하여 차세대 IT 융합제품 등에 응용 가능함.							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 빅데이터의 분석, 판단, 추론을 하기 위한 초저전력 RRAM 소자의 성능 및 에너지 효율을 개선 - 곡면의 디스플레이나 신체에 부착되어 사용되기 위한 유연성을 확보 ● 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 에너지 비용의 절감을 위한 초소형, 고직접도, 초저전력 RRAM 기반 유연소자를 개발 - 전력 소모를 증가시키는 메모리 소자의 누설 전류를 제한하기 위해 MIM 구조의 RRAM 위에 적층 가능한 $4F^2$ 크기의 수직 구조 셀렉터를 개발 - 초저전력 유연 RRAM 소자의 전력 소모 특성을 평가함 - 초저전력 유연 RRAM 소자의 반복적인 기계적 변형 하에서의 안정성을 평가함 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> ● 4차 산업혁명을 이끄는 핵심 중 하나인 웨어러블 기기를 위해 유연기판에 구현 가능한 소자가 필요함. ● 웨어러블/모바일 기기의 결제 기능, 헬스케어 기능 등은 주변의 사물인터넷과의 연동이나 센서를 통한 측정을 필요로 함. ● 더 많은 기술이 추가될수록 처리되고 통신되며 저장되는 데이터의 양의 증가를 가져올 수밖에 없고 이는 소자를 구동하는 전력의 증가를 의미함. ● 데이터양의 기하급수적인 증가에 비해 전력 생산의 기하급수적인 증가는 있을 수 없으므로 전체 전력소모량을 감소시킬 수 있는 초저전력 구동소자가 필요함. ● 기존 FET 소자의 성능을 scaling을 통해 증가시켰던 방식이 물리적 한계에 도달하였으므로 산업의 발전 속도를 유지하기 위해서는 새로운 형태의 성능 향상을 위해 뉴메모리 소자에 대한 연구가 이루어져야 함. ● 또한 4차 산업혁명의 핵심인 인공지능 및 초연결 사회를 구현하기 위해서는 폰 노이만 아키텍처는 비효율적이므로 새로운 형태의 아키텍처와 이에 맞는 소자가 개발되어야 함. 							
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 차세대 웨어러블 시장 ● 시장 실현 시기 : 2021년~2023년 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(7) 3차원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> 사물인터넷 등의 4차 산업혁명 관련 기술 및 More-than-Moore 반도체 기술 개발을 위한 3차원 집적 소자 기반 CMOS 이미지 센서 개발 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : CMOS 이미지 센서용 3차원 집적 소자 및 3차원 집적 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - CMOS 이미지 센서를 구성하는 집광 렌즈, 필터, 포토다이오드, 전기 신호를 처리하는 회로 등을 3차원 적층 구조로 형성하는 기술 개발 - 웨이퍼 본딩 기술을 통해 포토다이오드 칩과 오실레이터형 AD 변환회로를 접합하는 기술을 개발 - 해당 적층 기술을 기반으로 3차원 구조의 CMOS 이미지 센서를 개발 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> 스마트홈, 스마트카, 사물인터넷 등과 같은 4차 산업혁명의 핵심 개념들 뿐 아니라 모바일 앱의 폭발적인 성장은 더 민감하고 견고한 센서 기술을 요구하는 광범위한 센서 어플리케이션을 위한 분야를 형성하고 있는데 이는 반도체 IC 센서가 가장 잘 만족시킬 수 있음. 4차 산업혁명을 위한 반도체 센서에는 3차원 제스처 인식이 가능한 이미지 센서, 반도체 압력 센서, 적외선 및 자외선 센서, 반도체 가스 센서 등이 있음. 특히 반도체 CMOS 이미지 센서는 다양한 IT 기기와 자동차 등으로 분야를 확장시킬 수 있어 여러 반도체 센서 중 가장 각광받는 센서임. 								
초고속화	✓	대용량화		저전력화	✓	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 3차원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서 시장 시장 실현 시기 : 반도체 센서를 비롯한 세계 센서 시장 규모는 2020년에 약 1,400억 달러에 이를 것으로 전망되며 반도체 이미지 센서의 경우 국내 반도체 업계에서 2018년에 본격적인 양산에 들어갈 것으로 전망됨. 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 								

(8) 비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리

개발 개요									
<ul style="list-style-type: none"> 로직과 정보저장 모듈 간 정보전달 지연과 급격하게 증가하는 전력 소모를 해결할 목적으로 로직 회로에 비휘발성 정보저장 소자를 집적하여 로직-인-메모리를 구현 									
개발 목표 및 내용									
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 로직-인-메모리 아키텍처에 사용될 정보저장소자 구현을 위해서 비휘발성, 매우 높은 쓰기/지우기 반복 횟수($>10^9$), 빠른 쓰기 속도, 소자의 소형화 가능성, CMOS 공정에 적용할 수 있고 낮은 공정온도 및 3차원 적층 가능성이 확보될 수 있는 비휘발성 소자를 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - CMOS 공정 적합성이 뛰어나며 BEOL에 형성할 수 있는 2단자 또는 3단자 기반의 비휘발성 소자 구조로 형성하는 기술을 개발함. - 다치 레벨의 정보를 저장 가능한 가변 저항 메모리 - 로직에 연결 시 빠른 스위칭이 가능한 가변 저항 메모리 - 신뢰성이 뛰어난 가변저항 메모리 									
4차 산업혁명과의 연관성									
<ul style="list-style-type: none"> 현재의 CPU 기술은 로직과 정보저장 소자 모듈이 분리되어 있기 때문에 로직과 정보저장 모듈 사이를 연결해줄 글로벌 배선이 존재함. 글로벌 배선의 존재로 전달지연이 발생하며 칩 성능에 영향을 줌. 스케일링이 가속화되면서 모듈간 전달 지연이 점점 커지고 전력 소모는 급격하게 증가함. 현존하는 On-Chip 메모리 모듈은 휘발성 소자이기 때문에 스케일링이 지속되면서 정적 전력이 동적 전력 소모를 상회하는 수준에 이르게 됨. 4차 산업혁명을 위한 초절전 반도체 아키텍처 구현을 위해서 기존 메모리를 고속의 비휘발성 메모리 소자로 대체하여 시스템의 파워 소모 절감 및 성능 개선을 추구함. 기존 로직 소자가 차지하던 영역에 비휘발성 로직-인-메모리가 집적되는 형태의 시스템 구조가 되어 초절전, 소형 및 고속 소자 구현이 가능 									
초고속화	✓	대용량화		저전력화	✓	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기									
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 세계의 반도체 시장 시장 실현 시기 : 2021년~2028년 									
소요 기간 및 예산									
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2023 (5년) 소요 예산 : 10억원/년 (10억원) 									

[나노광전소자]

1. 4차 산업혁명에서 나노광전소자의 기여

- 4차 산업혁명은 인공지능에 의한 사물인터넷 초연결 및 실시간 네트워크에 기초할 것으로 예상되고 있으며 반도체 소자의 유연화와 투명성 부여는 사물인터넷 성능 극대화의 핵심 기능임.
- 두루마리처럼 자유자재로 접거나 공간 제약을 탈피하는 플렉서블/스트레처블 전자소자 및 발광소자는 미래 자율주행 차량, 자가진단 의료 등에 다양한 분야에 확대 적용되어 우리 삶에 기준에 예상하지 못한 편의성을 제공할 것으로 기대됨.
- 나노광전소자를 활용하게 될 경우 하기와 같은 다양한 분야에서 4차 산업혁명에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단
 - 촉각, 미각 등을 포함하는 오각인지형 센서가 내장된 나노디스플레이 기술은 사물인터넷의 초연결성을 극대화를 촉진시키는 방향으로 4차 산업혁명에 기여할 수 있음.
 - 고선명, 고해상도 및 고투과율을 갖는 윈도우 맞춤형 디스플레이 기술은 미래 자율주행 차량 인터페이스와 증강현실 구현 등에 핵심 소자로 활용될 수 있음.
 - 나노기반 신축성을 갖은 전자소자는 피부 부착, 생체 이식 등의 형태로 자가 의학진단 분야에 적용될 수 있으며 모바일, 인공지능 기반의 의료기기 소형화 및 휴대성 극대화에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상됨.
- 위에서 제시된 바와 같이 나노광전소자는 4차 산업혁명의 핵심 분야인 인공지능, 사물인터넷과 사람을 연결하는 인터페이스 기능을 수행하므로 국가 주도의 집중적인 연구개발 투자가 요구됨.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노광전소자 분야별 연관관계

영역	주제	나노광전소자										설명
		나노스트레처블 소자	나노유연TFT 소자	나노튜닝TFT 소자	나노홀로그램	나노양자 반도체 소자	나노반도체 소자	나노액광형 발광소자(LED·OLED)	나노나노소자 기술	나노발광소자 기술	나노액정셀 기술	
사회 영역	관련기술 영역											
산업	IoT/인터넷	7	8	9	10	5	1	3	2	6	4	신기능 (오감인지형 IoT 표시장치)
	로봇/자율기기	8	4	3	10	2	1	7	5	9	6	신기능 (자율주행 차량용 원도우 맞춤형 고성능 표시장치)
	빅데이터/알고리즘(AI)											
	클라우드 컴퓨팅											
	웨어러블/모바일 기기	1	2	4	10	7	3	6	5	9	8	신기능 (초연결이 가능한 웨어러블 전자·광소자)
	3D 프린팅(AM)											
	센서/액튜에이터	7	6	5	10	1	2	4	3	8	9	신기능 (오감인지 센서)
	첨단소재	2	7	8	6	9	3	1	4	10	5	신기능 (초연결 전자기기용 신축성 나노소재)
에너지/자원/환경	신재생에너지											
	스마트그리드											
	에너지 절약											
	에너지 저장											
	에너지 하베스팅/저장											
	자원 절약/재활용											
	환경 모니터링											
이동성	고용(직업)											
	운송/물류											
	자본(서비스)											
보건	맞춤의학	1	2	5	3	4	6	8	7	9	10	신기능 (초연결 의료용 피부 부착형, 생체 이식형)
	고령화 대응	1	2	5	3	4	6	8	7	9	10	신기능/고감도 (초연결 고령사회 대응용 스마트 진단 센서 표시장치)
	사회적 대응(전염병)											
가정/개인	가전제품(생활가전)											
	소비제품											

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노광전소자 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노광전소자 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 발광소자 봉지기술	용액형 나노소자 기술	나노 반사형 디스플레이	신기능 (오감인지형 IoT 표시장치)
	로봇/자율기기	나노 발광소자	양자 나노 반도체 소자	나노 투명 TFT 소자	나노 유연 TFT 소자	신기능 (자율주행 차량용 윈도우 맞춤형 고성능 표시장치)
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 투명 TFT 소자	신기능 (초연결이 가능한 웨어러블 전자•광소자)
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터	양자 나노 반도체 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 발광소자 봉지 기술	용액형 나노소자 기술	신기능 (오감인지 센서)
에너지/ 자원/환경	첨단소재	용액형 나노소자 기술	나노 스트레처블 소자	나노 발광소자	나노 발광소자 봉지 기술	신기능 (초연결 전자기기용 신축성 나노소재)
	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	양자 나노 반도체 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	신기능 (초연결 의료용 피부 부착형, 생체 이식형)
	고령화 대응	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	나노 홀로그램	양자 나노 반도체 소자	신기능/고감도 (초연결 고령사회 대응용 스마트 진단 센서 표시장치)
가정/개인	사회적 대응(전염병)					
	가전제품(생활가전)					
	소비제품					

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노광전소자 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	나노광전소자 (우선순위)				개발대상 나노광전소자 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 발광소자 봉지기술	용액형 나노소자 기술	나노 반사형 디스플레이	• 오감인지형 센서가 내장된 표시장치
	로봇/자율기기	나노 발광소자	양자 나노 반도체 소자	나노 투명 TFT 소자	나노 유연 TFT 소자	• 자율주행 차량용 고선명 표시장치
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 투명 TFT 소자	• 웨어러블 전자소자 제작을 위한 나노기반 스트레처블 기판/TFT/ 발광소자 및 설계 기술
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터	양자 나노 반도체 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	나노 발광소자 봉지 기술	용액형 나노소자 기술	• 오감인지형 센서가 내장된 표시장치
에너지/ 자원/환경	첨단소재	용액형 나노 소자 기술	나노 스트레처블 소자	나노 발광소자	나노 발광소자 봉지 기술	• 스트레처블 전자소자용 첨단 나노소재 개발
	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	양자 나노 반도체 소자	나노 발광소자 (LED-OLED 조명)	• 스트레처블/유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치
	고령화 대응	나노 스트레처블 소자	나노 유연 TFT 소자	나노 홀로그램	양자 나노 반도체 소자	• 네트워크 활용한 고감도 스마트 진단센서 표시장치 기술
가정/개인	사회적 대응(전염병)					
	가전제품(생활가전)					

5. 개발대상 나노광전소자 요약

(1) 오감인지형 센서가 내장된 표시장치

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> IoT 기반 사회에서 요구되는 다양한 센서기능이 내재된 디스플레이 소자 개발 기존 시각/청각 이외에도 후각, 촉각 등의 기능성 소자 집적화 기술 개발 					
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 촉각/후각/미각 기능 센서소재/공정/소자 개발 및 이를 디스플레이 소자에 집적 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> 나노기술을 활용한 촉각/후각/미각 센서 등 다양한 입력장치 소재/공정/아키텍쳐 개발 새로운 UI/UX를 포함하는 종합정보 입출력 장치 개발 					
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명에 핵심인 초연결성을 극대화하기 위해서는 오감인지형 센서와 같은 입력장치 다양화 기술 필요 오감인지형 디스플레이 소자는 IoT/인터넷 분야의 핵심 요소기술임. 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : IoT 디스플레이 소자 시장 실현 시기 : 2025년 이후 					
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2023 (5년) 소요 예산 : 20억원/년 (100억원) 					

(2) 자율주행 차량용 고선명 표시장치

개발 개요						
● 차세대 자율주행 자동차용 고선명 정보표시 디스플레이 소자 개발 ● 고해상도 및 고투과율을 갖는 윈도우 맞춤형 디스플레이 개발						
개발 목표 및 내용						
● 개발 목표 : 고선명, 고해상도, 고투과율을 갖는 자율주행 자동차용 디스플레이 나노소자 및 공정 기술 개발 ● 개발 내용 - 윈도우 맞춤형 디스플레이용 나노기반 초고이동도 백플레인 개발 - 금속 전기전도도를 갖는 투명 나노전극 물질 및 구조 개발 - 높은 C/R 비율 갖는 화소 구조 개발						
4차 산업혁명과의 연관성						
● 차세대 자율주행 자동차는 4차 산업혁명의 핵심인 인공지능 및 IoT 기술이 적용될 수 있는 최적의 플랫폼으로 판단됨. ● 고선명, 고해상도, 고투과율을 갖는 윈도우 맞춤형 디스플레이 기술은 자율주행 자동차 인터페이스 기능을 구현할 수 있는 기술임.						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
● 목표시장 : 자율주행 차량용 디스플레이 ● 시장 실현 시기 : 2024년 이후						
소요 기간 및 예산						
● 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (4년) ● 소요 예산 : 30억원/년 (120억원)						

(3) 웨어러블 전자소자 제작용 나노기반 스트레처블 기판/TFT/발광소자 및 설계 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 차세대 스트레처블 기판/TFT 개발 ● 웨어러블 소자용 발광소자 제조 및 설계 기술 개발 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 웨어러블 전자소자를 위한 스트레처블 기판/TFT 기술 개발 - 발광소자 제조/설계 기술 개발 및 웨어러블 전자소자에 적용 ● 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 고성능/고신뢰성을 갖는 스트레처블 TFT 기판 소재 및 공정기술 개발 - 연신율을 갖는 발광소자 전극 구조 및 설계 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 초연결이 가능한 웨어러블 디스플레이 소자 개발을 통해 4차 산업혁명 선도 가능 ● 웨어러블 소자는 편의성 및 휴대성 면에서 ICT 융합기술의 핵심 유망분야임. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	√	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 스트레처블/웨어러블 디스플레이 소자 ● 시장 실현 시기 : 2025년 이후 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2023 (5년) ● 소요 예산 : 50억원/년 (250억원) 						

(4) 스트레처블 전자소자용 첨단 나노소재

과제 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 스트레처블 디스플레이 구현을 위한 기능성 첨단 소재 개발 ● 나노구조체 기반의 변형 가능한 전도성 및 반도성 소재 합성 					
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 저온공정 가능한 나노기반 금속/반도체/절연체/인광체 소재 및 공정 개발 - 스트레처블 디스플레이 기계적/전기적 안정성을 위한 투명 나노전극, 발광 소재 및 봉지 소재 개발 ● 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 신축성 기판/절연체/반도체/전극 소재 개발 - 발광 소자의 전기적/기계적 신뢰성 개선 발광소재, 전극 및 봉지 기술 개발 					
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● IoT 및 AI로 대변되는 4차 산업혁명의 핵심 요소는 초연결성 및 초지능성 구현임. ● 스트레처블 전자소자는 초연결성을 극대화할 수 있는 기술이며 이를 구현하기 위해서는 신축성 있는 첨단 기능성 나노소재 합성 및 개발이 필수적임. 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 스트레처블 전자 소자 ● 시장 실현 시기 : 2020년 이후 					
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 15억원/년 (45억원) 					

(5) 스트레처블/유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 스트레처블/유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치 개발 					
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 : 고기능/고감도 갖는 맞춤형 의학진단용 표시장치의 공정 기술 및 소재 개발 ● 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 피부 부착형/ 생체 이식형 맞춤형 의학진단용 표시장치 개발 - 생체 적합성 및 신축성을 갖는 나노 기반의 기판/봉지 기술 개발 - 심박 수, 혈압, 혈당 등을 실시간 센싱할 수 있는 다양한 입력 센서 기술 개발 					
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 향후 모바일, 인공지능 기반의 의료기기들은 소형화 및 휴대성이 극대화될 것으로 예상됨. 또한 삶의 질 향상에 대한 욕구가 증가함에 따라 자가진단 및 헬스케어에 대한 관심이 고조됨. ● 의학진단용 표시장치는 위와 같은 향후 트렌드에 핵심 부품이며 4차 산업혁명의 초연결 네트워크 기술 활용될 것으로 기대됨. 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 맞춤형 웨어러블 헬스케어 소자 ● 시장 실현 시기 : 2023년 이후 					
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 30억원/년 (90억원) 					

(6) 네트워크 활용한 고감도 스마트 진단센서 표시장치 기술

개발 개요							
● 고령화 사회에 적합한 스마트 진단 센서 기능이 내재된 표시장치 개발 ● 실시간 데이터 송·수신 가능한 지능형 디스플레이 기술 개발							
개발 목표 및 내용							
● 개발 목표 : 맞춤형 건강관리를 위한 고감도 스마트 진단 센서 표시장치 및 지능형 디스플레이 기술 개발 ● 개발 내용 - 피부 부착형 고감도 생체신호센서 표시장치 개발 - 네트워크를 활용한 긴급 상황 대응 가능한 IoT 내장 표시장치 개발							
4차 산업혁명과의 연관성	초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기							
● 목표시장 : 고령화 대응을 위한 스마트 헬스케어 기기 ● 시장 실현 시기 : 2030년 이후							
소요 기간 및 예산							
● 소요 기간 : 2020 ~ 2023 (3년) ● 소요 예산 : 20억원/년 (60억원)							

[나노센서/액추에이터]

1. 4차 산업혁명에서 나노센서/액추에이터의 기여

- ICT의 융합을 바탕으로 하는 4차 산업혁명의 하드웨어 플랫폼을 뒷받침하는 핵심부품으로 센서/액추에이터는 정보의 입출력 및 이를 보조하는 기능을 담당
- 4차 산업혁명 시대를 성공적으로 맞이하고 선도하기 위해서는 센서/액추에이터의 고성능화, 신기능/다기능화, 초소형화, 저전력화 등과 같은 기술 이슈를 해결해야 하는데 나노 및 나노융합 기술의 적용이 가장 유망한 대안으로 부각됨.
- 나노센서/액추에이터 기술을 적용할 경우 아래와 같은 각종 분야에서 4차 산업혁명에 기여할 수 있을 것으로 전망됨.
 - 다기능/저전력 환경센서 개발을 통하여 IoT 환경 모니터링 및 제어 관리 시스템의 보급 확산에 기여
 - 산업 로봇용 초소형/저가격 안전관리 센서 개발을 통하여 인더스트리 4.0으로 대표되는 스마트 공장의 구현에 기여
 - 신기능(제스처 인식, 고지향성 음성인식 등), 고성능(양방향 피드백, 다양한 환경에서의 고신뢰성 등), 저전력, 초소형 등의 장점을 갖는 첨단 UI 센서 개발을 통한 AI 음성비서, AR/VR 기기, 스마트 키오스크, 디지털 사이니지 등의 각종 시스템의 사용자 인터페이스 편리성 향상
 - 안전/보안, 헬스케어 등의 분야에 활용되는 신기능(분자 스캐너, 테라헤르츠 영상 등), 고성능(고감도, 초고속 등), 초소형, 유연·신축 등의 장점을 갖는 새로운 센서와 센서/액추에이터의 융복합 기기 개발을 통하여 안전하고 건강한 사회 구현에 기여
 - 신기능(마찰대전 에너지 하베스팅 등) 및 고성능(고에너지 밀도, 고효율/고속 충전 등) 에너지 생성/저장 액추에이터 개발을 통하여 신재생 에너지와 스마트 그리드의 보급 확산시킴으로써 친환경 에너지 사회 구현에 기여
- 나노센서/액추에이터는 4차 산업혁명 시대를 대비한 핵심부품으로 그 중요성이 크지만 관련 국내 산업은 취약한 편이므로 정부의 적극적 투자가 요구됨.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노센서/액추에이터 분야별 연관관계

