

지능형 로봇 기반 융합연구사업 상세기획 연구

(Strategic planning for the intelligent
robot-based convergence research project)

연구기관 : 한국과학기술연구원
연구책임자 : 한상수

2022. 4.

과학기술정보통신부

안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의
개인적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견
해가 아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 임 혜 숙

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하

“지능형 로봇 기반 융합연구사업 상세기획 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 4.

연구기관명 : 한국과학기술연구원

연구책임자 : 한상수

연 구 원 : 임화섭, 김동훈, 이승용,
박해솔, 박정민, 양성욱

1. 서론

- 1.1 기획 추진 배경 3
- 1.2. 기획 추진 필요성 12
- 1.3 기획 추진 목적 및 내용 17
 - 1.3.1. 기획 추진 목적 17
 - 1.3.2. 기획 추진 체계 18
 - 1.3.3. 기획 주요 내용 21

2. 현황 및 환경 분석

- 2.1. 국내외 스마트 연구실 R&D 기술 현황 25
 - 2.1.1. 자동화와 자율화의 차이점 25
 - 2.1.2. 국외 현황 27
 - 2.1.3. 국내 현황 37
- 2.2. 국내외 스마트 연구실 R&D 정책 및 산업 동향 38
 - 2.2.1. 정책 동향 38
 - 2.2.2. 산업 동향 44
- 2.3. 현황 및 환경 분석 시사점 및 차별화 전략 47

3. AI 스마트 연구실 사업 추진 전략

- 3.1. 사업추진 비전 및 목표 53
 - 3.1.1. 사업추진 비전 및 목표 53
 - 3.1.2. 사업추진 전략 및 세부추진 과제 54

3.1.3. 세부추진 과제 구성	56
3.2. 세부추진과제 1: 촉매 및 디스플레이 나노입자 설계용 AI 스마트연구실 개발	58
3.2.1. 필요성	58
3.2.2. 기술 정의	67
3.2.3. 국내외 연구동향 및 차별성	69
3.2.4. 특허 분석	73
3.2.5. 개발 목표 및 내용	83
3.2.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	94
3.2.7. 소요예산	96
3.2.8. 기대효과 : 활용 시나리오	98
3.2.9. 발전방향	100
3.3. 세부추진과제 2: 유·무기 복합소재 개발용 AI 스마트 연구실 개발	101
3.3.1. 필요성	101
3.3.2. 기술 정의	105
3.3.3. 국내외 연구동향 및 차별성	107
3.3.4. 특허 분석	113
3.3.5. 개발 목표 및 내용	121
3.3.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	127
3.3.7. 소요예산	132
3.3.8. 기대효과 : 활용 시나리오	135
3.3.9. 발전방향	138
3.4. 세부추진과제 3: 실험실 자동화를 위한 인공지능 로봇 기반 기술	139
3.4.1. 필요성	139
3.4.2. 기술 정의	146
3.4.3. 국내외 연구동향 및 차별성	148
3.3.4. 특허 분석	153

3.4.5. 개발 목표 및 내용	190
3.4.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	200
3.4.7. 소요예산	204
3.4.8. 기대효과 : 활용 시나리오	209
3.4.9. 발전방향	212
3.5. 성과 목표 및 지표	216

4. 효율적 과제 추진을 위한 제안

4.1. 추진 체계	220
4.2. 투자 계획	221
4.3. 운영 계획	229

5. 타당성 분석

5.1. 정책적 타당성 분석	233
5.1.1. 사업추진의 시의성	233
5.1.2. 정부지원의 필요성	236
5.1.3. 국가 중장기 R&D 계획의 부합성	239
5.1.4. 기존 사업과의 차별성 및 연계성	241
5.2. 경제성 분석	243
5.3. 기대효과 및 활용방안	248
5.3.1. 과학·기술적 측면	248
5.3.2. 경제·산업적 측면	252
5.3.3. 사회·문화적 측면	253

6. 스마트 연구실 외 미래형 로봇 추가 상세기획

6.1. 세부추진과제 1: 재난현장 인명구조용 자율지능 소프트 휴머노이드	256
6.1.1. 필요성	256
6.1.2. 기술 정의	267
6.1.3. 국내외 연구동향 및 차별성	269
6.1.4. 특허 분석	275
6.1.5. 개발 목표 및 내용	288
6.1.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	291
6.1.7. 소요예산	295
6.1.8. 기대효과	298
6.2. 세부추진과제 2: 무전원 해저 탐사용 소프트 로봇 기술 개발	300
6.2.1. 필요성	300
6.2.2. 기술 정의	307
6.2.3. 국내외 연구동향 및 차별성	310
6.2.4. 특허 분석	314
6.2.5. 개발 목표 및 내용	325
6.2.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	328
6.2.7. 소요예산	330
6.2.8. 기대효과	331
6.3. 세부추진과제 3: 소재 표면 전처리 AI 로봇 개발	332
6.3.1. 필요성	332
6.3.2. 기술 정의	335
6.3.3. 국내외 연구동향 및 차별성	339
6.3.4. 특허 분석	343
6.3.5. 개발 목표 및 내용	348
6.3.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵	355

6.3.7. 소요예산	356
6.3.8. 기대효과	357
6.3.9. 발전방향	359

참고문헌

참고문헌	362
------------	-----

1. 서론

1 서론

1.1. 기획 추진 배경

▣ 기술 개발을 지연시키는 전통적 연구 체계의 한계: 좁은 전문성을 불러오는 연구방식

- 현장 연구자에게는 전문가로서의 식견과 더불어 연구 장비와 실험 과정을 다루는 숙련공으로서의 역할을 부여받음
 - 숙련공으로서 훈련받는 기간이 길어 개별 연구자와 그룹은 필연적으로 전문성이 좁아짐
- 현장의 연구 행위는 대부분 팀원급 연구원이 행하는 숙련공으로서의 노동집약적 행위로 채워져 있음
- 신소재 개발은 다학제 연구가 필요한 분야로서 전문성이 상대적으로 좁은 연구자들이 과편화되어 수행하는 연구의 조합으로 진행되고, 이에 따라 모든 연구단계에서 연구가 지연됨
- 이를 극복하기 위해 제기되는 융합연구는 그 조직이 너무 커져서 구성과 운영이 어려움 존재
- 자동화와 인공지능(AI)을 활용해 숙련공으로서의 역할을 덜어 주면 개별 연구자의 전문성이 넓어지고, 작은 조직으로도 큰 연구를 할 수 있음
- 성공한 혁신 기업은 아이디어를 신속히 시도하고 성패 결과를 적용하는 lean startup 방식을 사용하는데, 신소재 개발 연구에도 신속 연구 체계가 필요

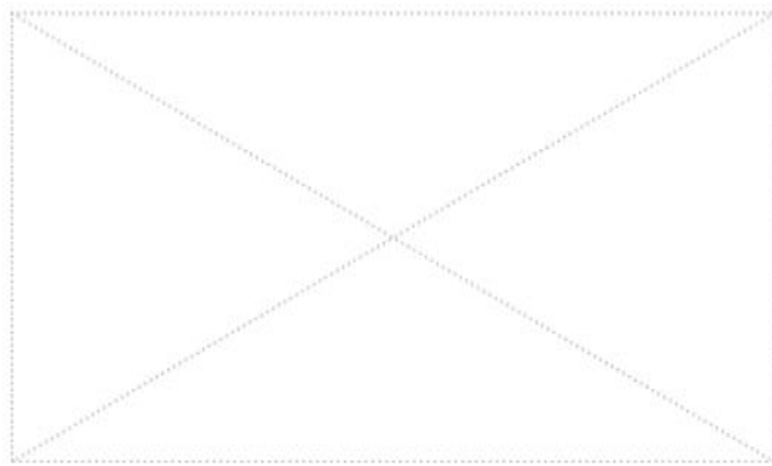
▣ 코로나의 교훈: 예측 못 한 상황에 빠르게 대응하는 연구 체계 필요

- 코로나 사태 및 이에 따라 파생됐던 요소수 사태, 일본의 소재 수출 제한처럼 예측할 수 없는 상황에서 빠르게 대응할 수 있는 연구개발 체계 필요성 대두
- 위기 대응을 위한 신속 대응 연구팀은 적은 인원으로 구성할 수 있어야 하는데, 이는 전문 영역이 넓은 연구자들이 풍부해야 가능함. 이를 위해 장비와 과정의 자동화

기술이 필요

▣ 4차 산업혁명 진입에 따른 데이터 및 AI 기반의 소재 R&D 패러다임 전환

- 4차 산업혁명 시대에 진입하면서 빅데이터가 ICT 분야를 위시한 전산업 분야에서 과학기술의 새로운 패러다임이자 신성장동력으로 급부상할 것으로 기대
- 산업화 시대의 철·석탄, 정보화시대의 인터넷처럼 스마트시대에는 데이터가 핵심 자원
- 데이터 기반 소재 R&D는 대용량 소재 데이터의 수집, 저장 및 관리를 수행하는 인프라와 데이터과학, AI 기술 등을 이용하여 소재 데이터를 적극적으로 활용하는 소재정보학을 활용하는 신소재 연구개발이 새로운 패러다임이 형성되고 있음
- AI를 활용해 기술 개발을 가속하는 연구만이 아니라 AI를 활용한 연구자동화 기술 개발 자체가 가속되고 있어서 뒤처지지 않기 위한 빠른 대처 필요



[소재 R&D 패러다임 변화]
(출처: Advanced Science, 2019)

▣ 향후 국가의 소재 산업 경쟁력은 데이터가 좌우: 양질의 소재 데이터 신속 확보 필요

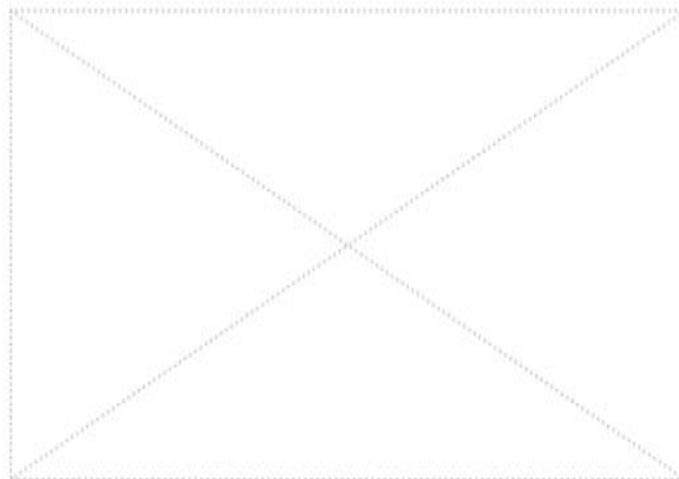
- (고품질 데이터의 중요성) 인공지능 기술을 통해 신소재를 빠르게 설계 및 개발하기 위해서는 양질의 소재데이터가 뒷받침돼야 함

- 국가적으로 소재데이터의 중요성을 인식하여 2020년에 과기부 지원으로 ‘소재 연구데이터 플랫폼 구축 사업’이 시작되었고, 이 사업을 통해 소재 연구 데이터를 수집·저장·관리 체계를 구축 중임
 - (데이터 통일성/재현성) 연구그룹마다 실험 조건 및 장비 등이 달라 동일 소재에 대한 데이터라 할지라도 모아서 보면 데이터의 양만 늘어날 뿐 활용하기 어렵고, 재현되지 않은 데이터가 많음
 - 양질의 데이터를 체계적으로 생성하기 위해서는 동일 장비에서 대량·신속(High-throughput)하게 소재 데이터를 생산할 수 있는 플랫폼 필요
- (데이터, AI+로봇 융합 필요성) 소재 공정 및 물성 데이터의 대량·신속 생산을 통한 양질의 실험 데이터를 생산하기 위해 로봇의 도움으로 실험의 자동화 구현이 필요하고, 더 나아가 로봇에 AI 기술을 접목하여 로봇을 지능화하여 로봇 스스로 신소재를 개발할 수 있도록 해야 함
- 소재 합성·분석 시 반복적인 실험(예, 조합실험 등)에서 로봇의 도움으로 자동화하여 신속하게 관련 소재 데이터를 확보할 수 있고, 양질의 데이터를 확보하기 위해서는 이러한 로봇 자동화 기술을 적극적으로 도입할 필요 있음
 - 향후 로봇에 AI 기술을 접목하여 (로봇의 지능화), 로봇 스스로 소재설계부터 합성·분석까지 수행하여 신소재를 개발하는 수준까지 도달 가능
- (계산-실험 간극 해소) 신소재 개발을 가속하기 위해서는 소재의 ‘구조-물성’ 간 상관관계 이해에 머물지 않고 ‘구조-물성-공정’간의 상관관계 이해로 확장해야 함
- 최근 계산과학 기술을 통해 소재 개발 가속 성공사례가 보고되고 있지만, 여전히 계산(이론)과 실험 사이에 간극 존재
 - 계산-실험 사이의 간극을 해소하기 위해서는 기존 계산과학의 ‘구조-물성’ 상관관계 연구를 확장하고 AI 기술을 도입하여 ‘구조-물성-공정’ 상관관계를 파악하려는 노력이 필요
 - 자동화 로봇시스템에 의해 생성된 소재데이터는 계산-실험 간극 해소 검증에도 활용 가능

■ 소재개발 가속화를 위한 순환고리형 (Closed-Loop) 신소재 개발 접근전략 필요

- 신규 소재 개발은 상용화까지 10~20년 걸리고 많은 인력과 자원이 필요

- 특히 산업 고도화로 인해 시행착오식의 실험으로는 고성능 소재 개발에 한계 존재
- 소재개발 가속화를 위한 新연구방법으로서 계산과학 외에 조합실험법(한 번에 여러 조건에서 소재 합성 혹은 물성 평가하는 기술) 또한 많이 활용되고 있음
 - 최근에는 조합실험기술에 로봇 자동화를 접목하여 단순 반복적인 작업의 효율성을 높이기도 하지만, 기본적으로 이러한 접근법은 시행착오 연구방식에서 탈피하지 못하고 있음
- 이러한 문제점을 해결하기 위해서 단순 ‘자동화 기술’을 통한 소재 개발기술이 아닌 AI 기술 접목을 통한 ‘지능형’ 소재 개발 혁신기술이 필요
 - 단순히 지정한 후보물질에 대한 소재합성·성능측정의 자동화에 그치는 것이 아닌, 분석결과 기반으로 새롭게 실험을 계획하고 후보물질을 자율적으로 샘플링하고 다시 합성함을 반복함으로 자율적으로 소재를 개발할 수 있는 Closed-Loop 신소재 개발법이 필요

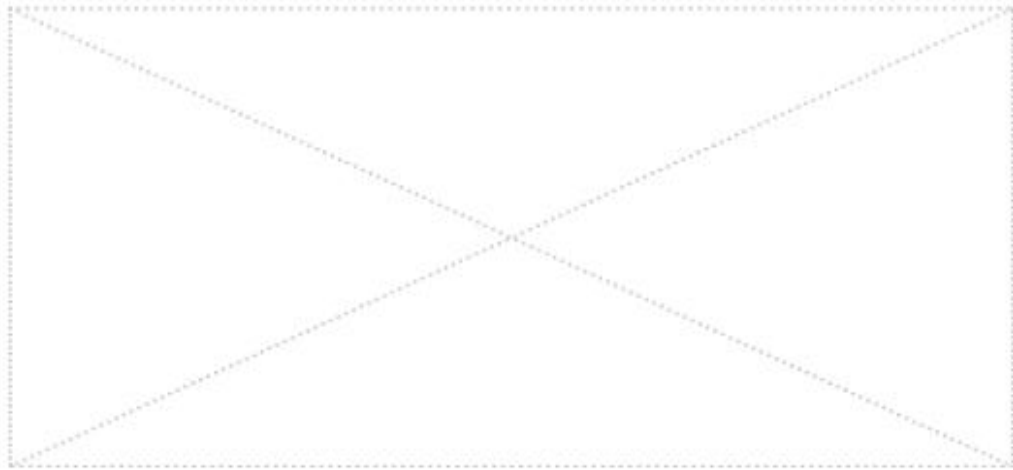


[Closed-Loop 신소재 개발법]
(출처: KIST 계산과학연구센터)

▣ 소재개발 가속화를 위한 데이터·AI·로봇·소재분석 등의 기술 융합 및 통합시스템 필요성

- 자율적 소재 탐색이 가능한 Closed-Loop 신소재 개발법 구현을 위해서 실험 계획, 후보물질 샘플링, 합성, 측정, 분석, 실험 계획 수정의 일련 작업을 수행할 수 있는 시스템이 필요

- 특히 연구자의 개입 없이 전 작업이 수행되기 위해서는 데이터 기반으로 계획과 의사결정이 가능한 AI 기술과 실험 수행을 위한 로봇이 필요하고 측정 결과로부터 실험계획 수정이 가능한 정보를 추출할 수 있는 소재 분석기술 필요
- Closed-Loop을 통한 신소재 탐색 혹은 조건 최적화를 위해서는 각 요소기술의 개발뿐만 아니라 요소기술들이 유기적으로 융합된 통합시스템이 개발되어야 함
 - AI 기반 실험계획은 대량의 데이터 기반으로 초기 실험 조건을 선정하고, 분석 결과를 기반으로 AI가 다음 실험을 계획 후 그 조건에 따라 로봇이 실험을 수행할 수 있도록 하는 유기적인 개발 필요
- 소재 개발에 가장 큰 병목으로 작용하는 연구자의 합성·측정 등 실험 수행, 분석 및 실험계획을 자동화 및 자율화함으로써 소재 개발 가속화
 - 노동시간 단축으로 연구자 부재 시 개발이 지연되는 연구자 의존 소재 개발 방법에 비해, AI 로봇 기반 소재개발시스템은 주7일 24시간 작업이 가능하여 개발시간 단축 가능
 - 로봇을 활용한 자동화로 신뢰성과 성공확률이 높은 실험 수행으로 개발시간 단축 가능
 - 소자 및 소재의 고도화로 실험계획 시 고려해야 하는 디자인 인자 및 공정 변수의 무수히 많은 조합을 효율적으로 탐색할 수 있는 AI 실험계획 모델 필요
- Closed-Loop을 통한 소재 개발 가속화를 위해 Closed-Loop 내에서 생성되는 대량의 메타데이터(합성조건, 분석조건 등 소재 특성 및 성능에 미칠 수 있는 모든 형태의 데이터)의 체계적 수집과 효율적 활용이 필요
 - 연구자 의존 소재 개발법은 합성 및 측정에 대한 체계적 메타데이터 수집이 비효율적이며 메타데이터 기반 실험계획 수립이 어려움
 - 합성과 측정 자동화 및 디지털화를 통해 메타데이터를 체계적으로 수집하고, 메타데이터 기반 강화학습 가능한 AI 기반 실험계획 모델을 적용하여, Closed-Loop이 반복됨에 따라 진화하는 스마트 소재연구실 구축
 - 연구자의 개입에 따른 실험 수행에서의 불확실성(실수 혹은 습관 등) 배제를 통해 메타데이터 기반으로 자동 실험 재현 시 동일 결과를 얻을 수 있도록 하여 축적되는 실험 데이터의 신뢰성 확보



[AI와 로봇 기반의 자율 소재 개발 시스템]

(출처: *Trends in Chemistry* 2019, 1, 282)

■ 다양한 공간·물리·화학적 환경에서 안전하게 움직이는 AI 로봇 개발에 연구 공정 데이터 필요

- 개발되지 않은 기술을 만들어야 하는 연구 현장(연구실)은 산업 현장(예, 공장)보다 다양하고 유동적인 환경임
 - 연구 현장에서는 여러 화학 약품을 산업 현장보다 훨씬 다양한 조건에서 다루고, 실험 과정을 바꾸기도 하며 로봇이 움직일 공간 배치가 바뀌기도 함
 - 연구 현장에서는 예기치 못한 화학적 부반응도 발생하고, 여러 가지 유독 물질이 발생하기도 함
 - 유동적인 실험 순서와 공간 구성, 다양한 화학적 환경에서도 안전성을 확보하기 위해서는 실험 공정 데이터를 훈련 시킨 AI 로봇이 필요함

■ 포스트 코로나 시대를 대비하여 비대면 연구 환경 조성의 중요성 대두

- 코로나19를 계기로 시공간 제약에서 자유로운 유비쿼터스 연구 기반 조성의 필요성 대두 (재난·재해 등 국가 위기 시, 중단 없는 연구수행 보장)
 - 코로나19 등으로 인한 비대면 일상화 및 디지털 전환추세가 가속화되고, R&D 데이터 확보·활용이 고도화됨에 따라 스마트연구실 모델 제시·구축 필요
 - 소재 분야의 비대면 연구를 위해서는 디지털 전환뿐만 아니라 사람 없이 실험 연구를 수행할 수 있는 환경이 필요하며, 이를 위해 로봇을 통한 무인 실험실

개발이 필요

- 소재 개발 시 유독 및 위험한 물질을 다루는 경우가 많아 실험실 안전사고가 종종 발생하고 있어 향후 실험실 무인화가 활발히 개발될 것으로 기대
 - 향후 AI 로봇을 통한 무인 실험실이 대중화될 것이며, 특히 위험한 물질을 다루는 실험에 적용될 것으로 기대

■ 저출산·고령화에 따른 연구/노동인구 감소로 국가경쟁력이 크게 위협받고 있음

- 세계무역기구(WTO)가 발간한 ‘세계무역보고서 2019’에 따르면 불과 20년 후 우리의 노동인구는 지금보다 17% 줄어들 것이란 전망치를 보고했는데, 같은 기간 세계평균이 17% 증가하는 것과는 정반대
 - 이 중 우리나라의 비숙련 노동인구* 감소율은 51%에 달할 것으로 추산되며, 이는 세계에서 가장 높은 수치임

*비숙련 노동자: 고등교육 수준 미만의 노동자를 의미

- 노동인구 감소는 국내총생산에 영향을 끼쳐 우리나라의 잠재적인 성장률은 2040년까지 65%로 세계평균(80%)에도 못 미칠 전망
- 인구절벽에 따른 노동력 감소를 AI 로봇을 통해 대체 가능
 - 향후 국내 제조업 분야의 노동력 감소를 AI 로봇을 투입하면 인력 부족은 일부 해결 가능할 것으로 기대
 - AI 로봇은 저출산 고령화 현상을 극복할 수 있는 기술적 열쇠일 뿐 아니라, 지속적인 경제성장을 위한 유망산업이기도 함

○ 신규 연구인력 감소에 대응

- 비단 산업 현장에서의 노동인구 감소만이 아니라 인구가 감소하는 만큼 신규 인력을 양성하는 대학의 위기가 예상되며, 연쇄적으로 연구 현장의 신규 연구인력 감소로 이어질 수 있음
- 특히, 대학의 연구인력과 정출연의 팀원급 연구원 감소는 거의 확실함
- 신소재 개발 경쟁이 점점 치열해지는 국제 상황에서 앞으로 감소할 연구인력으로도 국가 연구 경쟁력을 유지 혹은 향상시키기 위해서는 **연구 현장의 노동생산성 배가**가 필요
- 연구 과정에서 시간과 인력 소모적인 요소들을 자동화와 로봇 기술을 활용해

최소로 만들고 연구원은 연구의 본질적 목적에 맞는 일에 더 집중할 수 있게 함으로써 감소한 인력으로도 연구 경쟁력을 높여야 함

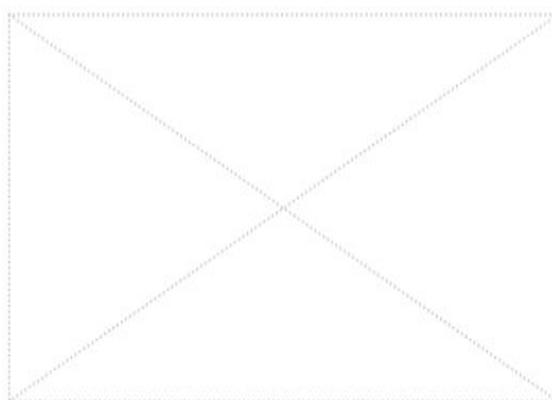
■ 노동/직업 환경 변화에도 단절 없고 유연한 연구 진행

- 근로시간 단축과 유연 근무 및 원거리 근무라는 시대의 흐름에 부응해 투입 인력 대비 효율이 높은 기술/장비 집약적 연구방식으로 전환 필요하며, 시간과 장소에 제약을 적게 받는 연구환경 필요
- 연구자 이직으로 인한 기술 상실 리스크 최소화
 - 비교적 안정적 직군인 연구자도 이직이 잦아지고 있는 상황에서, 연구자 개인에게 연구 노하우가 축적되는 현 상황은 연구자 이직으로 인한 연구 능력 상실 위험에 상시 노출되어 있음
 - 대학과 정출연에서 대학원생과 포스트닥터의 졸업 및 이직으로 인한 노하우 상실은 오래된 일상적인 현상임
 - 스마트연구실은 연구 방법과 과정의 기술적 노하우가 데이터와 AI 형태로 남아 있어 연구자 이직으로 인한 기업의 기존 연구 능력 상실 위험이 낮음

■ 비효율적 연구방식을 개선하고 고부가가치 산업으로서 연구산업 진흥

- 대한상공회의소가 진행한 '2018 국내기업의 경영여건 조사'에서 국내기업들은 세계 최고 기업 대비 혁신 속도가 절반에 머물러 있다고 응답하고 있으며, 중국에 비해서도 혁신 속도가 뒤처지고 있다는 우려가 고조 있음
- 기술혁신 주기 단축과 경쟁 가속화에 대응하기 위한 효율적 연구개발 환경 마련이 필요하며, 이를 위해 연구산업 진흥이 필요하다는 인식이 강해짐. 이런 인식으로 「연구산업진흥법」을 제정해 2021년부터 시행하고 있음
- 기존의 일반적인 연구방식
 - 연구 현장은 연구자의 전문적이지만 노동집약적인 단순 작업으로 채워져 있음
 - 최근에는 외부 서비스를 이용하는 방식으로 변해가고 있으나 소재 분석과 같은 일부분에 국한되어 있음
 - 현재의 노동집약적 연구방식을 기술/장비 집약적 연구방식으로 전환 필요
- 비효율적 연구방식을 개선하기 위한 연구 산업적 관점
 - 혁신적 연구 장비로서의 스마트연구실: 개별 연구자에게 부과되던 기능공으로

- 서의 요구를 자동화 연구 장비와 AI가 제어하는 closed-loop 연구 장비로 최소화함으로써 유동적이면서도 소수 인원으로 구성된 효율적인 연구조직 가능
- 연구개발 서비스 산업으로서의 스마트연구실: 자동화된 연구 장비나 AI가 제어하는 연구 시설들을 갖춘 연구기관이나 기업은 신소재 개발이 필요한 기업과 다른 연구기관에 적은 인력으로도 효율적인 연구 서비스를 제공할 수 있음. 따라서 신기술 개발이 필요한 기업뿐만 아니라, 새로운 고부가가치 산업으로서 연구 서비스 전문 기업과 연구산업을 성장시킬 수 있음



[연구산업과 스마트연구실과의 연계성]

(출처: KIST 계산과학연구센터)

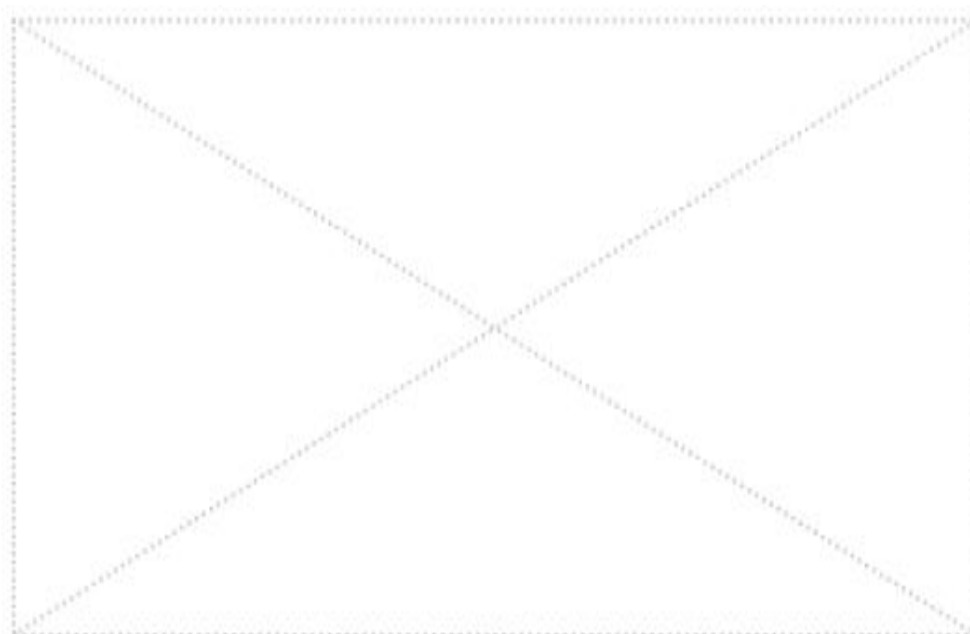
■ AI 스마트연구실 시범사업 추진 배경

- 세계적으로도 데이터·AI·로봇 융합을 통한 소재 개발 가속화 연구 사례가 적어 시범사업을 통해 성공 가능성 판단 후 타 분야로 확대 적용 필요
- 시범사업의 성공 가능성을 높이기 위해서는 소재 합성과정에 고가의 장비가 필요하지 않고 상대적으로 간단한 공정절차를 지닌 응용 분야를 선택하는 것이 바람직
- (응용분야 선정기준) 나노입자 및 유무기 페로브스카이트 소재는 합성 용이성, 물성 다양성, 응용처 다양성 등을 바탕으로 본 시범사업의 우선 소재 대상으로 선정
 - 국가 소재 연구 데이터 센터의 응용 분야에서 나노입자는 에너지·환경 소재, 페로브스카이트는 스마트·IT 소재에 해당

1.2. 기획 추진 필요성

▣ 최근 국내의 출산율 저하와 인구 고령화에 따른 노동인구 감소에 대처하기 위한 AI·로봇 기반의 연구 효율 향상 전략 필요

- AI·로봇 기반의 실험실 자동화 플랫폼 개발을 통한 연구 역량 강화
 - 소재 개발 실험에 있어, 연구자의 역할은 원하는 특성을 갖는 소재 개발을 위한 입력 물질, 합성 방법 등의 실험 계획을 수립하는 계획자의 역할과 계획된 실험을 의도대로 잘 진행할 수 있기 위한 숙련공으로서의 역할을 동시에 수행함
 - 같은 실험 계획에 따라 실험하더라도, 실험을 수행하는 사람의 숙련도에 따라 실험 성공 여부가 다름
 - 실험자의 숙련도에 따른 실험 결과 편차를 최소화하고, 연구자가 연구 계획 수립과 분석에 집중하여 연구를 가속할 수 있는 자동화 기술 필요
 - 실험자의 실험 수행을 물리적으로 대신할 수 있는 로봇 하드웨어와 로봇 구동을 위한 AI 알고리즘으로 이루어진 AI·로봇 기반의 실험실 자동화 플랫폼 개발 필요
 - 실험 설계 자동화와 AI·로봇 기반의 실험실 자동화 플랫폼의 결합을 통한 새로운 순환고리형(closed-loop) 연구방법론 필요
 - 실험실 자동화 플랫폼을 활용해 설계 자동화 AI 학습에 필요한 실험 데이터 축적 자동화 가능
 - 사용자가 원하는 합성 결과와 초기 실험 계획을 입력하면, 이후에 로봇이 스스로 실험을 수행하고 최적의 결과를 얻기 위해 실험 계획을 실시간으로 수정하는 온라인 학습 가능
 - 실험자의 개입을 최소화함으로써 연구자 1인당 연구 역량을 최대화함으로써 연구 경쟁력 확보
- ※ 영국 리버풀 대학에서 개발하여 2020년 7월에 발표한 “지능형 과학자 로봇” 기술은 실험실 안을 로봇이 자유롭게 돌아다니며 장비를 사용할 뿐만 아니라, 스스로 실험 계획을 수정할 수 있다. 총 8일 동안 172시간에 걸쳐 688건의 실험을 진행한 로봇은 그 성과로 기존 촉매보다 성능이 6배 뛰어난 광촉매를 개발했다.



[영국 리버풀 대학의 지능형 과학자 로봇]

(출처: Nature 2020)

▣ 포스트 코로나 시대의 비대면 연구 환경 조성을 위한 XR 기반 메타버스 실험실 기술 개발 필요

- AI·로봇 기반 실험실 자동화 기술 도입으로 연구 현장의 밀집도를 최소화하고 로봇의 원격 조종을 통한 실험 수행을 가능하게 하여 실험자들의 재택 근무를 활성화할 수 있음
- AI·로봇 관련 지식이 없는 소재 관련 실험자도 쉽게 조작 방법을 익히고 사용할 수 있는 사용자 친화적 인터페이스 제공이 필요함
- 실제 실험 환경을 3D 복원하고 XR 기반의 실감 인터페이스를 제공하여 사용자가 실제 실험 환경에서 직접 로봇에게 원하는 명령을 할당할 수 있는 XR 기반 메타버스 실험실 기술 개발 필요
 - XR 기반 메타버스 실험실 기술은 정부 주도의 한국판 뉴딜 10대 대표 과제 중 하나인 디지털 트윈 정책 및 관련 기술
 - 시각적인 면에서의 실감성 뿐만 아니라, 로봇 하드웨어와 촉감 등의 감각을 일정 부분 공유하여 조작의 편의성을 극대화할 수 있는 인터페이스 설계 및 관련 센서, 하드웨어 기술 개발 필요

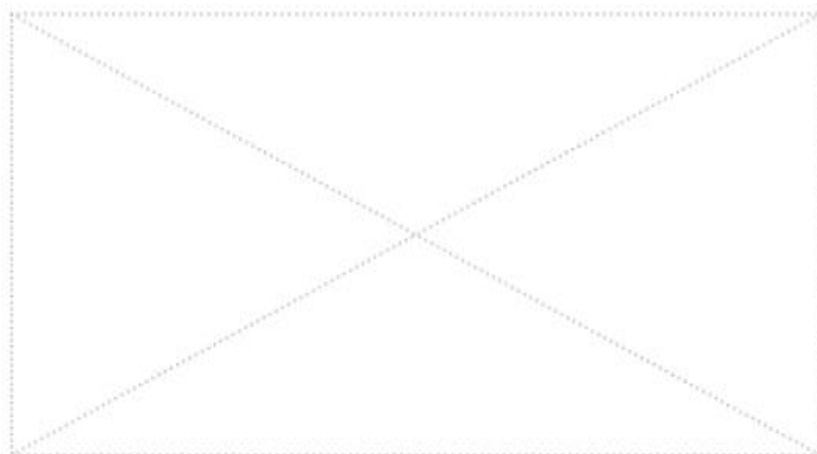


[실험실 자동화와 관련된 XR 기술 개념도 및 예시]

- 현실 로봇과 연계되지 않은 독립적인 메타버스 실험실 구동을 통해 AI·로봇 기반 실험실 자동화 플랫폼의 실험 계획을 수립하고 검토할 수 있는 시뮬레이션 환경을 제공할 수 있음

■ 실험실 자동화 기술을 통한 “자율운전 소재실험실”을 통한 소재개발 가속화 플랫폼 개발이 전 세계적 추세

- “자율운전 소재실험실”은 범국가적 선언인 “미션 이노베이션”에 의해 제안된 새로운 소재개발 가속화 플랫폼을 의미함
- 캐나다는 자율운전 소재실험실 주도국 중 하나로 Autonomous Discovery Accelerator for Materials Innovation 프로젝트를 2018년부터 진행했으며 해당 프로젝트는 국비 8백만 달러를 포함해 총 12백만 달러의 사업비로 운영되어, ADA라는 최신 AI 로봇 플랫폼을 구축하여 태양전지 소재개발에 시범적으로 적용중임



[캐나다의 ADA 플랫폼 예시]

- 미국의 국립과학재단은 Materials Innovation Platforms (MIP)라는 경쟁형 프로그램을 도입했으며, 2015년부터 진행된 1차 프로그램에서는 대량 및 박막용 결정형 경질 재료를 개발했고, 2019년부터 진행된 2차 프로그램에서는 신소재 개발을 위한 재료 연구와 생명과학의 융합 연구를 진행 중임
- 인도 정부는 2020년 9월까지 접수 받은 연구제안서를 토대로 소재 가속화 플랫폼 구축 과제를 진행 중이며 그 결과가 실용화로 이어질 수 있는 전략에 집중하고 있음
- 한국의 경우 해당 국가R&D 정책이 전무한 상황임

■ 실험실 완전무인화 관련 기술 주도권 확보를 위해서는 AI·로봇 기반 실험실 자동화 플랫폼 구축과 관련 기반 기술의 병렬적 연구가 필요함

- 1인당 연구 역량 강화와 비대면 연구 환경 조성, 그리고 화학적·방사능적 위험 요소 노출과 관련된 다양한 안전 문제를 모두 해결하기 위해서는 사람의 개입을 최소화할 수 있는 실험실 완전무인화 수준의 자동화 기술이 요구됨
- 하지만 실험실 완전무인화를 위해서는 실험 계획 수립 알고리즘, 실험 환경 및 용품 인식 AI, 자율주행 및 물품 파지를 위한 로봇 기술 등 관련 기반 기술의 고도화가 선행되어야 함
- 플랫폼을 위한 기반 기술 개발의 측면과 아울러, 각 기반 기술의 모듈화를 통해 개별 기술의 활용도를 높이고 추후 플랫폼으로의 확장성도 함께 확보하는 전략 필요
- 모듈화된 기반 기술의 빠른 시작 적용을 통해 실수요자인 연구자들의 피드백을 반영하여 요소기술의 성능을 개선하고, 추후 실험실 자동화 통합 플랫폼으로의 확장 시 참고할 수 있는 데이터 확보 필요
- 추후 통합을 고려한 장기적인 계획에 따라 실험실 자동화 플랫폼 구축을 위한 관련 인프라 기술과 AI·로봇 핵심 요소 기술들의 고도화를 병렬적으로 진행하여 실험실 완전무인화를 위한 자동화 플랫폼 기술 개발 주도권을 확보할 필요가 있음

■ 보다 큰 기술 파급력을 위한 실험실 자동화 기술의 적용 가능성 확장 필요

- 현재 개발된 실험 자동화 기기는 주로 액체를 다루는 실험으로 한정되어 개발되고 있으며, 특정 실험을 위해 개발된 자동화 기기를 다른 종류의 실험에 적용하기 어려움
- 또한, 자동화가 적용되는 공간 역시 특정 실험을 위한 기기 내부로 한정되기 때문에 재료의 공급, 분석을 위한 결과물의 이동 등에는 사람의 개입이 필요하다는 한계가 있음
- 기존 기기의 한계를 극복하고 기존 실험 장비를 최대한 활용하면서 다양한 분야에 적용 가능한 실험실 자동화 용 AI·로봇 플랫폼 개발이 필요하며, 범용성을 염두에 두고 모듈화가 가능한 형태의 기반 기술 개발 계획을 수립할 필요가 있음

■ 실험 데이터 관리 및 결과 공유를 위한 데이터 관련 기술 확보 필요

- 자동화 플랫폼 보급이 보급된다면, 사용자의 노력없이도 전산화된 다량의 실험 데이터 생산이 가능함
- 생산된 데이터를 계산나노과학 등 실험 계획 수립 AI 학습에 활용하기 위해 저장하고, 연구자 간 데이터를 공유하여 활용도를 높이기 위한 실험 데이터 플랫폼 개발이 필요함
- 국가적 자산인 실험 데이터의 오용, 도용을 막기 위한 블록체인 기반의 안전성 확보 기술 개발이 필요함

1.3. 기획 추진 목적 및 내용

1.3.1. 기획 추진 목적

소재 R&D 기간·비용의 획기적 감소 및 신소재 개발 가속화를 위한 데이터·AI+로봇 등을 융합한 지능형 소재 개발 플랫폼(스마트 연구실)의 개발전략 및 시행계획 수립

▣ 데이터·AI+로봇 등을 융합한 지능형 소재 개발 플랫폼(스마트 연구실)의 개념 및 구축 전략 수립

- 지능형 로봇 기반 소재 플랫폼 개발을 위한 응용·기반 기술의 도출 및 기술 간 체계적 연계를 위한 사업(안) 기획
 - 데이터, AI, 소재기술 등을 융합한 지능형 로봇 연구개발 추진전략 마련
 - 스마트 연구실을 통한 소재개발 가속화 실증을 위한 우선 구축 대상 소재군 발굴 및 관련 스마트 연구실의 기능 설계, 개발전략 및 다학제 융합연구 협력 방안 수립
 - 다양한 소재 응용분야로의 확장을 위한 스마트 연구실 플랫폼화 기반 기술 도출 및 개발전략 수립

▣ 4차산업혁명형 스마트 연구실의 세계 선도화를 위한 기반 기술 개발 전략 수립

- 소재개발 가속화를 위한 스마트 연구실을 구축하기 위해서 필요한 데이터, AI, 소재, 로봇 등의 기반 및 융합기술 개발전략을 수립하고, 국내 취약 분야에서의 다학제간 융합연구 방안 도출
- 스마트 연구실과 국가소재연구데이터플랫폼의 연계를 통한 데이터 생성·활용 체계 구축 전략 수립

1.3.2. 기획 추진 체계

데이터, AI, 소재, 로봇 등의 국내전문가들로 구성된 기획자문위원단을 4개의 TFT를 주축으로 추진

▣ 데이터, AI, 소재, 로봇 등의 산학연 전문가들로 기획자문위원단 구성

- KIST 내 계산과학연구센터, 물질구조제어연구센터 및 AI로봇연구소 내 데이터, AI, 로봇, 소재 전문가로 내부 기획위원 구성

<표 1-1> 기획자문위원 명단

이름	소속기관	직위	전공
한상수	KIST	센터장	소재설계, AI, 데이터
임화섭	KIST	단장	AI, 로봇
김동훈	KIST	선임연	소재설계, AI, 데이터
이승용	KIST	책임연	소재합성
박해술	KIST	선임연	AI, 로봇
박정민	KIST	책임연	AI, 로봇
양성욱	KIST	선임연	AI, 로봇
송가혜	KIST	선임연	로봇
이이수	KIST	선임연	로봇
윤상민	국민대학교	교수	AI
김진현	서울과학기술대학교	부교수	로봇
황진하	홍익대학교	교수	소재합성, 로봇
서동화	UNIST	조교수	소재설계, 로봇
최시영	POSTECH	교수	소재분석, AI
양세정	연세대학교	조교수	소재분석, AI
송승우	한국표준과학연구원	선임연	소재분석
이에리	한국화학연구원	선임연	데이터, AI

박용래	서울대학교	부교수	로봇, 소재분석
오누리	한양대학교	조교수	소재합성, 데이터
이노도	(주)LG전자소재기술원	책임연	데이터, AI

- 관련 분야 (소재 합성/분석 기술, AI, 로봇, 데이터과학 등) 산학연 외부 자문위원단 구성
- (공동기획위원장) 효율적 다학제간 융합연구 기획연구를 위해 소재 전문가 (한상수)와 AI로봇 전문가(임화섭)를 공동기획위원장으로 기획 추진

■ 기획자문위원의 전문분야에 따라 4개의 TFT를 구성하여 진행

- TFT1 (총괄 기획팀)
 - 지능형 로봇 기반 스마트 연구실 기술의 국내외 현황 분석
 - 스마트 연구실의 개념 설정
 - 스마트 연구실의 첨단 플랫폼화를 위한 응용기반 기술 정의 및 융합연구 전략 구축
- TFT2 (나노입자 스마트 연구실 기획팀)
 - 촉매 및 디스플레이 나노입자 개발용 스마트 연구실의 기능 설계 및 개발전략 기획
- TFT3 (유·무기 페로브스카이트 스마트 연구실 기획팀)
 - 태양전지 유·무기 페로브스카이트 스마트 연구실의 기능 설계 및 개발전략 기획
- TFT4 (스마트 연구실 플랫폼화 기획팀)
 - 스마트 연구실의 다양한 소재 분야에 적용할 수 있기 위한 플랫폼화 기술/기능 설계 및 개발전략 기획
 - 실험실 자동화를 위한 AI·로봇 분야 기반 기술 도출
- TFT5 (스마트 연구실 외 지능형 로봇 기획팀)
 - 스마트 연구실 분야 외 지능형 로봇에 대한 상세기획

<표 1-2> 지능형 스마트 연구실 기획을 위한 TFT 구성 인원

TFT	성명	소속기관	직위	비고
TFT-1	한상수	KIST	센터장	공동기획위원장
	임화섭	KIST	단장	공동기획위원장
	김진현	서울과기대	부교수	
	박용래	서울대	부교수	
	이노도	LG소재기술원	책임연	
TFT-2	김동훈	KIST	선임연	팀장
	이승용	KIST	책임연	
	송승우	표준연	선임연	
	오누리	한양대	조교수	
TFT-3	서동화	UNIST	조교수	팀장
	이예리	화학연	선임연	
	최시영	POSTECH	교수	
	양세정	연세대	조교수	
TFT-4	박해솔	KIST	선임연	팀장
	박정민	KIST	책임연	
	양성욱	KIST	선임연	
	윤상민	국민대	교수	
	황진하	홍익대	교수	
TFT-5	임화섭	KIST	책임연	팀장
	송가혜	KIST	선임연	
	이이수	KIST	선임연	
	최시영	POSTECH	교수	
	박용래	서울대	교수	

1.3.3. 기획 주요 내용

- 지능형 스마트 연구실의 개념과 우선 구축 분야 선정 및 구축전략 수립
- 데이터, AI, 소재, 로봇 등의 융합기술의 국내외 현황분석을 통해 스마트 연구실의 플랫폼을 위한 기반기술 개발전략 수립

■ 데이터·AI·로봇 관련 핵심기술 및 연구동향 분석

- 국내외 융합 지능형 로봇 관련 연구, 정책, 산업동향 분석 및 시사점 도출
 - 소재 데이터 및 AI 기술, 로봇을 통한 실험자동화(설계-합성-분석) 기술 등
- 국내외 연구개발 현황, 기술 수준 등의 조사·분석을 바탕으로 혁신 전략기술 확보 방향 제시

■ 지능형 로봇 기반 미래형 스마트 연구실 개발 추진전략 및 상세기획

- 관련 연구동향 분석을 통한 차별화 및 사업 추진전략 도출
- 「글로벌 소재 강국으로 도약을 위한 소재 R&D 투자 혁신 전략」(‘21.2, 제9회 국가과학기술자문회의 심의회의/소재·부품·장비 기술특별위원회)과 연계한 세부사업 상세기획
- 스마트 소재연구실 구축 관련 신규 연구과제 도출을 위한 기획
- 과학·기술적 및 경제·사회적 파급효과 분석
 - 산업생태계 구축 및 신산업 창출 전망, 비용-효과 분석 등

■ 지능형 로봇 기반 스마트 연구실 개발 상세기획 분야 및 주요내용

- (소재 응용분야 선정) 세계적으로 데이터·AI·로봇 융합을 통한 소재 개발 가속화 연구사태가 적어 우선적으로 성공 가능성이 높은 소재 분야를 선정한 후 향후 타분야로 확대 적용 필요
 - 시범사업의 성공가능성을 높이기 위해서는 소재 합성과정에 고가장비가 필요하지 않고 상대적으로 간단한 공정절차를 지닌 응용분야를 선택하는 것이 바

람직

- (응용분야 선정기준) 나노입자 및 유무기 페로브스카이트 소재는 합성 용이성, 물성 다양성, 응용처 다양성 등을 바탕으로 우선 적용 대상소재로 선택

○ (지능형 로봇 기반기술 상세기획) 지능형 로봇을 활용하여 다양한 소재 분야에 적용할 수 있도록 하는 플랫폼화된 스마트 연구실 구축을 위한 지능형 로봇 기술에 대한 상세기획 수행

- 사람의 도움 없이 지능형 로봇 스스로 소재 실험 시 인명피해는 생기지 않지만 다른 형태의 안전사고가 발생할 수 있어 안전성 확보를 위한 지능형 로봇 기술 기획
- 스마트 연구실의 플랫폼화를 위한 AI, 로봇, 확장현실(XR) 등의 융합기술 도출 및 관련 연구 상세기획

▣ 소재 연구데이터 생성·활용 체계 구축을 위한 타사업간 연계 및 차별성 확보 추진전략 도출

○ 소재 연구데이터 플랫폼 구축 사업 등 유관사업과의 차별화된 추진전략 및 사업간 연계방안 도출

- 스마트 연구실에서 생성된 소재 데이터의 국가소재연구데이터 플랫폼에 이관 계획 수립
- 스마트 연구실 개발 시 국가소재연구데이터 플랫폼 내 구축된 데이터를 활용할 수 있는 체계 수립

▣ 향후 소재 연구의 주요 인프라로서 스마트 연구실의 구축과 안정적 운영을 위한 투자전략 및 운영체계 제안

2. 현황 및 환경 분석

2 현황 및 환경 분석

2.1. 국내외 스마트 연구실 R&D 기술 현황

2.1.1. 자동화(automation)와 자율화(autonomy) 차이점

- ▣ (유사점) 자동화와 자율화는 제어 시스템과 다른 정보기술을 조화롭게 사용하여 산업 기계류와 공정을 제어, 사람이 관여할 필요를 줄이는 접근방식이라는 점에서 유사
- ▣ (자동화 개념) 자동화 프로세스(automated process)는 인간이 시키는 명령대로 움직이는 프로세스를 의미

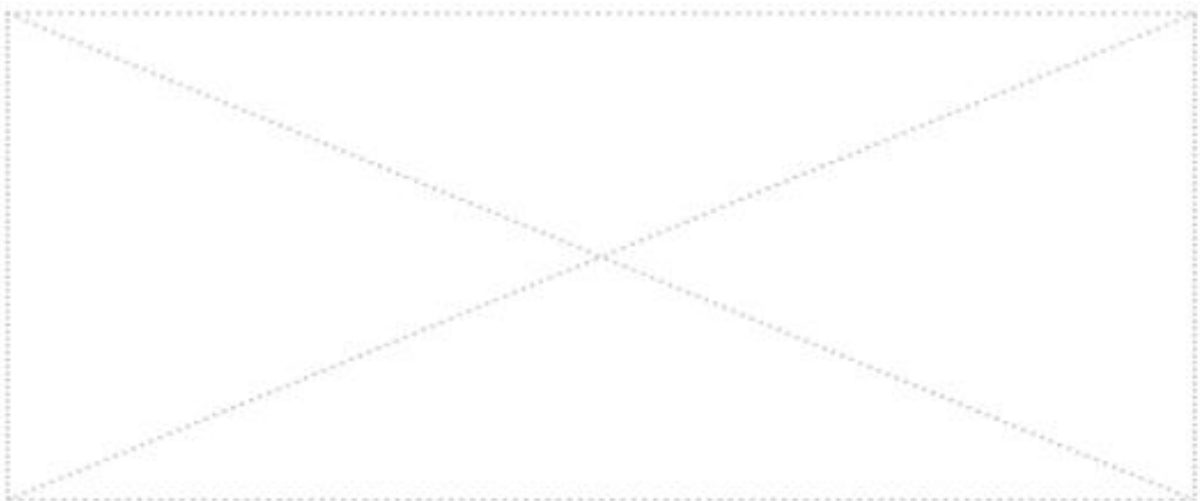
 - 로봇이 자동화 실험을 한다는 것은 인간(연구자)이 미리 프로그램에 어떤 실험을 수행해야하는지 입력을 해두면 로봇은 입력값에 따라서 충실히 실험을 수행함을 의미
 - 기본적으로 로봇 기계의 움직임을 비롯한 모든 제어통제권이 인간(연구자)에게 있음
- ▣ (자율화 개념) 자율화 프로세스(autonomous process)는 어떠한 실험을 수행할지를 인간이 아니라 AI 로봇이 자체적으로 결정

 - 실험 순서나 조건들을 AI 로봇 스스로 판단해서 수정해나가면서 실험을 진행
 - 이를 가능하게 하는 것은 AI 로봇은 단순 로봇이 아니라 데이터와 AI 소프트웨어가 탑재되어 있기 때문임
 - 자동화 시스템에서는 인간이 실험조건을 일일이 입력값으로 제공해줄 필요가 있지만, 자율화 시스템에서는 그럴 필요가 없음
 - 인간은 오로지 얻고자 하는 최종물성(target property)만 알려주면 그 물성을 가지는 소재를 합성해주는 모든 프로세스는 AI로봇이 자율적으로 판단

■ 자율화 개념을 이해하는데 가장 쉬운 사례: 자율주행차 (self-driving car
혹은 autonomous car)

- 자율주행차도 자율화의 정도에 따라서 레벨1부터 레벨5까지 다양하게 정의되지만, 가장 궁극적 목표인 레벨5 자율주행차의 경우는 인간이 자동차의 움직임에 대한 지능적 통제권을 더 이상 가지지 않음
 - 심각한 안전문제가 발생하였을 때는 인간(운전자)이 개입할 수는 있지만, 평소에는 자동차의 움직임에 세세한 명령을 내리지 않음
 - 이러한 것이 가능해지는 이유는 자율주행차에는 수많은 사진들을 바탕으로 한 빅데이터와 이를 훈련시킨 AI 모델이 탑재되어 있기 때문임
- 자율주행차에서는 탑승자는 최종 목적지만을 알려주면 자율주행차는 어떤 길을 선택할지, 보행자를 어떻게 피해갈지, 신호등을 어떻게 지킬지 등에 대한 자율적 판단이 가능하며 안전하게 목적지에 도착할 수 있게 됨
- 자율주행차의 연구실 버전이 AI 스마트 연구실로 이해하면 됨

■ 스마트연구실의 성공적 개발을 위해서는 자동화 단계를 우선 도달 후에 AI 기능을 탑재하여 자율화 단계로 가는 것이 최종목표



[스마트 연구실의 최종목표: 자동화를 넘어서 자율화 실현]

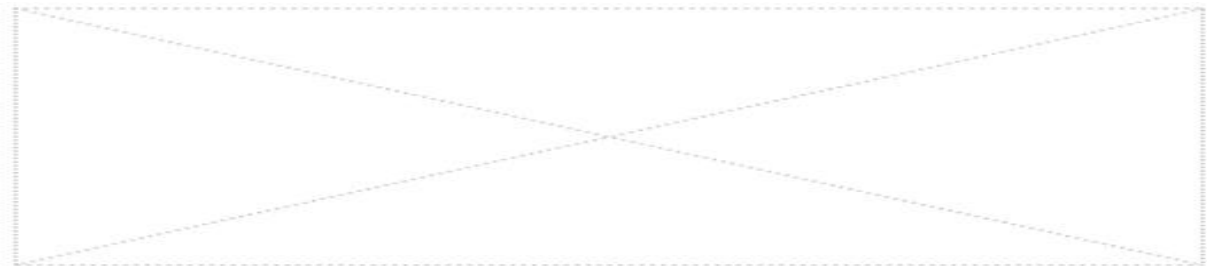
(출처: KIST 계산과학연구센터)

2.1.2. 국외 현황

(1) 실험실 자동화 표준화

▣ SiLA 컨소시엄 구성 및 활동

- SiLA(Standardization in Lab Automation)는 비영리 실험실 자동화 표준화 기구로 2009년 SiLA 1.0를 발표하였고 2016년 SiLA 2.0, 2019년에 SiLA 2.1을 발표
- SiLA는 실험 기구와 공정관리 사이의 제어와 데이터 관리를 담당하며 BIOSERO, HDC, KNIME, siobra가 주축이 되어 활동함.



[SiLA 실험실 자동화 표준화]

(2) 미국

▣ 미국 BIOSERO사는 End-2-End 자동화 통합의 목표로 실험실 자동화 스케줄링 소프트웨어인 Green Button Go 개발

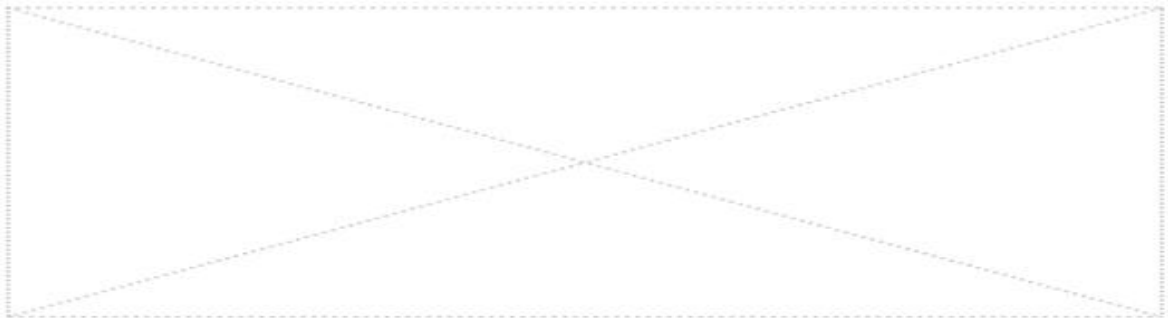
- Green Button Go는 대시보드 형태로 실험실 내의 모든 작업 흐름을 모니터링하고 스케줄을 제어할 수 있는 할 수 있는 소프트웨어로 실험실 자동화 SiLA 표준을 활용하여 실험실 관리 및 분석 소프트웨어인 KNIME 연동



[BIOSERO사의 Green Button Go 적용 자동화 실험실]

■ 미국 카네기멜론대의 인공지능 지도 자율주행 (self-driving) 실험실

- 로봇틱스(데이터 생성), 기계학습(데이터 해석), 인공지능(실험 선택) 기술을 활용하여 생물학 실험실의 자동화 기술 연구

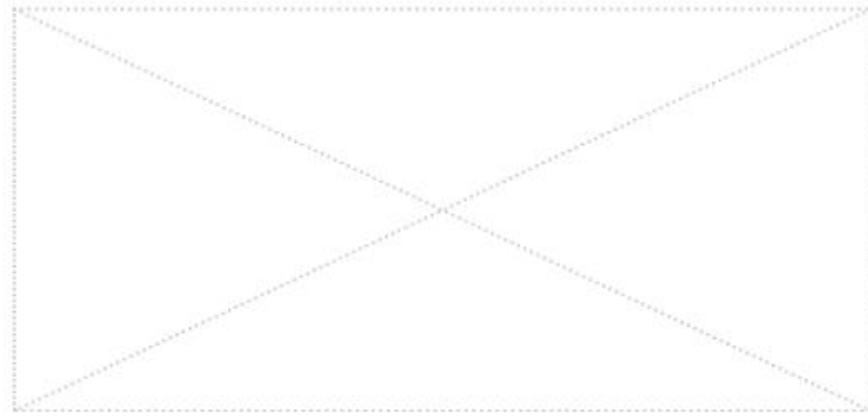


[미국 카네기멜론대의 자율주행 생물학 실험실]

■ 미국 MIT의 자율 화학 실험실

- 자율 화학 실험실은 유용한 분자를 생성하기 위한 실험 주기를 실행하였고, 한 사이클에서 인공지능은 실험을 모델링하고 화합물을 설계하고 로봇 장비는 합성을 실행하고 마지막으로 인공지능은 결과를 평가함
 - 연구자는 데이터를 해석하고 필요에 따라 실험 모델 또는 목표 정의를 조정
- 연구자가 원하는 유기물 소재의 화학구조를 입력값으로 제공하면 그 소재를 합성하는 로봇 기반 자율화 실험실 개발
 - 화학구조가 입력되면 AI 모델이 해당 물질의 구조를 파악한 후 합성의 성공을 위해서 어떤 시약이 필요한지 혹은 어떤 시약의 조합이 경제적인지 등을 판단하여 초기 반응물 시약들을 선정

- 그 후, 합성 공정을 AI이 제안하면 로봇팔이 해당 시약이 담겨 있는 모듈들을 직접 옮기면서 실제 합성을 진행
- 이 과정대로 원하는 유기 소재가 나올 때까지 연구자 개입없이 실험을 반복

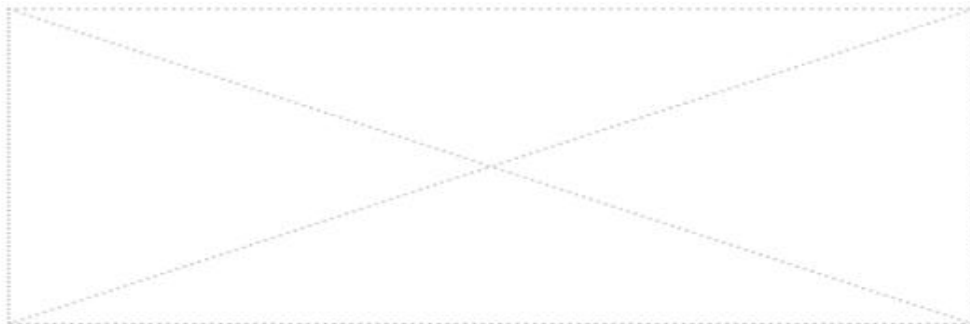


[MIT 대학의 유기물 합성경로 제안용 자율화 실험실]

(출처: Science, 2019)

■ 미국 노스웨스턴대의 최적화 기반 재료 디자인

- 자동화된 기계학습(AutoML)은 기계학습을 실제 문제에 적용하는 작업을 자동화하는 프로세스로 AutoML 방식의 베이지언 최적화 방식으로 정량적과 정성적 변수가 혼합된 재료 디자인 방법론 제시



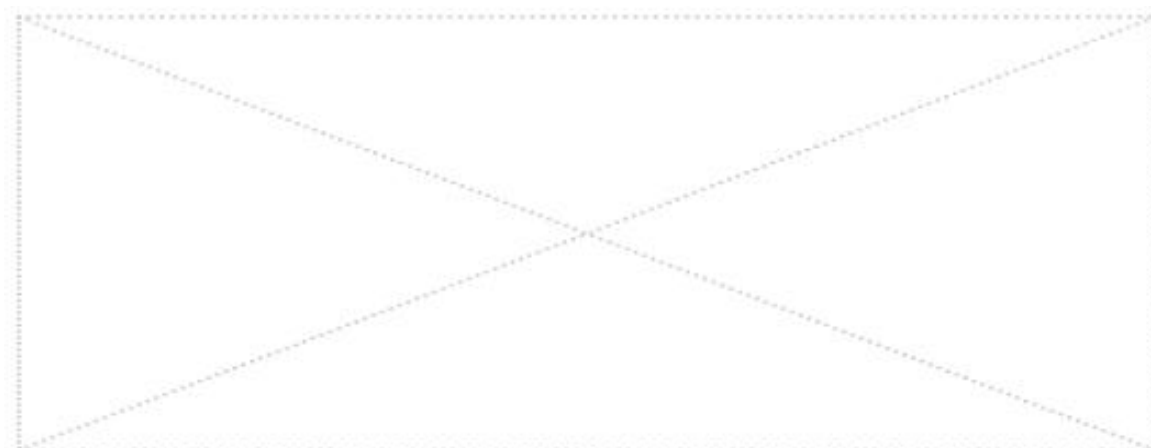
[노스웨스턴대의 AutoML 기반 재료 디자인]

(출처: Scientific Reports, 2020)

■ 미국 메릴랜드대의 능동적 학습 기반 재료 발견

- 최적 실험디자인에 사용되는 능동적 학습방식을 사용하여 실시간 페쇄루프로 phase mapping과 optimization을 자율적으로 수행하는 CAMEO를

제안하였으며 휴먼-머신 인터랙션을 통해 루프 안에서의 사람의 역할이 각 사이트들에서 중요한 역할을 하는 것을 강조

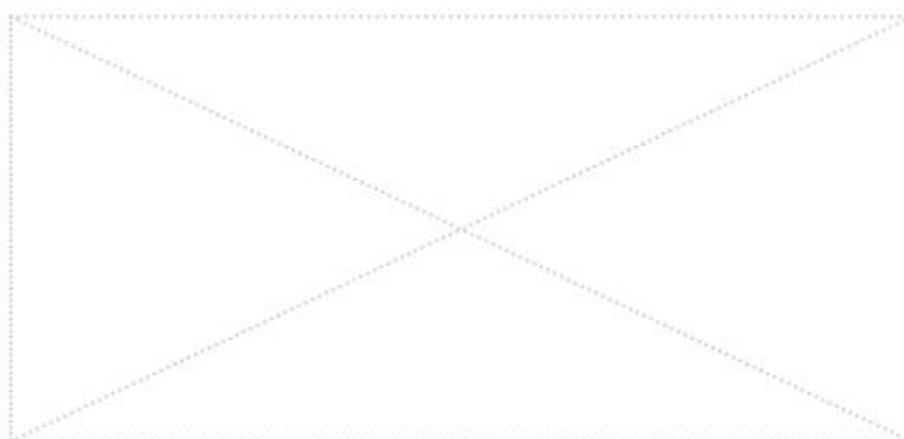


[메릴랜드대의 폐쇄 자율 재료 탐색 및 최적화 시스템]

(출처: Nature Communications, 2020)

▣ 미국 일리노이대의 자율 주행 실험 패러다임

- 전통적인 인간의 상상력과 시행착오 기반의 직접적인 디자인 접근 방식(왼쪽)이 고효율 계산 시뮬레이션과 스크리닝에 의해 가속화되고 재료 공간의 탐색을 실험실에서 컴퓨터로 이동시킴
- 재료 공간의 광범위한 검색을 피하면서 원하는 특성에서 유망한 후보 물질 예측하고, Closed-loop(순환고리 형태)의 합성 및 분석 자동화는 자율주행 실험실이 자율적으로 작동할 수 있도록 함

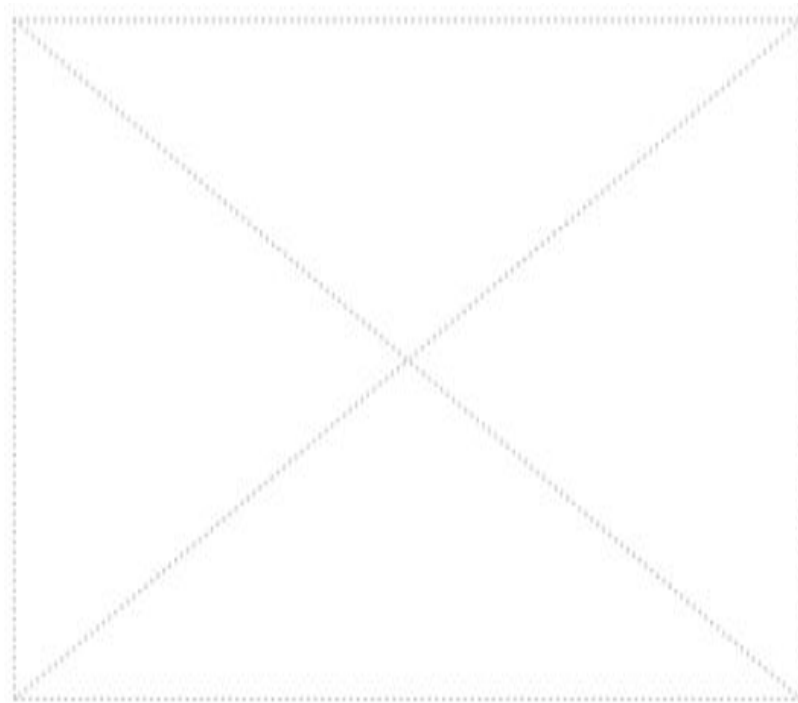


[일리노이대의 자율 주행 실험실 패러다임]

(출처: Joule, 2020)

■ 미국 노스캐롤라이나대의 보편적인 자율 주행 실험실

- 자율 주행 실험실은 실험을 수행하고 결과를 측정하는 하드웨어와 데이터를 분석하고 연구자에 의해 미리 설정된 범위 내의 다음 실험을 자율적으로 선택하는 인공지능으로 구성
- 자율 주행 실험실은 초기 가설과, 화학적, 물리적 경계뿐만 아니라 목표를 정의하는 과학자의 조수 역할을 하며 보편적 자율 주행 실험실을 달성하기 위한 자율 로봇 실험의 중요한 단계는 (1) 시스템 설계의 투명성 도입, (2) 하드웨어의 모듈화 및 표준화, (3) 개방형 적절한 AI 모델링 및 의사 결정 알고리즘을 선택하고 벤치마킹하기 위한 오픈앤세스 데이터 세트의 생성이라 주장



[노스캐롤라이나대의 보편적 자율 주행 실험실 개념]

(출처: Chem, 2021)

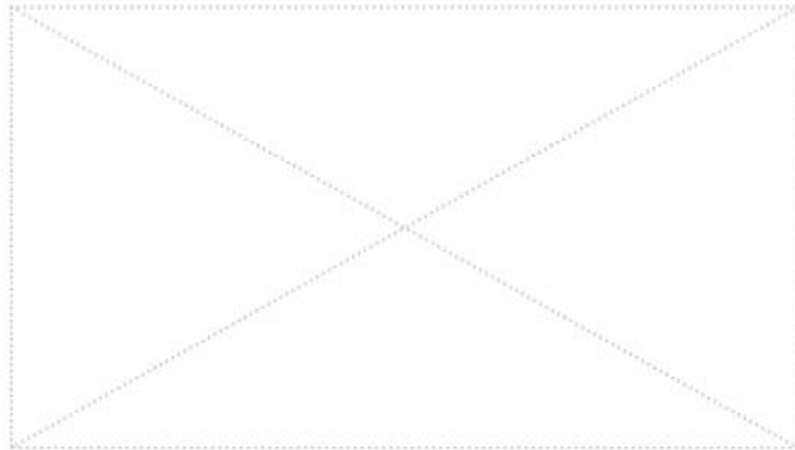
(3) 캐나다

■ 캐나다 토론토대의 인공지능 기반 자율 주행 실험실

- 인공지능과 로봇틱스를 포함하는 폐쇄루프 방식으로 재료 발견을 가속할 수

있는 자율 주행 실험실 프레임워크 제시

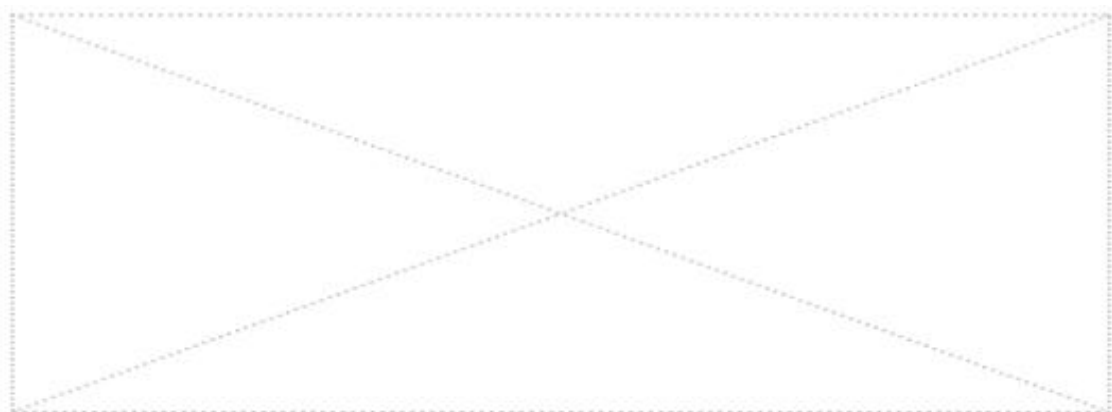
- 고효율 계산, 기계학습과 화학적 직감을 통합하여 새로운 기능적 재료를 발견하는데 필요한 시간과 비용을 10분의 1로 줄이는 것을 목표



[토론토대의 자율 주행 실험실]

▣ 캐나다 토론토대의 자율 주행 실험실 기반 차세대 실험

- 폐쇄 루프 접근 방식이 실험의 자율성을 위한 핵심 요소이며 자율 주행 실험실은 이전 실험 결과를 통해 인공지능으로 추측하고 가장 유용한 실험만 실행되도록 가설을 수정하는데 사용
 - 인공지능이 제공한 실험 과정은 발견을 가속화하고 사람과 로봇의 인터페이스로 연구자의 반복적인 작업을 없앨 수 있을 것으로 기대함
 - 인공지능 기반 최적화, 실험실 모듈화와 사용자 친화형 인터페이스 강조



[토론토대의 자율 주행 실험실의 구성 요소]

(출처: Trends in Chemistry, 2019)

▣ 캐나다 브리티시콜롬비아대의 박막 재료 자율 주행 실험실

- 필름 조합과 처리 조건을 조정하여 박막 재료의 광학 및 전자 특성을 자율적으로 최적화할수 있는 모델 기반 최적화 알고리즘을 사용하는 모듈러 로봇 플랫폼 제시



[브리티시 콜롬비아대의 박막 재료 자율 주행 실험실]

(출처: Science Advances, 2020)

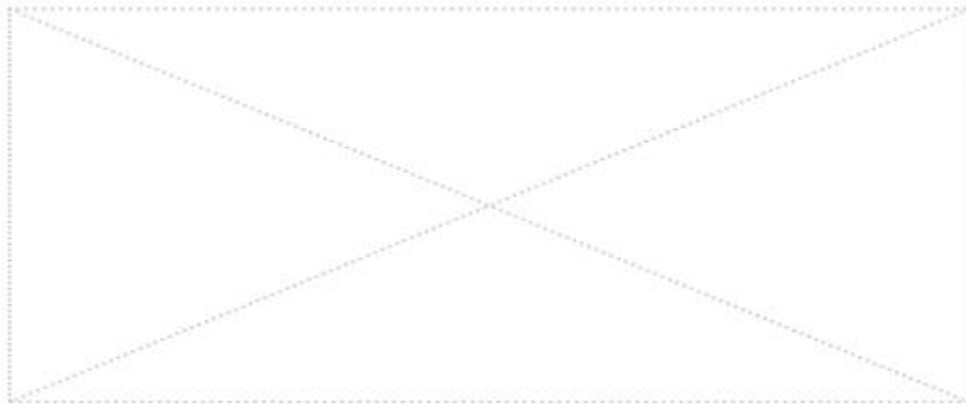
▣ 연구자-플랫폼 소통 챗봇(chatbot) 소프트웨어 개발

- 토론토 대학의 Aspuru-Guzik 교수팀은 앞으로 개발될 다양한 형태의 소재 자율화 실험실에 범용적으로 적용될 수 있는 인공지능 소프트웨어(ChemOS) 개발 (출처: PLOS ONE, 2020)
- ChemOS에는 연구자와 플랫폼이 소통할 수 있는 자연어처리 기반의 챗봇(chatbot) 기능 제공
 - 향후 자율화 실험실은 음성이나 텍스트 기반으로 연구자와 플랫폼이 소통할 수 있는 창구가 필요하고, 이때 자연어처리 기법과 음성인식 등의 고유 소프트웨어 기술들이 도입될 것으로 기대

(4) EU

- ▣ (영국) 리버풀대는 자동화된 실험실을 구축하여 보조연구원보다 1000배나 빠른 반복 실험 수행

- 독일의 쿠카 로봇을 사용하여 초기 하드웨어 구축 비용은 \$125,000에서 \$150,000정도 소요되며 제어 소프트웨어 개발에 3년이 걸렸고 LIDAR를 사용하여 스스로 주행 가능하고 일주일에 7일, 하루 22시간, 어두운 밤까지 실험 수행이 가능
- 반복적인 실험을 수행하는 데 매우 효율적이며 로봇의 활용도를 높이기 위해 다양한 실험을 수행할 수 있도록 재프로그래밍 필요
- Andy Cooper 교수는 자동화된 실험실의 목표는 기구를 자동화하는 것이 아니라 연구자를 자동화하여 연구를 가속하는 것이라고 강조

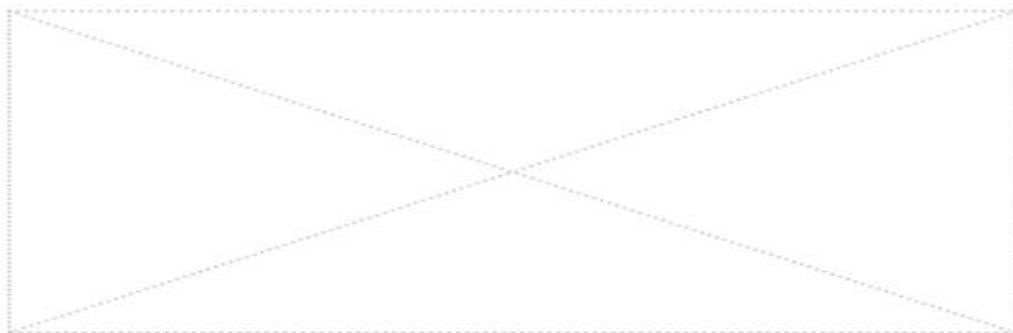


[영국 리버풀대 자동화 실험실]

(출처: Nature, 2020)

■ (영국) Robot Center사의 OTi 실험실 자동화 로봇

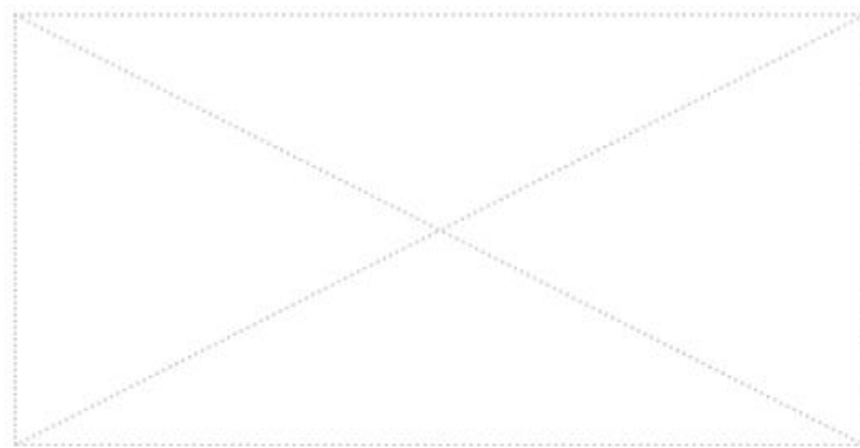
- UnitedLabs와 Astech Project와 협업하여 복잡한 실험실 작업과 생산성 증대를 위한 OTi 로봇 소개하였으며 태블릿으로 작업제어 가능하고 자사의 모바일 플랫폼과 UR 협동 로봇암을 사용



[Robot Center의 실험실 자동화 로봇 (오른쪽 야간 적외선 영상)]

▣ (독일) 프리드리히 알렉산더 대학교의 AMANDA 플랫폼

- AMANDA(Autonomous Materials and Design Application Platform)은 분산화된 재료연구를 위한 일반적인 플랫폼으로 유기 박막 태양전지 소재 개발을 위한 자율 실험실
 - 용액 처리된 박막의 분석하고 제작하기 위해 디자인되어 하루에 272개에 달하는 조합에 대해 순환고리형(closed-loop) 스크리닝을 수행 가능



[독일에서 구축한 박막 태양전지 개발용 자율 실험실]

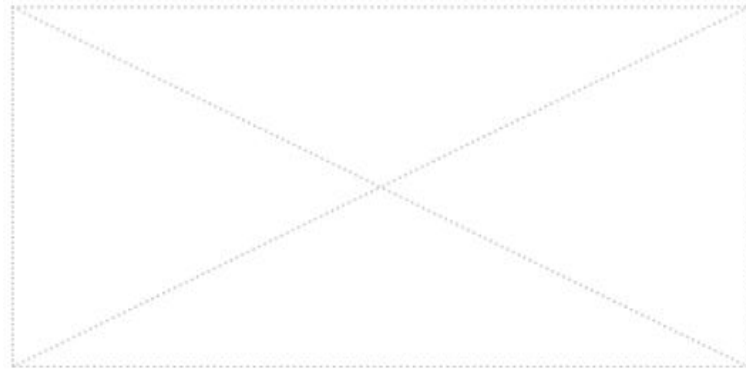
(출처: Journal of Materials Science, 2021)

▣ (독일) LabTwin의 음성 기반 디지털 실험실 보조

- LabTwin은 세계 최초의 음성과 인공지능 기반 디지털 실험실 보조로 과학자들이 실험실 장비 및 정보 시스템과 같은 다른 소스의 데이터 스트림뿐만 아니라 외부 데이터베이스에 즉시 액세스할 수 있도록 하고 개방형 API를 통해 R&D 그룹은 과학적으로 정확한 실시간 정보를 일상적인 작업 흐름에 쉽게 통합할 수 있음

▣ (덴마크) Labster사의 가상 시뮬레이션 실험실

- Labster는 전세계 2000개 이상의 대학과 교육자가 과학을 가르치는데 사용하는 가상 시뮬레이션 실험실로 직관적이고 초보자도 쉽게 실험을 이해하는데 도움이 되어 스마트 실험실 구축에 활용이 필요함

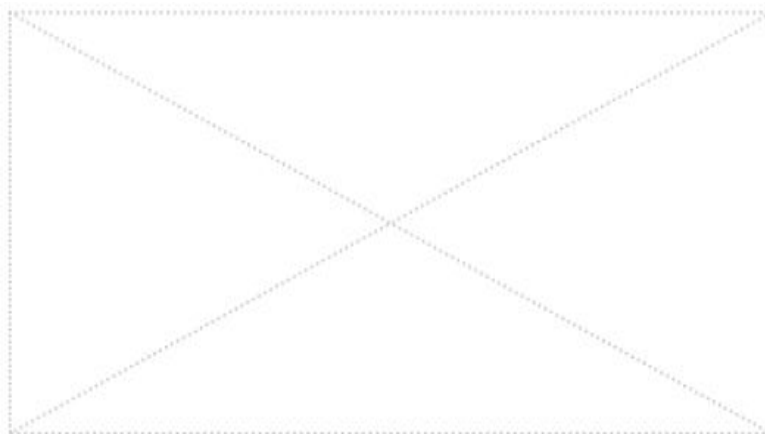


[Labster의 가상 시뮬레이션 실험실]

(5) 중국

▣ (홍콩) Shenzhen 대학에 AIRS (Artificial Intelligence and Robotics for Society) 센터에서 스마트 연구실 구축 연구 진행

- AIRS 센터는 IoT/클라우드, AI 응용, 확장현실(XR), 지능형 로봇, 컴퓨터 비전 5개팀을 중심으로 융합연구 진행 중이며, AI 응용팀을 중심으로 타팀과 협업하여 양자점 개발용 스마트 연구실 개발 중
- 타 스마트 연구실(자율화 실험실)과 달리 가상현실(VR) 기술을 도입하여 소재 합성 연구에 활용



[홍콩 Shenzhen 대학에서 구축한 스마트 연구실]

(출처: Advanced Science, 2020)

2.1.3. 국내 현황

▣ LG 및 삼성 등의 기업을 중심으로 소재 개발용 스마트 연구실 구축 중

- LG에서는 2020년 캐나다 토론토 대학과 맥마스터 대학, 프랑스 에너지석유회사 토탈(Total)과 ‘AI 기반 소재 개발 컨소시엄(A3D)’ 결성
 - 친환경 촉매와 차세대 광학소재 개발용 자동화 실험 플랫폼 구축 목표



[LG의 AI 기반 신소재 개발을 위한 A3D 컨소시엄 홍보 기사]

(출처: 파이낸셜뉴스, 2020)

- 삼성전자종합기술원에서도 배터리 소재 개발용 스마트 연구실 구축 중

▣ 일부 대학에서 재료 개발 자율화 시스템 구축 중

- UNIST에서는 재료 개발 자동화를 위해 소재의 가상탐색(virtual screening) 부터 소재 합성, 분석 후 다음 합성 방향 제시까지 연구자의 개입 최소화를 위해 기존 합성, 분석 장비를 모듈화하고 로봇을 활용하여 전 공정을 자동화하는 자율 주행 실험실(self-driving laboratory) 구축 진행

2.2.