사회 영역	관련기술 영역	나노센서/액추에이터										
		나노환경센서	나노바이오센서	나노오감센서	나노물리센서	나노유연·신축센서	나노에너지하베스터	나노전자센서	나노광액추에이터	나노바이오액추에이터	나노로봇액추에이터	
산업	IoT/인터넷	1	3	4	2	7	6	5	8	10	8	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 센서)
	로봇/자율기기	7	9	1	2	4	6	3	7	9	5	신기능 (초소형/저가격 로봇용 센서)
	빅데이터/알고리즘(AI)	4	3	1	2	5	5	5	5	5	5	신기능 (초소형/고성능 음성인식용 센서)
	클라우드 컴퓨팅											
	웨어러블/모바일 기기	6	5	3	2	1	7	4	8	10	9	신기능 (초고속/고감도 분자 스캐너), 고성능 (양방향 피드백 UI 센서)
	3D 프린팅(AM)											
	센서/액추에이터	2	4	3	1	5	7	5	9	9	7	신기능 (초고속/고감도 테라헤르츠 센서)
에너지/자원/환경	첨단소재	4	1	3	2	6	6	6	6	6	6	
	신재생에너지	4	5	5	3	5	1	2	5	5	5	대용량화 (고효율 태양전지)
	스마트그리드	4	5	5	2	5	3	1	5	5	5	초고속화 (고에너지밀도 이차전지)
	에너지 절약	4	5	5	3	5	1	2	5	5	5	대용량화 (고효율 태양전지)
	에너지 저장	4	5	5	3	5	2	1	5	5	5	대용량화 (고에너지밀도 이차전지)
	에너지 하베스팅/저장	4	8	6	3	5	1	2	10	9	7	대용량화 (고밀도 마찰대전 에너지 하베스터)
	자원 절약/재활용	2	4	3	1	5	5	5	5	5	5	저전력화 (초소형/저가격 분자 스캐너)
이동성	환경 모니터링											
	고용(직업)	1	3	2	4	5	6	6	6	6	6	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 모니터링 기기)
	운송/물류											
보건	자본(서비스)											
	맞춤의학											
	고령화 대응	6	1	5	3	4	7	8	9	2	9	신기능 (유연·신축, 센싱/자극 응복합 웨어러블 기기)
가정/개인	사회적 대응(전염병)	4	1	2	5	6	6	6	6	3	6	
	가전제품(생활가전)	2	4	3	1	5	6	6	9	9	8	신기능/저전력화 (제스처 인식 UI 센서)
	소비제품	5	3	4	1	2	5	5	5	5	5	신기능(유연·신축성 에너지 자립형 플렉서블 센서)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노센서/액추에이터 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노센서/액추에이터 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 환경센서	나노 물리센서	나노 바이오 센서	나노 오감센서	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 센서)
	로봇/자율기기	나노 오감센서	나노 물리센서	나노전지	나노 유연·신축 센서	신기능 (초소형/저가격 로봇용 센서)
	빅데이터/알고리즘(AI)	나노 오감센서	나노 물리센서	나노 바이오 센서	나노 환경센서	신기능 (초소형/고성능 음성인식용 센서)
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	나노 유연·신축 센서	나노 물리센서	나노 오감센서	나노전지	신기능 (초소형/저가격 문자 스캐너), 고성능 (양방향 피드백 UI 센서)
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액추에이터	나노 물리센서	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	신기능 (초고속/고감도 테라헤르츠 센서)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	대용량화 (고효율 태양전지)
	스마트그리드	나노전지	나노 물리센서	나노 에너지 하베스터	나노 환경센서	초고속화 (고에너지밀도 이차전지)
	에너지 절약	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	대용량화 (고효율 태양전지)
	에너지 저장	나노전지	나노 에너지 하베스터	나노 물리센서	나노 환경센서	대용량화 (고에너지밀도 이차전지)
	에너지 하베스팅/저장	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	대용량화 (고밀도 마찰대전 에너지 하베스터)
	자원 절약/재활용	나노 물리센서	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	저전력화 (초소형/저가격 문자 스캐너)
이동성	고용(직업)	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	나노 물리센서	저전력화 (저전력 다기능 복합환경 모니터링 기기)
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학					
	고령화 대응	나노 바이오 센서	나노 바이오 액추에이터	나노 물리센서	나노 유연·신축 센서	신기능 (유연·신축, 센싱 /자극 응복합 웨어러블 기기)
	사회적 대응(전염병)					
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노 물리센서	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	신기능/저전력화 (제스처 인식 UI 센서)
	소비제품	나노 물리센서	나노 유연·신축 센서	나노 바이오 센서	나노 오감센서	신기능(유연·신축성 에너지 자립형 플렉서블 센서)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노센서/액추에이터 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	나노센서/액추에이터 (우선순위)				개발대상 나노센서/액추에이터 기술 (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 환경센서	나노 물리센서	나노 바이오 센서	나노 오감센서	• 실내환경 모니터링용 나노·MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서
	로봇/자율기기	나노 오감센서	나노 물리센서	나노전지	나노 유연·신축 센서	• 협업 로봇용 압전 나노-변위 액추에이터 기반 MEMS형 초음파 근접센서
	빅데이터/알고리즘(AI)	나노 오감센서	나노 물리센서	나노 바이오 센서	나노 환경센서	• AI 음성비서용 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	나노 유연·신축 센서	나노 물리센서	나노 오감센서	나노전지	• Plug-In형 분자 스캐너용 나노·MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서 • AR/VR 기기용 양방향 피드백 UI 센서/액추에이터
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액추에이터					• 플라즈모닉 메타 소재·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 센서
	첨단소재					•
에너지/자원/환경	신재생에너지	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	• 대면적 유연 나노 구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자
	스마트그리드	나노전지	나노 물리센서	나노 에너지 하베스터	나노 환경센서	• 나노구조 제어 기반 고효율/고속 충전 이차전지
	에너지 절약	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	• 대면적 유연 나노 구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자
	에너지 저장	나노전지	나노 에너지 하베스터	나노 물리센서	나노 환경센서	• 나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지밀도 이차전지
	에너지 하베스팅/저장	나노 에너지 하베스터	나노전지	나노 물리센서	나노 환경센서	• 대면적 유연 나노 구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자 • 나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지밀도 이차전지
	자원 절약/재활용	나노 물리센서	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	• Plug-in형 분자 스캐너용 나노·MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	나노 물리센서	• 실내환경 모니터링용 나노·MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학					
	고령화 대응	나노 바이오 센서	나노 바이오 액추에이터	나노 물리센서	나노 유연·신축 센서	• 헬스케어 모니터링 센서 및 생체 자극 액추에이터 융복합 웨어러블 기기
	사회적 대응(전염병)					
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노 물리센서	나노 환경센서	나노 오감센서	나노 바이오 센서	• 제스처 인식 UI용 압전 MEMS형 초음파 ToF 센서 어레이
	소비제품	나노 물리센서	나노 유연·신축 센서	나노 바이오 센서	나노 오감센서	• 압전 나노복합체 기반 에너지 자립형 플렉서블 압력센서

5. 개발대상 나노센서/액추에이터 내용 요약

(1) 실내환경 모니터링용 나노·MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> ● IoT 실내환경 모니터링 기기 등에 활용되는 다기능/저전력 환경센서 ● 온도·습도·가스 등의 각종 환경 인자를 동시에 측정하는 저전력 복합센서 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 (TRL: [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계) <ul style="list-style-type: none"> - 저전력 온도·습도·가스 복합센서 모듈 기술 개발 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 고정밀 온도 감지 소재 및 소자 기술 - 고정밀/고속 습도 감지 소재 및 소자 기술 - 고정밀/고신뢰성 가스(CO_2, VOC) 감지 나노소재 및 MEMS 소자 기술 - 디지털 보정연산 복합 센싱 신호처리 ASIC 기술 								
초고속화		대용량화		저전력화	✓	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : IoT 실내환경 모니터링 기기, 스마트&그린 홈/빌딩 시스템, 가전기기 등에 사용되는 환경센서 시장 <ul style="list-style-type: none"> - 복합환경 센서는 기존의 단일센서보다 장착/운용 편리성이 우수하여 시장요구 높음. - 소비가전용 가스센서의 세계시장은 2015년 5백만 개에서 2020년 3억 5천만 개로 103%의 초고속 성장이 전망됨 (출처: Yole Development, 2016) ● 시장 실현 시기 : 2019년 초기시장 형성, 2022년부터 본격적 시장 성장 전망 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) ● 소요 예산 : 10억원/년 (40억원) 								

(2) 협업 로봇용 압전 나노-변위 액추에이터 기반 MEMS형 초음파 근접센서

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 협업 로봇(Cobot: Collaborative robot)에 부착하여 사람의 근접 상황에 따라 동작 여부/범위/속도를 조절하기 위한 안전관리용 초소형 근접센서 초음파를 출력시켜 사람/사물에 의한 반사파를 감지하여 근접 정도를 인식하는 초소형 센서 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 압전 MEMS형 초음파 근접센서 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 높은 압전상수 및 균일성을 갖는 압전 박막소재 기술 초음파 고출력 발생 및 고감도 감지 압전 MEMS 트랜스듀서 기술 압전 MEMS 트랜스듀서의 저전력 구동 및 고감도 감지 신호처리 ASIC 기술 압전 MEMS 트랜스듀서와 ASIC의 집적화를 포함하는 근접센서 모듈 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 인더스트리 4.0으로 대표되는 스마트 공장의 구현을 위해 사람과의 협업을 통해 생산성 향상이 가능한 협업 로봇의 안전관리 센서 개발 스마트 공장에 협업 로봇 설치 시 안전설비 비용 감소, 공간 배치 자유도 향상, 사람의 접근 자유도 향상 등에 기여 							
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 산업 로봇용 근접센서 시장 등 <ul style="list-style-type: none"> 산업 로봇용 센서의 세계시장은 2016년부터 연평균 8% 성장하여 2021년 38.6억불에 도달하고 센서 종류별로는 근접센서가 10%를 점유할 것으로 전망됨(출처: Technavio, 2017). 시장 실현 시기 : 2020년 초기시장 형성, 2025년부터 본격적 시장 성장 전망 							
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2019 ~ 2021 (5년) 소요 예산 : 12억원/년 (60억원) 							

(3) AI 음성비서용 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> 아마존의 에코(알렉사), 구글의 구글홈(구글 어시스턴트), 애플 홈팟(시리) 등의 AI 스피커(AI 음성비서)에 탑재되어 음성 인식률을 향상시키는 고성능 음향센서 주변 잡음 속에서 음성 인식률 향상을 위하여 사용자가 위치한 특정 방향의 소리만을 선택적으로 감지하는 초소형 음향센서 어레이 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계) <ul style="list-style-type: none"> 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 고신호잡음비 MEMS 음향센서 소자 기술 MEMS 음향센서 신호처리용 고신호잡음비 디지털 ASIC 기술 초소형/고감도/지향성 음향 패키지 기술 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이 모듈 기술 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> AI(인공지능) 시스템의 가장 유망한 UI(사용자 인터페이스)로 부각되는 음성인식의 정확도 향상을 위한 고성능 음향센서 개발 AI 시스템의 편리한 UI 개발을 통한 보급 확산에 기여 								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : MEMS 음향센서 시장 <ul style="list-style-type: none"> MEMS 음향센서의 세계시장은 연평균 11% 성장하여 2019년 13억불에 도달할 것으로 전망됨(Yole Development, 2016). 특히 AI 음성비서용 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이에는 고부가가치 제품으로 각광받을 것으로 예상됨. 시장 실현 시기 : 2019년 초기시장 형성, 2022년부터 본격적 시장 성장 전망 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) 소요 예산 : 12억원/년 (48억원) 								

(4) Plug-in형 문자스캐너용 나노·MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> 분자 스캐너는 다파장의 적외선 백색광을 시료 물질(고체/액체/기체)에 조사하고 반사되는 빛의 파장에 따른 강도를 측정하여 시료 물질의 화학적 분자구조를 분석하는 센서 시스템 최근 개발된 휴대형 문자 스캐너를 향후 스마트폰용 액세서리와 같은 plug-in형으로 발전시키기 위하여 나노/MEMS 융합기술을 통한 근적외선 분광센서의 초소형화/저가격화 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 초소형/저가격 근적외선 분광센서 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 저전압/고성능/저가격 All-Silicon MEMS 간섭계(interferometer) 소자 기술 고정밀 구동 및 저잡음 센싱 디지털 ASIC 기술 MEMS 간섭계, 근적외선 센서, 디지털 ASIC 일체화를 포함하는 분광센서 모듈 기술 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> 지능형 식품/약품/환경/제조공정/헬스 모니터링에 활용되는 스마트센서 시스템인 문자스캐너의 핵심부품인 분광센서 개발 초소형/저가격 문자 스캐너 보급 확산을 통한 건강하고 편리한 사회 구현에 기여 								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 적외선 문자 스캐너용 분광센서 시장 <ul style="list-style-type: none"> 적외선 문자 스캐너 세계시장은 2016년부터 연평균 6.5% 성장하여 2022년 12.6억불에 도달하고, 파장별로는 근적외선이 42%를 점유할 것으로 전망됨(출처: MarketsandMarkets, 2016). 분광센서 세계시장은 연평균 11% 성장하여 2022년 3.3억불에 도달할 것으로 전망됨(출처: tematys, 2016). 시장 실현 시기 : 2019년 초기시장 형성, 2022년부터 본격 시장 성장 전망 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) 소요 예산 : 10억원/년 (40억원) 								

(5) AR/VR용 양방향 피드백 UI 센서/액추에이터

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> 고품질 가상/증강 현실을 위한 오감 감지 및 피드백 구현 센서/액추에이터 원천 및 응용 기술 개발 나노복합소재 및 메타구조에 기반한 신축성, 고감도, 다기능 오감 센서 및 나노복합소재 기반 고출력/초소형 액추에이터 개발 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 오감을 현실적으로 구현하고, 가상공간의 활동, 현상, 변화를 사용자에게 피드백할 수 있는 나노복합소재 및 멀티스케일 구조 기반 다중 복합 액추에이터 어레이 개발 사용자의 환경/건강상태, 움직임, 감정 등을 정밀하게 감지할 수 있는 유/무기 나노복합소재 및 멀티스케일 구조 기반 고감도/고속 다중복합 웨어러블 센서 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노복합소재 및 멀티스케일 구조 기반 고출력/초소형/저전력 유연/신축 액추에이터의 설계, 제작 및 응용 기술 온도, 냄새, 촉감, 힘 등을 동시에 구현할 수 있는 유연/신축성 다중감각 디스플레이 메커니즘 연구 인체 혹은 의복 착용/부착형 유/무기 나노 복합소재 및 멀티스케일 구조 기반 멀티모달(인장, 전단, 굽힘, 접촉력 등) 센서 어레이 기술 감정 및 심리 감지를 위한 피부 온도/땀 감지 센서 및 EEG, ECG, EMG 센서 퓨전 기술 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> 사용자의 오감 감지 및 가상 물리시스템(cyber physical system)과의 고품질 양방향 인터랙션을 가능케하여 게임, 영화, 교육, 소셜미디어, 의료, 국방, 커머스 등 폭넓은 분야에 적용 가능함 드론, 로봇, 생산 시스템 등의 원격제어 및 감각 증강 구현을 통한 안전하고 편리한 작업 환경을 제공할 수 있음 								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장: 엔터테인먼트, 헬스케어, 교육, 국방, 물류 시스템 등 다양한 분야 <ul style="list-style-type: none"> 이미 VR/AR 관련 기기들이 시장에 다수 출시되어 있으나 대부분 시각, 청각 구현에 머물러 있음. 오감 구현 및 양방향 피드백 UI 구현을 통해 새로운 시장 개척 가능 시장 실현 시기: 3년 이내 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) 소요 예산 : 10억원/년 (40억원) 								

(6) 플라즈모닉 메타 소재·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 영상센서

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 정의: 테라헤르츠파는 적외선보다 낮은 에너지로 비이온화 특성을 가지며 전파의 투과성과 광파의 직진성을 모두 가지고 있음. 신규 나노소재 및 메타구조를 적용하여 테라헤르츠파의 국소 집속 및 필드 증폭을 통해 테라헤르츠파와 물질과의 상호작용을 극대화한 고민감도/고성능/초소형 영상 센서를 개발하고자 함. 용도: 생체, 플라스틱, 종이, 의류 등 대부분의 물질에 큰 손상 없이 내부를 투시할 수 있어 비접촉 방식으로 스마트 의료/헬스케어, 보안/안전, 스마트 공장 등의 4차 산업혁명 분야에서 다양한 활용이 가능하며 시장 파급력이 매우 클 것으로 기대함. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 신규 나노소재 및 메타구조가 적용된 볼로미터 기반의 테라헤르츠 영상센서 개발을 통해 영상센서의 성능을 획기적으로 개선하고 공정단순화/저가격화/초소형화 기술을 확보 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 신규 나노소재 및 메타물질 기반의 고감도 흡수 소재 및 공정 기술 CMOS 공정 기반 마이크로 볼로미터 방식의 테라헤르츠파 영상센서 소자 기술 나노패터닝 공정 적용을 통한 수율 및 특성 균일도 향상 설계/공정 기술 초소형 테라헤르츠 영상센서 모듈 제작 및 특성평가 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 테라헤르츠 영상센서의 핵심원천기술 확보를 통한 첨단센서 기술경쟁력 확보 빅데이터, 인공지능, 클라우드, 나노 신소재 산업 등과 융합된 고부가가치 기술 개발을 통해 4차 산업혁명 시대의 필요한 융합기술을 확보할 수 있음. 							
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 보안/안전 산업, 스마트 의료/헬스케어, 제조공정 산업, 국방 등의 분야 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> 테라헤르츠파 영상응용과 관련한 세계시장은 현재 연간 39백만불 정도로 추산됨. 보안 및 헬스케어 분야는 2019년 1.7백만불에서 연평균 25% 성장하여 2024년 5.2백만불에 도달할 것으로 전망됨. 이후 제조공정 및 국방산업 분야로의 확대를 통해 시장 규모가 급속히 확대될 것으로 예상됨. 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018~2021 (4년) <ul style="list-style-type: none"> 1단계 : 메타구조 기반 테라헤르츠 영상센서 소재/소자/공정 기술 확보 (2018~2019, 2년) 2단계 : 테라헤르츠 영상센서 모듈화 및 평가기술 확보 (2020~2021, 2년) 소요 예산 : 10억원/년 (총 40억원) 							

(7) 대면적 유연 나노구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 정의: 기계적 흔들림에 의한 미소 변위부터 인접해 있는 두 소재의 접촉/분리 혹은 스침 등으로부터 유도되는 마찰대전으로 전기 에너지를 발생시키는 미소 전력 발전기 용도: 동적 장치의 각종 센서 노드, 웨어러블 기기, 모바일 장치 등에 적용 가능하며 항상성 향상, 유지보수 비용 절감, 전력효율의 극대화를 통해 IoT, 웨어러블, 스마트 의료, 스마트 그리드 등 4차 산업혁명의 다양한 분야에서 활용 가능 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계) <ul style="list-style-type: none"> 대면적 나노구조화 공정에 최적화된 마찰대전 소재의 발굴을 통해 나노발전기의 에너지 변환효율을 극대화하고 R2R 기반의 대면적 구조화 공정 기술 개발을 통해 저가격화 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 대면적 나노구조화 공정에 최적화된 마찰대전 소재 기술 고밀도 에너지 포집을 위한 마찰대전 나노발전기 소자 기술 R2R 기반의 고균일도 유연 나노구조화 공정 기술 유연 하이브리드 집적 기반의 마찰대전 나노발전기 모듈 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> (산업) 에너지 하베스팅 소자를 이용한 센서 노드 및 모바일 장치의 자가 유지를 통한 항상성 및 신뢰성 향상으로 사물인터넷, 스마트 그리드 등 분야의 기술 경쟁력 제고 (에너지) 특히 신재생 에너지를 이용한 전력 효율의 극대화를 통해 탈원전 및 범지구적 에너지난 해소의 선도적 역할 및 지속가능한 발전에 기여 (보건, 가정) 기존 이차전지의 불편함을 해소하여 웨어러블 기기의 무자각·무인지화를 통해 스마트 의료, PoC 및 노령인구의 원격 의료 등 융합기술 확보 가능 							
초고속화	대용량화	✓	저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 국방/우주, 제조업, 자동차, 환경 모니터링, 헬스케어, 사물인터넷, 모바일 등 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> 에너지 하베스팅 시장은 2017년 기준 약 150만불로 추산되며, 소형가전, 국방/우주 및 자가유지 센서 노드 중심으로 시장을 형성하고 있음. 에너지 하베스팅 시장은 열전 및 압전 에너지 하베스팅 장치가 시장을 선도하고 있으나 마찰대전 에너지 하베스팅이 성공적으로 개발될 경우 소형가전을 비롯한 다양한 분야로 확대를 통해 2027년 40억불의 시장규모가 예상됨(IDTechEx, 2017). 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) <ul style="list-style-type: none"> 1단계 : 마찰대전 에너지 수확 소자의 소재/공정 기술 개발 (2018~2019, 2년) 2단계 : R2R기반 대면적 나노구조화 공정 및 마찰대전 에너지 하베스팅 모듈 기술 개발 (2020~2021, 2년) 소요 예산 : 10억원/년 (40억원) 							

(8) 나노구조 제어 기반 고효율/고속 충전 이차전지

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 현재 에너지 저장 한계에 이른 모바일 IT 및 전기자동차용 배터리의 에너지 밀도를 극복할 수 있는 대안이 고속 충전기술의 확보임. 배터리로 100% 전기를 사용하는 FEV(Full Electric Vehicle)의 보급이 전기자동차용 이차전지 기술의 궁극적인 목표임. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 고속충전에 적합한 나노구조 기반 전극소재 기술 개발 집전체 구조화 및 극판 제조 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 리튬 이동도 향상을 위한 전극 구조체 설계 기술 전극표면에 나노구조막 도입을 통한 전자전도도 및 이온전도도 동시제어 기술 전해액 적합성 향상 및 기능성 나노첨가제 기술 집전체 구조의 입체화 및 전자전도성 향상 기술 고속충전용 이차전지 설계 및 제조 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성	✓	대용량화		저전력화		신기능	기타
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 모바일 IT용 소형 리튬 이차전지 시장, 전기자동차(EV) 및 에너지 저장시스템(ESS)용 중대형 리튬 이차전지 시장 <ul style="list-style-type: none"> 소형 리튬 이차전지 시장은 2016년 12조원에서 2025년 20조원로 성장 전망 중대형 리튬 이차전지 시장은 2016년 3조원에서 2030년 50조원 규모로 성장 예상 (출처: B3 2016, Solar&Energy 2014, 및 한국전지산업협회) 시장 실현 시기 : 2020년 초기시장 형성, 2025년부터 본격적 시장성장 전망 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 12억원/년 (60억원) 							

(9) 나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지 밀도 이차전지

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 모바일 IT 및 전기자동차용 배터리의 에너지 저장 한계를 극복할 수 있는 새로운 에너지 저장용 전극 기술 기존 탄소계 음극의 저장 한계를 극복할 수 있는 실리콘계 음극소재의 실용화 기술 실리콘의 부피 팽창 및 비가역 한계 극복을 위한 나노화 및 제어 기술 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 나노구조 기반 실리콘 음극소재 기술 개발 기능성 나노결착재 소재 및 음극판 제조 기술 개발 실리콘 음극에 적합한 전해액 및 나노첨가제 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노기술을 접목한 실리콘계 소재의 기능화 기술 기능화된 실리콘계 소재에 적합한 결착재 및 집전구조 설계 기술 음극슬러리 코팅 및 건조 기술 SEI 제어 및 비가역 용량 억제를 위한 전해액 및 나노첨가제 제조 기술 고에너지 밀도 이차전지 설계 및 제조 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 스마트 그리드, 마이크로 그리드, 전기자동차용 고속충전용 전원 개발 IoT 기반 센싱 기술에 적합한 다양한 소자용 초소형 초전력 전원 개발 							
초고속화	대용량화	✓	저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 모바일 IT용 소형 리튬 이차전지 시장, 전기자동차(EV) 및 에너지 저장시스템(ESS)용 중대형 리튬 이차전지 시장 <ul style="list-style-type: none"> 소형 리튬 이차전지 시장은 2016년 12조원에서 2025년 20조원으로 성장 전망 중대형 리튬 이차전지 시장은 2016년 3조원에서 2030년 50조원 규모로 성장 예상 (출처: B3 2016, Solar&Energy 2014, 및 한국전지산업협회) 시장 실현 시기 : 2020년 초기시장 형성, 2025년부터 본격적 시장성장 전망 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) 소요 예산 : 12억원/년 (48억원) 							

(10) 헬스케어 모니터링 센서 및 생체 자극 액추에이터 융복합 웨어러블 기기

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 나노복합소재 및 마이크로/나노구조 기반 인체 착용형 다중복합 물리/화학 센서, 이를 이용한 고품질 건강 모니터링 소자 구현, 인체의 전기/기계적 자극을 통한 치료 장치가 집적된 융복합 웨어러블 헬스케어 기기 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) <ul style="list-style-type: none"> 나노복합소재 및 마이크로/나노구조를 이용한 신축/유연성 물리/화학/바이오센서 어레이 개발 및 이를 바탕으로 한 착용형 헬스케어 모니터링 시스템 구현 나노소재 기반 유연/신축성 전극 어레이를 이용한 패치형 생체전기 자극 기구 및 나노압전 메커니즘을 이용한 기계적 자극 기구 등의 웨어러블 생체자극 치료 시스템 구현 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노복합소재 기반 인체 부착형/의류 집적형 물리센서(관절각도, 맥박, 심박, 피부의 미세한 떨림, 자세, 발바닥 압력 분포 등) 기술 나노복합소재 기반 섬유/패치형태 체온, 땀, 타액, 소변 성분 분석 바이오센서 기술 금속산화물 나노소재 센서 어레이 기반 초소형/초저전력 웨어러블 날숨가스 분석 기술 나노소재 기반 신축/유연성 전극 어레이 기반 생체 전기 자극 패치 기술 나노압전소재 기반 피부 기계적 자극 패치 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 나노바이오 센서, 웨어러블, 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능에 기반한 차세대 헬스케어 및 ICT 기술의 융합을 통해 4차 산업혁명의 핵심 응용분야 중 하나인 디지털 헬스케어 구현 							
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 디지털 헬스케어 시장 <ul style="list-style-type: none"> 세계 의료기기 시장은 2016년 기준 3300불로, ICT, 웨어러블, 사물인터넷 기반 차세대 디지털 헬스케어 시장을 개척할 수 있음 시장 실현 시기 : 5년 이내 							
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 10억원/년 (50억원) 							

(11) 제스처 인식 UI용 압전 MEMS형 초음파 ToF 센서 어레이

개발 개요								
● 스마트 키오스크, 디지털 사이니지, 소비가전 제품, 자동차 등에 장착되어 사용자의 제스처를 인식하여 인터페이스하는 센서 ● 기존의 전자기장, 적외선 기반 제스처 인식 센서 보다 저전력, 다양한 동작 환경에서의 고신뢰성 등의 장점이 있는 초음파 기반 제스처 인식 센서								
개발 목표 및 내용								
● 개발 목표 (TRL: [시작] 3단계 ~ [종료] 6단계) - 제스처 인식 UI용 압전 MEMS형 초음파 ToF(Time of Flight) 센서 어레이 개발 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) - 높은 압전상수 및 균일성을 갖는 압전 박막소재 기술 - 초음파 고출력 발생 및 고감도 감지 압전 MEMS 트랜스듀서 기술 - 압전 MEMS 트랜스듀서의 저전력 구동 및 고감도 감지 신호처리 ASIC 기술 - 압전 MEMS 트랜스듀서와 ASIC의 집적화를 포함하는 초음파 ToF 센서 기술 - 초음파 ToF 센서 어레이 기반 제스처 인식 센서 모듈 기술 - 지능형 제스처 인식 알고리즘 및 사용자 인터페이스 기술								
4차 산업혁명과의 연관성								
● 터치스크린의 불편함, 음성인식의 어려움 등 기존 기술의 단점을 극복할 수 있는 새로운 제스처 인식 UI용 센서 개발 ● 스마트 키오스크, 디지털 사이니지, 소비가전 제품, 자동차 등에서 보다 편리한 사용자 인터페이스 제공								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
● 목표시장 : 터치리스 사용자 인터페이스 센서 시장 - 터치리스 사용자 인터페이스 센서의 세계시장은 2016년부터 연평균 17% 성장하여 2021년 440억불에 도달할 것으로 전망됨(출처: Touch Display Research, 2015). - 초음파 기반 터치리스 UI 센서는 최근 부각된 기술로 주목받고 있음. ● 시장 실현 시기 : 2020년 초기시장 형성, 2025년부터 본격 시장 성장 전망								
소요 기간 및 예산								
● 소요 기간 : 2019 ~ 2023 (5년) ● 소요 예산 : 15억원/년 (75억원)								

(12) 압전 나노복합체 기반 에너지 자립형 플렉서블 압력센서

개발 개요								
<ul style="list-style-type: none"> 스마트 신발, 웨어러블 헬스케어 기기 등에 부착되어 압전 에너지 하베스팅을 통하여 스스로 에너지를 공급하면서 압력을 동시에 감지할 수 있는 플렉서블 센서 압전 나노복합체를 이용하여 플렉서블 특성을 유지하면서 에너지 하베스팅 효율을 크게 향상시킨 에너지 자립형 플렉서블 압력센서 								
개발 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 (TRL: [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계) <ul style="list-style-type: none"> 에너지 자립형 플렉서블 압력센서 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 높은 압전상수 및 균일도와 저가격 특징의 압전 복합체 소재 기술 고효율 에너지 하베스팅 및 고감도 압력 감지 플렉서블 압전 소자 기술 저전력 에너지 관리 및 고감도 감지 신호처리 ASIC 기술 플렉서블 압전 소자의 어레이화 및 ASCI과의 연동을 포함하는 센서 모듈 기술 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> 스마트 신발 등에 활용되는 에너지 자립형 플렉서블 압력센서 개발 신기능 센서를 적용한 스마트 소비제품, 웨어러블 헬스케어의 보급 확산을 통하여 건강하고 편리한 사회 구현에 기여 								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 소비가전, 의료/헬스케어, 자동차 등에 활용되는 압력센서 시장 <ul style="list-style-type: none"> 압력센서의 세계시장은 2014년부터 연평균 5.9% 성장하여 2020년 94.8억불에 도달할 것으로 전망됨(출처: MarketsandMarkets, 2015). 2014년 기준으로 압전형 압력센서가 45%로 가장 비중이 높음. 압전 기반 에너지 자립형 플렉서블 압력센서가 향후 고부가가치 제품으로 부각될 것으로 예상됨. 시장 실현 시기 : 2020년 초기시장 형성, 2025년부터 본격적 시장성장 전망 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (4년) 소요 예산 : 10억원/년 (40억원) 								

[나노바이오]

1. 4차 산업혁명에서 나노바이오 분야의 기여

- 4차 산업혁명은 기존의 3차 산업혁명을 기반으로 하는 물리적, 생물학적, 디지털 산업세계의 경계가 없어지고 초고속, 초고용량, 초저전력, 고감도, 신기능, 친환경(지속가능) 등의 여러 분야의 기술들이 융합되는 새로운 미래기술 혁신을 의미함.
- 나노바이오 기술은, 첨단 바이오 기술과 나노소재 및 센서 등의 나노기술을 융합함으로써 4차 산업혁명의 신산업 분야 창출에 기여할 대표적 기술로 부상할 것으로 기대됨.
- 특히 나노바이오 분야는 4차 산업혁명의 핵심이라 할 수 있는 인공지능, 빅데이터, IoT, 로봇 등의 분야에 초고속 멀티 환경감시 센서, 생체신호 센서, 식품안전 센서 및 분석기기를 비롯하여 생체모사 소재, 인공생체 소재 등을 제공하여 4차 산업혁명의 촉진에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨.
- 아래와 같은 나노바이오 분야의 대표적인 기술들을 이용하여 4차 산업혁명에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.
 - 바이오 유해인자 감시용 고감도, 초고속, 신기능 나노바이오센서 기술 개발을 통하여 인공지능, IoT, 로봇 기술과의 융합을 통한 4차 산업혁명에 기여
 - 지문, 음성, 얼굴표정, 홍채 인식 등의 얼굴 인식 기술과 뇌파 및 근전도 등의 생체신호 인지 기술들을 이용한 감성 인식 기술 개발 및 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술 등을 통하여 저전력, 초소형화, 고감도의 웨어러블 IoT 및 로봇 기술 발전에 기여
 - 식품 부패 또는 작물 재배 시 생성되는 유해 화학분자의 검출 및 문자감응 등을 초고속, 실시간, 광학신호 감지 기술을 이용하여 식품 포장지의 스마트 나노레이블 기술 및 기능성 인조피부 기술 등을 통하여 인공지능을 위한 자료 및 빅데이터의 제공, IoT와의 연계 기술 개발

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노바이오 분야별 연관관계

사회 영역	관련기술 영역	나노바이오										
		환경감시용 나노바이오센서	생체신호 인자기술	생체모사기술	인공생체소재	정밀 나노바이오분석기	농수축산식품용 나노바이오센서	식품 및 농수축산용 나노바이오센서	화장품용 나노기술	항균용 나노소재		
산업	IoT/인터넷	1	2	6	9	5	3	9	4	9		신기능 (고감도화, 유해인자/생체신호 감지)
	로봇/자율기기	2	1	4	3	5	6	9	9	9		신기능 (고감도 센서)
	빅데이터/알고리즘(AI)	1	3	9	9	2	4	9	5	9		대용량화 (고밀도)
	클라우드 컴퓨팅											
	웨어러블/모바일 기기	2	1	8	7	5	6	9	3	4		신기능 (웨어러블 IoT)
	3D 프린팅(AM)	9	9	2	1	9	9	3	5	4		신기능 (생체친화나노소재)
	센서/액튜에이터	1	2	9	9	9	3	9	9	9		신기능 (유해인자/생체신호 감지)
	첨단소재	9	9	2	1	9	9	3	4	5		신기능 (탈부착나노소재)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지											
	스마트그리드											
	에너지 절약											
	에너지 저장											
	에너지 하베스팅/저장											
	자원 절약/재활용	9	9	2	3	9	9	1	9	9		신기능 (고효율)
	환경 모니터링	9	9	3	4	9	1	2	9	9		신기능 (현장진단)
이동성	고용(직업)											
	운송/물류	2	9	9	9	5	4	1	6	3		신기능 (나노 레이블)
	자본(서비스)											
보건	맞춤의학											
	고령화 대응	3	1	8	9	5	7	6	2	4		신기능 (고감도)
	사회적 대응(전염병)	2	5	9	9	3	4	6	9	1		신기능 (고감도)
가정/개인	가전제품(생활가전)	3	7	9	9	4	6	5	2	1		신기능 (초고속)
	소비제품	5	6	9	9	9	4	3	1	2		신기능 (IoT)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노바이오 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노바이오 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	환경감시용 나노바이오 센서	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서	화장품용 나노기술	신기능 (고감도화, 유해인자/생체신호 감지)
	로봇/자율기기	생체신호 인지기술	환경감시용 나노바이오 센서	인공 생체소재	생체 모사기술	신기능 (고감도 센서)
	빅 데이터/알고리즘(AI)	환경감시용 나노바이오 센서	정밀 나노바이오 분석기기	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서	대용량화 (고밀도)
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	생체신호 인지기술	환경감시용 나노바이오 센서	화장품용 나노기술	항균용 나노소재	신기능 (웨어러블 IoT)
	3D 프린팅(AM)	인공 생체소재	생체 모사기술	식품 및 농수축산용 나노소재	항균용 나노소재	신기능 (생체친화 나노소재)
	센서/액튜에이터	환경감시용 나노바이오 센서	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서		신기능 (유해인자/생체신호 감지)
	첨단소재	인공 생체소재	생체 모사기술	식품 및 농수축산용 나노소재	화장품용 나노기술	신기능 (탈부착 나노소재)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용	식품 및 농수축산용 나노소재	생체 모사기술	인공 생체소재		신기능 (고효율)
	환경 모니터링	농수축산 식품용 나노바이오 센서	식품 및 농수축산용 나노소재	생체 모사기술	인공 생체소재	신기능 (현장진단)
이동성	고용(직업)					
	운송/물류	식품 및 농수축산용 나노소재	환경감시용 나노바이오 센서	항균용 나노소재	농수축산 식품용 나노바이오 센서	신기능 (나노 레이블)
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학					
	고령화 대응	생체신호 인지기술	화장품용 나노기술	환경감시용 나노바이오 센서	항균용 나노소재	신기능 (고감도)
	사회적 대응(전염병)	항균용 나노소재	환경감시용 나노바이오 센서	정밀 나노바이오 분석기기	농수축산 식품용 나노바이오 센서	신기능 (고감도)
가정/개인	가전제품(생활가전)	항균용 나노소재	화장품용 나노기술	환경감시용 나노바이오 센서	정밀 나노바이오 분석기기	신기능 (초고속)
	소비제품	화장품용 나노기술	항균용 나노소재	식품 및 농수축산용 나노소재	농수축산 식품용 나노바이오 센서	신기능 (IoT)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노바이오 기술 (예시)

사회 영역	관련기술 영역	나노바이오 (우선순위)				개발대상 나노바이오 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	환경감시용 나노바이오 센서	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서	화장품용 나노기술	<ul style="list-style-type: none"> • 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 연구 • 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서 • IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재
	로봇/자율기기	생체신호 인지기술	환경감시용 나노바이오 센서	인공 생체소재	생체 모사기술	<ul style="list-style-type: none"> • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 • 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 • 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재 • 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술
	빅데이터/알고리즘(AI)	환경감시용 나노바이오 센서	정밀 나노바이오 분석기기	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서	<ul style="list-style-type: none"> • 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 • 나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기 • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 • 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서
	클라우드 컴퓨팅					•
	웨어러블/모바일 기기	생체신호 인지기술	환경감시용 나노바이오 센서	화장품용 나노기술	항균용 나노소재	<ul style="list-style-type: none"> • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 • 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 • IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재 • 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술
	3D 프린팅(AM)	인공 생체소재	생체 모사기술	식품 및 농수축산용 나노소재	항균용 나노소재	<ul style="list-style-type: none"> • 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재 • 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술 • 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 • 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술
	센서/액튜에이터	환경감시용 나노바이오 센서	생체신호 인지기술	농수축산 식품용 나노바이오 센서		<ul style="list-style-type: none"> • 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 • 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술 • 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서
	첨단소재	인공 생체소재	생체 모사기술	식품 및 농수축산용 나노소재	화장품용 나노기술	<ul style="list-style-type: none"> • 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재 • 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술 • 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 • IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재
에너지/자원/환경	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
에너지/자원/환경	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용	식품 및 농수축산용 나노소재	생체 모사기술	인공 생체소재		<ul style="list-style-type: none"> • 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 • 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 • 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재
	환경 모니터링	농수축산 식품용 나노바이오 센서	식품 및 농수축산용 나노소재	생체 모사기술	인공 생체소재	<ul style="list-style-type: none"> • 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서 • 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 • 생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술

					<ul style="list-style-type: none"> 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재
이동성	고용(직업)				
	운송/물류	식품 및 농수축산용 나노소재	환경감시용 나노바이오 센서	항균용 나노소재	<ul style="list-style-type: none"> 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서
	자본(서비스)				
보건	맞춤의학				
	고령화 대응	생체신호 인지기술	화장품용 나노기술	환경감시용 나노바이오 센서	<ul style="list-style-type: none"> 생체신호 인지 기술을 이용한 감성인식 기술 IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술
	사회적 대응(전염병)	항균용 나노소재	환경감시용 나노바이오 센서	정밀 나노바이오 분석기기	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서
가정/개인	가전제품(생활가전)	항균용 나노소재	화장품용 나노기술	환경감시용 나노바이오 센서	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서 나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기
	소비제품	화장품용 나노기술	항균용 나노소재	식품 및 농수축산용 나노소재	<ul style="list-style-type: none"> IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서

5. 개발대상 나노바이오 내용 요약

(1) 생체신호 인지 기술을 이용한 감성 인식 기술

개발 개요									
● 생체신호(음성, 얼굴표정 및 기타 생체신호) 인지 기술을 이용한 감성 인식 연구									
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 : 음성, 얼굴표정, 뇌파, 근전도, 피부 전기저항 등을 통해 획득된 복합적인 신호를 획득하고 이를 빅데이터 분석, 인공지능 기술 및 인지 심리학과 융합하여 사용자의 감성을 실시간으로 인식할 수 있는 기술 개발 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 비접촉식 (음성, 영상) 또는 웨어러블 형태의 생체인지 기술의 감성 인식 응용 - IoT 기술을 이용한 생체 인식 신호의 송수신 및 보안 기술 개발 - 측정된 생체 신호와 실제 감성과의 연계를 위한 인지심리학 기반의 빅데이터 분석 - 인공지능(AI)을 통한 감성 인식 훈련 및 인식 고도화 								
4차 산업혁명과의 연관성									
<ul style="list-style-type: none"> ● 흥체, 지문, 얼굴인식과 같은 기본적인 생체 인식 기술은 이미 스마트폰, 공항 등에서 널리 활용될 정도로 고도화된 상태이나 이를 소형화/저전력/초고속으로 구현하여 감성 인식 기술을 적용하기 위해서는 획득된 신호를 실제 감성과 연계할 수 있는 인지심리학, 빅데이터 분석 기술과 더불어 인공지능을 통해 감성인식 데이터를 훈련하여 감성 인식을 고도화시킬 수 있는 융복합 연구 필요 ● 얼굴 인식과 더불어 뇌파, 근전도, 피부전기저항과 같은 감성과 직접적 연관이 있는 생체 데이터의 경우 IoT 기술과 접목된 패치형태의 웨어러블 시스템으로 개발 									
초고속화	✓	대용량화		저전력화	✓	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기									
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 생체인지 기술과 더불어 감성인식 기술은 감성 맞춤형 제품과 서비스/문화콘텐츠 산업 즉, 방송, 광고 및 미디어, 이더닝, 게임, 공공안전, 병원, 심리 및 정신상담 등 그 범위 및 파급효과가 막대함. <ul style="list-style-type: none"> - 세계 생체인식 시장은 2015년 20억 달러에서 25.3%의 연평균 성장률을 보여 2024년 149억 달러에 달하고 향후 10년간 누적 수익 678억 달러에 이를 것으로 전망됨. - 감성 ICT 융합기의 경우 2015년 9,000억 달러에서 연평균 10%의 높은 성장률을 지속해 2020년에는 1조 4,000억 달러 시장을 형성할 것으로 기대됨. ● 시장 실현 시기 : 생체인식 시장과 더불어 감성인식 기술이 성숙될 시기는 2020년 이후로 봄. 									
소요 기간 및 예산									
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 15억원/년 (45억원) 									

(2) 생체모사 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 현재 동물의 혈액이나 소변/분변과 같은 체액을 활용한 질병의 진단은 대부분 휴대가 불가능한 측정 장비를 통해 이루어지기 때문에 고립된 환경이 절대적으로 필요한 고위험군 전염성 질병/급성 질환을 현장에서 진단하고 관리할 수 있는 휴대용 바이오센서 기술 개발이 시급함. 고위험군 질병의 정확한 진단 및 관리를 위해서는 장소와 상관없이 소량의 시료를 이용하여 다종 바이오마커를 시간별로 검출할 수 있는 휴대용 다중 바이오 센싱 기술 및 실시간 데이터 전송을 통한 빅데이터/인공지능 분석기술이 결합된 새로운 관리 시스템 기술 개발이 필요함. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 소량의 시료를 이용하여 다종 바이오마커 검출이 가능한 휴대용 무선 다중검지 바이오센서 기술 및 빅데이터/인공지능 분석을 통한 실시간 동물 질병 관리 시스템 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 생체모방 표면 기반 생체시료 및 바이오마커 전처리 기술 개발 - 생체시료 내 고위험성 병원균 및 질병 관련 바이오마커 조합에 대한 신속 분석 기술 개발 (표지인자 분포 및 분석을 통한 질병 종류, 진행 양상 파악) - 다중 질병검지 결과의 실시간 무선 전송 기술 및 인공지능/빅데이터 응용 기술 개발 (데이터 유효성, 질병 연관성, 진단 정확도 향상) 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 현재의 동물 질병 진단 방식은 불필요하게 소요되는 시간이 길고 고위험군 전염성 질환의 발생 시 질병 확산의 위험성이 존재함. 무선 운용의 휴대 가능한 다중 검지 바이오센서 기술 개발은 현장 중심의 즉각 검지와 관리가 가능하고 무선 데이터 전송을 통한 스마트 기기와의 연동을 통하여 실시간 데이터 수집 및 빅데이터 구축에 기여함. 조기 진단 및 대응을 위한 빅데이터 기술과 머신러닝, 인공지능 기술 및 산업 분야를 창출함. 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 검출기시장/휴대용 바이오 측정기기 시장 실현 시기 : 기존 질병진단키트는 검지할 수 있는 질병이 제한적이며 통신기능이 없어 데이터베이스를 구축하기 어려움. 많은 연구진들이 다중 검지시스템을 개발하고 있어 시장이 빠르게 형성되고 지속적인 성장이 가능할 것으로 예상됨. 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2023 (5년) 소요 예산 : 5억원/년 (25억원) 						

(3) 식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재

개발 개요									
<ul style="list-style-type: none"> 식품 부패 시 생성되는 유해 화학분자 검출 또는 부패 유발 환경을 경고 가능한 인체 무해, 문자감응 나노소재 개발 개발된 나노레이블 소재를 활용한 광학신호 기반 고감도, 초고속, 실시간 센싱 기법 개발 									
개발 목표 및 내용									
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 식품 부패 시 생성되는 유해 화학분자(예: 미생물 대사과정에서 나오는 문자 등) 또는 부패 유발 환경(예: 습도, 온도, 산소 등)을 고감도로 센싱 가능한 문자감응 스마트 나노레이블 소재의 개발 개발된 스마트 나노레이블 소재 기반 유해 화학분자 및 유발 환경의 고감도, 실시간 검출 기법 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 식품 부패 관련 유해 화학분자 및 환경에 감응하는 인체에 무해한 고감도 나노레이블 소재 개발 식품 포장지에 내장(또는 접합) 가능한 나노레이블소재 필름 디자인 및 구현 개발된 나노레이블 소재의 최적화 및 고감도, 초고속, 실시간 센싱 기법 개발 (가령, 필름 색변화 또는 분광신호 수집 등을 활용) 									
4차 산업혁명과의 연관성									
<ul style="list-style-type: none"> 스마트 나노레이블 소재 개발을 통해 인공지능 센서 기술의 개발에 활용함. 분자감응 스마트 나노레이블 소재를 공정단가가 낮은 3D 프린팅 기법 등을 활용하여 식품 포장재에 내장 또는 접합하여 정보추적 수단의 대량 생산 개발된 스마트 나노레이블 소재는 식품의 부패 및 부패 유발 환경을 확인 가능한 색변화 또는 분광신호를 유발하여 사람이(유통업자 또는 소비자) 육안으로 식별하거나 로봇이 바코드를 인식하듯이 분광신호를 수집하여 부패정도를 식별 가능하도록 개발 가능함. 									
초고속화	✓	대용량화		저전력화		신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기									
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 국내/외 식품 포장재 시장 시장 실현 시기 : 연구개발 시작 후 6년 이내 (2024년 이내) 									
소요 기간 및 예산									
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/3년 (15억원) 									