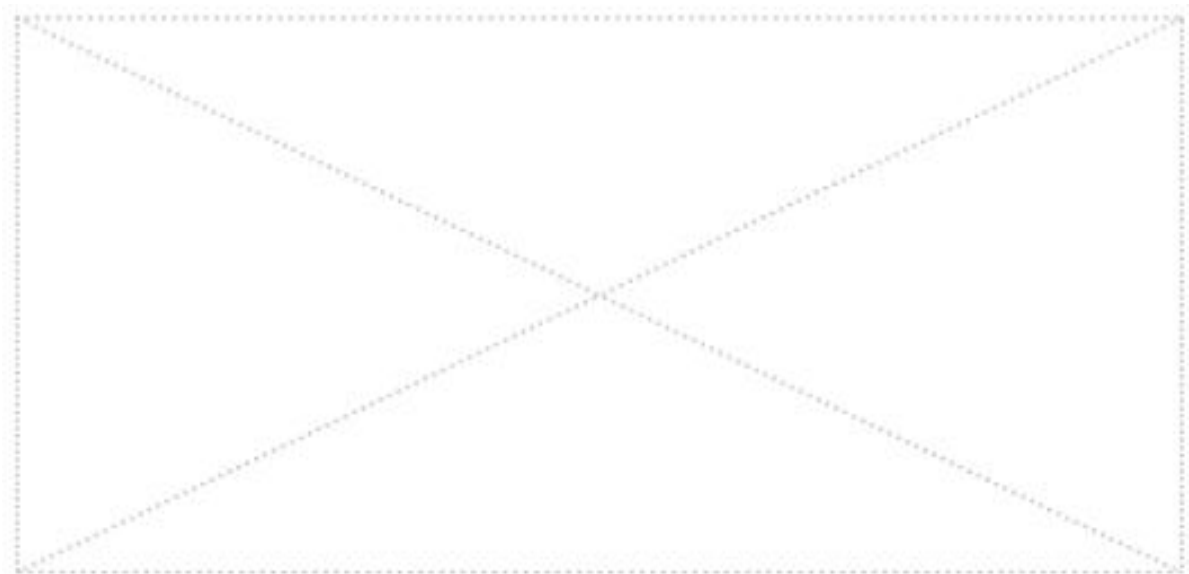
국내외 스마트 연구실 R&D 정책 및 산업 동향

2.2.1. 정책 동향

▣ 범국가적 선언인 “미션 이노베이션 (Mission Innovation)”에 의해 소재 개발 가속화를 위한 플랫폼으로 “자율운전 소재실험실” 제안됨

- 기존 유럽에서 소재 개발 자동화에 대해 국가 주도적으로 연구가 진행되어 왔으나 자율적 소재 개발 플랫폼에 대한 개념이 정립되어 있지 않았음
- ‘16년을 기점으로 5년 이내에 청정에너지 분야 연간 R&D 투자를 2배 늘리는 것을 목표로 한 세계 공동위원회 미션 이노베이션 창립됨

※ 미국, 캐나다, 멕시코, 한국, 중국, 인도, 브라질, 오스트리아, 사우디아라비아 등 24개 국가 및 유럽연합 참여



[(a) 재료 발견에 대한 현재의 비결합 접근 방식, (b) 미션 이노베이션에서 제안하는 재료 발견을 가속화하기 위해 모델링, 합성, 분석의 통합적 접근 방식, (오른쪽): 고성능, 저비용 에너지 재료를 발견하기 위한 혁신적 기술의 적용 예시]

- 미션 이노베이션의 세부 도전 중 하나인 고성능·저비용 “청정에너지 소재개발 가속화”를 위한 전략으로 '17년 제안됨
 - ① 인간의 통찰, ② AI 모델/고성능 컴퓨팅, ③ 데이터베이스, ④ 로봇 플랫폼, ⑤ 종합 조정 SW가 서로 연결 및 순환고리를 구성

- 실험실에 사람이 존재하지 않아도 소재개발 및 최적화 실험 가능
 - 기존의 소재 생산 → 물성 확인 흐름에서 요구 물성 → 소재 개발의 “역 디자인 (Inverse design)” 흐름으로 소재연구 패러다임의 혁명적 전환 가능
 - 이를 통해 소재개발 속도를 10배 더 빠르게 만들 것이라 예측
- ※ 캐나다·멕시코가 공동 주도하며, 우리나라 포함 14개 국가 및 유럽연합 참여

(1) 미국

▣ ‘15년부터 미국 국립과학재단과 방위고등연구계획국, 에너지성 주도하여 다양한 신소재 개발을 위한 소재 혁신 플랫폼 구축 프로젝트 진행

○ 미국국립과학재단 (NSF)는 “소재 혁신 플랫폼”이라는 경쟁형 프로그램 도입

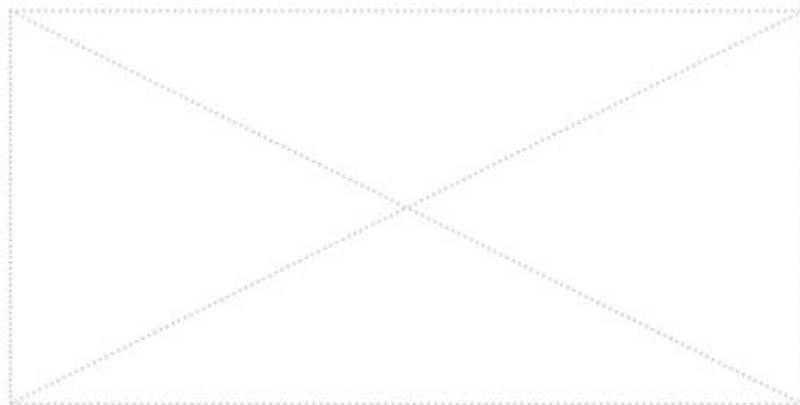
연구 기간	총사업비	프로젝트명	주관 기관	연구 주제
2016-2020 2021-2026	약 20백만달러 약 20백만달러	MIP-2DCC	Pennsylvania 주립대	미래 일렉트로닉스를 위한 2차원 박막 칼코게나이드 소재 개발
2016-2022	약 28백만 달러	PARADIM	코넬대학교	산화물과 2차원 박막 소재를 결합한 계면적 양자 소재 개발
2020-2025	약 23백만달러	GlycoMIP	버지니아 폴리테크닉 주립대	생물 및 소재융합으로 재료개발을 촉진하기 위해 소재 혁신 플랫폼
2020-2025	약 23백만달러	BioPACIFIC MIP	UCLA	효모, 균류, 박테리아 등의 생물학적인 과정을 활용해 폴리머를 대규모로 고속 합성

- 1기(‘16-’22)에는 소재 개발 가속화를 위한 소재 합성, 분석, 평가, 예측 방법 연구 개발에 집중
 - 2기(‘20-’25)에서 로봇 자동화 기술 기반으로 소재를 빠르게 준비하고 분석, 평가 자동화를 통한 소재 개발을 가속화에 집중
- 방위고등연구계획국(DARPA)의 유기화학물 합성자동화 시스템개발을 위한 ‘Make-It’ 프로젝트 추진(‘15-’19년)하였고 2021년 봄부터 “Rational Integrated Design of Energetics(RIDE)” 프로그램을 통해 로켓 추진제

개발을 위한 합성 자동/반자동화 시스템 개발할 계획임

- 유기화합물을 자동으로 합성, 정제, 분석할 수 있는 플랫폼을 구축하고, 이를 기반으로 자율적으로 합성 yield, 순도를 최적화하는 목표로 추진됨
- MIT, 퍼듀 대학, 보스턴 대학, 글라스고 대학, SRI International 등의 다국적 연구팀에 4년간 지원을 받아 의약품 분자 등을 연구자 개입 없이 자동으로 합성할 수 있는 스마트연구실을 개발함

- 에너지성(DOE)은 '소재 개발 가속화 플랫폼 (Materials Acceleration Platform)' 개발전략 수립 ('18년)



[DARPA의 지원을 받아 구축된 유기 소재 개발 자동화 시스템.
(왼쪽) SRI international에서 개발한 화학 반응기 자동화 시스템,
(오른쪽) MIT에서 개발한 화학 합성 자동화 시스템]

(2) 캐나다

▣ 자율운전 소재실험실 주도국인 캐나다 정부 Natural Resources Canada는 “재료 혁신을 위한 자율 발견 가속화” 프로젝트 ‘18년부터 진행

- 총사업비 3년간 약 12백만달러(국비 8백만달러)으로 British Columbia 大 주관하고 토론토 대학과 North Robotics사 등 다수의 연구팀이 참여
- “ADA”라는 최신 AI 로봇 플랫폼을 구축하여 고효율·저비용 태양전지 소재개발 및 최적화를 시범적으로 진행



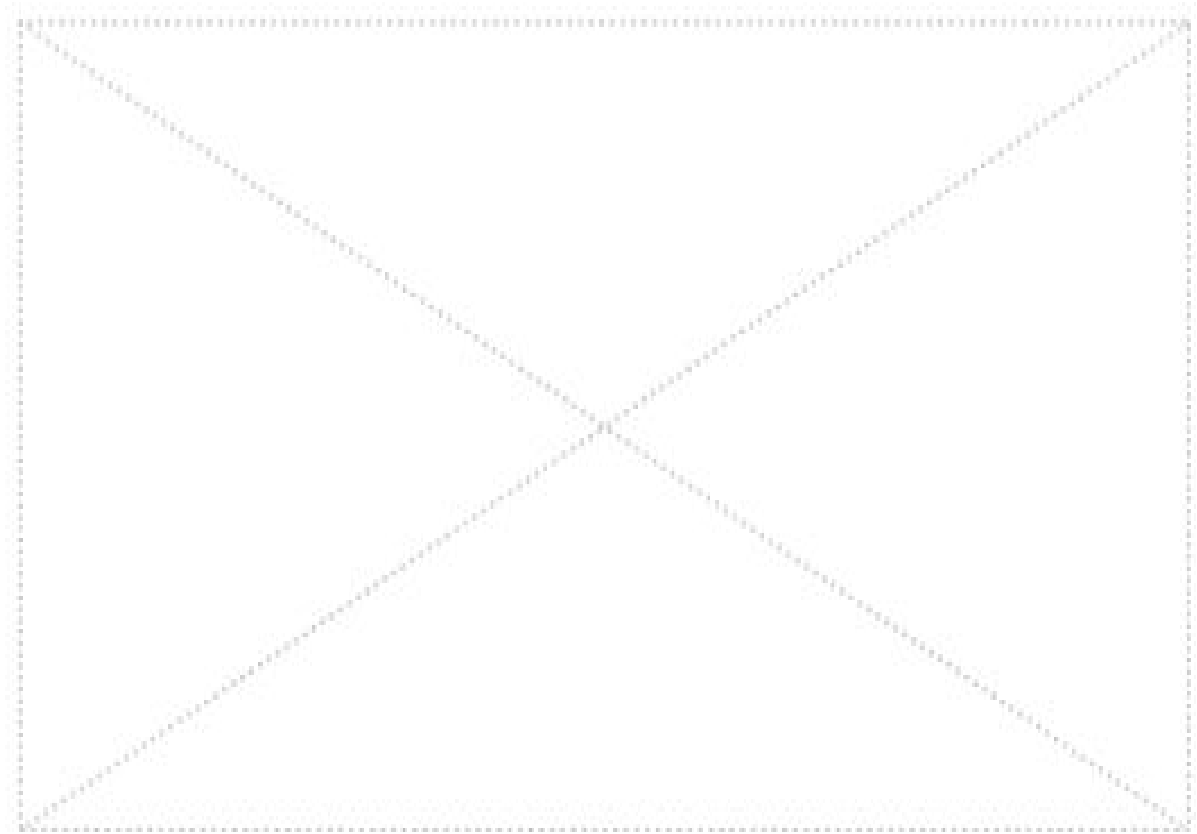
[캐나다 정부의 지원을 받아 구축된 유기 태양전지 소재 개발용 ADA 스마트 연구실]

(3) EU

▣ 영국 공학및물리과학연구회 및 유럽연합연구회 주도로 ‘10년부터 유기소재 탐색을 위한 자동화 플랫폼 개발을 위한 프로젝트 진행 중이며 최근 유럽 연구/혁신 프로그램에서도 신규 프로젝트 추진 중임

- 영국의 공학및물리과학연구회(EPSC)에서 ‘Dial-a-Molecule’ 프로젝트(’10-’25년) 도입하여 연속 흐름(continuous-flow) 플랫폼 기반의 유기소재 합성 자동화 시스템을 개발을 지원
 - 유기 소재 합성 자동화를 위해 3가지 목표, 합성 예측, 디자인 기반 스마트 합성, 지속 가능한 합성을 달성하기 위한 연구 지원
 - 지난 10년간 총 사업비 14.5백만 유로를 지원하여 영국 사우샘프턴 대학, 리즈 대학 주도로 1,2기가 수행되었고 ‘20년부터 영국 사우샘프턴 대학, 런던 임페리얼 컬리지 주도로 3기 수행 중임
 - 다양한 분야의 650명 이상의 연구원과 60개 이상의 기업이 협력하는 대규모 국가 프로젝트로 진행됨
- 유럽연합연구회(ERC)에서는 ‘SMART-POM’ 프로젝트(’15-’21년)를 통해 자율적으로 유기소재 합성 및 최적화가 가능한 Closed-Loop 신소재 개발 플랫폼 연구를 지원하고 있음
 - 총사업비 2.5백만 유로를 지원하여 글라스고 대학팀에서 12가지 이상의 합성 스텝을 자동화하여 10개 이상의 유기소재 합성조건을 최적화

- 유럽의 연구/혁신 프로그램의 지원으로 3.5년 동안 연구비 총액 5.5백만 유로로 독일의 헬름호르츠 연구소와 14개 기관이 포함된 대규모 연구그룹이 페로브스카이트 태양전지 소재 개발 자동화 플랫폼인 Viperlab (fully connected virtual and physical perovskite photovoltaics Lab)을 개발 중임



[Dial-a-Molecule 프로그램에서 제시된 중요 도전 이슈 및 로드맵]

(4) 아시아

■ 일본, 인도 등 아시아 국가에서는 국가 주도의 대규모 연구 프로젝트가 준비 중이나 우리나라의 경우 국가 주도 대규모 연구 프로젝트는 전무함

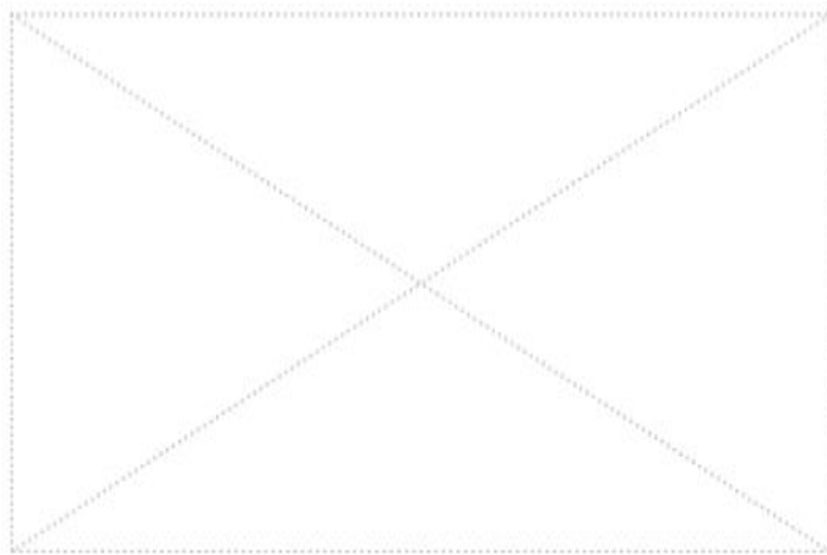
- (일본) 문부과학성 주도로 데이터 창출 및 활용형 재료연구개발 프로젝트: 소재DX플랫폼 사업의 예타 진행중
 - 산/학/관 모든 기관에서 생산되는 소재관련데이터를일본 국립재료과학연구소 (NIMS)에서 취합하여 관리

- 6개 데이터 허브(Hub)와 19개 스포크(Spoke)를 두고 이를 지역거점으로 하여 데이터 생산
 - 8개 중요 소재 기술분야에 대해 중점적으로 데이터를 축적하고 모인 데이터의 활용 방안 연구
 - 예비타당성 조사 2020년 예산 25억엔, 2021년 예산 34억엔
- (일본) 산업경제성 주도로 산학연 연계를 통해 로봇 및 AI 분야에 연간 연구비 450억엔 투자 (20년 기준)하여 인공지능을 이용한 자동생산/자동분석/판단보조 기술을 중점적으로 개발
- 주요 사업 (2020년 사업비): 혁신적 로봇 연구개발 기반구축 사업 (2.5억엔), 차세대인공지능 및 로봇 핵심 통합기술개발 (17.0억엔), 인공지능 기술적용에 의한 스마트 사회 실현 (19.5억엔), 인간과 함께 진화하는 차세대인공지능에 관한 기술개발사업 (29.3억엔), 빅데이터/AI를 활용한 사이버공간 기반기술 (20.8억엔)
- (인도) 인도 정부는 '20년 9월까지 관련 연구제안서 접수
- 소재 가속화 플랫폼 구축 과제에 최대 3년 이내로 제안 요구
 - 클린 에너지 재료 개발을 위해 인공지능, 로봇, 고도 컴퓨터 모델링 기반 예측, 합성, 분석, 평가를 기존 방법론 대비 10배 빠르게 진행할 수 있는 플랫폼 개발 요구
 - 주관 기관에 연구 결과가 실용화로 이어질 수 있는 전략 요청
- (중국) 중국의 경우 아직 국가 주도의 대규모 프로젝트는 부재하고, 홍콩 Shenzhen Univ. AIRS (Artificial Intelligence and Robotics for Society) 연구소에서 주도적으로 진행 중
- (한국) 우리나라의 경우, 국가R&D 정책이 전무한 상황으로 기업체를 중심으로 개별적으로 연구개발 진행 중
- (국가 프로젝트 필요성1) AI와 데이터베이스를 구성요소로 하는 기술이므로 기존의 소재 데이터 관련 사업들과의 연계 및 고도화 필요
 - (필요성2) HW·SW의 긴밀한 협동 연구가 필요하므로 다양한 전문성을 가진 수행기관이 참여하는 연구단이나 컨소시엄 형태 제안

2.2.2. 산업 동향

▣ 글로벌 마켓 비전에서 발간하는 보고서에 의하면 실험실 로봇 시장은 2020년에 1억 8,580만 달러로 평가되었으며 2026년까지 2억 7,449만 달러에 이를 것으로 예상

- 실험실 로봇은 주로 반복적인 실험을 효율적으로 수행할 수 있도록 자동화할 수 있는 제품으로 개발, 판매되고 있음
- 로봇은 정확성과 정밀도를 유지되며 매우 효율적이어서 다양한 실험으로 빠르게 확장되어 가고 있음
- 하지만 개별 공정, 측정에 국한된 자동화 제품 위주로 실험계획, 합성, 분석 등을 자율적으로 수행하기에 한계가 있음

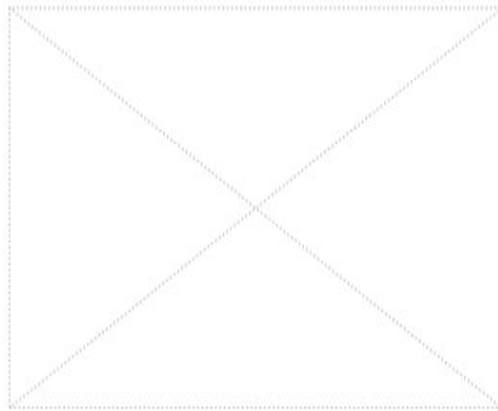


[실험실 자동화 시장 성장 예측]

(출처: Grand View Research)

▣ (스위스) Chemspeed Technologies AG 업체는 직교 로봇과 액체/고체 자율 분주기 기반의 다양한 실험 자동화 로봇 장치를 제공

- 분말 분배, 샘플 준비, 합성, 공정 개발, 제형, 적용 또는 테스트와 같은 특정 작업을 위한 전용 시스템 또는 이러한 기능을 통합 장치에 결합하여 특정 요구 사항에 따라 최적화 제공

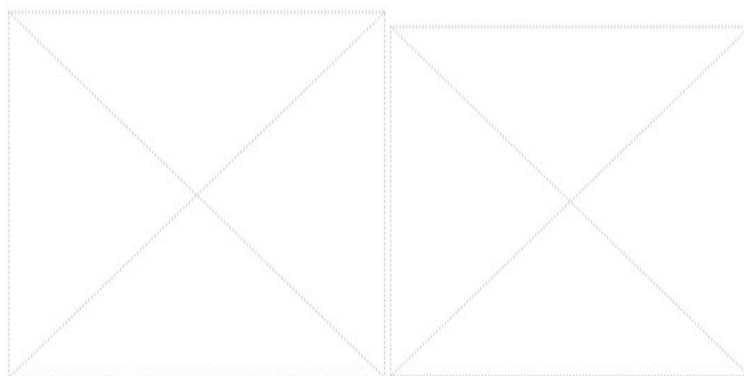


[Chemspeed Technologies AG 업체의 자동화 플랫폼]

(출처: Chemspeed Technologies AG 홈페이지)

▣ (미국) Thermo Fisher Scientific사는 다양한 실험실 자동화 시스템 및 솔루션을 제공함

- 자동화된 분석 장비, 다양한 로봇팔을 기반으로 개발된 실험 자동화 장치 제공
- 특히 inSPIRE 협업 실험실 자동화 장치는 모듈식 구성 요소를 이루고 있어 자동화된 워크플로에 적합한 솔루션을 구성할 수 있어 약물 발견, 합성 생물학, 인간 및 동물 건강 등에 적용 가능
- 다만 바이오 분석, 시료 채취 등 특정 용도로 개발되어 소재 개발 자동화에 적용되기 제한적임

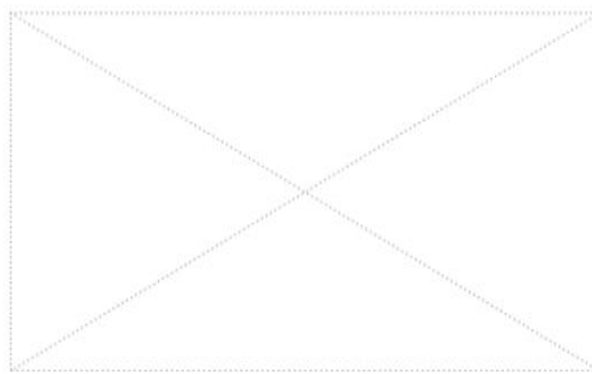


[Thermo Fisher Scientific사의 다양한 자동화 제품. (왼쪽) 연구용 로봇팔, (오른쪽) inSPIRE 협업 실험실 자동화 장치]

(출처: Thermo Fisher Scientific 업체 홈페이지)

■ (미국) Hamilton Robotics사도 직교 로봇과 액체/고체 자율 분주기 기반의 다양한 실험 자동화 장치를 제공

- 자동 액체 분주기 기반의 실험 자동화 장치로 모듈식 설계를 통해 보관, 장치 통합 및 샘플 핸들링을 최적화
- 자동 액체 분주기 기반이라 액상 프로세스를 통한 유기 소재 개발에 제한적으로 적용 가능하고 추가 합성 공정이나 분석에 대한 기능 제공이 없음



[Hamilton Robotics사의 Microlab VANTAGE Liquid Handling System]

(출처: Hamilton Robotics 업체 홈페이지)

■ (영국) ST Robotics는 공장 자동화에 사용되는 로봇팔 생산 업체로 최근 실험 자동화용 로봇팔 생산까지 사업 확장 중

- 다양한 그리퍼, 공장 자동화 솔루션을 제공하지만 실험 자동화 통합 플랫폼은 제공하지 않음

■ (국내) 로봇팔 제작 업체는 몇몇 존재하지만, 실험 자동화 장치/로봇 개발 업체는 전무

2.3. 현황 및 환경 분석 시사점 및 차별화 전략

연구방식의 질적 전환 시대. 소재 설계-합성-평가 전 과정에 데이터·AI·로봇을 적용한 연구개발 가속화 경쟁 심화. 스마트 연구실의 실증형과 플랫폼형 병행 및 국가 연구데이터센터와 연계된 데이터 축적/공유/관리 필요

■ 현황 및 환경 분석 시사점

- 연구개발의 질적 전환에 대한 총론 - 2 단계로 넘어간 가속화 경쟁
 - 미국 정부에서 Materials Genome Initiative를 발표한 이후 소재 설계에 Data-intensive 방법과 AI를 적용해 개발을 가속하겠다는 시도는 꾸준히 늘어 왔음. (가속화 1 단계)
 - 하지만, AI를 활용해 소재를 빠르게 설계했어도, 합성과 시험은 여전히 사람의 몫이라 실험 단계에서 연구가 지연되고, 실험 결과가 소재 재설계에 반영되는 피드백이 매우 느림. 또한, 소재의 성능에 초점을 맞춘 설계를 했기 때문에 대부분 소재 합성에 실패했음. (가속화 1 단계의 한계점)
 - 설계만이 아니라 설계-합성-평가 전 과정에 Data-intensive & AI를 적용해 소재개발을 한 단계 더 가속하려는 노력이 주요 국가 정부와 기업에서 2~3년 전부터 동시다발적으로 일어나고 있음. (가속화 2 단계)
 - Data+AI를 활용한 기술개발 가속화가 어느 단계 어떤 형태로 성공할지 아직 알 수 없으나 연구개발 방식 자체의 질적 전환을 위한 전방위적 경쟁이 일어나고 있는 바, 여러 단계/방식/분야 연구에 국가의 폭넓고 신속한 지원이 요구되고, high risk high return인 이 분야 중복 투자에 대한 지나친 경계로 사업이 지연되지 않아야 함
- 모든 과정을 연구자의 노동에 기대던 기존 연구방식에서 창의적인 활동을 제외한 모든 실험 과정을 자동화해 연구자가 넓은 전문 영역을 다룰 수 있게 하고, 작고 유동적인 조직으로도 큰 연구를 할 수 있는 체계로 점진적 전환 필요

○ 여러 소재 연구에 공통으로 활용되는 연구 장비의 고도화 필요

- 고도화된 시편 분석을 위해 AI와 로봇이 시편을 자동으로 제작하는 기술/장비 개발이 필요 (세계적으로 전무함)
- 연구실을 구성하는 합성 및 분석 장비의 개별적 자동화 및 자율화를 통한 스마트연구실의 모듈화 지향해야 함.
- 공통 장비의 자동화와 모듈화가 되지 않으면, 모든 스마트연구실과 연구장비가 각자 개발되고 호환되지 않음

○ 소재 데이터와 소재 실험 데이터의 일관된 축적과 관리 필요

- 소재 연구의 최종 산물인 소재 자체에 대한 데이터와 더불어 최종 산물을 만드는 과정인 실험 과정의 데이터 축적이 필요함
- 확립된 기술을 구현하는 산업 현장의 데이터가 아니라, 실패한 실험을 포함해 신소재 개발 단계에서 진행되는 모든 실험의 과정과 최종 산물의 데이터를 일관되게 관리할 수 있는 형식으로 확보 필요
- 연구실 기술이 산업 현장으로 이전될 때 연구 과정에서 실패한 실험 데이터가 없어서 기업이 산업기술로 전환하기 어려운 것을 감안해서 실패하거나 부정적인 결과 데이터도 일관되게 축적/관리해야 함
- 국가 소재데이터 센터를 통해 공유할 수 있는 형식의 데이터로 축적 필요. 국가가 지원하는 스마트연구실 및 AI 활용 연구 자동화 연구에서 생성/관리하는 데이터를 국가소재데이터센터에서 공유할 수 있는 형식으로 요구해야 함

■ 차별화 전략

○ 특정 응용 분야의 실증형 과제와 일반적 연구실 플랫폼화 병행

- 선진국에서 진행하는 프로젝트에서도 아직 특정 응용 분야에 국한된 연구가 병렬적으로 일어나고 있을 뿐, 일반적인 소재 실험실 환경을 플랫폼화하는 시도까지는 나아가지 못했음.
- 응용 분야를 지정한 실증 연구와 더불어 장비와 연구실의 모듈화를 포함

하는 플랫폼화 연구도 동시에 진행하면 경쟁력을 확보할 수 있을 것임

- 실험실 구성 요소와 장비들의 모듈화와 표준화로 나아가기 위한 테스트 베드로서의 플랫폼화 프로젝트
- 연구실 플랫폼화 프로젝트는 스마트실험실 기술의 표준화로 연결될 수 있어서 스마트실험실을 구성하는 장비와 AI 프로그램의 호환성을 확보하고, 새로운 응용연구 분야 스마트실험실 제작 시간을 단축하고 난이도를 낮춰 줄 것임
- 양질의 소재 및 소재 실험 데이터를 대량으로 확보하고, 스마트연구실 플랫폼화를 위해서는 여러 응용 분야의 다양한 실증 예시 필요
- 모든 프로젝트의 경험과 노하우를 공유하는 연구 교류회 상설. 각 개발팀이 데이터 형식 공유와 성공/실패 경험을 나누기 위한 일상적 기술 교류가 필요하지만, 공유할 수 있는 데이터 형식을 제외한 개발 방식과 내용을 제한하지는 않는 느슨한 형식 필요

○ 일정한 형식의 데이터 생성과 국가 소재데이터센터를 통한 데이터 공유

- 개별 실증형 연구의 방식은 제한하지 않지만, 데이터는 소재데이터센터를 통해 공유할 수 있는 형식 유지
- 자동화 연구 장비에서 생성되는 일정한 형식의 데이터 생성

○ AI 로봇을 활용해 실험실 지능화 추구

- 소수 인력으로도 거대 연구그룹에 비견되는 연구를 진행할 수 있음
- 시간과 장소 제약이 없는 지능화된 자동 실험실 추구

○ XR (AR+VR) 기술 적용 실험실 디지털 트윈 추구

- XR 기술을 적용한 메타버스는 다음 세 가지 측면에서 연구환경 고도화에 기여 할 수 있음. 첫째, 계산과학 비전공자도 활용할 수 있는 XR 환경의 전산모사 플랫폼, 둘째, 가상으로 실험실을 구동시킬 수 있는 시험실 자체에 대한 시뮬레이터, 셋째, XR 장비를 이용한 실험실 원격 제어
- 첫 번째 측면은 전문가를 통하지 않고도 대부분의 연구자가 계산과학을

즉시 활용할 수 있음

- 두 번째와 세 번째는 실험실의 디지털 트윈으로서 시공간 제약 없는 실험 연구를 가능하게 하며, 실험 과정을 바꾸거나 실험 변경이 큰 경우 실제 실험에 들어가기에 앞서 가상으로 실험실을 구동시켜 봄으로써 위험을 사전에 파악할 수 있음.
- 완전 자율 기술이 아직 확립되지 않은 응용 분야에서도 원격 제어를 통해 위험물(독성, 폭발성 물질, 병원체)을 다루는 연구 가능
- 세계적으로 매우 제한적인 연구 분야로서 미래의 중요 기술로 부각 될 가능성이 큼

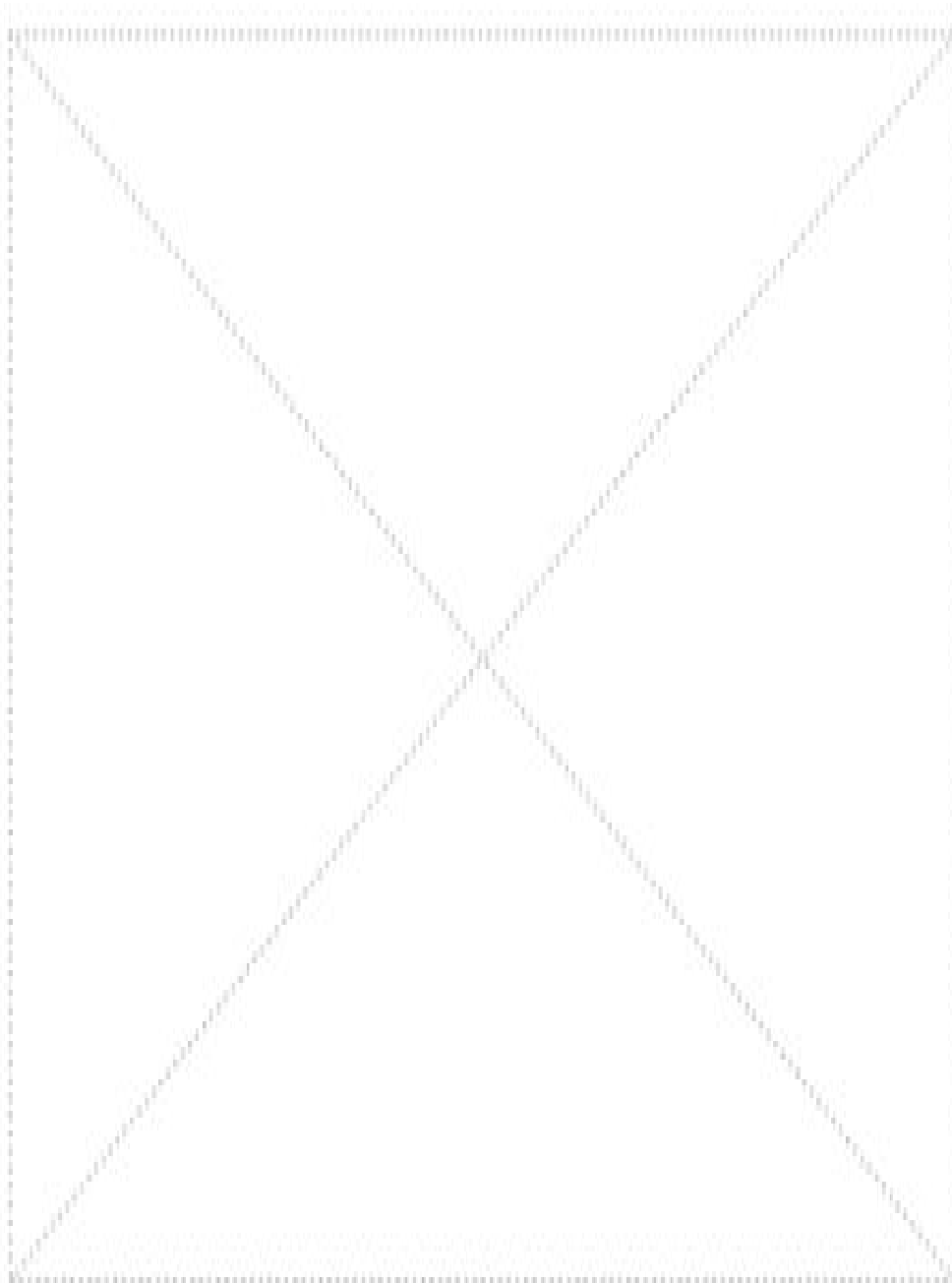
3. AI 스마트 연구실 사업 추진 전략

3

AI 스마트 연구실 사업 추진 전략

3.1. 사업추진 비전 및 목표

3.1.1. 사업추진 비전 및 목표



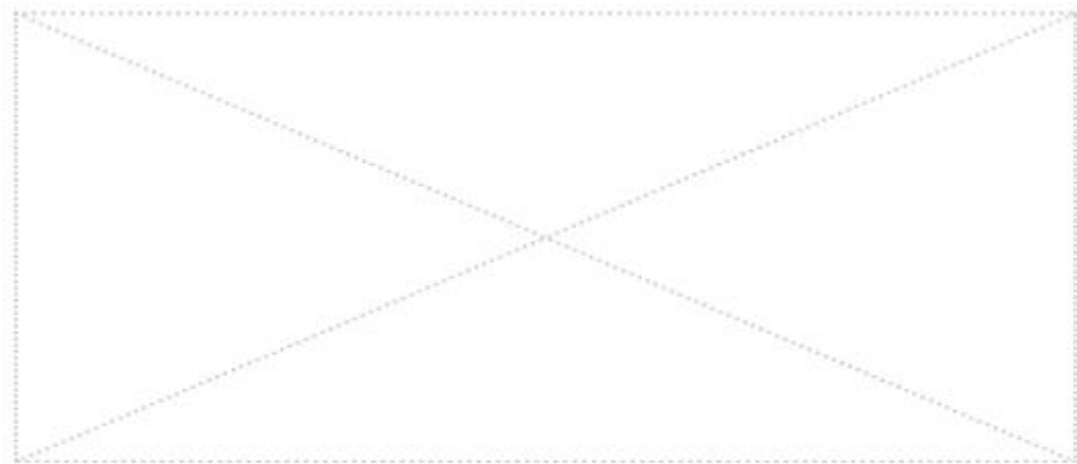
3.1.2. 사업추진 전략 및 세부추진 과제

▣ (소재연구데이터 플랫폼 연계) 소재 데이터의 체계적 생성·이관·활용을 위해 '국가 소재 연구데이터 플랫폼'과 연계

- (연계방안) 국가 소재 연구데이터 플랫폼에서 소재 설계용 AI 기술 개발을 위해 데이터를 제공 받고, 스마트 소재 연구실을 통해 생성된 실험 데이터(성공/실패 데이터 모두)는 플랫폼에 이관
 - 향후 국가의 소재 경쟁력은 데이터가 좌우: 양질의 소재데이터 신속 확보 필요
 - (데이터 통일성/재현성) 각 연구 그룹에서 창출되는 데이터는 양질이라 하더라도 연구그룹마다 실험 조건 및 장비 등이 달라 같은 소재에 대한 데이터라 할지라도 모아서 보면 데이터의 재현성에 문제가 발생할 수 있고, 이를 극복하기 위해서는 재현성 있는 데이터를 신속하게 확보할 수 있는 통일된 실험 플랫폼 필요
 - 스마트 연구실에서는 소재 공정 및 물성 데이터의 대량·신속 생산을 통한 양질의 실험데이터를 생산하기 위해 로봇 자동화 시스템을 구축하고 활용

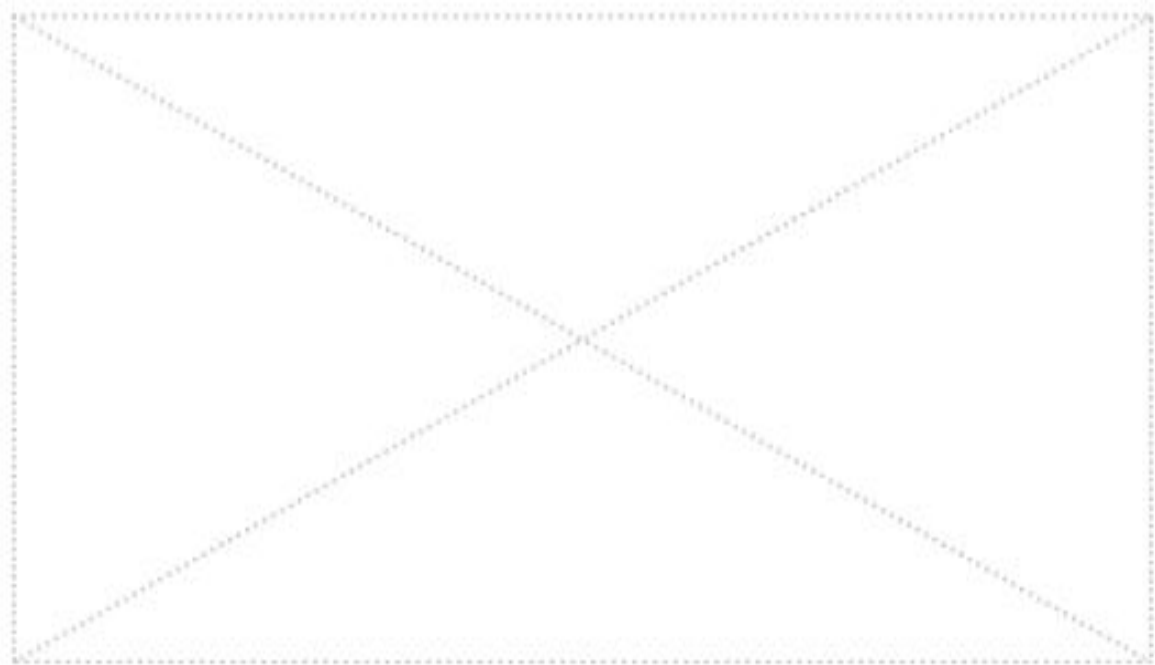
▣ (실증형-플랫폼형 과제 병행) 스마트 연구실을 통해 소재 개발 가속화 성공사례 도출을 위한 실증형 과제와 향후 다양한 소재 분야 및 4차산업혁명형 소재 연구실 구축을 위한 플랫폼형 과제를 병행

- (실증형) 소재 데이터 생성활용을 통한 신소재 개발용 AI 스마트 연구실 개발에 목표가 있고, 촉매 및 디스플레이용 나노입자 분야와 태양전지용 유·무기 페로브스카이트 분야에 우선 적용
 - (소재 응용분야 선정) 세계적으로 데이터·AI·로봇 융합을 통한 소재개발 가속화 연구사례가 적어 우선적으로 성공가능성이 높은 소재분야를 선정한 후 향후 타 분야로 확대 적용 필요
 - 시범사업의 성공가능성을 높이기 위해서는 소재 합성공정에 고가 장비가 필요하지 않고, 상대적으로 간단한 공정절차를 지닌 응용분야를 선택하는 것이 바람직
 - (응용분야 선정기준) 나노입자와 유·무기 페로브스카이트는 합성이 상대적으로 용이하고, 물성 및 응용처의 다양성 등을 바탕으로 시범사업의 우선 소재 대상으로 선정



[나노입자 및 양자점의 합성 용이성, 물성 다양성, 응용처 다양성]

- (플랫폼형) 다양한 소재 분야에 적용 가능한 스마트 연구실 구축을 위한 AI, 로봇, 확장현실(XR) 기반의 플랫폼화 기술 개발 목표
 - 현재 세계적으로도 플랫폼화된 스마트 연구실 구축 연구사례는 없어 관련 분야 세계 선도를 위한 AI·로봇 분야의 기반 및 융합기술 개발



[지능형 스마트 연구실 개발 개념도]

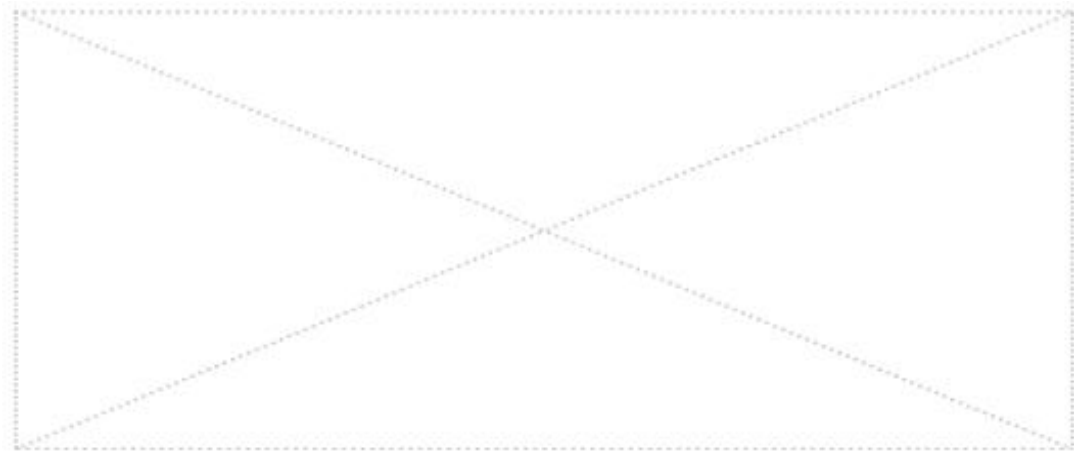
- ▣ (연구실 생태계 지능화) 전문적인 연구개발 아이디어를 구현할 수 있는 연구 실험 환경을 지능화/무인화/모듈화하여 플랫폼화된 스마트 연구실 구축

- 제안된 연구 결과물 개발을 위한 최적 공정(혹은 실험)을 제안할 수 있도록 실시간 공정 분석 및 공정과 연계된 연속 분석 기능을 접목하여 연구개발의 방향을 최적화할 수 있는 Closed-Loop 소재 R&D 프로토콜 제공
- 다양한 연구 분야의 서로 다른 실험실 환경에도 범용적으로 적용이 가능한 지능화된 실험실 자동화 플랫폼을 위한 AI·로봇 기반 기술 개발

■ (연구실 디지털 트윈화) 4차산업혁명형 연구실 환경 구축을 위해 데이터, AI, 확장현실(XR), IoT 기술 융합

- 현재 선진국을 중심으로 개발 중인 스마트 연구실과 달리, 4차산업혁명의 핵심 기술인 데이터, AI, IoT, 로봇을 기반으로 XR 기술을 가미한 디지털 트윈을 구현함으로써 소재 R&D 역량의 극대화를 가능하게 하는 차별성 제공

3.1.3. 세부추진 과제 구성



[스마트 연구실 세부 추진과제]

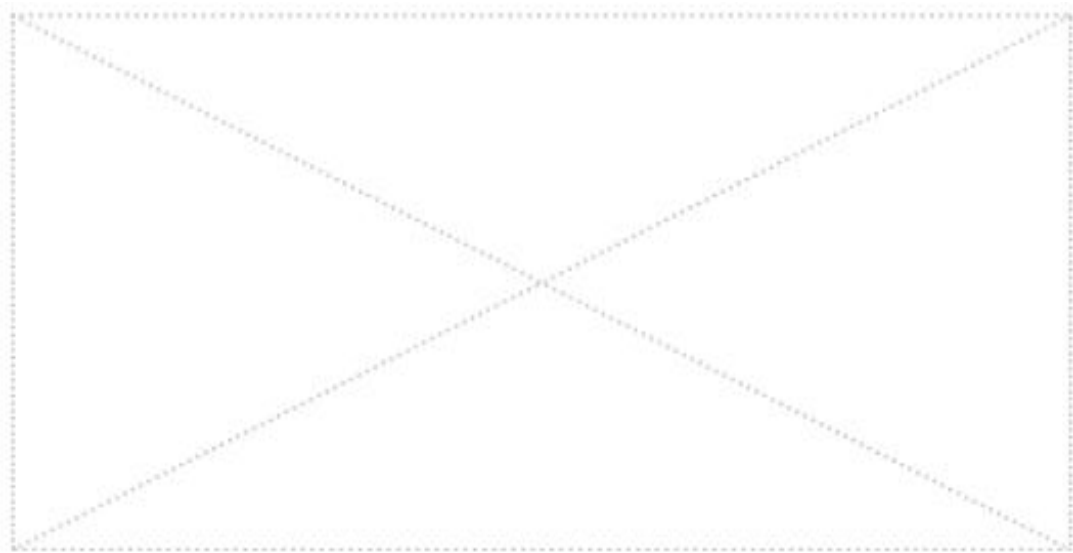
■ 과제의 구성

- (총괄과제1) 촉매 및 디스플레이 나노입자용 AI 스마트연구실 개발
 - 수요자가 원하는 물성을 갖는 나노입자 또는 양자점 소재를 개발할 수 있는 AI 로봇 기반의 지능형 플랫폼
 - (촉매) 촉매물성(활성도 및 선택도)을 최적화할 수 있는 나노입자 합성/공정 조건 제시 기능 제공
 - (양자점) 광학특성(발광 파장, 발광 세기, 발광 반치폭)을 최적화할 수 있는 양자점의 합성/공정 조건 제시 기능 제공
- (총괄과제2) 페로브스카이트 태양전지용 AI 스마트연구실 개발
 - 로봇과 AI 기반으로 태양전지용 페로브스카이트 소재의 개발을 자율적으로 수행하고 얻어진 데이터를 기반으로 성능 최적화 가능한 연구실 환경 제공
 - 페로브스카이트 소재의 합성, 소재 특성 평가, 소자 조립, 소자 성능 평가를 자동으로 수행할 수 있는 각 모듈을 개발 및 조합하여 신소재 개발에 최적화된 연구실 환경 제공
- (총괄과제3) 실험실 자동화를 위한 AI·로봇 기반기술 개발
 - 스마트 연구실 플랫폼은 로봇틱스/빅데이터/IoT 기술을 탑재한 모듈형 실험공정을 융합적으로 연결하여 고난이도의 원천기술을 효율적으로 개발하는 기능 제공

- 다양한 연구 분야의 실험 환경에 범용적으로 적용할 수 있는 AI로봇 기반의 실험실 자동화 플랫폼 기반 기술 제공
- 실험실 환경에서 사람과 로봇이 유연하게 인터랙션할 수 있도록 하는 확장현실(XR) 원천기술 개발을 통해 다양한 형태의 인간-로봇 협업을 포함한 다양한 응용이 가능한 XR 인터페이스 기반 기술 제공

▣ 과제간 연계성

- (소재 실험의 다양성) 소재 실험은 합성·공정 및 분석·물성평가 과정에서 다양한 기술 및 장비가 존재하고, 총괄과제 1, 2의 실증형 과제에서는 각 특화된 응용분야에서의 합성·공정 및 분석·물성평가 자동화 기술에 초점이 맞추어져 있음
- (실험의 모듈화) 총괄과제 3은 다양한 실험을 수행할 수 있도록 하기 위한 기반기술 개발에 목표가 있고, 특히 다양한 합성·공정 및 분석·물성평가 기술/장치를 모듈화하고 체계적으로 integration 하기 위한 플랫폼 개발에 집중
 - 총괄과제 1, 2에서 개발된 모듈화된 실험(합성·공정 및 분석·평가 등) 기술/장치는 과제종료 후 총괄과제 3에 제공하여 스마트 소재연구실의 플랫폼화 강화



[스마트 연구실 모듈화 개념: 플랫폼형과 실증형 과제의 연계성]

- (플랫폼화) 총괄과제 3의 기반기술에서는 실험실 자동화 및 안전(safety) 기술 개발도 포함되어 있고, 이는 향후 총괄과제 1, 2에 제공하여 안전한 스마트 연구실 환경 구축 가능

3.2.

세부추진과제 1: 촉매 및 디스플레이 나노입자 설계용
AI 스마트연구실 개발

3.2.1. 필요성

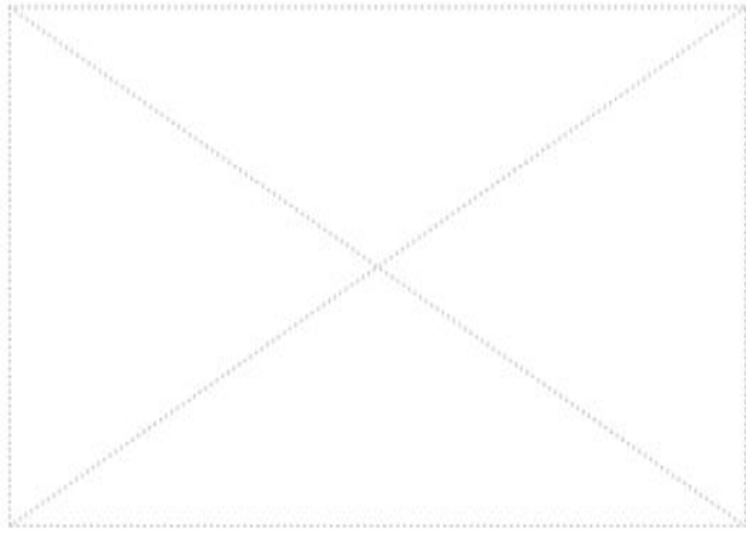
▣ 촉매의 필요성

- 촉매는 현대 생활의 영위를 위해서 뿐만 아니라 지속 가능한 미래를 위해 많은 공정에 필수
 - 고도로 산업화된 경제에서, 필수적인 화학 공정에 투입되는 에너지를 낮추고 반응 속도를 높이기 위해서 촉매를 사용할 수밖에 없음
 - 실제로 모든 화학 공정의 90 % 이상이 촉매에 의존한다고 알려져 있음
 - 촉매는 더 낮은 자유에너지의 전이 상태를 갖는 대체 반응 경로를 제공함으로써 화학 공정에 유리하게 작용함
 - 증가하는 인구와 유한한 자원을 고려했을 때 향상된 효율과 에너지 저감을 통한 지속 가능성 확보는 인류 생존에 필수임
- 촉매와 반응물의 상이 액체/액체, 고체/고체 같이 동일할 때 사용되는 촉매는 균일 촉매, 액체/고체 같이 다를 때는 불균일 촉매라 일컬음
- 통상 액상 반응물에 고상 촉매가 사용되는 불균일 촉매 시스템은 반응 후 촉매를 회수하여 쉽게 재생할 수 있다는 것이 장점임

▣ 금속 나노입자 촉매 개발 방향

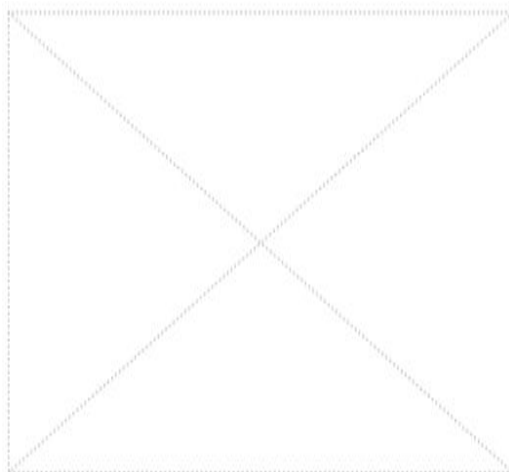
- 금속 나노입자 촉매는 CO oxidation, hydrochlorination, selective hydrogenation, selective oxidation, C-C cross coupling, epoxidation, oxygen reduction 등등 다양한 반응에 사용됨
- 금속 나노입자 촉매의 활성은 입자의 크기, 모양 구조, 지지체와의 상호 작용 등에 의해 결정됨
 - 입자의 크기가 줄어들면, 촉매의 단위 질량당 표면적이 증가하여 촉매 사용량을 줄일 수 있음
 - 크기가 감소된 입자는 corner site, edge site의 비율이 더 높아 반응물과의 결

합 특성이 변경됨

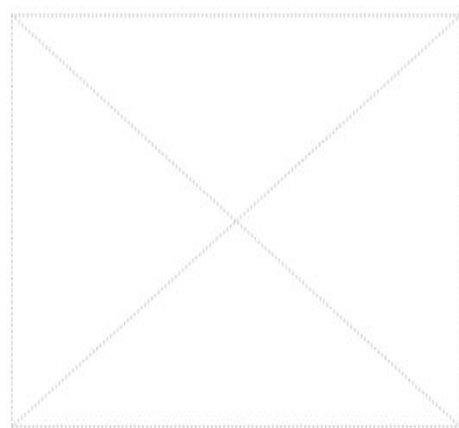


[octahedron 입자에서 입자 크기에 따른 surface, corner, edge site에 위치하고 있는 입자의 비율]

- 금속 나노입자의 모양을 조절하는 것은 매우 어려운 일이지만 콜로이달 방법을 통해 달성한 결과들이 많이 보고되었음
- 관찰되는 입자의 모양은 존재하는 다른 결정면의 결과로, 반응물의 흡/탈착 거동에 직접적인 영향을 미침
- 주변 원자에 대해 높은 배위수를 가져 에너지가 낮아, 통상 낮은 면지수의 결정면이 지배적이지만, corner, edge, kink 사이트가 활성점으로 작용할 때는, 높은 면지수를 갖는 면을 형성시키는 것이 유리함
- 더불어, 그림 3.2.3에 나와있는 다양한 변수들이 나노입자의 물성을 결정함



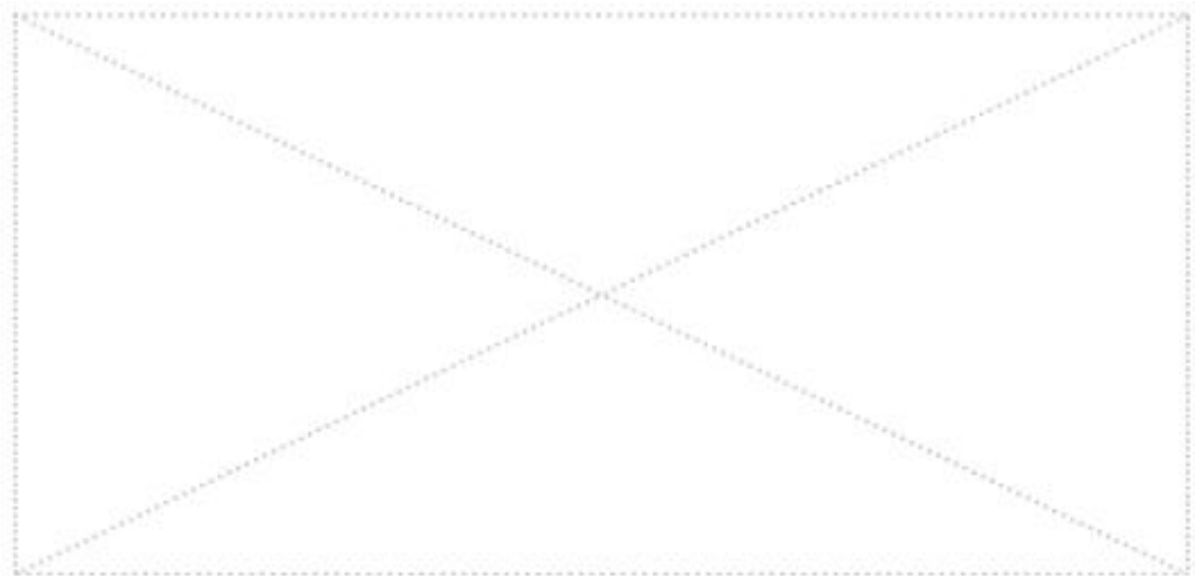
[결정면에 따른 원자의 배열]



[나노입자 물성을 결정하는 다양한 인자들]

▣ 금속 나노입자 촉매 개발용 스마트 연구실의 필요성

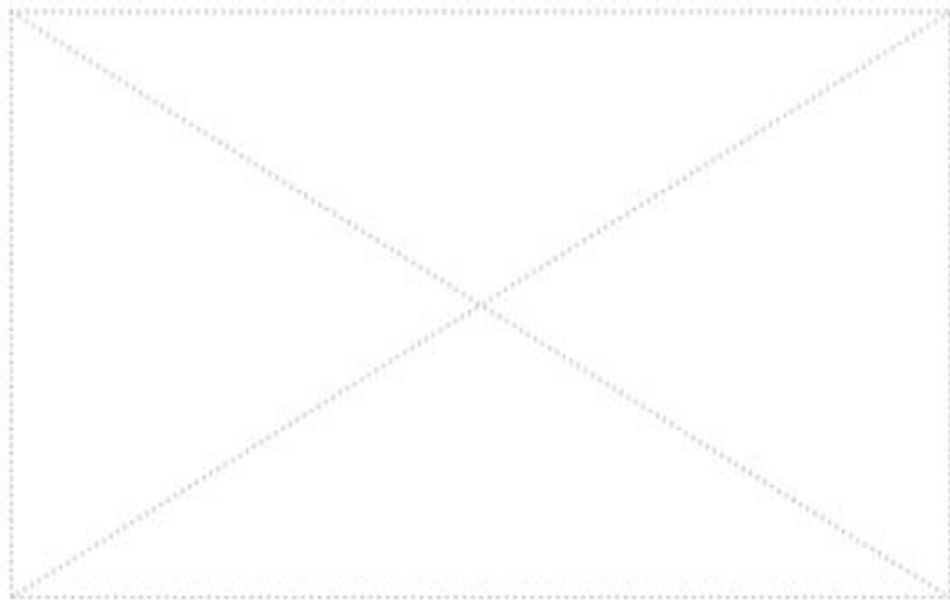
- 지속가능한 미래를 준비하기 위해서는 금속 나노입자 촉매 개발이 필수
- 촉매의 물성을 결정하는 다양한 인자가 있기 때문에 촉매 개발을 위해 탐험해야 할 공간은 4차원 이상의 고차원 공간임
 - 촉매 소재의 경우, 구성원소의 개수에 따라 2원계, 3원계 등이 존재하며, 조성 (composition)도 주요 변수가 됨
 - 촉매 소재의 경우, 나노입자의 크기의 형상도 주요 변수가 되므로, 사실상 무한대에 가까운 촉매소재 조합이 가능함
 - 촉매 소재 뿐만 아니라, 다른 시스템적인 변수로는 counter전극, reference전극, 전해질(electrolyte), 촉진제(promoter), 그리고 분리막(membrane) 등이 존재하며 이런 시스템적인 변수들에 따라 성능은 천차만별로 바뀔 수가 있음
- 고차원의 방대한 실험양이 새로운 촉매 개발에 허들(hurdle)로 작용
- 무인자동화를 넘어서 AI를 이용한 스마트연구실이 구축되면 예측을 통해 실험의 수를 줄일 수 있어 새로운 촉매개발 가속화 가능



[촉매용 나노입자 개발 연구에서 자율화 과정 필요성]

▣ 디스플레이용 양자점 소재 개요

- 양자점(Quantum Dot, QD)은 수 나노미터에서 수십 나노미터 크기의 화합물 반도체 입자로서 크기가 작아짐에 따라 양자구속효과로 인하여 밴드갭이 커지는 특성을 바탕으로 특정 크기 입자가 외부로부터 빛, 전기 등 에너지를 주입받아 본래 밴드갭 에너지에 해당하는 빛을 스스로 방출하는 원리로 디스플레이 발광소재로서 응용되고 있음



[InP 기반 코어/다층셸 양자점의 구조 및 광학적 특성]

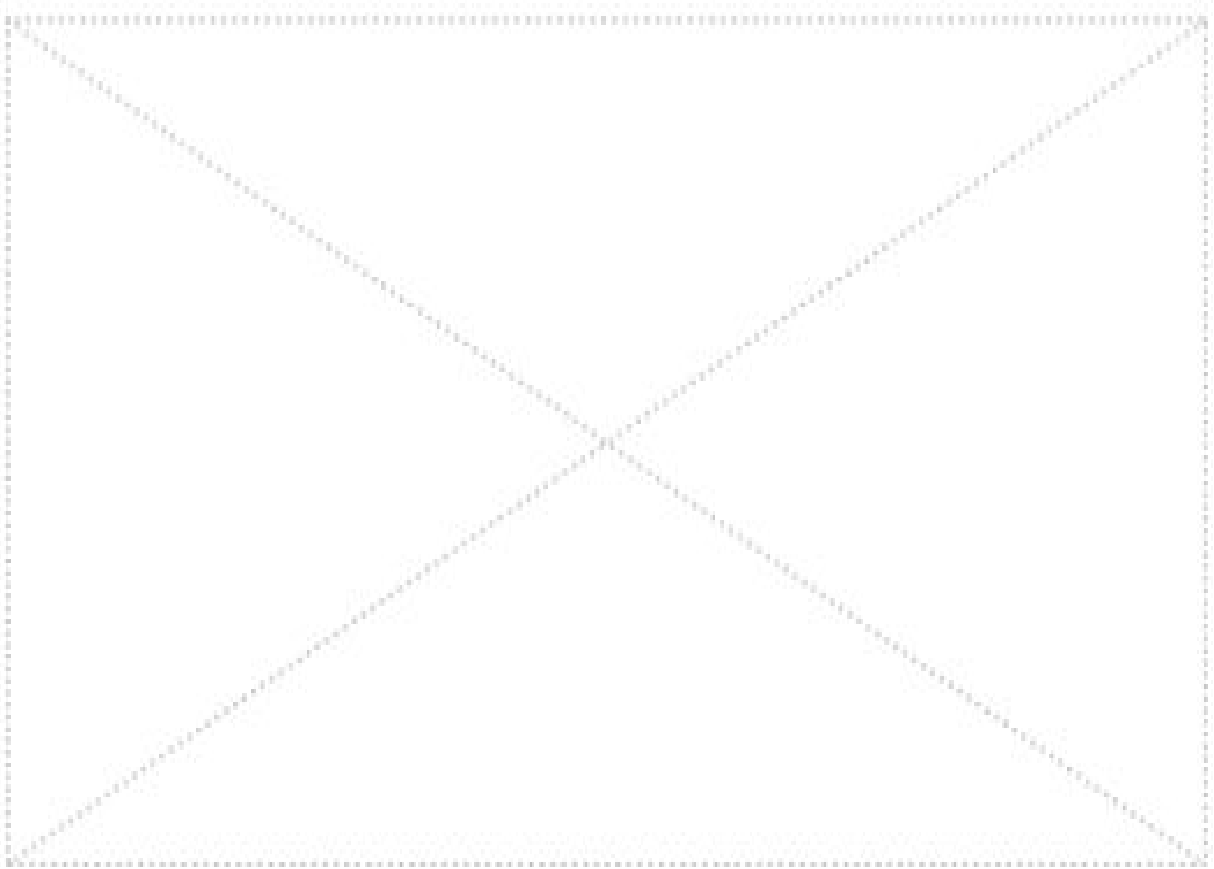
(출처: ACS Appl. Nano Mater. 2020)

- 현재 상용화되고 있는 양자점의 경우 친환경 조성의 InP 코어에 ZnSe 및 ZnS의 합금 조합의 다층 셸(shell) 구조로 이루어져 있고 녹색과 적색 발광 응용에 맞춰 각기 다른 크기의 코어를 통하여 원하는 파장의 빛을 방출하며 균일한 코어 크기 제어로부터 높은 색순도의 빛을 얻을 수 있고 $ZnSe_{1-x}S_x$ 다층 셸의 정교한 조성 제어를 통하여 계면 결함을 줄이고 높은 발광 효율을 확보 가능
- 콜로이드 용액 상태로 제조 및 후속 공정이 이루어지는 양자점은 배치 타입의 용액 공정을 기반으로 수-수십 리터 규모로 제조되고 있으며 제조 과정 중 공기나 수분의 차단된 상황에서 다양한 전구체들을 고온에서 주입시켜 반응시키고 이후 정제과정을 거쳐 분말의 형태 혹은 다시 용매에 분산된 잉크 형태로 완성되어 고분자 필름에 분산된 형태 및 잉크젯 공정을 통한 복합체 형태로 응용되고 있음