(4) 작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서

개발 개요					
<ul style="list-style-type: none"> ● 농약과 같은 저분자 유해화학물질들은 적은 양으로도 심각한 독성을 나타내기 때문에 이들의 재배 환경에서의 간편하고 정확한 진단 및 유해성 분석은 매우 중요함. ● 본 과제를 통해, 작물 재배환경에서의 잔류 유기농약 검출을 위한 진단 리셉터를 발굴하고 이를 이용한 고감도 휴대용 나노바이오센서 및 그 시작품을 개발하며 산출된 위해 정보의 스마트폰 기반 농작물 품질정보 제공시스템을 개발함. 					
개발 목표 및 내용					
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 작물 재배에 잔류하는 유기농약 검출을 위한 바이오리셉터 개발 (5종 이상 농약 대상) - 잔류 유기농약에 대한 현장·다중 분석용 고감도 정성·정량분석 광학 나노바이오센서 칩 (스트립) 개발 (10 ppb 검출 한계) - 잔류 유기농약 검출을 위한 고감도 분광 광학 나노바이오센서 시스템 개발 - 핵심 검출 제품 및 부품들의 양산 기술 개발 - IoT 기술 기반 원거리 통신기술 탑재 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> (1) 작물 재배환경에서의 잔류 유기농약 (유기인계, 카바메이트계, 특이농약 등) 검출용 리셉터 발굴 <ul style="list-style-type: none"> - 잔류농약 인식용 바이오리셉터 발굴 - 잔류 유기농약 인식용 리셉터의 나노입자 도입을 통한 민감도 향상 및 다중인식 기술 개발 (2) 고감도 잔류농약 검출을 위한 휴대용 나노바이오센서 칩 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 간이 전처리가 가능한 공정 및 키트 기술 개발 - 나노입자의 특이적인 성질을 활용한 농약검출 및 시그널링 기법 개발 - 현장에서 15분 이내에 검출이 가능한 진단키트 플랫폼 개발 (3) 고감도 휴대용 광학 검출장비 시스템 시작품 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 광학적 검출장비에 적용가능한 나노바이오센서 칩 소자 설계 - 휴대용 검출 시스템을 위한 기기의 소형화 기술 개발 (4) 신선농작물의 안전성 관리기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 위해요소 관리기준을 활용한 운용시스템 개발 - 휴대용으로 사용 및 분석센터로의 정보전달 및 판단이 가능한 IoT 플랫폼 및 네트워크 개발 - 신선 농작물의 안전, 품질, 신뢰정보 전달서비스 제공 시스템 개발 					
4차 산업혁명과의 연관성					
<ul style="list-style-type: none"> ● 개발될 나노바이오센서는, 스마트폰과 이미지 분석 어플을 연동하여 별도의 분석기기 없이 스마트폰 카메라를 통해 신선농작물의 안전, 품질, 신뢰정보를 정량화 및 데이터화하고 분석센터로 전송하는 시스템으로 개발될 것임. ● 본 기술은 궁극적으로 웨어러블 및 사물인터넷 기술과 융합하여 높은 휴대성 및 중앙분석센터(예: 농산물품질관리원 등)와의 실시간 정보 연동이 가능한 작물 재배 현장에서의 유해물질 탐지를 위한 차세대 스마트 센서 시스템으로서 개발될 것임. 					
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능	기타
목표시장 및 시장 실현 시기					
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 재배 농작물 검사 및 환경보호를 위한 각종 검사와 관련한 시장 ● 시장 실현 시기 : 기술개발 완료 2년 후 휴대용 나노바이오센서 출시 (2023년) 					
소요 기간 및 예산					
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 					

(5) IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 장기적, 반복적인 사용으로 경미한 효과를 나타내는 화장품에서 벗어나 즉각적이고 일시적인 피부의 외관 변화와 이의 지속적인 사용에 의한 상태 개선을 목표로 하는 새로운 화장품 시장 영역의 도출 화장품 산업의 2차 활성화를 위해 세계적으로 우수한 기술을 기획보하고 있는 첨단 산업(전기, 전자, 의료 등)으로부터 화장품용 소재 및 피부 개선에 도움을 줄 수 있는 기술의 발굴 및 응용 								
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 미세먼지, 자외선, 이상 고온과 세균 등의 유해 환경 요인으로부터 효과적인 피부 보호 솔루션 도출 피부 외관의 즉각적인 개선을 나타낼 수 있는 기능성 소재 및 화장품 연구개발 시스템 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> 피부 탄력 조절, 투습, 자동세정 기능을 갖는 새로운 고분자 필름 연구 그래핀, 메타물질 등의 새로운 광필터를 이용한 신규 자외선 차단제 및 광색소 연구 LED, 생체 전기, 미세 전류, 자기장 등을 이용한 신규 피부 기능 조절 기술 발굴 연구 피부의 물리, 화학, 광학적인 특성을 실시간으로 측정 분석하는 센서, 시뮬레이션 연구 								
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 웨어러블 센서, IoT 기술이 접목된 개인 진단 기술의 확보와 데이터 축적 다양한 산업 사이의 영역 파괴 및 융합, 기술의 수평적 네트워크 확장 								
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	√	기타				
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 국내 외 화장품 시장 시장 실현 시기 : 현재 기술 성숙도 TRL4 수준 약 5년 이내 실용화 수준으로 성장 								
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 								

(6) 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 다양한 인공지능형 스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술 개발을 통해 감염균의 선제적 방어를 통해 플렉서블 IoT 제품, 로봇, 화장품, 의료장비 등의 4차 산업혁명의 주요 산업제품의 안전성을 확보하고자 함. 나노바이오 소재를 통한 표면항균 제어 기술은 스마트 소자의 기술적 적용을 확대시키며 IoT 기반 유해인자 감지용 나노바이오센서 기술과 연동하여 미래사회에서의 잠재적 감염인자를 제어하는 새로운 기술임. 기존의 수동적 방어에서 벗어나 감염균의 특성에 맞는 유전자 정보를 이용한 능동적 방어가 가능한 나노코팅 기술이므로 생체정보 및 생체신호의 빅데이터의 사회적 가치를 부여하고 4차 산업혁명이 주도하는 미래사회의 스마트 제품에 부가가치를 선도할 수 있음. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 스마트 소자에 적용 가능한 항균 나노바이오 소재의 균일 분산 및 영구 결합을 통해 항균 기능성을 갖춘 표면항균 코팅 기술을 개발하고자 함. 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 항균 나노소재의 균일 분산 및 영구 결합 기술을 통한 표면코팅 기술 개발 (스마트 소자의 영구적 표면 접착성을 가지는 항균 나노바이오 소재 개발) - 항균 기능성을 갖춘 나노바이오 기능성소재 개발 (질병과 개인의 특성에 맞는 맞춤의료가 가능하고 감염의 선제적 대응이 가능한 지능형 항균소재 개발) 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 고령화와 관련 스마트 소재에 대한 항균의 필요성 스마트 소자의 기술적 적용 확대 미래 사회에서의 잠재적 감염인자 제어 기술 4차 산업혁명이 주도하는 미래 사회의 스마트 제품과 뷰티 제품에 고부가가치 부여 4차 산업혁명의 주요 의료용 산업제품의 안전성 확보 							
초고속화	대용량화	저전력화		신기능	✓	기타	✓
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 항균 코팅 시장은 2020년 13억 달러의 시장규모로 성장할 것으로 예측되고 있으며 세계적으로 기술 개발 경쟁이 심화되고 있음. - 세계 항균/항생제 전체 시장 규모는 2011년 기준 약 421억 달러 규모로 연평균 3.5% 대의 시장 성장률을 나타내었으며 항균 코팅의 용도가 확대되면서 세계의 항균 코팅 시장은 2014~2019년 사이 매년 14.38%씩 확대되고 있음. 시장 실현 시기 : 기술 개발과 산업화가 이루어짐과 동시에 시장 진입 가능 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 6억원/년 (18억원) 							

(7) 인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 최근 웨어러블 기술 개발에 따른 인체부착용 헬스케어 소자를 위한 핵심 소재 기술로 인체의 움직임을 극복하고 안정적인 생체 신호들 (ECG, EEG, 맥파, 온도 등)을 검출할 수 있는 신축성 소재 기술, 장시간 부착에도 인체에 불편함이 없는 반복적 생체친화성 점착 소재 및 전극 삽입 기술이 중요한 이슈로 부각되고 있음. 기존에 웨어러블 소자 및 피부의 점착 소재들은 물속 및 젖은 표면과 땀에 의한 습한 피부에 접착력이 급격하게 저하되는 문제점들이 있음. 또한 기존의 점착 소재들은 습한 인체 표면 환경에서 반복적인 탈부착이 불가능하다는 한계점이 존재함. 이러한 맥락에서 젖은 피부 표면 환경에서도 높은 접착력을 유지하고, 피부자극과 표면의 오염을 최소화하는 생체모사 삼차원 미세구조체를 이용한 인체부착용 전극/점착 소재 개발이 필요한 실정임. 					
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 물속/습한/건조한 환경 및 거친 표면과 피부 표면에 효과적으로 접착 가능한 생체모사 탈부착 후 오염물을 남기지 않는 청정 및 신축 접착 소재 개발 웨어러블 소자에 응용이 가능한 생체모사 3차원 미세구조체를 이용한 인체부착용 전극이 형성된 가역적 점착 소재 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 미세 3차원 계층구조에 따른 문자적 상호작용 이론적 모델링 및 분석 기술 미세구조의 초저가 제조 공정 기술 신축성의 생체적합 및 청정 소재 합성/제조 기술 물속/건조한 표면 및 피부의 잠착 소재의 수직, 수평 및 벗겨냄에 대한 접착력 분석 툴 설계 가역적 탈부착 및 오염물을 남기지 않는 청정 접착 소재 개발 신축성의 청정 건식접착 소재의 전극 형성 및 전극 형성 기술 개발된 소재를 이용한 의료 기기 응용 기술 					
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 소자와 계면 피부/조직 부착기술을 통한 고성능 의료소자의 IoT 웨어러블 소자 기술 진단 소자와 맞춤 줄기세포/약물전달시스템과의 결합을 통한 통합 정보 소자 기술 3차원 미세 패터닝 기술 소재 개발을 통한 3D 프린팅 기술 개발 로봇 및 이동 기술 활용을 위한 소자 기판, 디스플레이 패널, 정밀 반도체 소자 등의 첨단 소재의 청정 접합/이송/고정 기술 개발 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 기존 의료용 진단 소자 점착 소재, 스마트 와치 및 의료용 웨어러블 소자의 계면 소재, 정밀 반도체 로봇 청정이송 소재 시장 실현 시기: 2021년 이후 초저가 대면 제조를 통한 산업 활용 계획 					
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 3억원/년 (9억원) 					

(8) 나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 식품안전 및 유해성 진단을 위해서 현장에서 실시간으로 생육과정의 품질 제어와 잔류농약 또는 유해 미생물 등으로 유발된 식품독성을 정확하게 진단할 수 있는 정밀 분석장비가 요구됨. 질량분석기술은 다양한 종류의 화합물을 현장에서 실시간으로 정확하고 빠르게 검출하고 동정(identification)할 수 있는 현장 맞춤형 나노바이오 식품안전 질량분석기 개발 현장에서 실시간 측정 및 식품안전 진단이 가능하도록 질량분석 데이터베이스 구축을 위한 플랫폼 기술 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 현장 내 실시간 식품안전 모니터링을 위한 요소 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 식품안전 진단을 위한 on-site 정밀측정 분석기기 및 탐재 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> 현장 내 실시간 모니터링 가능한 나노기술 기반 대기압 이온화 질량분석 기술 개발 현장별 특성 및 변동요소를 고려한 신호처리 기술 개발 식품안전 현장 진단용 DB 요소 기술 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 정밀 나노바이오 분석기에서 도출된 결과를 실시간 모니터링함으로써 인공지능 기반 자동 품질 제어 가능 식품안전 및 작물독성 등 실시간 현장 분석을 위하여 현장별 특징적 빅데이터를 제공하고 인공지능이 현장 내 여러 변동요소를 계산하여 분석에 반영할 수 있도록 지원 							
초고속화	✓	대용량화		저전력화		신기능	
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 식품안전 및 유해독성 진단이 필요한 생산라인부터 유통, 개인 가구 정밀분석 시장 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> TRL [시작] 3단계 ~ [종료] 7단계 시장별로 2025 ~ 2020년 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2024 (3+3년) 소요 예산 : 20억원/년 (20억원) 							

(9) 바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서

과제 개요								
● 나노바이오 기술을 활용하여, 유해한 병원체로 오염된 물이나 흙 등 유해한 바이오 환경을 실시간으로 검지할 수 있고 전국적인 규모로 설치가 가능할 정도의 저가 무인 유해 바이오 환경 모니터링 시스템을 개발								
● 이러한 무인 모니터링 시스템을 통하여 생성된 빅데이터는 인공지능을 통하여 분석되어 조류독감, 구제역, 에볼라 등 유해 병원체의 발생을 실시간으로 경보하고 그 확산을 예측하고 미리 방재할 수 있게 해줌으로써 국민의 안전을 보장하고, 유해병원체로 인한 천문학적인 재난관리 비용 절감 가능								
과제 목표 및 내용								
<ul style="list-style-type: none"> ● 과제 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 호수물, 흙, 공기 등의 환경에 포함된 1종이상의 유해 병원체를 실시간으로 전처리하여 검지하는 저가 나노바이오센서 시스템 개발 - 나노바이오센서 시스템의 무인 장기 구동과 검지신호 전송을 가능하게 해주는 무인 모니터링 시스템 구성 기술 ● 과제 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 자동 고속 전처리 기술 : 물, 흙, 공기 등의 유해 바이오 환경에 포함된 병원체를 고속으로 전처리하고 농축하는 기술 개발 - 저가 실시간 나노바이오센서 기술 : 유해 바이오 환경에 포함된 병원체를 실시간으로 검지하는 저가 나노바이오센서 기술 개발 - 무인 시스템 구성 기술 : 전처리와 센싱을 연동하여 자동으로 수행하고 이를 장기간 반복할 수 있게 해주는 무인 모니터링 시스템 구성 기술 개발 								
4차 산업혁명과의 연관성								
<ul style="list-style-type: none"> ● 4차 산업혁명의 시작점은 인공지능이 활용할 수 있는 빅데이터의 생성임. ● 유해 병원체가 포함된 물이나 공기 등 유해 바이오 환경을 모니터링하는 시스템을 개발하여 유해 바이오 환경에 대한 빅데이터를 생성하고 이를 인공지능을 통해 분석 예측하고 그 확산을 신속히 방재할 수 있게 해줌으로써 장차 조류독감, 구제역, 에볼라 등 고병원성 병원체로부터 국민의 안전을 지키고 천문학적인 재난 비용을 줄이게 해줄 것으로 예상됨. 								
초고속화	✓	대용량화	✓	저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 조류독감, 구제역, 에볼라 등 전염병 조기 방역을 통한 국가 재난관리 비용 감소와 관련 시장 ● 시장 실현 시기 : 2024년(기술 개발 후 3년간의 제품개발 기간을 거쳐 시장 창출 예상) 								
소요 기간 및 예산								
<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 								

(나노의학)

1. 4차 산업혁명에서 나노의학 분야의 기여

- 4차 산업혁명은 기존의 3차 산업혁명을 기반으로 하는 물리적, 생물학적, 디지털 산업세계의 경계가 없어지고 초고속, 초고용량, 초저전력, 고감도, 신기능, 친환경(지속가능), 개인맞춤 등 여러 분야의 기술이 융합되는 새로운 미래기술 혁신임.
- 나노의학 기술은, 스마트 진단 및 개인맞춤 치료 등의 의학 기술에 나노소재 및 센서 등의 나노 기술을 융합함으로써 4차 산업혁명의 신산업 창출에 기여함.
- 특히 나노의학 분야는 4차 산업혁명의 핵심이라 할 수 있는 인공지능, 빅데이터, IoT, 로봇 등의 분야에 정밀의료장비 및 영상 기술을 비롯한 체외진단 검지기술, 약물전달 소재, 맞춤의학 치료 소재, 재생의학 소재 등을 제공하여 4차 산업혁명의 촉진에 크게 기여할 수 있음.
- 나노의학 분야의 의료진단, 치료, 제어 및 재생 기술로 신속 진단, 상시모니터링, 및 환자 맞춤치료를 구현하며, 첨단의료 기술 및 의료정보 빅데이터 제공을 통하여 원격진료, 의료용 로봇, 인공지능 진단과 같은 4차 산업혁명의 핵심 영역 촉진에 기여할 것으로 기대됨.
 - 원격진료와 인공지능 진단에 필요한 환자 DB 구축과 맞춤진단/치료를 활용한 정밀의학의 구현은 나노기술에 기반한 진단, 치료, 제어 및 재생 기술 등의 나노의학 기술을 통해 4차 산업혁명에 기여 가능
 - 특히 현장 의료 진단, 환자 맞춤형 치료 및 신속 진단에 필요한 나노의학 기술은 원격진료, 빅데이터 수집, 인공지능 진단과 같은 4차 산업혁명에 적용 가능한 첨단의료 기술 및 의료정보 네트워크화에 크게 기여할 것으로 예상됨.
 - 신속진단, 헬스 모니터링, 개인맞춤 치료 등의 나노의학 기술은 4차 산업 혁명을 통해 도래할 미래사회에서의 고령화를 준비할 수 있는 핵심기술임.
 - 나노의학 영상 기술과 브레인 인터페이스 기술은 인공지능과 빅데이터 구축과, 사물 인터페이스 기술, IoT, 로봇 등의 미래 핵심기술로 활용되어 인공지능형 미래기술 제품과 웨어러블 IoT 기술, 로봇제어 기술의 대중화에 큰 기술적 파급성을 가질 것으로 예상됨.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노의학 분야별 연관관계

	관련기술 영역	나노의학								
		체외진단용 나노검지	나노정밀의료장비	나노영상소재	나노약물전달체	나노치료소재	뇌기능제어기술	나노기반재생의료		
사회 영역										
산업	IoT/인터넷									
	로봇/자율기기									
	빅데이터/알고리즘(AI)	1	2	3	8	8	8	8		대용량화/초고속 (인체정보, 의료정보)
	클라우드 컴퓨팅									
	웨어러블/모바일 기기	1	2	3	8	8	8	8		신기능 (신기능 센서, 고감도 센서, 인체신호 검지)
	3D 프린팅(AM)	8	8	8	8	3	2	1		신기능 (신기능 소재, 개인맞춤/고정밀 인공장기 소재)
	센서/액튜에이터									
	첨단소재	2	8	1	8	8	4	3		신기능 (고감도/개인맞춤 의료용 소재, 신기능 소재)
에너지/자원/환경	신재생에너지									
	스마트그리드									
	에너지 절약									
	에너지 저장									
	에너지 하베스팅/저장									
	자원 절약/재활용									
	환경 모니터링									
이동성	고용(직업)									
	운송/물류									
	자본(서비스)									
보건	맞춤의학	1	5	4	3	1	5	5		신기능 (개인맞춤 고감도 센서, 생체친화 소재, 초고감도 분석, 인체정보)
	고령화 대응	4	5	5	2	3	5	1		신기능 (웨어러블, 조직재생 소재, 모니터링)
	사회적 대응(전염병)	1	8	8	3	2	8	8		초고속화 (초고속 진단, 현장진단, 맞춤치료, 원격진료)
가정/개인	가전제품(생활가전)	1	2	8	8	8	8	8		신기능 (원격진료, 상시 모니터링)
	소비제품	3	8	8	2	1	8	8		신기능 (신기능 소재, 신기능 센서)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노의학 분야 및 기여 내용

사회 영역	관련기술 영역	나노의학 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비	나노 영상소재		대용량화/초고속 (인체정보, 의료 정보)
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비	나노 영상소재		신기능 (신기능 센서, 고감도 센서, 인체신호 검지)
	3D 프린팅(AM)	나노기반 재생의료	뇌 기능 제어 기술	나노 치료소재		신기능 (신기능 소재, 개인맞춤/고정밀 인공장기 소재)
	센서/엑튜에이터					
	첨단소재	나노 영상소재	체외 진단용 나노검지	나노기반 재생의료	뇌 기능 제어 기술	신기능 (고감도/개인맞춤 의료용 소재, 신기능 소재)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학	체외 진단용 나노검지	나노 치료소재	나노약물 전달체	나노 영상소재	신기능 (개인맞춤 고감도 센서, 생체친화 소재, 초고감도 분석, 인체정보)
	고령화 대응	나노기반 재생의료	나노약물 전달체	나노 치료소재	체외 진단용 나노검지	신기능 (웨어러블, 조직재생 소재, 모니터링)
가정/개인	사회적 대응(전염병)	체외 진단용 나노검지	나노 치료소재	나노약물 전달체		초고속화 (초고속 진단, 현장진단, 맞춤치료, 원격진료)
	가전제품(생활가전)	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비			신기능 (원격진료, 상시 모니터링)
	소비제품	나노 치료소재	나노약물 전달체	체외 진단용 나노검지		신기능 (신기능 소재, 신기능 센서)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노의학 기술 (예시)

사회 영역	관련기술 영역	나노의학 (우선순위)				개발대상 나노의학 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자율기기					
	빅 데이터/알고리즘(AI)	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비	나노 영상소재		<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 정밀의료기기(인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기) 고선택성 정밀의학용 나노조영제
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비	나노 영상소재		<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 정밀의료기기(인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기) 고선택성 정밀의학용 나노조영제
	3D 프린팅(AM)	나노기반 재생의료	뇌 기능 제어 기술	나노 치료소재		<ul style="list-style-type: none"> 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술 뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술 동반진단 나노테라노시스 기술
	센서/액튜에이터					
에너지/ 자원/환경	첨단소재	나노 영상소재	체외 진단용 나노검지	나노기반 재생의료	뇌 기능 제어 기술	<ul style="list-style-type: none"> 고선택성 정밀의학용 나노조영제 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술 뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술
	신재생에너지					
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장					
	에너지 하베스팅/저장					
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학	체외 진단용 나노검지	나노 치료소재	나노약물 전달체	나노 영상소재	<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 동반진단 나노테라노시스 기술 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학소재 고선택성 정밀의학용 나노조영제
	고령화 대응	나노기반 재생의료	나노약물 전달체	나노 치료소재	체외 진단용 나노검지	<ul style="list-style-type: none"> 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학소재 동반진단 나노테라노시스 기술 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서)
가정/개인	사회적 대응(전염병)	체외 진단용 나노검지	나노 치료소재	나노약물 전달체		<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 동반진단 나노테라노시스 기술 개인맞춤형 약물 전달을 위한 나노의학소재
	가전제품(생활가전)	체외 진단용 나노검지	나노정밀 의료장비			<ul style="list-style-type: none"> 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서) 정밀의료기기(인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기)
	소비제품	나노 치료소재	나노약물 전달체	체외 진단용 나노검지		<ul style="list-style-type: none"> 동반진단 나노테라노시스 기술 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학소재 체외진단용 나노검지(고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서)

5. 개발대상 나노의학 내용 요약

(1) 고선택성 정밀의학용 나노조영제

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 의료영상을 위한 나노소재는 영상장비의 특성을 반영하여 특이적 신호를 발생하여야 하고, 인체에 적용하였을 때 안정성, 안전성을 확보하여야 하며, 특정 질환 부위를 추적하고 다른 조직에서의 배설이 신속하게 이루어지는 특성을 가지고 있어야 함. 이를 위하여 개발되어야 할 핵심기술은 영상장비의 특성을 반영한 나노입자 코어의 합성, 생산기술, 친수화 또는 질환추적 물질을 도입 후 균일성을 확보할 수 있는 표면변환 기술, 체외 배설을 가속화하는 기술 등이 개발되어야 함. 또한 나노조영제 상용화의 비용, 기간 단축 및 임상 성공률 제고를 위하여 고효율/저비용의 나노조영제 개발 전략이 필요함. 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 임상 상용화를 위한 생체적합형 고선택성 나노조영제 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> (1) 영상장비의 특성을 고려한 나노소재의 합성, 생산 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 임상사용 가능 물질 종류에 따른 나노조영제 3종 이상 개발 - 표면변환을 통한 친수화, 고선택성 구현 기술 개발 - 전신독성 최소화를 위한 나노소재 투여 방식 제시 (전신, 국소 등) - 전임상 독성 평가 - 나노소재 생산성/보관성 최적화, 규격 표준화 기술 개발 (2) <i>in vivo</i> 동반진단 및 다중 영상 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 질환추적 나노조영제를 활용한 환자맞춤형 치료제 선택 - 나노조영제를 이용한 상보적 다중영상 진단 및 영상유도 수술 동시 달성이 가능한 융합 조영제 및 영상 기술 개발 (광학, CT, MRI, 초음파, 핵의학 영상 등에서 2종 이상 포함) - 전문 임상의료 연구자와의 연계를 통한 영상유도 정밀치료 전임상 유효성 평가 및 진단/치료 유통 프로토콜 개발 (수술, 광치료, 초음파치료 등 영상유도에 의한 치료효과 포함) 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> <i>in vivo</i> 동반진단을 활용하여 환자맞춤형 치료제 선택이 가능하여 맞춤진단/치료를 활용한 정밀의학의 구현이 가능함. 다양한 질환에 대한 환자영상정보의 DB를 구축하여 빅데이터로서 활용될 것이며 AI를 활용한 진단을 위한 기초 DB로 활용될 것임. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 심혈관계 질환, 뇌질환, 신생물질환 등에 광범위하게 사용이 가능함. 시장 실현 시기 : 기술개발과 산업화가 이루어짐과 동시에 시장 진입 가능 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (5년) 소요 예산 : 10억원/년 (50억원) 						

(2) 개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학 소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 나노입자 기반의 약물 전달체는 기존에 많이 개발되어 왔으나 다수의 경우 저분자 약물 전달에 집중되어 있고 이마저도 나노입자의 모양 및 크기의 균질성이 임상 승인을 위해 요구되는 수준에 미치지 못하여, 실용화 시 어려움이 있음. 이러한 기존 나노약물 전달체의 한계를 극복하고 유전자 단백질과 같은 바이올로직스 약물을 효과적으로 질환 부위에 전달하기 위해서는 새로운 소재/방법론 기반의 나노전달체 개발이 필요함. 임상 적용 안정성이 임상 시험 단계를 통해 이미 증명된 생체유래 소재 또는 이에 준하는 성능을 지니는 인공 소재이면서 나노전달체의 구조적 균일성을 높일 수 있는 나노소재 개발 연구는 실용화 단계에서 임상시험 성공 가능성을 극대화할 수 있는 기회를 제공 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 구조적 균질성이 높으며 약물의 종양 선택적 전달이 가능한 나노전달체 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> (1) 고균질성 나노입자 개발 <ul style="list-style-type: none"> 임상사용가능 물질 기반 고균질성 나노구조체 3종 이상 개발 ($PdI < 0.2$) 전신독성 최소화를 위한 나노소재 투여 방식 제시 (전신, 국소 등) 전임상 독성 평가 나노소재 생산성/보관성 최적화, 규격 표준화 기술 개발 (2) 약물 전달 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> 생체친화 소재로 만들어진 고균질성 나노입자를 이용한 종양 선택적 약물 전달 기술 개발 (동물 종양 모델에서의 종양 선택적 전달능 검증, 도즈 당 1 % 이상의 종양 누적률) 전문 임상의료 연구자와의 연계를 통한 전달 된 약물에 의한 종양 치료 전임상 유효성 평가 및 진단/치료 운용 프로토콜 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 고령화 대응 신생물 질환의 극복 						
목표시장 및 시장 실현 시기	<table border="1"> <tr> <td>초고속화</td><td>대용량화</td><td>저전력화</td><td>신기능</td><td>✓</td><td>기타</td></tr> </table>	초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 신생물 질환 등을 타겟으로 사용이 가능함. 시장 실현 시기 : 기술 개발과 산업화가 이루어짐과 동시에 시장 진입 가능 						
소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년)							
소요 예산 : 20억원/년 (100억원)							

(3) 동반진단 나노테라노시스 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 나노 치료 및 진단, 약물전달 기술 등을 활용하여 비침습적 고효능, 저부작용 개인별 맞춤 진단-치료(테라노시스) 기술로 개발 환자 개인의 특성에 맞춘 맞춤형 다기능 나노입자를 이용하여 생체 내에서 진단과 치료가 동시에 이루어질 수 있음. 하나의 나노물질에 다양한 형태의 치료용 약물, 영상용 프로브, 질환표적 리간드를 연결하여 생체 적합한 다기능성 나노물질을 제작하여 질환을 특이적으로 표적하여 영상을 기반으로 진단하고 치료할 수 있는 테라그노시스 신기술 연구 								
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 신개념 나노테라노시스 기술을 활용한 개인 맞춤형 진단치료 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 나노물질에 기반한 테라그노시스용 다기능성 나노캐리어 개발 질병관련 문자추적 영상 및 치료제 전달 체계가 접목된 영상기반 진단치료 융복합 기술 개발 나노표적 진단치료 기술을 이용한 조기진단, 질병의 중증도 수준 및 예후 판정 기준 확립, 재발판정, 치료의 효과검증 및 치료계획 수립을 위한 표준화 프로그램 도입 생체분자 영상기술로 확보된 바이오마커 영상의 정량적 통합 분석 기술 개발 생체표적 하이브리드 영상 정보, 오믹스자료 등을 통합한 맞춤형(individualized) 질환진단, 예후예측, 약물반응 모니터링 기술 개발 올리고핵산(RNAi/miRNA) 및 치료용 동위원소를 이용한 질환표적 병합치료 연구 생체분자 영상시스템을 이용한 중개연구 및 임상시험 응용 								
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> in vivo 동반진단을 활용하여 환자맞춤형 치료제 선택이 가능하여 맞춤진단/치료를 활용한 정밀의학의 구현이 가능함. 								
초고속화		대용량화		저전력화		신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기									
	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 신생물 질환과 전염병 등에 사용이 가능함. 시장 실현 시기 : 기술 개발과 산업화가 이루어짐과 동시에 시장 진입 가능 								
소요 기간 및 예산									
	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 30억원/년 (150억원) 								

(4) 뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 노령화 및 뇌질환으로 퇴행된 뇌기능을 대체 및 보조 장치를 개발하기 위해서는 뇌의 신경과 신호를 유기적으로(seemless) 연결되면서 신호패턴을 정확하게 조절할 수 있는 기술이 필요함. ● 다양한 퇴행성 뇌질환의 치료를 위해서는 뇌의 멀티스케일 컨넥톰을 정확하게 모사할 수 있는 신개념 나노소재 원천기술 개발이 필요하며, 이를 활용하여 뇌의 기능을 정확히 조절할 수 있는 기술이 필요함. 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 과제 목표 : 나노기술을 활용한 뇌질환 조절 및 치료 ● 과제 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> (1) 뇌와 연결하여 퇴행된 뇌 기능을 대체 및 보조하는 나노장치 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 청력 및 신경과 연결(neuro-connect)하는 나노장치를 개발하고 뇌신호 패턴 인식에 필요한 인공지능 원천기술 개발 - 퇴행된 뇌기능 보조/대체용 나노스케일 인공신경기구(심부뇌자극기, 인공감각기, 인공해마) 개발 (2) 뇌의 전 영역 네트워크를 분석할 수 있는 인공지능 기술 및 플랫폼 <ul style="list-style-type: none"> - 뇌의 전 영역에서 퇴행된 뇌기능을 분석할 수 있는 인공지능 기술(예, 위상 데이터 분석) 개발 - 뇌 질환의 발생 및 진행에 따른 뇌의 전 영역의 관계 및 변화를 예측할 수 있는 시뮬레이션 플랫폼 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 고령화대응 뇌질환의 극복 							
목표시장 및 시장 실현 시기	<table border="1"> <tr> <td>초고속화</td><td>대용량화</td><td>저전력화</td><td>신기능</td><td>✓</td><td>기타</td><td></td></tr> </table>	초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타			
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) ● 소요 예산 : 10억원/년 (50억원) 							

(5) 고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 고령화에 따른 노령인구의 삶의 질 향상을 위하여 나노기술이 접목된 생체조직 재생 기술의 확보가 시급함. 퇴행성 질환에 적용할 수 있는 나노 재생, 생체모방 기술 등을 활용하여 인체 면역에 적합하며 인체 적용이 가능한 효율적 조직재생화 기술을 개발함. 					
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 나노재생 기술을 이용한 조직재생화 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 재생유도 표면활성 나노지지체 기반 재생 활성치료 기술 개발 질환 특이적 생체적합성/생체분해성 나노지지체 물질 개발 3D nano-fibrous matrix/scaffold의 난치성 피부질환 치료용 경피흡수 촉진 나노전달체 개발 난치성 피부질환(아토피, 건선, 피부암)을 효율적으로 치료할 수 있는 경피흡수 촉진 나노전달체 플랫폼 개발 줄기세포 및 조직공학제제 개발 관련 상업화 					
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 고령화 대응 퇴행성 질환의 극복 					
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 관절염, 골다공증, 피부과 질환 등을 타겟으로 사용이 가능함. 시장 실현 시기 : 기술 개발과 산업화가 이루어짐과 동시에 시장 진입 가능 					
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 20억원/년 (100억원) 					

(6) 감염성 질환 현장 진단용 고민감도 다중 체널 분석기기

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 고민감도 신속 진단이 필요한 감염성 질환의 진단을 위해 현장 진단용 의료기기 개발에 대한 필요성이 증가하고 있음. 현장 진단용 기기를 통한 초고속 진단을 통해 진단 대상에 따른 맞춤형 치료가 가능하고 또한 빅데이터 기반의 치료 및 네트워크를 통해 진단 내역의 빅데이터 생성에도 도움이 되는 ICT 융합 기술로 발전이 가능 이를 위해서는 극미세 농도 체외 진단용 소재 및 키트의 개발, 다중 채널 초고속 분석용 센서 개발, 분석용 진단기기 플랫폼 개발, 빅데이터 및 네트워크 연동 진단 기술 구축 등의 기술이 필요함. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 감염성 진단의 현장진단을 위한 ICT 기반 진단 장비 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 감염성 질환 3종 이상 동시 진단용 광학 검출 모듈 개발. - 극미량 분석용 고민감도, 고민감도 나노소재 개발 - 고속 현장 진단용 카트리지 및 분석 기기 개발 - ICT 기반 현장 진단 네트워크 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 나노의학을 기반으로 현장 의료 진단, 환자 맞춤형 치료, 신속 진단 및 환자 맞춤치료를 구현할 수 있고 첨단의료 기술 및 의료정보 네트워크화로 원격진료, 빅데이터 수집, 인공지능 진단과 같은 4차 산업혁명에 적용 가능 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 국내외 중대형, 소규모 병원, 응급실, 일반 가정집 시장 실현 시기 : 4년 이내 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(7) 인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대에 도래하여 빅데이터 활용 및 인공지능(AI)을 기반으로 개인별 특성에 따른 암 발병 예측 및 진단, 예후 판단 등 개인별 의료 시장이 확대되고 있음. 연세 세브란스 병원에서 '셀바스 AI'를 이용하여 환자의 3년 내 암 또는 성인병 발병위험도를 예측하는 서비스를 보급할 예정이고 정부에서도 의료 AI 소프트웨어의 허가 심사규제 가이드라인을 작성하여 제시하는 등 활발한 움직임이 있음. 암 진단 신뢰도의 향상을 위하여 다중 바이오마커 생체물질의 동시 측정이 이루어져야 함에 따라 정확성을 확보한 고감도 나노기술 기반 정밀 질병진단이 중요한 기술 분야로 대두되고 있음. 따라서 다양하고 많은 환자 샘플에서 실시간 대용량의 데이터를 제공할 수 있는 나노바이오 정밀진단 기기를 개발하고 이 데이터에 기반한 진단 신뢰성을 확보한 인공지능 기반 정밀진단 플랫폼 개발을 최종목표로 함. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 나노기술 기반 암 진단용 의료기기 DB 구축을 위한 인공지능형 정밀진단 플랫폼 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 질병예측 및 진단을 위한 바이오마커 정밀측정을 분석 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> (1) 타겟 암 진단을 위한 생체시료 처리 최적화 (2) 다중 바이오마커 측정 및 질량분석 신호 분석 기술 (3) 암 진단용 질량분석 DB 요소 기술개발 (4) 기존 임상 진단법과의 연계성 판단 알고리즘 및 진단 신뢰값 도출 알고리즘 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 원격진료와 인공지능 진단에 필요한 환자 DB 구축과 맞춤진단/치료를 활용한 정밀의학의 구현은 나노기술에 기반한 진단, 치료, 제어 및 재생 기술 등의 나노의학 기술을 통해 4차 산업혁명에 기여 가능 환자 개인별 의료기록과 진단 및 치료 데이터 등이 축적된 의료 빅데이터 필요 <ul style="list-style-type: none"> - 빅데이터 활용하여 AI를 통한 정확한 질병 분류 및 질병 발병 확률을 수치적으로 예측 - 질병 발병 확률 수치의 진단 신뢰값 도출 가능 							
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 질병 진단 및 치료의 개인별 맞춤 의료 정밀분석기기 시장 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> - TRL [시작] 3단계 ~ [종료] 7단계 - 시장별로 2025 ~ 2020년 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2024 (3+3년) 소요 예산 : 20억원/년 (20억원) 							

(8) 고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 체외진단을 위한 나노바이오 분야의 대표적 기술인 나노바이오센서 기술을 고도화하여 고속 다중 질병마커 검출을 구현하고 이를 인공지능, IoT, 로봇 기술과 융합하여 기존에 불가능하던 고속 자동 진단, 부작용을 최소화한 개인별 맞춤진단을 실현하며 나아가 축적된 데이터를 바탕으로 한 질병예측 시스템을 구현하고자 함. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 고속 다중 나노바이오센서와 인공지능 로봇기술을 융합한 질병 진단, 치료 및 예측 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 고속 다중 질병마커 검출을 위한 고감도 정밀 나노바이오센서 개발 - 인공지능 나노바이오센서 로봇 탑재 및 운용 기술 개발 - 축적 데이터기반 질병예측 알고리즘 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서와 인공지능, IoT, 로봇 기술을 융합하여 초고속 신기능 고속자동 질병진단 및 개인별 맞춤치료 구현 진단 및 치료용 나노바이오센서 데이터 축적을 통한 질병 예측 알고리즘 구축 							
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 <ul style="list-style-type: none"> - 글로벌 의료기기 시장은 2013년 3,486억 달러에서 연평균 4.46%씩 성장하여 2018년 4,336억 달러에 이를 것으로 전망 - 고속자동 질병진단 및 개인별 맞춤치료 의료기기 시장 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> - TRL [시작] 3단계 ~ [종료] 7단계 - 시장별로 2025 ~ 2030년 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2019 ~ 2024 (5년) 소요 예산 : 15억원/년 (75억원) 							

[나노공정·장비]

1. 4차 산업혁명에서 나노공정·장비의 기여

- 4차 산업혁명의 주요기술(인공지능, 클라우드, 빅데이터, VR/AR, 자율주행차, 사물인터넷, 로봇/드론, 3D프린팅 등)은 초저전력·초고속반도체, 스마트센서, 플렉서블·3D 디스플레이, 고효율 전지 등의 핵심기술로 구현되며 나노기술이 성능 향상을 견인하고 있음.
- 초저전력·초고속 반도체, 스마트센서, 플렉서블·3D 디스플레이, 고효율 전지 등 핵심소자 제작은 다양하고 복잡한 공정기술이 요구되므로 정밀하고 신뢰성 있는 나노구조체를 형성하기 위한 나노공정 장비 개발과 형성된 나노구조체를 평가하기 위한 나노측정장비 개발은 4차 산업혁명을 성공적으로 견인할 핵심 기술임.
 - 4차 산업혁명 시대의 핵심요소인 플렉서블 디스플레이, 센서, 메모리 소자, 기능성 시트 제품 등 신축성 있고 착용 가능한 전자소자 및 시스템의 수요가 급증할 것으로 예상됨에 따라 신뢰성 있고 생산단가가 낮으면서 플렉서블 기판과 호환성 있는 나노소자 제조기술 개발이 필요함.
 - 유연기판 IT 시스템(메모리, 디스플레이), 유연 태양전지, 나노소재 기반 연료전지 소자, 고성능 3차원 전자소자, 나노메타물질 소자 등의 수요 급증으로 각종의 기능성 나노물질의 직접 패터닝 공정의 개발이 시급한 시점임.
 - 4차 산업혁명 시대에는 다양한 환경 상황을 모니터링 할 수 있는 웨어러블 및 신축 착용형 시스템 및 관련 소자의 수요가 증가할 것으로 전망됨에 따라 이에 적합한 소재 및 공정 개발이 필요함.
 - 사물인터넷 기반 전자 제품의 다기능화 및 스마트화에 대한 요구가 폭발적으로 증가하므로 고품위 나노박막 공정 기술에 대한 수요는 지속적으로 확대될 것으로 전망되고 있으나 기존 박막 증착 및 식각 기술로는 소자 크기의 나노화 및 구조의 3차원화에 어려움이 있으며 이를 해결하기 위하여 새로운 개념의 나노증착 및 식각공정 기술이 개발되고 있음.
 - 수 nm의 균질한 고밀도 실리콘 양자점 층은 차세대 메모리 및 차세대 태양전지 등 4차 산업혁명을 위한 핵심 소자에 적용될 수 있음.
 - 대면적 3D 나노소자의 검사기술은 4차 산업혁명 대응 차세대 나노소자 제조기술 상용화를 위한 필수 기술이며 마이크로와 나노기술이 접목된 3D 스마트소자의 경우 그 구조가 더욱 복잡해지고 있으며 최신의 광소자나 반도체소자들의 경우에도 마이크로/나노구조가 혼재된 다층박막 적층구조로 인해 검사 비용 및 시간의 증가가 심화되고 있어 이를 해결할 수 있는 기술개발이 필요함.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노공정·장비 분야별 연관관계

사회 영역	관련기술 영역	나노공정·장비							
		나노파 터 NING 장 비	나 노 첨 · 선 합 성 및	나 노 반 막 장 비	S P M · 광 합	나 노 화 학 · 구 조 분 석	나 노 물 성 측 정 장 비		
산업	IoT/인터넷	1	3	2	4	5	6		초고속화 (초고속 IoT 소자 제조/측정/분석)
	로봇/자율기기	1	3	2	4	5	6		초고속화 (고성능 나노센서 제조/측정/분석)
	빅데이터/알고리즘 (AI)	1	4	3	2	5	6		초고속화 (초고속 빅데이터 저장/처리장치 제조/측정/분석)
	클라우드 컴퓨팅	1	4	3	2	5	6		초고속화 (초고속 연산소자 제조/측정/분석)
	웨어러블/모바일 기기	1	3	2	4	5	6		초고속화 (고성능 웨어러블/모바일 기기 제조/측정/분석)
	3D 프린팅(AM)	6	1	5	2	4	3		초고속화 (고성능 3D 프린팅공정/장비 개발)
	센서/액튜에이터	1	3	2	4	5	6		초고속화 (고성능 연산소자 제조/측정/분석)
	첨단소재	3	1	2	4	5	6		대용량화 (고성능 저가 첨단소재 제조)
에너지/자원/환경	신재생에너지	1	3	2	4	5	6		대용량화 (고성능 신재생에너지 소자 제조/측정/분석)
	스마트그리드								
	에너지 절약								
	에너지 저장	1	3	2	4	5	6		대용량화 (고성능 에너지 저장소자 제조/측정/분석)
	에너지 하베스팅/저장	1	3	2	4	5	6		대용량화 (고성능 에너지 하베스팅 소자 제조/측정/분석)
	자원 절약/재활용								
	환경 모니터링								
이동성	고용(직업)								
	운송/물류	1	3	2	4	5	6		초고속화 (고성능 스마트 패키징 소자 제조/측정/분석)
	자본(서비스)								
보건	맞춤의학	1	3	2	4	5	6		신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
	고령화 대응	1	3	2	4	5	6		신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
	사회적 대응(전염병)	1	3	2	4	5	6		신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
가정/개인	가전제품(생활가전)	1	3	2	4	5	6		신기능 (고성능 나노부품 제조/측정/분석)
	소비제품	1	3	2	4	5	6		신기능 (고성능 나노부품 제조/측정/분석)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노공정·장비 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노공정·장비 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	초고속화 (초고속 IoT 소자 제조/측정/분석)
	로봇/자율기기	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	초고속화 (고성능 나노센서 제조/측정/분석)
	빅데이터/알고리즘(AI)	나노 페터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	초고속화 (초고속 빅데이터 저장/처리장치 제조/측정 /분석)
	클라우드 컴퓨팅	나노 페터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	초고속화 (초고속 연산소자 제조/측정/분석)
	웨어러블/모바일 기기	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	초고속화 (고성능 웨어러블/ 모바일 기기 제조/측정/분석)
	3D 프린팅(AM)	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노물성 측정장비	나노화학· 구조분석 장비	초고속화 (고성능 3D 프린팅공정/장비 개발)
	센서/액튜에이터	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	초고속화 (고성능 연산소자 제조/측정/분석)
	첨단소재	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	나노 페터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	대용량화 (고성능 저가 첨단소재 제조)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	대용량화 (고성능 신재생에너지 소자 제조/측정/분석)
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	대용량화 (고성능 에너지 저장 소자 제조/측정/분석)
	에너지 하베스팅/저장	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	대용량화 (고성능 에너지 하베스팅 소자 제조/측정/분석)
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	초고속화 (고성능 스마트 패키징 소자 제조 /측정/분석)
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
	고령화 대응	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
	사회적 대응(전염병)	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	신기능 (나노바이오소자 제조/측정/분석)
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	신기능 (고성능 나노부품 제조/측정/분석)
	소비제품	나노 페터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	신기능 (고성능 나노부품 제조/측정/분석)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노공정·장비 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	나노공정·장비 (우선순위)				개발대상 나노장비 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	로봇/자율기기	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	빅데이터/알고리즘(AI)	나노 패터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사장비
	클라우드 컴퓨팅	나노 패터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사장비
	웨어러블/모바일 기기	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	3D 프린팅(AM)	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	나노물성 측정장비	나노화학· 구조분석 장비	<ul style="list-style-type: none"> 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	센서/액튜에이터	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	첨단소재	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	나노 패터닝장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술 기능성 나노구조물 직접패터닝 기술
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사장비
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술
	에너지 하베스팅/저장	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술
	자본(서비스)					•
보건	맞춤의학	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	• 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	고령화 대응	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	• 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
	사회적 대응(전염병)	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	• 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술
	소비제품	나노 패터닝장비	나노 박막장비	나노점·선 합성 및 정렬장비	SPM· 광융합 나노 측정장비	<ul style="list-style-type: none"> 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 고품위 저가 대면적 나노박막 공정 기술