▣ 양자점 디스플레이 산업 배경과 위기

- 국내 기업의 주도하에 친환경 조성 양자점 소재 개발을 바탕으로 LCD 방식의 TV, 모니터 등 QLED 디스플레이에 양자점이 분산된 필름이 도입되어 성공적으로 상용화되었고 현재도 국내 업체들이 산업 시장의 우위를 선점하고 있음
 - 2021년 1분기 글로벌 TV 시장에서 QLED는 전체 268만대가 판매되어 전년 동기 154만대 대비 74.3% 성장 (출처: 매일경제, 2021년 5월, “삼성·LG전자 TV 1분기 글로벌 시장 평정, 점유율 52% 넘어”)
- 현재는 기존 컬러필터 대신 잉크젯 공정의 양자점 복합체를 이용하여 청색 OLED 혹은 청색 μ -LED 백라이트를 녹색 및 적색으로 변환시키는 방식의 QD-OLED 및 QNED가 개발 중에 있으며 가장 진화된 형태의 전계발광 QD-EL 기술 개발이 예측됨에 따라 관련 시장이 지속적으로 성장 중임
 - 2021년 4분기 삼성 QD-OLED 양산 계획에 따라 2022년 글로벌 OLED TV 출하량은 700만대 돌파를 바라볼 것으로 전망하며 2021년 또한 610만대 수준으로 2020년 대비 두 배 가까운 급성장 기록 (출처: 이데일리, 2021년 10월, “4분기 삼성 QD-OLED 양산...관 커지는 OLED TV 시장”)
- 국내 디스플레이 관련 업체가 앞으로 5-10년간 현재의 기술적 우위를 유지하기 위한 중요한 요소 중 하나는 양자점 생산원가의 절감으로써 양자점 양산 및 신규 양자점 소재에 대한 지속적인 기술 개발이 요구됨
 - 전체 QLED TV 시장이 늘어난 반면 동시에 2021년 1분기 중국산 QLED TV 점유율은 21.6%로 2020년 대비 12.2% 늘어났고 국내 제품 보다 낮은 가격수준에서 판매되어 시장 점유율을 끌어올리고 있음 (출처: 조선일보, 2021년 6월, “삼성이 키운 QLED TV까지 중국 업체 추격 시작됐다”)
 - QD-OLED 기술은 다량의 양자점이 필요한 구조로 기술적 우수성은 인정되나 생산단가가 높다는 우려가 있으며 이에 따라 생산원가를 낮추기 위한 지속적인 소재 개발 및 지원이 요구되고 동일한 성능에서 양자점 함량을 낮출 수 있도록 현재의 InP 양자점을 뛰어넘는 고효율 양자점 개발 등 신규 소재 개발이 절실함 (출처: 한국산업기술평가관리원, 2021년 7월, “디스플레이용 QD 소재 기술 동향 및 향후 추진 방향”)

▣ 양자점 소재 개발 핵심 이슈

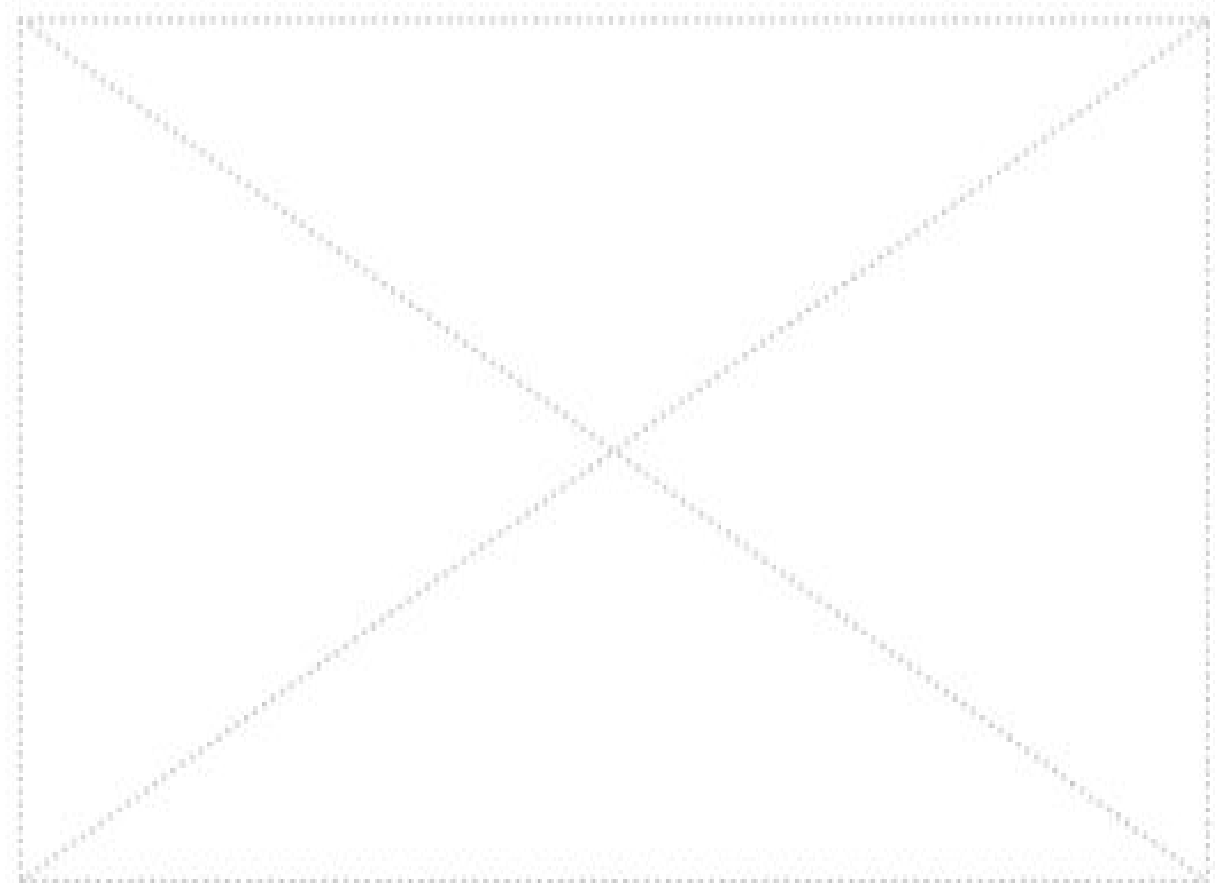


[양자점 소재 개발 핵심 이슈 요약]

- 실감형 디스플레이 구현을 목표로 색순도를 높이고 더 넓은 색 영역을 표현하기 위해서는 20 nm 이내의 발광 반치폭이 요구되지만 현재 이론적 기대치만큼 도달하지 못하는 InP 양자점의 넓은 반치폭을 줄일 수 있는 방안이 요구됨
 - 현재 상용화되고 있는 녹색과 적색 InP 양자점의 반치폭은 35 nm 전후로써 색 영역 기준(BT.2020)의 92% 정도 밖에 충족시키지 못하며, 이것은 22 nm의 단일 입자 발광 반치폭 값으로 볼 때 양자점 코어의 불균일한 크기로 인한 문제로 여겨짐 (출처: ACS Energy Letters, 2020, “Environmentally Friendly InP-Based Quantum Dots for Efficient Wide Color Gamut Displays”)
 - 동일 크기의 입자로만 이루어진 것처럼 아주 높은 균일도를 갖는 입자 집합체 합성 공정 조건을 탐색하는 일이 요구되며 이를 위해서 많은 공정 변수들의 조합론적인 접근에 따라 균일한 크기 입자로 제조할 수 있는 양자점 합성 공정의 최적화가 요구됨

- 양자점은 OLED에 사용되는 유기발광체에 비하여 상대적으로 안정하지만 공기나 수분, 열에 대한 안정도가 낮으며 이로 인하여 양자점 제조 과정 중 발생하는 소재 내부 결함이 제품화 과정 중 발광효율 저하로 연결되기 때문에 이를 해결하기 위한 다양한 접근이 요구됨
 - 산소/수분 차단 상황에서도 미세하게 도입된 불순물에 의하여 InP 표면의 산화물이 형성될 수 있으며 쉘 형성 온도의 미세한 변화에 따라 불규칙한 양자점의 형상이 얻어져 발광효율의 저하가 나타날 수 있음 (출처: Nature, 2019, "Highly efficient and stable InP/ZnSe/ZnS quantum dot light-emitting diodes")
 - 이를 극복하기 위하여 제조 과정 중 이미 형성된 산화물을 에칭할 수 있는 불산(HF) 등 공정 첨가제를 도입하고 있으며 다층 쉘 형성 과정에서 다양한 전구체 조합, 농도, 조성, 온도, 반응시간 등 공정 변수의 제어를 통하여 소재 내에 발생하는 결함을 최소화하고 효율과 안정성을 높일 수 있는 방안이 요구됨
- InP 양자점의 경우 LCD 방식 TV에 필름 형태로 상용화에 성공하였으나 현재 개발 중인 차세대 양자점 디스플레이에서는 이러한 InP 양자점이 적합하지 않거나 부족한 특성을 보이고 있어서 신규 양자점 소재 개발이 절실히 요구되며 소재를 빠르게 선별하여 공정을 최적화할 수 있는 개발 방안이 필요함
 - 현재 개발 중인 QD-OLED, QNED 등 청색 백라이트 색 변환 방식의 경우, 목표 파장의 높은 발광 효율과 함께 청색 파장의 높은 흡수도가 요구되지만 InP 기반 양자점의 경우 450 nm 영역의 흡수도가 낮아 청색광 빛샘 현상이 나타나고 이를 해결하고자 양자점의 무게 비중을 30-40%로 높이고 두께를 증가시키게 되면 생산단가가 높아짐 (출처: Nanoscale, 2019.12, "Inkjet printed uniform quantum dots as color conversion layers for full-color OLED displays")
 - 더 적은 함량을 사용하고 더 얇은 두께로 색 변환 층으로 활용할 수 있도록 높은 청색광 흡수 및 변환을 위한 대체 소재로서 ZnSeTe, InGaP, AgInS 기반의 양자점 소재들이 연구되고 있으나 상용화 수준까지 효율을 향상시키기 위하여 합성 공정의 많은 최적화가 요구됨 (출처: 한국산업기술평가관리원, 2021.07, "디스플레이용 QD 소재 기술 동향 및 향후 추진 방향")

▣ 양자점 소재 개발을 위한 “스마트 연구실”의 필요성



[AI기반 스마트 연구실 개요. 위: 전통적 소재개발 방식의 흐름도, 아래: AI기반 가속화 기술이 도입된 스마트 연구실의 소재 개발 흐름도]

- 디스플레이 양자점 소재 개발 이슈의 경우 InP 코어 소재 제조 공정의 최적화, 다층 쉘 구조 형성의 최적화 등과 연계되어 있고 무수히 많은 공정 변수의 조합으로 결과를 얻어내야 하기 때문에 많은 비용과 시간이 소모가 예상됨
 - 전통적인 소재 개발 흐름에 따라 문제들을 해결하게 될 경우 한차례의 실험 과정을 수행하고 결과를 얻어서 판단하여 다시 계획을 하기까지 수시간 내지는 수일에 걸쳐서 이루어져서 복잡한 공정변수 조건을 다 파악하기 어렵기 때문에 한정적인 제한조건 내에서 실험이 이루어지게 되고 목표로 하는 최적의 결과를 얻는 것이 어렵게 됨
- 단순한 소재 물성에 대한 계산과 예측을 넘어서 양자점 개발 과정에 대한 실험-분석-데이터확보-데이터해석/예측-실험의 일련의 과정을 수행하는 자율

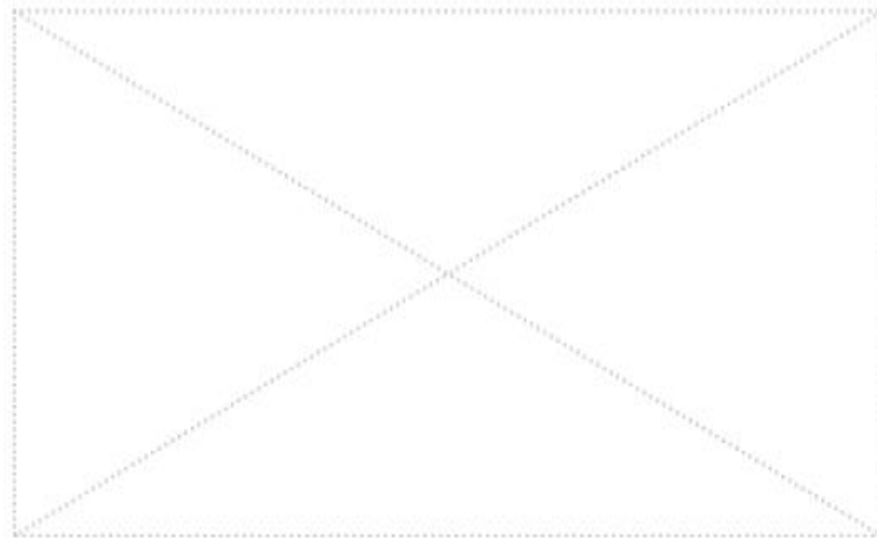
소재 연구 시스템이 요구되며 조합 방식의 다양화를 통해 얻어지는 방대한 정보를 처리할 수 있는 시스템의 구축이 요구됨

- 공정변수에 따른 결과를 수초에서 수분 내로 신속하게 확인하기 위한 closed-loop 실험 시스템을 바탕으로 InP 코어 제조 과정의 핵생성과 성장 및 다층 쉘 형성에 대한 방대한 데이터 베이스 구축을 가능하게 함
 - 로봇 기술 기반의 closed-loop 실험 시스템을 통하여 실험 수행과 분석을 자동화하여 다양한 조합 방식으로 이루어지는 공정변수 최적화 과정에 대한 시간과 비용을 감소시킬 수 있고 축적되는 방대한 양의 데이터를 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘을 통하여 분석하고 예측하여 합리적인 결론을 얻어내어 다음 실험에 대한 계획을 수립하여 과정을 반복할 수 있음
- 자율형 소재 개발 시스템 및 플랫폼의 개발과 조합 방식으로 얻어지는 빅데이터는 현재 소재의 최적화된 공정 조건을 찾게 해줄 뿐 아니라 새로운 소재 예측에 활용이 되어 원하는 물성을 갖는 신규 양자점의 탐색 및 소재 선별에 이용될 수 있을 것으로 예상함

3.2.2. 기술 정의

■ 나노입자/양자점 개발용 AI 스마트 연구실의 제공 기능

- 개발될 AI스마트연구실은 원하는 물성을 가지는 나노입자 또는 양자점 소재를 개발할 수 있는 연구환경 플랫폼을 제공
- 나노입자 촉매개발의 경우, 연구자는 촉매 특성 (예: 활성도나 선택도)을 최적화시킬 수 있는 나노입자 합성 및 공정 조건을 찾을 수 있음
- 디스플레이용 양자점 소재 개발의 경우, 연구자는 광학 특성 (예: 발광 파장, 발광 세기, 발광 반치폭)을 최적화시킬 수 있는 양자점의 합성 및 공정 조건을 찾을 수 있음



[나노입자/양자점 AI 스마트 연구실의 개념도]

- 구체적인 예로서, 개발될 AI스마트연구실은 아래와 같은 질문에 해답을 제공

산소생성반응(OER) 촉매 개발 연구자 질문:

질문1. 이리듐 (OER 반응 현존하는 가장 효과적 촉매) $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 을 로딩했을 때, 최대 전류값은 얼마인가?

질문2. OER 반응에 효과적인 값싼 촉매 (비싼 이리듐 대체용)는 무엇일까?

디스플레이용 양자점 소재 개발 연구자 질문:

질문1. InP 기반의 양자점의 경우, 합성 조건 최적화를 통하여 발광 반치폭이 이론적 한계값인 22nm 수준에 도달할 수 있을까?

질문2. InP 단점을 극복하는 청색 발광 효율과 반치폭을 최적화시키는 신규 소재는 무엇일까?

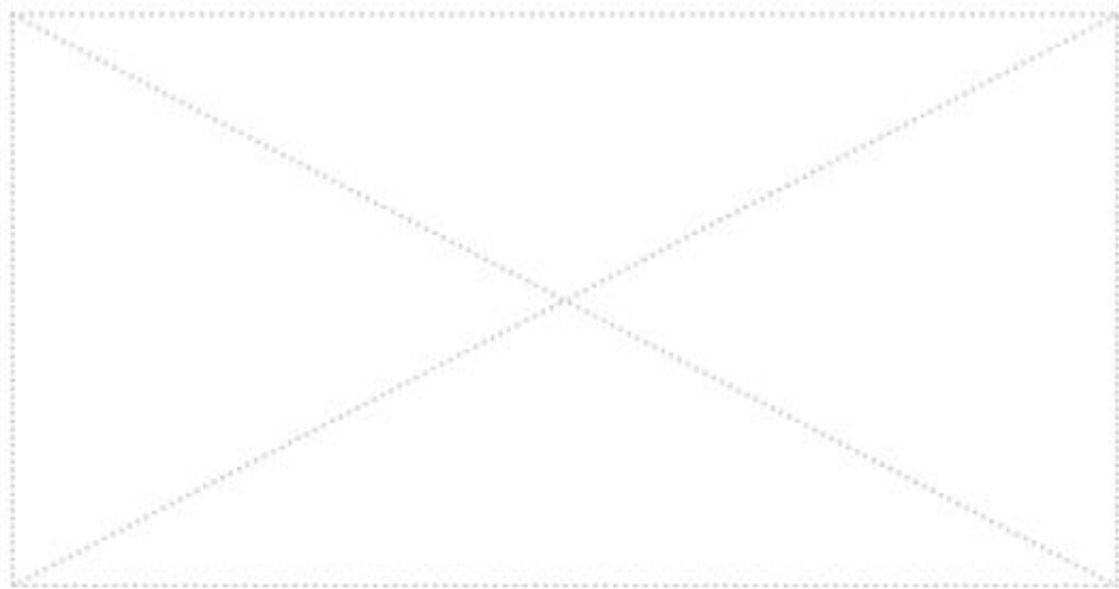
- 스마트연구실은 수요자 요구 맞춤형(수요자가 요구하는 여러 물성을 충족하도록 하는 기술) 소재 개발이 가능
 - 특정 물성에 최적화된 기존 소재가 아닌 수요자가 요구하는 여러 가지 물성들을 충족하는 새로운 소재를 신속하게 개발할 수 있어야 함
 - 예로, 디스플레이용 양자점 소재 개발할 때, 발광 파장, 발광 세기, 발광 반치폭 등에 대한 연구자의 다양한 요구 물성이 존재하는데 이를 모두 충족하는 소재를 설계하는 플랫폼이 되어야 함
 - 개인맞춤 시장(개별고객의 주문에 맞춰 one batch 생산이 가능한 시장)의 부상으로 제품 다양화와 그에 따른 맞춤형 소재의 신속한 개발이 필요해짐
- 스마트연구실은 합성된 나노입자 또는 양자점 소재의 내구성 평가를 위한 기능을 제공
 - 예로, 촉매의 내구성을 평가하기 위해 recyclability (aging에 따른 성능 반복 측정) 평가 시스템을 제공
- 본 과제에서 구축된 스마트연구실을 통해 합성된 모든 소재에 대하여 합성·공정조건·물성결과에 대한 데이터베이스 구축 및 사용자 요구에 따른 제공
 - 스마트연구실은 모든 합성·공정조건·물성 테스트 정보들을 디지털화하여 표준화된 포맷의 데이터셋으로 저장하고 있으며, 이 정보들을 사용자 요구에 따른 제공할 수 있는 플랫폼으로 구현하도록 함

3.2.3. 국내외 연구동향 및 차별성

▣ 촉매 나노입자 설계용 AI 스마트연구실 연구동향

○ 금 나노입자 합성 및 광학적 특성 분석 자율화 시스템 구축

- 영국 글래스고우 대학 Cronin 교수팀은 금 나노입자를 합성하는 AI 스마트실험실을 구축함 (Nature Communication, 2020년 6월 보고)
- 원하는 흡광도 스펙트럼을 가지는 나노입자를 구축하기 위한 자율 시스템을 구축함
- (차별성) 나노입자 합성을 자율화한 실험실 측면에서 의의가 크지만, 본 과제 기획은 신규 촉매소재 개발의 목적성이 다름



[금 나노입자 합성 AI 스마트실험실 플랫폼과 workflow 도식도]

(출처: Nature Communication, 2020)

○ 금 나노입자 유체 합성 및 광학적 특성 분석 자율화 시스템 구축

- 캐나다 토론토대학 Guzik 교수팀에서 금 나노입자 유체(fluid)기반 합성 및 광학적 특성 분석 자율화 시스템을 보고함 (Adv. Funct. Mater., 2021년 9월)
- 금 나노입자의 특정 파장에서의 최대 흡광도, 반치 전폭, SPR peak와 같은 광학적 특성을 최적화하는 공정을 머신러닝 기법을 통해 개발함
- 기존 배치(batch) 합성과는 달리 유체(fluid) 합성을 이용하여 매우 균일한 나

- 노입자를 머신러닝 기반으로 생성된 합성 공정 조건에 맞춰 자동으로 합성함
- (차별성) 광특성 최적화를 위한 나노입자 합성 플랫폼을 구축한 점은 의의가 크지만, 본 기획 과제는 신규 촉매소재 개발의 목적성이 다름



[금 나노입자 유체(fluid)기반 합성 및 광특성 분석 플랫폼 및 workflow 도식도]

(출처: Advanced Functional Materials, 2021)

○ 전기화학 촉매 합성 및 분석 자동화 시스템 구축

- 중국 북경대학교 Pan 교수팀에서 전기화학 촉매 합성 및 분석 자동화 시스템을 구축함 (Adv. Mater. Tech., 2021년 2월)
- Ni-Fe-Co 삼원계 촉매들을 조성을 변화하면서 고속대량 생성방법 (High-throughput generation)으로 합성하고, 수소 발생 반응에 대한 전기화학적 특성을 평가함
- (차별성) 본 플랫폼은 촉매의 전기화학적 특성을 분석하는 자동화 플랫폼을 구축했다는 점에서 의의가 있으나, 인공지능 기반의 소재개발 ‘자율화’ 시스템이 구축되지 않은 점이 본 기획과제와 큰 차별점임



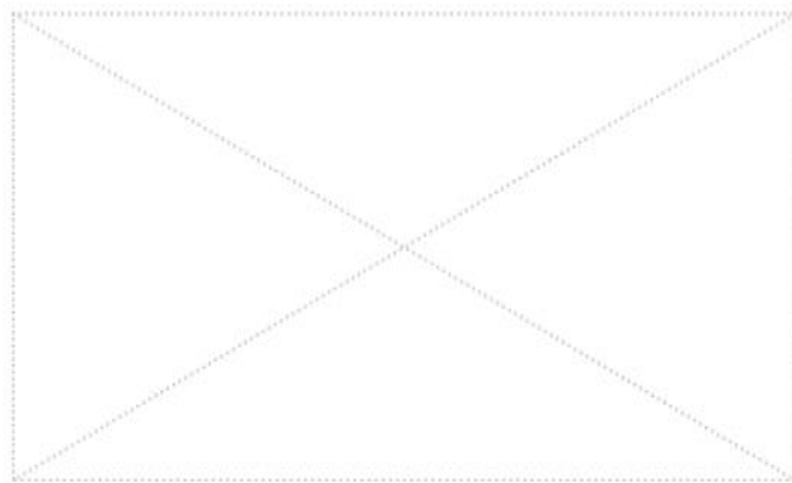
[전기화학 촉매 합성 및 분석 자동화 시스템 및 workflow 도식도]

(출처: Advanced Materials Technologies, 2021)

■ 디스플레이용 양자점 설계용 AI 스마트연구실 연구동향

○ 유기 용매에서 합성된 양자점 추출 및 정제 자동화 시스템

- 미국 MIT공과대학 Jensen 교수팀에서 유기 용매에서 합성된 양자점을 추출하고 정제하는 시스템을 자동화하여 보고함 (Nanoscale, 2017년 5월)
- 유체 합성 시스템이 요구되는 콜로이드 양자점 합성에서, 합성 이후 분석 및 시스템 도입을 위해 용매와 같은 불순물들을 정제 및 추출하는 과정을 다공성 전극 기반의 유체 채널을 이용하여 자동화함
- (차별성) 다양한 상에서의 합성과 추출 및 정제를 자동화하여, 이후에 분석에 까지 연결하고 확장 가능하다는 것에 의의가 있으나, 머신러닝 기반의 소재개발 ‘자율화’ 시스템까지 구축되지 않은 점이 본 기획과제와 큰 차별점임



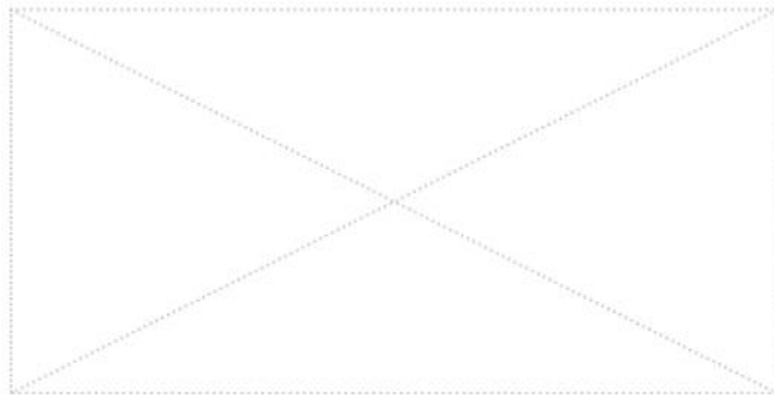
[전체적인 workflow 및 하드웨어 구성]

(출처: Nanoscale, 2017)

○ 페로브스카이트 양자점 합성 및 광학적 특성 분석 자율화 시스템 구축

- 미국 노스캐롤라니아 주립대 Abolhasani 교수팀에서 페로브스카이트 양자점 소재의 합성 및 광학적 특성 분석을 자율화하는 플랫폼을 보고함 (Adv. Mater., 2020년 6월)
- 디스플레이 내 특정 발광 스펙트럼을 가지는 균일도 높은 양자점을 합성하기 위해 합성 공정을 조절하는 앙상블 신경망 머신러닝 알고리즘을 사용함
- 높은 양자수율 및 균일한 입자 크기를 얻기 위한 자동화된 유체 합성 시스템과 다양한 머신러닝 기법들을 통합하여 수요자 맞춤형 페로브스카이트 입자를 합성하는 플랫폼을 구성한다는 것에 의의가 있음

- (차별성) 페로브스카이트 기반의 양자점 소재에 국한되며, 본 기획과제에서는 디스플레이용 적녹청색 발광 효율 극대화를 위한 core-shell 형태의 소재 전반에 대하여 시스템이 구축되어야 함

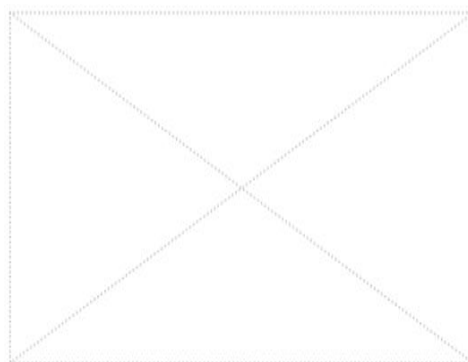


[페로브스카이트 양자점 합성 및 광학적 특성 분석 자동화 시스템]

(출처: Advanced Materials, 2020)

○ 3상 양자점에서의 안정성 분석 시스템 구축

- 미국 테네시 대학 Ahmadi 교수팀에서 3상 양자점의 안정성 분석과 관련한 플랫폼을 구축하여 보고함 (ACS Energy Lett., 2020년 5월)
- 장기적인 안정성 문제가 양자점 상용화의 주요 문제로 떠오르고 있는 현재, 주변 조건들을 적용하여 장기 안정성을 탐색하는 것을 목표로 함
- 3상 양자점에서 양자점의 조성을 여러 가지 회귀 기법 등 머신러닝을 통해 조절하고, 물리적 특성뿐 아니라 장기 안정성을 자동으로 분석해준다는 점에서 의의가 있음
- (차별성) 본 기획과제에서는 디스플레이용 적녹청색 발광 효율 극대화를 위한 core-shell 형태의 소재 전반에 대하여 시스템이 구축되어야 함



[3상 양자점 안정성 분석 시스템의 도식도]

(출처: ACS Energy Letters, 2020)

3.2.4. 특허 분석

▣ 특허 분석 개요

- 검색기간: ~2021년 9월까지 검색된 특허
- 범위: 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인: 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB: Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

검색식				
(((nano* 나노* particle* 입자* material* 물질* 재료* 소재* compound* 화합물* catalyst* 촉매* "quantum dot" 양자점*) near3 (design* 디자인* 설계* synthes* 합성*)) and (experiment* 실험* laborator* 랩* robot* 로봇* 로보트* "machine learning" 기계학습* "기계 학습" learn* train* 러닝* 학습* "artificial intelligence" 인공지능* "인공 지능" automation* 자동화*)) AND (c* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
303	514	216	194	1,227

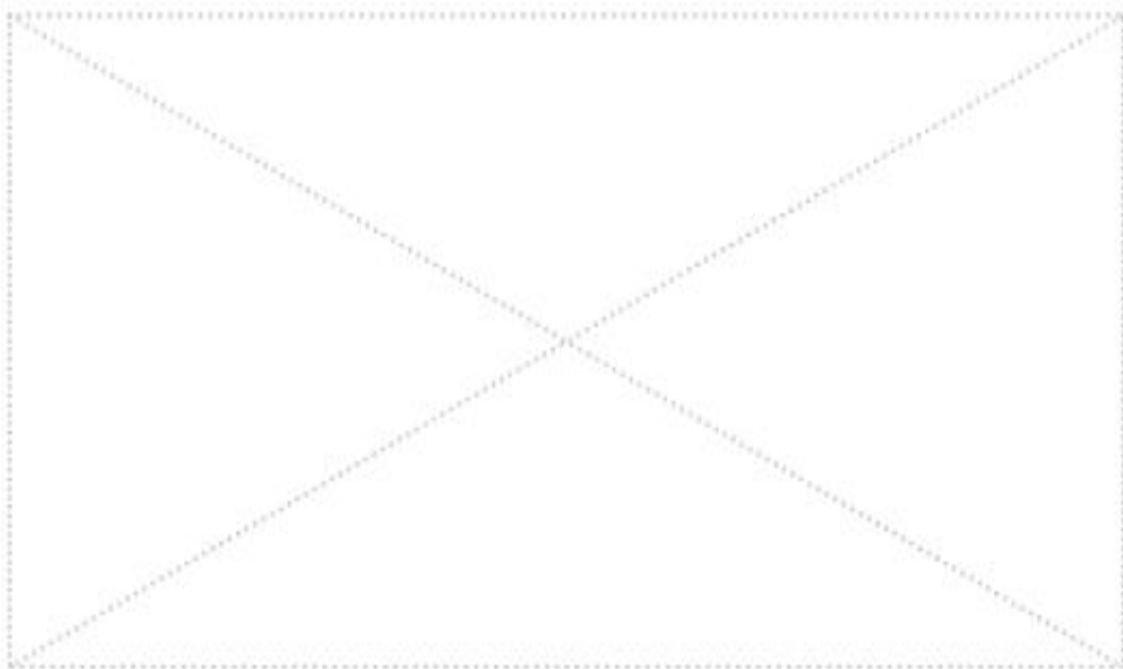
▣ 연도별 특허 발표 현황

- 검색된 특허 1,227건을 중복 제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 172건의 특허가 최종 선정되었음
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함. 즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님
- 미국(65건, 38%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 일본(45건, 26%), 한국(41건, 24%), 유럽(21건, 12%) 순임
- 참고로, 본 과제의 검색 범위를 머신러닝, 자동화 등에 포커싱을 하여 좁게 찾으면, 검색되는 건수가 거의 없기에, 다소 범위를 넓혀서 검색하였음

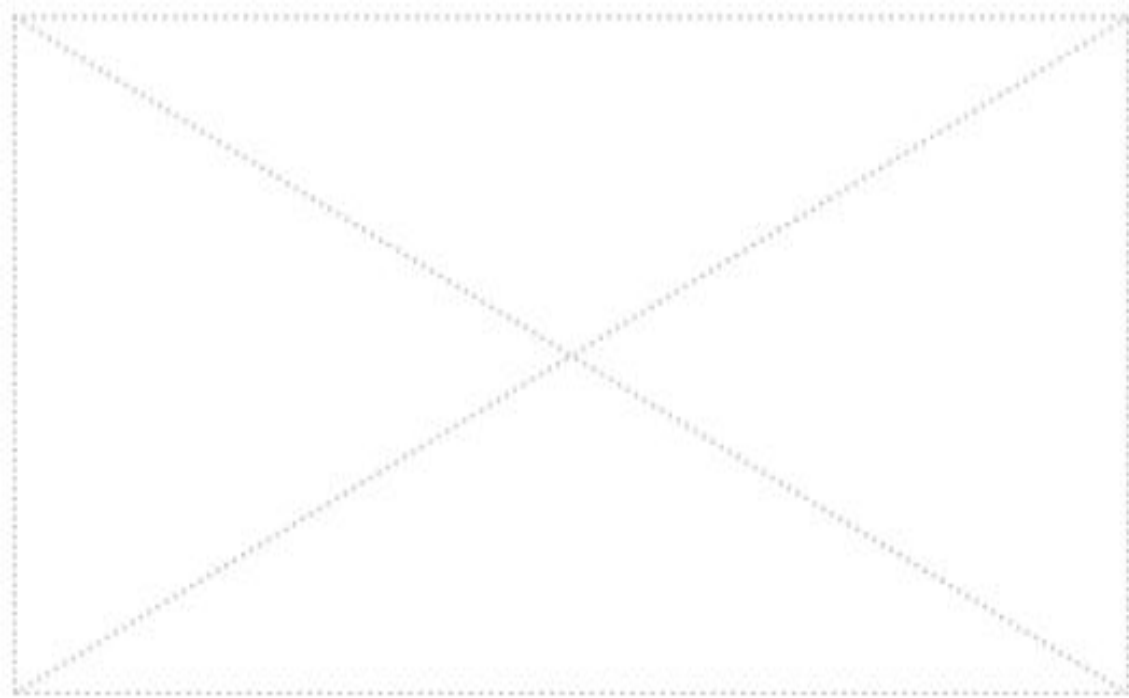
3. AI 스마트 연구실 사업 추진 전략

구분	92	93	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
유럽	1	1	1	0	3	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
일본	0	0	1	2	4	2	2	2	3	0	2	1	2	1	1
한국	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	1
미국	0	0	0	0	2	0	0	2	1	5	3	5	1	1	5
계	1	1	2	2	9	3	4	5	5	7	5	6	4	3	8

구분	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	총합계
유럽	0	0	0	0	0	2	0	0	1	2	1	2	1	0	21
일본	0	0	1	2	0	2	1	0	2	0	6	3	4	1	45
한국	1	0	1	2	5	0	3	1	2	2	4	8	6	1	41
미국	1	1	2	1	3	3	0	3	5	4	3	8	5	1	65
계	2	1	4	5	8	7	4	4	10	8	14	21	16	3	172



[연도별 특허 발표 현황]



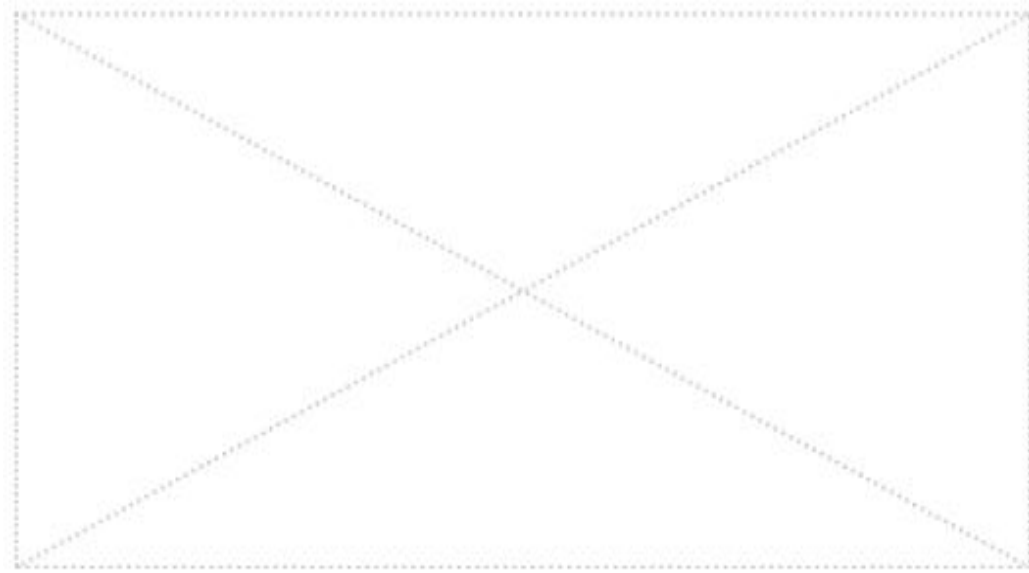
[연도별, 국가별 특허발표 현황]

▣ 국가별 특허발표 현황

○ 상위 10개 출원인은 아래와 같음

○ 한국과학기술연구원이 8건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

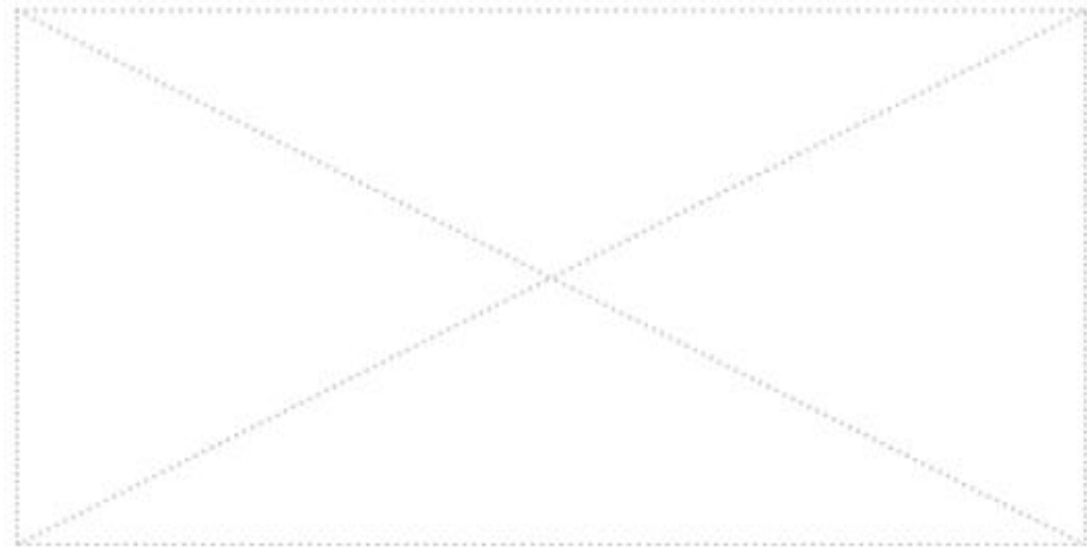
순위	기관	특허수	비율
1	한국과학기술연구원	8	21.1%
2	삼성전자 주식회사	4	10.5%
3	3-Dimensional Pharmaceuticals, Inc.	4	10.5%
4	Kyoto University	4	10.5%
5	SHOWA DENKO MATERIALS CO LTD	3	7.9%
6	ARAKI SHOICHI	3	7.9%
7	The Government of the United States of America	3	7.9%
8	성균관대학교산학협력단	3	7.9%
9	CITRINE INFORMATICS, INC.	3	7.9%
10	Lex Cowsert M.	3	7.9%



[관련특허 출원 기준 상위 10개 출원인]

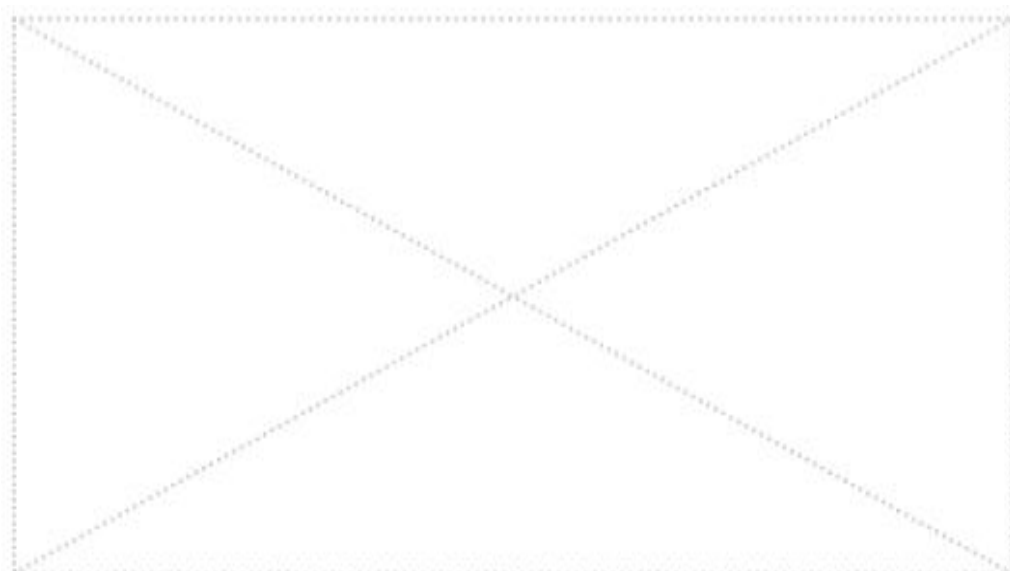
- 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음
- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 미국이 14건으로 가장 많으며, 그 뒤로 일본(10건), 한국(9건) 및 유럽(5건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	한국과학기술연구원	1	1	5	1	8
2	삼성전자주식회사	1	1	1	1	4
3	3-Dimensional Pharmaceuticals, Inc.	1	1	0	2	4
4	Kyoto University	1	2	0	1	4
5	SHOWA DENKO MATERIALS CO LTD	1	2	0	0	3
6	ARAKI SHOICHI	0	3	0	0	3
7	The Government of the United States of America	0	0	0	3	3
8	성균관대학교산학협력단	0	0	3	0	3
9	CITRINE INFORMATICS, INC.	0	0	0	3	3
10	Lex Cowsert M.	0	0	0	3	3
합계		5	10	9	14	38



[관련특허 등록 기준 상위 10개 출원인]

- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 1,104회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 압도적으로 높게 나타나고 있음
- 즉, 상위 출원인 중에 다양한 국적의 출원인이 많지만, 실제로는 미국에서의 특허출원 활동이 가장 활발하며, 심사관 등에 의해 인용되는 빈도도 미국에서 가장 높음

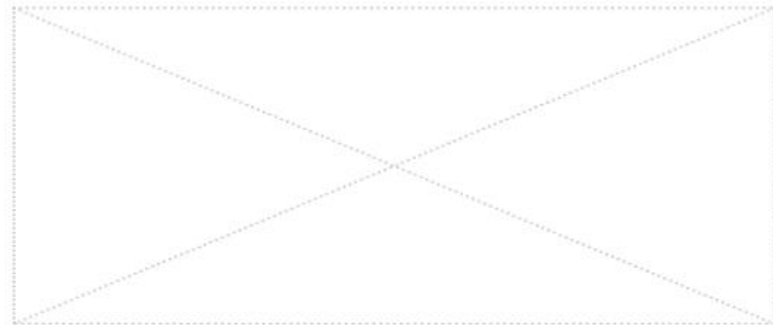


[관련특허 국가별 특허수 및 피인용도 그래프]

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	1,104	68	16.24
일본	99	37	2.68
한국	61	45	1.36
영국	37	4	9.25
독일	16	3	5.33
홍콩	3	2	1.5
중국	3	1	3
이스라엘	2	1	2
이탈리아	1	3	0.33
인도	1	3	0.33
스페인	1	1	1
벨기에	0	1	0
캐나다	0	1	0
덴마크	0	1	0
모로코	0	1	0
글로벌 평균	88.53	11.47	2.87

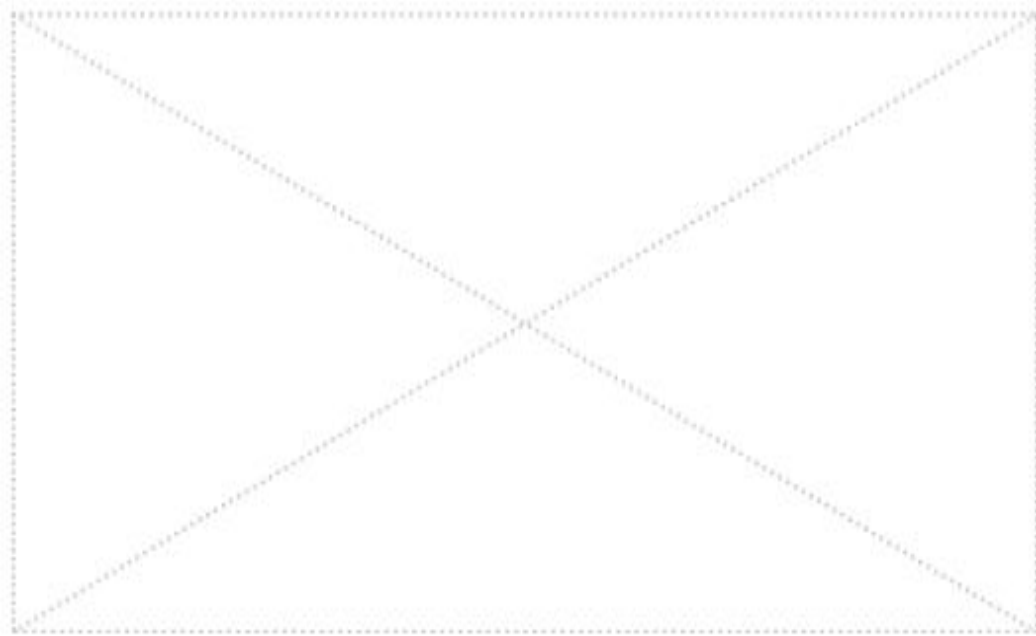
■ 기술수명 주기별 동향

- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 출원인수 및 출원건수 모두 계속적으로 증가하는 성장기에 해당되는 것으로 나타남
- 참고로, 성장기는 출원인수와 출원건수가 동시에 급증하는 시기를 의미함
- 따라서, 본 기술분야는 크게 뜨고 있는 분야로 볼 수 있음
- 다만, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것이므로, 만약 본 분석을 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾는다면, 성장기가 아닌 태동기에 해당될 것이며, 이는 바꿔 말하면, 기술 선점의 기회가 매우 넓게 열려 있는 것으로 볼 수 있음
- 참고로, 성장기는 출원인수와 출원건수가 동시에 급증하는 시기를 의미함



출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간

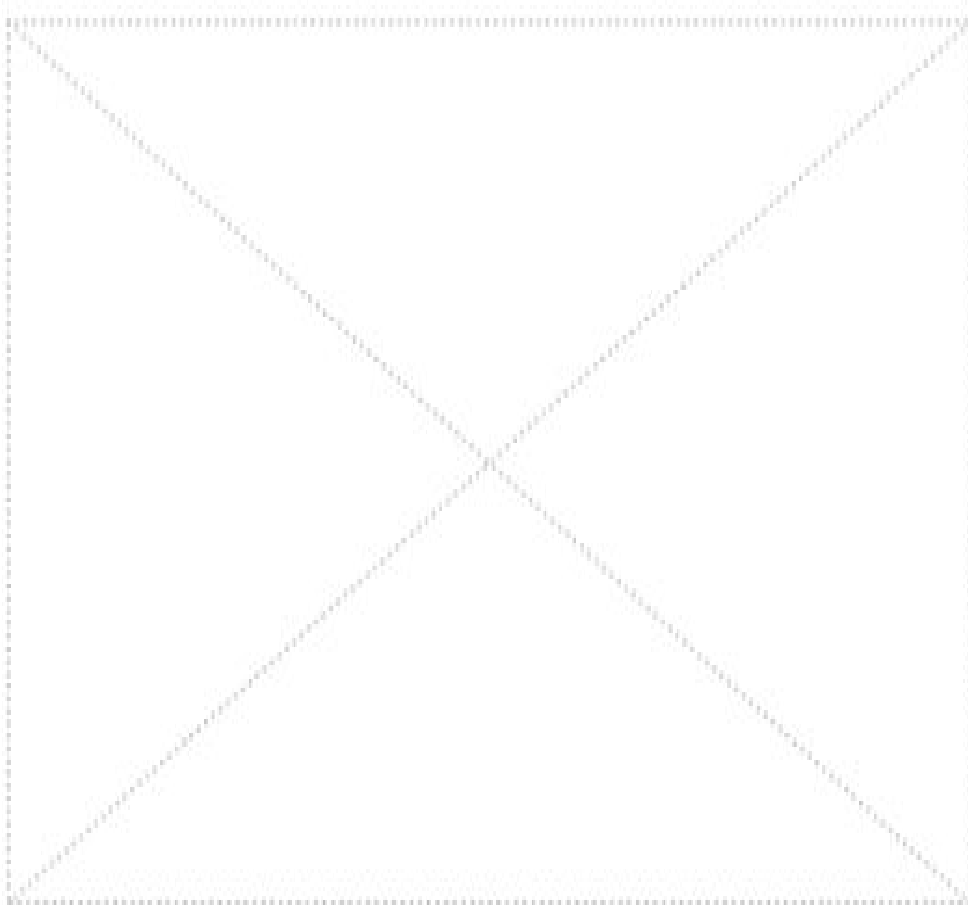
[기술수명 주기별 동향 설명 자료]



[기술수명 주기별 동향 분석결과]

▣ 키워드 맵

- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 다양한 재료들이 키워드로 포진하고 있으며, 가장 외곽 부분에 자동화, 해결 수단, 에너지, 방정식 등의 키워드가 일부 포진하고 있기는 하지만, 아직 “자동화”, “머신러닝” 등의 키워드가 그다지 활성화되지 않은 것으로 판단됨

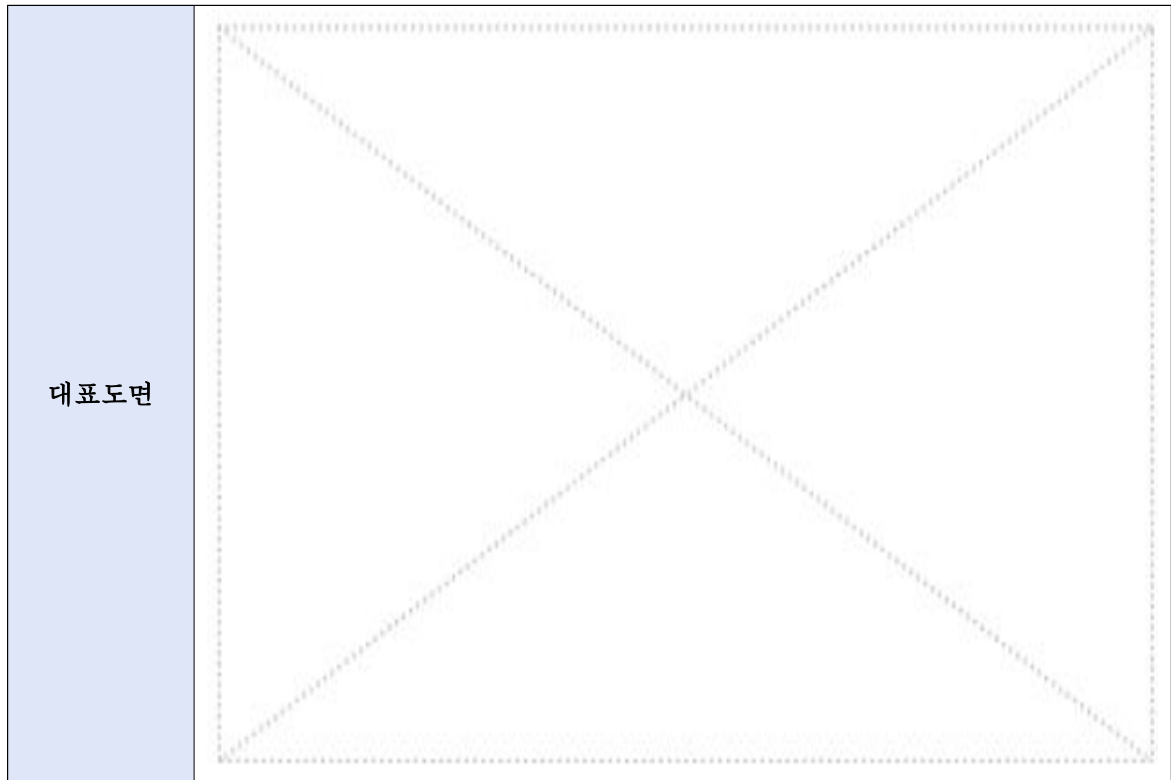


[특허 키워드맵]

▣ 핵심 특허

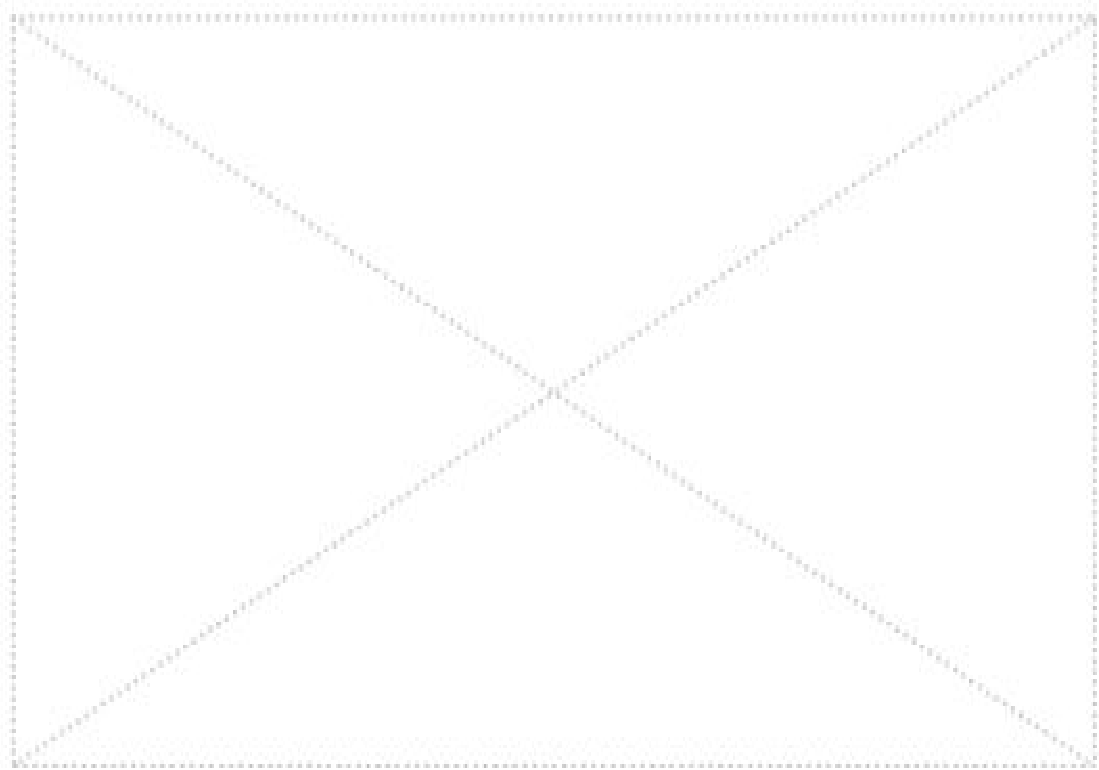
- 유효특허를 대상으로 위와 같은 분석을 진행하였으며, 172건의 유효특허 중에서 아래와 같은 핵심특허가 검색되었음
- 참고로, 출원인은 한국과학기술원이고, 발명자는 함형철, 김승훈 등 총 12명의 발명자가 포함되어 있음
- R&D를 투입하고 관련 특허를 창출하기 위해서는, 아래와 같은 핵심특허와는 차별화되도록 할 필요가 있으며, 아래의 청구항에 따르면, 제일원리 기반의 밀도 함수 이론(density functional theory, DFT)이라든가, “상기 반응 환경 정보는 전극 포텐셜, 및 전해액 pH 중 하나 이상을 포함하고, 상기 학습 데이터 출력 정보는 산소 흡착 에너지”라고 기재하고 있는 등 특정 부분에 특화되어 있으므로, 본 과제를 통해 차별화된 R&D 가 가능할 것으로 판단됨

발명의 명칭	딥러닝 기반의 촉매 설계 방법 및 그 시스템		
출원번호	2020-0096177	등록번호	2288002
출원일	2020.07.31	등록일	2021.08.04
출원인	한국과학기술연구원	발명자	함형철, 김승훈, 조진원, 최선희, 박현서, 윤창원, 윤성필, 정향수, 한종희, 유성종, 김형준, 장종현
요약	딥 러닝 기반의 촉매 설계 방법은, 인공 신경망(neural network)을 이용한 학습을 통하여 학습모델을 결정하는 단계, 촉매 구조 및 흡착물의 정보를 상기 학습모델에 입력하는 단계, 및 상기 학습모델에 입력된 촉매 구조 및 흡착물의 정보로부터 예측되는 산소 환원 반응 촉매 활성을 출력하는 단계를 포함한다.		
대표청구항	<p>컴퓨팅 시스템에 의해 각 단계가 수행되는 딥 러닝 기반의 촉매 활성 예측 방법으로서,</p> <p>인공 신경망(neural network)을 이용한 학습을 통하여 학습모델을 결정하는 단계;</p> <p>촉매 구조의 정보를 상기 학습모델에 입력하는 단계; 및</p> <p>상기 학습모델에 입력된 촉매 구조의 정보로부터 예측되는 산소 환원 반응 촉매 활성을 출력하는 단계;를 포함하며,</p> <p>상기 학습모델을 결정하는 단계는, 제일원리 기반의 밀도 함수 이론(density functional theory, DFT) 계산을 통하여 상기 학습모델의 학습을 위한 학습데이터 입력 정보 및 출력 정보의 종류를 결정하는 활성 디스크립터 해석 단계;</p> <p>제일원리 기반의 밀도 함수 이론 계산을 통하여 입력된 학습 데이터 입력 정보 값 및 이에 대응되는 학습 데이터 출력 정보 값을 획득하는 단계; 및</p> <p>상기 획득한 학습 데이터 입력 정보 값 및 출력 정보 값에 대하여 가중치 및 바이어스를 조절을 통하여 학습모델을 획득하는 단계;를 포함하고,</p> <p>상기 학습 데이터 입력 정보는 촉매 고유 특성, 촉매 구조, 흡착물의 촉매 표면 흡착 배치, 및 반응 환경 정보를 포함하고,</p> <p>상기 반응 환경 정보는 전극 포텐셜, 및 전해액 pH 중 하나 이상을 포함하고,</p> <p>상기 학습 데이터 출력 정보는 산소 흡착 에너지인, 촉매 활성 예측 방법.</p>		



3.2.5. 개발 목표 및 내용

▣ 개발 목표



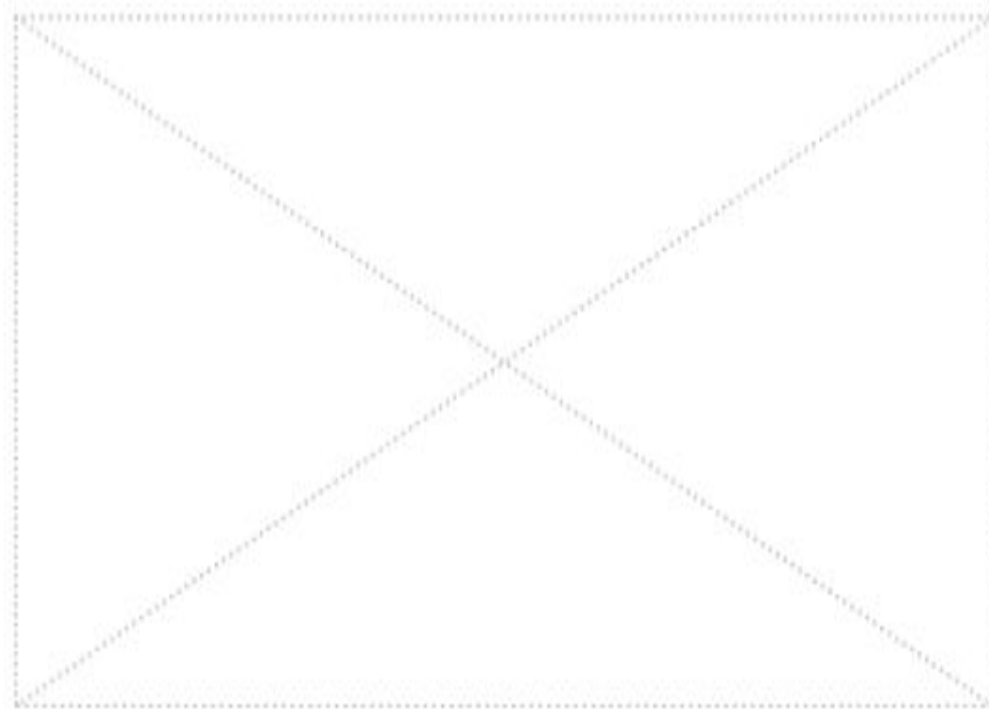
[기획과제 최종목표 및 세부목표 구성]

- (최종목표1) 수요자 요구 맞춤형 (수요자가 요구하는 여러 물성을 충족하도록 하는 형태) 나노소재 (나노입자, 양자점) 개발용 무인 자율화실험실 개발
- (최종목표2) AI 탑재된 지능형 로봇이 신소재 설계, 합성, 분석, 물성평가까지 자율적으로 수행하는 단일 플랫폼 개발
- (세부목표1) 나노입자 합성 자동화 기술 및 장치 개발
 - (촉매)로봇 제어형 배치(batch) 합성 시스템 구축
 - (촉매)다양한 성분 구성의 합금 나노입자 제조 공정법 개발
 - (디스플레이) 로봇 제어형 연속/대량 제조를 위한 유동(fluid)화학 기반 플랫폼 구축
 - (디스플레이) 합성과정 (온도, 농도, 흐름, 혼합, 정제 등) 정밀제어 기술 개발

- (세부목표2) 촉매 물성측정 자동화 기술 및 장치 개발
 - 촉매질량 측정 회피를 위한, 유사 mass-activity 측정법 개발
 - 촉매성능 평가용 전류측정 장치 및 결과 환류체 자동화 시스템 개발
- (세부목표3) 디스플레이 광특성 측정 자동화 기술 및 장치 개발
 - 광특성 분석용 시료제작 자동화 기술 개발
 - 광 산란 및 광 흡수 및 발광 측정을 동시에 수행하여 융합물성 데이터를 획득할 수 있는 융합 물성 측정 시스템 구축
- (세부목표4) 나노입자 설계 및 최적화 AI 기술 개발
 - 촉매와 디스플레이의 성능을 결정짓는 핵심물성들을 예측할 수 있는 AI모델 개발
 - 수요자가 요구하는 물성을 인풋으로 입력하였을 때, 최적의 합성 반응조건 및 반응경로 제시할 수 있는 역설계 AI 모델 개발
 - 나노입자 (촉매용)와 양자점 (디스플레이용) 재료에 관련한 문헌으로부터 비정형 데이터 (공정 또는 물성관련 텍스트, 그래프, 표, 그림) 추출을 위한 자연어처리 기술 개발
- 자율화실험실 검증 및 활용성 입증
 - (촉매) Ir 기반 기존 나노입자 촉매소재의 합성 및 공정 최적화 및 Ir 단점 극복용 OER반응 고성능 신규 촉매 개발
 - (디스플레이) InP 기반 기존 양자점 소재의 합성 및 공정 최적화 및 InP 단점 극복용 청색발광 신규 양자점 소재 발굴
- 아래 연구개발 내용을 자세히 기술함

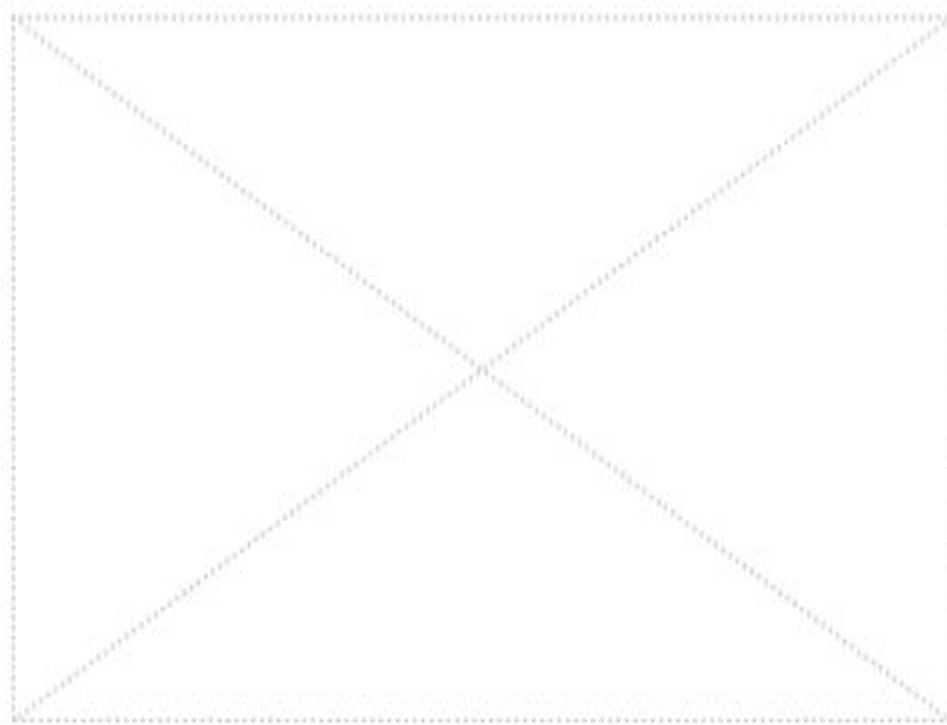
▣ 나노입자 합성과 촉매 물성평가 기술 개발

- 다양한 성분과 조성의 합금 나노입자를 제조하고 이의 OER촉매 특성을 자동으로 평가하는 자동화 시스템 개발
- 자동화 시스템은 ‘합금 나노입자 제조’, ‘합금 나노입자 증착 전극 제조’, ‘OER 특성 평가’로 구성(아래 시스템 구성도 참조)



[OER 측매용 나노입자 합성 및 물성평가 자동화 시스템 구성도]

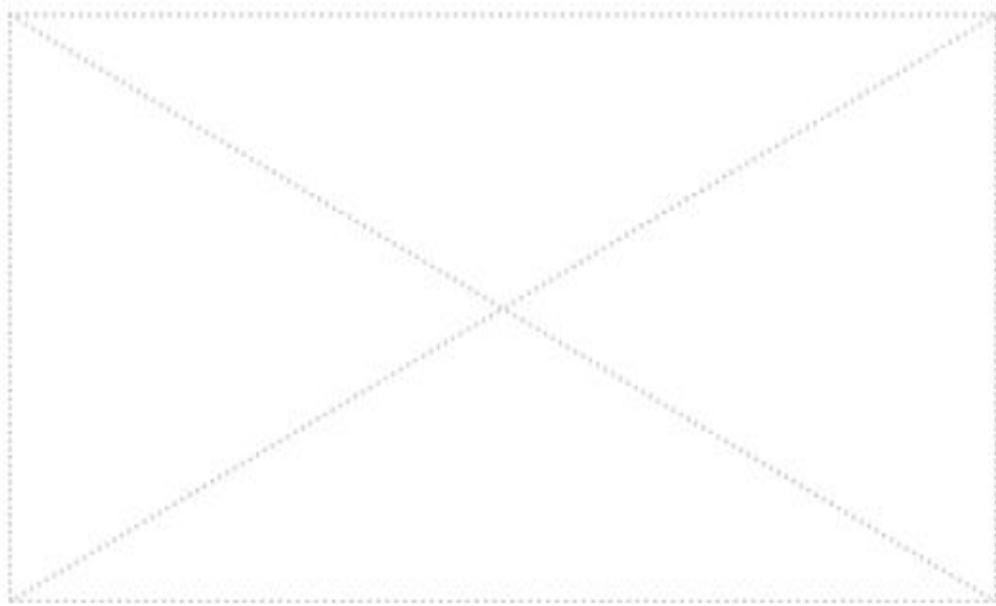
- 시스템을 통해 얻어진 합금의 성분 및 조성에 따른 OER 특성 결과들은 데이터베이스에 저장되고, 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과들과 비교하여 보다 정확한 나노입자 측매 신소재를 설계할 수 있도록 함
- 다양한 성분 구성의 합금 나노입자 제조 공정법 개발
 - 합금 나노입자를 만드는 일반적인 공환원 공정은 합금 나노입자를 간편하게 만드는 장점이 있지만 환원속도가 크게 차이나는 물질의 합금 나노입자를 제조가 어려운 단점이 있음
 - 또 다른 대표적인 공정인 열수합성법은 고온고압이 필요하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있음
 - 이러한 공정은 다양한 성분 및 구성의 합금 나노입자를 빠르게 제조하고 평가해야 하는 자동화 시스템에는 맞지 않음
 - 따라서 안정적으로 다양한 합금 나노입자를 제조하는 새로운 공정을 개발해야 할 필요가 있음



[다양한 성분의 합금 나노입자의 제조공정 모식도]

- 합성 자동화를 위한 합금 나노입자 제조 공정법 최적화 기술 개발
 - 합금 나노입자의 합성 및 평가 자동화 공정 개발을 위해서는 나노입자의 제조 공정을 최대한 단순화하고 규격화 할 필요가 있음
 - 또한 시약의 투입에 있어서 모든 시약을 액체화해서 운반의 편리함과 오차의 최소화를 진행해야 함
 - 금속 전구체, 안정제, 환원제를 모두 용액상으로 다루는 제조기술 개발이 필요함
 - 상온 또는 100도 이하의 온도에서 상압에서 나노입자를 제조가능 한 기술 재현성이 뛰어나고 안정적인 나노입자 제조기술이 필요함
- 촉매질량 측정 회피를 위한, 유사 mass-activity 측정법 개발
 - 합금 나노입자의 전기화학적 특성분석을 위해서는 만들어진 나노입자를 반응 용액에서 분리 및 세정하고, 용액에 재분산하여 정확한 양을 전극에 올리는 과정이 필요함
 - 이러한 나노입자의 세정 및 재분산, 농도측정은 원심분리기, ICP등 분석기기를 사용해야 하고, 이를 위한 샘플 준비시간 및 과정이 복잡하여 자동화가 어려운 문제가 있음

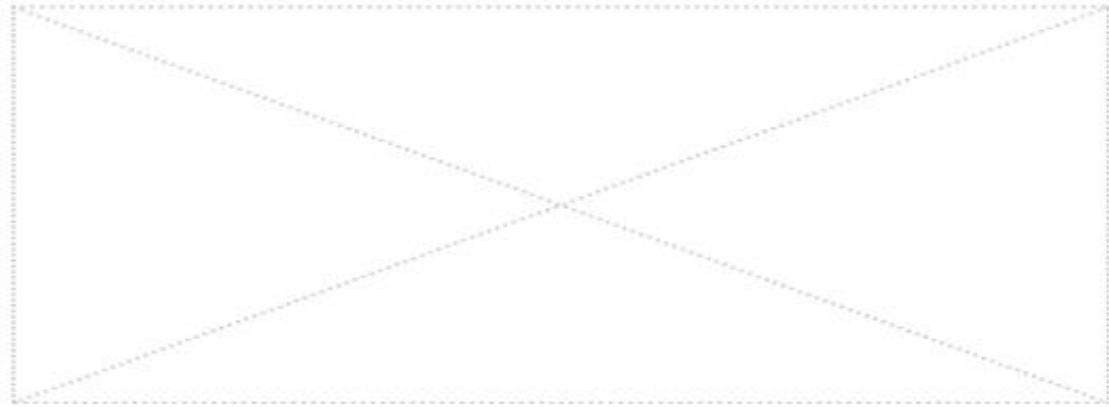
- 따라서 만들어진 합금 나노입자를 측정 전극에 올리고, 전극에 올라간 나노입자의 양을 정확히 측정할 수 있는 새로운 기술의 개발이 필요함
- 합금 나노입자를 분리 및 세정없이 전극에 올리는 기술이 필요함
- 합금 나노입자를 잘 부착할 수 있는 형태와 조성을 가진 전극 개발 기술이 필요함
- 전극 위에 올라간 합금 나노입자의 양을 정확하게 측정할 수 있는 측정기술이 필요함



[촉매질량 측정 회피를 위한 유사 mass-activity 측정법의 모식도]

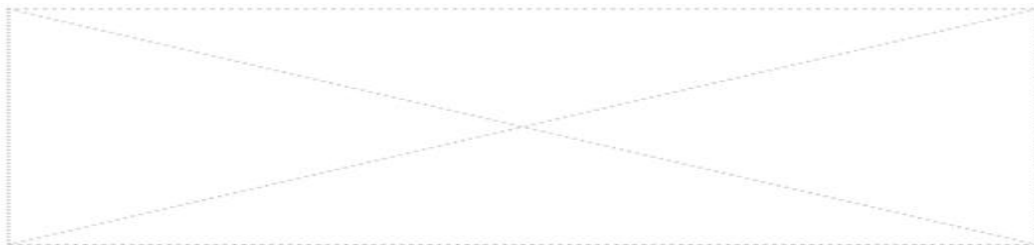
- 촉매성능 평가용 전류측정 장치 및 결과 환류체 자동화 시스템 개발
 - 전극 위에 올라간 합금 나노입자의 성능평가를 위해서는 반응기, 전해질, 기준전극, 상대전극이 필요하고 전극 특성 평가 후 다음 평가를 위해서는 전해질을 교체하고 반응기, 기준전극, 및 상대전극의 세정이 필요함
 - 이를 위해서 반응시스템의 교체 및 세정, 다음 평가 준비를 자동화하는 시스템을 개발할 필요가 있음
 - 반응기, 전해질, 기준전극, 및 상대전극이 조합되어 평가용 합금 나노입자 전극 투입 시 바로 평가가 가능한 시스템이 필요함
 - 평가가 끝난 후 다음 평가를 위해서 새로운 반응기, 전해질, 기준전극, 및 상대전극을 분석장비에 연결, 준비하는 자동화 시스템이 필요함
 - 평가가 끝난 반응기, 기준전극, 및 상대전극을 세정하고, 반응기에 새로운 전해질을 투입하여 다음 평가를 준비하게 하는 자동화 시스템이 필요함

▣ 디스플레이용 양자점 합성 및 물성평가 기술 개발



[디스플레이용 양자점 개발 자율형 실험실 개발 내용 요약]

- 지능형/지울형 합성 수행 로봇 시스템은 이동형 혹은 고정형 로봇 팔 시스템으로 양자점 합성을 준비하고 실제 실험을 수행하며 머신 비전 기술 등이 도입하여 현재 상태와 흐름을 확인할 수 있도록 개발하고자 함
 - 로봇 시스템의 요소 기술로서 전구체 준비 및 주입, 시료 채취, 정제/분석 등 후처리 공정을 가능하게 하는 로봇 팔 시스템과 제어 시스템이 있음
 - 또한 실험 수행 과정의 흐름을 파악할 수 있도록 적외선/열/가시광 카메라 등으로 이루어진 머신 비전 기술도 중요한 부분이며 전체 자율형 실험실의 안전을 위한 필수요소이기도 함
- 연속적인 반복 제조를 위하여 유동 화학 기반 합성 플랫폼을 개발하여 공정변수에 따른 합성 과정의 시간과 비용을 축소하고자 하며 자동화된 합성 수행을 위하여 로봇 시스템이 제어할 수 있도록 개발하고자 함



[연속 유동화학 합성 시스템]

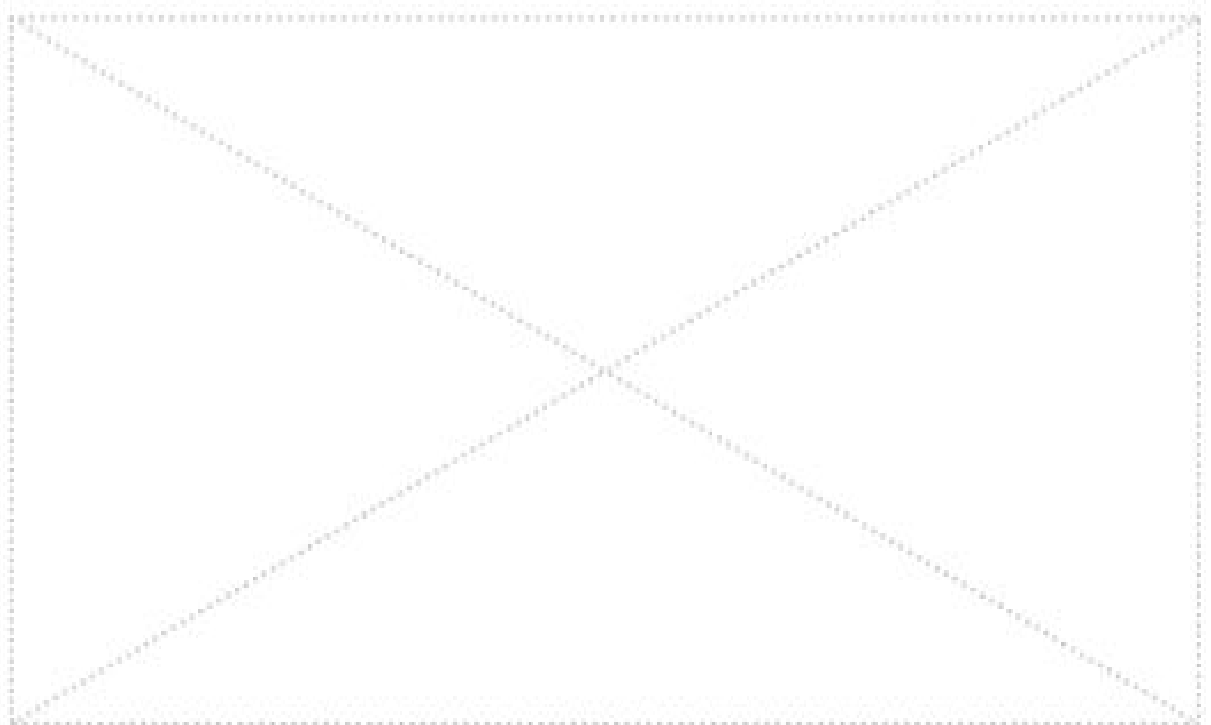
- 합성 시스템 요소 기술로서 전구체 주입량, 주입속도, 혼합속도, 반응기 내 체류시간 등을 제어하고 합리적인 합성 반응기 디자인을 적용하여 연속적으로 대량의 실험 수행을 가능하게 하는 유동 화학 합성 시스템 개발이 필요함

- 합성 시스템의 또 다른 요소 기술로써 유동 반응물의 실시간 물성 평가 시스템의 구축이 있으며 이는 연속적으로 대량의 실험이 수행되어지는 과정 중 분석 과정의 시간을 축소시켜주며 자율형 시스템의 수행 과정을 관리자가 직관적으로 파악할 수 있도록 해줄 것으로 예상함



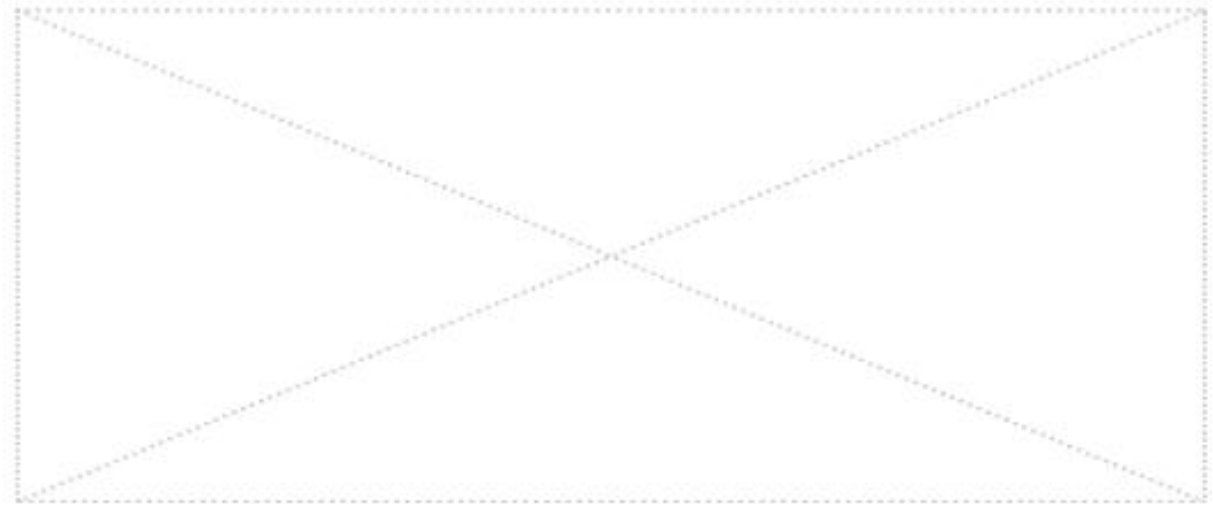
[디스플레이용 양자점 개발 자율형 실험실의 개발과정 요약도]

- 종합적으로 반복 실험을 통하여 수집된 방대한 양의 데이터를 해석하고 적용하기 위하여 머신러닝 기반 데이터 추론 및 소재 합성 계획 설계 기술을 개발하고자 하며 합성 변수와 실시간/현장외 분석 데이터를 연계하여 결과를 도출하고 결과 예측 및 반응 경로 최적화 등 합리적인 추론을 가능하게 하는 기술을 개발하고자 함
- 나노입자 소재 분석용 시료제작 자동화 기술 개발하고자 함
 - 합성된 나노입자 용액을 자동으로 인지하고, 로봇팔을 활용하여 채취하고 원하는 전처리 과정을 수행할 수 있도록 재위치시키는 기술 개발
 - 나노입자 합성시 발생하는 반응이 완료되지 않은 전구체 및 용매, aggregate를 제거하기 위한 시료 전처리 과정 자동화 기술 개발
 - 전처리가 완료된 시료를 재채취하고, 나노입자 구조인자 및 물성 측정을 위한 측정 스테이지로 이동시키는 기술 개발
 - 본 나노입자 소재 분석용 시료제작 자동화 기술 개발은 기존 나노입자 분석 시료 제작기술을 모사하는 자동화 시스템을 구축함으로써 연구자 기반 실험의 실패 반복을 통한 실험 수행을 통한 낮은 실험 재현성 및 효율성을 극복하고자함



[나노입자 소재 분석용 시료제작 자동화 기술 연구내용 모식도 및 요구 요소기술]

- 나노입자 소재의 광특성을 측정 및 분석하는 자동화 시스템 개발하고자 함
 - 전처리된 나노입자 용액의 크기 및 분산도 측정을 위한 광 산란 측정 시스템 구축 및 분석 시스템 자동화
 - 광 산란 및 광 흡수 및 발광 측정을 동시에 수행하여 융합물성 데이터를 획득할 수 있는 융합 물성 측정 시스템 구축
 - 측정된 데이터 분석 자율화 시스템 구축을 위해 기존 측정 기술을 활용한 나노입자 물성관련 레퍼런스 데이터 생성
 - 나노입자 레퍼런스 데이터를 활용한 자동 융합물성 측정 결과 분석 자동화 시스템 구축
 - 본 나노입자 소재 분석용 측정/분석 자동화 시스템 개발을 구축함으로써 기존 측정기술의 한계를 극복하는 나노입자의 소자 물성을 결정하는 구조인자를 빠르게 측정함으로써 나노입자 합성 재설계 최적도건 도출을 효율적으로 유도하고자함



[나노입자 소재 분석용 측정/분석 자동화 시스템 개발 연구내용 모식도 및 요구 요소기술]

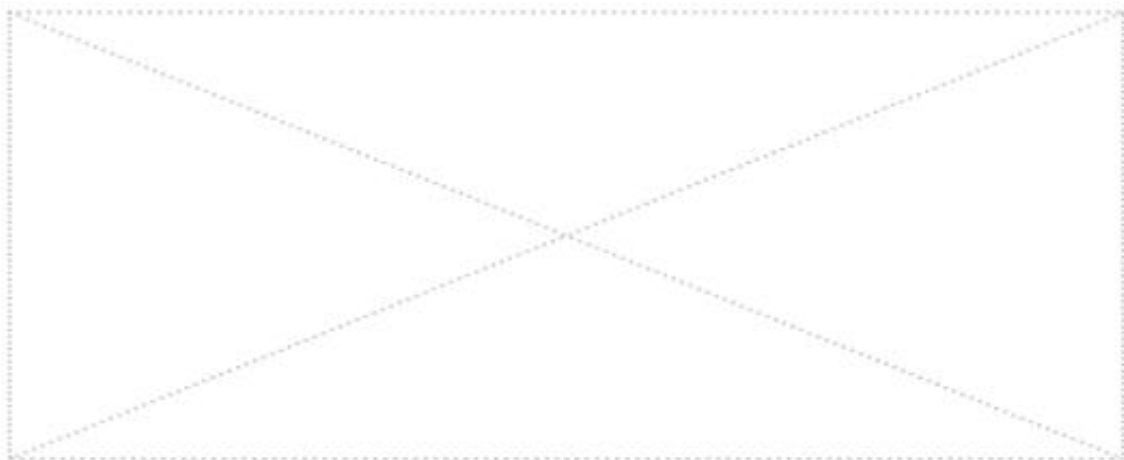
■ 나노입자 설계 및 최적화 AI기술 개발



[세부목표2 달성을 위한 개발내용 요약]

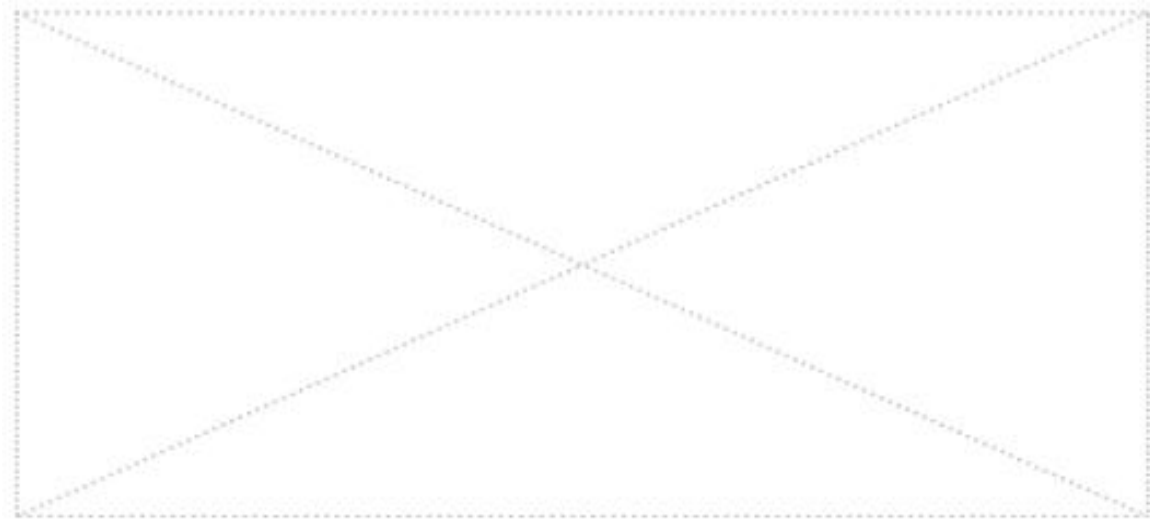
- 양자역학 계산 및 머신러닝 기반 유망소재군 탐색
 - 신규소재를 발굴할 시에는 모든 소재에 대한 탐색이 진행될 수가 없기 때문에, 특정 유망한 소재군을 확보할 필요성이 존재 (촉매 및 디스플레이 모두 해당)
 - 열역학적 물성 데이터베이스를 양자역학 계산법 기반으로 구축하고 재료의 안정성 (또는 합성가능성)을 평가할 수 있는 머신러닝 모델 개발
 - 촉매특성 또는 디스플레이 광특성 데이터베이스를 양자역학 계산법 기반으로 구축하고 해당물성 평가하는 머신러닝 모델 개발

- 촉매/디스플레이 물성 예측용 AI 모델 개발
 - 확보된 공정-물성 빅데이터를 바탕으로 나노소재 합성의 공정조건을 인풋으로 활용하고 물성 데이터 (촉매의 경우 활성도, 선택도 등, 디스플레이의 경우 발광파장, 발광세기 등)를 아웃풋으로 예측할 수 있는 인공지능 모델 개발
 - 여러 물성치를 수요자가 지정하는대로 동시에 충족하는 인공지능 모델 개발
 - 소재의 공정-물성-분석 데이터들의 상호간의 상관관계 규명
- 최적의 합성 반응조건 및 경로 제시용 AI 모델 개발
 - 수요자가 요구하는 여러 가지의 물성들을 한번에 인풋으로 입력하였을 때, 최적의 합성 반응조건 및 반응경로 제시할 수 있는 역설계 AI 모델 개발
 - 화학합성의 합성순서(recipe sequence)에 대한 사전정보(priori)가 전혀 없는 경우에도 순서를 배열시켜 출력할 수 있는 인공지능 모델 개발



[여러 물성치를 수요자가 지정하는대로 충족하는 AI모델 도식도]

- 비정형 데이터(공정/물성) 추출을 위한 자연어처리 기술 개발
 - 문헌 (촉매용 나노입자 또는 디스플레이용 양자점 소재개발 관련 연구문헌) 내에 양질의 공정, 물성, 분석 데이터가 존재하므로 이를 추출할 수 있는 자연어처리 기반의 추출도구를 개발
 - 문헌 내에 존재하는 핵심정보들이 텍스트, 표, 그래프 (XRD, XPS 등), 이미지 (SEM, TEM 등)의 다양한 포맷으로 존재하므로, 각 포맷의 데이터를 디지털화된 형태로 추출할 수 있는 인공지능 기술 개발
 - 문헌으로부터 추출된 데이터를 자유헌실에서 활용할 수 있는 형태로 지식베이스 구축 (Knowledgebase)



[문헌 내 비정형 데이터 수동추출의 예시 (UCSB 열전소자 지식베이스 구축)]

(출처: UCSB MRL 홈페이지)

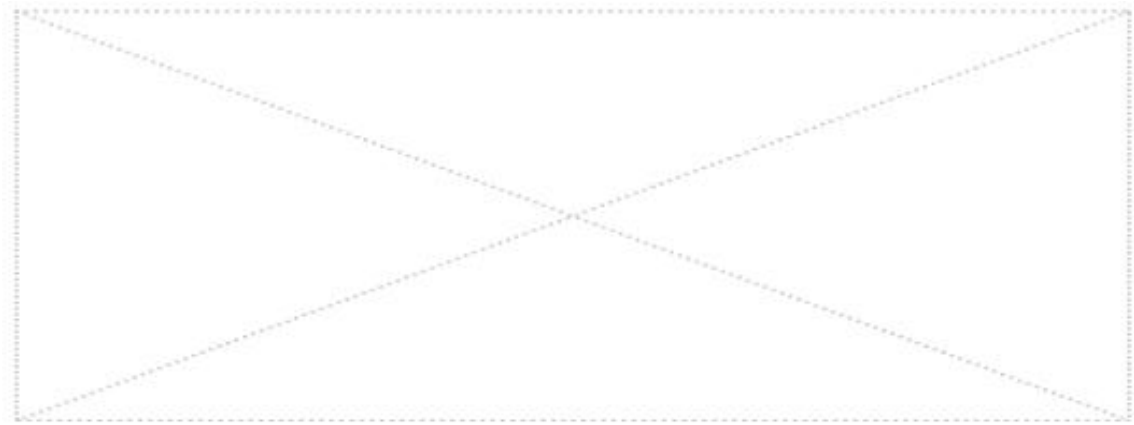
*본 기획사업의 내용은 자연어처리 기술 기반 자동추출

▣ 개발된 스마트연구실 검증 및 활용안 입증 계획

- (검증 및 활용안1) OER촉매 개발
 - Ir 기반 기존 OER촉매 소재의 합성 및 공정 최적화 (문헌값 재현)
 - Ir보다 가격경쟁력 있고 더욱 고성능 (전류밀도, Faradaic 효율 최적화)인 신규 OER 촉매소재 발굴
- (검증 및 활용안2) 양자점 디스플레이 현재 기술의 한계 극복: 색순도 향상을 위한 합성 공정 최적화
 - InP(인화인듐) 기반 녹색/적색 발광 양자점 최적화
 - InP 양자점의 합성 및 공정조건 최적화를 통해 반치폭(FWHN) 값이 이론적 한계 값인 22nm 수준에 도달할 수 있는지 확인을 통해 개발 플랫폼의 활용성 검증
 - InP 단점을 극복할 수 있고, 청색 발광 효율과 반치폭을 최적화시킬 수 있는 신규 소재 발굴을 통한 본 플랫폼의 확장성 입증

3.2.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

▣ 추진체계



[추진체계 및 참여기관 구성 요약도]

- 본 과제에서 개발될 자율화실험실은 상기 설정된 세부목표에 따라 3개의 세부 개발팀으로 나누어 진행 (세부1, 세부2, 세부3팀)
- 세부1팀은 나노입자의 합성과 물성측정 자동화 기술 및 장치 개발 연구를 수행
- 세부2팀은 나노입자 설계 및 최적화를 위한 AI 기술 개발 연구를 수행
- 세부3팀은 나노입자 소재 분석자동화 기술 개발 연구를 수행
- 스마트실험실의 검증 및 활용안 입증은 스마트연구실이 구축되어 있는 세부1팀에서 주도적으로 수행

▣ 연구개발 로드맵

- 세부1. 나노입자 합성 자동화 기술 개발

연구 내용	2022	2023	2024	2025	2026	2027
로봇 제어형 나노입자 합성 시스템 구축						
다양한 성분 구성의 나노입자 제조 공정법 개발						

유동 화학 기반 합성 플랫폼을 개발 결과 수집 및 반응 예측에 의한 자율 실험설계 기술 개발						
자율실험실 시스템 개발 및 시스템 integration						
자율실험실에 의한 신규 조성 OER 촉매 개발 검증						
자율실험실에 의한 신규 조성 양자점 개발 검증						

○ 세부2. 촉매물성 평가 자동화 기술 개발

연구 내용	2022	2023	2024	2025	2026	2027
촉매질량 측정 회피를 위한, 유사 mass-activity 측정법 개발						
나노입자 합성 시스템과 융합(integration)기술 개발						
촉매성능 평가용 전류측정 장치 및 결과 환류체 자동화 시스템 개발						

○ 세부3. 디스플레이 광특성 평가 자동화 기술 개발

연구 내용	2022	2023	2024	2025	2026	2027
시료 채취 및 전처리 자동화 기술						
공간인지 및 그래퍼 최적화 기술						
나노입자 합성 시스템과 융합(integration)기술 개발						
광기반 나노입자 구조물성 측정 플랫폼 구축						

○ 세부4. 나노입자 설계 및 최적화 AI 기술 개발 로드맵

연구 내용	2022	2023	2024	2025	2026	2027
양자역학 계산법 및 머신러닝 기반 유망소재 탐색						
최적합성조건 (농도, 부피 등) 예측용 AI기술 개발						
최적반응경로 (합성순서 등) 제시용 AI기술 개발						
AI 자연어처리 기술 기반, 문헌 내 비정형데이터(합성 및 물성 데이터) 추출						

3.2.7. 소요예산

▣ 사업기간 : 6년 (2022~2027년)

▣ 사업비 규모 : 국비 총 93억원 (1차년도 13.66억, 2차년도 17.34억, 3-5차년도 각 18억원/년, 6차년도 8억원)

▣ 연차별 연구비

[단위: 억원]

구분		'22	'23	'24	'25	'26	'27	계
정부 (출연금)	나노입자 합성 자동화 기술 개발	6.7	7.0	7.0	8.2	8.2	2	39.1
	촉매물성 평가 자동화 기술 개발	1.5	2.84	3.0	2.6	2.6	2	14.54
	디스플레이 광특성 평가 자동화 기술 개발	2.46	3.5	4.0	3.6	3.6	2	19.16
	나노입자 설계 및 최적화 AI기술 개발	3.0	4.0	4.0	3.6	3.6	2	20.2
소계		13.66	17.34	18.0	18.0	18.0	8.0	93.0
총 사업비		13.66	17.34	18.0	18.0	18.0	8.0	93.0

▣ 사업비 산출근거 (아래의 전문가 수 및 기타 이유 (예, 하드웨어적 요소등))

- (전체) 아래 장비비, 재료비, 활동비, 추진비, 인건비, 필요 전문가 숫자 및 분야에 근거하여 18억원/년 규모의 사업비를 추산
- (장비비) 촉매 및 디스플레이 랩의 합성파트 구축에 필요한 로봇 하드웨어와 제어시스템 구입이 필요하며, 이는 2.5억원/년 규모로 추산
- (장비비) 촉매 성능 특성분석 장비 및 디스플레이 광특성 분석 장비 및 관련 제어시스템 구입이 필요하며, 이는 연 2억원/년 규모로 추산
- (재료비) 대량의 양자역학 계산, 데이터베이스 구축, 데이터 기반 인공지능 학습 모델 개발에 필요한 서버 및 고성능 GPU 구입이 필요하며, 이는 2억원/년 규모로 추산

- (재료비) 본 과제의 성격상 끊임없는 나노입자 및 양자점 소재의 합성이 필요하며, 관련한 재료비는 2.5억원/년 규모로 추산
- (활동비 및 추진비) 국내외 학회 활동을 포함한 각종 연구활동 및 과제추진 비용은 1억원/년 규모로 추산
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 최소 10명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 책임급 연구원이 이끄는 3-4인의 전임 연구보조원이 필요하므로 이를 바탕으로 인건비를 추산하면 8억원/년 규모가 됨

전문가 1	로봇 기반 화학 합성 시스템 구축 전문가
전문가 2	나노입자 화학 합성 및 공정법 개발 전문가
전문가 3	OER 촉매 반응 및 소재개발 전문가
전문가 4	디스플레이용 발광 양자점 소재개발 전문가
전문가 5	소재 역설계용 머신러닝 모델 개발 전문가
전문가 6	인공지능 자연어처리 전문가
전문가 7	대형 데이터베이스 지식베이스 구축 전문가
전문가 8	나노입자 광분석(spectroscopy) 시스템 자동화 전문가
전문가 9	컴퓨터 비전 전문가
전문가 10	공간인지 및 그래퍼 제작 전문가

3.2.8. 기대효과 : 활용 시나리오

▣ 시나리오 1 : 금속 나노입자 촉매 개발 연구 분야

연구 중심 대학에서 연구를 수행하고 있는 이교수는 간담이 서늘했다. 학령인구가 줄어들어, 대학생 수가 줄어든 상황에서, 학생들의 취업이 용이하다보니 대학원을 진학하는 학생들 또한 줄었다. 산소발생반응에 들어가는 귀금속 iridium을 대체할 새로운 합금 조성의 촉매를 개발하기 위해서는 많은 양의 실험이 필요한데, 이렇게 줄어든 인력으로는 빠른 개발은 커녕 연구 자체가 불가능했을 상황이기 때문이다.

하지만 새로 도입된 자율연구실 시스템의 덕분에 지금까지의 개발 노하우를 가지고 빠른 촉매연구가 가능하게 되었다. 자동화 로봇 시스템과 인공지능을 이용한 실험 설계 시스템으로 구성된 자율연구실 시스템은 실험 조건을 동일하게 하고 계량화하여, 흔히 말하는, “손을 탄다”의, 인간에 의한 오차를 줄일 수 있었고, 효율적인 실험 설계에 의해 개발에 필요한 전체 실험수를 현저히 줄일 수 있었다. 여기에다 사람이 아닌 로봇에 의한 실험은 밤에도 계속될 수 있어, 3교대로 24시간 돌아가는 공장처럼 불이 꺼지지 않는 실험실을 실현시킬 수 있었다.

다양한 조성에 대한 빠른 screening과 도출된 주요 후보군에 대한 정밀한 실험을 통해 주어진 경계조건에서의 최적의 1세대 신조성 촉매를 개발할 수 있었고, 이 결과에 대해 다시 계산을 수행하고 합성 및 평가를 통해 다음 세대 신조성 촉매를 개발하는 식으로 몇 번의 iteration을 통해 산소발생반응에서 세계 최고 성능의 촉매를 단기간에 개발할 수 있었다.

이교수는 다음 연구 주제로 화학공학 분야에서 알콜의 선택적 산화에 쓰이는 촉매인, 금을 대체하는 연구를 계획하고 있다. 이를 위해서 계산 과학자들이 준비한 인공지능 패키지를 업로드하고 산소발생반응 실험과 다른 부분을 보완하기 위해서 필요한 몇 가지 실험 로봇 모듈을 구입할 계획이다. 시작과 함께 끝이 보이는 연구, 불과 십년 전만해도 상상할 수 없었던 현실이었다.

이제 경쟁력은 실험 설계 기술에 달려있다. 이교수 연구실에 많지 않은 대학원생들이 오늘도 어떤 로직을 자율실험실에 부여해야하는지 고민하고 있다.

▣ 시나리오 2 : 디스플레이용 양자점 개발 연구 분야

“교수님, 안녕하세요” 회사를 차린 제자 공박사가 스승의 날이라고 찾아왔다. “요새 회사 잘 나간다면서~ 돈 많이 벌어서 좋겠다.” 안부를 묻고 같이 점심을 먹으러 나갔다. “이게 다 제 실수 때문이죠 하하하” “그럼, 그럼”

작년 여름 공박사는 대학원생일 때 조금 덤벼대는 편이었고 그 날도 정신없이 합성을 수행하느라 실수를 저질렀다. 평소처럼 적색 InP 입자를 만드는 과정에서 크기를 키우기 위하여 InCl_3 를 추가로 넣으려고 했었는데 실수로 시약장 내 옆에 있던 GaCl_3 를 집어 들어 InP 코어 용액에 넣었다. 그 때까지 GaCl_3 는 InP 합성 과정 중에 넣을 생각도 해본 적 없었다. 평소와 같았다면 쉘 형성을 하지 않은 InP 코어는 양자효율이 1%도 안되서 빛이 나는지 확인도 안되었을텐데 이번엔 대충봐도 60-70% 효율의 양자점처럼 빛이 나고 있던 것이었다. 표면처리가 되어서 효율이 좋아진 것 같은데 도무지 왜 그렇게 되었는지 알 수가 없었다.

그 날부터 우리는 온갖 원인을 하나씩 되짚어가며 과정을 반복했다. 주입 속도가 잘못되었나? 온도를 잘못 설정했나? 제어기가 잘못됐나? 진공펌프가 이상한가? 글래스가 오염되었나? 의심이 되는 조건은 하나씩 반복하다가 두 달이 훌쩍 지났다. 얼마 남지 않은 샘플로 혹시나 하는 마음에 맡겼던 ICP-MS 성분분석 결과 3 at% Ga이 포함되었다는 사실을 알고는 우리는 허탈했다. 그 이후 최적의 조건을 찾아 정리하는데 더 많은 시간을 더 허비하였다. 어느 순간에 얼마만큼 넣는게 좋은지 얼마만큼 넣는게 좋은지 더 좋은 첨가제는 없는지 매 순간 고민이었고 하루에 두 번 겨우 합성하는 것으로는 한계였다.

때마침 우리는 막 개발된 로봇 팔이 달린 나노입자 자율합성 플랫폼을 구매하였다. 10개의 라인에서 자동화된 연속 공정 시스템으로 하루에 500차례 이상 실제 실험 조건이 구현이 가능했고 이틀이면 1년치 실험 결과보다 더 많은 양을 얻을 수 있었다. 이 데이터들로 우리는 최적의 조건을 찾아냈고 더 좋은 효과가 기대되는 몇 가지 금속 Halide를 추천받아서 계속 진행할 수 있었다. 우리는 개발된 소재를 이용하여 10만시간 동안 동작 시켜도 안정한 QD-EL 소자를 개발할 수 있었다. 이제 우리는 실수하지 않고도 가장 최상의 결과를 얻을 수 있다.

3.2.9. 발전 방향

▣ 본 과제의 성공적인 연구목표 달성을 위해서는 각 세부 나노입자 합성, 계산 과학, 측정/분석 연구주제간 유기적인 협동연구가 중요

- 각 세부 연구주제의 중요성과 더불어 나노입자 스마트실험실 구현을 위한 협동 연구계획 및 공간확보 필요

▣ AI 기반 스마트연구실은 실험결과의 재현성 및 신뢰성이 강조되는 다양한 소재 분야로 확장, 후속 연구가 지속적으로 운영되어야함

- 기존 사람이 지속, 반복적으로 수행하여 효율이 떨어지는 분야 및 3D (Difficult, Dangerous, Dirty) 분야로 확대 적용할 필요성 제고

▣ 개발된 AI 기반 스마트연구실을 실제 산업체로 확산, 응용하기 위한 산업체의 수요조사 및 플랫폼화 필요

- 대규모 의료 진단검사 산업체에 확산 가능 : 최근 COVID-19으로 크게 증대한 코로나 확진자 및 의심자의 진단검사를 자동화하게 되면, 검사시간 단축 및 사람이 검체를 다룰 때 발생할 수 있는 오염률을 줄일 수 있을것으로 기대
- 배터리 분야의 산업체에 확산 가능 : 전기차의 수요증대와 환경오염 문제로 말미암아 2차 전지분야의 산업전반의 기술개발 요구가 증대함에따라 안전성을 담보할 수 있는 신뢰성 있는 배터리 제작 기술의 자동화 분야로 발전시킬 수 있을 것으로 기대
- 본 과제로 확립될 요소기술은 다양한 차세대 신소재 합성 및 분석에 응용될 수 있고, 스마트연구실 구축을 위한 연구 순환고리를 이용한 다양한 스마트연구실 플랫폼으로 응용할 수 있도록 지속적 연구 필요

▣ 개발된 AI 기반 스마트연구실을 확장현실(eXtended Reality)로 발전시켜, 실제 연구자가 실험실 공간에 상주하지 않아도 공간제약이 없는 상태로 연구를 수행할 수 있도록 연구개발이 필요

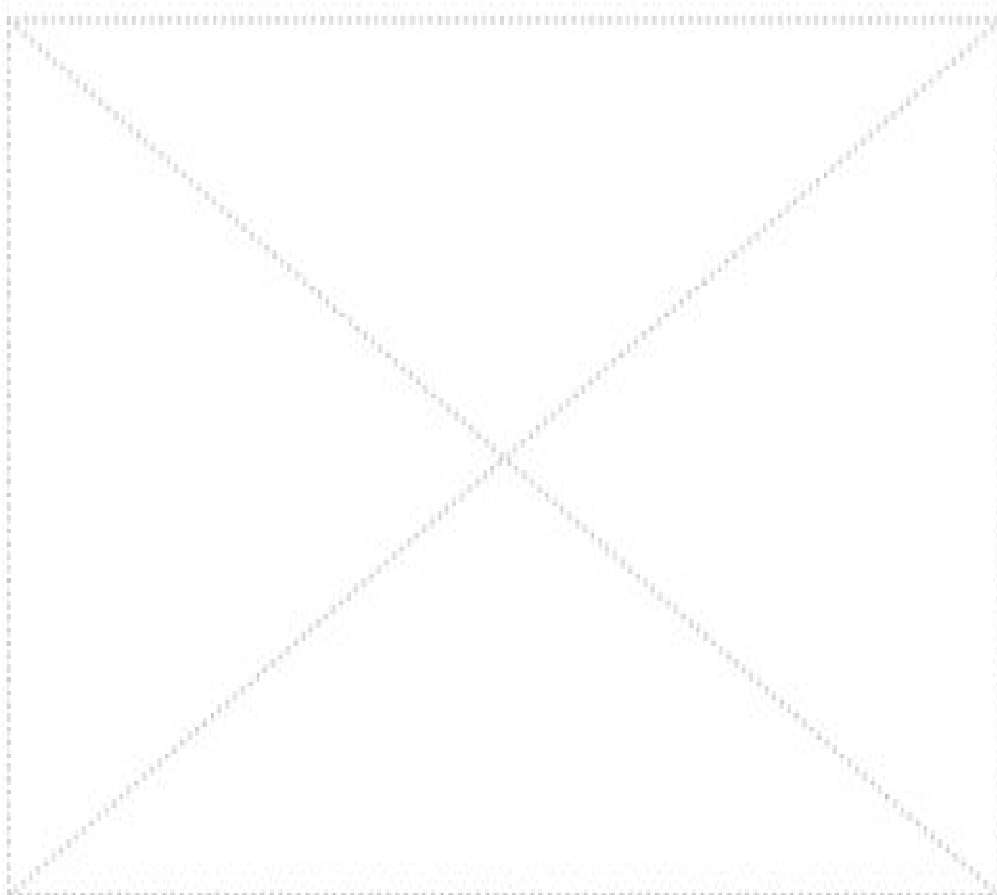
3.3.

세부추진과제 2: 유·무기 복합소재 개발용 AI 스마트 연구실 개발

3.3.1. 필요성

▣ 개발 플랫폼의 개요

- 본 플랫폼은 로봇과 AI 기반으로 태양전지용 유·무기 복합소재의 개발을 자율적으로 수행하고 얻어진 데이터를 기반으로 성능 최적화 가능한 연구실 환경 제공
- 본 플랫폼은 유·무기 복합소재의 합성, 소재 특성 평가, 소자 조립, 소자 성능 평가를 자동으로 수행할 수 있는 각 모듈을 개발 및 조합하여 신소재 개발에 최적화된 연구실 환경 제공



[유·무기 복합 소재 개발용 스마트 연구실 개요]

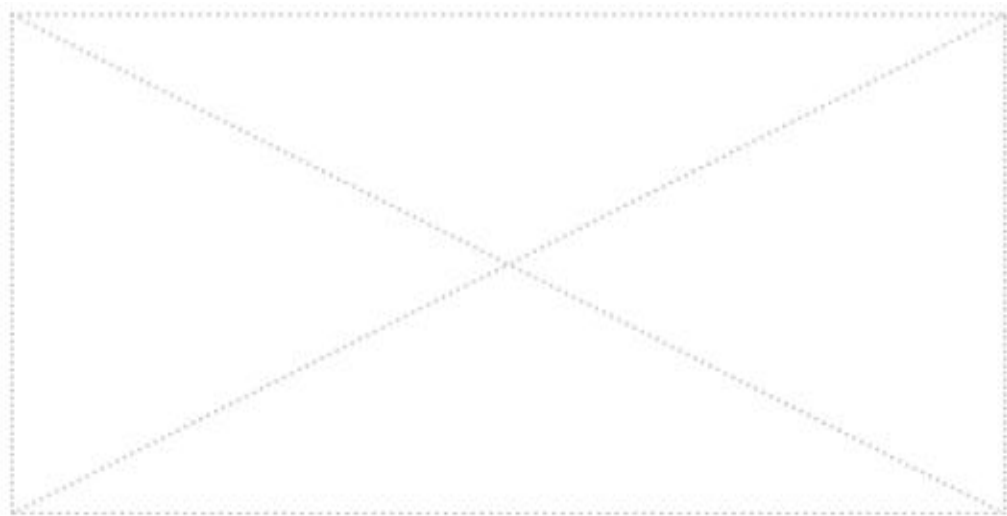
- 본 플랫폼은 다양한 소자 분야에 적용 가능한 고성능 유·무기 복합소재를 자율적으로 개발할 수 있도록 해줌으로써 소재 원천 특허를 선점하고 시장을 선도할 소재 혁신을 이루며 국내산업의 개발 경쟁력을 더욱 높일 수 있는 기반을 제공

■ 소재개발 측면에서의 필요성

- 유·무기 페로브스카이트 소재는 유기물질과 무기물질의 재료가 결합한 유·무기 복합소재의 대표적인 소재로, 각 물질이 갖는 장점들이 결합하여 시너지 효과를 일으켜 여러 방면에서 필요한 기술적 한계를 극복하는 데 유리함
- 페로브스카이트 소재의 개발은 다양한 실험 조건, 즉, 물질 조성, 합성 방법, 처리 방식, 소자 제작 방법 등 매우 많은 실험 변수를 조절하여 물질의 특성을 목적에 맞게 최적화하는 과정이 필요함
- 대규모 실험으로 실험 변수 공간을 테스트하기에는 시간과 인력에 제한이 있기에 연구자의 경험에 기반한 판단에 따라 선택적으로 최적화 과정을 진행함
- 제일원리 계산이나 다른 시뮬레이션 방식을 이용하여 실험의 방향성을 제시할 수 있지만, 계산의 정확도, 계산할 수 없는 구조 등에 대한 한계가 존재함
- 다양한 실험 변수에 대한 대규모 실험을 통해 신뢰성 있는 데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 AI를 이용해 최적화를 진행하면 정확도와 신속성을 모두 만족하는 소재개발 연구가 될 것으로 예상함
- 대규모 실험에서 필연적으로 발생하는 단순 반복 작업, 고도의 집중을 요구하는 어려운 작업, 완벽히 동일한 조건을 요구하는 정밀 실험 등은 연구의 효율을 떨어뜨리는 요인이 되며 로봇을 이용하여 이러한 작업을 대체할 필요가 있음
- 같은 실험 조건에서도 연구자마다 다른 결과를 얻는 경우가 많은데, 이는 개인이 체득한 실험기술(know-how)이 명확히 전달되지 않기 때문임
- 연구자의 실험기술을 정확히 모사하여 누구든지 같은 실험을 재현할 수 있도록 로봇을 이용하여 실험 전 과정을 디지털화하고 표준화할 필요가 있음
- 대규모 실험을 통해 수집된 데이터들은 물질 조성, 실험 과정 등에 따른 소재의 특성을 통합적으로 파악할 수 있는 매우 가치 있는 정보이므로, 실험 조건

과 결과 등을 담은 데이터를 체계화하여 소재 데이터 플랫폼에 수집해야 함

- 소재 데이터를 기반으로 물성을 예측하고 소재 디자인 원리를 파악하는 AI 연구가 수반되면, 소재 개발이 가속화되고 당면한 문제를 효율적으로 해결할 수 있을 것으로 기대함
- 페로브스카이트 소재 중 페로브스카이트 결정구조의 소재는 매우 뛰어난 광학적, 전기적 특성이 있으므로, 태양전지, 발광다이오드(light emission diode, 이하 LED), 광검출기 등의 다양한 소자에 응용될 수 있음
 - 페로브스카이트는 ABX_3 의 분자식을 갖고 있으며, A에는 세슘(Cs^+), 메틸암모늄($CH_3NH_3^+$) 등의 1가의 양이온이, B에는 2가의 양이온, 납(Pb^{2+}), 주석(Sn^{2+}) 등이 위치하며, X는 할로젠족, 요오드(I^-), 브롬(Br^-), 염소(Cl^-) 등의 음이온이 위치하여 결정구조를 이룸

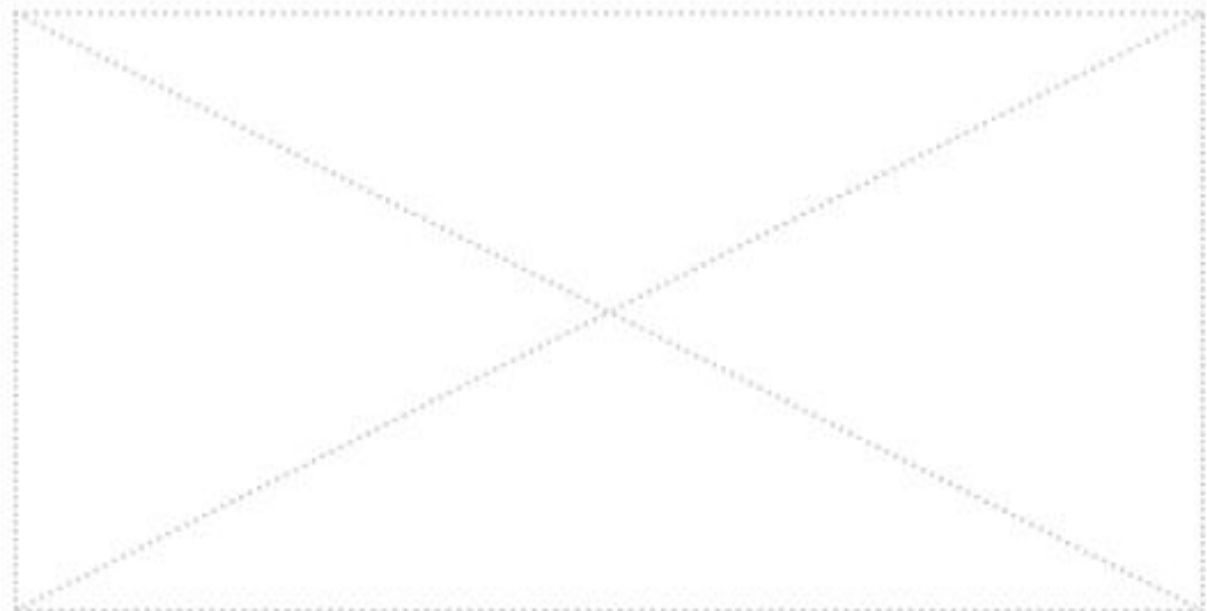


[페로브스카이트 결정구조 ABX_3]

- 다양한 양이온과 음이온이 결합한 구조로 구성 원소의 변형 및 박막의 품질을 높이기 위한 첨가제(additive) 조합을 변형하면 수천 개 이상의 조성 조합이 가능함
- 소재 특성에 따라 다양한 소자로의 응용이 가능하며 각 소자에 맞춰 소재 및 공정 최적화가 필요함
- 페로브스카이트 소재 자체의 안정성, 상용화를 위한 대면적화, 유연성 확보 등의 문제 해결도 필요함

■ 경제/산업적 측면에서의 필요성

- 이미 다양한 산업현장에서 스마트 공장, 작업 로봇이 광범위하게 적용되어 대량생산, 작업 효율화 향상에 큰 역할을 하고 있음
- 많은 연구실에서 자동화 장비를 차츰 갖추고 있지만, 복잡하고 정교한 실험에서는 아직 연구자들의 노동력에 전적으로 의지하고 있음
- 스마트 연구실에서는 규격화된 로봇과 자동화 시스템을 기반으로 소재가 개발되기 때문에 차후 대량생산이 필요한 사업화로 쉽게 이어질 수 있을 것으로 예상함
- 정부가 발표한 2050 탄소중립 로드맵에 따르면 2050년도의 태양광 발전량이 2020년에 비해 약 30배 가량 증가하므로, 태양전지 시장의 확대는 필연적이며 상용 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 차세대 소재인 페로브스카이트 소재 개발이 필수적임



[2020년 정부가 발표한 2050 탄소중립추진전략]

- 페로브스카이트 태양전지의 경우 국내 기술이 세계를 선도하는 상황이고, 최근 울산과학기술원에서 25.8%인 최고효율의 페로브스카이트 소재²를 발표하여 그 상용화 가능성이 점차 커지고 있음
- 페로브스카이트 소재는 특히 저렴하고 합성이 간편하며, 실리콘 태양전지에 상

응하는 고효율을 갖는 소재로써, 안정성과 대면적화의 문제가 해결되면 차세대 태양전지의 핵심소재가 될 것으로 기대됨

- 페로브스카이트 소재는 태양전지 뿐만 아니라, LED, 광검출기 등의 다양한 소자에 적용되어 괄목할만한 성능 개선을 이루고 있으므로, 안정성 및 상용화를 위한 지속적인 연구가 필요함
- 스마트 연구실을 도입하여 자율주행 실험으로 페로브스카이트 소재 및 소자 최적화에 성공하면, 효율을 증가시킴과 동시에 안정성, 대면적 등의 문제를 해결할 수 있을 것이며, 또한 스마트 연구실 기술 또한 기술이전과 사업화에 핵심 역할을 할 것으로 예상함

3.3.2. 기술 정의

▣ 개발 플랫폼의 제공기능

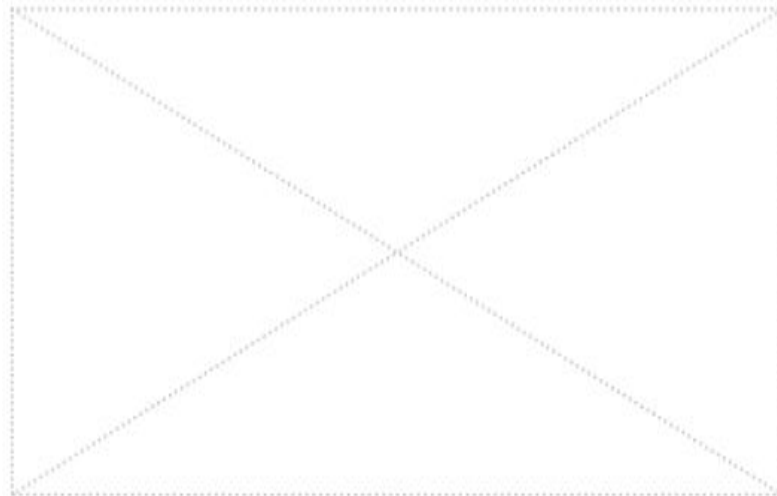
- 개발 플랫폼은 로봇이 유·무기 페로브스카이트 소재를 자동으로 합성하고 그 소재 특성을 평가하는 연구실 환경을 제공
 - 로봇 기반으로 전구체 배합, 샘플 수송, 스핀코팅, 열처리 등을 이용한 합성, 밴드갭, 모빌리티 등 소재 특성 평가 자동화
- 개발 플랫폼은 스마트 연구실에서 얻어진 소재 데이터를 기반으로 인공지능을 이용하여 소재특성을 최적화하는 조성 및 합성 과정을 예측하고 실제 실험으로 검증하는 과정을 자율주행으로 진행함
- 반복 실험을 통해 최적화된 신소재를 개발하고 로봇을 통해 소재 합성을 재현할 수 있게 함
- 페로브스카이트 소재의 합성 과정 중 반복 작업을 로봇으로 대체함으로써 연구 효율을 높이고 연구자에 따라 합성 결과가 변하지 않는 일관성을 제공
- 페로브스카이트 소재의 화학·물리적 특성을 자동으로 측정하는 기능을 제공
 - 전자적 특성(유전상수, 유효질량 등), 광학적 특성(밴드갭, 광흡수 계수 등), 수송 특성(수송체의 수명, 전기전도도 등)의 소재 물성을 측정
- 페로브스카이트 소재를 이용한 소자를 자동으로 조립·평가하는 기능을 제공

- 페로브스카이트 소재를 이용한 태양전지 소자, LED, 광검출기 등의 소자를 제작 및 평가하고, 개발 소재의 응용 가능성 제시
- 인공지능을 이용하여 소재/소자의 구성, 실험 과정 등을 최적화하여, 목표 성능이 향상된 소재/소자를 개발
 - 베이저안 최적화(Bayesian optimization) 등과 같은 방식으로 다양한 변수의 실험 공간에서의 최적점을 찾는 방법으로 소재/소자 개발
- 연구자의 목표에 맞게 개발된 다양한 소재 합성/분석 모듈과 소자 조립/성능 평가 모듈에서 선택하여 조합 가능한 모듈형 플랫폼으로 다양한 연구개발에 적용할 수 있는 활용도 높은 스마트 연구실을 제공
- 개발 플랫폼에서 생성된 소재 합성 과정, 측정된 화학·물리적 특성, 다양한 소자 물성 등의 모든 데이터는 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 공유하여 양질의 데이터베이스로 제공

3.3.3. 국내외 연구동향 및 차별성

▣ 로봇과 AI 기반 유·무기 페로브스카이트 소재 개발 동향

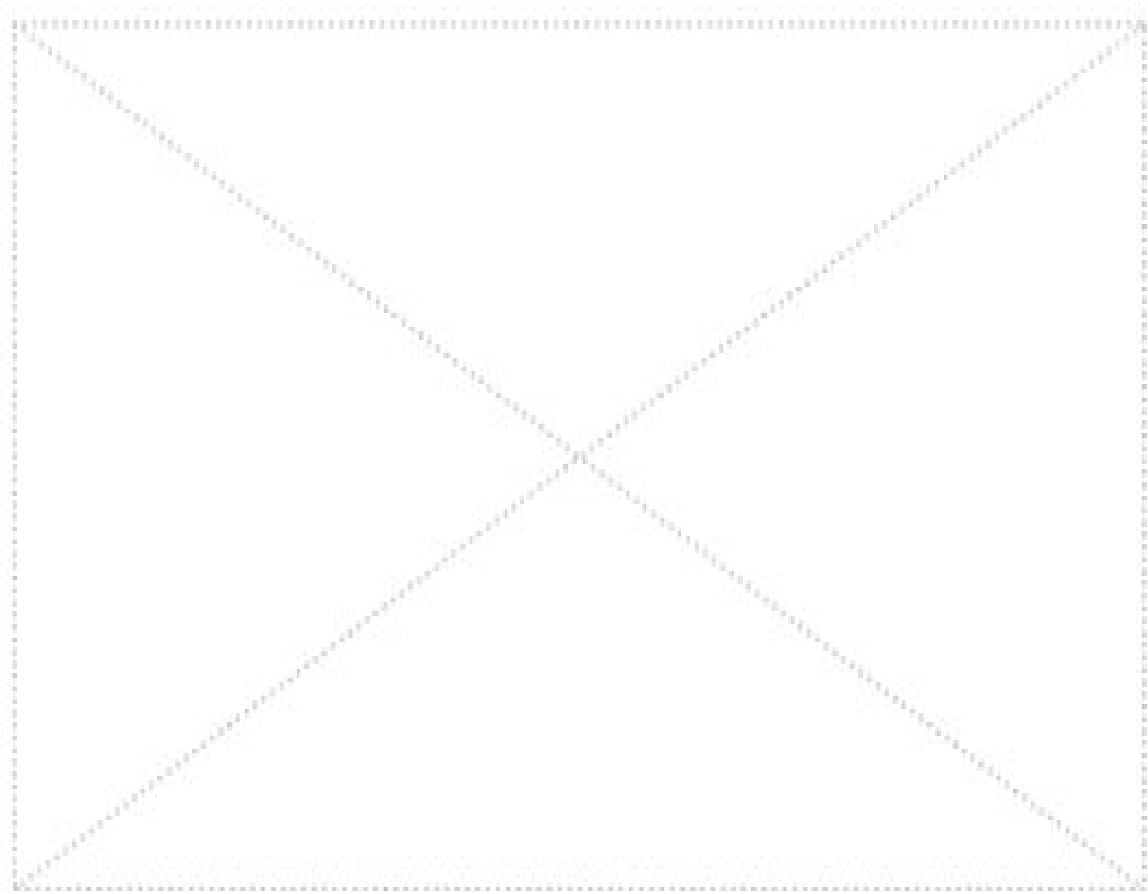
- 중국 선전 남방과학기술대학교의 Xu 그룹 2019년 10월에 *Advanced Functional Materials*에 발표한 연구이며 (*Adv. Func. Mater.* **2019**, 29, 1905487), 페로브스카이트 태양전지에 사용하는 페로브스카이트 소재를 잉크젯 프린터로 전구체를 혼합하여 다양한 조성의 페로브스카이트 소재를 합성하는 자동화 연구실을 구성함
- 잉크젯 프린터로 전구체 분주와 혼합 자동화로 샘플 준비 시간을 획기적으로 단축하였으나 열처리, 소재 특성 분석, 소자 제조, 성능 평가 등 추가 공정 자동화가 이뤄지지 않았음



[잉크젯 프린트 기반 페로브스카이트 소재 전구체 자동 혼합 장치]

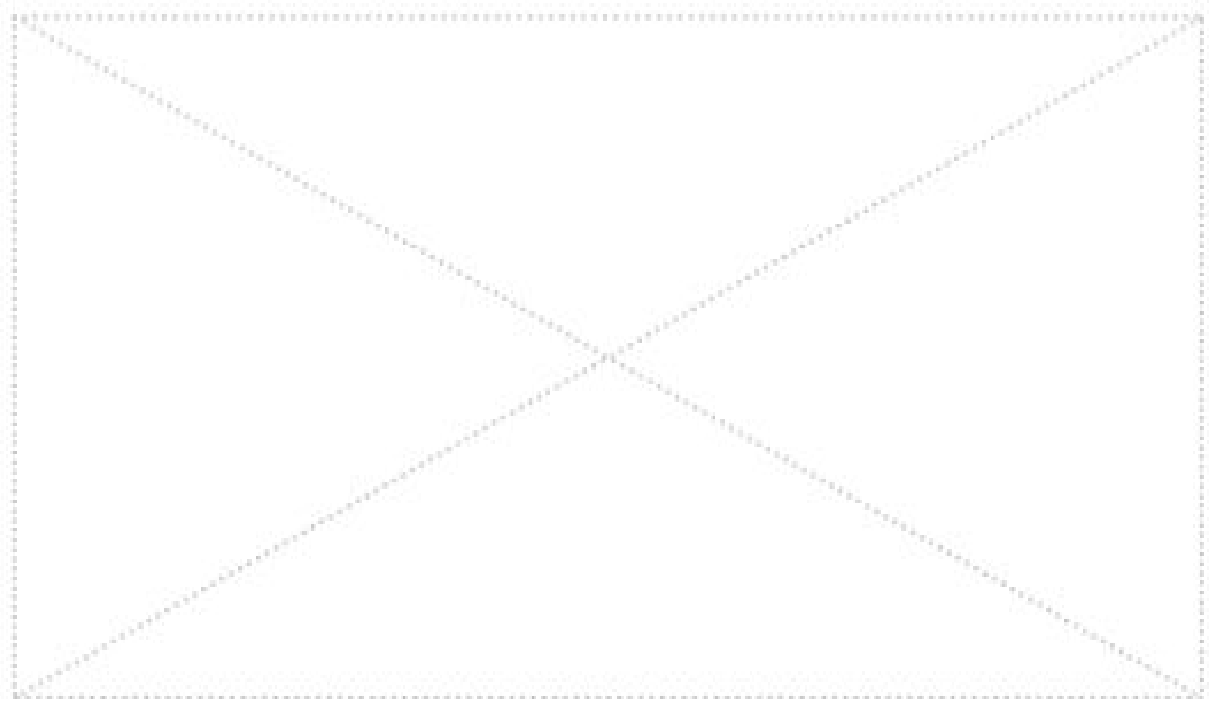
- 독일 프리드리히 알렉산더 대학교의 Brabec 그룹에서 2020년 8월 *Joule*에 보고한 연구이며 (*Joule*, **2020**, 4, 1806), 자율 분주기(liquid handler)를 활용하여 페로브스카이트 태양전지에 사용하는 페로브스카이트 소재의 전구체를 혼합하여 분광학 분석이 가능한 자동화 연구실을 구성함
- 자율 분주기 기반으로 96종의 다양한 조합으로 전구체 분주가 가능하여 high throughput screening에 적합하고 다양한 조성에 대한 실험 탐색을 획기적으로 높일 수 있음
- 플랫폼 내에서 분주된 well plate를 그대로 활용하여 바로 분광학 분석이 가능하도록 구성하였으나 샘플의 이동을 위해 연구자 개입이 필요하여 무인 자율

화를 이루지 못함



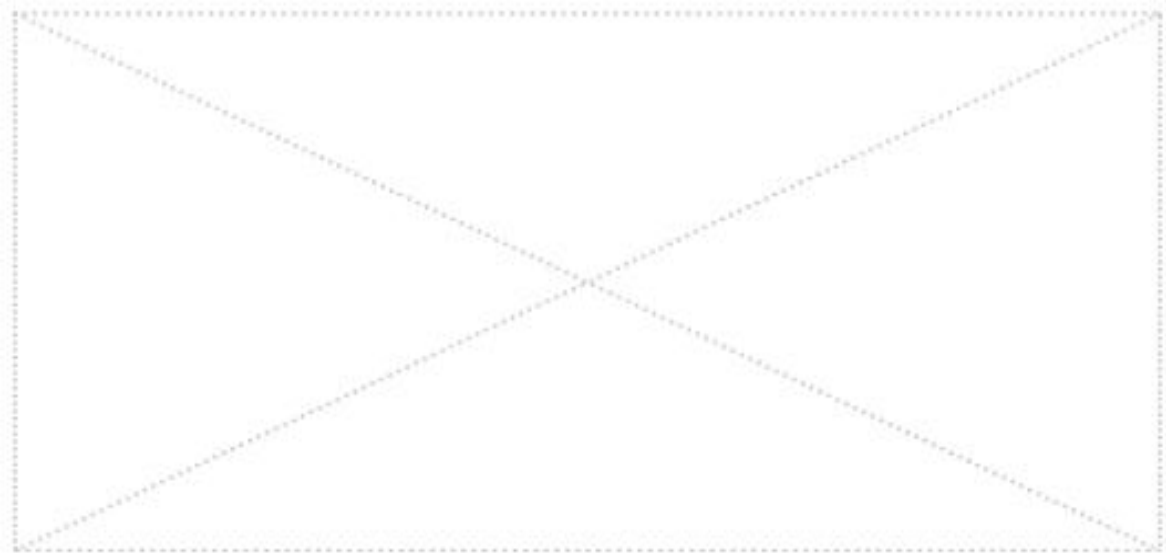
[자율 분주기 기반 페로브스카이트 소재 전구체 자동 혼합 및 분석 장치]

- 미국 테네시 녹스빌 대학의 Ahmadi 교수팀에서 2020년 10월 ACS Energy Letter에 보고한 연구이며 (ACS Energy Lett., 2020, 5, 3426), 자율 분주기 (liquid handler)를 활용하여 발광소자 및 센서용 페로브스카이트 소재의 전구체를 혼합하여 광발광 분석이 가능한 자동화 연구실을 구성함
 - 자율 분주기를 이용하여 $MA_xFA_yCs_{1-x-y}PbBr_3$, $MA_xFA_yCs_{1-x-y}PbI_3$, $Cs_xFA_yMA_{1-x-y}Pb(Br_{x+y}I_{1-x-y})_3$, $Cs_xMA_yFA_{1-x-y}Pb(I_{x+y}Br_{1-x-y})_3$ 등 96종의 조성을 분주 합성하여 광발광 분석할 수 있는 자동화 연구실 구축



[자율 분주기 기반 광발광 및 센서 소자용 페로브스카이트 소재 개발 장치]

- 캐나다 토론토 대학의 Aspuru-Guzik 교수팀에서 2020년 2월 *Advanced Materials*(*Adv. Mater.* 2020, 32, 2070110)와 2020년 5월 *Science Advances*(*Sci. Adv.* 2020, 6, eaaz8867)에 발표한 연구로 유기 소재 및 페로브스카이트 소재 개발이 가능한 자율 연구실을 구성함
 - 유기물 태양전지에 사용하는 활성층 물질을 최적화시키기 위한 코팅용액 제조, 박막 스핀 캐스팅, 열처리, 이미지, 광섬유 스펙트럼, 전도도 측정, 분석 결과 해석 및 홀이동도 계산 기반으로 다음단계 실험 결정 가능하여 단일 플랫폼을 이용하여 연구자 개입 없이 반복 실험을 통해 최적 소재 조건 도출 가능하다고 보고함
 - 최적화 AI 알고리즘으로 베이저안 최적화(Bayesian optimization)를 탑재한 ChemOS 소프트웨어 개발하고, 이를 활용하여 최적의 용액 조합비율을 탐색
 - 자율화연구실이 실험적인 비용(시약, 실험시간 등)을 획기적으로 단축시킬 수 있음을 데모실험을 통해 제시

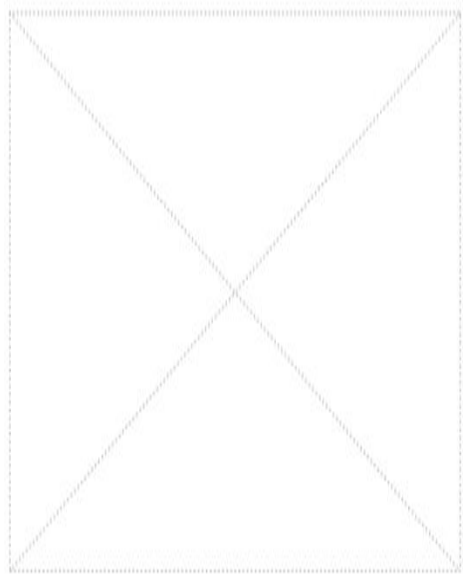


[페로브스카이트 소재의 합성, 분석, 실험계획이 가능한 자율주행 실험 플랫폼]

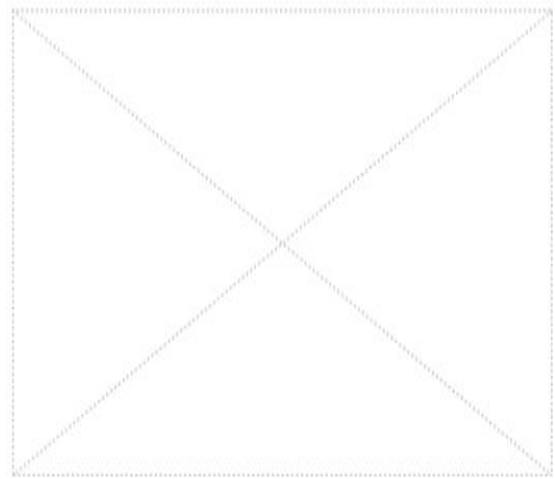
▣ 유·무기 페로브스카이트 소재 기반 태양전지 연구 환경 변화

- 현재 많은 그룹들이 페로브스카이트의 고효율화, 안정화를 추구하고 있으며 새로운 소재, 소자 제작 방법의 개발을 통해 페로브스카이트 연구 개발 연구초기 단계에 비해 상승된 효율, 안정된 소자의 특성들이 보고되고 있음
- 최근의 연구동향
 - 영국 옥스퍼드 대학교의 H. Snaith 그룹에서는 Ionic liquid를 통해 페로브스카이트의 ion migration을 막아 줌으로써 장시간 동안 안정한 태양전지를 보고 (*Nature*, 2019, 571, 245)
 - 스위스 로잔공대의 M. Grätzel 그룹이나 UNIST의 김진영 교수 연구팀에서는 Formamidinium lead triiodide(FAPbI₃)를 methylammonium thiocyanate (*Science*, 2020, 370, 6512), formamidine formate (*Nature*, 2021, 592, 381)등을 각각 첨가하여 3차원 알파상(α -phase)으로 안정화(stabilization)시키는 기술들을 개발 하여 고효율, 고 안정성을 갖는 소자를 보고
 - 이러한 3D FAPbI₃ 안정화 기술에 관한 연구도 최근 주목받는 고효율 페로브스카이트 태양전지의 연구 분야 중 하나임
 - 고효율을 위한 방법으로 3D/2D 구조를 갖는 페로브스카이트를 제작하여 소자의 안정성에 영향을 주는 첨가제(additive)를 사용하지 않은 P3HT 폴리머를 정공전달물질로 사용하여 고효율, 안정한 소자를 보고 (*Nature*, 2019, 567, 511)

- 적절한 3D/2D 엔지니어링을 통해 소자의 효율을 향상시킬 수 있는 연구결과를 보고



<Thiocyanate를 이용한 FAPbI₃의 3D 구조 안정화 및 소자 안정성 결과>



<Formate를 이용한 FAPbI₃의 3D 구조 안정화 및 소자 효율 결과>

[페로브스카이트 태양전지 연구 동향]

(출처: Energy Environ. Sci., 2019)

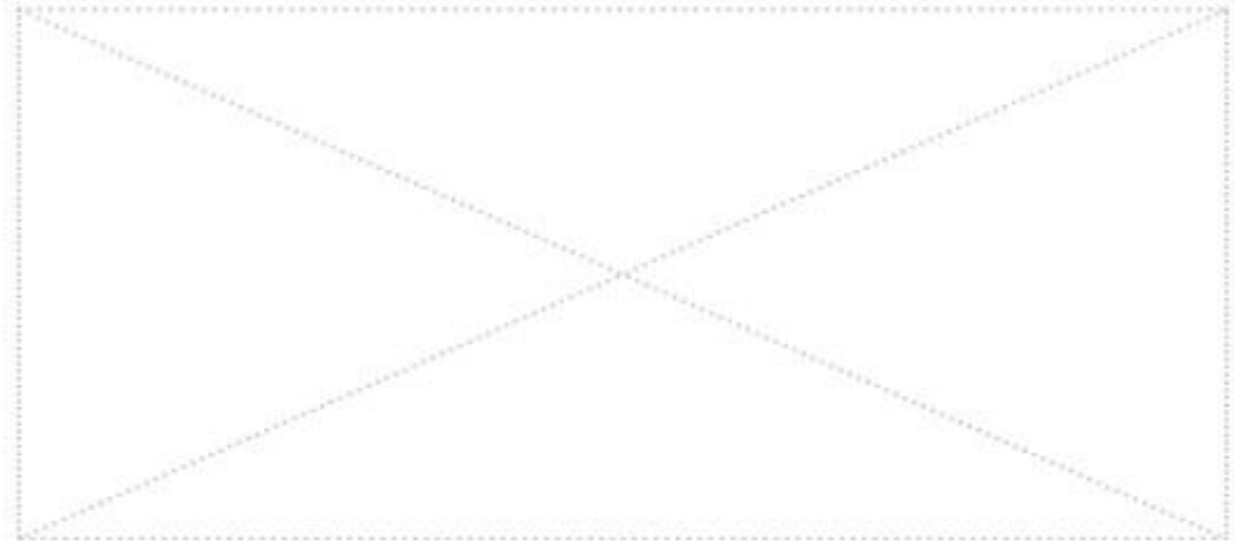
- 전자 수송층 개발을 통해 세계 최고 효율인 25.2%의 결과를 NREL chart에 보고 (*Nature*, 2021, 590, 587)

▣ 차별화 방안

- 현재 페로브스카이트 태양전지의 국내외에서는 장기적으로는 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 상용화가 가능한 특성을 갖는 소자, 소재의 개발을 요구하고 있으며 많은 연구자가 이 부분에 집중하여 연구를 수행하고 있음
- 상용화를 위해서는 매우 높은 조건의 안정성이 요구되나, 대부분의 연구가 고효율 혹은 안정화의 조건을 충족하는 정도이며 고효율을 유지하면서 안정한 특성을 보이는 소자는 보고되지 않음
- 고효율, 고안정한 페로브스카이트 태양전지 소자를 제작하기 위해서는 단순히 소자를 제작하고 특성을 평가하는 것 뿐 아니라, 페로브스카이트 소재 자체의 특성, 소자 내에서의 작동원리 등 복합적 환경요인에 의한 거동에 대해 공학적으로 규명이 되어야 하고 이를 위해서는 결정구조 변화에 따른 광효율 상관관

계를 초고속 방사선을 포함한 다양한 기술로 분석해서 종합적이고 체계적인 페로브스카이트 소재 재단을 추구하는 연구가 필수적임

[전자수송층 개발을 이용한 페로브스카이트 태양전지 연구결과]



3.3.4. 특허 분석

▣ 특허 분석 개요

- 검색기간 : ~2021년 9월까지 검색된 특허
- 범위 : 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인 : 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB : Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

검색식				
(perovskite* 페로브스카이트*) and (“solar cell” “solar battery” 태양전지* “태양 전지”) and (design* 디자인* 설계* synthes* 합성* laminat* 적층* fabricat* 제작* coat* 코팅* deposit* 증착* experiment* 실험* laborator* 랩* robot* 로봇* 로보트* "machine learning" 기계학습* "기계 학습" learn* train* 러닝* 학습* "artificial intelligence" 인공지능* "인공 지능" automation* 자동화*) AND (c* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
312	121	97	59	589

[관련 특허 검색식]

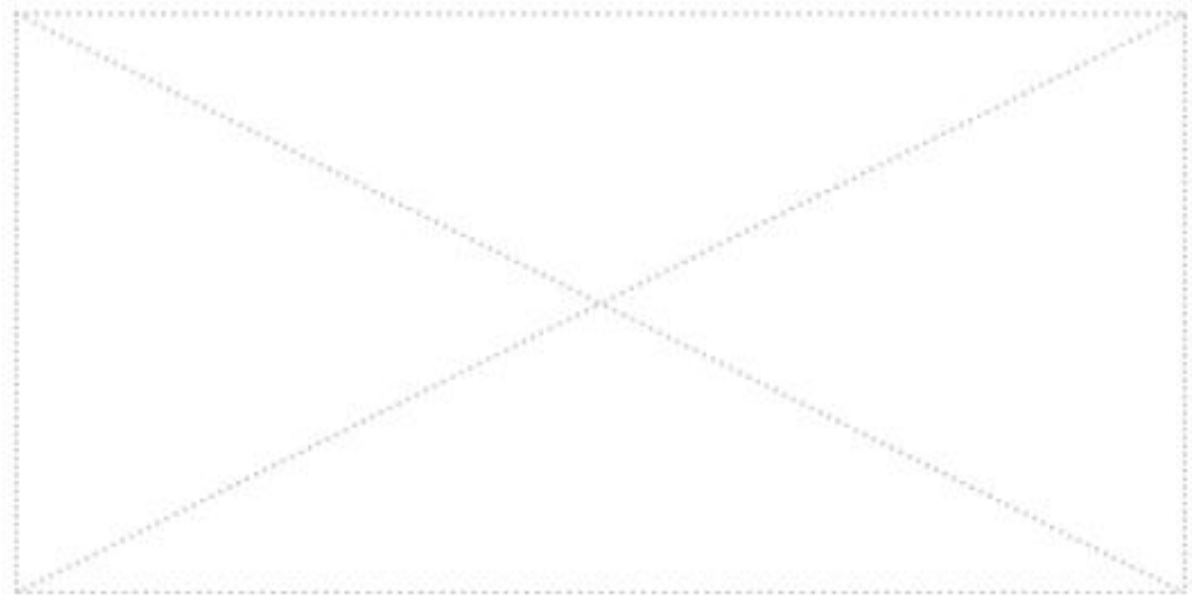
▣ 연도별 특허발표 현황

- 검색된 특허 589건을 중복제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 400건의 특허가 최종 선정되었음
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함 (즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님)

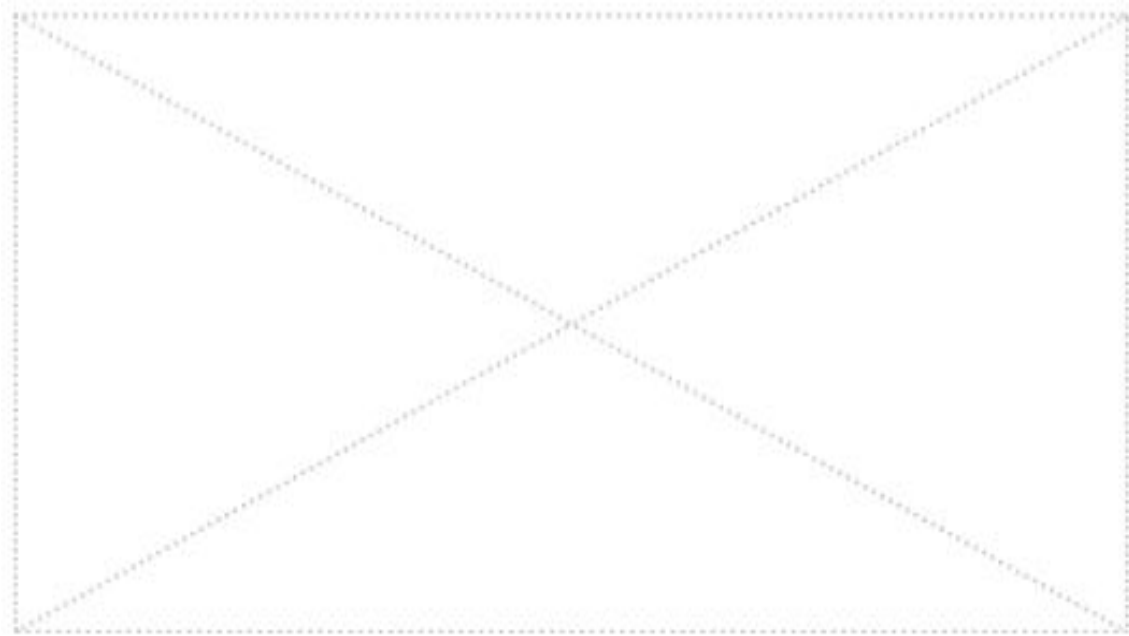
- 한국(199건, 50%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 미국(88건, 22%), 일본(71건, 18%), 유럽(42건, 10%) 순임
- 참고로, 본 과제의 검색 범위를 머신러닝, 자동화 등에 포커싱하여 좁게 찾으면, 검색되는 건수가 거의 없기에, 다소 범위를 넓혀서 검색하였음