5. 개발대상 나노공정·장비 내용 요약

(1) 유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 메모리 전자소자, 에너지 전자소자, 나노 바이오소자, 유연전자소자 및 디스플레이 등의 고기능화 및 환경 친화/ 인간친화형의 플렉서블 기능성 나노소자 및 나노부품을 대면적에서 연속으로 제작할 수 있는 기술로 기존의 나노구조를 갖는 기능성 나노부품을 고신뢰도, 고생산성으로 제작할 수 있는 나노소자 제조기반 기술 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 기능성 나노부품을 고신뢰도, 고생산성으로 제작할 수 있는 나노소자 제조기술 개발 과제 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 유연기반 대면적 다층 나노패터닝 기술 - 대면적 다층 오버레이/정렬 기술 - 나노소자 기능성 제어를 위한 나노소재 대면적 정렬 기술 - 3D 구조의 배리어 패턴을 이용한 무정렬 다층 유연소자 설계 및 구현 기술 - 대면적 Stitch/Seam 최소화 3D 나노마스터 패터닝 기술 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대의 핵심요소인 플렉서블 디스플레이, 센서, 메모리 소자, 기능성 시트 제품 등 신축성이 있고 착용 가능한 전자소자 및 시스템의 수요가 급증할 것으로 예상됨에 따라 신뢰성 있고 생산단가가 낮으면서 플렉서블한 기판과 호환성 있는 나노소자 제조기술 개발이 필요함. 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 유연전자소자의 경우 2023년에 800억불로 성장할 것으로 예상되고 이를 기반으로 하는 바이오전자소자의 경우 2019년까지 190억불(CAGR=9.6%)로 성장할 것으로 예측되며, 대면적 유연 에너지소자의 경우 2017년까지 230억불(CAGR=16.1%)로 성장함. 나노장비 시장의 경우 2019년 34억불 (CAGR=22%)까지 성장할 것으로 예측되고 있음. 시장 실현 시기 : 유연전자소자 시장은 현재 존재하며 2023년 800억불로 확대 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 웨어러블 및 신축이 가능한 섬유상에 유연 회로 및 전극을 임베디드하여 착용할 수 있는 인체 무해성, 유연성, 스트레치성, 외부 환경에 대한 안정 및 신뢰성 구현이 가능한 소재 (금속, 세라믹, 고분자, 유기물 등 복합 소재 등)기반의 유연소자 제조 기술 개발 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 섬유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 고농도 나노입자 합성 및 분산 기술 개발 나노소재들의 결합 및 유연 기능성 다층 박막 설계 다층 박막의 IoT 응용 소자 임베디드 제작 기술 유연 소자 계면 특성 최적화 및 유연성, 비틀림성 조건 최적화 대면적 균일 코팅 및 필름 제조 기술 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대에는 다양한 환경 상황을 모니터링할 수 있는 웨어러블 및 신축 착용형 시스템 및 관련 소자의 수요가 증가할 것으로 전망됨에 따라 이에 적합한 소재 및 공정 개발이 필요함. 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 섬유기반 전자소자를 포함한 유연전자소자 시장은 2023년에 800억불로 성장할 것으로 예상됨. 시장 실현 시기 : 섬유 기반 전자소자 시장은 2023년 실현될 것으로 기대 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(3) 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 기능성 나노구조물(나노입자, 나노와이어, 나노튜브, 그래핀 등)을 복잡한 전/후 공정(리소그래피, 증착, 식각, lift-off 등)을 거치지 않고 직접 패터닝 함으로써 공정의 단순화, 비용 절감, 친환경성을 극대화하고, 다종의 나노구조물을 다양한 기판에 고밀도로 집적시켜 고기능성 나노소자를 제작할 수 있는 제조 기술 개발 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 다종의 나노구조물을 다양한 기판에 고밀도로 집적시켜 고기능성 나노소자를 제작할 수 있는 제조 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 직접 패터닝 및 후처리 공정 기술 직접 패터닝 공정 기반 마이크로/나노구조물 고종횡비 구현 기술 직접 패터닝용 나노소재 및 액체 분산 제조 기술 직접 패터닝 공정 기반 마이크로/나노구조물의 기계/전기적 신뢰성 확보 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대의 핵심 요소인 유연기판 IT 시스템(메모리, 디스플레이), 유연태양전지, 나노소재 기반 연료전지 소자, 고성능 3차원 전자소자, 나노메타물질 소자 등의 수요 급증으로 다종의 기능성 나노물질의 직접 패터닝 공정의 개발이 시급한 시점임. 							
초고속화	✓	대용량화		저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 인쇄전자소자의 구현을 위해서는 금속전극 패턴뿐 아니라 반도체, 절연체, 도체 등의 다양한 나노소재의 직접 프린팅 공정장비 시장 시장 실현 시기 : 나노구조 투명전극 시장은 현재 존재하며 다양한 나노소재의 직접 프린팅 공정장비 시장은 2023년에 실현될 것으로 기대 							
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(4) 전자제품의 다기능화 및 스마트화를 위한 고품위 나노박막 공정 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 고집적화, 고기능화 되는 전자, 광, 에너지 소자 등에서 우수한 전기적, 기계적 특성을 가지는 나노미터 두께의 박막을 제조할 수 있는 기술로 물리적 화학적 방법으로 증착하는 기술과 소자 크기의 나노화 및 구조의 3차원화를 위한 좁은 선폭 및 높은 종횡비의 형상을 구현하기 위한 기술 및 이의 응용을 위한 공정기술 개발 							
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 물리적 화학적 방법으로 증착하는 기술과 소자 크기의 나노화 및 구조의 3차원화를 위한 좁은 선폭 및 높은 종횡비의 형상을 구현하기 위한 기술 및 이의 응용을 위한 공정기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 나노박막의 고속 대면적 원자층 식각 기술 - 이종기판 위 고품위 에피택시 나노박막 증착기술 - 고단차, 대면적 전도성 배선 및 박막 제조 및 응용 기술 - 대면적 고속 원자층 증착 장비 기술 - 기능성 나노 코팅 박막 제조 기술 - 대면적 고품위 2-D 나노소재 제조 기술 							
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 사물인터넷 기반 전자 제품의 다기능화 및 스마트화에 대한 요구가 폭발적으로 증가하므로 고품위 나노박막 공정 기술에 대한 수요는 지속적으로 확대될 것으로 전망되고 있음. 기존 박막증착 및 식각기술로는 소자 크기의 나노화 및 구조의 3차원화에 어려움이 있으며 이를 해결하기 위하여 새로운 개념의 나노증착 및 식각공정 기술이 개발되고 있음. 							
초고속화	✓	대용량화		저전력화		신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기								
	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 2013년 기준 나노박막 증착장비의 국내시장 규모는 각 985백만 불로 연평균 5%의 시장성장을 보이고 있으며 나노장비 시장의 경우 2019년 34억 불(CAGR=22%)까지 성장할 것으로 예측되고 있음. 시장 실현 시기 : 나노박막 증착장비 시장은 현재 존재하며 연평균 5%의 고성장 중임. 							
소요 기간 및 예산								
	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

(5) 대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 마이크로와 나노구조로 구성된 멀티스케일 신제품들에 대한 실시간 연속 측정과 제품 구조에 따른 각 층별 파라미터들의 통합 추출을 통해 설계와의 일치 여부를 실시간 모니터링하여 검사 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 하이브리드 광학(기하, 파동, 전자기, 양자광학) 기반 시뮬레이션 기술과 광센서를 접목한 스마트 광학 검사 시스템 기술 개발 			
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 검사 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 하이브리드 광학(기하, 파동, 전자기, 양자광학) 기반 시뮬레이션 기술과 광센서를 접목한 스마트 광학 검사 시스템 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 하이브리드 광학 시뮬레이션과 광센서가 접목된 스마트 광학검사 기술 - 광학검사 통합 플랫폼 기술 - OCD 분석법 최적화 기술 - 하이브리드 광학 시뮬레이터 기반 통합형 3D 광학 측정장비 기술 			
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 대면적 3D 나노소자의 검사 기술은 4차 산업혁명 대응 차세대 나노소자 제조 기술 상용화를 위한 필수 기술임. 마이크로와 나노기술이 접목된 3D 스마트소자의 경우 그 구조가 더욱 복잡해지고 있으며 최신의 광소자나 반도체 소자들의 경우에도 마이크로/나노구조가 혼재된 다층 박막 적층구조로 인해 검사 비용 및 시간의 증가가 심화되고 있어 이를 해결할 수 있는 기술 개발이 필요함. 			
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	기타
목표시장 및 시장 실현 시기				
	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 대면적 측정분석 장비 시장 시장 실현 시기 : 대면적 측정분석 장비 시장은 현재 존재하며 지속적 성장 중임 			
소요 기간 및 예산				
	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 			

[나노측정/분석/평가]

- 4차 산업혁명에서 나노측정/분석/평가의 기여
 - 4차 산업혁명에 필수적인 저전력, 고속, 고용량 3차원 나노소자 개발에 필요한 고속, 대면적, 3차원 물성 분석 및 소자 특성 평가 기술에 기여
 - 신기능, 고감도 센서, 첨단소재 개발에 필요한 나노소재 물성의 측정, 분석 및 평가 기술에 기여
 - 고효율, 고용량 배터리 개발에 필요한 전극, 전해질, 분리막 등의 물성 및 성능평가 기술, 신소재 적용 에너지 변환소자 전기적 특성 분석 기술 및 고효율 전력소자 분석 평가 기술에 기여
 - 나노신소재, 나노신소자 등의 적용에 따른 인체 안전성 및 제품의 나노신뢰성 평가 기술에 기여

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노측정/분석/평가 분야별 연관관계

사회 영역	관련기술 영역	나노측정/분석/평가									
		나노화학구조분석	나노물질분석	S P M 계측분석	고분해능 전자현미경	나노광측정	나노하이브리드 계측 분석	나노안전성평가 기술			
산업	IoT/인터넷	6	3	1	3	5	2	7			신기능 (신기능 나노소자 분석평가), 저전력화 (3차원 나노소자 계측)
	로봇/자율기기	5	1	2	3	4	5	6			신기능 (신기능 부품 구조 및 물성 분석)
	빅데이터/알고리즘(AI)	5	3	1	3	5	2	7			대용량화 (초고용량 메모리 소자)
	클라우드 컴퓨팅	5	2	1	4	5	2	7			대용량화 (초고용량 정보저장 소자)
	웨어러블/모바일 기기	1	2	3	4	5	5	4			신기능 (웨어러블 소재 분석)
	3D 프린팅(AM)	1	2	4	6	5	4	5			신기능 (나노 3D 프린팅기술)
	센서/액튜에이터	3	1	2	6	5	4	5			신기능 (성능평가 (초정밀도))
	첨단소재	2	1	3	5	5	7	4			신기능 (2차원 소재 특성분석)
에너지/자원/환경	신재생에너지	1	2	5	4	4	3	6			대용량화/고효율화 (고공간 분해능 에너지변환 특성 측정)
	스마트그리드										
	에너지 절약	3	2	1	6	4	5	6			저전력화 (나노소자 분석)
	에너지 저장	1	2	3	4	7	5	4			대용량화 (초고용량 배터리 기능성 평가)
	에너지 하베스팅/저장	1	2	4	6	5	5	4			대용량화 (나노에너지 변환소자 효율 평가)
	자원 절약/재활용	1	2	5	6	7	5	3			신기능 (재활용 나노소재 평가)
	환경 모니터링	3	2	7	6	5	4	1			기타/나노안전성 (나노물질 환경안정성 평가)
이동성	고용(직업)										
	운송/물류										
	자본(서비스)										
보건	맞춤의학	2	5	4	5	5	4	1			기타/나노안전성 (맞춤형 시약 안전성 평가)
	고령화 대응	2	5	3	4	6	5	1			기타/나노안전성 (환경 및 영양소의 세포영향 평가)
	사회적 대응(전염병)	2	5	4	5	6	5	1			기타/나노안전성 (세포수준 전염병 진단)
가정/개인	가전제품(생활가전)	1	2	7	6	5	3	4			신기능 (나노신뢰성 평가)
	소비제품	3	2	6	5	7	4	1			기타/나노안전성 (나노소재 안전성 및 신뢰성 평가)

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노측정 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노측정/분석/평가 (우선순위)				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	신기능 (신기능 나노소자 분석평가), 저전력화 (3차원 나노소자 계측)
	로봇/자동기기	나노물성 측정	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	나노광측정	신기능 (신기능 부품 구조 및 물성 분석)
	빅데이터/알고리즘(AI)	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	대용량화 (초고용량 메모리 소자)
	클라우드 컴퓨팅	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	대용량화 (초고용량 정보저장 장치 소자)
	웨어러블/모바일 기기	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	신기능 (웨어러블 소재 분석)
	3D 프린팅(AM)	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노안전성 평가기술	SPM 계측분석	신기능 (나노 3D 프린팅기술)
	센서/액튜에이터	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	신기능 (성능평가 (초정밀도))
	첨단소재	나노물성 측정	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	신기능 (2차원 소재 특성분석)
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노하이브 리드 계측 분석	고분해능 전자현미경	대용량화/고효율화 (고공간 분해능 에너지 변환 특성 측정)
	스마트그리드					
	에너지 절약	SPM 계측분석	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노광측정	저전력화 (나노소자 분석)
	에너지 저장	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	대용량화 (초고용량 배터리 기능성 평가)
	에너지 하베스팅/저장	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	대용량화 (나노에너지 변환소자 효율 평가)
	자원 절약/재활용	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노안전성 평가기술	SPM 계측분석	신기능 (재활용 나노소재 평가)
	환경 모니터링	나노안전성 평가기술	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	기타/나노안전성 (나노물질 환경안정성 평가)
이동성	고용(직업)					
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	기타/나노안전성 (맞춤형 시약 안전성 평가)
	고령화 대응	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	기타/나노안전성 (환경 및 영양소의 세포영향 평가)
	사회적 대응(전염병)	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	기타/나노안전성 (세포수준 전염병 진단)
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노화학구 조분석	나노물성 측정	나노하이브 리드 계측 분석	나노안전성 평가기술	신기능 (나노신뢰성 평가)
	소비제품	나노안전성 평가기술	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	기타/나노안전성 (나노소재 안전성 및 신뢰성 평가)

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노측정/분석/평가 기술 (예시)

사회 영역	관련기술 영역	나노측정/분석/평가 (우선순위)				개발대상 나노측정/분석/평가 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 신기능 나노소자 성능 평가 기술 3차원 나노소자 고정밀 측면 물성 분석 기술
	로봇/자동기기	나노물성 측정	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	나노광측정	<ul style="list-style-type: none"> 신기능 구동부품의 고정밀 표면구조 및 물성 분석 기술
	빅데이터/알고리즘(AI)	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 3D 나노구조물 고속 대면적 하이브리드 계측 기술
	클라우드 컴퓨팅	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	나노물성 측정	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 3D 나노구조물 고속 대면적 하이브리드 계측 기술
	웨어러블/모바일 기기	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 신기능 웨어러블 소재 나노특성 분석 기술
	3D 프린팅(AM)	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노안전성 평가기술	SPM 계측분석	<ul style="list-style-type: none"> 나노 3D 프린팅 요소 기술
	센서/액튜에이터	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	<ul style="list-style-type: none"> 고정밀도 센서/액튜에이터 성능 평가 기술
	첨단소재	나노물성 측정	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 분석 기술 저차원 나노소재의 특성분석 하이브리드 기술
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노하이브 리드 계측 분석	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 페로브스카이트 등 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술
	스마트그리드					
	에너지 절약	SPM 계측분석	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노광측정	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 나노소자 고정밀 측면 물성 분석 기술 초저전력 나노소자 특성분석 기술
	에너지 저장	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 배터리 전극, Redox flow cell 등의 전기 효율성 측정 기술
	에너지 하베스팅/저장	나노화학 구조분석	나노물성 측정	SPM 계측분석	나노안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 나노 에너지 변화소자 고정밀 효율 평가 기술
	자원 절약/재활용	나노화학 구조분석	나노물성 측정	나노안전성 평가기술	SPM 계측분석	<ul style="list-style-type: none"> 재활용 나노소재 물성 평가 기술
	환경모니터링	나노안전성 평가기술	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	<ul style="list-style-type: none"> 나노물질 환경 안전성 평가 기술
이동성	고용(직업)					
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	나노하이브 리드 계측 분석	<ul style="list-style-type: none"> 맞춤 의약품 평가 시스템 기술
	고령화 대응	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 환경 및 영양소의 세포영향 평가 기술 단일세포의 노화 이미징 및 검지 기술
	사회적 대응(전염병)	나노안전성 평가기술	나노화학 구조분석	SPM 계측분석	고분해능 전자현미경	<ul style="list-style-type: none"> 세포 수준의 전염병 진단 기술
가정/개인	가전제품(생활가전)	나노화학구 조분석	나노물성 측정	나노하이브 리드 계측 분석	나노안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 가전제품 적용 나노소자 신뢰성 평가 기술
	소비제품	나노안전성 평가기술	나노물성 측정	나노화학 구조분석	나노하이브 리드 계측 분석	<ul style="list-style-type: none"> 소비제품 적용 나노소재의 나노안전성 및 나노신뢰성 평가 기술

5. 개발대상 나노측정/분석/평가 내용 요약

(1) 3차원 나노소자 고밀도 측면 물성 분석 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> IoT/인터넷의 중요도가 올라가는 4차 산업혁명 시대에서 고밀도 고집적의 소자 개발은 필수적이며 이를 소자의 공정 및 성능을 계측할 수 있는 기술이 요구됨. 고밀도·고집적도를 실현하기 위해 3차원으로 쌓는 소자의 3D 구조 및 측면을 분석하는 기술 개발 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 기존 평면(2D) 구조의 한계를 극복하기 위해 도입된 입체(3D) 구조의 공정 기술인 핀펫(FinFET)의 3D 구조 및 측면의 나노계측 기술 개발 측면의 형상을 비롯하여 전기적 성질을 측정할 수 있는 계측 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 10 nm 이하 FinFET 구조를 측정할 수 있는 3D 나노계측 기술 개발 나노소자 공정에 적용하기 위한 인라인용 3D 나노계측 자동화 기술 개발 FinFET 분석 자동화 알고리즘 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명으로 불리는 전 방위적 기술과 문화의 혁신은 반도체 시장의 격변을, 이는 다시 새로운 기술을 촉진하며 성장의 사이클을 끊임없이 회전시키고 있으며 이 시장의 공정 문제에 솔루션을 제공하는 나노계측 기술의 개발은 필수불가결한 선택임. 최근의 반도체 호조세가 4차 산업혁명의 영향 때문이며 이는 반도체 산업의 수요처가 점차 소형화, 개인화되고 있으며 특정 주력 제품에 집중되기보다 모든 전자기기에 반도체 칩을 적용하는 개념으로 기기별 요구 특성이 다변화되기 때문임. 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 반도체 시장 시장 실현 시기 : 현재 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 10억원/년 (30억원) 						

(2) 나노 3D 프린팅 요소기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 3D 프린팅은 산업의 패러다임을 바꿀 수 있는 최신 기술로 매우 빠르게 성장 중 ● 나노소재와 나노제어 기술이 발전됨에 따라 나노크기의 적층구조를 자유롭게 만들 수 있는 안정된 기술이 미래 시장을 이끌게 되리라 기대함. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 나노미터 해상도(<100 nm)의 3D 프린팅 요소 기술 개발 - 3차원 나노구조물 제작과 응용 ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 3D 프린팅용 나노입자, 나노섬유 등 나노소재 제작 기술 개발 - 3D 프린팅용 나노소재 출력 기술 개발 - 3D 나노프린팅을 위한 나노 제어 및 적층 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 4차 산업혁명의 근간이 될 수 있는 고정밀 적층구조(Additive Manufacturing) 개발 ● 소비자 맞춤형 생산을 통한 단품종 제조생산 기술의 리얼타임 통합 솔루션 제공 ● 제조업과 ICT 융합의 제조 공정 혁신을 통한 4차 산업혁명 견인 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 소비재, 전자, 자동차, 의료, 항공우주 ● 시장 실현 시기 <ul style="list-style-type: none"> - 2015년부터 매년 20~30% 성장률 예상 - 2020년 이후 시장 급성장 예상 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(3) 2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 분석 기술

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 그래핀, MoS₂와 같은 2차원 나노소재의 대면적 전자소자 응용을 위해서는 성장된 나노소재의 전기적 특성 균일도 측정이 필요하고 이때 측정 과정에서 2차원 나노소재의 손상이나 변형이 이루어지지 않아야 함. 이러한 요구조건에 적합한 2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 측정을 위한 장비 및 측정 방법을 개발 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 4 인치 이상의 대면적 2차원 나노소재의 신뢰성을 갖는 전기적 특성측정 방법 개발 2차원 나노소재 전기적 특성 측정을 위한 장비 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> Micro 4-point probe(M4PP) 방법을 이용한 2차원 나노소재 측정 방법 개발 SPM 장비와 결합한 M4PP 측정 모듈 개발 2차원 나노소재 전기적 특성측정에 적합한 M4PP 프로브 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 그래핀, MoS₂와 같은 2차원 나노소재는 4차 산업혁명에 필수적인 초저전력 소자, 신기능 센서 등에 필요한 핵심소재로 다양한 응용분야가 예상되고 있음. 이러한 소재의 전기적 특성 응용을 위해서는 성장된 나노소재의 국소 영역 전기적 특성 및 대면적으로 성장된 2차원 나노소재의 전기적 특성의 균일도 측정을 동시에 수행할 수 있어야 하는 것이 필요하지만 이러한 두 가지 측정을 동시에 수행하는데 어려움을 겪고 있어 기술 발달에 제약 요소로 작용하고 있음. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	√	기타		
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 <ul style="list-style-type: none"> 2차원 나노소재 전기적 특성 측정 장비 또는 SPM 부착 측정 모듈 측정에 필요한 프로브(probe) (소모품) 시장 실현 시기 : 2020년 이후 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2020 (3년) 소요 예산 : 7억원/년 (21억원) 						