구분	2002	2005	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	총합계
유럽	0	0	0	1	0	0	1	4	5	11	3	7	6	3	1	0	42
일본	0	1	1	0	0	1	1	2	8	16	6	12	12	9	1	1	71
한국	0	0	0	0	0	1	0	2	9	23	28	41	34	42	17	2	199
미국	1	0	0	0	1	0	0	2	9	11	16	16	14	10	7	1	88
계	1	1	1	1	1	2	2	10	31	61	53	76	66	64	26	4	400

[연도별 개별 국가 특허 발표 현황표]



[연도별 발표된 특허수 분포]



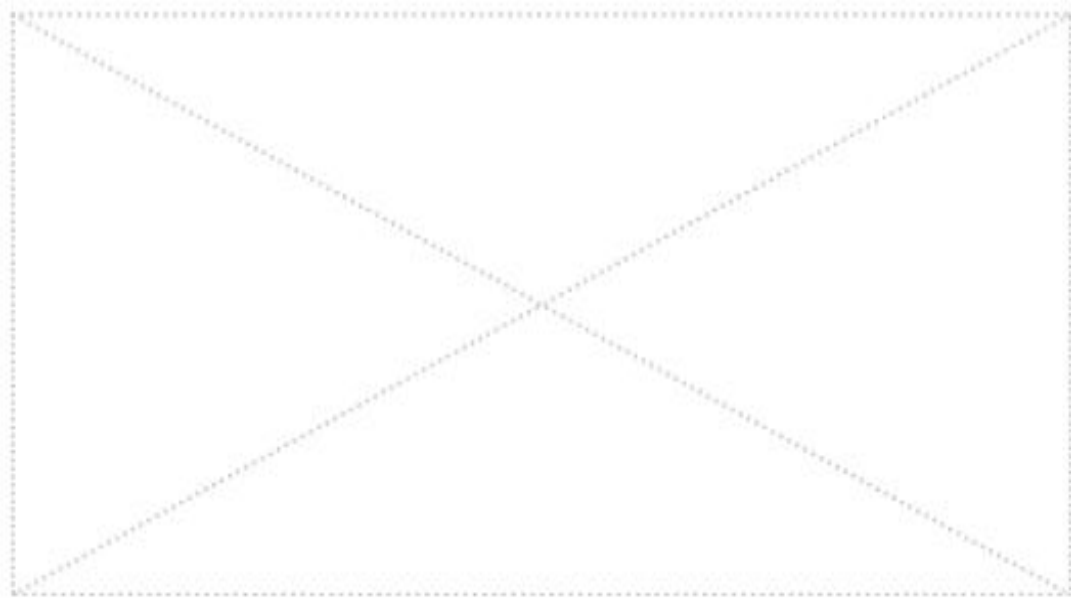
[연도별 개별 국가 특허 발표 현황]

▣ 국가별 특허발표 현황

- 상위 10개 출원인은 아래와 같음
- SEKISUI CHEM이 37건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	SEKISUI CHEM	37	21.4%
2	엘지전자	20	11.6%
3	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)	20	11.6%
4	울산과학기술원	17	9.8%
5	성균관대학교산학협력단	15	8.7%
6	한국과학기술연구원	15	8.7%
7	고려대학교 산학협력단	15	8.7%
8	한국화학연구원	14	8.1%
9	재단법인 멀티스케일 에너지시스템 연구단	10	5.8%
10	한국전력공사	10	5.8%

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]



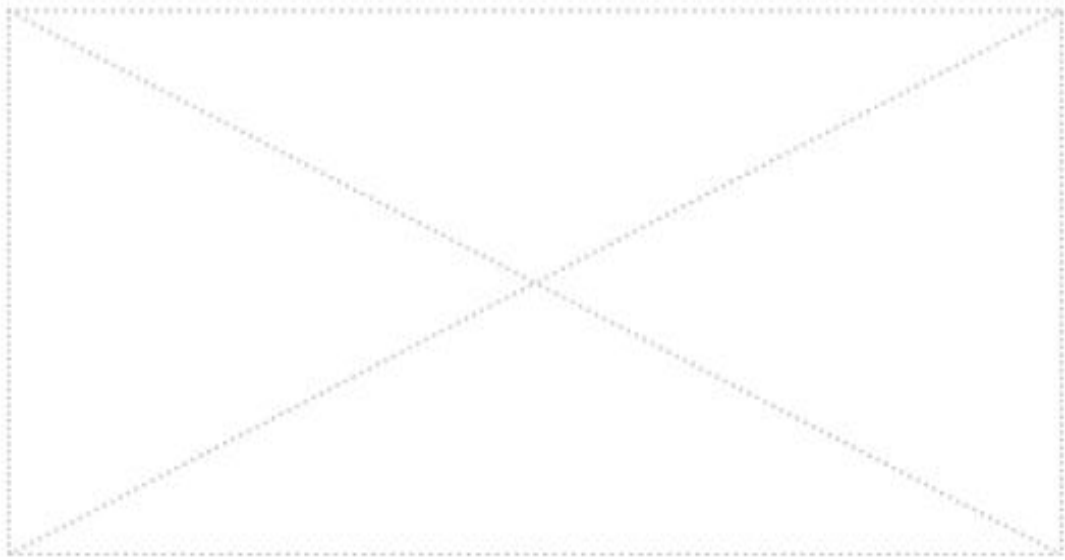
[상위 10개 출원인 특허수]

- 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음
- SEKISUI CHEM이 37건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	SEKISUI CHEM	5	27	0	5	37
2	엘지전자	3	3	10	4	20
3	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)	10	2	2	6	20
4	울산과학기술원	0	0	17	0	17
5	성균관대학교 산학협력단	0	0	15	0	15
6	한국과학기술연구원	1	0	11	3	15
7	고려대학교 산학협력단	0	0	14	1	15
8	한국화학연구원	0	0	14	0	14
9	재단법인 멀티스케일 에너지시스템 연구단	0	0	10	0	10
10	한국전력공사	0	0	10	0	10
합계		19	32	103	19	173

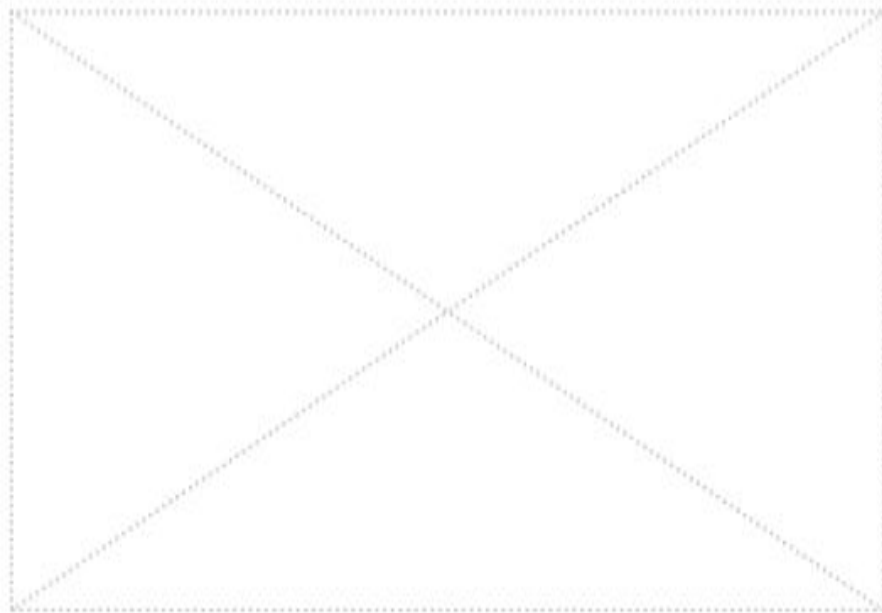
[상위 10개 출원인의 국가별 출원수]

- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 한국이 103건으로 가장 많으며, 그 뒤로 일본(32건), 미국 및 유럽(19건) 순임



[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 국가별 특허 피인용 합계는 한국이 286회로 가장 많으나, 평균 피인용 횟수에서는 2위인 미국보다 낮은 평균 피인용 횟수를 기록하고 있음



[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

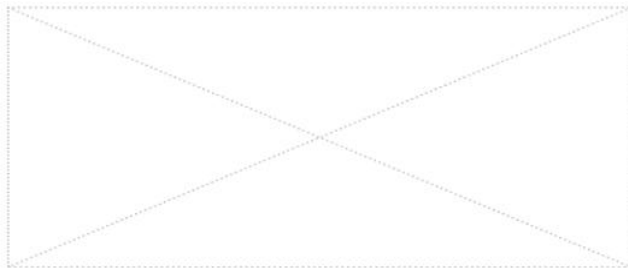
- 본 기술분야는 다른 기술과는 달리, 한국 국적의 출원인의 특허 활동이 활발한 것으로 나타난 것이 특이한 점임
- 다만, “평균 피인용”에 있어서는 한국의 수치가 높지 않으므로, 기술력에 있어서는 다소 보완할 필요가 있는 것으로 판단됨

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
한국	286	218	1.31
미국	123	46	2.67
일본	110	71	1.55
대만	87	13	6.69
스위스	54	22	2.45
홍콩	17	2	8.50
에스파냐	12	2	6.00
중국	6	11	0.55
브루나이	1	1	1.00
영국	1	1	1.00
독일	0	4	0.00
프랑스	0	1	0.00
이탈리아	0	1	0.00
카자흐스탄	0	1	0.00
네덜란드	0	2	0.00
러시아	0	3	0.00
사우디아라비아	0	1	0.00
글로벌 평균	41	23.53	1.87

[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

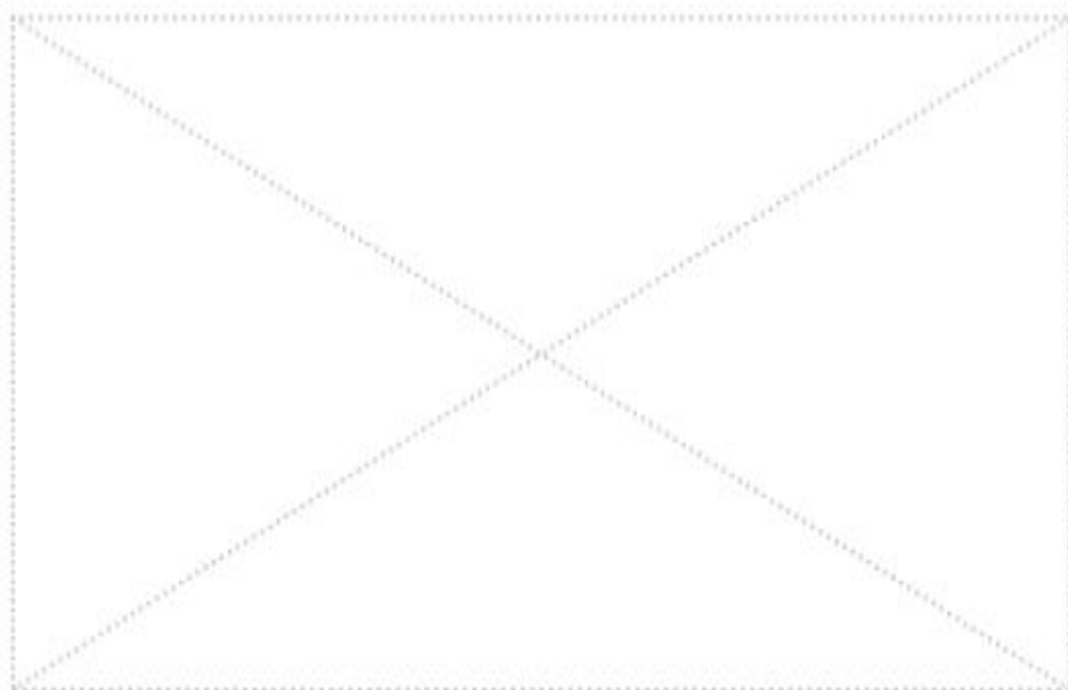
■ 기술수명 주기별 동향

- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 출원인수 및 출원건수 모두 계속적으로 증가하는 발전기에 해당되는 것으로 나타남
- 참고로, 성장기는 출원인수와 출원건수가 동시에 급증하는 시기를 의미하므로 본 기술분야는 크게 뜨고 있는 분야로 볼 수 있음
- 다만, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것이므로, 만약 본 분석을 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾는다면, 성장기가 아닌 태동기에 해당될 것이며, 이는 바꿔 말하면, 기술 선점의 기회가 매우 넓게 열려 있는 것으로 볼 수 있음



출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간

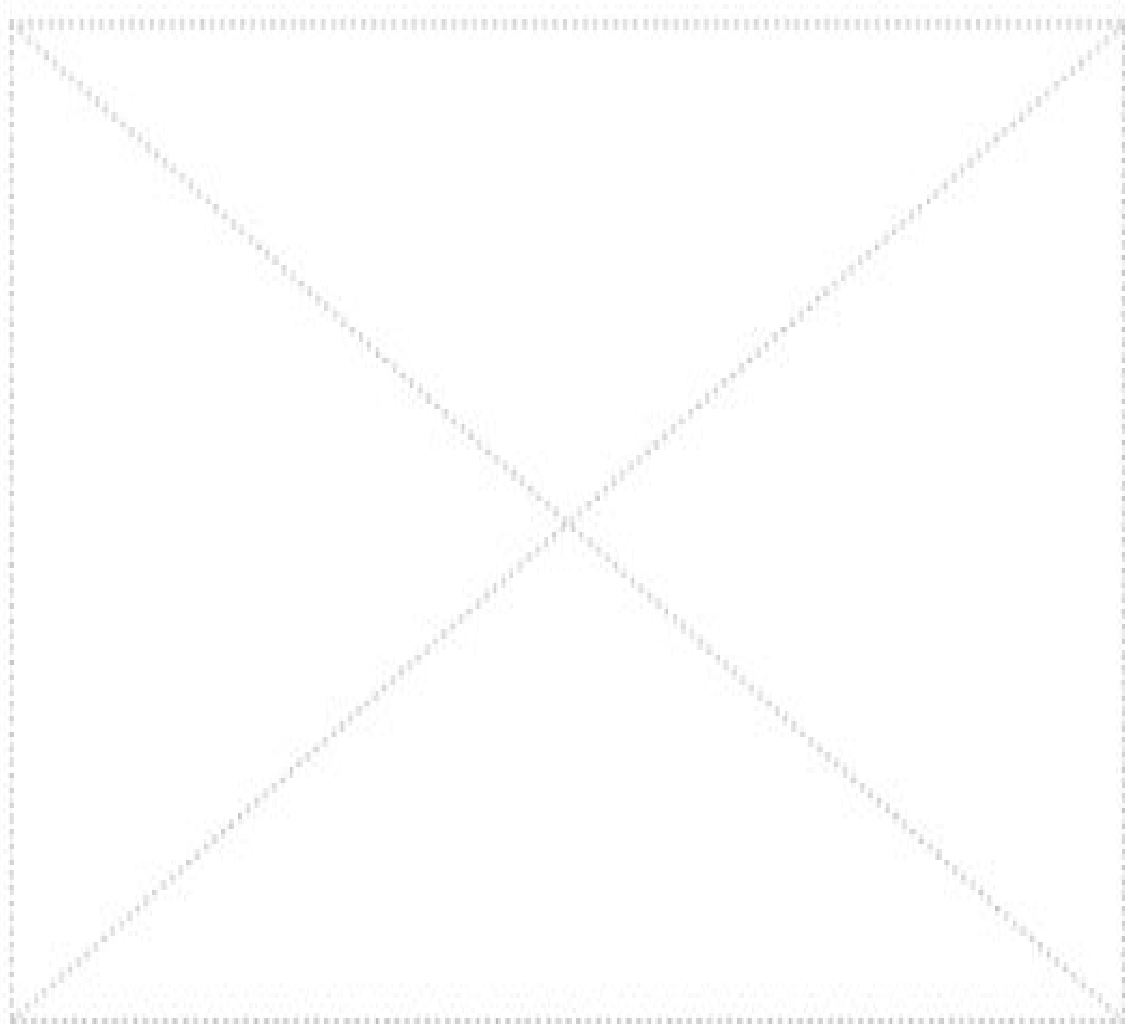
[기술수명 주기별 동향 설명 자료]



[기술수명 주기별 동향 분석결과]

■ 키워드 맵

- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 다양한 재료들이 키워드로 포진하고 있으며, 그 주변 부분에 광활성층, 광흡수층, 열처리, 페로브스카이트층, 전자전달층, 정공수송층 등과 같은 각각의 layer 에 대한 키워드가 포진하고 있지만, 아직 “자동화”, “머신러닝” 등의 키워드가 거의 활성화되지 않은 것으로 판단됨



[특허 키워드맵]

- 기존 특허와의 차별화 전략
 - 400건의 유효특허는 페로브스카이트 태양전지와 관련된 특허지만, 합성 및 측정 자동화 기술 및 AI 기반 기술과 관련된 핵심 특허는 발견되지 않았음
 - 따라서, 본 기술과 관련하여 로봇 자동화 기술과 같은 자동화 기술 또는 AI 모

델링 기술을 결합하여 R&D를 투입할 여지가 있으며, 이와 관련하여 특허를 창출할 여지도 있음

- 또한 페로브스카이트 태양전지 소재 원천 특허는 제한적이며 광범위한 조성 탐색시 신규 조성에 대한 원천 특허 창출할 기회가 많음
- 태양전지 용도에 국한하지 않으면 탐색할 수 있는 페로브스카이트 소재의 조성 범위를 넓힐 수 있어 LED, 전고체 전지, 광 검출기, 반도체 등 다양한 용도의 페로브스카이트 소재 원천 특허 창출할 여지가 있음

3.3.5. 개발 목표 및 내용

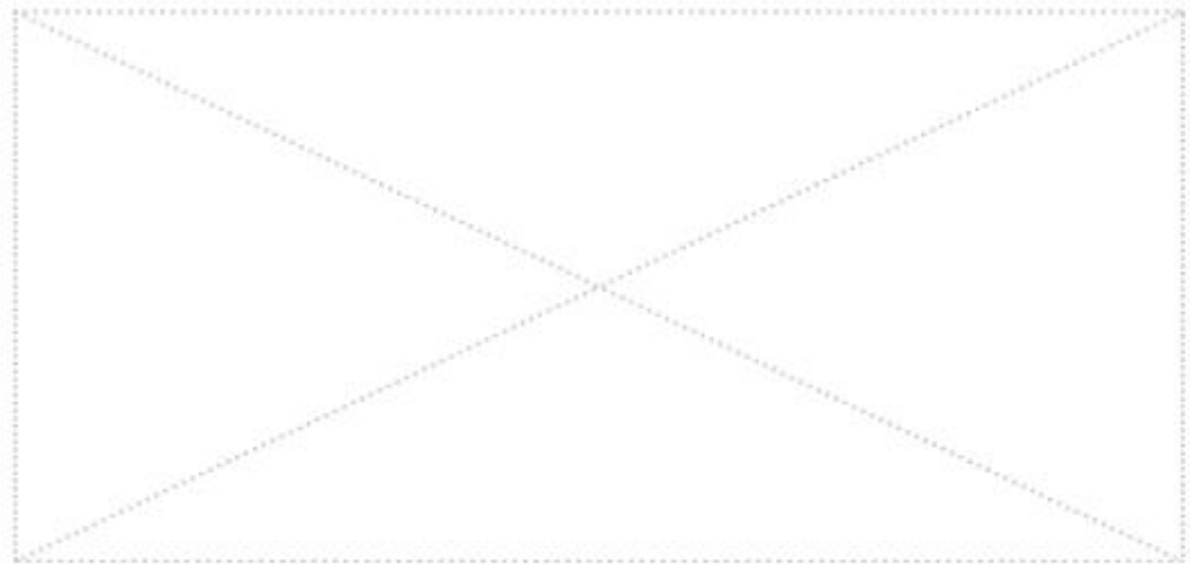
■ 연구개발 목표

- 유·무기 페로브스카이트 소재를 로봇으로 자동 합성하고 그 특성을 평가하며, 축적된 소재데이터와 AI를 기반으로 최적화된 소재를 개발하는 자율주행 환경을 제공
- 태양전지 페로브스카이트 소자의 조립 및 평가가 가능한 연구실로 확장하여 소재/소자 개발이 복합적으로 이루어질 수 있도록 구성
- 개발 연구실에서 얻어진 모든 실험 관련 데이터는 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 이관되고, 소재정보학 기반 페로브스카이트 신소재의 특성 예측 및 설계를 진행

■ 세부기술 1: 유·무기 복합소재 합성·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 유·무기 페로브스카이트 소재의 합성, 분석, 물성평가 영역별로 모듈화된 자동화 장비 및 기술 개발
 - 다양한 페로브스카이트 소재의 합성 공정들에 대한 자동화 모듈 개발
 - 다양한 페로브스카이트 소재의 분석 기술들에 대한 자동화 모듈 개발
 - 다양한 합성 공정과 분석 기술에 대한 모듈을 결합할 수 있는 자동화 기술 개발
- AI 기반 소재 특성을 자율적으로 최적화할 수 있는 기술 개발

- 다양한 모듈과 모듈 간의 연계를 자동으로 운용할 수 있는 AI 기술 개발
- 분석 결과 기반으로 다음 실험 조건을 자율적으로 선정할 수 있는 AI 기술 개발
- 국가 소재 연구 데이터 플랫폼 데이터 활용하여 소재 후보군 압축 선정 가능한 AI 기술 개발

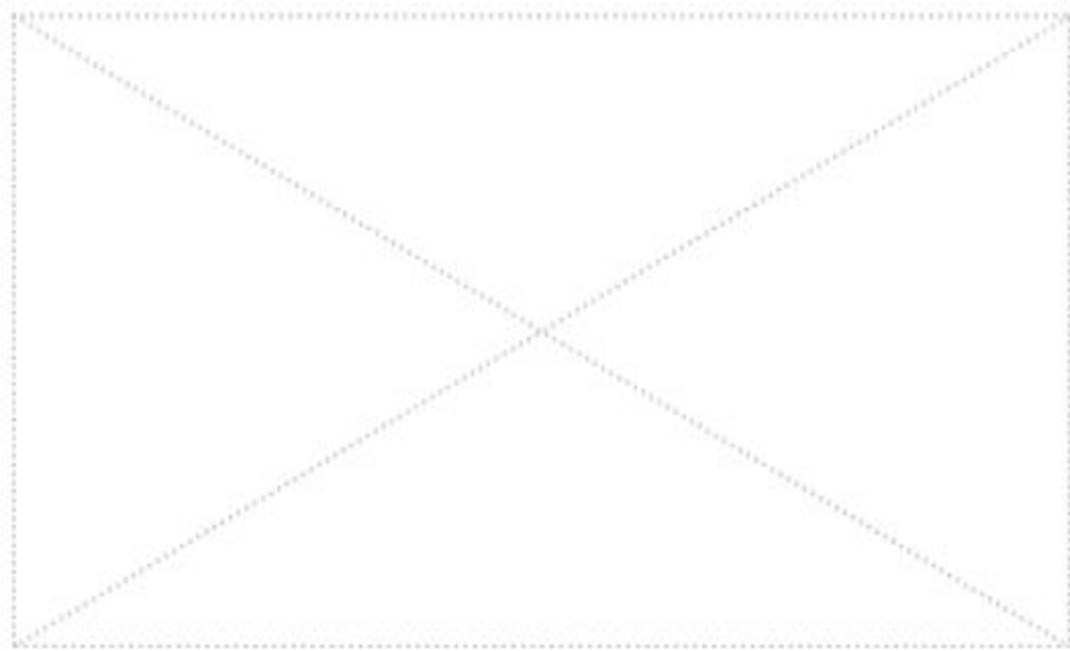


[모듈화 기술을 통한 페로브스카이트 소재 개발 자동화 개념도]

- 개발된 모듈과 요소기술을 결합하여 자율주행 연구실을 구축하고 소재 개발에 적용하여 신소재 개발
 - (예시) 페로브스카이트 태양전지용 광활성층 페로브스카이트 소재 개발에 적용
 - (예시) 페로브스카이트 LED 소자용 페로브스카이트 소재 개발에 적용
- 개발 장치를 통한 소재 합성·물성데이터 생성 및 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 이관

▣ 세부기술 2: 유·무기 복합소자 조립·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 유·무기 페로브스카이트 소재를 이용한 태양전지 소자 조립 및 특성 평가 전 과정을 로봇과 AI를 이용하여 자동화



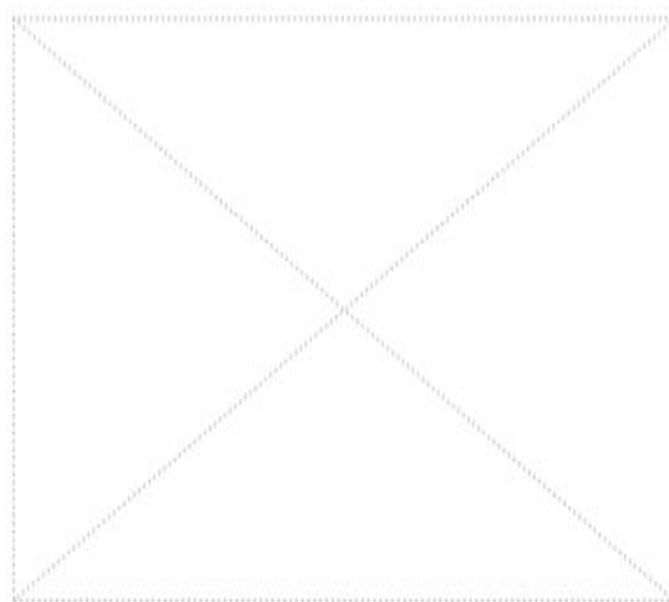
[페로브스카이트 태양전지용 셀 제조 및 측정 자동화 개념도]

○ 페로브스카이트 태양전지의 경우,

- 페로브스카이트 태양전지는 높은 효율과 값싼 제조방식 등으로 실리콘 태양전지를 대체할 차세대 핵심 소재로 각광받고 있음
- 태양전지 소자는 투명전도층, 전자수송층, 페로브스카이트층, 홀수송층, 양극층과 같은 다층 박막 재료들로 구성되어 있음
- 각 박막 재료의 조합, 공정 조건 등의 변화로 태양전지 효율과 안정성, 대면적화 등의 특성이 크게 변함
- 용액 공정으로 스펀코터 위에서 박막 재료들을 순서에 맞게 차례로 쌓아 페로브스카이트 태양전지 소자 조립을 진행
- 조립된 태양전지 소자를 증착 장비로 이동하고 진공 챔버에 샘플을 로딩함
- 진공 상태에서 금속층을 증착
- 완료 후 진공챔버를 벤트(vent)하고 시료를 꺼내어 측정 장비로 이동
- 솔라시뮬레이터에서 태양전지 효율과 같은 소자 특성 측정
- 페로브스카이트 태양전지 소자의 상용화를 위해 해결해야 할 문제, 즉 고효율, 고안정성, 대면적화, 유연소자 개발 등의 문제 해결을 위해, 상세 목적에 맞게 실험 변수 공간을 구성하고, AI 자율주행으로 탐색



[페로브스카이트 태양전지 소자의 다양한 층상 구조]



[페로브스카이트 소재 기반 태양전지 상용화를 위한 문제 해결]

- 페로브스카이트 소재의 뛰어난 소재 특성이 태양전지 뿐 아니라 다양한 소자 기술에 응용될 수 있음
 - LED, 전고체 전지(solid-state battery), 광검출기(photodetector) 등에 응용 가능
- 페로브스카이트 LED의 경우,
 - 페로브스카이트 LED는 색순도(color purity)가 높고 색 영역(color gamut)이 넓으며, 가시광선-근적외선 영역에서 발광파장을 정밀하게 제어할 수 있고, 용액 공정 기반의 제조 유연성 및 저비용으로 인하여 대표적인 디스플레이 소자인 OLED(organic light-emitting diode) 및 QLED(quantum dot light-emitting diode)를 대체하는 차세대 고해상도 디스플레이 분야의 강력한 후보로 주목받고 있음

- 페로브스카이트 발광체는 여기자(exciton) 결합 에너지가 낮다는 본질적인 한계가 있기 때문에, 이를 극복하기 위해 나노 입자의 형태로 제조하여 여기자를 공간적으로 구속하는 것으로 극복함
- 페로브스카이트 나노 입자의 경우 표면에 결함(defect)이 쉽게 생기는데 리간드 물질을 변형함으로써 결함을 제거하고 발광효율을 높일 수 있음이 발표됨³
- 페로브스카이트 태양전지와 비슷하게 LED는 홀수송층, 페로브스카이트 나노 결정층, 전자수송층, 전극층의 다층 박막 구조로 이루어져 있음
- 본 스마트 연구실에서는 로봇을 이용하여 페로브스카이트 LED 소자를 제작하고 발광효율을 측정하는 실험 전주기를 자동화함
- 페로브스카이트 나노입자의 표면 결함을 없애고, 전자수송층 사이의 계면 안정화를 위한 소재 탐색 및 공정조건 최적화를 위해 AI를 사용함

○ 페로브스카이트 전고체 전지, 광 검출기 등 다양한 응용 기술에 적합한 스마트 연구실을 구축하고, 소자 조립 및 특성 평가, AI를 통한 최적화 기술을 개발함

■ 세부기술 3: AI 기반 유·무기 복합 소재 합성과 소자 설계 및 최적화 기술 개발

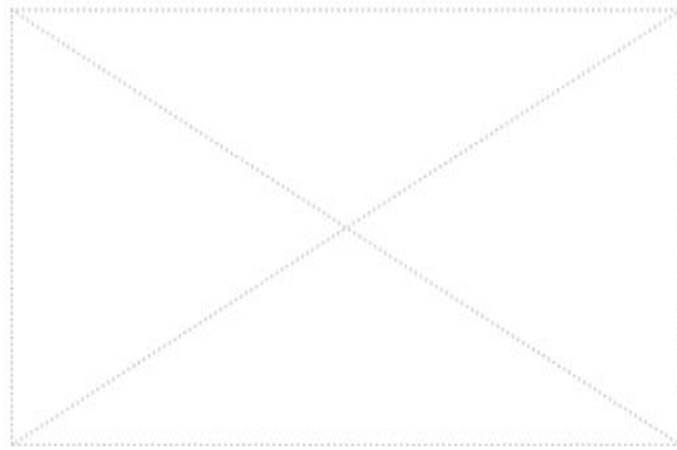
- 유·무기 페로브스카이트 소재의 합성 및 소자 제작, 물성 평가 등의 실험 전주기 과정을 AI 기반 자율주행으로 작동하는 스마트 연구실 플랫폼을 개발
- 스마트 연구실을 통해 얻은 데이터를 통합적으로 관리하는 데이터 플랫폼을 구축하여 실시간으로 수집된 연구 데이터를 업로드하고 데이터베이스화하여 체계적으로 데이터를 수집 및 관리
- 소재 및 소자 실험으로 얻어진 연구 데이터를 이용하여 각 목표 성능을 최적화하는 AI 기술을 개발
- 초기 실험 과정에서 소재데이터의 양이 많지 않을 때 베이지안(Bayesian) 최적화와 같은 방법을 이용해 최고의 성능을 갖는 실험 조건을 제시하여 자율주행 실험이 수행되도록 진행
- 일정수준 이상의 데이터가 축적된 이후 다양한 AI 방법론을 적용하여 소재의 물성을 예측하고 소재의 조성, 실험 변수, 처리 방식 등의 공정 조건을 최적화하는 역설계(inverse design)를 수행
- 페로브스카이트 소재를 이용한 소자 개발의 경우 스마트 연구실의 데이터를

기반으로

- 현재 발생하고 있는 광/전기적 손실을 분석하여 이를 최소화할 수 있음
 - 다양한 조성, 합성 변수 등에 의해 변하는 페로브스카이트 박막의 광/전기적 특성을 세밀하게 예측 및 제어할 수 있음
 - 현재 잘 알려지지 않은 전하수송층의 구조나 물성에 따른 계면 특성도 빅데이터를 통해 최적화할 수 있음
 - 이를 통해 기존 효율과 안정성을 뛰어넘는 새로운 소재 및 소자 구조를 개발하여 페로브스카이트 응용 산업을 선도할 수 있음
- 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 업로드된 데이터를 이용하여 AI 예측 모델을 구축하고 페로브스카이트 소재 및 소자 설계에 사용함
- 본 스마트 연구실에서 얻은 소재/소자 연구 데이터를 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 이관하여 많은 사람이 손쉽게 연구 데이터를 활용하게 함

3.3.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

▣ 추진체계



[세부간 협업 체계]

- 1세부에서 개발된 신규 유·무기 복합소재에 대한 정보를 2세부에 공유하여 신규 소재가 적용된 소자를 제작하여 소자 성능을 평가하여 이에 대해 1세부로 피드백 제공하여 소재와 소자 데이터 상호 보완
- 1세부와 2세부에 필요한 로봇팔 운용 기술, 장비 자동화 기술 등을 공유하여 중복 기술 개발 최소화
- 1세부와 2세부에서 수집된 모든 메타데이터와 소재, 소자 측정 데이터를 3세부와 공유하여 데이터 기반의 소재, 소자 설계 및 최적화 기술 개발
- 3세부에서 개발된 소재 설계 및 최적화 기술을 1세부와 2세부에서 채용하여 운용하여 결과를 3세부에 피드백하여 설계 및 최적화 기술 개선

▣ 세부기술 1: 유·무기 복합소재 합성·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 1년차: 페로브스카이트 소재 합성 자동화 모듈 구축
 - 페로브스카이트 소재 합성을 위한 전구체 분주, 혼합, 열처리 등이 자동으로 가능하도록 기존 장치의 수정 및 최적화와 로봇팔을 이용한 자동화 운용 모듈 및 프로그램 개발
 - 페로브스카이트 소재의 다양한 물성의 측정 및 분석이 자동으로 가능하도록

기존 장치의 수정 및 최적화와 로봇팔을 이용한 자동화 운용 모듈 및 프로그램 개발

- 합성/측정 자동화 모듈 운용으로 생성된 합성, 물성 데이터를 국가 소재 연구 데이터 플랫폼으로 이관

○ 2년차: 페로브스카이트 소재 합성 및 측정 자동화 통합 플랫폼 구축

- 로봇팔을 활용하여 합성 및 측정 자동화 모듈을 통합 운용할 수 있도록 개발
- 통합 운용에 적합하도록 개별 모듈 최적화
- 효율적 운용이 가능한 운용 프로그램 개발
- 합성/측정 자동화 통합 플랫폼 운용으로 생성된 합성, 물성 데이터를 국가 소재 연구 데이터 플랫폼으로 이관

○ 3년차: 페로브스카이트 소재 개발 자동화 통합 플랫폼 고도화 및 소재 개발에 적용

- 자동화 통합 플랫폼을 활용한 신규 페로브스카이트 소재 탐색 및 최적화
- 소재 개발 적용을 통한 자동화 통합 플랫폼 고도화
- 자동화 통합 플랫폼 운용으로 생성된 합성, 물성 데이터를 국가 소재 연구 데이터 플랫폼으로 이관

○ 4년차: 자동화 통합 플랫폼 기반 고성능 페로브스카이트 태양전지 소재 개발

- 자동화 통합 플랫폼을 활용한 고효율, 고안정성, 대면적 페로브스카이트에 적합한 소재 개발
- 자동화 통합 플랫폼 운용으로 생성된 합성, 물성 데이터를 국가 소재 연구 데이터 플랫폼으로 이관

■ 세부기술 2: 유·무기 복합소자 조립·측정 자동화 기술 및 장치 개발

○ 1년차: 태양전지 소자 제작 및 측정 자동화 시스템 구축

- 로봇팔 및 분주기 연계 스프린코터 및 기타 소자 제작 시스템 구축
- 효율 측정 자동화 로봇팔 및 기타 측정장비 연계 시스템 구축
- 자동화 공정 50% 이상 달성, 자동화 소자 효율 연구원 대비 70% 이상 달성

○ 2년차: 태양전지 소자 제작 및 측정 자동화 시스템 완성

- 자동화 공정 최적화를 통해 연구원 효율 대비 100% 효율 및 더 높은 재현성

확보

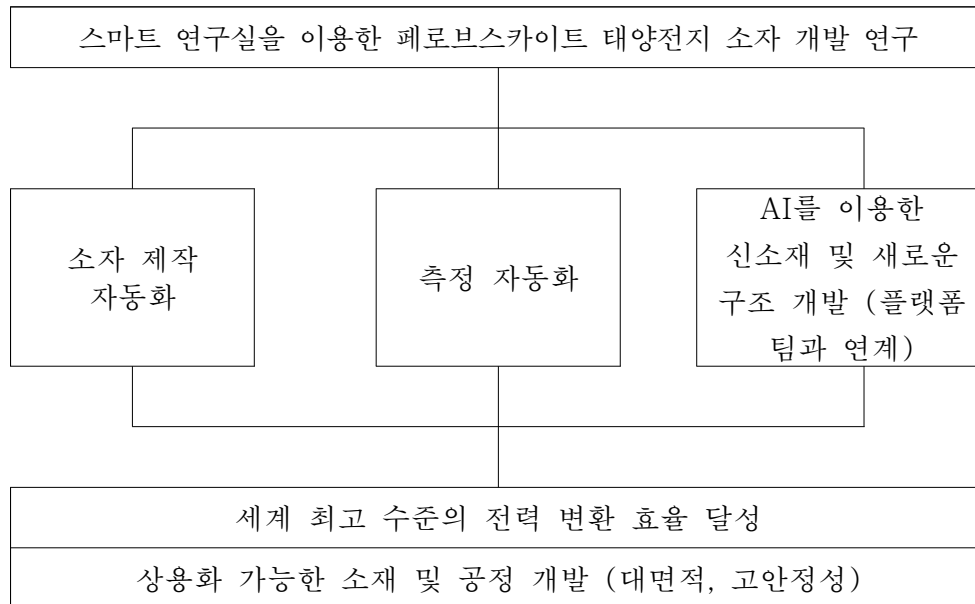
- 공정 및 측정 자동화 100% 달성

○ 3년차: 소면적 단위셀 초 고효율 및 대면적 자동화 적용 구축

- AI 플랫폼과 연계하여 새로운 물질/구조 적용 자동화 실험
- 정밀하게 최적화된 새로운 구조를 통해 초고효율 및 상용화 가능한 수준의 고안정성 단위셀 제작
- 대면적 모듈 제작 자동화 적용 구축

○ 4년차: 자동화 시스템을 이용한 대면적 고안정성 모듈 제작

- 자동화 시스템을 이용하여 양산화, 상용화 가능한 수준의 고품질 페로브스카이트 태양전지 대면적화 기술 개발
- 소면적 셀을 바탕으로 모듈화에 적합한 물질, 구조 및 공정방법 완성



[페로브스카이트 태양전지 소자 연구 개발 정량 목표]

▣ 세부기술 3: AI 기반 유·무기 복합소재 합성과 소자 설계 및 최적화



- 1년차: 소재/소자 제작 과정의 로봇팔 및 분주기 작동 통합 플랫폼 구축
 - 페로브스카이트 소재/소자 제작 및 측정 자동화 시스템 구축에 맞추어 통합 플랫폼을 구축
 - 소재/소자 실험의 환경 조건, 공정 조건 및 측정 결과 등의 연구 데이터를 통합하여 관리하는 데이터 플랫폼 구축
 - 국가 소재 연구 데이터 플랫폼과의 연계를 염두한 데이터베이스 구축
- 2년차: 소재/소자 제작 과정의 로봇팔 및 분주기 작동 통합 플랫폼 완성과 AI 기반 자율주행 실험 구축
 - 스마트 연구실 플랫폼 구축 완료
 - AI를 이용한 소재 조성, 공정 조건 등을 최적화하는 자율주행 실험 구축
 - AI 기반 자율주행 플랫폼을 확장하여, 다양한 조건, 물질 군에서 실험할 수 있도록 지원
 - 축적된 데이터를 이용하여 AI 모델 고도화
- 3년차: 소재 및 소자 데이터를 이용한 AI 예측 모델 구축
 - 자율주행 실험으로 축적된 소재/소자 데이터를 이용하여 AI로 물성 예측, 소자의 성능 등을 예측하는 모델을 구축
 - 국가 소재 연구 데이터를 이용하여 데이터셋을 확장하고, 제일 원리 계산 데이터베이스 (예를 들어 Materials Project, Nomad 등)을 이용하여 예측 모델을 고도화
- 4년차: 수집된 연구 데이터를 기반으로 AI 자율주행 및 특성 예측 모델 고도화 및 고효율, 고안정성, 대면적의 페로브스카이트 소재/소자 개발

- AI 자율주행 모델, 물성 및 소자 성능 예측 모델 등을 고도화
- 스마트 연구실을 통해 고효율, 고안정성, 대면적의 페로브스카이트 소재 및 소자를 개발
- 제일 원리 계산 등으로 개발된 소재/소자의 작동원리를 이론적으로 분석

3.3.7. 소요예산

▣ 사업기간 : 5년 (2023~2027년)

▣ 사업비 규모 : 국비 총 90억원 (18~19억원/년)

▣ 연차별 연구비

[단위: 억원]

구분		'23	'24	'25	'26	'27	계
정부 (출연금)	세부기술 1: 유·무기 복합소재 합성·측정 자동화 기술 및 장치 개발	5.25	6.65	6.65	6.65	6.3	31.5
	세부기술 2: 유·무기 복합소재 조립·측정 자동화 기술 및 장치 개발	5.25	6.65	6.65	6.65	6.3	31.5
	세부기술 3: AI 기반 유·무기 복합소재 합성과 소자 설계 및 최적화 기술	4.5	5.7	5.7	5.7	5.4	27
소계		15	19	19	19	18	90
총 사업비							90

▣ 사업비 산출근거

○ 세부기술 1: 유·무기 복합소재 합성·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 스마트 연구실을 실제 소재 합성 및 물성 측정에 활용하기 위해서는 로봇팔, 분주기, 그리고 이들과 연계된 스핀 코터, 측정 장비 등의 별도 장비 구축이 필요함
- 이러한 시스템을 설치하기 위해서는 또한 별도의 연구실 구축이 필요함

장비 1	로봇팔 (소재 합성용 2ea, 측정용 2ea)
장비 2	분주기 (소재 합성 제작용 2ea)
장비 3	자동화 공정 제반 시설 (후드, 스핀코터, 측정 장비 등)
연구실	제습실

- 소재 합성에 필요한 전구물질 재료비 역시 과제의 규모나 반복 실험량을 고려하였을 때 연간 1.5억 원이 소요될 것으로 예상함
- 스마트 연구실 과제의 소재 합성, 측정팀에서 필요 인력은 약 2명의 책임급, 3명의 선임급 연구원이 필요 할 것으로 보임

전문가 1	자동화 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	소재 합성 자동화 공정 구축 담당자
전문가 3	소재 측정 자동화 공정 구축 담당자
전문가 4	자동화 시스템 운용 인공지능 개발 담당자

○ 세부기술 2: 유·무기 복합소자 조립·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 스마트 연구실을 실제 소자 제작 및 물성 측정에 활용하기 위해서는 로봇팔, 분주기, 그리고 이들과 연계된 스핀 코터, 후드 측정 장비 등의 별도 장비 구축이 필요함
- 이러한 시스템을 설치하기 위해서는 또한 별도의 연구실 구축이 필요함

장비 1	로봇팔 (소자 제작용 2ea, 측정용 2ea)
장비 2	분주기 (소자 제작용 2ea)
장비 3	자동화 공정 제반 시설 (후드, 스핀코터, 측정 장비 등)
연구실	제습실
대면적 자동화 관련 시설	로봇팔, 분주기, 바 코터 및 제습실

- 소자 제작에 필요한 전구물질 재료비 역시 과제의 규모나 반복 실험량을 고려하였을 때 연간 1.5억 원이 소요될 것으로 예상함
- 스마트 연구실 과제의 소자 제작팀에서 필요 인력은 약 1명의 책임급, 3명의 선임급 연구원이 필요 할 것으로 보임

전문가 1	자동화 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	소자 제작 자동화 공정 구축 담당자
전문가 3	소자 측정 자동화 공정 구축 담당자
전문가 4	자동화 시스템 대면적 적용 담당자

- 세부기술 3: AI 기반 유·무기 복합소재 합성과 소자 설계 및 최적화 기술
- 스마트 연구실의 AI 활용 분야에서는 데이터 플랫폼 구축 기술, AI 모델링 구축 기술, 데이터 해석 및 제일 원리 계산 지원의 전문 기술 인력이 필요

전문가 1	스마트 연구실 AI 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	스마트 연구실 자동화 기술 연구 담당자
전문가 3	연구 데이터 플랫폼 담당자
전문가 4	데이터 기반 소재/소자 디자인을 위한 AI 모델링 담당자
전문가 5	연구 데이터 해석 및 제일 원리 계산 담당자

- 플랫폼 구축을 위한 서버 등의 고성능 컴퓨터 장비가 필요

3.3.8. 기대효과 : 활용 시나리오

▣ 시나리오 1 : 로봇이 직접 실험하는 연구실

“로봇부터 AI까지.. 최신 기술의 집합소 스마트 연구실”

페로브스카이트 태양전지 개발 부서 연구원 김씨. 페로브스카이트 소재를 이용하여 고효율의 태양전지를 개발하는 데 매진하고 있다. 오늘 아침 출근하여 연구실 창문 너머로 연구실 온도와 습도, 몇 명이나 실험 중인지를 확인한다. 하나, 둘, 셋, 넷, 다섯... 이미 다섯 명이 실험 중이라 지금 당장 연구실에 들어갈 수가 없다. 페로브스카이트는 습도에 너무 민감하여 연구실 내 사람 숫자까지 제한을 두고 습도 환경을 유지해야 한다. 빨리 연구실 확장 공사가 끝나야 이 체증이 끝날 것 같다. 한 시간이 지나서야 드디어 실험을 시작했다. 샘플 합성을 위해 피펫에 용액을 로딩하고, 스핀코터를 작동시킨 후 심호흡을 한다. 용액을 피펫팅하는 시기와 속도를 잘 맞추지 못하면 태양전지 효율이 잘 나오지 않기에 늘 긴장되는 순간이다. 침착하게 피펫팅을 실시했지만, 이번에 너무 느리게 피펫을 누른 것 같다. 다시 해야 하나, 일단 태양전지 효율을 측정해볼까 고민되지만 이미 벌어진 일이니 포기하고 다음 샘플 합성으로 넘어가 본다. 용액 비율을 바꿔보고, 피펫팅 속도를 바꿔보고 다양한 조합으로 샘플을 계속 합성한다. 어깨가 아프고 계속 긴장 상태라 몸이 녹초가 되었다. 오늘 만든 샘플에 금속 증착도 해야 하는데, 일단 점심을 먹으러 가야겠다.

데이터기반 연구부서 연구원 이씨. 사무실로 출근한 이연구원은 스마트 연구실 플랫폼에 접속한다. 밤새 로봇이 만든 샘플을 확인하고 소재 특성 측정 결과를 살펴본다. 로봇이 용액 비율과 피펫팅 속도를 바꿔가며 15개의 샘플을 만들었고, AI가 최적화를 잘 진행하여 13번째에 합성된 샘플이 가장 좋은 밴드갭 값을 가지는 것으로 확인되었다. 오늘 새로 얻은 데이터는 국가 소재 연구 데이터 플랫폼에 자동으로 업로드되었고, 밴드갭을 예측하는 AI 모델을 업데이트하여 실험 조건 최적화 모델을 수정하였다. 용액 비율과 피펫팅 속도에서는 꽤 좋은 최적화 결과를 얻었기 때문에, 이제 피펫팅 시기 조건을 추가해서 최적화를 진행할 예정이다. 이제 곧 사람보다 로봇이 더 합성을 잘할

것 같다. 오후에는 합성된 샘플을 금속 증착 및 태양전지 효율 측정 모듈로 옮겨줄 예정이다. 다음 달이면 샘플 합성 모듈과 소자 제작 모듈이 연결되어 모든 실험 과정이 자동으로 진행될 예정이라 좀 더 편하게 실험 결과를 확인할 수 있을 것 같다.

로봇과 AI의 최신 기술이 접목된 스마트 연구실 플랫폼을 통해 단순 반복 작업을 획기적으로 감소시키고, 다양한 물질 군과 실험 조건 변형을 통해 좀 더 빠르고 편리하게 성능 최적화를 달성하고 있다. 곧 최고성능의 페로브스카이트 소재도 개발할 수 있으리라 기대한다. 처음 실험하는 로봇을 도입하려고 했을 때, 대학원생이 필요 없어지는 것 아니냐는 이야기를 많이 들었지만, 막상 일을 시작해보니 로봇이 사람 손을 덜어 주는게 아니라 일을 더 많이 만드는 것 같다. 매일같이 쏟아지는 새로운 샘플과 측정 데이터들을 분석하는 것만 해도 너무 벅차다. 데이터 분석과 연구실 플랫폼 개선을 위해 일해줄 학생을 더 뽑아야 할 것 같다.

■ 시나리오 2 : 페로브스카이트 태양전지의 난제 해결

“10000시간 유지되는 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발을 향해”

페로브스카이트 소재는 태양광을 흡수하여 전기로 변환하는 태양전지 소자에 사용되어 활발히 연구되고 있고, 꾸준히 고효율의 페로브스카이트 태양전지가 국내외에서 발표되고 있다. 페로브스카이트 태양전지 개발 부서 연구원 장씨는 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 목적으로 효율도 높이고 동시에 안정성을 높이기 위한 연구를 진행하고 있다. 태양전지 소자는 투명전도층, 전자수송층, 페로브스카이트층, 홀수송층, 양극층과 같은 다층 박막 재료들로 구성되어 있는데, 홀수송층의 물질을 바꾸거나 페로브스카이트 소재의 조성, 공정조건 등을 변형하여 안정성을 높이는 시도를 하고 있다. 그런데 변형해볼 수 있는 물질 군, 실험 변수가 너무 많아서 경험에 기반하여 선택적으로 시도하는 상황이고, 변수와 성능의 상관관계도 아직 정확히 파악하지 못하고 있다. 2020년에 기계학습을 이용하여 페로브스카이트 소재의 A 위치에 PTEA 물질을 추가함으로써 안정성을 높일 수 있다고 예측하였고, 실제 실험으로도 이를 증명함이 발표되었다. 이러한 AI의 시대에서 아직도 예전처럼 주먹구구식으로

실험 변수를 선택하고, 될 때까지 실험을 시도하는 게 옳은 방식인가라는 고민이 계속된다.

페로브스카이트 태양전지 개발 부서 연구원 서씨는 스마트 연구실 플랫폼을 이용하여 더 효율적이고 안정적인 태양전지를 개발하고 있다. AI가 체계적으로 다양한 물질을 선택하고, 실험과정에서의 다양한 변수를 바꿔가며 자동으로 태양전지 소자를 제작하고 성능에 대한 평가를 진행하고 있다. 물론 아직은 때때로 자동 실험 장비에 크고 작은 문제가 생겨서 자율주행 실험 프로그램의 복잡한 코드를 살펴봐야 하지만, 스마트 연구실에서 자율주행으로 며칠씩 자동으로 샘플을 만드는 걸 보면 너무 뿌듯하다. 많은 연구자가 그동안 미처 생각지 못했던 물질 군도 AI가 실험으로 제시하여 시도해 볼 수 있었고, 그중 몇몇 물질 군은 뛰어난 효율과 안정성을 보여주기도 했다. 기존의 경험적 방식으로 찾아낸 태양전지 소자들의 안정성 평가 결과가 최고 1000시간 정도로 발표되었는데, 스마트 연구실을 통해 개발한 태양전지 소자의 경우 일반 대기압과 온도 조건에서 4000시간으로 크게 증가하였다. 점차 스마트 연구실의 조건 변수를 확장하여 자율주행 실험의 범위를 넓혀가고 있고, 자율주행의 시스템도 안정적으로 작동하고 있어서 26% 효율에 10000시간 안정성을 곧 달성할 수 있으리라 기대한다.

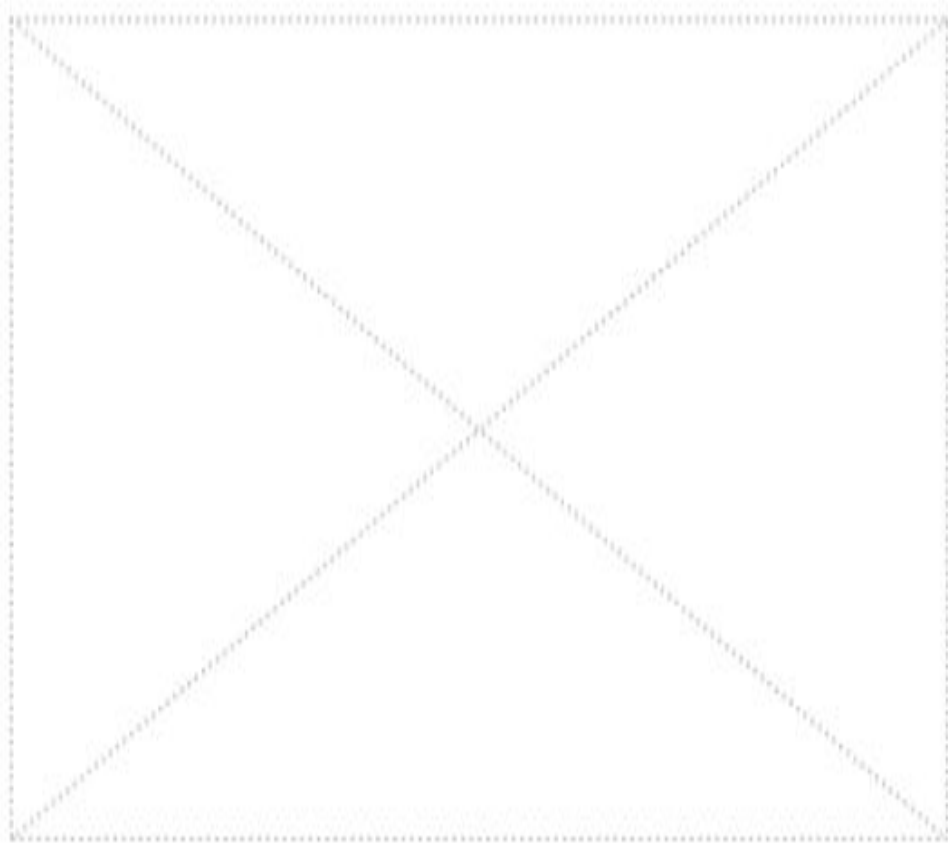
3.3.9. 발전방향

- 과제 종료 후 개발된 플랫폼이 산학계에서 다양한 유·무기 복합소재 및 소자 개발에 적용 가능하도록 추가 연구개발 프로그램이 필요
 - 다양한 유·무기 페로브스카이트 소재 개발에 적용되기 위해서는 다양한 합성, 분석 모듈이 추가적으로 개발되어야 하며, 개별 소재 개발을 위한 모듈 통합 적용에 추가적 지원이 필요
- 개별 연구 그룹에서 추가적인 장비 구축 없이 페로브스카이트 소재 개발이 가능하도록 공유 플랫폼 구축이 필요
 - 중복적 장비 구축을 방지하기 위해 공유 플랫폼을 구축하여 용도에 맞게 모듈들을 조합하여 변경 활용할 수 있는 공간, 장비, 지원 인력 교육이 추후 필요
- 산학계 수요 및 실제 활용에 따른 개선
 - 산학계에서 개발하고자 하는 페로브스카이트 소재에 적합한 합성, 측정 모듈에 대한 수요를 파악하고 추가 개발
 - 실제 소재 개발에 적용함에 따라 발생하는 문제점, 개선점에 대해 파악하여 기존 모듈들 최적화 및 플랫폼 개선
- 활용도를 높이기 위한 워크숍 및 문헌 보고
 - 플랫폼 활용도를 높이기 위해 산학계 전문가들을 초빙하여 플랫폼을 소개하고 연구자들의 개별 소재들 개발에 대한 자동화 플랫폼 활용에 대한 컨설팅 제공
 - 자동화 플랫폼을 가상으로 경험해볼 수 있는 VR 등 가상현실 정보 제공
 - 플랫폼과 플랫폼을 활용한 신규 소재 개발에 대한 SCI 저널 논문 출판으로 플랫폼 신뢰성 및 활용도 홍보

3.4.1. 필요성

▣ 개발 플랫폼의 개요

- 스마트 연구실 플랫폼은 산업체/대학/연구기관의 전문적인 연구 개발 아이디어(혹은 Insight)를 구현할 수 있는 연구 실험 환경을 지능화/무인화/모듈화함으로써, 제안된 연구 결과물 개발을 위한 최적 공정(혹은 실험)을 제안할 수 있도록 실시간 공정 분석 및 공정과 연계된 연속 분석 기능을 접목하여 연구 개발의 방향을 추천 혹은 최적화할 수 있는 Closed Loop 프로그램이며, 이를 통해 산학연의 연구개발 비용과 시간을 절감할 수 있는 연구개발 환경을 제공



[AI·로봇 기반 스마트 연구실 플랫폼 예시]

(출처: Chem, 2021)

- 본 스마트 연구실 플랫폼은 급변하는 정치/경제/과학 변화의 흐름속에서 세계적 경쟁력을 갖추는 과학기술을 혁신적으로 발전시킬 수 있는 효율적인 연구 환경을 제공함으로써 국내 산학연의 원천 기술 경쟁력을 더욱 높일 수 있는 기반을 제공
- 본 과제를 통해 다양한 연구 분야의 서로 다른 실험실 환경에도 범용적으로 적용이 가능한 실험실 자동화 플랫폼을 위한 인공지능·로봇 기반 기술을 개발함
- 본 플랫폼은 XR(eXtended Reality, 확장현실 또는 가상융합기술) 기술을 통해 실험실 외부의 사용자와 실험실 내부의 로봇이 서로 인터랙션을 할 수 있도록 하는 인터페이스를 구현함으로써 사용자에게 직관적이며 실험실 환경의 다양한 변화에 유연한 실험 방법을 제공
- 본 플랫폼은 실험실용으로 특화된 고정밀 모바일 매니플레이터에 기반하여 기존 실험실 환경 및 장비를 활용할 수 있는 실험실 자동화 기술을 제공하며, 이를 통해 연구자들이 저비용으로 유연하게 실험실 자동화 환경을 구축할 수 있는 기반 기술을 제공

■ 국가 핵심 전략적 측면에서의 필요성

- 기후 변화, 미중 무역 분쟁, 코로나 19 유행 등 급변하는 대외적인 연구 환경 속에서, 과거 어느 때보다 효율적인 스마트 연구실 구축을 통한 가속형 실험 기술 플랫폼의 원천 기술 확보 중요성이 매우 중요한 상황이 도래함
- 또한 포스트 코로나 시대에 감염병, 재난 및 재해 상황에 대비한 사회환경의 변화인 재택근무, 원격협업 등의 비대면에 대한 수요 증가로 인해 물리적으로 분리된 공간에서의 실험이 필요하며 이러한 상황에 적극적으로 대처할 수 있는 새로운 실험 방법론이 필요함
- 미래 한국 산업 먹거리는 기후 변화 관련 기술과 전자 산업을 핵심 축으로 전화될 가능성이 높음
 - 수소 기반 연료전지 기술, 물분해를 이용한 수소 생산 기술, 고효율 태양전지 기술, 열전소자를 이용한 에너지 수확 기술 등에 대한 관심이 증대되고 있는 상황임

- 한국의 과학 기술 발전은 기존의 우수한 인력 중심의 기술 개발 형식에서 탈피하여 집단 지성과 인공 지능을 융합한 초연결 지능을 반영한 스마트 연구실 기반 신기술 개발 형식을 도입할 시점임

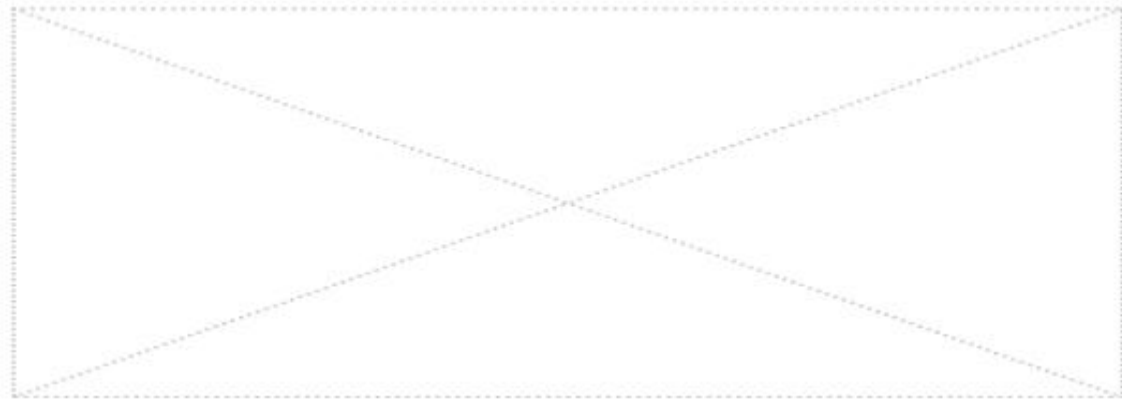
■ 기술적 측면에서의 필요성

- 실험 자동화, 연구소 자동화 분야의 인공지능·로봇 기술 주도권 확보
 - 실험 자동화 및 연구소 자동화 분야에 적용 가능한 완전 무인형 인공지능·로봇 플랫폼은 아직 개발되거나 상용화된 사례가 없으나, 인공지능 주도의 완전 무인 실험 환경 구현을 위해선 필수적인 요소임
 - 지능형 로봇을 이용한 연구소 자동화를 구현하기 위한 기술적 난제 극복 및 기반 기술 확보를 통해 향후 기술 플랫폼 경쟁에서의 주도권 확보가 필요함
 - 관련 데이터셋 선 구축 및 인공지능 라이브러리, 로봇 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼 확보를 통한 후속 연구 촉진 및 세계적 선도 그룹 육성 필요
- 기존 실험실 자동화는 특정 실험에만 적용 가능한 모듈 단위 자동화 기기 등으로 국한되어 완전 무인화와는 거리가 있음
 - 모듈 단위 자동화 기기는 주로 액체를 다루는 실험으로 한정되어 개발되고 있으며, 특정 실험을 위해 개발된 자동화 기기를 다른 종류의 실험에 적용하기 어려움
 - 실험자 관점에서 여러 실험을 자동화하기 위해 매번 새로운 자동화 기기를 구매하고 사용법을 숙지해야 하는 부담이 있으며, 기존 실험 장비를 활용하기 어려운 측면이 있음
 - 기존 모듈화된 자동화 기기는 입력과 출력이 분명한 실험 환경에서의 자동화만 지원하므로 해당 자동화 기기에 시약을 보급하거나 결과물을 다른 실험/분석 장비로 옮기는 등의 작업에는 여전히 실험자의 개입이 필요함
 - 기존 기기의 한계를 극복하고 기존 실험 장비를 최대한 활용하면서 다양한 분야에 적용 가능한 실험실 자동화 용 인공지능·로봇 플랫폼 개발이 필요함
 - 자동 반복 수준에서의 자동화가 아니라 임무 관련 환경을 능동적으로 파악하고 환경 변화에 유연하게 대처하는 자동화 플랫폼 구현을 위해서는 인공지능과 로봇의 공동 개발이 필수적임
 - 해당 수준의 자동화 플랫폼 구축에는 인공지능과 로봇 기술의 공동 개발뿐만 아니라 적용 환경에 따라 두 기술을 모두 포함하는 복합적 튜닝이 필요함

- 모듈 단위 자동화가 아닌 실험실 단위 자동화의 경우 실험 전 과정을 유기적으로 파악하고 실험 절차나 사용 시약 등에 변화가 생길 때 유연한 대처가 필요함

○ 실험실 자동화에 따른 연구 효율 향상

- 단순 노동 인력 감소 수준에서의 효율성 향상뿐만 아니라, 실험실 자동화 플랫폼과 연계한 인공지능 주도 실험 설계 등 신기술 도입으로 연구 효율 향상이 가능함



[Autonomous Experiment용 실험실 모습]

(출처: Nature, 2020)

○ 객체/환경 인식, 로봇 매니플레이션 등은 현재도 활발히 개발되고 있는 기술이지만 실험실 환경에서의 구동을 위한 개선이 필수적임

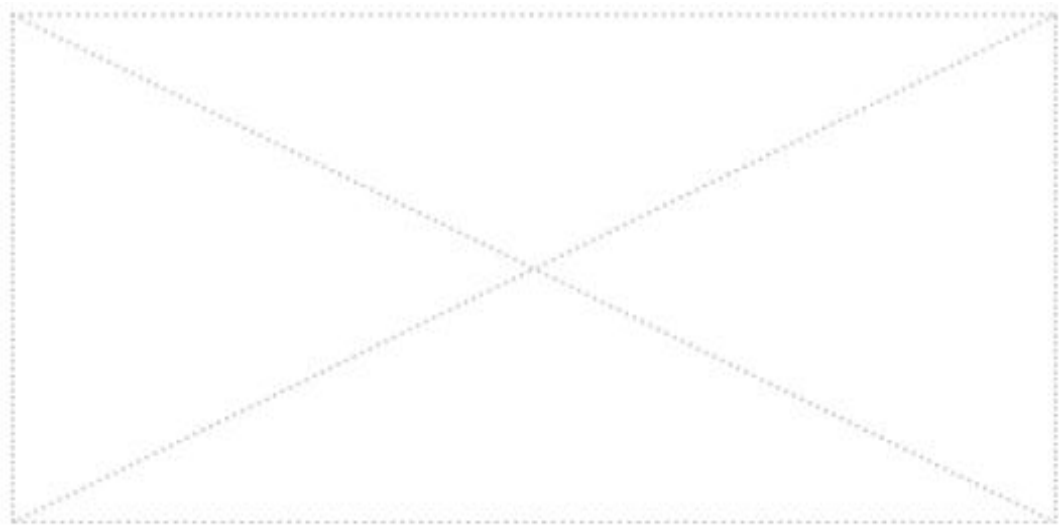
- 기존 객체/환경 인식 알고리즘은 기존 산업의 관심사에 따라 보행자, 차량, 반려동물 등의 객체를 주로 다루고 있으며, 인식하고자 하는 환경도 사무실/가정 등 일반 실내 환경을 가정하고 있거나, 비교적 단순한 구조의 실외 환경만 대상으로 하고 있어 실험실 객체/환경 인식에 적용하기 어려움
- 특히, 실험실의 경우 대부분의 객체가 시약 보관용 통, 비커, 플라스크 등 비슷한 외양을 가질 뿐만 아니라 그 표면이 투명이거나 반사율이 높은 소재로 되어 있어 검출, 인식, 3차원 복원 등에 어려움이 많으며, 실험실 환경에도 유리, 금속 등 고 반사 표면이 많아 기존 알고리즘을 활용하면 3차원 구조 파악이 어려움
- 로봇 측면에서도 실내 복잡도가 크고 안전성이 강조되어야 하는 실험실 환경의 특성상 복잡하게 적재된 실험 용품들을 파손 없이 안전하고 정확하게 파악하기 위한 전용 로봇손 하드웨어 및 관련 제어 기술 개발이 필수적임



[로봇 매니플레이터를 활용한 실험 수행 실시 예]

(출처: Yaskawa 社 및 ABB 社)

- 기반 기술 육성으로 플랫폼 시장 확보에 있어 우선권을 가져가고, 각 요소기술의 모듈화를 통해 빠른 시장 적용 필요
 - 플랫폼을 위한 기반 기술 개발의 측면과 아울러, 각 기반 기술의 모듈화를 통해 개별 기술의 활용도를 높이고 추후 플랫폼으로의 확장성도 함께 확보하는 전략 필요
 - 모듈화된 기반 기술의 빠른 시장 적용을 통해 실수요자인 연구자들의 피드백을 반영하여 요소기술의 성능을 개선하고, 추후 실험실 자동화 통합 플랫폼으로의 확장 시 참고할 수 있는 데이터 확보 필요
- 현재 사용되는 XR 기반 가상현실 인터랙션은 미리 정해진 명령에 의해 실행 결과를 일방적으로 보여주는 방식이 대부분이어서 실험실 환경에서 사람-로봇 간 인터페이스에 적용하기에는 부적절함
 - XR 로봇은 XR 기술이 융합된 지능형 로봇으로, 스마트 연구실에서 XR 로봇과의 협업을 통해 실험 결과에 대한 신뢰성 확보하고 다양한 실험을 안전하게 직관적으로 수행하도록 함으로써 빠르게 프로토타이핑하고 실험의 질을 향상시킬 수 있도록 협업을 지원하는 인터랙션 및 인터랙션 기술 개발이 필요함
 - 현재 가상현실의 3D 인터랙션은 제스처나 휴대용 장치를 이용하여 가상물체를 조작하므로 직관성이 아니며 직관적으로 상호작용하는 직접조작은 접촉감(feeling of touch)가 제공되지 않아 상호작용 정도를 인지하기 어렵고 몰입이 방해가 되므로 가상현실 공간에서 사용자에게 인터랙션에 대응하여 적절한 피드백을 주어야 적합한 일련의 작업을 수행할 수 있으므로 이에 대한 기술 개발이 필요함



[Labster의 가상 실험실]

▣ 경제/산업적 측면에서의 필요성

- 4차 산업혁명 핵심 기술인 인공지능, 빅데이터, 로봇, IoT 기술은 독자 기술 개발은 이미 개방된 상황이므로, 융합형 플랫폼을 통해 구축된 스마트 연구실을 통해 고부가가치 창출 원동력을 확보할 수 있음
 - 한국 국가 경제의 명운을 결정할 국가 경제의 핵심적인 성장판
 - 국내 산업의 경쟁력 제고를 위해서 반드시 이에 대한 투자 필요
- 노동인구 감소에 따른 연구소, 실험실 운영 효율화 필요
 - 범용성 있는 실험실 자동화 플랫폼 개발을 통해 실험에 필요한 다양한 단순 반복 작업을 자동화할 수 있으며, 실험자나 연구자가 더 창의적이고 중요한 일에 집중할 수 있게 도와줄 수 있음
 - 결과적으로 인원당 연구 능력 측면에서 연구소 운영을 효율화 할 수 있음
 - 또한, 방사성 물질이나 고위험 화학물질의 운반이나 보관, 점검 등 작업자나 연구자가 기피하는 환경에 실험실 자동화용 로봇이나 인공지능 알고리즘을 적용할 수 있으며, 인건비와 안전 장비 및 건강 검진 등 여러 부대 비용을 크게 절약함에 더해, 실제 관련 종사자의 건강과 삶의 질 향상에 기여할 수 있음
 - 추후 연구 용품 재고 관리 및 안전 점검 등을 자동화하는 인공지능과 결합하여 연구소 자동화로 확장하여, 다양한 측면에서 연구소 운영 효율화가 가능

함

- 자동화 시장은 그 규모가 빠르게 성장하고 있으며, 실험실 자동화에서 확보한 기반 기술은 추가 개발을 통해 더 범용적인 산업/공장/업무 자동화 시장으로의 확장이 가능함
 - 자동화 시장의 규모는 아래와 같이 크게 성장하고 있으며, 특히 인공지능 분야에서의 성장이 두드러짐
 - 실험실 자동화에 쓰이는 인공지능·로봇 기술은 추후 다양한 산업이나 서비스에 적용할 수 있도록 확장할 수 있어 산업적 과급력이 큼



[자동화 시장 규모 및 전망]

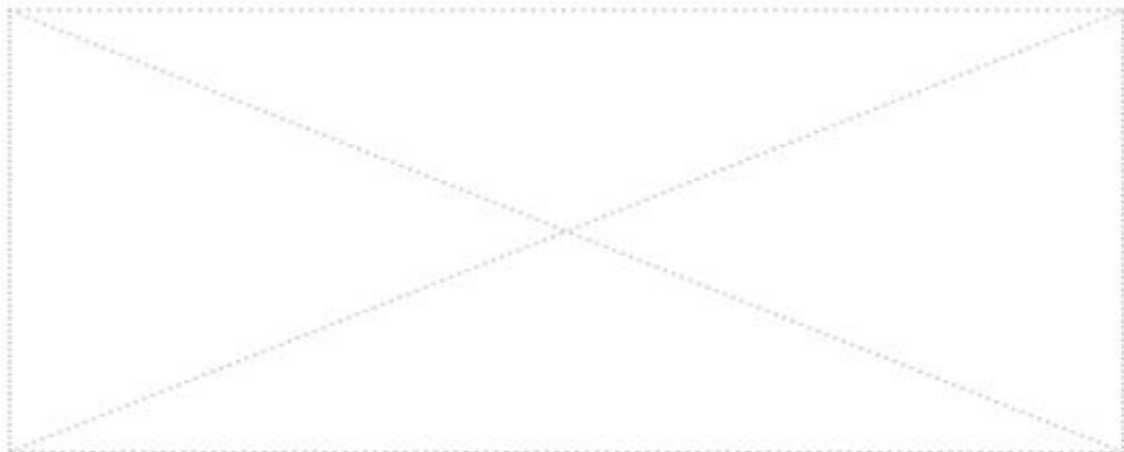
(출처: 연구개발특구진흥재단 2018)

- 본 플랫폼의 개발 기술 중 하나인 XR의 경우, 빠른 속도로 성장을 이루고 있는 전세계 XR 시장은 2020년 148억달러에서 2030년까지 총 4,547억 달러에 규모에 도달하여 연간 40,5%(출처: Market Research Future)로 급성장할 전망
- 지금까지 게임 등 엔터테인먼트 분야에 국한되어 활용되던 XR 기술이 국내에서 제조, 교육, 의료, 국방, 유통 등 다양한 산업 분야로 XR을 활용한 사례들이 확대되는 추세임
- 전 세계 XR 시장에서 제조업과 의료 분야는 가장 활용도가 높은 분야로 기술의 도입기부터 많은 투자가 이루어져 왔으나, 실험실과 같은 분야에 대한 기술 도입의 필요성은 인식하나 아직 활발히 연구되지 않는 실정이며 연구 및 기술 개발에 대한 투자가 미흡함

3.4.2. 기술 정의

▣ 제공기능

- 스마트 연구실 플랫폼은 연구 개발 주체인 대학, 연구소, 및 산업체의 연구 개발 능력(Insight)을 구체화할 수 만능(혹은 Universal) 실험실 기능을 제공
- 스마트 연구실 플랫폼은 실험 관련 Inventory 제공, 실험 공정 추천 기능, 실험 수행 및 분석 기능을 제공하며, 이를 통해 연구자는 연구 개발 Insight 구현과 관련된 신기능성 소재 구현 가능
- 스마트 연구실 플랫폼을 이용하여 연구자는 해당 모듈형 실험 공정에 대한 종합적인 데이터 관리를 통해, 실험 문제점 파악 및 피드백을 Closed Loop 형태로 진행하고, 연구자의 제안된 Insight에 대한 설득력 있는 Feasibility 근거 제공