(4) 저차원 나노소재 특성분석 하이브리드 기술

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 양자점, 나노선, 그래핀, MoS₂와 같은 저차원 나노소재들의 물성, 나노구조, 화학구조의 고유한 특성 분석을 위해서 나노소재 양상을 특성이 아닌 개별 나노소재의 분석이 필요함. 개별 나노소재들의 특성 분석을 위해서는 고분해능 전자현미경 기술과 다양한 물성분석 기술이 결합되어야 하며 이를 위한 다양한 분석용 나노소자들이 필요함. 이러한 분석용 나노소자 제작 기술 및 이를 결합한 나노소재 특성분석 하이브리드 기술을 개발 필요 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 전자현미경내에서 저차원 나노소재 기본물성 분석을 위한 나노소자 개발 전자현미경과 결합된 나노소재 기본물성 분석기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> Push-to-Pull 방법 등을 이용한 2차원 나노소재 물성 측정 방법 개발 투과전자현미경용 PTP 소자, 나노인덴터 특성분석 소자 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 양자점, 나노선, 그래핀, MoS₂와 같은 저차원 나노소재는 4차 산업혁명에 필수적인 초저전력 소자, 신기능 센서, 고해상도 디스플레이 등에 필요한 핵심소재로 다양한 응용분야가 예상되고 있음. 이러한 소재의 기본물성 분석을 위해서는 개별 나노소재의 고정밀 물성 분석이 필수적이며 이를 위하여 고해상도 전자현미경 기술과 물성분석 기술의 결합이 필요하고 이에 필요한 다양한 분석용 나노소자 및 기구물들의 개발이 필수적임. 						
초고속화	대용량화	저전력화		신기능	✓	기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 전자현미경과 결합한 저차원 나노소재 물성분석 측정용 나노소자 및 분석 모듈 시장 실현 시기 : 2022년 이후 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2022 (5년) 소요 예산 : 6억원/년 (30억원) 						

(5) 페로브스카이트 등의 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술

개발 개요										
<ul style="list-style-type: none"> 디지털 혁명 위에 구축된 4차 산업혁명에서는 어느 때보다 자연친화적인 신재생 에너지에 대한 기술이 필수적임. 페로브스카이트(perovskite) 등의 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술을 개발하여 고효율의 신재생 에너지 개발에 기여함. 										
개발 목표 및 내용										
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 페로브스카이트 등 태양광 소재의 특성을 분석할 수 있는 나노계측 기술 개발 나노계측 기술로 측정 된 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 알고리즘 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 페로브스카이트 등 태양광 소재의 나노크기 수준의 분해능을 갖는 무결함(artifact free) 계측 기술 선정 및 개발 전기적 특성을 측정할 수 있는 KPFM, EFM, SSRM, SCM 등의 정량계측 기술 개발 태양광 소재의 전기적 특성 데이터 분석 알고리즘 개발 										
4차 산업혁명과의 연관성										
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명은 에너지 분야에도 혁신을 일으켜 에너지 분야와 연관분야를 융합, 에너지의 디지털화를 촉진하는 에너지 4.0 시대로 진입 중임. 4차 산업혁명 시대에서는 신재생 에너지를 활용하는 시대에서 더 나아가 지능적인 제품 생산과 스마트한 에너지 사용이 가능해지는 것을 의미함. 4차 산업혁명이 성공하기 위해서는 신재생 에너지의 초고효율화를 통한 스마트한 에너지 생산 및 활용이 필요함. 										
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	기타(초고효율)	✓					
목표시장 및 시장 실현 시기										
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 태양광 산업시장 (연 20%이상 고속 성장을 하고 있음) 시장 실현 시기 : 2015년 현재 세계 태양광 시장 규모는 1.4억불이며 2020년까지 누적 9.4억불에 달할 것으로 전망 (SNE 리서치) 										
소요 기간 및 예산										
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 										

(6) 환경 및 영양소의 세포영향 평가 기술

개발 개요							
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명과 더불어 피할 수 없는 고령화 시대에 있어 환경요소와 영양소가 건강한 노년에 미치는 영향이 지대함. 다양한 환경요소와 영양소의 효과를 나노계측 기술을 이용하여 단일세포 수준에서 평가하는 분야는 4차 산업혁명 시대의 고령화에 필수적인 기술 분야가 될 것임. 							
개발 목표 및 내용							
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 나노전달 기술을 이용하여 환경요소와 영양소를 단일세포 수준에서 전달하는 기술 개발 나노계측 기술을 이용하여 단일세포 수준에서 환경요소와 영양소의 효과를 분석하는 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> Picoliter 수준에서 세포 내부, 외부, 세포막에 전달물질을 투여하는 기술 개발 살아있는 단일세포 반응 파라미터를 선정하고 이를 계측할 수 있는 기술 개발 단일세포의 반응을 자동으로 분석할 수 있는 알고리즘 개발 							
4차 산업혁명과의 연관성							
<ul style="list-style-type: none"> 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 무인 운송 수단, 3차원 인쇄, 나노기술의 6대 기술혁신으로 대표되는 4차 산업혁명에서 단일세포에서의 나노계측 기술 개발은 나노기술과 직접적인 연관이 있음. 세포에 전달하는 기술은 3차원 인쇄기술과 환경요소 및 영양소에 대한 단일세포의 반응 분석은 인공지능을 포함한 ICT의 빅데이터 기술과 간접적인 연관이 있음. 							
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	기타(나노안전성)	√		
목표시장 및 시장 실현 시기							
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 고령친화 산업시장 (2020년 72조원 시장으로 성장이 예측됨, 고령친화 산업 Report 2015) 시장 실현 시기 : 2012년 현재 27조원 시장 규모, 매년 13%의 CAGR로 성장 							
소요 기간 및 예산							
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 							

[나노인포매틱스]

1. 4차 산업혁명에서 나노인포매틱스의 기여

- 나노인포매틱스는 나노기술 관련 실험 및 계산 결과의 데이터를 기반으로 머신러닝을 통해 새로운 나노소재를 탐색하고 나노현상의 메카니즘을 규명하는 매우 효과적인 연구방법임. 나노정보학은 나노기술 관련 연구, 개발 및 응용 프로그램의 모든 측면에 영향을 미치는 통합적 학문으로서 나노물질의 구조와 물리화학적 특성은 물론 생물학적 환경과의 상호작용 및 응용 관련 정보를 분석하고 처리하기 위한 정보기술과의 융합분야임.
- 나노인포매틱스는 전 세계적으로 나노분야에의 지속적 투자를 통해 축적된 나노기술 관련 연구개발 데이터들을 가공 분석함으로써 새로운 나노지식의 발굴 가능성이 제시되면서 많은 주목을 받고 있음. 특히 IT 기술의 혁명적인 발전을 통해 나노기술 관련 데이터의 수집, 저장, 공유가 광범위하게 일어날 수 있게 됨에 따라 그 가치는 더욱 확대될 것으로 기대됨.
- 나노인포매틱스가 4차 산업혁명에 기여하는 부분은 크게 두 가지로 구분할 수 있음. 첫째는 나노데이터의 수집, 저장, 공유, 그리고 데이터 분석기법의 개발은 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅, 머신 러닝 등 4차 산업혁명의 핵심기술 개발에 기여할 것임. 둘째는 나노인포매틱스를 통한 나노소재의 개발, 나노공정의 최적화, 나노시스템 설계 등은 4차 산업혁명을 구현하는 핵심 요소기술인 나노기술 개발의 중요 R&D 도구로서의 기여임.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 나노인포매틱스 분야별 연관관계

	사회 영역	관련기술 영역	나노인포매틱스							
			나노 비 데 이 터 생 성	DB 구 축 및 운 영	데 이 터 가 시 화 분 석 기 술	정 보 학	원 천 기 술	개 발		
산업	IoT/인터넷									
	로봇/자율기기									
	빅데이터/알고리즘(AI)	2	1	3	4					기타 (R&D 데이터 관리 활용 기반)
	클라우드 컴퓨팅									
	웨어러블/모바일 기기									
	3D 프린팅(AM)									
	센서/액튜에이터									
	첨단소재									
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	1	2	4	3					신기능 (고효율 소재 탐구), 초고속화 (에너지용 첨단 나노소재 개발)
	스마트그리드									
	에너지 절약									
	에너지 저장	2	4	5	1					대용량화 (저장시스템의 성능강화) 신기능(저장용 신소재 발굴)
	에너지 하베스팅/저장	2	3	4	1					초고속화 (에너지 하베스팅 소재 발굴) 신기능(신소재 개발)
	자원 절약/재활용									
	환경 모니터링									
이동성	고용(직업)									
	운송/물류									
	자본(서비스)									
보건	맞춤의학									
	고령화 대응									
	사회적 대응(전염병)									
가정/개인	가전제품(생활가전)									
	소비제품									

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 나노인포매틱스 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	나노인포매틱스				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)	DB 구축 및 운영	나노 빅데이터 생성	데이터 가시화분석 기술	정보학 원천기술 개발	기타 (R&D 데이터 관리 활용 기반)
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기					
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터					
에너지/자원/환경	첨단소재					
	신재생에너지	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	정보학 원천기술 개발	데이터 가시화분석 기술	신기능 (고효율 소재 탐구), 초고속화 (에너지용 첨단 나노소재 개발)
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	정보학 원천기술 개발	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	데이터 가시화분석 기술	대용량화 (저장시스템의 성능강화) 신기능 (저장용 신소재 발굴)
	에너지 하베스팅/저장	정보학 원천기술 개발	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	데이터 가시화분석 기술	초고속화 (에너지 하베스팅 소재 발굴) 신기능(신소재 개발)
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학					
	고령화 대응					
가정/개인	사회적 대응(전염병)					
	가전제품(생활가전)					
	소비제품					

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 나노인포매틱스 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	나노인포매틱스				개발대상 나노인포매틱스 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)	DB 구축 및 운영	나노 빅데이터 생성	데이터 가시화분석 기술	정보학 원천기술 개발	• 나노정보학 기반 신재료 설계 프레임워크 기술
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기					
	3D 프린팅(AM)					
	센서/액튜에이터					
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	정보학 원천기술 개발	데이터 가시화분석 기술	• 데이터 기반 태양전지 소재
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	정보학 원천기술 개발	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	데이터 가시화분석 기술	• 메탄가스 저장용 다공소재 나노포어오믹스 (NanoporeOmics)
	에너지 하베스팅/저장	정보학 원천기술 개발	나노 빅데이터 생성	DB 구축 및 운영	데이터 가시화분석 기술	• 부생가스 에너지 수확을 위한 선택적 촉매물질 재료정보학 탐색
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학					
	고령화 대응					
	사회적 대응(전염병)					
가정/개인	가전제품(생활가전)					
	소비제품					

5. 개발대상 나노인포매틱스 내용 요약

(1) 나노정보학 기반 신재료 설계 프레임워크 기술

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 데이터 기반 연구 패러다임의 도래에 따른 나노빅데이터를 이용한 새로운 나노소재 설계 기술의 개발 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 신뢰성이 높은 물성 DB와 기계학습이 결합된 웹기반 나노정보학 플랫폼 구축 새로운 소재 개발을 위한 재료 설계/마이닝 프레임워크(framework) 수립 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> (빅데이터) 나노관련(실험·시뮬레이션 등) 다양한 자료의 수집·품질검증을 통한 표준화된 DB 구현 (기계학습) 최적화 기계학습을 이용한 물성(3종 이상)의 핵심표지자(key descriptor) 발굴 (플랫폼) 나노빅데이터, 기계학습 알고리즘, 웹 UI 등이 통합된 사용자 친화형 웹기반 나노정보학 플랫폼 구축 및 운영 (Feasibility) Descriptor 조합 또는 수리모델 기반의 신소재 설계 프레임워크 수립 (신소재(2종 이상) 설계·제안) 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 핵심에 해당하는 데이터 및 인공지능(기계학습)에 기반한 선도적인 연구 사용자 접근이 용이한 웹기반 나노정보학 플랫폼은 이해관계자들간의 연결/교류를 활성화하여 데이터의 품질 개선과 범위 확대, 알고리즘 업그레이드 등 지속적인 성장을 기대할 수 있는 나노소재 분야 연구 인프라임. 본 기술의 개발은 4차 산업혁명이 지향하는 ICT 기반 초연결(hyper-connected), 초지능(hyper-intelligent)화에 부합됨. 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능		기타	✓
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 나노소재 시장 <ul style="list-style-type: none"> 친환경, 에너지 관련 하이브리드, 경량, 적층가공, 초전도, 금속/복합재, 생체모방형/생체적합형, 자성, 스마트 소재 등 목표지향적인 신소재 설계에 범용적으로 활용 시장 실현 시기 : 빅데이터 처리 및 분석 기술이 실현되는 2020년 이후 시장 활성화 예측 <ul style="list-style-type: none"> * 제5회 과학기술예측조사(17) 병렬 기계학습 알고리즘: 해외 2019년, 국내 2024년 기술실현 예상 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) 데이터 기반 태양전지 소재

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 계산과학 기반의 태양전지 소재 물성 및 소자 특성 데이터베이스 구축 (태양전지 종류 특화 필요: (예시) 유기태양전지, 유-무기 태양전지, 염료감응형 태양전지 등) 머신러닝을 활용한 신규 태양전지 소재 개발 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 계산과학 기반 태양 전지 광활성 소재 물성 데이터베이스 구축 태양전지 효율 계산을 위한 소자 구조 및 물성 데이터베이스 수집 및 생성 머신러닝을 활용한 태양전지 소재 조성 및 구조 최적화 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 태양전지 광활성 소재의 가상 조성에 대한 제일원리 기반 스크리닝으로 물성 데이터베이스 생성 특화된 태양전지 소자 구성 소재 (전극층, 정공수송층, 전하수송층 등) 물성 데이터 수집 및 데이터베이스화 TCAD를 활용하여 태양전지 소자 효율 데이터베이스 구축 머신러닝을 활용한 태양전지 소자 효율 최적화 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 데이터 기반의 신규 소재 개발 제일원리 계산과 소자 특성 계산인 TCAD의 멀티스케일 계산과학 데이터베이스 머신러닝을 활용한 소재 개발 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 기존의 실리콘 기반의 태양전지 소재를 대체할 신규 태양전지 소재 시장 실현 시기 : 2020년 이후 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(3) 메탄가스 저장용 다공소재 나노포어오믹스 (NanoporeOmics)

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 천연가스 주성분인 메탄가스(CH_4)의 효율적 저장을 위한 다공소재 개발을 목표로 현재까지 발표된 다공소재(제올라이트 및 MOF 등)의 구조 및 메탄가스 저장용량 등의 빅데이터 구축 머신러닝 기술을 이용하여 다공소재의 구조-메탄가스 저장용량간 상관관계를 규명하고, 이를 기반으로 신규 메탄가스 포집용 다공소재 설계 메탄가스는 미세먼지 방출이 거의 없는 친환경 에너지원이지만 현재는 고압(CNG) 혹은 액체 상태(LNG)에서 저장하고 있어 높은 위험성과 고비용의 문제가 있음. 이런 문제를 빅데이터 및 머신러닝을 이용하여 상온, 저압에서 효율적으로 메탄가스를 저장할 수 있는 신규 다공소재 설계를 목표로 함. 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 기발표된 모든 다공소재의 구조 및 물성을 포함하는 DB 구축 Topology Data Science (TDS) 기반 다공소재 기공(pore) 분석 기술 개발 다공소재 메탄가스 저장용량 예측 머신러닝 기술 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> High-throughput screening 기술 기반 CSD 및 ICSD 결정구조 DB로부터 다공 소재 DB (density, surface area, pore size, pore volume 등) 구축 TDS 기반 기공 geometry 정량화 기술 개발 및 관련 DB 및 가시화 프로그램 개발 기발표 문헌(논문/특허)으로부터 다공소재 구조/메탄가스 저장 용량 DB 구축 High-throughput 몬테카를로 시뮬레이션 기반 메탄가스 저장용량 예측 기술 개발 머신러닝 이용 다공소재-메탄가스 상관관계 결정 머신러닝 이용 고효율 메탄가스 저장용 신규 다공소재 예측 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 현재 몇몇 그룹에서 소규모로 보유하고 있는 다공소재 DB를 통합 및 자체 확장하여 다공소재 빅데이터 구축 다공소재 빅데이터와 머신러닝 이용 신규 소재 설계 기술 개발 (현존 관련기술 전무) 차후 이러한 빅데이터와 머신러닝 기술을 이용하여 다공소재의 합성(화학반응) 가능성도 예측 가능할 수도 있을 것으로 예상 ((예) MOF의 경우 metallic node와 organic linker로 구성되어 있고 이들간 화학반응으로 결정구조가 생성됨. 확보 DB 및 머신러닝 기술을 이용하여 이들간의 성분과 화학반응성의 상관관계를 규명하고 사용자가 제시하는 metallic node와 organic linker 간의 합성 가능성 예측 가능) 						
초고속화	대용량화	✓	저전력화	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 현 CNG 및 LNG 산업 대체, 친환경 자동차 등 시장 실현 시기 : 2025년 (예상) 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(4) 부생가스 에너지 수확을 위한 선택적 촉매물질 재료정보학 탐색

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 산업 또는 일상 환경에서 쉽게 발생되는 부생가스들(예: 메탄, 일산화탄소)은 환경오염과 온실효과를 유발할 뿐 아니라, 자연에 그대로 방출되는 잔존 에너지이기도 함. 이러한 부생가스들의 효과적 포집 및 산화반응으로부터 에너지 하베스팅을 실현하기 위해서는 각 분자들에 대한 높은 선택성을 가진 촉매시스템 구현이 필요함. 높은 선택성의 촉매시스템을 실현하기 위해서는 촉매물질들에 대한 분자 선택성 데이터수집이 필요하며 여기에 나노인포매틱스 기술을 적용함으로써 새로운 촉매물질 개발을 가속화할 수 있을 것으로 기대됨. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 대표적인 부생가스들에 대한 다양한 촉매물질들의 제일원리계산 데이터베이스를 구축하고 기계학습 분석을 통한 선택성 예측 모델 개발 개발된 예측 모델로부터 고속 대량 소재 선별을 수행하여 우수 촉매물질 제안 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 메탄, CO, CO₂에 대한 선택성 촉매 실험 및 계산 데이터베이스 구축 기계학습 방법을 통한 촉매물질 선택성 예측 모델 개발 예측 모델 기반의 고속대량 소재선별 수행 및 구조-물성 연관성 규명 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 나노인포매틱스 기반 가상소재 설계기술 구현을 통해 소재 개발 비용을 최소화함. 부생가스 에너지 하베스팅 기술을 실용화하여 스마트 에너지 원천기술 확보에 기여함. 수십 년간 축적된 구조 빅데이터로부터 나노인포매틱스 기술을 활용하여 촉매 신물질을 탐색함. 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 부생가스 에너지 수확 촉매 시장 실현 시기 : 2025년 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2020 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(계산나노과학)

1. 4차 산업혁명에서 계산나노과학의 기여

- 원자 혹은 분자 수준의 제어가 필수적인 나노산업 분야에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 현상의 이해와 이에 바탕을 둔 공정 혹은 시스템의 설계 기술은 매우 중요함. 계산나노과학은 첨단의 IT 기술과 모델링 기술을 융합한 다양한 시뮬레이션 기술을 통해 나노공정과 나노시스템을 설계하고 예측하며 최적화하는 기술임. 나노기술에서는 제어해야 할 현상 자체가 거시 규모의 그것과 상이하며 공정 중에 관찰이 불가능하고 실험적 분석 역시 대단히 제한적이며 계산나노과학이 이를 극복할 수 있는 중요한 기술로 부각되고 있음.
- 4차 산업혁명의 근간인 센서, 데이터 축적 관리, 머신러닝, 액츄에이션 등의 기술들은 나노소재 및 소자에 기반하고 있음. 계산나노과학은 나노소재, 나노소자, 나노 시스템의 설계를 매우 효율적으로 진행할 수 있는 방법론으로서 4차 산업혁명을 실현하기 위한 핵심 요소 기술인 나노기술의 개발을 촉진하게 될 것임.