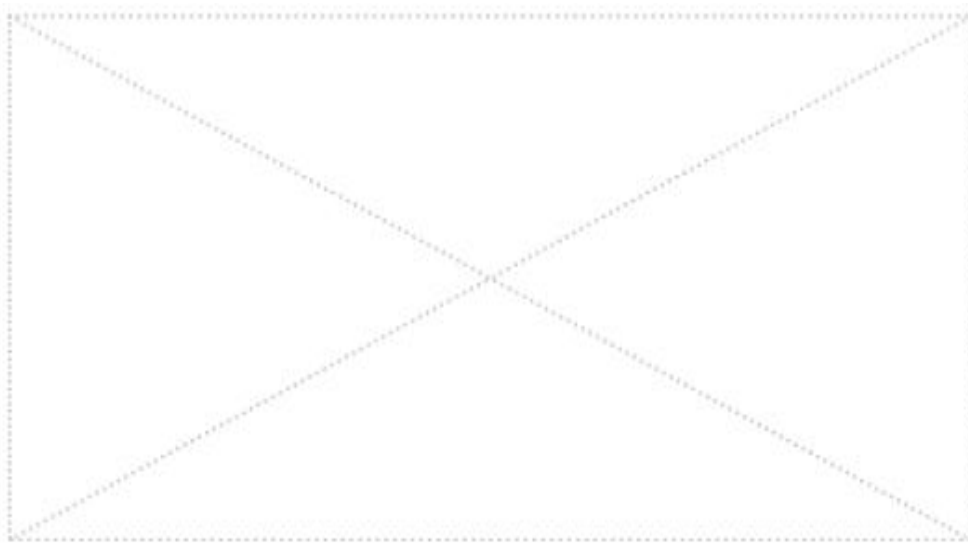


[AI 기반 자동화된 미래 재료 연구 경향]

(출처: J. Mater. Sci., 2021, 56, 16422)

- 스마트 연구실 공정 진행 현황을 통해 실시간 모니터링 함으로써, 공정에 대한 열/화학/기계적 안정성(stability)을 예측할 수 있도록 하여 개발 주기를 최소화할 수 있는 체계를 제공
- 스마트 연구실 플랫폼은 로봇틱스/빅데이터/IoT 기술을 탑재한 모듈형 실험 공정을 융합적으로 연결하여 고난이도의 원천기술을 효율적으로 개발하는 기능을 수행

- 스마트 연구실 플랫폼은 경쟁이 심화되는 원천 기술 개발 과정에서 미래형 지적 재산권 증빙 기록 및 검증 자료로서의 데이터 제공 기능 수행이 가능할 것으로 예상됨
- 다양한 연구 분야의 실험 환경에 범용적으로 적용할 수 있는 인공지능·로봇 기반의 실험실 자동화 플랫폼 기반 기술 제공
- 실험실 환경에서 사람과 로봇이 유연하게 인터랙션할 수 있도록 하는 XR 원천기술 개발을 통해 다양한 형태의 인간-로봇 협업을 포함한 다양한 응용이 가능한 XR 인터페이스 기반 기술 제공
- 다양한 표면 특성을 갖는 실험 용품 등을 안전하게 파지하기 위한 매니퓰레이터 기술을 기반으로 하는 실험실 전용 모바일 로봇 매니퓰레이터 하드웨어 및 운용 기술 제공
- 인공지능·로봇 비전문가가 쉽고 간단하게 실험 자동화를 계획하거나 수정할 수 있는 실험실 자동화 통합 플랫폼으로 확장 가능한 기반 기술 제공



[완전 자동화되고 실시간 모니터링 및 인터랙션이 가능한 스마트 연구실 예]

(출처 Biosero)

3.4.3. 국내외 연구동향 및 차별성

▣ 국내 연구 사업 및 과제 분석

- 로봇 자동화 관련 최근 연구과제들을 분석한 결과, 대부분 유연한 실험 계획에 적응할 수 있는 로봇 시스템이 아닌 반복 공정 위주의 자동화 관련 과제로 본 사업에서 제안하는 실험실 자동화 수준의 내용은 찾기 어려움
- 비슷한 외양의 실험 용품 및 시약을 구분할 수 있는 인식 기술 관련 과제는 없음
- 다양한 일상 물건 위주의 파지 제어 시스템 및 로봇 손 개발 관련 과제들이 수행되고 있으나, 실험실 용품을 안전하고 안정적으로 파지하기 위한 수준의 기술이 아니며, 하드웨어 설계와 파지 모션 제어를 동시에 수행하는 과제를 찾기 어려움

과제명	부처	기간	연구자/기관
염색 일발율 및 실험실-현장간 재현성 향상을 위한 능동제어형 모액-조액-염색-색상수정 무인 자동화 시스템	중소벤처기업부	2019.12~ 2021.12	권오대/(주)포원시스템
반투명/고반사 객체의 3차원 영상 획득 시스템 구축	미래창조과학부	2013.11~ 2016.10	심현정/연세대학교
차세대 소프트 그리퍼를 위한 소프트 로보틱스 기반 기술 개발	산업통상자원부	2015.06~ 2020.05	조규진/서울대학교산학협력단
시각 및 촉각 정보를 이용하여 다양한 부품을 파지/조립할 수 있는 인공지능 기반의 부품 핸들링 기술 개발	산업통상자원부	2020.01~ 2020.12	황희선/한국로봇융합연구원
멀티모달인식 기반으로 일상생활환경의 다양한 물체를 파지 조작하고 도구 활용 작업이 가능한 로봇 작업 제어 기술 개발	산업통상자원부	2018.04~ 2021.12	이병주/한양대학교 에리카 산학협력단

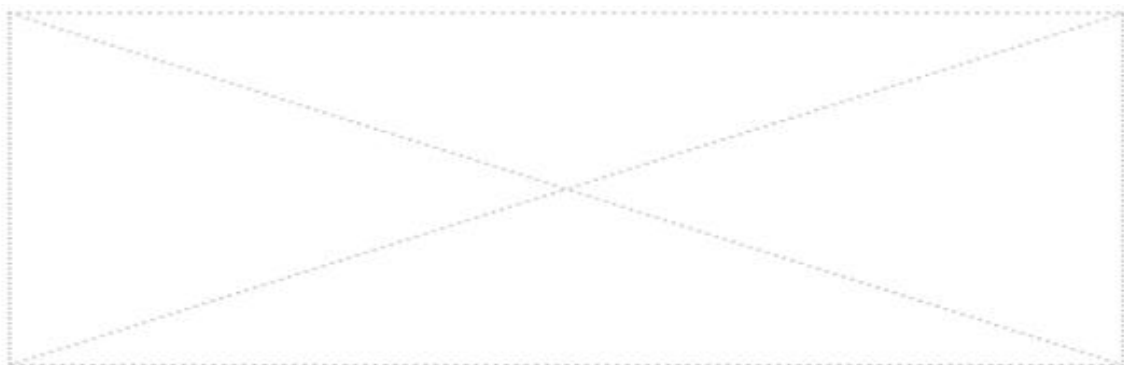
■ 국외 연구 사업 분석

- 미국은 방위고등연구계획국(DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency)의 “Make-It”프로그램(2015-2019년) 중심으로 머신러닝과 로봇 기반 유기 화합물 합성 자동화 시스템 개발 프로젝트를 수행하였고 2021년 봄부터 “Rational Integrated Design of Energetics(RIDE)”프로그램을 통해 로켓 추진제 개발을 위한 합성 자동/반자동화 시스템 개발할 계획 중
- 중국, 일본 등 아시아 국가에서는 아직 국가 주도 대규모 연구 과제가 추진되고 있지 않음

기관명/ 프로젝트명	국가	연구개발개요	특징	연구제안의 차별성
DARPA/ Make-it	미국	머신러닝과 로봇 기반 유기 화합물 합성 자동화 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 작은 유기물 합성에 집중 • 흐름-기반 플랫폼 중심 	무기소재 중심
DARPA/ RIDE	미국	에너지 분야에 자동화를 부분 적용하여 안전한 연료 합성 및 실험 가능한 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 상업 시장이 아닌 국가 안보에 중요한 에너지 분야(로켓 추진제 등) 집중 • 반자동화 고려 	Closed-Loop 가 가능한 자동/자율 시스템 중심

■ 인공지능·로봇 기반 소재/공정 자동화 기술 동향

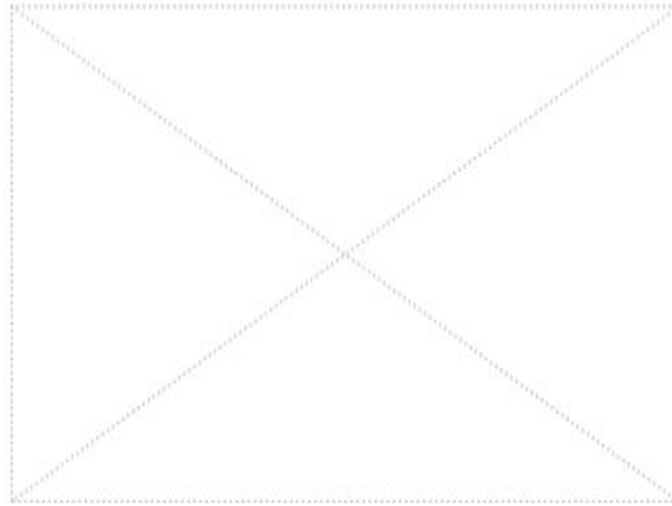
- Surrogate model 내 실험결과를 이용하여 Belief model을 학습함 (출처: Chem. Sci., 2021, 12, 6025)



[AI 기반 Lead Halide Perovskite QD 조성 설계]

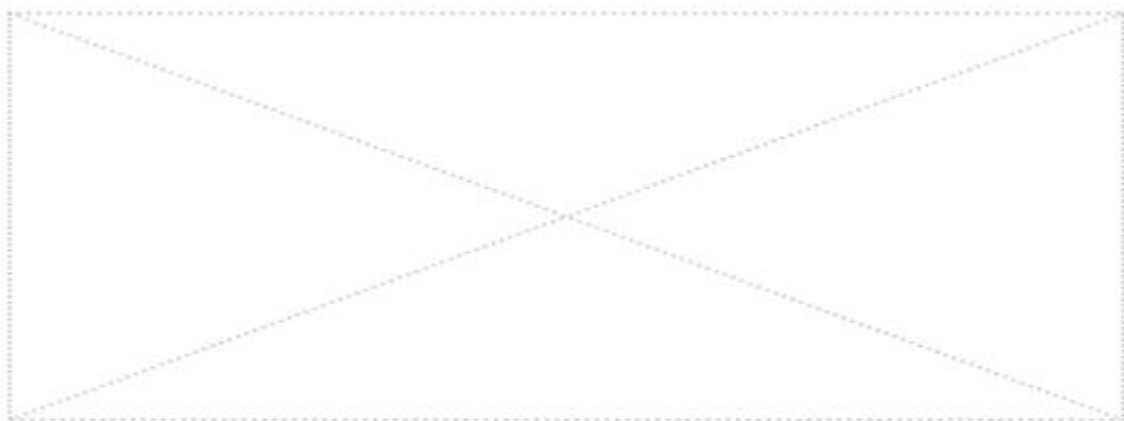
- 재료개발 Cycle을 기존 10-20년에서 1-2년으로 줄이기 위해 필요한 6가지 선행연구 주제 (출처: Materials Acceleration Platform: Accelerating

Advanced Energy Materials Discovery by Integrating High-Throughput Methods and AI (2018))



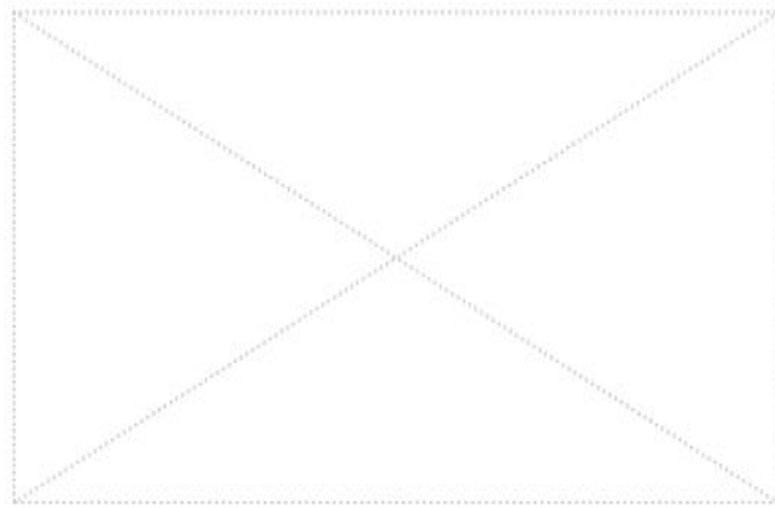
[재료개발 가속화 전략 모식도]

- 최근 재료 screening은 (1) Library 생성, (2) priority에 기반한 Library 스케일링, (3) 스케일된 library에 대한 양자화학계산 (computational pipeline), 및 (4) 계산 결과 가장 유망한 후보군에 대한 실험 진행으로 진행됨 (출처: Nat. Rev. Mater., 2018, 3, 5)



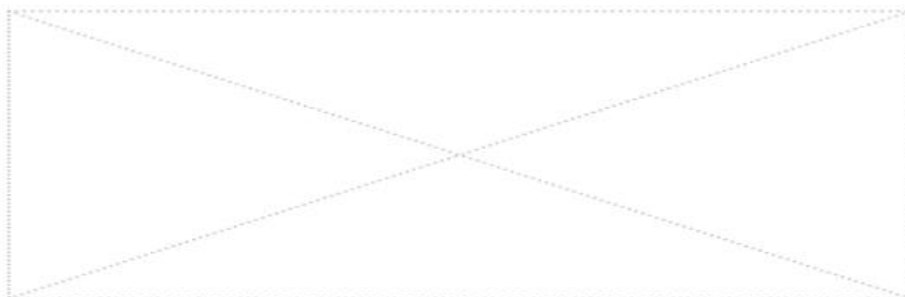
[최신 재료 virtual Screening 모델 모식도]

- 최근 Machine Learning에 의해 virtual screening이 강화되었음 (그림 11 내 빨간색 상자) (출처: Nat. Rev. Mater., 2018, 3, 5)



[Machine learning에 의해 강화된 재료 virtual Screening 모델 모식도]

- 로봇이 고형물의 무게를 측정하고 용기의 공기를 제거하거나 촉매 반응을 일으키는 등 모든 실험 작업을 독립적으로 수행한 결과 연구팀의 도움 없이 기존 촉매보다 6배나 성능이 뛰어난 새로운 ‘중합 광촉매(polymeric photocatalyst)’를 개발함 (출처: Nature, 2021, 583, 237-241)



[A mobile robotic chemist]

■ 차별화 전략

- 기존 보고된 지능형 실험실 접근은 출발 소재가 액상을 기반으로 한 자동화 시스템 구현과 인공지능을 이용한 실험 최적화를 중심으로 연구된 사례에 비해, 본 연구 기획 주제는 고상 소재를 기반으로 한 고상 분말 기반의 단일막/적층 후막 공정과 디지털 소결 기술 및 연계 기술 개발로 난이도가 높은 주제로 스마트 연구실 플랫폼 검증에 적합할 것으로 분석됨
- 본 기획과제는 모듈형의 단위 실험 공정 개발과 이를 실험목적에 맞게 연동한

융합형 구현을 통해 제안된 실험 목표에 부합하도록 확장성과 보편성이 가능하여 연구/개발 현장의 활용도를 극대화할 수 있을 것으로 예상됨

- 4차 산업 혁명 핵심 기술인 인공지능, IoT, 빅데이터, Robotics를 기반으로 XR를 가미한 Digital Twin을 구현함으로써, 연구/개발 능력의 극대화를 가능하게 하는 차별성인 요소를 포함하고 있음
- 융합 연구가 용이한 다학제적 연구 인프라 구축
 - 실험실 자동화는 데이터, AI, 로봇, 센서 등의 다양한 융합 연구가 필수적일 뿐만 아니라 수요분야인 소재, 소재측정, 생명공학 등과의 긴밀한 상호작용도 필요함
 - 본 과제에서는 과제 내 각 기반 기술을 연구하는 기관 또는 연구자 간의 협력 체계 구축에 더해 동 사업 내의 타과제 연구자들과의 협업을 통해 수요자의 필요성에 대응하기 위한 다학제적 연구 인프라 구축을 목표로 함
- 실험실 환경의 특수성에서 비롯한 기술적 난제 극복
 - 기존 객체 인식 기술은 연구용 데이터셋에 정의된 객체를 대상으로 하며, 클래스 간 외양 차이가 뚜렷한 경우가 많아 비슷한 외양의 실험 용품 인식에는 부적합함
 - 본 과제에서는 비슷한 외양의 실험 용품 인식이 가능한 기술 개발을 목표로 함
 - 기존 깊이 인식 하드웨어 및 알고리즘은 대상 표면의 투과율, 반사율이 높지 않은 Lambertian surface를 대상으로 하기 때문에 실험실 환경 깊이 인식에 부적합하며, 이를 극복하기 위해 과제에서는 멀티모달 센서를 활용하여 non-Lambertian surface의 깊이 추정 알고리즘 연구를 목표로 함
 - 표면 강도가 약한 물체를 안전하고 안정적으로 파지하고 옮기기 위한 특수 로봇손 하드웨어를 개발하고 복잡한 적치 상태에서의 안전한 파지를 위한 특수 센서 기반의 고정밀 제어 알고리즘을 개발함
- 통합 플랫폼 구축을 고려하여 기반 기술의 모듈화를 통한 사용성 확보
 - 추후 실험실 자동화 통합 플랫폼 구축에 활용되는 점을 고려하여 기반 기술을 모듈화 하여 사용성을 강화함
 - 안전한 실험실 자동화 계획 수립을 위해 로봇 플랫폼을 사용자가 미리 운용해볼 수 있는 시뮬레이션 환경을 제공함

3.4.4. 특허 분석

▣ 특허 분석 개요

- 검색기간 : ~2021년 9월까지 검색된 특허
- 범위 : 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인 : 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB : Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

검색식 (지능형 로봇 기반 융합연구사업)				
(실험실* 연구실* laborator* 랩*) and (“mobile robot” 자율주행* “자율 주행” “mobile platform” 이동로봇* “이동 로봇” “모바일 로봇” “모바일 플랫폼” ((용품* supplies* object* 물체* code* 코드* 부품* tool* 도구* experiment* equipment* 장비* reagent* drug* 시약* bottle* 병*) near3 (recogni* 인식* vision* 비전* visual* 시각* depth* 깊이* grasp* grip* seize* clasp* grab* 과제* 잡기* 로봇손* “로봇 손” hand*))) AND (c* f* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
233	407	95	88	823

검색식 (스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스)				
(실험실* 연구실* laborator* 랩*) and (로봇* 로보트* robot* 기계* machine* 휴먼* human* 사람* 사용자* interfac* 인터페이스* HMI MMI) and (XR “extended reality” 확장현실* “확장 현실” “virtual reality” 가상현실* “가상 현실” “augmented reality” 증강현실* “증강 현실” interact* 인터랙션 다중감각* “다중 감각” 멀티모달* “multi-modal” “multi modal” feedback* 피드백* 역감* collaborat* 협업) AND (c* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
377	1072	77	126	1652

검색식 (스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스)				
(실험실* 연구실* laborator* 랩*) and (로봇* 로보트* robot* 기계* machine* 휴먼* human* 사람* 사용자* interfac* 인터페이스* HMI MMI) and (XR “extended reality” 확장현실* “확장 현실” “virtual reality” 가상현실* “가상 현실” “augmented reality” 증강현실* “증강 현실” interact* 인터랙션 다중감각* “다중 감각” 멀티모달* “multi-modal” “multi modal” feedback* 피드백* 역감* collaborat* 협업) AND (c* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
377	1072	77	126	1652

[관련 특허 검색식]

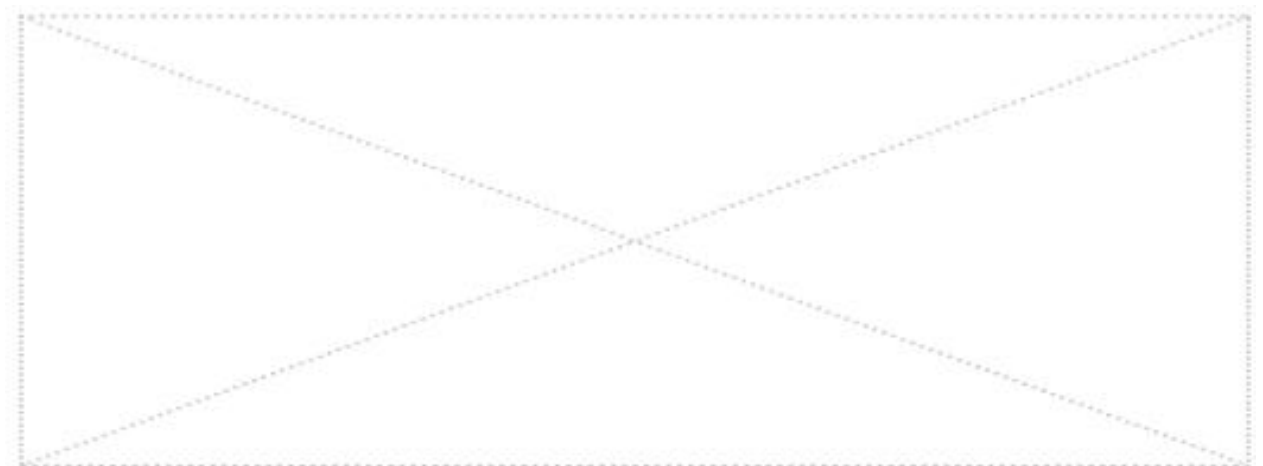
■ 연도별 특허발표 현황

- 세 가지 검색식을 바탕으로 검색된 특허 4,733건을 중복제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 388건의 특허가 최종 선정되었음
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함. 즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님
- 미국(169건, 44%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 한국(99건, 25%), 유럽(69건, 18%), 일본(51건, 13%) 순임
- 참고로, 본 과제의 검색 범위를 머신러닝, 자동화 등에 포커싱을 하여 좁게 찾으면, 검색되는 건수가 거의 없기에, 다소 범위를 넓혀서 검색하였음
- 세 가지 기술에 대한 분석

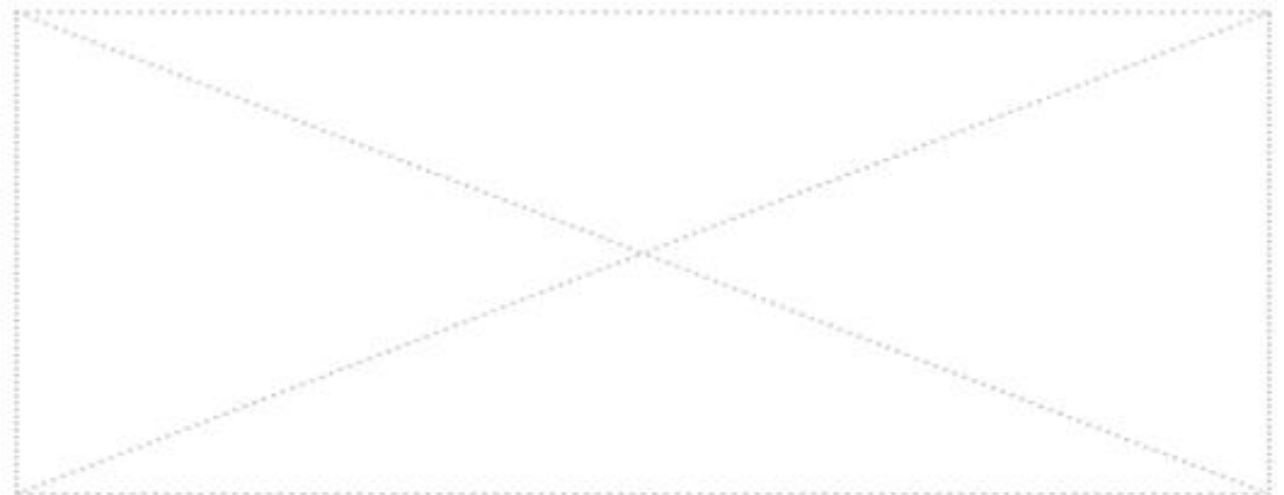
구분	'90	'91	'92	'93	'94	'96	'97	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05
유럽	1	2	0	1	0	1	0	0	4	1	4	3	0	0
일본	0	1	2	0	0	1	0	2	2	2	1	1	1	1
한국	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
미국	1	4	0	0	3	0	1	3	2	4	7	4	4	3
계	2	7	2	1	3	2	1	5	8	7	12	9	5	5

구분	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	총합계
유럽	4	3	3	3	2	0	2	4	2	9	3	5	4	5	2	1	69
일본	1	1	1	5	5	1	1	1	0	2	3	3	4	6	1	2	51
한국	2	1	1	3	4	2	6	3	0	7	10	17	12	22	6	1	99
미국	6	9	5	8	2	6	3	6	12	10	9	10	12	15	15	5	169
계	13	14	10	19	13	9	12	14	14	28	25	35	32	48	24	9	388

[연도별 개별 국가 특허 발표 현황표]



[연도별 발표된 특허수 분포]



[연도별 개별 국가 특허 발표 현황]

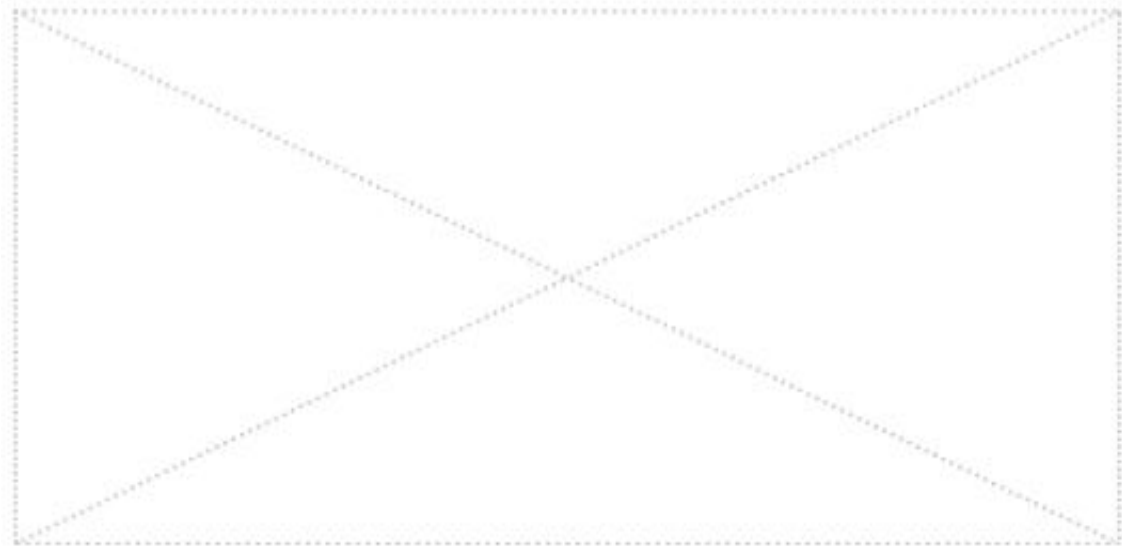
○ 스마트 실험실 플랫폼 구축을 위한 기반 기술에 대한 분석

- 미국(77건, 49%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며 유럽(30건, 19%), 일본(28건, 18%), 한국(22건, 14%) 순임

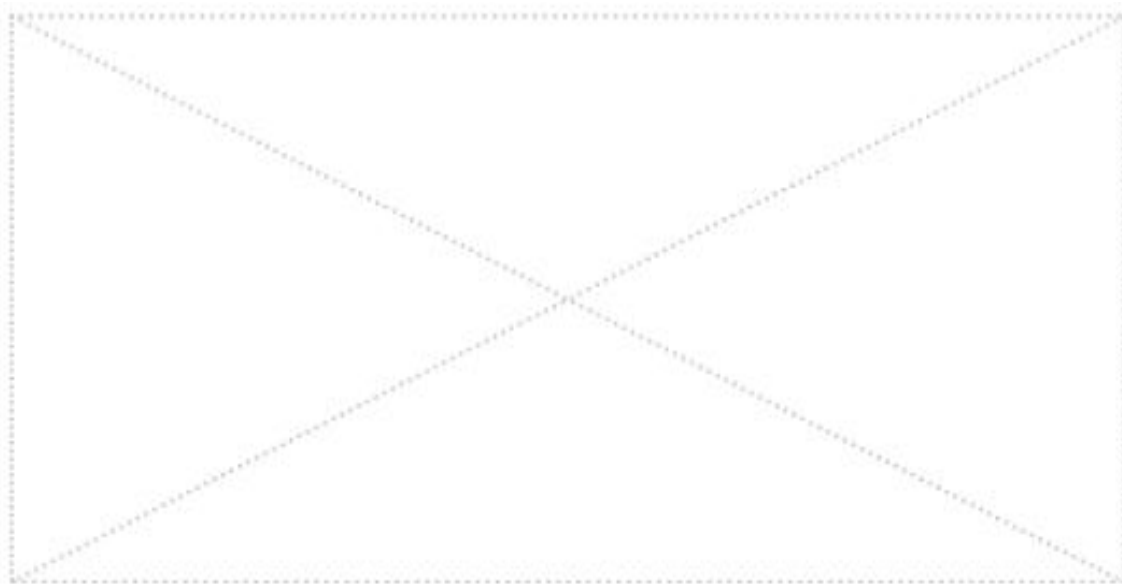
구분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
유럽	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
일본	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	1
한국	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
미국	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	1
계	1	5	2	0	0	0	2	0	0	1	1	4	0	1	2	2

구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	총 합
유럽	0	2	0	3	0	0	0	2	1	4	2	4	3	4	1	1	30
일본	1	0	0	1	3	0	0	1	0	2	2	1	2	5	1	1	28
한국	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2	4	1	3	6	3	0	22
미국	3	4	2	2	0	2	2	3	6	6	3	6	9	7	9	3	77
계	5	6	2	8	3	2	2	6	7	14	11	12	17	22	14	5	157

[연도별 개별 국가 특허 발표 현황표]



[연도별 발표된 특허수 분포]



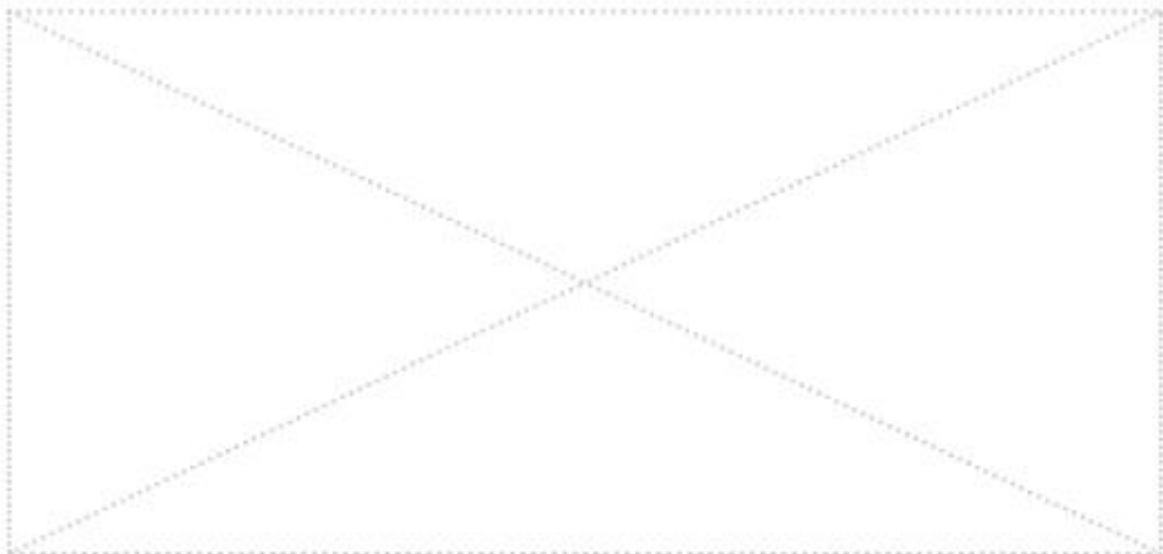
[연도별 개별 국가 특허 발표 현황]

○ 지능형 로봇 기반 융합연구사업 기술에 대한 분석

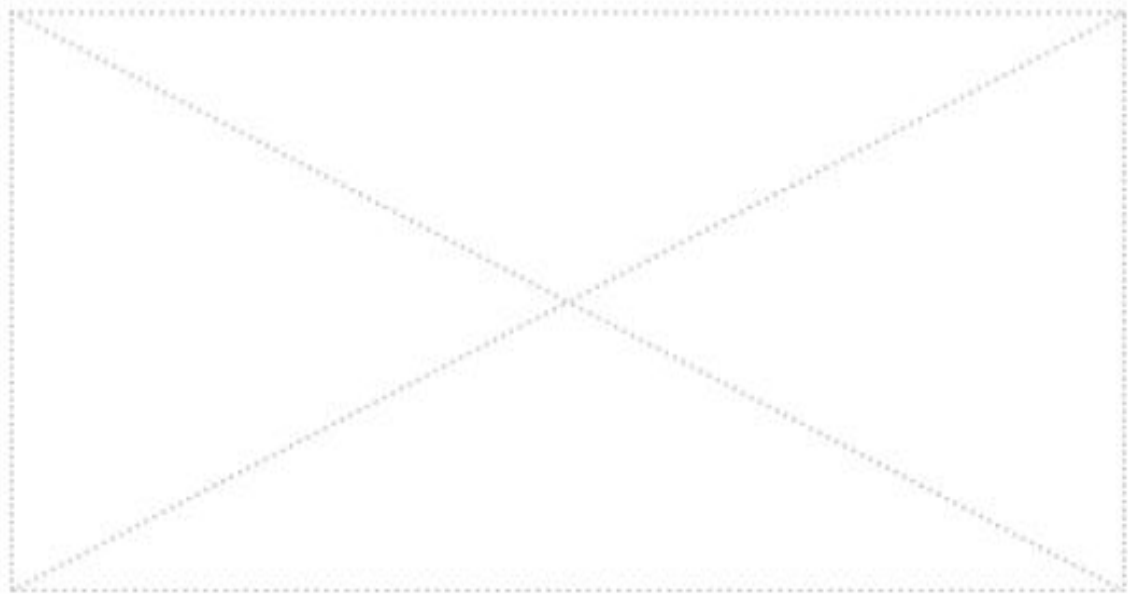
- 미국(39건, 42%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 유럽(23건, 25%), 한국(21건, 23%), 일본(10건, 11%) 순임

구분	00	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	총합계
유럽	0	3	3	0	0	3	1	3	0	0	0	2	1	1	4	0	1	1	0	0	23
일본	1	0	1	0	0	0	0	1	3	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	10
한국	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	2	1	0	2	0	1	2	7	2	21
미국	0	4	1	1	1	0	2	2	4	1	2	1	0	1	2	3	3	1	6	4	39
계	1	7	5	1	2	3	4	7	8	2	2	6	2	2	8	3	6	5	13	6	93

[연도별 개별 국가 특허 발표 현황표]



[연도별 발표된 특허수 분포]



[연도별 개별 국가 특허 발표 현황]

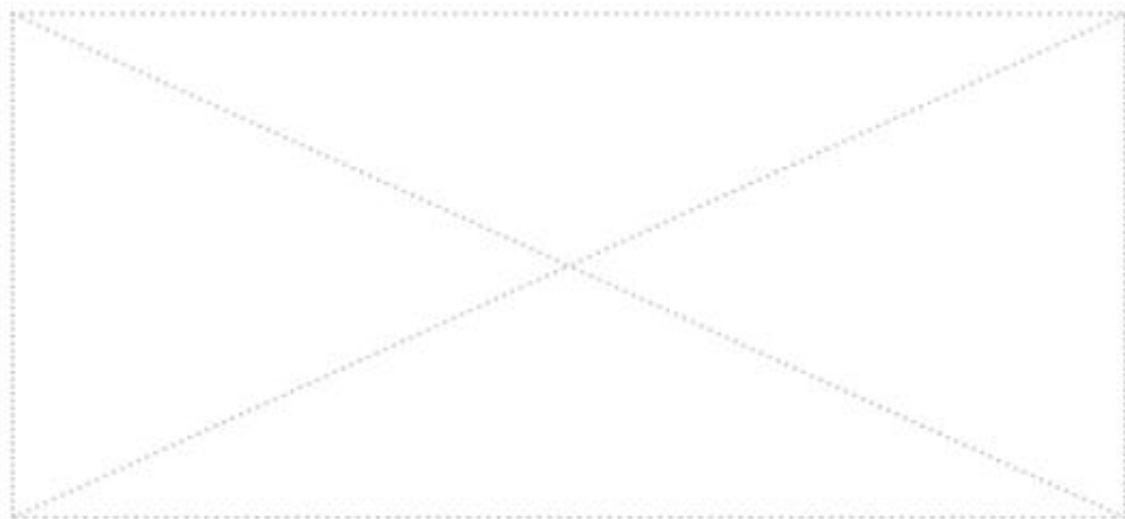
○ 스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스 기술에 대한 분석

- 한국(56건, 41%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 미국(53건, 38%), 유럽(16건, 12%), 일본(13건, 9%) 순임

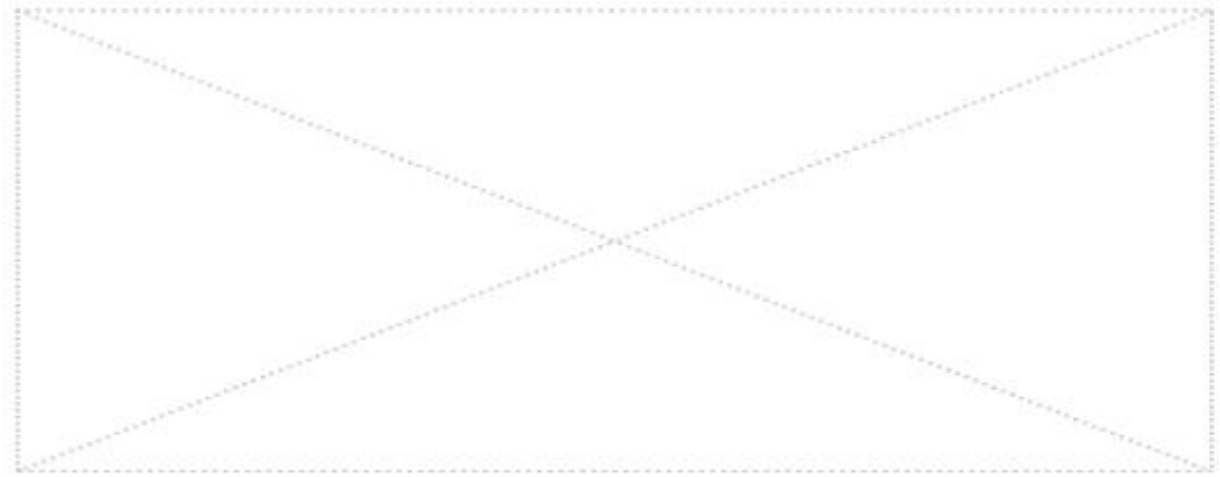
구분	90	91	93	94	97	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08
유럽	0	2	1	0	0	0	3	1	1	0	0	0	1	0	0
일본	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	0
한국	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
미국	1	0	0	3	1	2	2	2	3	2	2	1	3	3	1
계	1	2	1	3	1	4	6	3	5	3	2	1	5	4	1

구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	총합계
유럽	0	2	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	16
일본	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	13
한국	0	4	2	4	2	0	3	6	15	7	9	1	1	56
미국	2	1	2	0	3	5	2	3	1	2	2	2	2	53
계	3	8	5	4	6	5	6	11	17	10	13	4	4	138

[연도별 개별 국가 특허 발표 현황표]



[연도별 발표된 특허수 분포]



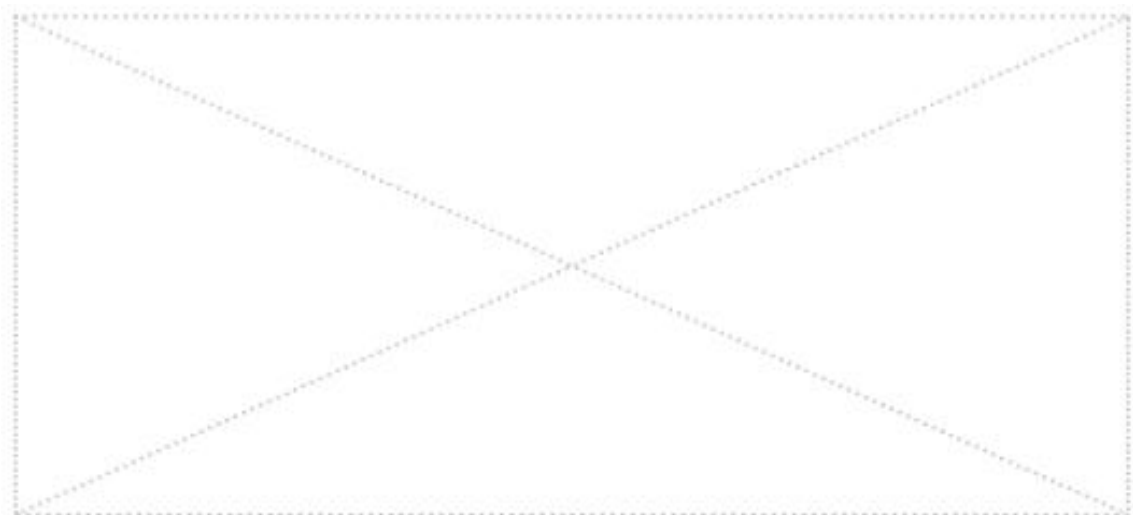
[연도별 개별 국가 특허 발표 현황]

■ 국가별 특허발표 현황

- 통합 데이터
- 상위 10개 출원인은 아래와 같음
- Siemens Aktiengesellschaft가 13건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	Siemens Aktiengesellschaft	13	16.7%
2	Abbott Laboratories	12	15.4%
3	HRL Laboratories, LLC	9	11.5%
4	Rockwell Automation Technologies, Inc.	8	10.3%
5	Beckman Coulter, Inc.	6	7.7%
6	엘지전자 주식회사	6	7.7%
7	모전스랩(주)	6	7.7%
8	Beckman Instruments, Inc.	6	7.7%
9	MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES INC	6	7.7%
10	Psychogenics Inc.	6	7.7%

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]



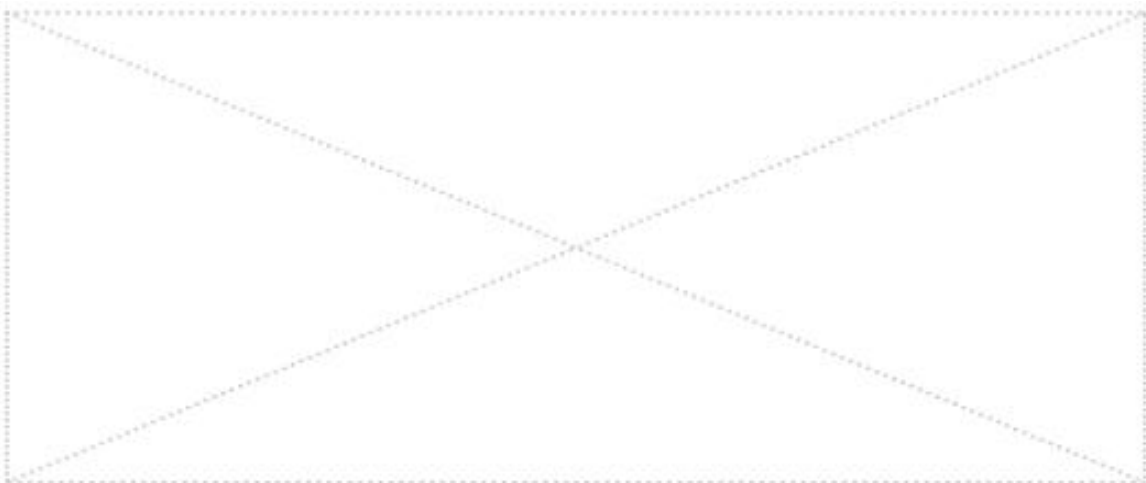
[상위 10개 출원인 특허수]

○ 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음

○ 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 미국이 36건으로 가장 많으며, 그 뒤로 유럽(21건), 한국(13건) 및 일본(8건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	Siemens Aktiengesellschaft	6	1	1	5	13
2	Abbott Laboratories	5	3	0	4	12
3	HRL Laboratories, LLC	1	0	0	8	9
4	Rockwell Automation Technologies, Inc.	1	0	0	7	8
5	Beckman Coulter, Inc.	4	0	0	2	6
6	엘지전자 주식회사	0	0	6	0	6
7	모전스랩(주)	0	0	6	0	6
8	Beckman Instruments, Inc.	1	1	0	4	6
9	MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES INC	0	3	0	3	6
10	Psychogenics Inc.	3	0	0	3	6
합계		21	8	13	36	78

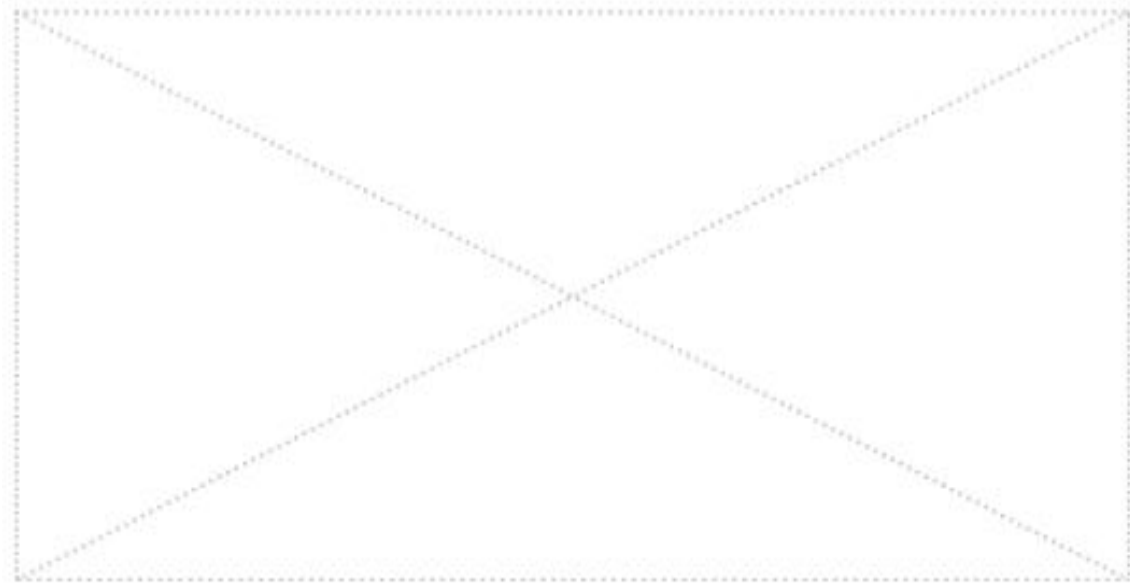
[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]



[상위 10개 출원인 특허수]

- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 3618회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 압도적으로 높게 나타나고 있음
- 즉, 상위 출원인 중에 다양한 국적의 출원인이 많지만, 실제로는 미국에서의 특허 출원 활동이 가장 활발하며, 심사관 등에 의해 인용되는 빈도도 미국에서 가장 높음. 참고로, 스웨덴은 특허 수가 2건에 불과하므로 통계적으로 유의미하지 않음

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	3618	182	19.88
한국	240	84	2.86
스웨덴	212	2	106.00
일본	183	33	5.55
독일	85	32	2.66
프랑스	40	4	10.00
스위스	25	14	1.79
캐나다	11	4	2.75
몰타	10	6	1.67
포르투갈	4	3	1.33
글로벌 평균	402.6	72.4	9.69

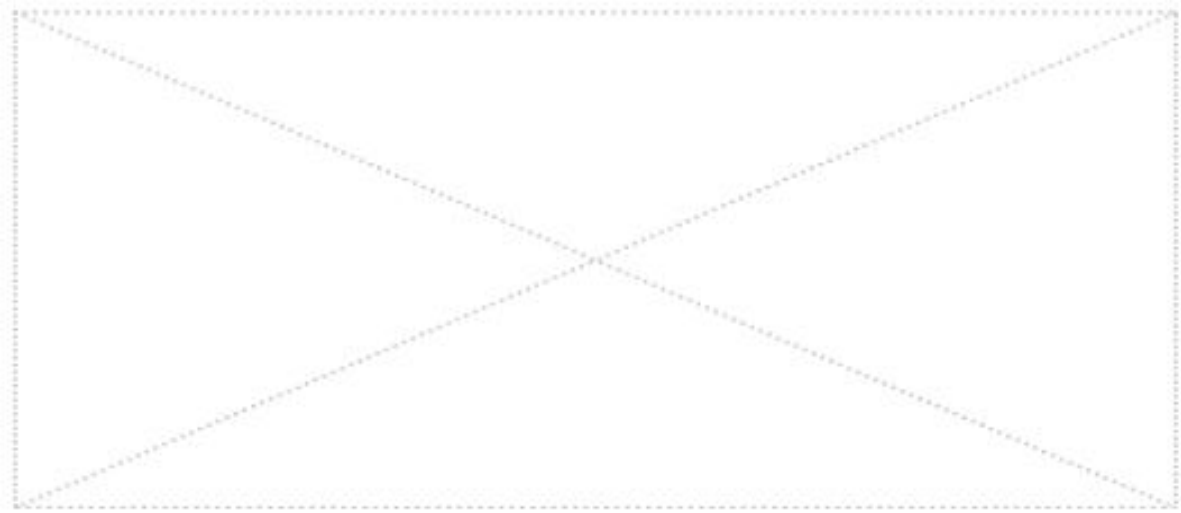


[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

- 스마트 실험실 플랫폼 구축을 위한 기반 기술에 대한 분석
- Siemens Aktiengesellschaft가 11건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	Siemens Aktiengesellschaft	11	22.0%
2	Rockwell Automation Technologies, Inc.	8	16.0%
3	Beckman Instruments, Inc.	6	12.0%
4	FANUC LTD	4	8.0%
5	F. HOFFMANN-LA ROCHE AG	4	8.0%
6	Beckman Coulter, Inc.	4	8.0%
7	Kla-Tencor Corporation	4	8.0%
8	Inpeco Holding Ltd.	3	6.0%
9	SEMICONDUCTOR PROCESS LABORATORY CO LTD	3	6.0%
10	Inpeco Holding Ltd	3	6.0%

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]

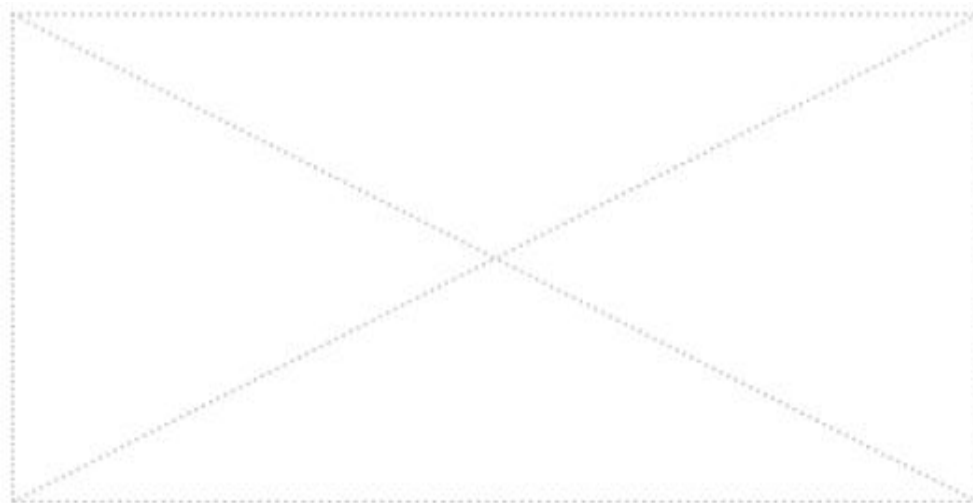


[상위 10개 출원인 특허수]

○ 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 미국이 23건으로 가장 많으며, 그 뒤로 유럽(13건), 일본(12건) 및 한국(2건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	Siemens Aktiengesellschaft	5	1	1	4	11
2	Rockwell Automation Technologies, Inc.	1	0	0	7	8
3	Beckman Instruments, Inc.	1	1	0	4	6
4	FANUC LTD	1	1	0	2	4
5	F. HOFFMANN-LA ROCHE AG	0	4	0	0	4
6	Beckman Coulter, Inc.	2	0	0	2	4
7	Kla-Tencor Corporation	1	1	1	1	4
8	Inpeco Holding Ltd.	0	0	0	3	3
9	SEMICONDUCTOR PROCESS LABORATORY CO LTD	0	3	0	0	3
10	Inpeco Holding Ltd	2	1	0	0	3
합계		13	12	2	23	50

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]

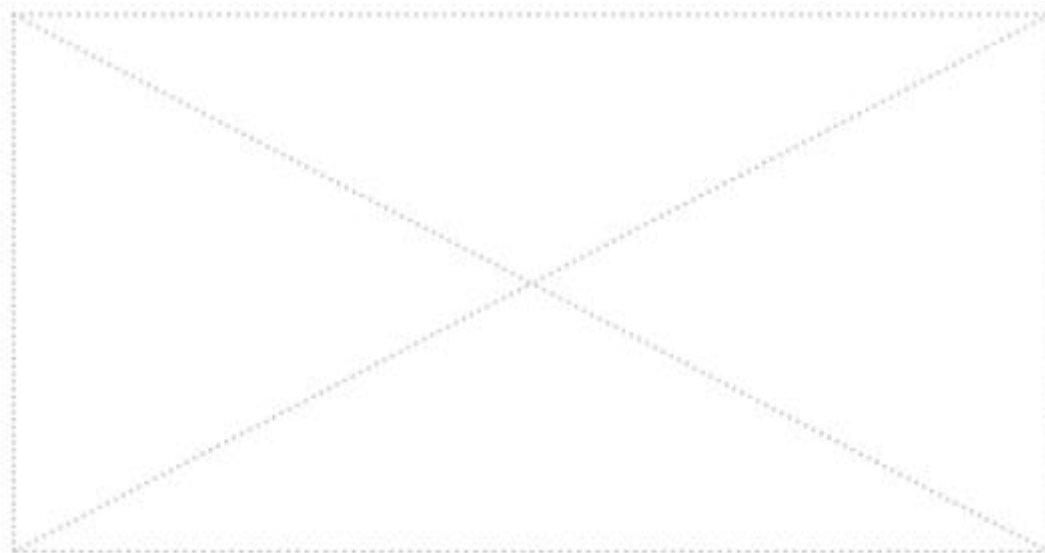


[상위 10개 출원인 특허수]

○ 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 884회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수 역

시 12.63으로 가장 높은 평균 피인용 횟수를 기록하고 있음

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	884	74	12.63
일본	123	19	6.47
한국	56	7	2.95
프랑스	37	8	12.33
독일	31	5	1.55
캐나다	10	4	3.33
말타	10	4	1.67
스위스	4	2	0.67
대만	1	5	0.50
벨기에	0	2	0.00
중국	0	2	0.00
사이프러스	0	3	0.00
영국	0	1	0.00
이탈리아	0	2	0.00
글로벌 평균	82.57	9.86	3.01



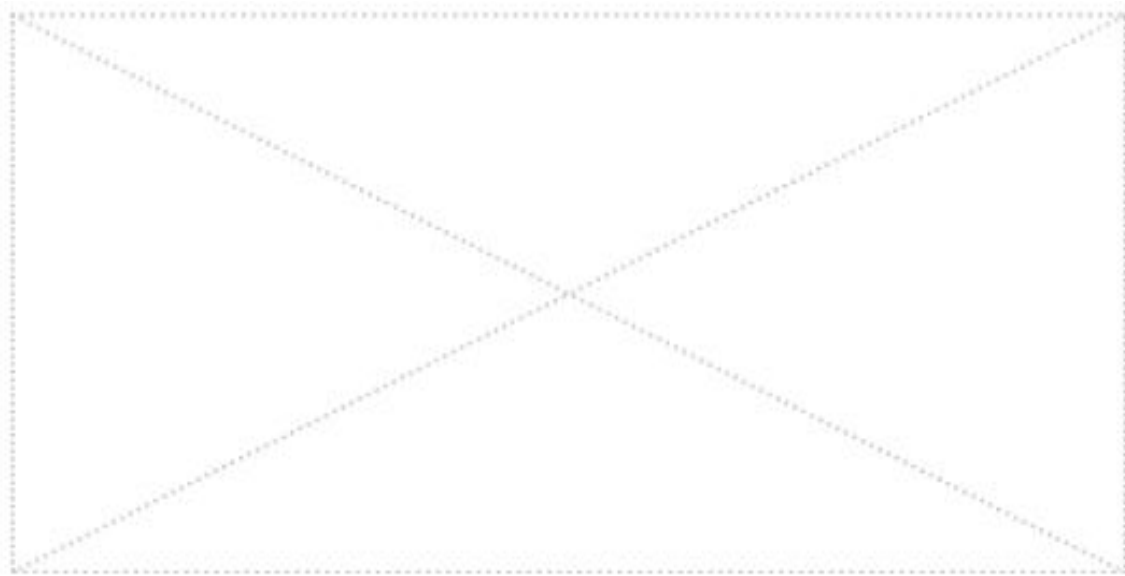
[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

○ 지능형 로봇 기반 융합연구사업 기술에 대한 분석

○ Abbott Laboratories가 12건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	Abbott Laboratories	12	28.6%
2	HRL Laboratories	7	16.7%
3	Psychogenics Inc.	6	14.3%
4	NATIONAL INSTITUTE OF INFORMATION & COMMUNICATIONS TECHNOLOGY	3	7.1%
5	DENSO IT LABORATORY	3	7.1%
6	Synthace Limited	3	7.1%
7	고려대학교 산학협력단	2	4.8%
8	The Boeing Company	2	4.8%
9	NEC Corporation	2	4.8%
10	Yantai AusBio Laboratories	2	4.8%

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]

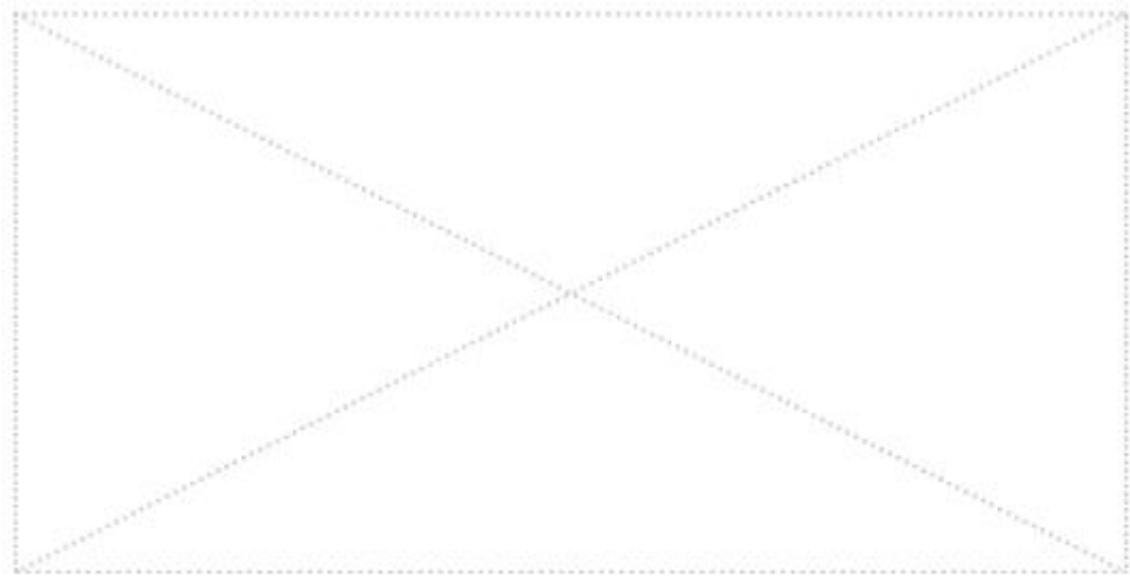


[상위 10개 출원인 특허수]

○ 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 미국이 17건으로 가장 많으며, 그 뒤로 유럽(15건), 일본(7건) 및 한국(3건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	Abbott Laboratories	5	3	0	4	12
2	HRL Laboratories	1	0	0	6	7
3	Psychogenics Inc.	3	0	0	3	6
4	NATIONAL INSTITUTE OF INFORMATION & COMMUNICATIONS TECHNOLOGY	0	3	0	0	3
5	DENSO IT LABORATORY	2	1	0	0	3
6	Synthace Limited	2	0	0	1	3
7	고려대학교 산학협력단	0	0	2	0	2
8	The Boeing Company	1	0	0	1	2
9	NEC Corporation	0	0	0	2	2
10	Yantai AusBio Laboratories	1	0	1	0	2
합계		15	7	3	17	42

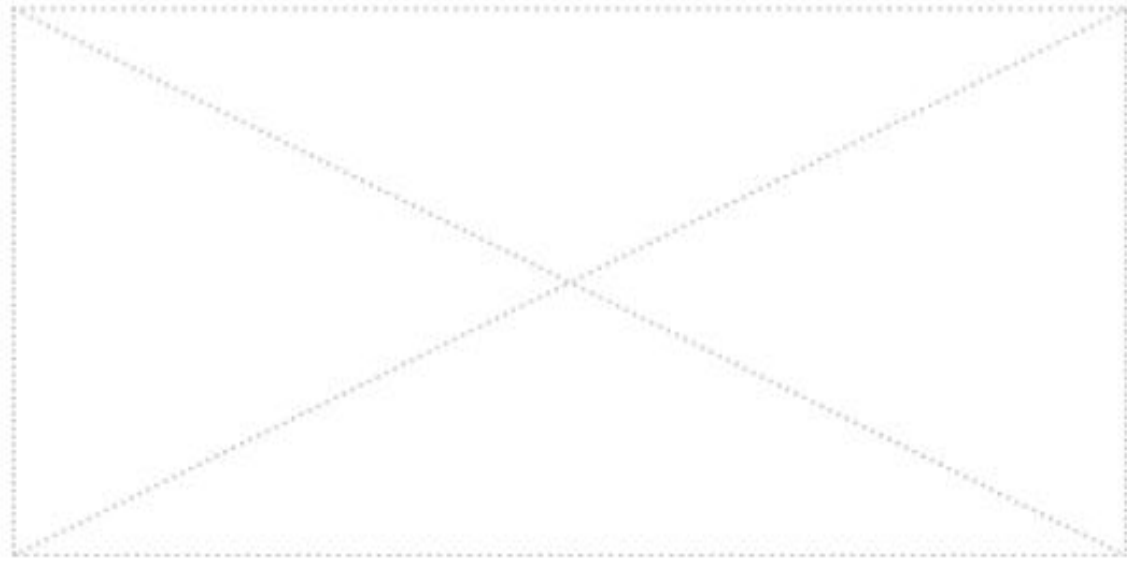
[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]



[상위 10개 출원인 특허수]

○ 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 890회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 압도적으로 높게 나타나고 있음

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	890	48	18.54
한국	49	18	2.72
독일	44	8	5.50
일본	21	9	2.33
포르투갈	4	3	1.33
스위스	2	1	2.00
아르헨티나	0	1	0.00
중국	0	2	0.00
영국	0	3	0.00
글로벌 평균	202	18.60	3.60

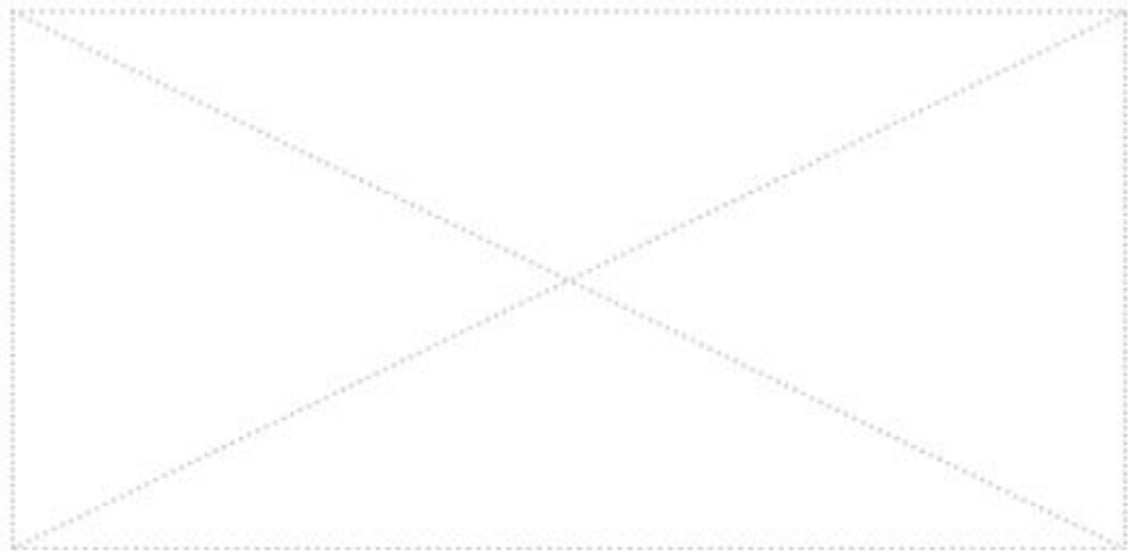


[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

- 스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스 기술에 대한 분석
- 엘지전자 주식회사, 모전스랩(주)가 6건의 특허를 출원하여 공동 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	엘지전자 주식회사	6	14.6%
1	모전스랩(주)	6	14.6%
3	엘에스일렉트릭(주)	5	12.2%
4	MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES INC	5	12.2%
5	Sandia Corporation	4	9.8%
6	Elliptic Laboratories AS	3	7.3%
7	네이버랩스 주식회사	3	7.3%
8	주식회사 그루크리에이티브랩	3	7.3%
9	Konica Minolta Laboratory U.S.A., Inc.	3	7.3%
10	Sharp Laboratories of America, Inc.	3	7.3%

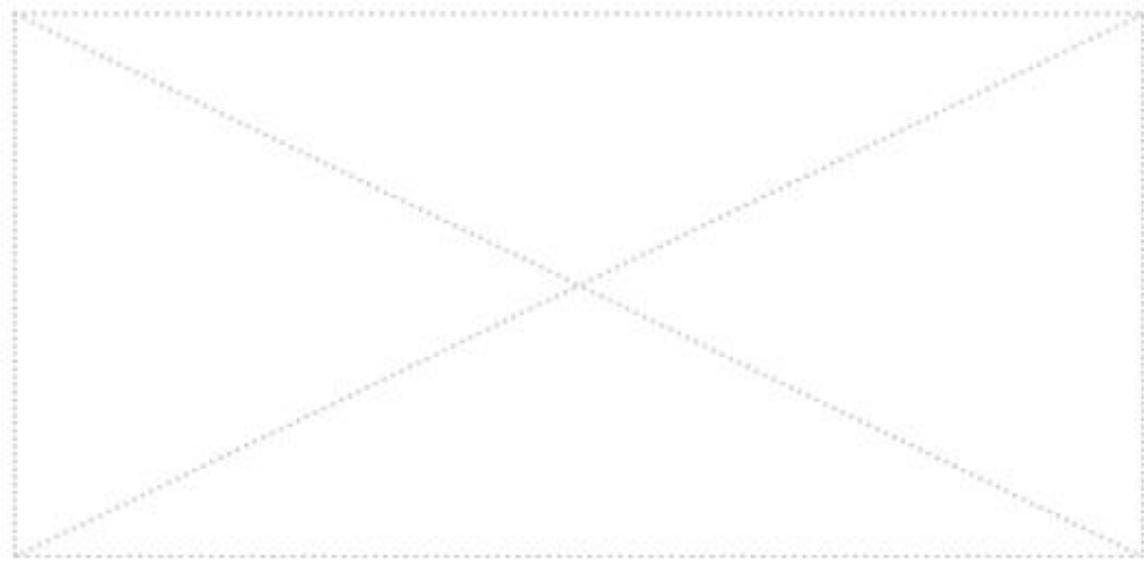
[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]



[상위 10개 출원인 특허수]

- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 한국이 23건으로 가장 많으며, 그 뒤로 미국(13건), 유럽(3건) 및 일본(2건) 순임

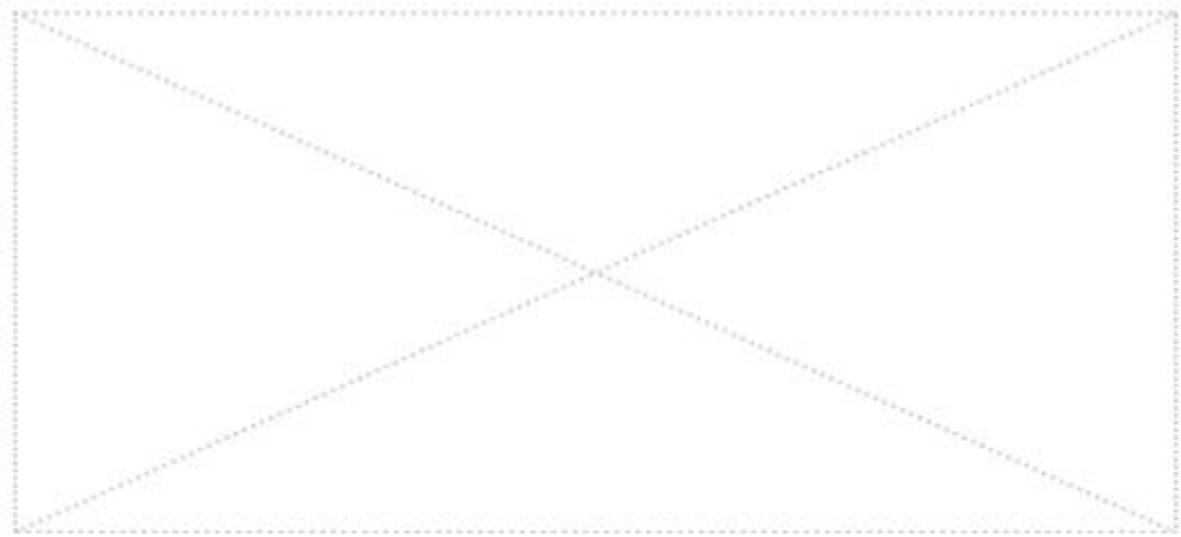
순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	엘지전자 주식회사	0	0	6	0	6
1	모전스랩(주)	0	0	6	0	6
3	엘에스일렉트릭(주)	0	0	5	0	5
4	MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES INC	0	2	0	3	5
5	Sandia Corporation	0	0	0	4	4
6	Elliptic Laboratories AS	2	0	0	1	3
7	네이버랩스 주식회사	0	0	3	0	3
8	주식회사 그루크리에이티브랩	0	0	3	0	3
9	Konica Minolta Laboratory U.S.A., Inc.	1	0	0	2	3
10	Sharp Laboratories of America, Inc.	0	0	0	3	3
합계		3	2	23	13	41



[상위 10개 출원인 특허수]

- 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 1,705회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 압도적으로 높게 나타나고 있음
- 참고로, 스웨덴의 피인용 합계는 212이며 평균 피인용은 106으로 나타나는데, 특허 건수가 2건이므로 정량적인 의미를 부여하기 다소 어려움

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	1705	64	26.64
스웨덴	212	2	106.00
한국	135	47	2.87
일본	39	5	7.80
스위스	19	7	2.71
독일	10	4	2.50
프랑스	3	1	3.00
캐나다	1	1	1.00
노르웨이	1	3	0.33
영국	0	3	0.00
중국	0	1	0.00
글로벌 평균	193.18	12.55	13.90



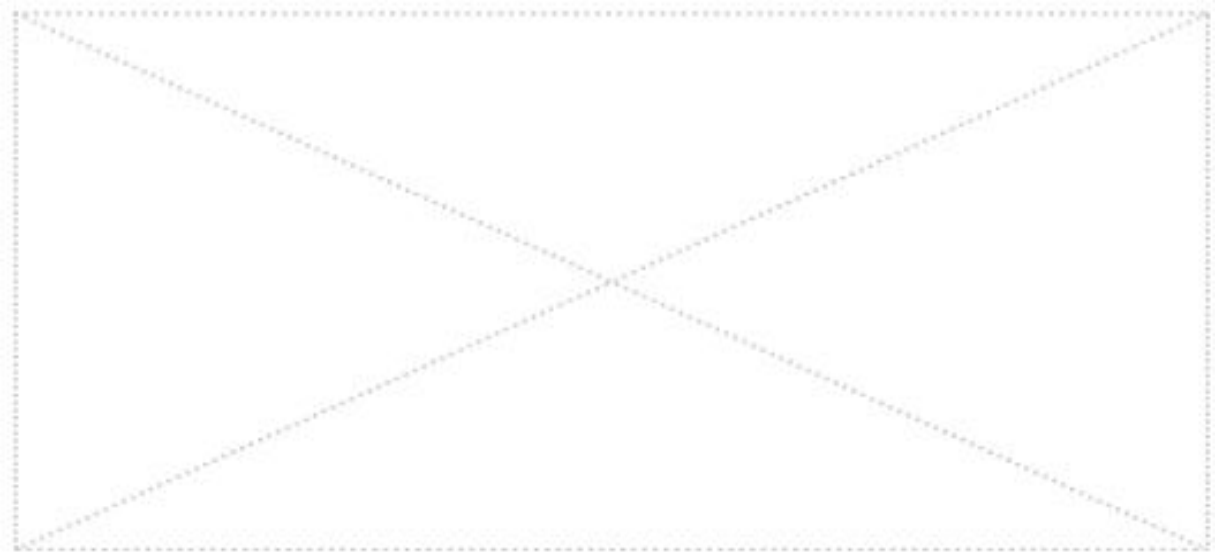
[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

■ 국가별 특허발표 현황

- 상위 10개 출원인은 아래와 같음
- 엘지전자 주식회사, 모전스랩(주)가 6건의 특허를 출원하여 공동 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	엘지전자 주식회사	6	14.6%
1	모전스랩(주)	6	14.6%
3	엘에스일렉트릭(주)	5	12.2%
4	MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES INC	5	12.2%
5	Sandia Corporation	4	9.8%
6	Elliptic Laboratories AS	3	7.3%
7	네이버랩스 주식회사	3	7.3%
8	주식회사 그루크리에이티브랩	3	7.3%
9	Konica Minolta Laboratory U.S.A., Inc.	3	7.3%
10	Sharp Laboratories of America, Inc.	3	7.3%

[상위 10개 출원인 특허수 및 비율]