2. 4차 산업혁명의 주요 영역과 계산나노과학 분야별 연관관계

	관련기술 영역	계산나노과학									
		제일원리 계산기술 (반 옹 성) MD 모사 기술	메소스 케일 시뮬 레이 션 기술	계산결과 가시화 기술	멀티스 케일 시뮬레이 션 기술	계산나 노과 학 플랫폼 기술	HT 계산 나 노과 학 합 계 극복 기술	HT 계산 및 분석 기술			
산업	IoT/인터넷										
	로봇/자율기기										
	빅데이터/알고리즘(AI)										
	클라우드 컴퓨팅										
	웨어러블/모바일 기기										
	3D 프린팅(AM)	1	2	4	6	3	3	7	9		신기능 (3D 프린팅용 나노소재 설계)
	센서/액튜에이터										
에너지/ 자원/환경	첨단소재	1	2	3	5	1	6	6	4		대용량화 (첨단 나노소재 및 공정 최적화)
	신재생에너지	2	1	5	7	5	4	6	3		초고속화 (고효율 에너지 전 환용 나노소재)
	스마트그리드										
	에너지 절약										
	에너지 저장	2	1	5	7	3	4	6	4		대용량화 (에너지 저장시스템의 용량 확대)
	에너지 하베스팅/저장	2	1	5	7	3	4	6	4		신기능 (신개념 에너지 하베스팅 시스템)
	자원 절약/재활용										
이동성	환경 모니터링										
	고용(직업)										
	운송/물류										
보건	자본(서비스)										
	맞춤의학										
	고령화 대응										
가정/개인	사회적 대응(전염병)										
	가전제품(생활가전)										
	소비제품										

3. 4차 산업혁명의 주요 영역별 기여 계산나노과학 분야 및 기여 내용

사회영역	관련기술 영역	계산나노과학				4차 산업혁명 관련 기여 내용
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자동기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기					
	3D 프린팅(AM)	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	계산 나노과학 플랫폼기술	멀티스케일 시뮬레이션 기술	신기능 (3D 프린팅용 나노소재 설계)	
	센서/액튜에이터					
	첨단소재	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	메소스케일 시뮬레이션 기술	HT 계산 및 분석기술	대용량화 (첨단 나노소재 및 공정 최적화)	
에너지/ 자원/환경	신재생에너지	(반응성) MD 모사기술	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	HT 계산 및 분석기술	초고속화 (고효율 에너지 전환용 나노 소재)	
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	(반응성) MD 모사기술	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	멀티스케일 시뮬레이션 기술	계산 나노과학 플랫폼기술	대용량화 (에너지 저장시스템의 용량 확대)
	에너지 하베스팅/저장	(반응성) MD 모사기술	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	멀티스케일 시뮬레이션 기술	계산 나노과학 플랫폼기술	신기능 (신개념 에너지 하베스팅 시스템)
	자원 절약/재활용					
	환경 모니터링					
이동성	고용(직업)					
	운송/물류					
	자본(서비스)					
보건	맞춤의학					
	고령화 대응					
	사회적 대응(전염병)					
가정/개인	가전제품(생활가전)					
	소비제품					

4. 4차 산업혁명의 주요 영역별 개발대상 계산나노과학 기술 (예시)

사회영역	관련기술 영역	계산나노과학				개발대상 계산나노과학 기술 (예시) (우선순위별)
		1	2	3	4	
산업	IoT/인터넷					
	로봇/자율기기					
	빅데이터/알고리즘(AI)					
	클라우드 컴퓨팅					
	웨어러블/모바일 기기					
	3D 프린팅(AM)	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	계산 나노과학 플랫폼기술	멀티스케일 시뮬레이션 기술	• ICT 기반 능동형 기능성 (4D) 차세대 스마트 소재	
	센서/액튜에이터					
에너지/ 자원/환경	첨단소재	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	메소스케일 시뮬레이션 기술	HT 계산 및 분석기술	• 환경정화 및 감지용 2차원 재료	
	신재생에너지	(반응성) MD 모사기술	제일원리 계산기술	HT 계산 및 분석기술	• 이산화탄소 전환 광촉매 설계	
	스마트그리드					
	에너지 절약					
	에너지 저장	제일원리 계산기술 (반응성) MD 모사기술	멀티스케일 시뮬레이션 기술	계산 나노과학 플랫폼기술	• Beyond LIB형 나트륨 이차전지 소재 설계용 시뮬레이션 플랫폼	
	에너지 하베스팅/저장	(반응성) MD 모사기술	제일원리 계산기술 멀티스케일 시뮬레이션 기술	계산 나노과학 플랫폼기술	• 초소형 소자용 고효율 단원자 나노촉매 소재 설계 및 최적화	
	자원 절약/재활용					
이동성	환경 모니터링					
	고용(직업)					
	운송/물류					
보건	자본(서비스)					
	맞춤의학					
	고령화 대응					
가정/개인	사회적 대응(전염병)					
	가전제품(생활가전)					
	소비제품					

5. 개발대상 계산나노과학 내용 요약

(1) ICT 기반 능동형 기능성(4D) 차세대 스마트 소재

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 현재 3D 프린팅은 낮은 경제성, 기계적(느린 출력속도, 낮은 정밀도 등) 약점과 더불어 소재의 제약이라는 한계를 지님. 이에 ICT 기술기반 능동형 기능성(4D) 스마트 소재의 개발을 통해 현재의 소재 제약성을 극복하고자 함. 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 : 외부환경에 따라 자가 조립·변형·변화가 가능한 차세대 기능성 스마트 프린팅 소재의 개발 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - 나노규모(구조, 조성, 배열 등) 시뮬레이션을 통한 프로그래머를 나노구조체의 설계 - 주변 환경(시간, 압력, 온·습도 등)에 따른 나노구조체의 형태 변화 시뮬레이션 (메조·연속체 규모) - 프로그래머를 나노구조체에 대한 3D프린팅 최적기법 개발 및 (實寫)응용물 시연 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명 시대는 정보화로 인한 구매 요구의 다양성, 빅데이터 및 초연결 혁신 비즈니스의 증가 등으로 고객맞춤형 소품종 제품의 수요가 급증할 것으로 전망됨. 3D 프린팅은 고객맞춤형 소품종 생산/제조의 최적 기술임. 미국은 4차 산업혁명 시대의 제조업 경쟁력 회복과 제조 혁신을 위해 3D 프린팅 기술을 적극 지원 중 세계경제포럼(WEF)은 미래 유망기술로 ‘적층가공(AM, Additive Manufacturing)’을 선정(2015). 또한 가트너(Gartner)는 3D 프린팅 재료를 유망기술로 발표(2016)함. ※ 현재는 첨단 니켈 합금, 탄소섬유, 생물학적 소재, 종이, 나일론, 레진, 세라믹, 초콜릿 등의 소재를 활용 						
초고속화	대용량화	저전력화	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 항공·우주·건설·의료 등의 스마트 소재 시장 <ul style="list-style-type: none"> - 차세대 기능성 소재의 개발을 통해, 극한 환경 및 바이오메디컬(보형물, 인공장기, 피부), 전자소자, 자동차, 국방 등 다양한 분야의 신시장 개척이 가능 시장 실현 시기: 환경인지형 4D 프린팅 기술(2017, 제5회 과학기술예측조사)의 경우, 해외는 2023년, 국내는 2027년을 기술의 실현 시기로 예상하고 있음. 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) 환경 정화 및 감지용 2차원 재료

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 화석 연료의 사용으로 인한 대기 환경오염을 감지 및 정화하기 위한 2차원 재료 개발 대기오염 물질을 감지하기 위한 2차원 재료 탐색 및 빅데이터 구축 대기 중 CO_2를 변환시킬 수 있는 촉매 탐색 및 빅데이터 구축 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 제일원리계산을 통해 저압에서 CO_x, NO_x, SO_x 등의 대기오염 물질을 감지하기 위한 2차원 센서재료 탐색 제일원리기반 전기화학반응 모델링을 통해 CO_2를 CH_4, CH_3OH, C_2H_4 등 유용한 화합물로 변환시킬 수 있는 2차원 촉매 탐색 빅데이터 분석을 통해 2차원 센서재료 및 촉매재료의 설계 원리(design rule) 제안 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> High-throughput 제일원리기반 기체 분자 흡착 에너지 계산을 통해 센서로서의 성능 예측 전기화학반응 촉매의 성능을 나타내는 descriptor를 탐색하여 효율적인 2차원 촉매재료 탐색을 위한 high-throughput 기술 개발 High-throughput 계산으로 효율적인 CO_2 변환 촉매재료를 탐색하여 메카니즘을 분석하고 응력이나 도핑 등 촉매 효율을 증가시킬 수 있는 방안 모색 High-throughput 계산을 통해 얻은 빅데이터를 분석하여 센서재료 및 촉매재료의 성능을 예측할 수 있는 설계 원리 제안 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 현재까지 발표된 2차원 물질 데이터베이스 및 기개발된 데이터베이스를 이용하여 환경재료로서의 2차원 물질 데이터베이스를 새롭게 구축 개발된 데이터베이스를 실험 연구자들에게 제공하여 협업 및 데이터베이스 확장 구축된 빅데이터를 머신러닝 기술과 결합하여 설계원리를 탐색하고 새로운 물질군에서 재료 탐색 가능 						
초고속화	대용량화	✓	저전력화	신기능	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 환경센서 및 발전소용 CO_2 변환촉매 시장 실현 시기 : 2025년 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2023 (5년) 소요 예산 : 7억원/년 (35억원) 						

(3) 이산화탄소 전환 광촉매 설계

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> ● 이산화탄소(CO_2)를 합성연료의 원재료(CO, CH_4 등)로 전환하기 위한 광촉매 설계 기술 개발 ● 광촉매 설계를 위한 여기상태 해석 방법(TDDFT) 응용 기술 개발 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ● 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - CO_2 전환용 광촉매 설계 기술 개발 - 광촉매 설계에 필요한 계산방법의 개발 및 응용 연구(TDDFT 등) ● 개발 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> - CO_2 전환용 산화물 광촉매 설계 및 개발 - CO_2 전환용 비금속 광촉매 설계 및 개발 - 광촉매 설계를 위한 여기상태 해석 방법(TDDFT) 응용 기술 개발 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> ● 4차 산업혁명 시대의 친환경 에너지원에 대한 수요는 더욱 커질 전망이며 이에 대비하는 신재생 에너지의 개발이 시급함. ● 이산화탄소 전환 기술은 이산화탄소를 저감하는 동시에 활용하는 기술로서 신재생 에너지원을 마련하는 중요 기술임. 						
초고속화	✓	대용량화	저전력화	신기능		기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> ● 목표시장 : 탄소시장, 탄소 자원화 시장 ● 시장 실현 시기 : 2030년 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> ● 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) ● 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(4) Beyond LIB형 나트륨 이차전지 소재 설계용 시뮬레이션 플랫폼

개발 개요						
<ul style="list-style-type: none"> 차세대 이차전지인 나트륨(Na) 이차전지 음극, 양극, 전해질 소재의 효율적 설계를 위한 멀티스케일 시뮬레이션 플랫폼 개발 전극 안정성 향상을 위한 신규 전해질 첨가제 설계 기능 구현 개발된 플랫폼을 웹상에 공개하여 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 유도 						
개발 목표 및 내용						
<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 멀티스케일 시뮬레이션 기반 나트륨 이차전지 음극, 양극, SEI 설계 예측 기술 개발 개발된 각 모듈별 시뮬레이션 기술을 계산 비전문가도 손쉽게 사용 가능하도록 GUI(Graphical User Interface) 개발 및 공개 과제 내용 (세부과제 혹은 세부내용) <ul style="list-style-type: none"> 반응성 분자동역학 기반 P, Sn, Sb 등의 다양한 금속복합체 음극재 성능 예측 기술 개발 High-throughput 제일원리계산 기반 금속산화물계 신규 양극재 설계 기술 개발 반응성 분자동역학 기반 음극/전해질 계면 화학반응 및 SEI 형성 거동 예측 기술 개발 (첨가제 효과 고려 기능 구현) 음극 및 SEI 모듈용 반응성 힘장 (ReaxFF) 개발 개발된 시뮬레이션의 GUI 개발 및 웹상에 공개 						
4차 산업혁명과의 연관성						
<ul style="list-style-type: none"> 4차 산업혁명의 중요한 키워드는 빅데이터와 머신러닝이며 개발 플랫폼은 나트륨 이차전지 소재 빅데이터를 구축할 수 있는 환경이 될 수 있음. 개발 플랫폼을 웹상에 공개하여 많은 연구자가 사용할 수 있도록 유도하면 관련 연구자들의 계산 결과는 플랫폼 서버에 저장됨. 이를 통해 나트륨 이차전지의 빅데이터 구축 가능하고 차후에는 축적된 DB와 머신러닝 기술을 접목하여 관련 소재의 연구동향 뿐만 아니라 추가적인 관련 소재 개발까지 가능 						
초고속화	대용량화	✓	저전력화	신기능		기타
목표시장 및 시장 실현 시기						
<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : 이차전지, 전기자동차, ESS(에너지 저장 시스템, energy storage system) 시장 등 시장 실현 시기 : 2025년 (예상) 						
소요 기간 및 예산						
<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2021 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(5) 초소형 소자용 고효율 단원자 나노촉매 소재 설계 및 최적화

개발 개요	<ul style="list-style-type: none"> 초소형 소자(웨어러블, 바이오센서 등)의 실현을 위해서는 고효율·저비용 나노촉매의 개발이 필수적임. 촉매 효율을 극한으로 올리며 비용 또한 감소시킬 수 있는 고효율의 단원자 촉매 및 그 지지체의 물질 설계 및 최적화가 요구됨. 계산나노과학 기반 기술을 이용한 고효율 나노촉매 물질 설계 및 최적화를 통해 초소형 소자 개발에 큰 역할을 할 것으로 기대됨. 						
개발 목표 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> 촉매 반응 예측 방법론, 머신러닝을 활용한 지지체 물질 설계, 단원자 촉매 생성 최적화 등 계산나노과학 기반 기술 확보 고효율·저비용 단원자 촉매용 지지체 물질 설계 및 최적화 개발 내용 <ul style="list-style-type: none"> 공정 변수에 따른 지지체 구조 예측 지지체 물질 및 구조에 따른 단원자 촉매/지지체의 안정성 예측 다양한 단원자 촉매/지지체에 따른 촉매 반응성 예측 및 최적화 						
4차 산업혁명과의 연관성	<ul style="list-style-type: none"> 초소형 스마트 센서(웨어러블, 바이오 등)에 적용 가능한 고효율 촉매/지지체 소재 후보군 발굴 정보학 기반의 실시간 가장 물질 설계 						
초고속화	대용량화	저전력화	✓	신기능	✓	기타	
목표시장 및 시장 실현 시기	<ul style="list-style-type: none"> 목표시장 : IoT 기기, 스마트 센서 시장 실현 시기 : 2025년 						
소요 기간 및 예산	<ul style="list-style-type: none"> 소요 기간 : 2018 ~ 2020 (3년) 소요 예산 : 5억원/년 (15억원) 						

(2) 후보과제별 중복성 검토를 위한 검색어

① 나노소재 분야

과제명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)				
초고주파 통신소자용 유전율 변조 세라믹 소재	나노소재	무선통신	초고주파 통신	유전율 변조	
고감도 전자피부(압력, 온도) 소재	나노소재	전자피부	피부 대체	압력 온도	
고밀도/고이동도 트랜지스터용 2차원 소재	나노소재	2차원 소재	트랜지스터용	고밀도	고이동도
실시간 생체신호 모니터링용 스마트 나노섬유 복합체	나노소재	생체신호 모니터링	나노섬유	착용형	
자유곡면 3D 프린팅용 나노소재	나노소재	3D 프린팅	자유곡면	나노 분말	
환경센서용 하이브리드 나노선 소재	나노소재	하이브리드 나노선	환경센서	환경 오염물질	
에너지 효율 극대화를 위한 나노소재 기반 전기장 투과가능 투명전극	나노소재	전기장 투과	에너지 효율	투명전극	
태양광 물분해용 무전원 박막형 광전극 소재	나노소재	무전원	광전극	물분해용	
고밀도 실리콘 양자점 제어 공정 기술	나노소재	양자점	실리콘	태양전지	
제로에너지 빌딩을 위한 저방사 친환경 나노코팅 소재	나노소재	나노코팅	저방사	제로에너지	
세라믹 담지를 통한 저비용 고용량 전극소재	나노소재	이차전지용	전극소재	고용량	
태양열 집열을 통한 고성능 열전 소재	나노소재	열전 소재	태양열 집열	광반도체	
철 기반 고효율 나노촉매 소재	나노소재	나노촉매	철	수소에너지	
초소형 미세먼지 감지센서 소재	나노소재	미세먼지 센서	초소형	모바일	
상·소리 동시 구현 유연소재	나노소재	유연소재	영상	소리	유연 디스플레이
친환경 양자점 발광소재	나노소재	발광소재	양자점	친환경	
패치형 색변조 기반 질병 조기 자가진단 소재	나노소재	자가진단	색변조	플렉시블	

②~③ 나노정보소자 및 나노광전소자 분야

과제명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)			
미래 사물인터넷 시대를 위한 초저전력 반도체 소자	나노정보소자	사물인터넷	반도체	초저전력
Monoolithic 3D 집적 시스템 공정·집적·소자 기술	나노정보소자	3D 집적	모노리씨	소자
3차원 집적을 위한 레이저 공정 및 장비/소재	나노정보소자	3차원 집적	레이저	공정
고속 비휘발성 메모리 기반 자가 구조변경 시스템	나노정보소자	비휘발성	자가 구조변경	고속
초저전력 나노유연소자의 3차원 집적을 위한 본딩	나노정보소자	나노유연소자	초저전력	3차원 집적
웨어러블/모바일 기기의 유연기판에 구현 가능한 초저전력 RRAM 소자	나노정보소자	유연기판	초저전력	RRAM
원 집적 소자 기반의 차세대 CMOS 이미지 센서	나노정보소자	3차원 집적	이미지 센서	CMOS
비휘발성 로직소자를 위한 높은 저항비, 고속, 고신뢰성 메모리	나노정보소자	비휘발성	메모리	로직소자
오감인지형 센서가 내장된 표시장치	나노광전소자	집적화	표시장치	오감인지
자율주행 차량용 고선명 표시장치	나노광전소자	표시장치	원도우 맞춤형	자율주행
웨어러블 전자소자 제작용 나노기반 스트레처블 기판/TFT/발광소자 및 설계 기술	나노광전소자	스트레처블	웨어러블 소자	발광소자
스트레처블 전자소자용 침단 나노소재	나노광전소자	스트레처블	전자소자용	디스플레이
스트레처블/유연 소자를 이용한 맞춤형 의학진단용 표시장치	나노광전소자	스트레처블	표시장치	의학진단용
네트워크 활용한 고감도 스마트 진단센서 표시장치 기술	나노광전소자	진단센서	표시장치	네트워크

④ 센서/액추에이터 분야

과제명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)				
실내환경 모니터링용 나노·MEMS·CMOS 융합기술 기반 저전력 온도·습도·가스 복합환경 센서	나노센서	나노액추에이터	실내환경	복합환경센서	저전력
협업 로봇용 압전 나노-변위 액추에이터 기반 MEMS형 초음파 근접센서	나노센서	나노액추에이터	근접센서	초음파	나노-변위 액추에이터
AI 음성비서용 초소형/고신호잡음비/고지향성 MEMS 음향센서 어레이	나노센서	나노액추에이터	음향센서어레이	MEMS	음성인식
Plug-in형 분자스캐너용 나노·MEMS 융합기술 기반 초소형/저가격 근적외선 분광센서	나노센서	나노액추에이터	Plug-in	근적외선	분광센서
AR/VR용 양방향 퍼드백 UI 센서/액추에이터	나노센서	나노액추에이터	UI센서	양방향	AR
플라즈모닉 메타 소재·구조 융합 기반 초고속/고감도 테라헤르츠 영상센서	나노센서	나노액추에이터	테라헤르츠 영상센서	메타소재	플라즈모닉
대면적 유연 나노구조화 기반 고밀도 마찰대전 에너지 하베스팅 소자	나노센서	나노액추에이터	에너지 하베스팅	소자	유연
나노구조 제어 기반 고효율/고속 충전 이차전지	나노센서	나노액추에이터	이차전지	고속충전	모바일
나노구조 에너지 저장용 음극 기반 고에너지 밀도 이차전지	나노센서	나노액추에이터	이차전지	음극소재	실리콘
헬스케어 모니터링 센서 및 생체 자극 액추에이터 융복합 웨어러블 기기	나노센서	나노액추에이터	생체자극	헬스케어 모니터링	웨어러블 기기
제스처 인식 UI용 압전 MEMS형 초음파 ToF 센서 어레이	나노센서	나노액추에이터	초음파 ToF	센서 어레이	MEMS
압전 나노복합체 기반 에너지 자립형 플렉서블 압력센서	나노센서	나노액추에이터	압력센서	플렉서블	압전

⑤~⑥ 나노바이오 및 나노의학 분야

과제명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)			
생체신호 인지 기술을 이용한 감성 인식 기술	나노바이오	감성 인식	생체신호	비접촉
생체모사 기술 기반 휴대용 다중검지 바이오센서 기술	나노바이오	다중검지	바이오센서	생체모사
식품 포장지의 스마트 나노레이블 소재	나노바이오	식품포장지	나노레이블	분자감응
작물 재배환경 잔류성 유기오염 물질의 현장진단 바이오센서	나노바이오	작물재배	현장진단	오염물질
IoT 화장품 적용을 위한 기능성 나노소재	나노바이오	IoT	화장품	기능성
스마트 소자에 적용 가능한 표면항균 나노코팅 기술	나노바이오	나노코팅	표면항균	스마트 소자
인공생체 미세구조체를 이용한 인체부착용 나노소재	나노바이오	인공생체	인체부착용	소자
나노바이오 식품안전 정밀 고속 분석기기	나노바이오	식품안전	고속분석	식품독성
바이오 유해인자 감시용 나노바이오센서	나노바이오	유해인자	저가무인	환경 모니터링
고선택성 정밀 의학용 나노조영제	나노의학	나노조영제	고선택성	나노입자
개인맞춤형 약물전달을 위한 나노의학 소재	나노의학	개인맞춤형	약물전달	나노입자
동반진단 나노테라노시스 기술	나노의학	동반진단	나노테라노시스	나노입자
뇌질환 예측 및 조절을 위한 브레인 인터페이스 기술	나노의학	뇌질환	인터페이스	밀티스케일 컨넥톰
고령화 대응 나노바이오 조직재생 기술	나노의학	조직재생	생체조직	고령화 대응
감염성 질환 현장 진단용 고신뢰성, 고민감도 다중 체널 분석기기	나노의학	감염성 질환	다중체널	분석기기
인공지능용 대용량 실시간 데이터 제공을 위한 정밀 나노의료기기	나노의학	인공지능	실시간	나노의료기기
고속 다중 질병마커 검출용 나노바이오센서	나노의학	다중	질병마커	검출용

⑦~⑩ 나노장비·공정/나노측정·분석·평가/나노인포메틱스/계산나노과학 분야

과 제 명	검색어 (상응하는 영문 검색어 동시 사용)			
유연 나노소자를 위한 대면적 3D 나노패터닝 기술	나노공정	유연	나노소자	3D 나노패터닝
심유상의 유연소자의 임베디드 제조 기술	나노공정	심유	유연소자	임베디드
기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술	나노공정	직접 패터닝	나노구조	기능성
전자제품의 다기능화 및 스마트화를 위한 고품위 나노박막 공정 기술	나노공정	나노박막	공정기술	전자제품
대면적 3D 나노소자용 광기반 하이브리드 검사 기술	나노공정	3D 나노소자	광기반	검사 기술
3차원 나노소자 고정밀 측면 물성 분석 기술	나노측정	3차원	나노소자	측면물성
나노 3D 프린팅 요소기술	나노측정	3D 프린팅	적층구조	나노제어
2차원 나노소재 대면적 전기적 특성 분석 기술	나노측정	2차원 나노소재	전기적 특성	대면적
저차원 나노소재 특성분석 하이브리드 기술	나노측정	저차원 나노소재	특성분석	하이브리드
페로브스카이트 등의 태양광 소재의 공간 고분해능 에너지 변환특성 분석 기술	나노측정	에너지 변환	태양광 소재	페로브스카이트
환경 및 영양소의 세포영향 평가 기술	나노측정	세포영향 평가	환경	영양소
나노정보학 기반 신재료 설계 프레임워크 기술	나노인포메틱스	신재료 설계	프레임워크	나노빅데이터
데이터 기반 태양전지 소재	나노인포메틱스	데이터 기반	태양전지	계산과학
메탄가스 저장용 다공소재 나노포어오믹스 (NanoporeOmics)	나노인포메틱스	메탄가스 저장	다공소재	빅데이터
부생가스 에너지 수확을 위한 선택적 촉매물질 재료정보학 탐색	나노인포메틱스	부생가스 에너지	촉매물질	고선택성
ICT 기반 능동형 기능성(4D) 차세대 스마트 소재	계산나노과학	ICT 기반	능동형	기능성 4D
환경 정화 및 감지용 2차원 재료	계산나노과학	환경 정화	환경감지	2차원 재료
이산화탄소 전환 광촉매 설계	계산나노과학	이산화탄소	전환	광촉매
Beyond LIB형 나트륨 이차전지 소재 설계용 시뮬레이션 플랫폼	계산나노과학	나트륨	이차전지	멀티스케일 시뮬레이션
초소형 소자용 고효율 단원자 나노촉매 소재 설계 및 최적화	계산나노과학	단원자 나노촉매	초소형 소자용	고효율