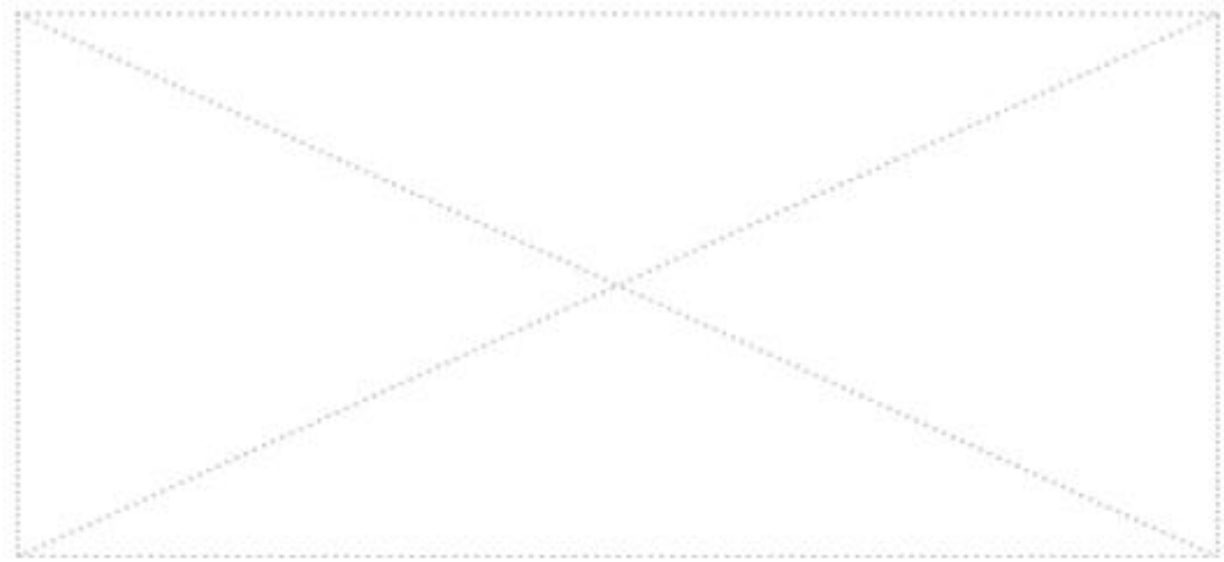


[상위 10개 출원인 특허수]

- 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음
- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 한국이 23건으로 가장 많으며, 그 뒤로 미국(13건), 유럽(3건) 및 일본(2건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	엘지전자 주식회사	0	0	6	0	6
1	모전스랩(주)	0	0	6	0	6
3	엘에스일렉트릭(주)	0	0	5	0	5
4	mitsubishi electric research laboratories inc	0	2	0	3	5
5	Sandia Corporation	0	0	0	4	4
6	Elliptic Laboratories AS	2	0	0	1	3
7	네이버랩스 주식회사	0	0	3	0	3
8	주식회사 그루크리에이티브랩	0	0	3	0	3
9	Konica Minolta Laboratory U.S.A., Inc.	1	0	0	2	3
10	Sharp Laboratories of America, Inc.	0	0	0	3	3
합계		3	2	23	13	41

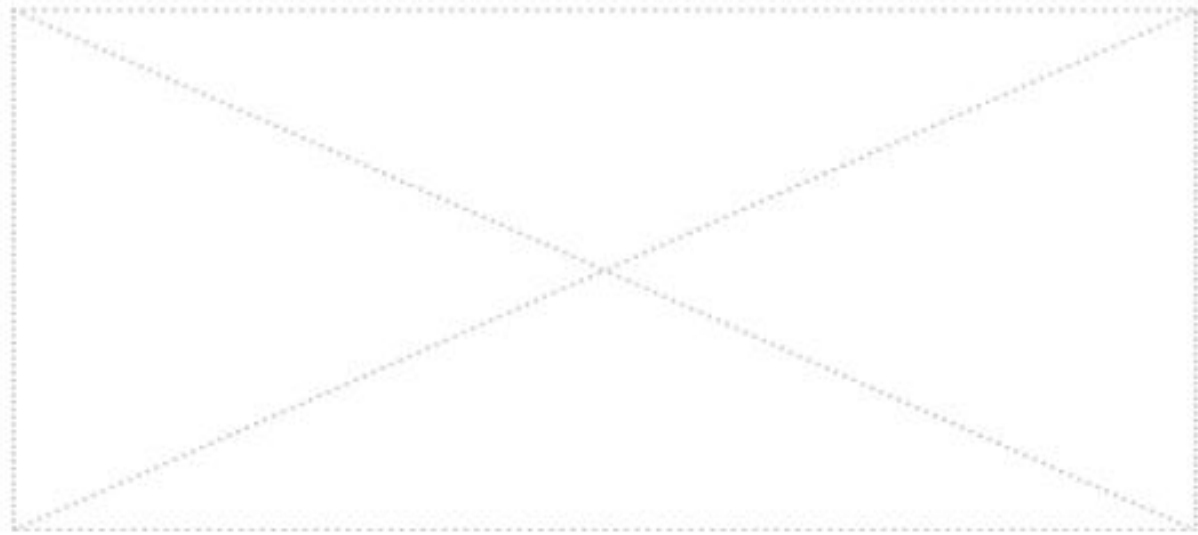
[상위 10개 출원인의 국가별 출원수]



[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 가별 특허 피인용 합계는 미국이 1,705회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 압도적으로 높게 나타나고 있음
- 참고로, 스웨덴의 피인용 합계는 212이며 평균 피인용은 106으로 나타나는데, 특허 건수가 2건이므로 정량적인 의미를 부여하기 다소 어려움

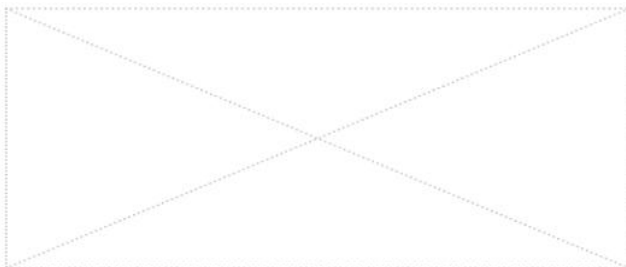
구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	1705	64	26.64
스웨덴	212	2	106.00
한국	135	47	2.87
일본	39	5	7.80
스위스	19	7	2.71
독일	10	4	2.50
프랑스	3	1	3.00
캐나다	1	1	1.00
노르웨이	1	3	0.33
영국	0	3	0.00
중국	0	1	0.00
글로벌 평균	193.18	12.55	13.90



[상위 10개 출원인의 출원 국가별 비율]

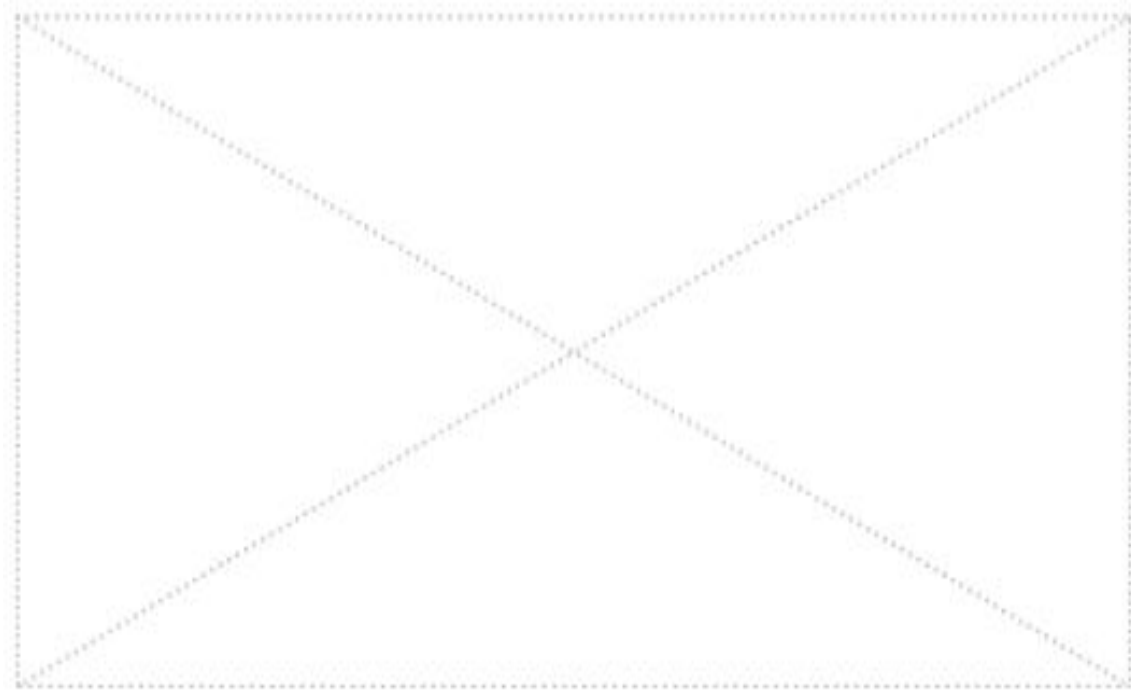
▣ 기술수명 주기별 동향

- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 출원인수 및 출원건수 모두 계속적으로 증가하는 성장기에 해당되는 것으로 나타남. 참고로, 성장기는 출원인수와 출원건수가 동시에 급증하는 시기를 의미함. 따라서 다양한 출원인이 많은 특허를 출원하고 있으므로 연구개발이 활발하다고 판단할 수 있음. 다만, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것이므로, 만약 본 분석을 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾는다면, 성장기가 아닌 태동기에 해당될 것이며, 이는 바꿔 말하면, 기술 선점의 기회가 매우 넓게 열려 있는 것으로 볼 수 있음



출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간

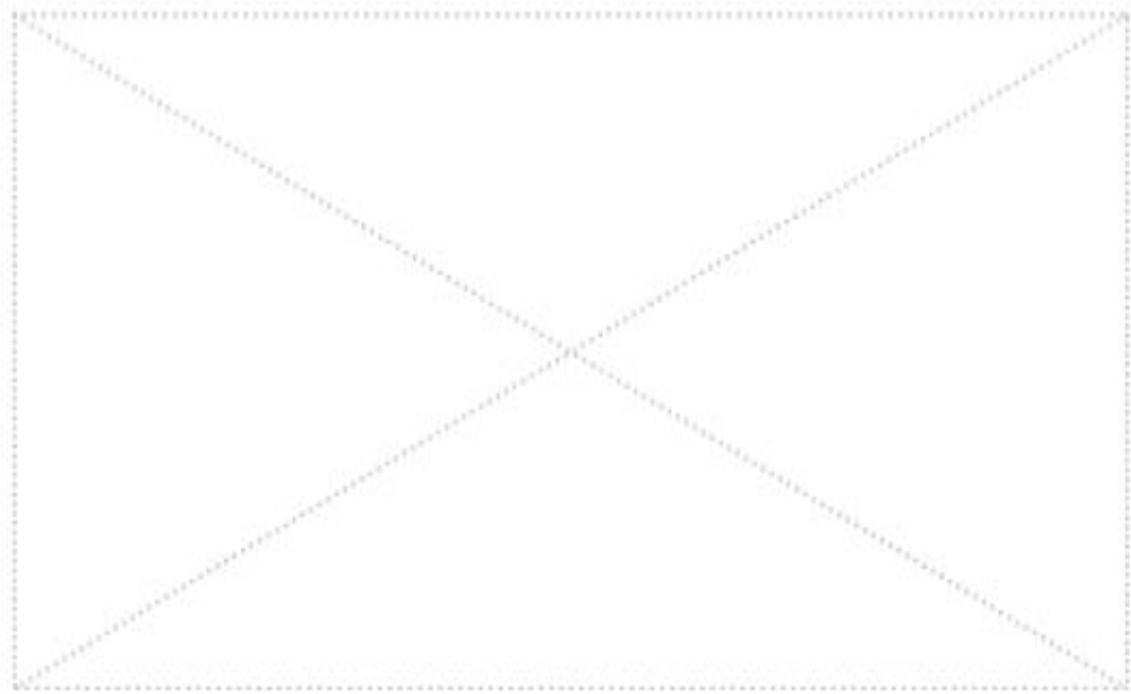
[기술수명 주기별 동향 설명 자료]



[기술수명 주기별 동향 분석결과]

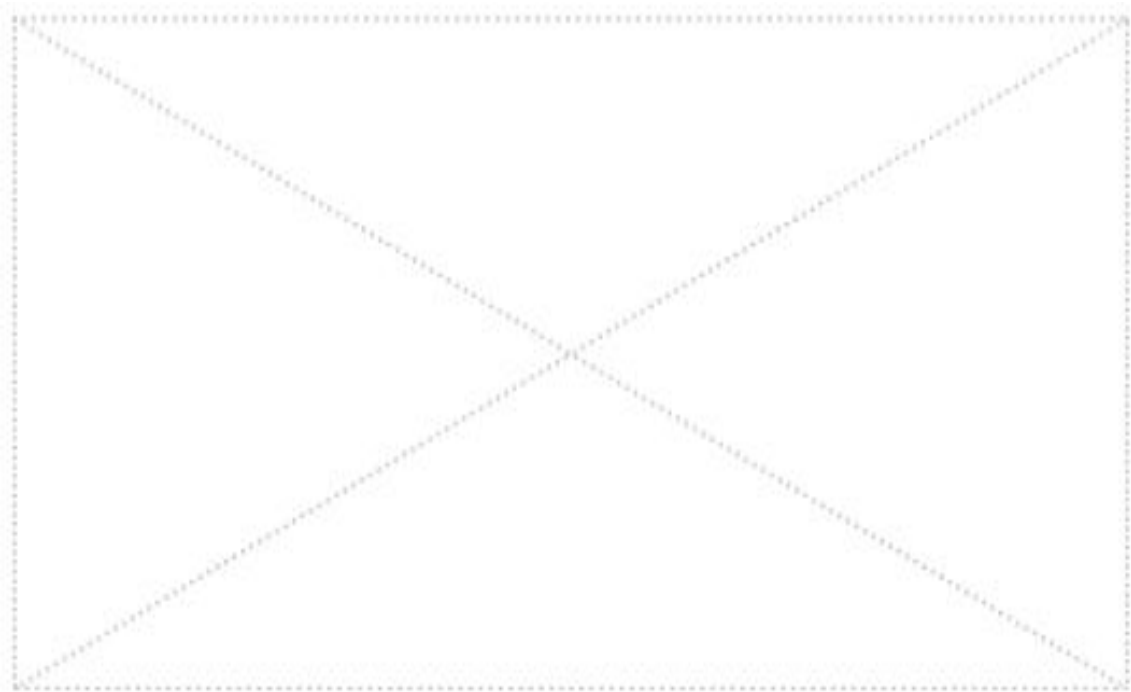
- 아래와 같이 각각의 세부 기술별로 살펴보아도, 각각 성장기에 해당되는 것으로 볼 수 있으나, 이 역시, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것이므로, 만약 본 분석을 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾는다면, 성장기가 아닌 태동기에 해당되는 것으로 볼 수 있음

- 스마트 실험실 플랫폼 구축을 위한 기반 기술에 대한 분석



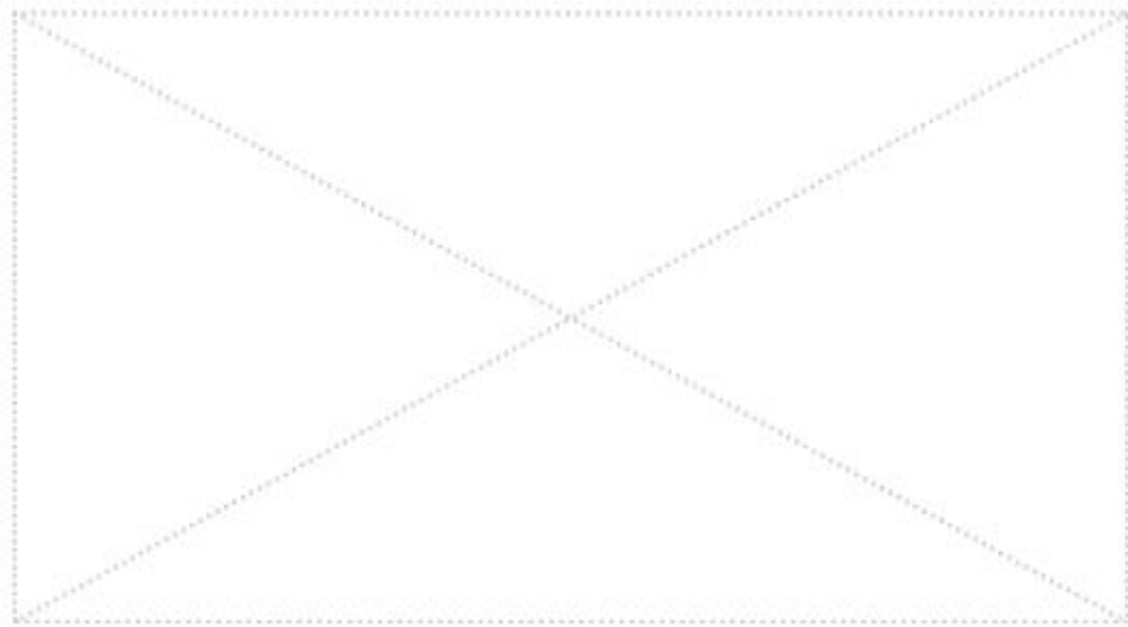
[기술수명 주기별 동향 분석결과]

○ 지능형 로봇 기반 융합연구사업 기술에 대한 분석



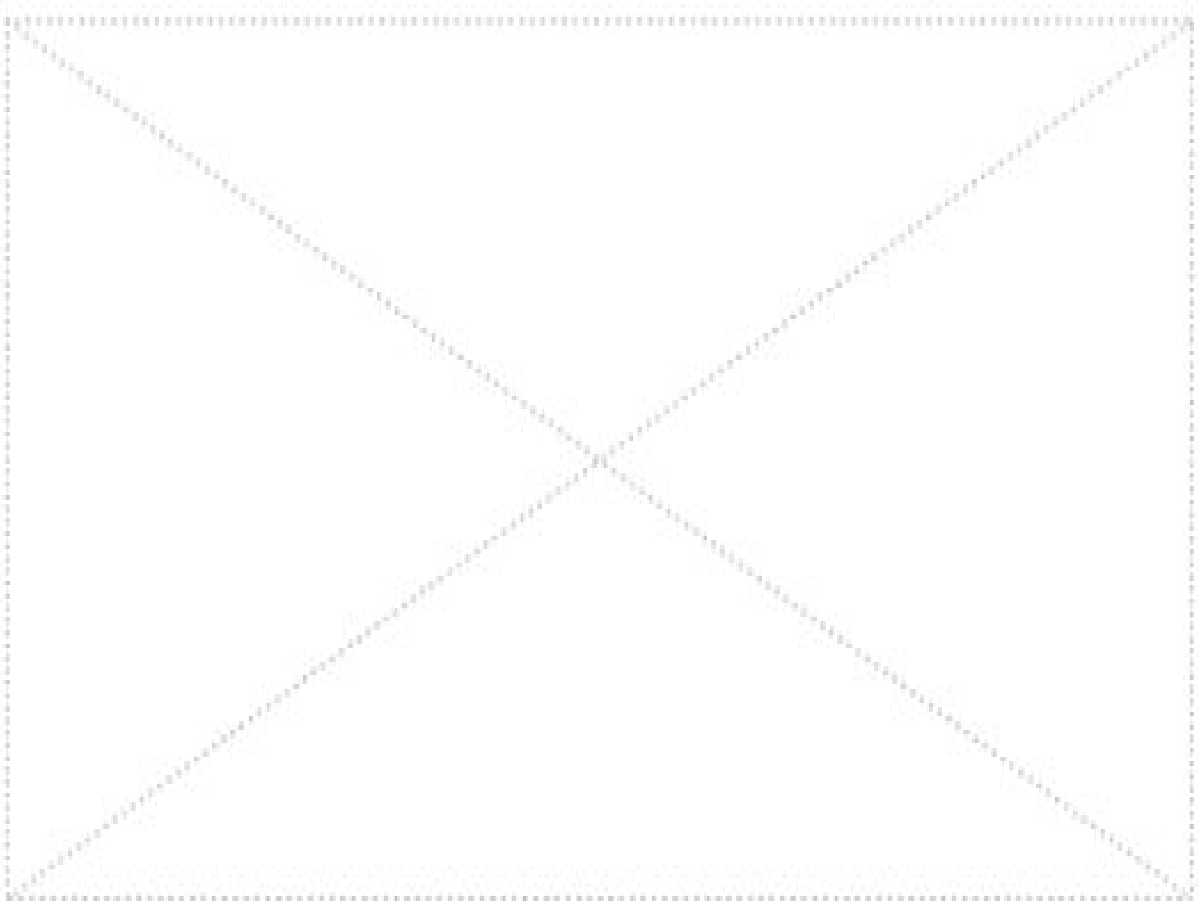
[기술수명 주기별 동향 분석결과]

○ 스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스 기술에 대한 분석



[기술수명 주기별 동향 분석결과]

▣ 키워드 맵



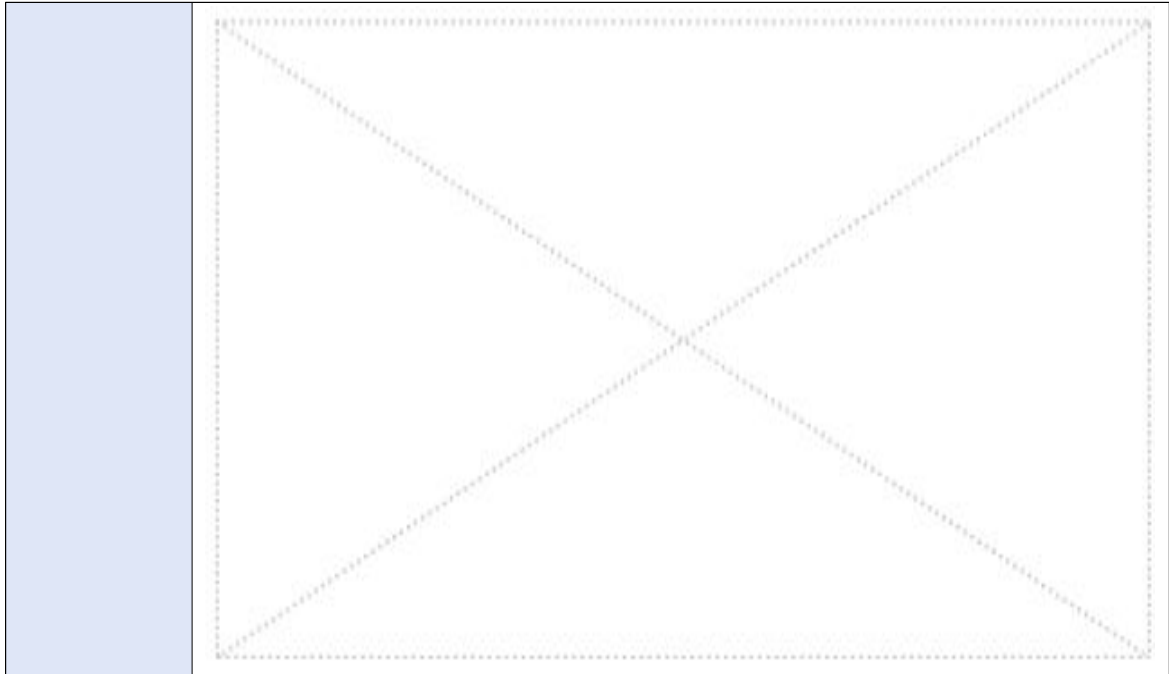
- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 “learning”, “neural network” 등 학습과 관련된 키워드들이 포진되어 있으며, 주변 부분에 “simulating”, “robot”, “automation” 등과 관련된 키워드도 검색되고 있음

■ 핵심 특허

- 유효특허를 대상으로 위와 같은 분석을 진행하였음. 388건의 유효특허 중에서 아래와 같은 핵심특허가 검색되었음
- R&D를 투입하고 관련 특허를 창출하기 위해서는, 아래와 같은 핵심특허와는 차별화되도록 할 필요가 있으며, 아직까지 스마트 실험실과 관련된 머신러닝, 자동화와 관련된 특허들이 매우 소수이므로, 본 과제를 통해 차별화된 R&D가 가능할 것으로 판단됨
- 스마트 실험실 플랫폼 구축을 위한 기반 기술

발명의 명칭	IoT 기반의 스마트 랩 관리 시스템		
출원번호	10-2015-0118929	등록번호	1730332
출원일	2015.08.24	등록일	2017.04.20
출원인	조성기, (주)비즈니스랩	발명자	조성기
요약	IoT 단말기를 이용하여 연구실 내의 환경 및 안전을 모니터링하고, 연구실에서 사용되는 시약의 입고부터, 사용, 보관 및 폐기까지의 전체 프로세스를 실시간 모니터링하여 관리하는 IoT 기반의 스마트 랩 관리 시스템에 관한 것으로, 위험물질 및 유해물질 시약을 기반으로 연구, 시험, 분석 등 연구 업무를 추진하고 있는 기업연구소, 정부연구소 및 대학연구소에서 위험물질 및 유해물질의 각종 시약의 입고, 사용, 보관, 폐기 등을 체계적이고 효율적으로 관리함으로써 연구실에서 발생될 수 있는 위험요소를 사전에 제거 및 방지하고, 연구와 관련된 플랫폼 서비스를 제공하여, 연구자들의 안정적인 시험, 분석, 검사, 실험 환경을 제공할 수 있다.		
대표청구항	연구실 환경의 모니터링을 위한 환경 데이터를 감지하고, 시약 용기 및 시약 저장고에 대한 관리 및 모니터링을 위한 시약 관리 데이터, 상기 시약 저장고의 밀폐형, 오픈형, 폭발성 물질 저장형 및 일반형 중 적어도 어느 하나의 용도 데이터를 수집하고, NFC(Near Field Communication), 비콘(Beacon), RFID(Radio Frequency Identification), 바코드(Barcode) 및 센서 중 적어도 어느 하나를 포함하는 적어도 하나 이상의 IoT 단말기;		

<p>대표도면</p>	<p>상기 적어도 하나 이상의 IoT 단말기로부터 상기 환경 데이터 및 상기 시약 관리 데이터를 수신하고, 수신된 상기 환경 데이터 및 상기 시약 관리 데이터로서, 연구실 내의 시약의 현황, 정보, 원료를 사용한 사용자, 사용량, 유효기간과, 연구실의 사고위험감지, 사고 발생 공지, 환경오염 정도 및 가스누출 알림 정보를 연구자에게 디스플레이 하여 제공하며, 상기 제공된 디스플레이에 기초하여 상기 연구자로부터 플랫폼 서비스를 위한 선택 입력에 따른 선택 입력 정보를 수신하는 스마트 디바이스;</p> <p>상기 스마트 디바이스로부터 실시간으로 상기 환경 데이터 및 상기 시약 관리 데이터를 수신하고, 실시간으로 수신된 상기 환경 데이터 및 상기 시약 관리 데이터를 기반으로 상기 연구실 환경의 안전관리와, 시약에 대한 실시간 모니터링 및 관리를 수행하는 스마트 랩 서버; 및</p> <p>상기 스마트 랩 서버로부터 수신된 상기 환경 데이터 및 상기 시약 관리 데이터를 기반으로 레거시 시스템을 통하여 서비스 파트너 서버와 연계하여 상기 플랫폼 서비스를 제공하는 플랫폼 서비스 제공부를 포함하고,</p> <p>상기 스마트 랩 서버는</p> <p>상기 IoT 단말기로부터 상기 시약의 입고일, 사용량, 유효 기간, 보관 현황 및 폐기 중 적어도 어느 하나를 포함하는 상기 시약 관리 데이터를 수신하며, 상기 수신된 시약 관리 데이터에 기초하여 상기 시약에 관해 사전에 정의된 기준으로부터 상기 시약을 실시간 모니터링하여 전송하고,</p> <p>(중략)</p> <p>를 포함하는 IoT 기반의 스마트 랩 관리 시스템.</p>
--------------------	--



○ 지능형 로봇 기반 융합연구사업 기술

발명의 명칭	Laboratory sample distribution system and laboratory automation system		
출원번호	15/405369	등록번호	10261103
출원일	2017.01.13	등록일	2019.04.16
출원인	Roche Diagnostics Operations	발명자	Christoph Pedain
요약	A laboratory sample distribution system and a laboratory automation system comprising such a laboratory sample distribution system are presented. The laboratory sample distribution system comprises a number of sample container carriers adapted to move autonomously and to communicate with each other and with a central control unit.		
대표청구항	1. A laboratory sample distribution system, the laboratory sample distribution system comprising: a plurality of transport planes arranged adjacent to each other, wherein each transport plane is divided into a plurality of fields, wherein each field has a unique code on the respective transport plane, wherein the transport planes with respect to each other have partially or completely overlapping codes;		

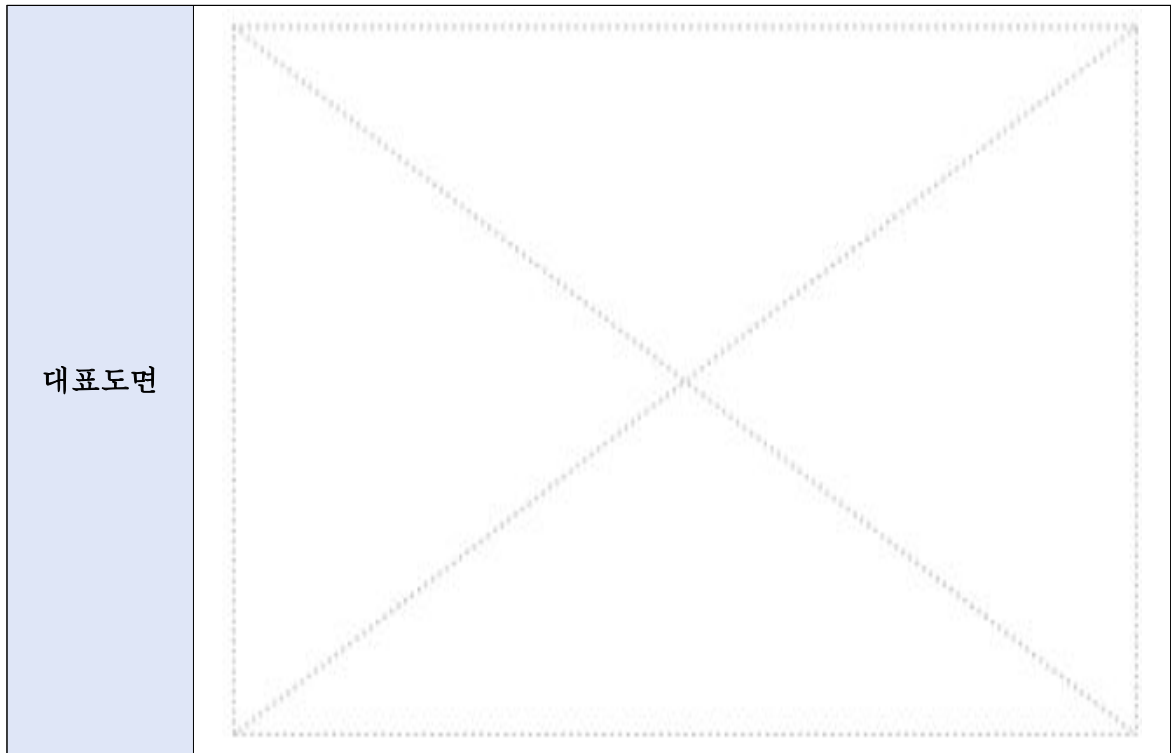
at least one sample container carrier movable on the transport plane and adapted to carry one or more sample containers, the sample container carrier comprising,

- a code recognition device adapted to recognize the code of the field on which the sample container carrier is currently located,
- a driver adapted to propel the sample container carrier on the transport plane and/or to set a direction in which the sample container carrier is moving,
- a controller adapted to control the driver, and
- a carrier wireless communication device communicatively connected to the controller;

a control unit;

a central wireless communicator communicatively connected to the control unit and adapted to communicate with the carrier wireless communicator of the sample container carrier; and

a radio frequency position determining device adapted to determine the transport plane on which the sample container carrier is currently located based on a field strength of a signal transmitted between the central wireless communicator and the carrier wireless communicator, wherein the control unit is adapted to send a transport task to the sample container carrier using the central wireless communicator, and wherein the controller is adapted to control the driver such that the sample container carrier moves according to the received transport task.

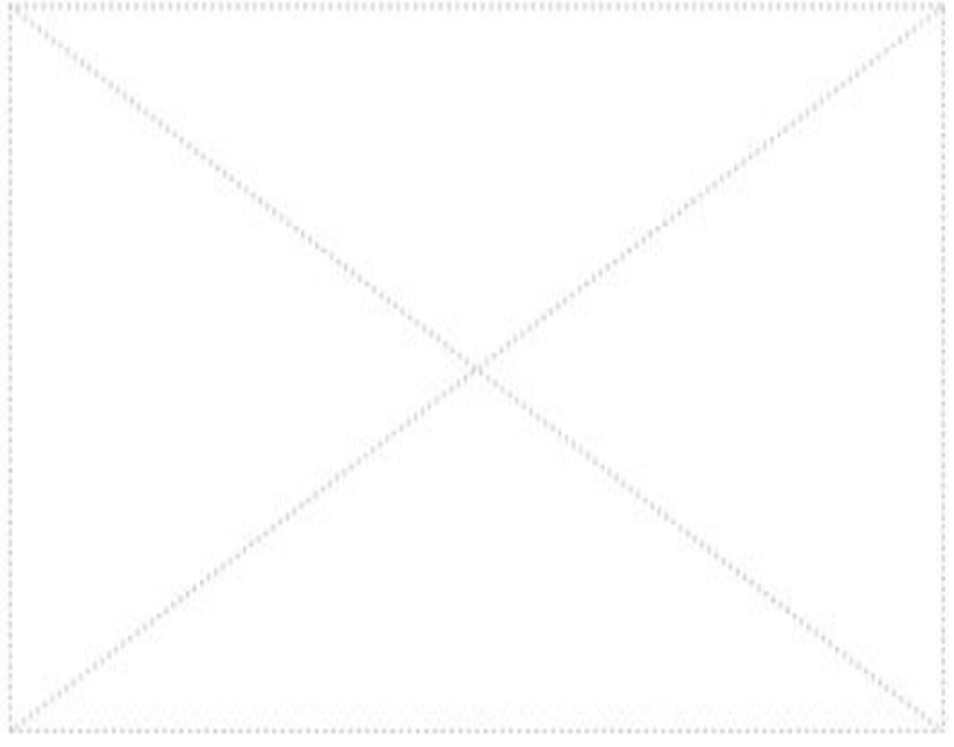


○ 스마트 실험실을 위한 XR 로봇 및 인터페이스 기술

발명의 명칭	가상현실 기반 원거리 협업 기능과 데이터베이스를 제공하는 하이브리드 나노물질 및 나노소자의 재료 설계 장치		
출원번호	2016-0039058	등록번호	1822806
출원일	2016.03.31	등록일	2018.01.23
출원인	한국과학기술원	발명자	김용훈, 김후성 김효석, 이성주 이병찬
요약	<p>재료 설계 장치는 모델러(modeler), 데이터베이스, 시뮬레이션 연산부, 가상현실 제어부 및 중앙 제어부를 포함한다. 모델러는 헤드 마운트 디스플레이(Head Mount Display; HMD) 및 모션 캡처(motion capture) 기기에 기초하여 구현된 가상 현실(Virtual Reality; VR) 상에서 상에서 복수의 비주기적 또는 주기적 재료 구성 요소들을 결합하여 하이브리드 나노물질 구조 또는 나노소자 구조를 생성한다. 데이터베이스는 생성된 재료 구조, 및 생성된 재료 구조와 기 저장된 기존 재료 구조를 결합시킨 재귀적 재료 구조를 저장한다. 시뮬레이션 연산부는 생성된 재료 구조, 기존 재료 구조 또는 재귀적 재료 구조 중 적어도 하나 이상의 재료 특성을 나노 스케일</p>		

	<p>시뮬레이션(nano scale simulation)에 기초하여 연산한다. 가상현실 제어부는 복수의 사용자들에게 손동작에 기초한 가상 현실 인터페이스를 제공하고, 사용자들 각각이 착용한 헤드 마운트 디스플레이 및 모션 캡처 기기를 제어한다. 중앙 제어부는 모델러, 데이터베이스, 시뮬레이션 연산부 및 가상현실 제어부의 동작을 제어한다.</p>
<p>대표청구항</p>	<p>헤드 마운트 디스플레이(Head Mount Display; HMD) 및 모션 캡처(motion capture) 기기에 기초하여 구현된 가상 현실(Virtual Reality; VR) 상에서 복수의 비주기적 또는 주기적 재료 구성 요소들을 결합하여 하이브리드 나노물질 구조 또는 나노소자 구조를 생성하는 모델러(modeler);</p> <p>상기 생성된 하이브리드 나노물질 구조 또는 나노소자 구조의 재료 구조, 및 상기 생성된 하이브리드 나노물질 구조 또는 나노소자 구조의 재료 구조와 기 저장된 기존 재료 구조를 결합시킨 재귀적 재료 구조를 저장하는 데이터베이스;</p> <p>상기 생성된 하이브리드 나노물질 구조 또는 나노소자 구조의 재료 구조, 상기 기존 재료 구조 또는 상기 재귀적 재료 구조 중 적어도 하나 이상의 재료 특성을 나노 스케일 시뮬레이션(nano scale simulation)에 기초하여 연산하는 시뮬레이션 연산부;</p> <p>복수의 사용자들에게 손동작에 기초한 가상 현실 인터페이스를 제공하고, 상기 사용자들 각각이 착용한 상기 헤드 마운트 디스플레이 및 상기 모션 캡처 기기를 제어하는 가상현실 제어부; 및</p> <p>상기 모델러, 상기 데이터베이스, 상기 시뮬레이션 연산부 및 상기 가상현실 제어부의 동작을 제어하는 중앙 제어부;를 포함하고,</p> <p>상기 시뮬레이션 연산부는, 재료 구성 요소들 각각의 원소 종류, 상기 재료 구성 요소들 각각의 좌표 또는 상기 재료 구성 요소들의 반복 형태 중 적어도 하나 이상을 포함하는 구조 정보에 기초하여 시뮬레이션 연산에 사용될 추천 이론 수준 또는 추천 파라미터 중 적어도 하나 이상을 결정하고, 상기 추천 이론 수준 또는 상기 추천 파라미터 중 적어도 하나 이상을 상기 사용자들에게 제시하는 것을 특징으로 하는 재료 설계 장치.</p>

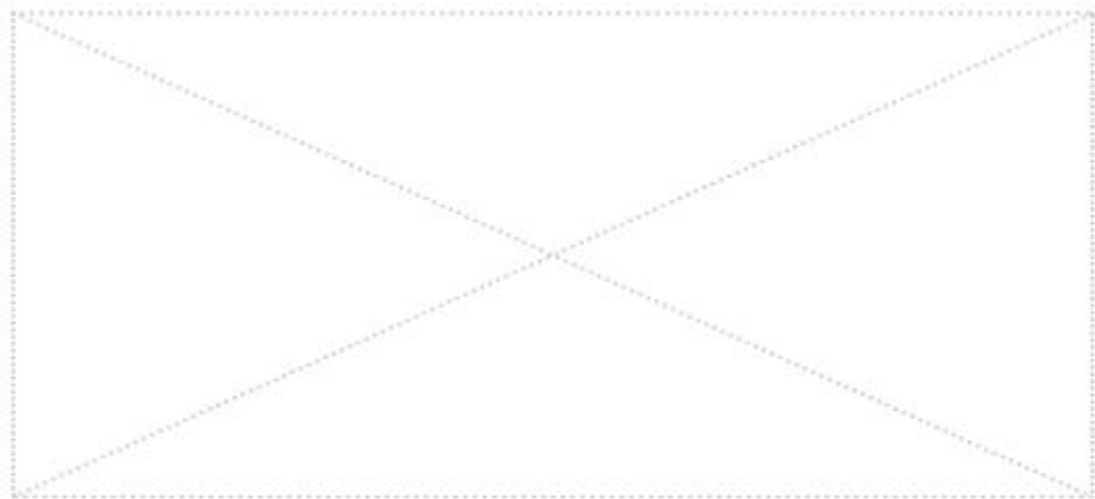
대표도면



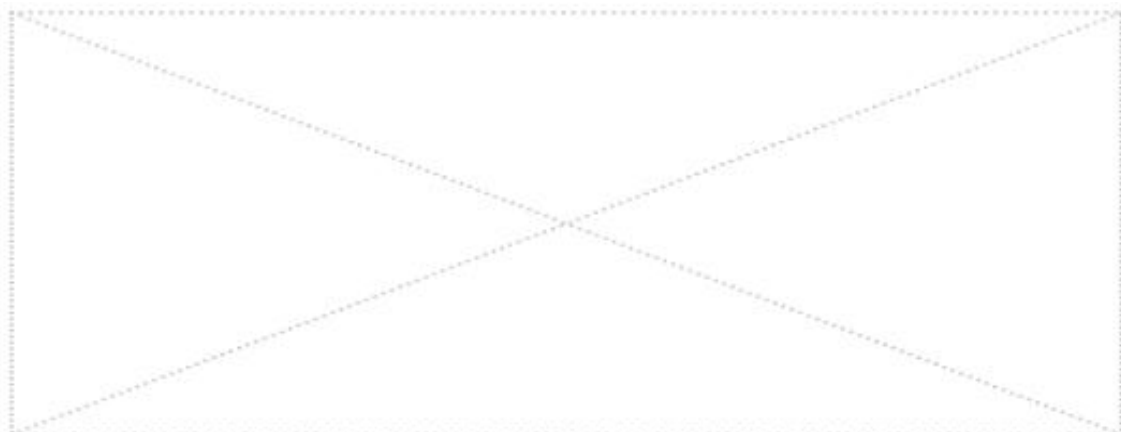
3.4.5. 개발 목표 및 내용

▣ 개발 목표

- 자율 지능형 스마트 연구실 플랫폼 구축
 - 기존 혹은 미래 실험실에서 AI, 로봇, IoT, 빅데이터, 디지털 기술을 활용하여 실험실 내의 모든 실험 데이터를 자동으로 수집, 분석, 및 관리하고, 자율적으로 설계 및 실행하며, 사용자와의 협업이 가능한 자율 지능형 스마트 연구실 플랫폼 기술 개발



[스마트 연구실 플랫폼]



[스마트 연구실 세부 과제간 관계도]

▣ (세부목표 1) 스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축 기술 개발

- 무인화 스마트 연구실용 데이터 베이스 설계 및 구축
(Inventory/Equipment/Analysis DB)
- 스마트 연구실용 연구자원 물류기반 데이터 제공
(블록체인 기반 데이터 무결성/보유 검증)
- 실험환경/분석 측정 데이터 확보를 위한 자동화 기술 개발
 - 스마트 연구실 환경 IoT 설계 및 자동화
 - 지능화 실험실용 자동 분석 기술 개발 (광학기술기반 모니터링/정밀 센서 기반 모니터링 기술 개발)
- 스마트 연구실 구축 기반이 가상과 현실에서 구축되는 점을 고려한 고도의 3차원 좌표계 상의 실험 인프라구조 조성이 매우 필요함
 - 실체형 스마트 연구실 구축을 위한 설계 자료가 가상 실험실 데이터로 활용되는 장점을 최대한 활용
 - 모듈형 공정 관리를 위한데이터 기반 실험 데이터 인프라 구조 지능화 및 고도화 기술 개발

▣ (세부목표 2) 스마트 연구실 로봇 인프라 구축 기술 개발

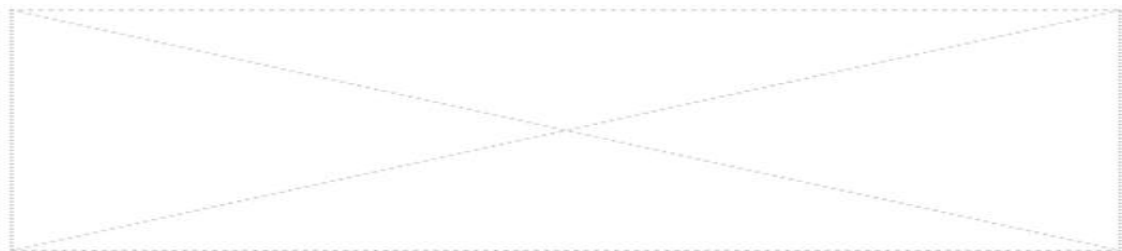
- 글로벌 비전 센서에 의한 시각 정보가 불확실성을 갖는 상황에서, 비정형의 비가시적 특성을 갖는 다양한 실험 용품에 접근, 파지, 조작하여 적절한 임무를 수행하기 위한 인공지능·로봇 기술 개발
 - 실험실 환경에서 모바일 매니플레이터 로봇의 안전한 이동 및 임무수행을 위한 통합 제어 알고리즘 개발
 - 실험실 환경의 투명, 반사 표면에서도 정확한 깊이값 추정이 가능한 멀티모달센서 기반 실험 환경 깊이값 추정 기술 개발
 - 복잡한 실험실 환경에서 안정적인 실험 용품 파지가 가능한 파지 모션 생성 기술 개발
 - 실험 용품의 안전한 파지를 위해 다양한 내장 센서를 기반으로 적응형 파지가 가능한 특수 로봇손 하드웨어 기술 개발

- 사용자가 특정한 위치로 주위 환경 및 적치물과 충돌 없이 안전하게 주행하기 위한 로봇 센서 하드웨어 구성 및 제어 기술
 - 매니퓰레이터가 부착된 모바일 로봇이 충돌 없이 안전한 주행을 수행하기 위해서는 기존 모바일 로봇에 내장된 자율 주행 센서뿐만 아니라 매니퓰레이터, 로봇손 등의 움직임과 부피를 고려해 로봇 전방위를 커버할 수 있는 추가 센서 설치가 필요함
 - 다양한 센서들의 입력을 고려해 실시간으로 충돌 및 위험 요소를 파악하고 해당 요소들을 회피하여 목표지점을 향한 경로를 수정하기 위한 이동 알고리즘 구현 필요
 - 모바일 로봇 하드웨어에서 제공되는 맵핑을 포함한 자율주행 기술과 실시간으로 다양한 센서에서 입력되는 정보들을 결합한 다이나믹 환경 인지 알고리즘 구현 필요
- XR 기반 사용자 인터페이스 등 플랫폼 단위 통합을 위한 고수준 사용자 인터페이스 구현
 - 인공지능·로봇 비전공자인 실험자가 실험 자동화를 위해 로봇을 제어하고 계획을 수립하기 위해서는 3D 복원된 지도상에서 로봇의 목표지점을 지정하거나 의미단위로 분할되어 있는 실험 용품을 지정하여 조작하도록 하는 등의 고수준 인터페이스가 필요함
 - 이를 위해 타 세부주제에서 개발된 XR 기반 사용자 인터페이스 등의 기술과 통합이 가능하도록, 의미단위로 실험 용품 지정 및 조작이 가능한 API를 구현하고, 객체 파지, 이동, 놓기 등 사용자가 원하는 다양한 동작을 어렵지 않게 로봇에게 전달하기 위한 인터페이스를 구현해야 함
- 다양한 광학적 특성을 가진 기기에 대한 3차원 재구성 및 활용을 위한 멀티모달 센서간 특성 분석 및 정합 기술 필요
 - 기존의 공간 및 기기에 대한 3차원 재구성에 있어 환경 및 물체의 특성에 매우 민감하며, 주로 불투명한 물체 및 환경에 대한 3차원 재구성에 대한 연구가 주를 이루어져 왔음
 - 물체의 광학적 특성에 따라 (불투명, 반투명, 투명)에 따라 체계적인 분석 및 종합적인 3차원 복원에 대한 이해가 필요함



[물체의 광학적 특성에 따른 3차원 복원 연구]

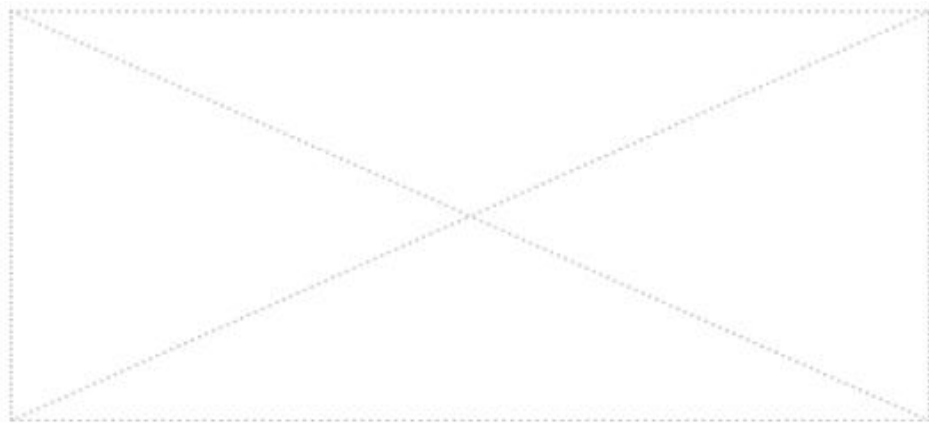
- 복잡한 환경에 적재되어있는 실험 용품을 안전하게 파지하기 위한 파지 모션 생성 기술
 - 로봇팔의 자유도와 움직임 공간 등을 고려하고 주변 물체와의 충돌을 회피할 수 있는 파지 모션 생성 필요
 - 정확한 깊이값 추정이 어려울 수 있는 실험 용품의 표면 특성을 고려하여, 두 개 이상의 깊이 센서를 포함한 다양한 센서를 적절한 위치에서 사용하여 파지 모션 생성을 위한 센서 시스템 구축 필요
 - 깊이값에 다양한 노이즈가 있을 때에도 안정적으로 동작할 수 있는 멀티 모달 센서 기반 파지 모션 생성 기술 개발 필요
 - 딥러닝 기반의 파지 모션 생성 기술 학습을 위한 시뮬레이션 환경 개발 필요
 - 실환경에서 물체 파지 임무를 수행하기 위한 로봇 제어 소프트웨어 개발



[기존 깊이 값 기반 일반 물체 대상 로봇손 파지 자세 생성 알고리즘 예시]

- (로봇손 하드웨어 기술) 다양한 실험 용품이 불규칙적으로 혼재된 실험실 공간에서 목표 물체를 안정적으로 파지, 이동하기 위한 로봇손에 내장된 로컬 비전 센서 기반 주변 사물 및 상태 인식 기술 개발
 - 로봇손에 내장된 카메라 기반 주변 사물 및 상태 인식 기술
 - 로컬 비전 센서 시각 정보를 기반으로 한 로봇손 및 손목 자세 제어 기술

- 주변 사물 회피, 목표 물체 선택적 파지를 위한 로봇 손목 메커니즘 기술
- 실험 용품의 비가시적 특성에 대한 적응형 파지 및 조작 기술
 - 화학실험 현장에서 활용되는 대부분의 실험 용기는 유리와 같은 투명체이거나 금속과 같은 빛 반사 표면을 갖는 경우가 많아, 현재의 비전 기술로는 크기, 모양 등을 정확하게 인식하고 물체를 특정하기 어려운 조건
 - 시각적 인식이 어려운 실험 용품을 시각 정보가 불확실한 상황에서도 안정적으로 파지 및 조작하기 위해서는 접촉 기반 물체 인식 (touch-based object recognition) 기술이 반드시 필요



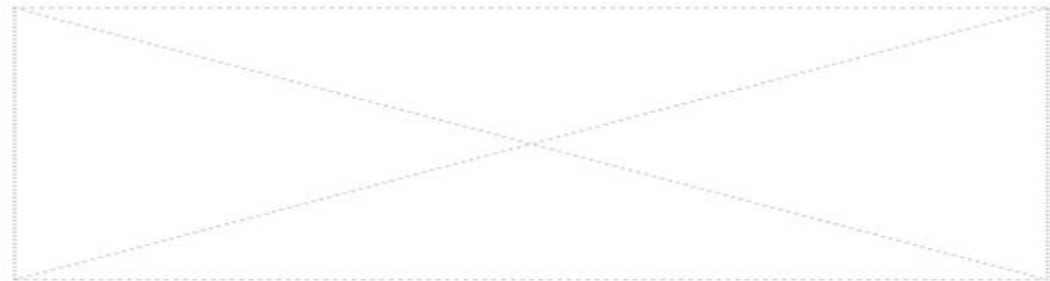
[촉감 센서 기반 물체 비가시적 물성 파악가능 로봇핸드]

(출처: KIST 지능로봇연구단)

- 로봇손 내장 로컬 비전 센서 기반 물체 및 주변 상태 인식 기술
 - 다양한 실험 용기, 도구, 기기들이 실험대 위에 무질서하게 혼재되어 있는 상태는, 글로벌 비전 센서 정보만을 기반으로 목표하는 물체에 로봇손이 접근하여 파지 작업을 수행하기에 어려운 조건
 - 주변 물체와의 불필요한 접촉을 방지하고, 목표 물체가 있는 지점까지 로봇손이 안전하게 도달하기 위해서는 접근 과정 중 주변 상태를 인식하고 이를 바탕으로 접근 경로를 업데이트하는 과정이 필요
- 실험 수행에 의한 로봇손 화학적 오염 및 손상 대응 기술
 - 로봇손 하드웨어를 화학적으로 손상시킬 수 있는 다양한 화학적 물성의 파우더 및 액체류를 활용하는 실험에서 로봇손의 오염을 방지하는 기술 및 오염 발생 시 로봇손을 세척할 수 있는 기술이 필요
 - 실험용 파우더 및 액체류의 로봇손 내부 침투 방지를 위한 IP등급 기준 방진

/방수 기술

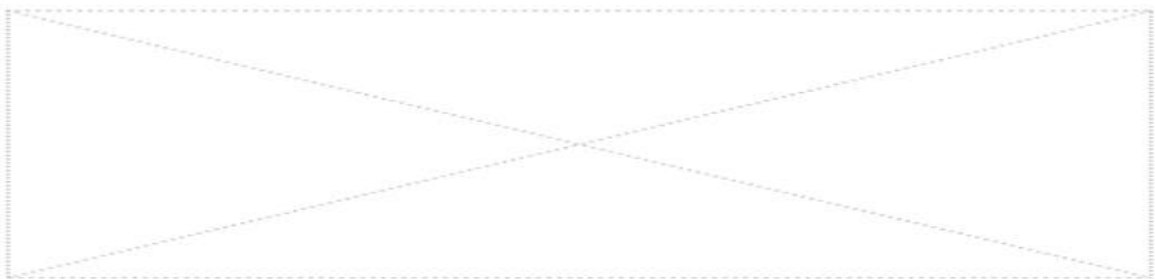
- 화학물질에 의한 로봇손 외부 오염 시 세척 가능한 로봇손 피부 및 피부 기반로봇 하드웨어 내외장 밀폐 기술
- 실험 용품의 비정형 비시각적 특성 감지를 위한 로봇손 내장 가능 센서 기술
 - 파지된 물체의 연성, 표면거칠기, 표면온도 등의 특성 감지를 위한 대면적 촉감센서(tactile sensor) 및 센서가 내장된 연성 로봇피부
 - 파지된 물체의 무게/변화, 무게중심/변화 등의 특성 감지를 위한 다자유도 역감센서(kinesthetic sensor)
 - 촉감 및 역감 피드백을 동시에 이용하는 물체의 비가시적 특성 적응형 파지 전략 및 특성별 대응 알고리즘



[손 안 조작(in-hand manipulation)이 필요한 실험 도구 예]

(출처: www.google.com)

- (로봇손 하드웨어 기술) 실험 도구 손 안 (in-hand) 조작을 위한 로봇손 하드웨어 및 조작 제어 기술
 - 촉감 및 역감 센서 정보 기반 파지된 물체의 로봇손 내 방향 및 자세 (orientation and pose) 추정 기술
 - 수동 조작형 실험 도구(예: 피펫, 클램프, 집게, 드롭퍼 등)를 다루는 사람의 손 행동을 모사한 학습 기반 로봇손 제어 기술



[카메라 센서 내장 그리퍼 장착된 매니플레이터]

(출처: Robotiq 社 및 MIT)

- 로봇손에 내장된 카메라 기반 주변 사물 및 상태 인식 기술
 - 로봇손의 손목, 손등, 손바닥 등에 내장된 로컬비전 센서를 활용한 주변 사물 및 상태 실시간 인식 기술
 - 고정된 글로벌비전 센서 정보와 이동성을 갖는 로컬비전 센서 정보의 통합을 통한 주변 환경 재생성 및 접근 경로 업데이트 기술

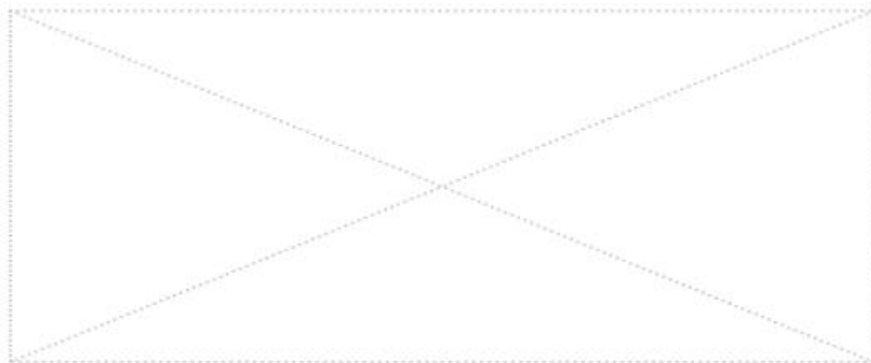
■ (세부목표 3) 인공지능·로봇기반 스마트 연구실 모듈화 개발

- 모듈형 스마트 연구실 기술 개발은 4차 산업혁명 핵심 기술 융복합화가 성공의 관건임
 - 인공지능, 로봇, 자동화 기술, IoT 센서 기술 (분석 기기를 포함), 빅데이터, 데이터 베이스 운영 시스템이 핵심 기술로 실제적으로 내재화되어야 함
 - 공정 모듈형 데이터 인프라 구조 확립 & 빅데이터화
- 인공지능의 모듈형 스마트 연구실 체계로의 내재화 및 검증
 - 인공 지능 내재화(모듈화)를 통한 순환형 피드백 체계 구축
 - 실증적 형태 스마트 실험실 구축 및 운영 데이터 확보 및 피드백
- 실험 공정 자동화 및 지능화를 위한 모듈형 자원 관리 및 설계 기술 개발
 - 실험 기자재 준비 (장비, 물질) 및 실험 Protocol를 포함한 모듈형 공정 설계
 - 공정 호환성과 연결성을 가진 데이터/실험 운영 체계 구축
- 로봇과 자동화 기반 기초 실험 공정 모듈 기술 개발
 - 실험실 환경 하에서의 모바일 로봇 및 Manipulator 위치 자세 정확도 확보
 - 실험실 환경에서의 Localizaton/Navigation/Manipulation 기능 검증 (실험 도구 인식 및 실행 검증)
- 모듈형 스마트 연구실 기술 개발은 고상 소재를 기반으로 구축 예정
 - 기상은 난이도와 산업적 효과가 미비하고, 액상(나소소재)은 현재 많은 연구가 진행 중이며, 별도의 과제가 추진 중임
 - 기술 난이도가 높고, 산업적 파급력인 큰 고상 소재가 적절하다고 판단되어 개발 대상 소재로 선정됨
- 고상 소재 기반의 Tape Casting 공정과 광학 소결 기술 개발 및 최적화

- 모듈형 실험 공정 개발의 재현성, 유연성, 확장성을 담보하고자 테이프 캐스팅 기반 출발 소재를 선정하여 단일막/적층막 시편 제작 공정과 대면적 적외선 광원을 이용한 디지털 소결 기술을 채택하여 모듈형 실험 단위 공정과 연계 공정 구현
- 모듈형 실험 기술 개발은 실시간 모니터링 기술 개발과 병행하여 진행되어야 시너지 효과를 발휘할 수 있을 것으로 예상됨
- 상기 목표 달성을 위한 전략으로 자동화 환경 구축 스마트 모듈형 공정 기술 개발의 1단계 접근과 인공지능 기반 모듈형 실험 고도화 기술개발의 2단계로 추진 예정
- 스마트 연구실 자동화/지능화 구축을 위한 모듈형 공정 DB/설계 기술 개발
 - 무인 실험실 단위 공정 기반 모듈형 정보 Library기술 개발 (단위 실험 공정 Library 확보/자동화/지능화 전략 (대분류/소분류적 접근))
 - 단위 실험 분석 Library/자동화/지능화 전략 (분석별 난이도 고려한 로봇 친화적 설계)
- 스마트 연구실용 모듈형 공정 기술 개발
 - 모듈형 단위 공정 자동화 기초 기술 개발 (분말 공정 기술/건조기술/소결기술로 분리적 접근)
 - 모듈형 단위 실험 응용 기술 개발
 - 모듈형 실험 데이터 기반 Closed Loop용 데이터 수집 응용 기술 개발
- 스마트 모듈형 공정 고도화를 위한 인공지능 적용 기술 개발
 - 신뢰성있는 최적 실험 조건 제안 및 설명 가능 인공지능 기반 해석
 - 인공지능 기반 최적 실험 공정 제안 및 해석 최적화 (실험 플랫폼 정보 연동 및 학습 데이터 정제)
- 스마트 연구실 플랫폼 구축을 위한 모듈형 인공지능 기술 개발 접근
 - 유전자 알고리즘 및 강화학습 기반 공정 최적화 (기반구축과 고도화전략이 필요함)
 - 설명가능 인공지능 기반 실험 공정 결과 해석 체계 구축 (Attention기반 추출 신경망 구축 & SHAP (SHapley Additive exPlanation) 기술 개발)

▣ (세부목표 4) 디지털 트윈 기반 스마트 연구실 지능화 기술 개발

- 디지털 트윈 기반 실감 실험실 구축
- 센서 동기화 및 인공지능 활용 기술 반영
- XR 기반 사용자-연구실 지능 인터랙션 인터페이스 개발
 - 사용자와 스마트 연구실 간 협업을 지원하는 인터랙션 및 인터페이스 기술을 개발함으로써 관련 원천 기술 확보 및 글로벌 경쟁력 강화
 - 직관적이고 사용하기 쉬운 양방향 인터랙션 UI 개발하여 사용자와 연구실 지능 간 원활하게 상호작용할 수 있도록 함
 - 사용자와 연구실 지능 간 다중 감각 피드백 인터페이스 기술을 개발로 실험 몰입도를 제공하는 협업 환경 제공
 - 반복적인 작업을 자율적으로 실행할 수 있는 자율 인터랙션 계획 기술과 사용자가 적극적으로 함께 작업할 수 있는 반자율 인터랙션을 지원하며 자율 인터랙션과 반자율 인터랙션 간에 전이 기술을 개발하여 자율/반자율 인터랙션 간 전환이 용이하도록 함으로써 협업의 융통성 및 활용도 제고



[연구실 지능인 “자비스“와 XR 인터랙션하는 장면]

(출처: 영화 아이언맨)

- 고신뢰 내결함성 분산 실험실 자율 관제 기술
 - Fault-Tolerance, Intrusion Detection, Process, Integrity, AI, Context-aware Computing 기술이 반영되어야 함
 - 딥러닝과 이종 센서 기반 무인/자율실험실 모니터링 기법 개발
 - 데이터의 무결한 수집과 저장을 위한 고확장성, 고안정성 분산 인프라 개발
 - 운영상 비정상 상황 인지를 위한 OT(Operation Technology) 보안 기술 개

발

- 경량화된 하드웨어 센서 및 인공 지능 보안 공격 방어 기술 개발
- 실험실 객체들간의 상호 작용을 위한 메세징 체계 기술 개발
- 스마트 연구실용 안전/ 보안체계 구축 및 활용 기술 개발
 - 고신뢰성 내결함성 실험 결과 관리 시스템 개발을 목표로 함
 - 무인형 실험실 디지털 관제 환경 구축과 무결한 실험 결과의 안정적 관리 시스템 개발을 목표로 함
- 무인형 실험실 디지털 관제 환경 구축을 위한 핵심 기술 개발
 - 무인 환경 실험실에 특화된 이중 센서 제작 및 필수 데이터 형식 정의
 - 무인 실험실 모니터링용 딥러닝 기반 이중 센서 퓨전 알고리즘과 비정상 행태 실시간 인지 기술 개발
 - 무인 실험실 사이버물리 (Cyber Physical) 객체들 (센서, 실험 장비 등) 간의 상호 작용을 위한 분산 Pub/Sub 기반의 디지털 중추 체계 (Digital Nervous System) 개발
 - 민감 정보가 은닉된 상태에서의 콘텐츠 기반 데이터 분산 라우팅을 통한 무결한 실험실 정보 수집 체계 개발
- 무결한 실험 결과의 안정적 관리 시스템 개발을 목표로 핵심 기술 개발
 - 디지털서명, 분산합의 및 영지식 증명 기반한 데이터 무결성 및 보유 검증
 - 실험 결과 추론용 심층인공신경망 교란 공격 정황 감지 및 공격자 추적
 - 실시간 실험실 네트워크 침입 감지 및 차단 시스템 개발
 - 공정 적합성 실시간 검증 기술 개발
 - 대용량 멀티미디어 실험 데이터의 분할 저장 및 복제 기법을 통한 고확장성 실험결과 저장 인프라 개발
 - Network Partition, Fail-Stop, Byzantine 장애 등의 상황에서도 고가용성을 유지하는 내결함성 실험실 환경 구축
- 연구실 지능 기반 지능형 협업을 위한 양방향 인터랙션 UI 기술 개발
 - 지능형 협업을 위한 인터페이스 프레임워크 기술 개발
 - 사용자-연구실 간 인터랙션 인지 및 추론 기술
 - 사용자-연구실 간 양방향 상호작용을 위한 인터랙션 UI 개발

3.4.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

▣ 추진체계

- 본 스마트 연구실 플랫폼 과제는 상기 설정된 세부 목표에 기초하여 4개의 세부 개발팀으로 나누어 진행
- 세부 1팀은 물리적 실험실 구축, 스마트 연구실 데이터 생성/관리/추적/응용 Platform 연구 수행
- 세부 2팀은 스마트 연구실 플랫폼 구축을 위한 지능형 모바일 매니플레이터 로봇 및 실험 용품 파지를 위한 로봇손 하드웨어 및 관련 제어 기술 개발 연구 수행
- 세부 3팀은 스마트 연구실 플랫폼 구축을 위한 인공지능과 로봇을 활용한 공정 모듈화 연구 수행
- 세부 4팀은 디지털 트윈에 기반 실가상 연구실 구축과 연구실 지능화 연구를 수행함

▣ 연구개발 로드맵

- 연차별 연구목표

연구 내용	2023	2024	2025	2026	2027
연차별 목표	스마트 연구실 플랫폼 설계	스마트 연구실 플랫폼 개발	스마트 연구실 플랫폼 통합	스마트 연구실 플랫폼 검증	스마트 연구실 플랫폼 시연
1세부 센서/데이터 인프라 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 연구실 데이터 관리 통합 방안 1차안 설계 • 스마트 연구실용 IoT Library 구축 및 로드맵 작성 • 스마트 연구실용 IoT 설계 1차안 확정 	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 연구실 환경 모니터링 IoT 표준안 구축, 데이터 구조 피드백, 및 운영 센서기반 스마트 연구실 실험 데이터 확보 체계 구축 및 피드백 	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 연구실 환경 데이터/공정 모듈 데이터 통합 데이터 관리 체계 확보 및 피드백 • 데이터 기반 지능화 피드백 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 데이터 기반 Closed Loop형 스마트 연구실 Recommendation 시스템 개발 • 다단계 공정 연계용 Platform 확정 전략안 확정 및 제안 	<ul style="list-style-type: none"> • 연계공정을 반영한 센서/데이터 인프라 통합 운영 시스템 고도화 및 프로토타입 시연

2세부 로봇 인프라 구축	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 설계 멀티모달센서 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 멀티모달센서 기반 깊이 추정 알고리즘 초기버전 개발 파지모션 생성 알고리즘 학습을 위한 시뮬레이션 환경 구현 	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 제어 알고리즘 개발 멀티모달센서 기반 깊이 추정 기술 고도화 파지모션 생성 알고리즘 초기버전 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 제작 파지모션 생성 알고리즘 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> 모바일 매니플레이터 제작 통합 제어 알고리즘 개발 및 시연
3세부 스마트 연구실 모듈화	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정설계를 위한 자료 Library 구축 실증형 실험실 설계안 확정 (및 관련 기자재 발주) 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 자동화 기반 구축 (독립 공정) 실험용 데이터 취득 체계 확보 실험 환경용 데이터 취득 체계 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 자동화 고도화 (공정 연결성) 공정 연결 시나리오에서의 데이터 (실험 & 환경 데이터) 수집 및 활용 체계 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 데이터 기반 AI 순환형 피드백 체계 구축 연계공정 (2혹은 3 단위 공정)의 AI기반 연계 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 연계공정 (2혹은 3공정) 결합 모델 제안 & 프로토타입 시연
4세부 스마트 연구실 지능화	<ul style="list-style-type: none"> 실험기기/로봇/환경 디지털 모델링 연구실 디지털 트윈 환경 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 실가상 실험기기/로봇/환경 연동 XR 기반 사용자-연구실 인터랙션 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 연구실 통합 관리 및 제어 지능 개발 자연어 기반 사용자-연구실 인터랙션 	<ul style="list-style-type: none"> 자율 운영 스마트 연구실 지능 및 인터랙션 플랫폼 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 자율 운영 스마트 연구실 통합 플랫폼 시연

○ (세부목표1) 스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축 기술 개발

연구 내용	2023	2024	2025	2026	2027
연차별 목표	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 연구실 지능화를 위한 IoT 및 데이터 관리 설계 스마트 연구실용 IoT 라이브러리 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 연구실 환경 모니터링 IoT 표준안 구축 및 운영 센서기반 스마트 연구실 실험 데이터 확보 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 실험 환경 데이터/공정 모듈 데이터 통합 관리 체계 개발 데이터 기반 지능화 피드백 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 데이터 기반 Closed Loop형 스마트 연구실 기반구축 다단계 공정/센서 연계 데이터 관리 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 연구실 센서/데이터 Platform 제안 및 시연
스마트 연구실용 정보 데이터 베이스 설계, 구축, 및 고도화	>>	>>	>>		
연구실 환경 IoT 설계, 데이터 체계 구축/최적화	>>	>>	>>		
지능화 연구실 모듈형 공정 모니터링 분석 데이터 확보 설계, 구축, 및 최적화	>>	>>	>>		
연구 실험데이터/ 연구 환경 데이터 통합 관리 및 AI기반 고도화 기술 개발		>>	>>	>>	>>

○ (세부목표2) 스마트 연구실 로봇 인프라 구축 기술 개발

연구 내용	2023	2024	2025	2026	2027
연차별 목표	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 설계 멀티모달 센서 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 멀티모달 깊이 추정 알고리즘 개발 파지모션 학습 시뮬레이션 환경 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 개발 파지모션 생성 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 로봇손 하드웨어 제작 파지모션 생성 기술 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> 모바일 매니플레이터 제작 통합 제어 알고리즘 개발
깊이 추정을 위한 멀티모달센서 시스템 구축	>>	>>			
멀티모달센서 기반 깊이 추정 알고리즘 개발	>>	>>	>>		
파지모션 생성 알고리즘 학습을 위한 시뮬레이션 환경 구축	>>	>>			
파지모션 생성 알고리즘 개발		>>	>>	>>	>>
로봇손 하드웨어 설계	>>	>>	>>		
로봇손 하드웨어 제어 알고리즘 개발		>>	>>	>>	>>
모바일 매니플레이터 하드웨어 제작		>>	>>	>>	>>
통합 제어 알고리즘 개발			>>	>>	>>

○ (세부목표3) 인공지능·로봇 기반 스마트 연구실 모듈화 기술 개발

연구 내용	2023	2024	2025	2026	2027
연차별 목표	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 설계를 위한 자료 Library 구축 실증형 실험실 설계 안 확정 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 (단일공정) 자동화 기반 구축 실험 및 실험환경 데이터 수집 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 공정 자동화 고도화 (공정 연결성) 공정 연결 시나리오에 서의 데이터 (실험 & 환경 데이터) 활용 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> AI 기반 모듈형 공정 순환형 피드백 기반 구축 AI기반 연계 공정(2혹은 3 단위 공정)이 모듈형 융합 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> AI기반 모듈형 공정 융합 모델 제안 AI 기반 모듈형 공정 결합 모델 (2혹은 3공정) 제안 & 프로토타입 시연
고상기반 모듈형 공정/장비/실험설계/자동화 Library 구축	>>	>>	>>		
Robotics기반 모듈형 공정(단위) 기술 개발	>>	>>	>>		
실시간 실험 모니터링/추적 광학기반 플랫폼 구축	>>	>>	>>		

스마트 소재 연구실 실험/데이터 체계 구축 및 운영 피드백		>>	>>	>>	>>
스마트 소재 연구실 환경 데이터 수집 체계 구축 및 연계 기술 개발		>>	>>	>>	>>
AI기반 Closed Loop형의 공정 모듈 기술 개발		>>	>>	>>	>>

○ (세부목표4) 디지털 트윈 기반 스마트 연구실 지능화 기술 개발

연구 내용	2023	2024	2025	2026	2027
연차별 목표	<ul style="list-style-type: none"> 실험 기기/로봇/환경 디지털 모델링 연구실 디지털 환경 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 실가상 실험 기기/로봇/환경 연동 XR 기반 사용자-연구실 인터랙션 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 연구실 통합 관리 및 제어 지능 개발 자연어 기반 사용자-연구실 인터랙션 	<ul style="list-style-type: none"> 자율 운영 스마트 연구실 지능 및 인터플랫폼 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 자율 운영 스마트 연구실 통합 플랫폼 시연
연구실 기기/로봇/환경 디지털 모델링	>>	>>			
연구실 실가상 시뮬레이션 환경 구축	>>	>>			
실험기기/로봇/환경 실시간 연동 및 모니터링		>>	>>		
실험기기/로봇/환경 실시간 제어		>>	>>	>>	
연구실 실시간 모니터링 및 지능화		>>	>>	>>	
XR 및 자연어 기반 사용자-연구실 인터랙션		>>	>>	>>	>>

3.4.7. 소요예산

▣ 사업기간 : 5년 (2023~2027년)

▣ 사업비 규모 : 국비 총 146억원 (30억원/년)

▣ 연차별 연구비

[단위: 억원]

구분		'23	'24	'25	'26	'27	계
정부 (출연금)	스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축 (세부 1)	2	3	3	3	2	14
	스마트 연구실 로봇 인프라 구축 (세부 2)	5	10	12	12	12	53
	AI·로봇 기반 스마트 연구실 모듈화 (세부 3)	5	10	11	11	11	51
	디지털 트윈 기반 스마트 연구실 지능화 (세부 4)	3	7	8	8	8	38
소계		15	30	34	34	33	146
총 사업비							146

▣ 사업비 산출근거

[스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축 (세부 1)]

- 지능형 스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축을 위한 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기초 투자를 반영할 필요가 있음.
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 5억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 센서/데이터 인프라 구축 비용으로 기자재 분야에 대한 재료로 1억원/년로 추산됨
- (재료비) 본 과제의 추진에 따른 센서 및 데이터 처리 및 시스템 구축을 위한

서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.

- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 0.6억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 4명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 2.4억원/년 규모가 됨.

전문가 1	빅데이터/ 데이터 사이언스 전문
전문가 2	인공지능 설계 및 활용 전문가
전문가 3	IoT/계측 제어 전문가

[스마트 연구실 로봇 인프라 구축 (세부 2)]

- 본 과제의 필요인력은 약 15명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 과학기술정보통신부에서 지원하는 이론/계산 그룹의 평균 연구비는 1억원/년 규모로, 이를 본 과제에 환산하면 10억원/년 규모가 됨

전문가 1	생성 모델 학습 전문가
전문가 2	인식 모델 학습 전문가
전문가 3	시뮬레이션 및 그래픽스 전문가
전문가 4	멀티모달센서 특성 분석 및 정합 기술 전문가
전문가 5	광학적 특성에 따른 물체 분석 기술 전문가
전문가 6	멀티모달센서 기반 캘리브레이션 전문가
전문가 7	깊이 추정 딥러닝 모델 전문가
전문가 9	다중 센서 융합 및 3차원 모델링 전문가

전문가 10	가상현실 시뮬레이션 시스템 전문가
전문가 11	로봇손 내장 촉감 센서 및 역감 센서 전문가
전문가 12	다지형 로봇손 기구/전장 설계 및 통합 전문가
전문가 13	로봇손목 메커니즘 설계 및 제어 전문가
전문가 14	이동형 카메라 비전 정보 기반 물체 및 환경 인식 전문가
전문가 15	적응형 파지/조작 전략 개발 전문가

[AI·로봇 기반 스마트 연구실 모듈화 (세부 3)]

- 지능형 실험실의 물리적 및 가상 구현을 위한 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기초 투자에 대한 비중이 높을 것으로 예상됨
 - 유연성/확장성 높은 Robot 시스템을 기반으로 한 Hardware 구축 비용
 - 외부 전문 자동화/로봇 실무 인력과의 협업 프로젝트 비용
 - 방대한 실험 데이터 관리를 위한 Server 구축 비용
 - 모듈형 실험/분석 시스템 구축 비용
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 10억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 실험실 구축 비용으로, 로봇 하드 웨어, 제어 시스템, 자동화 이동 장치, 광학기반 분석 장치, 디지털 소결 장치, 지능형 실험실 데이터 처리용 서버 등 연간 5억원
- (재료비) 본 과제의 추진에 따른 대상 고체 소재 시약 비용, 인공 지능 연구 관련 서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.
- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 1억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 8명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표

참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 3억원/년 규모가 됨.

[실존 실험실 개발 비용]

전문가 1	Robotics 전문가
전문가 2	빅데이터/ DB Management 포함 전문가
전문가 3	인공지능 전문가
전문가 4	IoT/계측 제어 전문가
전문가 5	실험 자동화 전문가
전문가 6	실험 공정/설계 전문가
전문가 7	디지털 소결 기술 전문가
전문가 8	스마트 연구실 분석 전문가

[디지털 트윈 기반 스마트 연구실 지능화 (세부 4)]

- 디지털 트윈을 위해 실제 자율 운행 실험을 재현할 수 있는 실·가상 연구실 환경 구축에 기초 투자에 대한 비중이 높을 것으로 예상됨
 - 센서, 실험기구, 로봇 등 플랫폼 검증을 위한 스마트 실험실 환경 구축 비용
 - 연구실 내부, 실험기구, 로봇 등 시뮬레이션 가능한 3차원 모델링 비용
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 10억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 연구실 구축 비용으로, 로봇 하드 웨어, 제어 시스템, 자동화 이동 장치, 지능형 실험실 데이터 처리용 서버 등 연간 5억원
- (재료비) 본 과제의 추진에 디지털 트윈 시뮬레이션, 인공 지능 연구 관련 서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.

- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 1억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 8명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 3억원/년 규모가 됨.

전문가 1	Robotics 전문가
전문가 2	빅데이터/ DB Management 포함 전문가
전문가 3	인공지능 전문가
전문가 4	디지털 트윈 전문가
전문가 5	XR 인터랙션 전문가
전문가 6	자연어 처리 전문가
전문가 7	시스템 통합 전문가
전문가 8	연구실 플랫폼화 전문가

3.4.8. 기대효과 : 활용 시나리오

▣ 시나리오 1 : 실험실 자동화 부분 적용

“실험실 자동화 지능형 로봇 플랫폼이 없는 실험실”

국내외에 잘 알려진 촉매 전문가인 이모 박사는 촉매 신물질 설계와 관련해 수행 중인 과제 수행을 위해 실험을 준비하고자 한다. 이번 과제는 그가 기존에 연구해오던 촉매 반응들이 아닌 이산화탄소의 환원반응에 적합한 새로운 물질의 개발이 그 목적이다.

과제 제안 과정에서 팀원들과 함께 조사한 후보 소재 물질들을 기반으로 소재 합성 실험을 진행해야 하는데, 매 실험마다 조건을 조금씩 달리하며 같은 실험을 반복하고 그 결과를 토대로 또 새로운 실험을 설계하는 과정이 쉽지 않다. 관련 연구를 찾아보고, 과제 보고서도 틈틈이 작성하고, 다른 과제 업무도 병행하느라 실험에 물리적으로 쓸 수 있는 시간이 한정적이어서 학생 연구원에게 시약 준비와 실험 보조 등의 도움을 받고 있다.

그나마 얼마 전에 큰 연구비를 들여 도입한 액체 실험 자동화 기기 덕분에 손이 덜 가게 되었지만, 여전히 달라지는 실험 조건마다 재료 약품들을 교체하고, 결과 분석을 위해 합성된 물질들을 분류하고 보관하는 일에는 사람 손이 필요하다. 과제 종료가 얼마 남지 않아 마음은 급하고 하루가 아깝지만, 밤새 자동화 기기 옆을 지키고 있을 수는 없다. 그렇다고 학생 연구원에게 밤을 새워 가며 실험을 중단이 이어가도록 지시할 수도 없는 일이다. 단순하고 사소하지만, 이런 부분까지 자동화하는 방법이 있으면 정말 좋을 텐데, 오늘도 이박사는 마음이 무겁다.

“실험실 자동화 지능형 로봇 플랫폼이 있는 실험실”

국내외에 잘 알려진 촉매 전문가인 이모 박사는 촉매 신물질 설계와 관련해 수행 중인 과제 수행을 위해 실험을 계속하고 있다. 이번 과제의 목표가 새로운

물질 개발에 있는 만큼 다양한 후보물질들을 다양한 방법으로 합성해보고 결과를 분석하는 등 많은 횟수의 실험을 수행해야 한다.

빠듯한 일정을 생각하면 실험 교대 계획을 짜고 밤샘 실험 일정을 잡느라 한숨이 나올만한 상황이지만, 지금 이박사는 마음이 든든하다. 얼마 전에 개발이 완료되었다고 시사용을 부탁받은 실험실 자동화 지능형 로봇 플랫폼 덕분이다. 처음에는 안 그래도 다른 일로 바쁘게 복잡해 보이는 로봇이니 인공지능이니 하는 것들을 테스트해달라는 요청을 받고 난감한 마음뿐이었지만, 연구개발팀이 로봇을 이용해 즉석에서 원하는 시약을 척척 옮기는 시연을 보고 혹시 싶어 승낙했었다. 조금 수고스러워도 사용법을 열심히 익히면 없는 것보다는 낫겠지 싶었는데, 로봇이나 인공지능 문외한인 이박사가 사용하기에도 큰 어려움이 없어서, 연구개발팀의 간단한 도움을 받아 실험 기기 사이의 시약 운반이나 합성기기와 분석기기 사이의 결과물 운반 등을 자동화할 수 있었다.

운반해야 할 시약에 변화를 주고 싶거나 결과물 종류가 조금 달라져도 그때그때 원격으로 시약 종류만 인공지능 소프트웨어에서 변경해주면 되니, 밤새 실험실을 지키고 있을 필요도 없어졌다. 지금은 실제 실험은 모듈 단위 자동화 장비에 의존하고 있지만, 지능형 로봇 플랫폼 개발팀은 개별 실험들도 모두 자동화할 수 있는 플랫폼 개발을 이어간다고 하니, 그때가 되면 정말 꿈같은 실험실이 만들어질 것 같다는 상상에 벌써 마음이 설렌다.

▣ 시나리오 2 : 실험실 자동화 인공지능·로봇 플랫폼 개발

로봇 연구소에 근무 중인 연구원 박박사는 최근 비전문가를 위한 실험실 자동화 인공지능·로봇 플랫폼을 개발하는 과제에 착수했다. 이렇게 실제 사용 시나리오에 근접한 플랫폼을 개발할 때는 사전에 고려해야 할 부분이 너무 많다. 필요한 요소 기술들이 모두 기존에 있는 기술이라고 쉽게 접근했다가 사용환경의 특수성이나 실제 데이터와 연구용 데이터 사이의 괴리로 인한 기존 기술 적용 실패로 최종 결과물의 완성도가 급격히 떨어지는 경우가 많기 때문이다. 실험실 자동화 플랫폼도 객체/환경 인식 기술, 로봇의 자율주행 기술, 매니플레이터의 정교한 제어와 안전한 파지를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술 등 일견 기존 기술 활용이 가능한 쉬운 통합 과제인 것처럼 보이지만, 실험실 환경의 특수성을 염두에 두는 순간 기존 기술을 그대로 활용하는 계획은 실현 가능성이 없다. 그 모든 요소 기술이 갖춰져 있더라도, 사용성을 고려한 UI 디

자인과 조작성을 향상하기 위한 통합 제어 시스템 구현, 순간마다 발생할 수 있는 요소 기술들의 실패를 고려한 위험 회피 전략 구현 등 통합 단계에서 고려해야 하는 연구개발 요소가 너무 많다.

다행히도 이런 현장 연구자들의 요청이 잘 받아들여져서, 이번 과제는 플랫폼 구현을 위한 기반 기술 개발 과제의 후속 과제로 진행되고 있다. 연속성 있게 기획된 과제 덕분에 개발된 기반 기술들은 환경의 특수성에 맞게 개발되어 높은 신뢰도와 안정성을 갖고, 통합 과정이 수월하도록 적절한 사용성으로 모듈화 되어 있어 이번 과제에서 박박사는 정말 연구자들이 사용하기 좋은 실험실 자동화 플랫폼을 만드는 데 집중할 수 있게 되었다.

기반 기술 과제 시사용을 통해 많은 도움이 되는 피드백을 주었던 이모 박사로부터 플랫폼 개발에 대한 기대감을 전해 들은 터라, 이번 과제 수행에는 왠지 모르게 더 열의를 가지고 집중하게 된다. 정말 좋은 사용성을 가지도록 만들어 박박사 본인 연구실에서 활용하려는 계획도 있다. 기존 자동화 기기들과 다르게 다양한 실험실 환경에서 다양한 임무를 유연하게 수행할 수 있도록 범용성 있는 플랫폼을 만드는 게 과제의 목적이기 때문이다.

박박사는 이번 과제에서 시뮬레이터 기반의 사용자 UI를 만들어 사용자가 미리 컴퓨터로 자동화 계획을 세우고 실행해본 다음 바로 지능형 로봇이 해당 일정을 수행할 수 있게 하거나, XR 기술을 도입해 로봇을 실시간 원격조종해 반자동의 실험 수행을 가능하게 하는 시나리오 구현을 계획하고 있다. 사람과 로봇이 한 공간에서 서로에게 안전하게 임무를 수행할 수 있는 로봇 지능을 구현하는 것도 중요한 과제이다. 기반 기술이 갖춰져 있는 덕분에 다양한 시나리오를 구상해 완성도 있는 플랫폼을 개발할 수 있다. 박박사는 오늘도 바쁘고 힘들지만 과제 결과물로 만들어질 플랫폼이 가져올 미래를 상상하며 즐겁게 연구 중이다.

3.4.9. 발전방향

▣ 다학제의 초융합성 연결성으로 연구 주체간 협업 도모

- 본 스마트 연구실 플랫폼의 성공 여부는 다학제의 초융합성 연결성이 핵심인 바, 총괄 연구책임자를 중심으로 인공지능/IoT/빅데이터/디지털 트윈 등 연구 주제를 책임지는 연구 주체간의 유기적이며 세심한 협업이 매우 중요
 - 가상 실험공간과 물리적 실험실 구축을 위한 전용 플랫폼용 실험실 공간 확보가 필요
 - 특히 폭증하는 실험/공정을 포함한 Total 데이터에 대한 효율적인 관리 및 응용 방법 개발, 데이터베이스 단계적인 확장 및 고성능의 컴퓨팅 지원에 대한 파격적인 지원 등이 필요
- 개발된 스마트 연구실의 플랫폼의 성공 여부는 스마트 연구실 플랫폼의 편리성/신뢰성/정확성에 달려있음
- 또한 개발된 스마트 연구실 플랫폼은 대학과 연구소의 미래 수요가 반영되어야 하며, 산업체의 부족한 역량을 보완하는 방향으로 개발이 되어야 고부가가치 창출로 이어지는 공학적 가치를 지향해야 함

▣ AI 기반의 실험 과정 설계와 E2E 실험 자동화로 확장

- AI가 간단한 실험 절차 변경과 사용할 실험 용품, 시약 등을 새롭게 선택해 기존에 시도된 적이 없던 새로운 실험을 수행하거나, 기존 실험의 한계를 극복하고 시간적, 경제적 측면에서 보다 효율적인 실험 절차를 찾아낼 수 있도록 end-to-end 실험 자동화 환경을 제공할 수 있음
- 기존의 단위 실험 자동화 모듈은 실험 모듈의 운용을 위한 시약 보급, 결과 분석 등에 있어 사람의 개입이 필수적이나, 저장소-기기 간 운반, 실험기기-분석기기 간 운반 등의 절차를 제안하는 실험실 자동화 플랫폼으로 수행할 경우 사람의 개입이 없는 AI 주도 실험이 가능함

▣ 연구실 자동화에서 연구소, 캠퍼스 단위 자동화로 확장

- 방사능, 고위험 화학 실험 등 유인 실험에 있어 기피 요인이 있는 실험실, 연구실 등의 시설 자동화로 확장

- 방과 방사이의 이동이 가능한 로봇 하드웨어와 건물 전체의 매핑에 기반한 자율주행 시스템 도입으로 실험실 단위 자동화에서 건물, 연구소, 캠퍼스 단위의 자동화로의 확장
 - 또한, 일반 운반 환경보다 도전적인 실험실 자동화 환경에서 개발한 모바일 매니플레이터의 운용 환경 확장을 통해, 실험자나 연구자를 위한 자동화 모듈을 일반적인 운송, 시설 유지보수 자동화, 산업 자동화 등으로 확장할 수 있음

■ 스마트 연구실의 실험적 검증에서 상용수준 플랫폼화로 현장 적용

- 기반 기술 개발 단계에서부터 관련 산·학·연 연구진과의 workshop을 진행하여 사용자 수요를 반영한 기반 기술을 개발할 필요가 있음
- 실제 연구소의 실험자나 연구자와의 협력을 통해 실험적 검증과 현장의 문제에 직접 적용할 수 있는 기반 기술 개발로 실험실 자동화 기술의 신뢰성을 증진시킬 필요가 있음
- 기반 기술 개발 후 연구진(산·학·연)들을 베타테스터로 초빙하여 대상으로 현장에서 일어나고 있는 문제점과 추가 수요를 파악해 추후 플랫폼으로의 확장 시 필요한 기술 개발 로드맵을 확정할 필요가 있음
- 연구 개발 현장의 데이터 기록 문제를 시간과 공간적 측면에서 유연성있게 플랫폼 시스템으로 흡수시킴으로써 도모하여 향후 인공지능 해석기술과의 피드백을 통한 고도화 추진 및 신뢰성을 증진시킬 필요가 있음
- 지능형 실험실 플랫폼 구축 및 운영 결과를 자문 위원회와의 미팅을 통해 지능형 실험실 플랫폼의 인지도 및 편리성을 도모할 계획임
- 기반 기술 개발 후 정기적인 기술 개선 및 사용자 데모를 통해 추후 개발될 플랫폼의 인지도와 진입 장벽을 낮출 필요가 있음
- 기반 기술의 개발 문서와 사용 매뉴얼을 완성도 있게 작성하고 추후 플랫폼 개발에 더 많은 연구자가 참여할 수 있도록 다양한 사용자의 피드백을 기반으로 유지보수할 필요가 있음
- 개발 연구진이 실제 개발된 기반 기술을 이용하여 관련 분야 SCI 논문 등을 발표하여 기반 기술의 신뢰도 및 인지도를 높임
- 본 스마트 연구실 플랫폼 완료 후인 4년 후 본 과제가 종료되어도 개발된 실

험실 플랫폼용 다양한 모듈 개발을 위한 추가적인 연구 개발 투자 및 개발된
실험실 모듈의 유지 및 성능 개선을 위한 추가 연구 개발 프로그램이 필요

3.5. 성과 목표 및 지표

3.5.1. 성과목표

- 나노입자 및 페로브스카이트 소재 개발용 AI 스마트연구실 구축
 - 소재 합성, 분석 및 물성측정 자동화 장치 개발 (각 소재 분야별 4건 이상)
 - 소재/소자 설계 및 최적화 AI 모델 개발 (10건 이상)
 - 소재 합성·물성 데이터 대량 생성 (10,000건 이상)
 - 관련 신소재 발굴 (2종 이상)
 - AI 스마트연구실 구축을 통해 소재 개발 자율화 (구축된 스마트연구실의 실험 재현성과 효율성 관련 2종 이상의 지표)
- 실험실 자동화를 위한 AI·로봇 기반 기술 개발
 - 소재 연구용품 인식용 마커 개발 (1종)
 - 로봇손 프로토타입으로 파지 가능한 연구용품 개발 (5종 이상)
 - 소재 실험실 내 자율주행 로봇시스템 개발 (1종)

3.5.2. 성과지표

성과지표명	목표치						측정방법
	'22	'23	'24	'25	'26	'27	
소재 자동화장치 (수)	-	1	1	2	2	2	관련 증빙자료 제출
소재 설계 및 최적화 AI 모델 (수)	2	2	2	2	2	2	관련 증빙자료 (논문, 특허, 프로그램 등) 제출
소재합성·물성데이터 (건)	200	1000	2800	3000	3000	2000	국가 소재 연구데이터 플랫폼 이관 유무
신소재 발굴 (종)	-	-	-	-	2	2	특허 확보 유무
스마트연구실 데이터 재현성 - 생성데이터의 표준편차 (%)	30	20	15	10	8	-	동일한 소재합성 실험 10회 반복 시 생성되는 데이터의 표준편차

스마트연구실 소재개발 효율성 - 고출력 스크리닝 탐색횟수(10 ⁿ) 대비 감소율 (%)	-	50	60	70	80	90	AI 기능이 없는 자동화/로봇 장치를 이용한 고출력 스크리닝 실험 대비 소재 탐색횟수 대비 감소율
연구용품 검출 성능 (%)	-	-	-	60	70	80	제안하는 데이터셋의 테스트셋에 대해 검출 정확도 (average precision) 평균
연구용품 종류 및 자세인식 성능 (%)	-	-	-	60	70	80	제안하는 데이터셋의 테스트셋에 대해 종류 인식 성능 및 자세 인식 정확도 평균
소재실험실 환경 깊이 인식 성능 (%)	-	-	-	20	10	5	영상 내 유효 픽셀 중 80% 이상의 수에 대한 깊이값 오차율 평균
로봇손 하드웨어 프로토타입 제작 (수)	-	-	-	1	2	2	로봇손 하드웨어 프로토타입을 이용해 파지 및 이동이 가능한 연구용품 수
SCI 논문 (수)	4	8	10	13	15	12	관련 증빙자료 제출
특허 출원 (수)	1	2	2	2	3	2	관련 증빙자료 제출
프로그램 등록 (수)	2	2	3	3	4	3	관련 증빙자료 제출

4. 효율적 과제 추진을 위한 제안

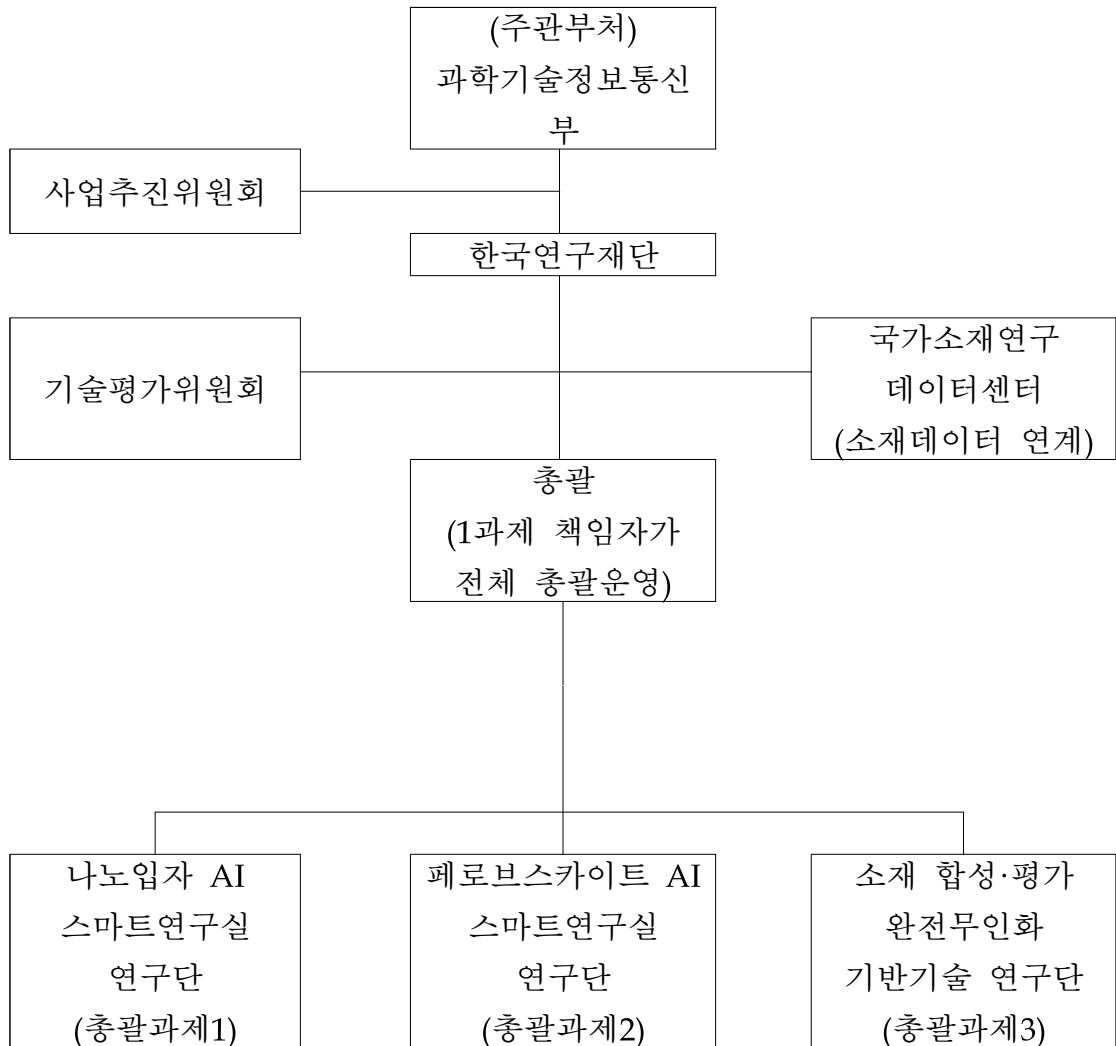
4

효율적 과제 추진을 위한 제안

4.1. 추진 체계

▣ 추진 전략 및 방법

○ 스마트 연구실 추진 체계



[스마트 연구실 추진 체계 구조]

○ 과제 운영 계획

구분	주요역할
과학기술정보통신부	- 사업추진 정책 수립 및 사업시행계획 수립 - 타부처 협력 및 과제선정 최종 심의 등
사업추진위원회 전담기관 (한국연구재단)	- 사업추진방안, 시행계획 및 과제제안서 도출 - 사업/과제기획, 공고 및 과제 신규평가 - 수행관리, 연차평가, 성과분석 및 사후관리
기술평가위원회	- 과제선정, 진도점검·연차 및 최종평가 - 과제관리 기술자문
국가소재연구데이터센터	- 스마트 연구실에 AI 학습용 데이터 제공 - 스마트 연구실에서 생성된 데이터 플랫폼 이관
수행기관 (학연)	- 과제 주관 혹은 참여기관으로 기술개발 수행 - 결과물 도출 및 성과활용 등 - 총괄과제1(나노입자 AI 스마트연구실 연구단) 책임자가 전체 총괄운영

- 1세부 과제 책임자가 전체 과제에 대한 총괄 책임자를 겸직함으로써 과제간 유기적인 협력 및 효율적인 운영 방안 마련
- 총괄을 중심으로 각 세부 과제별 연구 내용 공유 및 상호 순환적 기술 및 인력 교류를 위한 정기 운영 위원회 운영
- 연구단간 지속적인 교류 및 협의를 통하여 중복 투자를 방지하고 일관성 있고 체계적인 연구를 수행할 수 있는 정기 워크숍 진행
- 국가 소재 연구 데이터 센터와의 유기적 협력을 통하여 스마트 연구실에서 발생하는 다양한 정형/비정형 데이터 및 플랫폼의 공유

4.2. 투자 계획

■ 세부과제별 연구비 투자 계획

	'22년	'23년	'24년	'25년	'26년	'27년	합계
① 촉매디스플레이 나노입자용 AI 스마트연구실 개발	13.66	17.34	18	18	18	8	93
② 유무기 복합소재 개발용 AI 스마트연구실 개발	-	15	19	19	19	18	90
③ 실험실 자동화를 위한 AI 및 로봇 기반 기술 개발	-	15	30	34	34	33	146
합계	13.66	47.34	67	71	71	59	329

■ 세부과제1 (나노입자용 스마트연구실) 사업비 산출근거

- (전체) 아래 장비비, 재료비, 활동비, 추진비, 인건비, 필요 전문가 숫자 및 분야에 근거하여 18억원/년 규모의 사업비를 추산
- (장비비) 촉매 및 디스플레이 랩의 합성파트 구축에 필요한 로봇 하드웨어와 제어시스템 구입이 필요하며, 이는 2.5억원/년 규모로 추산
- (장비비) 촉매 성능 특성분석 장비 및 디스플레이 광특성 분석 장비 및 관련 제어시스템 구입이 필요하며, 이는 연 2억원/년 규모로 추산
- (재료비) 대량의 양자역학 계산, 데이터베이스 구축, 데이터 기반 인공지능 학습 모델 개발에 필요한 서버 및 고성능 GPU 구입이 필요하며, 이는 2억원/년 규모로 추산
- (재료비) 본 과제의 성격상 끊임없는 나노입자 및 양자점 소재의 합성이 필요하며, 관련한 재료비는 2.5억원/년 규모로 추산
- (활동비 및 추진비) 국내외 학회 활동을 포함한 각종 연구활동 및 과제추진 비용은 1억원/년 규모로 추산
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 최소 10명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 책임급 연구원이 이끄는 3-4인의 전임 연구보조원이 필요하므로 이를 바탕으로 인건비를 추산하면 8억원/년 규모가 됨

전문가 1	로봇 기반 화학 합성 시스템 구축 전문가
전문가 2	나노입자 화학 합성 및 공정법 개발 전문가
전문가 3	OER 촉매 반응 및 소재개발 전문가
전문가 4	디스플레이용 발광 양자점 소재개발 전문가
전문가 5	소재 역설계용 머신러닝 모델 개발 전문가
전문가 6	인공지능 자연어처리 전문가
전문가 7	대형 데이터베이스 지식베이스 구축 전문가

전문가 8	나노입자 광분석(spectroscopy) 시스템 자동화 전문가
전문가 9	컴퓨터 비전 전문가
전문가 10	공간인지 및 그래퍼 제작 전문가

■ 세부과제2 (유·무기 복합소재용 스마트연구실) 사업비 산출근거

○ 세부기술 1: 페로브스카이트 소재 합성·측정 자동화 기술 및 장치 개발

- 스마트 연구실을 실제 소재 합성 및 물성 측정에 활용하기 위해서는 로봇팔, 분주기, 그리고 이들과 연계된 스핀 코터, 측정 장비 등의 별도 장비 구축이 필요함
- 이러한 시스템을 설치하기 위해서는 또한 별도의 연구실 구축이 필요함

장비 1	로봇팔 (소재 합성용 2ea, 측정용 2ea)
장비 2	분주기 (소재 합성 제작용 2ea)
장비 3	자동화 공정 제반 시설 (후드, 스핀코터, 측정 장비 등)
연구실	제습실

- 소재 합성에 필요한 전구물질 재료비 역시 과제의 규모나 반복 실험량을 고려하였을 때 연간 1.5억 원이 소요될 것으로 예상함
- 스마트 연구실 과제의 소재 합성, 측정팀에서 필요 인력은 약 2명의 책임급, 3명의 선임급 연구원이 필요 할 것으로 보임

전문가 1	자동화 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	소재 합성 자동화 공정 구축 담당자
전문가 3	소재 측정 자동화 공정 구축 담당자
전문가 4	자동화 시스템 운용 인공지능 개발 담당자

○ 세부기술 2: 태양전지용 페로브스카이트 소자 조립·측정 자동화 기술 및 장치

개발

- 스마트 연구실을 실제 소자 제작 및 물성 측정에 활용하기 위해서는 로봇팔, 분주기, 그리고 이들과 연계된 스핀 코터, 후드 측정 장비 등의 별도 장비 구축이 필요함
- 이러한 시스템을 설치하기 위해서는 또한 별도의 연구실 구축이 필요함

장비 1	로봇팔 (소자 제작용 2ea, 측정용 2ea)
장비 2	분주기 (소자 제작용 2ea)
장비 3	자동화 공정 제반 시설 (후드, 스핀코터, 측정 장비 등)
연구실	제습실
대면적 자동화 관련 시설	로봇팔, 분주기, 바 코터 및 제습실

- 소자 제작에 필요한 전구물질 재료비 역시 과제의 규모나 반복 실험량을 고려하였을 때 연간 1.5억 원이 소요될 것으로 예상함
- 스마트 연구실 과제의 소자 제작팀에서 필요 인력은 약 1명의 책임급, 3명의 선임급 연구원이 필요 할 것으로 보임

전문가 1	자동화 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	소자 제작 자동화 공정 구축 담당자
전문가 3	소자 측정 자동화 공정 구축 담당자
전문가 4	자동화 시스템 대면적 적용 담당자

○ 세부기술 3: AI 기반 페로브스카이트 소재 합성과 소자 설계 및 최적화 기술

- 스마트 연구실의 AI 활용 분야에서는 데이터 플랫폼 구축 기술, AI 모델링 구축 기술, 데이터 해석 및 제일 원리 계산 지원의 전문 기술 인력이 필요

전문가 1	스마트 연구실 AI 시스템 연구 총괄 책임자
전문가 2	스마트 연구실 자동화 기술 연구 담당자
전문가 3	연구 데이터 플랫폼 담당자
전문가 4	데이터 기반 소재/소자 디자인을 위한 AI 모델링 담당자
전문가 5	연구 데이터 해석 및 제일 원리 계산 담당자

- 플랫폼 구축을 위한 서버 등의 고성능 컴퓨터 장비가 필요

▣ 세부과제3(실험실 자동화를 위한 AI로봇 기반기술) 사업비 산출근거

[스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축 (세부 1)]

- 지능형 스마트 연구실 센서/데이터 인프라 구축을 위한 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기초 투자를 반영할 필요가 있음.
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 5억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 센서/데이터 인프라 구축 비용으로 기자재 분야에 대한 재료로 1억원/년로 추산됨
- (재료비) 본 과제의 추진에 따른 센서 및 데이터 처리 및 시스템 구축을 위한 서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.
- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 0.6억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 4명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 2.4억원/년 규모가 됨.

전문가 1	빅데이터/ 데이터 사이언스 전문
전문가 2	인공지능 설계 및 활용 전문가
전문가 3	IoT/계측 제어 전문가

[스마트 연구실 로봇 인프라 구축 (세부 2)]

- 본 과제의 필요인력은 약 15명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 과학기술정보통신부에서 지원하는 이론/계산 그룹의 평균 연구비는 1억원/년 규모로, 이를 본 과제에 환산하면 10억원/년 규모가 됨

전문가 1	생성 모델 학습 전문가
전문가 2	인식 모델 학습 전문가
전문가 3	시뮬레이션 및 그래픽스 전문가
전문가 4	멀티모달센서 특성 분석 및 정합 기술 전문가
전문가 5	광학적 특성에 따른 물체 분석 기술 전문가
전문가 6	멀티모달센서 기반 캘리브레이션 전문가
전문가 7	깊이 추정 딥러닝 모델 전문가
전문가 9	다중 센서 융합 및 3차원 모델링 전문가
전문가 10	가상현실 시뮬레이션 시스템 전문가
전문가 11	로봇손 내장 촉감 센서 및 역감 센서 전문가
전문가 12	다지형 로봇손 기구/전장 설계 및 통합 전문가
전문가 13	로봇손목 메커니즘 설계 및 제어 전문가
전문가 14	이동형 카메라 비전 정보 기반 물체 및 환경 인식 전문가
전문가 15	적응형 파지/조작 전략 개발 전문가

[AI·로봇 기반 스마트 연구실 모듈화 (세부 3)]

- 지능형 실험실의 물리적 및 가상 구현을 위한 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기초 투자에 대한 비중이 높을 것으로 예상됨
 - 유연성/확장성 높은 Robot 시스템을 기반으로 한 Hardware 구축 비용

- 외부 전문 자동화/로봇 실무 인력과의 협업 프로젝트 비용
 - 방대한 실험 데이터 관리를 위한 Server 구축 비용
 - 모듈형 실험/분석 시스템 구축 비용
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 10억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 실험실 구축 비용으로, 로봇 하드 웨어, 제어 시스템, 자동화 이동 장치, 광학기반 분석 장치, 디지털 소결 장치, 지능형 실험실 데이터 처리용 서버 등 연간 5억원
- (재료비) 본 과제의 추진에 따른 대상 고체 소재 시약 비용, 인공 지능 연구 관련 서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.
- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 1억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 8명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 3억원/년 규모가 됨.

[실존 실험실 개발 비용]

전문가 1	Robotics 전문가
전문가 2	빅데이터/ DB Management 포함 전문가
전문가 3	인공지능 전문가
전문가 4	IoT/계측 제어 전문가
전문가 5	실험 자동화 전문가
전문가 6	실험 공정/설계 전문가
전문가 7	디지털 소결 기술 전문가
전문가 8	스마트 연구실 분석 전문가

[디지털 트윈 기반 스마트 연구실 지능화 (세부 4)]

- 디지털 트윈을 위해 실제 자율 운행 실험을 재현할 수 있는 실·가상 연구실 환경 구축에 기초 투자에 대한 비중이 높을 것으로 예상됨
 - 센서, 실험기구, 로봇 등 플랫폼 검증을 위한 스마트 실험실 환경 구축 비용
 - 연구실 내부, 실험기구, 로봇 등 시뮬레이션 가능한 3차원 모델링 비용
- (전체) 연구 목표 달성을 위한 예상되는 연구기자재비, 재료비, 활동비, 과제 핵심 전문가 및 전문 연구 인력 인건비에 근거하여 10억원/년 규모의 사업비를 추산함
- (장비비) 스마트 연구실 구축 비용으로, 로봇 하드 웨어, 제어 시스템, 자동화 이동 장치, 지능형 실험실 데이터 처리용 서버 등 연간 5억원
- (재료비) 본 과제의 추진에 디지털 트윈 시뮬레이션, 인공 지능 연구 관련 서버/GPU 구입이 필요하며, IoT관련 부품 구매 등으로 고려 시, 1억/년 규모로 추산됨.
- (활동비 및 추진비) 본 과제 관련 국내외 학회 활동 및 제반 연구 과제 추진 비용과 산업체 핵심 인력을 통한 용역 등을 포함하여 1억원/년 규모로 추산.
- (인건비) 본 과제의 필요인력은 약 8명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 각 연구책임자가 투입할 수 있는 연구 인력이 통상 2-3인 연구원임을 고려시, 3억원/년 규모가 됨.

전문가 1	Robotics 전문가
전문가 2	빅데이터/ DB Management 포함 전문가
전문가 3	인공지능 전문가
전문가 4	디지털 트윈 전문가
전문가 5	XR 인터랙션 전문가
전문가 6	자연어 처리 전문가
전문가 7	시스템 통합 전문가
전문가 8	연구실 플랫폼화 전문가

4.3. 운영 계획

▣ 인력 운영 계획

분야별	1단계			2단계			총계
	'22	'23	'24	'25	'26	'27	
나노입자 AI 스마트 연구실 연구단	10	10	10	10	10	10	60
페로브스카이트 AI 스마트 연구실 연구단	-	13	13	13	13	13	65
소재 합성 평가 완전 무인화 기반기술 연구단	-	34	34	34	34	34	170
총 계	10	57	57	57	57	57	300

- 소재, AI, 로봇 분야의 균형있는 연구 인력 투입을 통한 융합 연구 효율성 확보 및 전문 연구 인력 확보
 - 각 연구단의 각 분야별 인력을 연차별 지속적으로 투입함으로써 소재, AI, 로봇 분야를 융합한 전문 인력이 양성될 수 있도록 운영함
 - 연구단 간 인력의 상호 교류를 통한 분야별 전문성뿐만 아니라 융합 능력을 갖춘 인재를 양성할 수 있도록 인력을 운영함
- 나노입자 합성·물성 측정 AI 스마트 연구실에 필요한 전문 인력 투입을 통한 효과적인 자동화 및 장치 기술 개발
 - 나노입자 설계 및 최적화 AI 기술을 개발하기 위하여 나노입자의 합성 및 물성 측정할 수 있는 인력과 플랫폼 데이터 기반 AI기술을 활용할 수 있는 전문가를 통해 소재 분석 자동화할 수 있도록 연구단 운영
- 페로브스카이트 태양전지용 AI 스마트 연구실에 필요한 인력 양성 및 최적화 기술 개발
 - 태양전지용 셀 제작·측정을 위한 인력을 연차별로 효과적으로 투입함으로써 차세대 페로브스카이트 태양전지의 경쟁력 확보할 수 있도록 함
 - 태양전지 분야 전문가 및 AI 전문가와의 지속적인 협력 체계 마련을 통한 효과적인 데이터 분석 및 최적화 관련 인력 운영

- 무인 자동화된 연구실 구축을 위한 AI 로봇 연구단의 융합 연구 인력의 효과적인 운영
 - AI 로봇 기술을 활용하여 실험실 환경의 자동화 및 지능화될 수 있도록 AI 및 로봇 기술 연구자간의 융합 연구가 유기적으로 이루어질 수 있도록 인력을 운영함
 - 타 연구단의 나노입자 및 태양전지 소재 개발을 위한 설계 및 최적화가 원활하게 이루어질 수 있도록 타 연구단과의 협력 관계를 유지할 수 있도록 인력 운영
 - XR 기술을 활용하여 사용자가 몰입도를 높일 수 있는 환경을 제공하기 위한 HCI 관련 연구자 및 전문가와의 효율적인 협력 체계 마련

5. 타당성 분석

5 타당성 분석

5.1. 정책적 타당성 분석

5.1.1. 사업추진의 시의성

- ◆ 감염병, 자연재해 등 불확실성으로 인한 쏠 사회적인 디지털 전환 흐름을 공정의 연속성을 함유한 소재 개발 실험실도 피할 수 없음
- ◆ 주요국들이 최근 투자하기 시작한 소재 개발 “가속화”에 발맞추지 않으면 추후 미래 사회의 하드웨어 구현 및 시장 확보에 치명적 타격 예상

▣ 포스트 코로나 시대의 디지털 전환 가속화

- 4차 산업혁명 시대의 대표적 ICT 기술들인 D(데이터).N(네트워크).A(인공지능, AI)가 他 과학기술 및 산업영역으로 확산하며 그것들을 변화시키고 있음
- 이러한 사회적 혁신을 “디지털 전환(digital transformation, DX)”이라고 부르며, 기반 기술인 D.N.A의 발전은 디지털 전환을 더욱 가속화 할 전망
- 최근 코로나-19의 전 세계적 대유행 영향은 인류 생활 전반의 비대면 디지털 전환을 위한 기폭제가 되었음
 - 디지털 전환을 위한 기반 기술들은 이미 상당한 수준이었으나, 이를 현장에 적용하여 비대면 환경을 실현하기 위한 노력이 불필요했었다고 볼 수 있음
 - 코로나-19 이외에도 다른 감염병, 기후변화 등 자연재해로 인한 불확실성의 크기와 빈도 또한 시간이 갈수록 증가할 것으로 보임

【코로나-19 이후 화상회의 앱 다운로드 횟수 증가】

※ '20년 3월 셋째 주 다운로드 횟수가 '19년 4분기 주간 평균의 몇 배인지 계산한 수치

국가	Google Hangouts	Zoom Meetings	Microsoft Teams
미국	30	14	11
영국	24	20	13
프랑스	23	22	16
독일	15	17	11

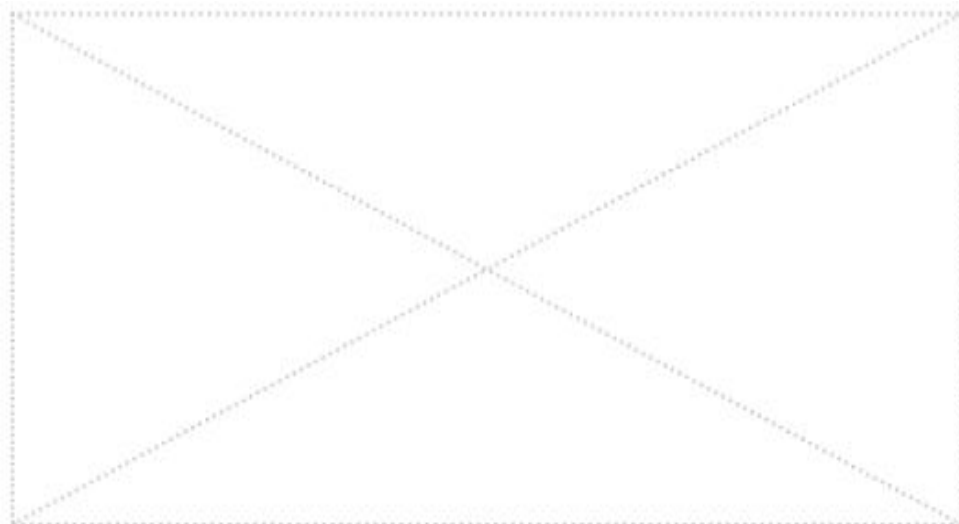
출처 : OECD 「OECD Digital Economy Outlook 2020」, '20.11 / 과기정통부 「22년도 국가연구개발 투자방향 및 기준」,

- 소재 개발이 이루어지는 실험실도 다수의 연구자가 모여 일하는 환경이 대부분이기에 이러한 불확실성 문제와 디지털 전환을 위한 노력을 피할 수 없음
 - 특히 단순 “물리적” 조립이나 제조와 달리, 소재 개발의 경우 “화학적” 반응에 기반한 경우가 많으므로 공정에서 “연속성”을 요구하는 경우가 많음
 - 따라서 감염병 등의 이유로 실험실에 사람의 개·출입이 불가하여 소재 공정이 단절될 시, 그로 인한 경제·시간적 매몰 비용이 필수적으로 발생
- ※ '국가보안기술연구소' 연구자 코로나19 확진, 연구소 4일까지 폐쇄(헬로디디, '20.9.3.) : UST, 한국원자력연구원 등 대덕특구 내 다른 연구기관들의 과거 코로나19 확진자 소식도 포함

▣ 소재 가속화 플랫폼 연구에 주요국 투자가 초기 단계 : 지금이 기회

- 소재 개발에는 장기적(10~20년) 대규모의 투자가 필요하다는 것이 연구자들의 공통적 의견이며, 실제로 상용화에 성공한 소재의 사례들도 이에 상응함
 - 이러한 투입의 어려움에도 불구하고 다행히 소재 개발은 원재료의 고부가가 치화가 이뤄지며, 기업 간 높은 경로의존성으로 인해 시장 선점에도 유리
- 미래 사회에서 소재는 하드웨어적 요소를 차지하기에 다양한 분야와 장소에서의 신규성, 원천성, 극한성이 더욱 요구될 것임

【소재 예시별 개발에서 적용까지의 소요 시간】



출처 : Cyrus Wadia '12. / KISTEP 「창의소재 디스커버리 사업 예비타당성 조사보고서」, '14.8

- 경험 의존적 방법을 계속하여 사용할 시, 이러한 요구 조건들을 만족하는 소재를 개발하려면 더욱 많은 시간과 자금력이 필요하다는 결론에 이름
- 이러한 문제 해결을 위해 공감대를 형성한 주요국들은 소재 개발을 “가속화”를 목적으로 디지털 전환 및 스마트 실험실 구축 관련 투자를 최근 시작함
 - (캐나다) 스마트 소재실험실 주도국인 加 정부는 “재료 혁신을 위한 자율 발전 가속화”라는 명칭의 프로젝트를 ‘18년부터 진행
 - ※ 총사업비 약 12백만 달러(국비 8백만 달러), British Columbia 大 주관
 - ※ “ADA”라는 최신 AI 로봇 플랫폼을 구축하여 고효율·저비용 태양전지 소재 개발 및 최적화를 시범적으로 진행
 - (미국) 美 NSF는 “소재 혁신 플랫폼”이라는 경쟁형 프로그램 도입
 - ※ 1차(‘15년) : 대량 및 박막용 결정형 경질 재료 개발에 집중
 - ※ 2차(‘19년) : 신소재 개발을 위한 재료연구와 생명과학의 융합
 - (인도) 인도 정부는 ’20년 9월까지 관련 연구제안서 접수
 - ※ 소재 가속화 플랫폼 구축 과제에 최대 3년 이내로 제안 요구(他 국가와 협업도 가능)
 - ※ 주관기관에 연구 결과가 실용화로 이어질 수 있는 전략 요청
- 따라서 이런 소재 개발 가속화를 위한 주요국들의 흐름에 지금 바로 함께하지 않는다면, 미래 사회 구현에 사용될 소재 개발 및 시장 확보에 치명적 어려움이 발생할 것으로 예측됨

5.1.2. 정부 지원의 필요성

- ◆ 『22년 국가연구개발 투자방향 및 기준』의 ICT·SW 및 소재·나노 분야에서 동 사업과 관련된 지속 지원·확대가 다수 언급되어 정책적 부합성이 높음
- ◆ 신소재 개발은 실패 확률이 높기에 정부가 디지털 전환을 통한 가속화에 투자하여 시장을 지원하고, 장기적으로는 경제·시간적 비용을 절감할 필요

■ 정책적 측면 : 소재 신연구방법론 분야 신규사업 기획과 지원의 필요성

- 정부는 『22년도 국가연구개발 투자방향 및 기준』의 “10대 중점 투자 방향”에서 동 사업의 목표인 소재 연구의 DX 패러다임 전환과 관련된 내용을 여러 번 제안
 - (미래소재 기술개발) “소재·부품·장비 경쟁력 강화 및 미래 공급망 창출”에서 혁신소재 원천기술 개발을 위한 데이터·AI 기반 소재 연구체계 투자 확대를 언급
 - (D.N.A 생태계 전 산업 융합 확산) “D.N.A 기반의 디지털 경제 전환 촉진”에서 5G·AI·클라우드 기술의 활용을 지원하여 전 산업의 디지털화 가속 유도
- 같은 안건의 “2022년도 기술 분야별 투자전략”에서도 디지털 기술의 활용을 통한 소재 연구개발 가속화에 연관된 투자 방향 지속 언급
 - (디지털 전환 촉진) ICT·SW 분야에서 디지털 뉴딜·전환을 촉진하는 핵심기술을 고도화하고, 비대면·콘텐츠 서비스 창출을 통한 산업생태계 강화를 제시
 - ※ 특히 중장기 경쟁력 확보를 위한 차세대 인공지능, 미래 SW·컴퓨팅·클라우드 기술과 관련
 - (연구방법론 혁신) 소재·나노 분야에서 데이터·AI·자동화 기반 소재 연구방법론 혁신을 위한 투자를 통해 기술개발 시간·비용의 획기적 절감 추진을 강조
 - ※ 데이터 활용 성공모델 창출을 위한 선도프로젝트, 스마트 재료연구실 구축 등 신규 지원을 명시
- 이렇게 D.N.A 기술과 소재 연구개발과의 융합기술 영역을 창조하고, 이를 통해 소재 개발을 가속화하는 방식을 “소재 신연구방법론”이라고 일컬음
 - 소재 신연구방법론은 ICT 기술을 활용한 데이터(소재 정보기술), 계산재료과학(AI 및 알고리즘), 조합실험법(소재 개발 실험 자율화)을 통틀어 아우르는 기술 분야를 의미
 - ※ 한국과학기술기획평가원 (2014). '창의소재디스커버리 예비타당성조사 보고서'에 명시된 정의

참고

- 현재 소재 신연구방법론 분야를 지원하는 정부 R&D 사업은 과학기술정보통신부의 “미래소재디스커버리지원”이 유일하나, '24년 종료 예정
 - 미래소재디스커버리지원 사업은 예비타당성조사를 통과하여 총사업 기간 '15년~'24년에 총사업비 3,066억원을 28개 연구단에 지원하는 사업으로, 사업 내 과제 물량·단가가 확정된 형태
 - 따라서 동 사업을 통해 소재 신연구방법론 분야를 지속 지원하는 것은 힘들며, (가칭) 미래소재크리에이션*과 같은 후속 사업이 기획 중인 것으로 예상되나 사업 규모나 세부 지원 분야를 정확히 파악하기 어려움
 - * 「데이터 기반 소재연구 혁신허브 구축·활용방안」('20.10, 관계부처 합동)에서 간단히 언급
- 종합하자면, 소재 신연구방법론은 소재 연구개발의 디지털 전환을 담고 있는 분야이고 '22년도 국가연구개발 투자방향 및 기준에도 지원의 필요성이 여러 차례 언급되었으나, 이와 관련된 정부 R&D 사업이 부족한 상황
- 따라서, 소재 연구방법론 혁신과 직접적인 관련이 있는 동 사업의 신규 지원을 통하여 미래소재디스커버리 사업 종료 후 발생할 수 있는 투자 공백을 사전에 방지함과 동시에 정책-사업 간의 연결고리를 강화할 필요

■ 경제·산업적 측면 : 실패 확률이 높은 신소재 개발 영역엔 정부 지원이 절실

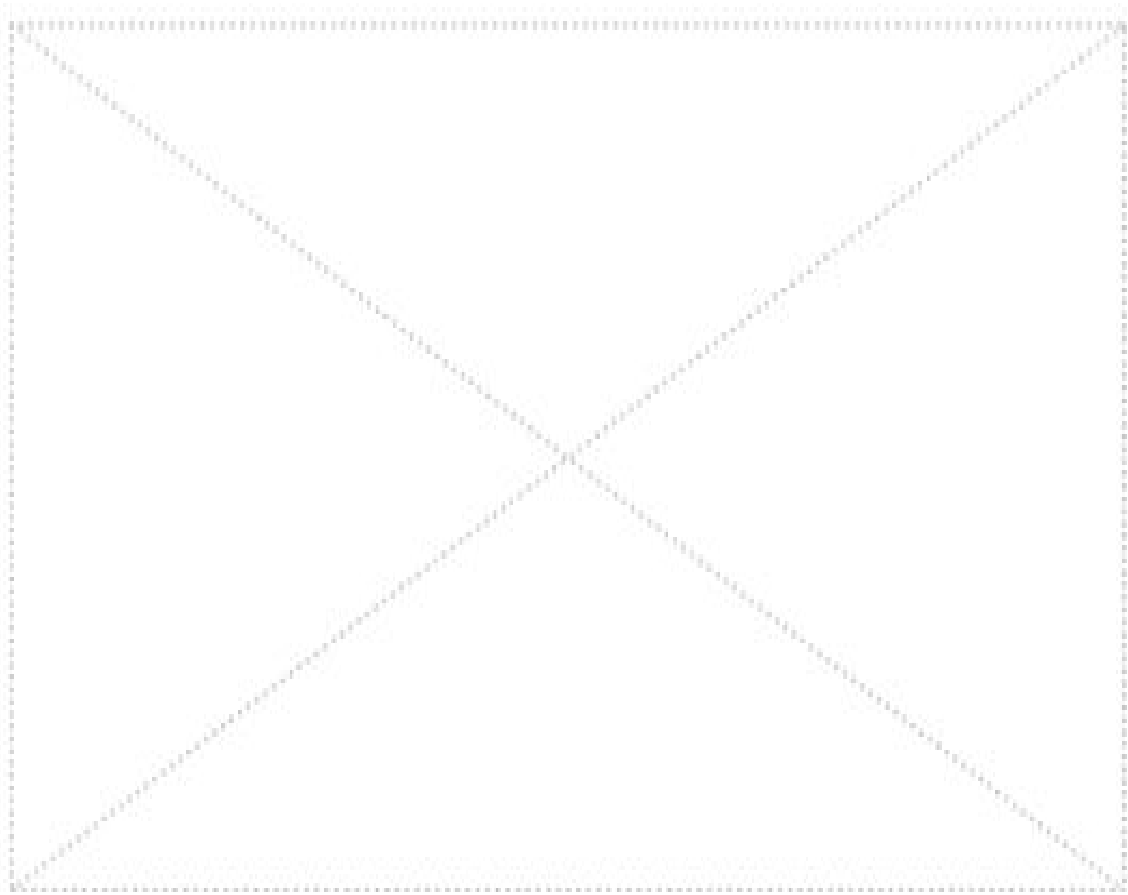
- 신소재 영역은 기술개발 초기에 많은 자본과 시간 투입이 꼭 필요한 분야이며, 기초·원천 기술개발 이후에도 실증과 상용화 단계를 거쳐야 하므로 경제적 이윤이 창출되기 어려움
 - 1950년대에 유기물에서 전기발광 현상이 최초로 발견된 이후, 40년이 지나서야 OLED 디스플레이로 소재가 상용화
 - 일본의 주식회사 닛폰 제온은 합성고무 신소재 연구의 개시 → 출시(제품화) → 흑자실현까지 12년이 소요('88~'00년까지 400억엔이 넘는 누적 적자를 기록)
 - 일본의 주식회사 신닛테쓰화학은 휴대폰용 2층 CCL기판 ‘에스파넥스’를 개발하여 세계시장의 60%를 점유하고 있으나, '86년 파일럿 플랜트를 가동해서 '99년 흑자로 전환하기까지 13년이 소요
- 하지만 추후 소재 상용화까지 성공할 경우, 산업의 고부가 가치성 및 밸류체인

의존성으로 인하여 시장에 진입할 시 지속적이고 안정적인 이윤 생산 가능

- 최근에는 제품 원가 중 소재의 비중이 증가하는 추세* 또한 관찰되어 소재 자체의 고부가 가치성 및 밸류체인 의존성이 더욱 증가할 것으로 예측

* 태양전지(82%), LCD(55%), 리튬 2차전지(53%) 등

- 또한 원료나 기초·원천소재의 경우, 다양한 복합소재 및 제품의 구성요소가 될 수 있기에 그 산업적 파급력이 매우 큼



【 불소 소재 원료의 산업적 파급효과 】

- 게다가, 소재 R&D의 패러다임이 과거 소재 연구데이터 단순 수집에서 ‘15년 기점 신소재 탐색·설계로 변화하여 연구 기간 단축 및 경제적 효과 발생 예측

- 분야별 소재 개발 기간 10~60% 단축, 신소재 탐색부터 적용까지 R&D 기간 평균 3.5년 단축, 연간 R&D 비용 평균 564억 달러 절감 및 R&D 성과 1,514억 달러 향상이 예상*

* 출처 : RTI International (2018). 『Economic Analysis of National Needs for

Technology Infrastructure to Support the Materials Genome Initiative』

- 따라서, 실패 확률이 높으나 고부가가치의 영역인 신소재 개발을 정부가 디지털 전환을 통한 가속화 플랫폼 정책·사업으로 지원해야 하며, 이는 기술 패권 전쟁에서 게임체인저가 될 수 있는 기회임
 - 이미 소부장 관련 수출규제로 우리의 밸류체인에 타격을 주었던 일본, 희토류 등 자원 기반으로 강점을 확보한 중국 등과의 소리 없는 경쟁이 지속될 전망
 - 정부 R&D 사업으로 개발된 “플랫폼” 기술은 태생적으로 공공성을 지니기 때문에, 동 사업에서 추진하고자 하는 소재 개발 가속화 플랫폼의 경우에도 보안이 중요한 기업의 R&D 결과물과 달리 관련 기술의 저변 확산 가능

5.1.3. 국가 중장기 R&D 계획의 부합성

- ◆ 동 사업의 목표는 문재인 정부 100대 국정과제 및 제4차 과학기술기본계획의 미래산업 육성 및 주력산업 제도약 관련 정책과제들과 부합
- ◆ 제4차 소재부품발전기본계획과 4차 산업혁명 대응계획 내 과제인 소재·부품 인프라의 미래형 전환과 성장동력 기술력 확보가 동 사업과 연결성이 있음

■ 문재인 정부 100대 국정과제 중 미래형 신산업 및 주력산업 제고와 부합

- (과제 34) “고부가가치 창출 미래형 신산업 발굴·육성”
 - (첨단기술 산업) 융복합 추진전략 마련, 반도체·디스플레이·탄소 산업 등 4차 산업혁명 대응에 필요한 첨단 신소재·부품 개발
 - * 지능형 로봇, 3D프린팅, AR·VR, IoT가전, 스마트선박, 나노·바이오, 항공·우주 등 첨단 기술 산업 육성을 위해 R&D 및 실증·인프라 구축 지원
 - (미래 성장동력) 추격형에서 선도형 경제로의 경제 패러다임 전환을 위해 미래 성장동력 발굴·육성 가속화 추진
- (과제 38) “주력산업 경쟁력 제고로 산업경제의 활력 회복”
 - (소부장 강국도약) 소부장 경쟁력 강화 대책(’19년) 및 2.0전략 수립(’20년) 등으로 핵심품목의 공급 안정화, R&D 집중투자, 협력 생태계 조성 등 추진

■ 제4차 과학기술기본계획('18~'22)도 첨단기술 산업과 제조업 재도약 관련 과제에서 부합하여, 100대 국정과제와 부합 형태가 유사

○ (과제 12) “국민이 체감하는 혁신성장동력 육성”

- 첨단기술 산업 분야 국가경쟁력 강화를 위해 반도체, 디스플레이, 웨어러블 디바이스, 탄소 소재 등 미래 유망분야 기반 강화에 필요한 신소재·부품 산업 고도화

○ (과제 13) “제조업 재도약 및 서비스업 육성”

- 소부장 분야 핵심기술 확보 및 전문기업 육성을 목표로 미래 신산업 창출을 촉진할 나노·소재 핵심 원천기술 개발* 및 나노융합기술 상용화** 성과 창출

* 뇌신경 모방칩 등 기존 기술 소형화·고집적화, 스마트소재 등

** '22년까지 나노분야 기업매출 1조원 달성 및 원천소재 특허 포트폴리오 5건 확보

■ 제4차 소재부품발전기본계획('17~'21)과 부합하며, 특히 소재·부품 인프라의 미래형 전환에 대하여 명시

○ (과제 1) ‘25년까지 100대 新소재·부품 기술개발

- 4차 산업혁명 대응(50개) 및 주력산업 고도화 뒷받침(50개)을 위한 기술개발

○ (과제 4) 소재·부품 인프라를 미래형(virtual)으로 전환

- 부처 간 협업으로 빅데이터 플랫폼 구축·활용
- 가상공학 플랫폼을 통해 소재·부품 개발 기간·비용 단축*

* 계산과학 방법론에 대한 기술개발 추진('16~), 계산과학 플랫폼 구축('17~) 등 구체적으로 명시

■ 4차 산업혁명 대응계획('17.11)과 부합하며, 19대 미래성장동력과 9대 국가전략 프로젝트 연계·통합 기술분야(안)으로 첨단소재 제안

○ (과제 2) 성장동력 기술력 확보

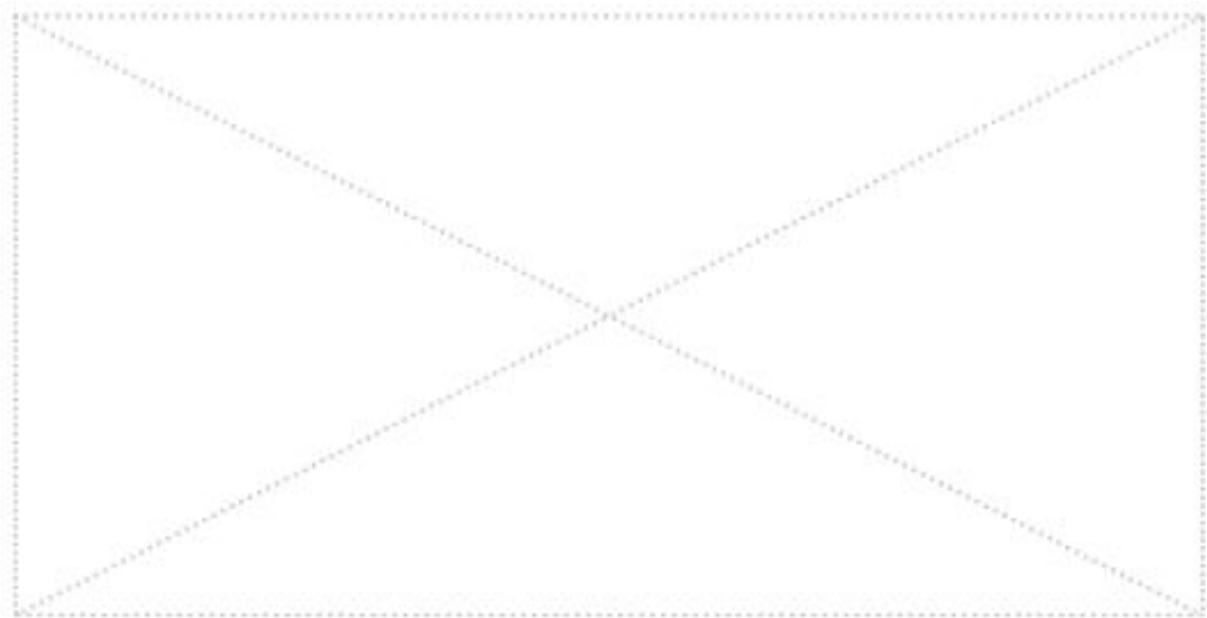
- 소자, 센서·IoT, 디스플레이 등 4차 산업혁명 기반 하드웨어의 초고속화·대용량화·저전력화를 위한 나노·소재 선도연구 강화 및 원천기술 확보

※ 2차원 소재(그래핀 등), 양자점 소재, 에너지 관련 소재 등 나노소재 동반 개발을 통한 나노 소자나노시스템 기술 실현

※ AI·빅데이터·IoT와 융복합화가 가능한 미래소재 개발 등

- 19대 미래성장동력과 9대 국가전략프로젝트를 연계·통합*하여 지속 지원하고, 4차 산업혁명을 고려하여 추가 발굴

* (통합안) 자율주행차, 빅데이터, 맞춤형헬스케어, 스마트시티, 가상증강현실, 지능형로봇, 고기능무인기, 차세대통신서비스, 첨단소재, 지능형반도체, 혁신신약, 인공지능, 신재생에너지



【중장기 R&D 계획 - '22년 투자방향 - 동 사업 간의 연계성】

5.1.4. 기존 사업과의 차별성 및 연계성

- ◆ 과기정통부가 지원 중인 미래소재디스커버리지원 사업 및 소재 연구데이터 플랫폼 구축사업과 비교했을 때, 동 사업은 AI(SW)와 HW의 “연결”을 통한 소재 개발 실험 “자율화” 측면에서 차별성이 부각
- ◆ 동 사업을 통해 “생성”된 소재 데이터는 소재 연구데이터 플랫폼에 “저장”될 수 있으며, 또한 AI 개발에 적합한 플랫폼 내 데이터를 동 사업에서 “활용”하는 형태로 연계 가능

■ 동 사업과 유사·중복 검증이 필요한 사업으로는 미래소재디스커버리지원 및 소재 연구데이터 플랫폼 구축사업이 있으나, 충분한 차별성 및 연계성 확보가 가능

【 기존 사업과의 차별성 및 연계성 】

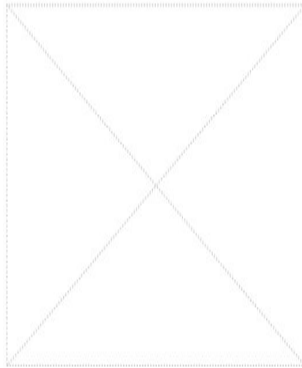
구분	AI 스마트 소재연구실 구축사업	미래소재 디스커버리지원 (과기정통부)	소재 연구데이터 플랫폼 구축사업 (과기정통부)
총 사업비	329억원 (국비 329억원)	3,066억원 (국비 3,066억원)	225억원 (플랫폼 115억원, 인프라 110억원)
총 사업 기간	‘22~‘26(5년)	‘15~‘24(10년)	‘20~‘28(7.5년)
연구기간	3+2년(2단계 구성)	6년	과제당 상이
연구비 (과제당)	약 26억/년	15-25억/년	과제당 상이
사업 목적	AI·데이터+로봇 등을 융합한 지능형 소재개발 플랫폼을 통해 소재 R&D 시간·비용의 획기적 감소 및 신소재 개발 가속화	미래소재 확보를 통한 미래 신산업 육성 및 소재 강국 실현	소재 연구데이터 수집·관리·활용 플랫폼 구축 및 데이터 기반 혁신적 소재 연구개발 방법론 제시
사업 내용	▶(과제1) 촉매 및 디스플레이 나노입자용 AI 스마트연구실 개발 ▶(과제2) 페로브스카이트 태양전지용 AI 스마트연구실 개발 ▶(과제3) 소재 합성·평가의 완전무인화를 위한 AI 로봇 기반기술 개발	新연구방법론을 활용하여 새로운 물성과 기능을 구현하는 신소재 개발 및 미래소재 원천특허 확보	▶소재 연구데이터 수집·관리· 공유·활용 플랫폼 구축 및 운영 ▶소재 연구데이터 플랫폼 서비스용 하드웨어 인프라 구축 및 운영
추진방법	출연(연) 주도	학·연 주도	출연(연) 주도
성격	기초·원천(TRL 1-5)	기초·원천(TRL 2-6)	기초·원천(TRL 3-5)
차별성 및 연계성	▶과제1,2(실증형)과 여기에 기반기술을 제공하는 목적인 과제3(플랫폼형)으로 구성 ▶순환고리형 소재 실험실 자율화를 위해 AI와 HW 기술고도화 내용을 포함 ▶소재 연구데이터 플랫폼 구축사업과의 연계 추진	▶신연구방법론을 통한 소재 발굴과 특허 확보에 중점 ▶데이터와 계산과학적 방법을 활용하지만, 실험실 자율화를 위한 AI나 HW 개발은 강조되지 않음 ▶축적된 소재 데이터의 수집 및 활용 체계 마련이 부족	▶에너지·환경 소재, 스마트·IT 소재, 안전(구조) 소재로 총 3개의 분야별 데이터 센터 구축·운영에 역점을 둔 사업 ▶소재 개발 AI와 HW의 연계를 통한 실험 자율화 내용 미포함 ▶관련 하드웨어 구축도 데이터 저장·활용 인프라만을 의미함

5.2. 경제성 분석

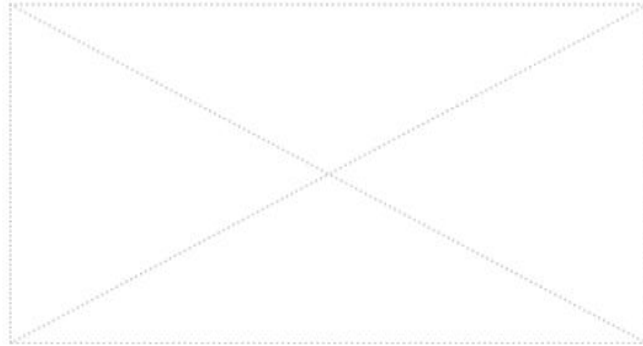
▣ ‘AI 로봇’ 기술의 세계 시장

※ 출처. ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) Market by Robot type (Service, Industrial), Offering (GPU, MPU), Technology (Machine Learning, Computer Vision), Application (Public Relations, Stock management), and Geography – Global Forecasts to 2023

- ‘AI 로봇’ 세계 시장은 2018년 \$34.9억에서 2023년 \$123.6억까지 연평균(CAGR) 28.78%씩 성장할 전망
 - 예측기간 가장 높은 성장률을 보이는 지역은 아시아(30.65%)로, 중국(33.72%), 일본(30.66%), 한국(28.52%) 순

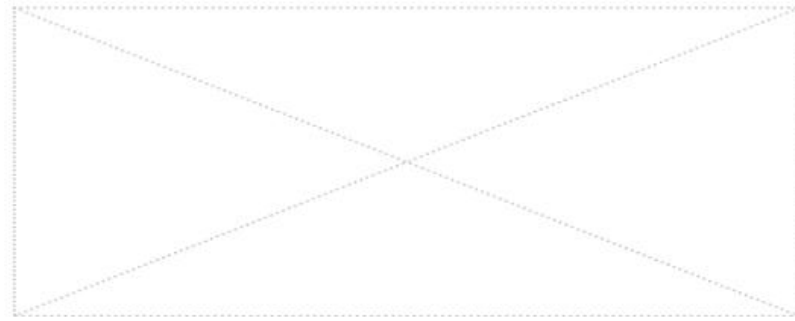


[AI 로봇시장 성장률]



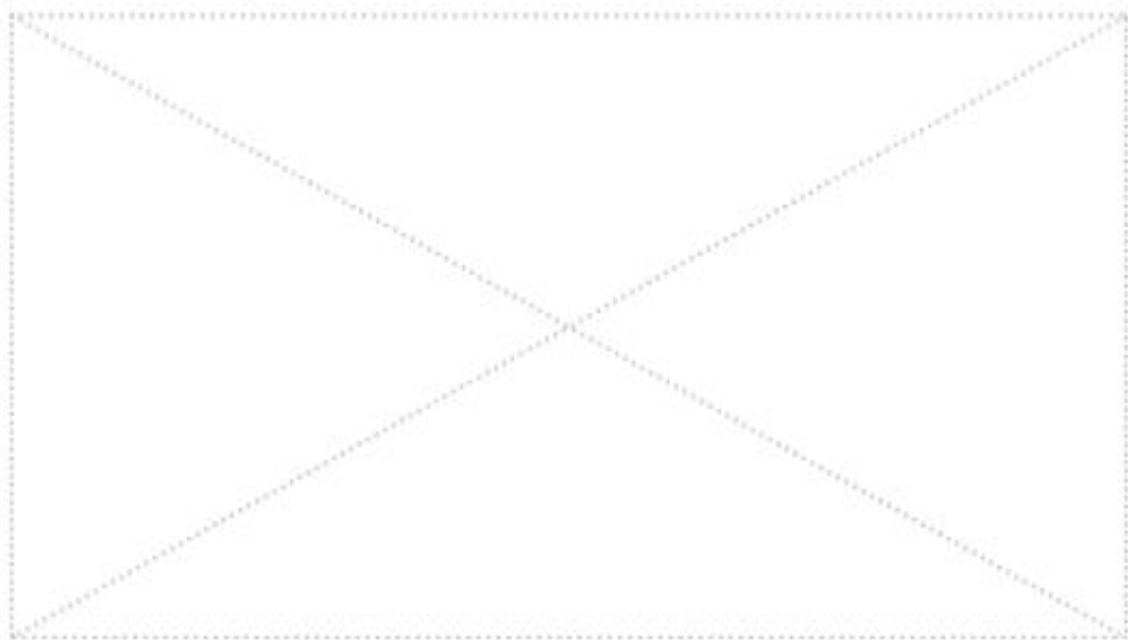
[’18년~’23년 AI 로봇시장의 지역별 점유율 및 CAGR]

- AI 로봇 시장은 교제(companionship)와 오락(entertainment) 같은 개인적 용도에 대한 로봇사용 증가가 바탕이 되어 성장할 전망
 - 전 세계적으로 증가하는 노령인구도 노인 지원 응용 프로그램들에 대한 AI 기반 서비스 로봇의 수요를 증대시키고 있음
- AI 로봇시장을 기술적 측면에서 살펴보면, 머신러닝, 상황이해(Context Awareness), 자연어처리(Natural Language Processing), 컴퓨터 시각인식(Computer Vision)으로 나눌 수 있음
 - 시장점유율은 머신러닝 시장이 49.6%로 가장 높으며, 성장률(CAGR)은 컴퓨터 시각인식(34.63%), 머신러닝(30.31%), 상황인식(27.73%), 자연어처리(25.35%) 순으로 예상



[AI로봇 기술별 CAGR]

- AI 로봇 기술의 사용 분야는 군사 및 국방(Military & Defense), 주식관리 (Stock Management), 개인지원 및 간병(Personal Assistance and Caregiving), 교육 및 엔터테인먼트(Education and Entertainment), 실험 및 우주탐사(Research and Space Exploration) 등으로 나눌 수 있음



[AI로봇 사용에 대한 연도별 시장규모 및 CAGR (단위 : USD Million)]

- 주식관리와 공공장소에서의 첩외(public relations)가 각각 15%와 12.3%로 전체 시장의 상위 30%를 차지할 것으로 예측되고 있으며, 성장률 역시 전체 시장 성장률(28.78%)을 웃도는 36.45%, 31.24%로 예측
- 실험 및 우주탐사용(Research and Space Exploration) AI 로봇 역시 30.38%로 성장할 것으로 예측되어 전체시장 성장률을 웃도는 유망한 시장이 될 것으로 전망

○ AI로봇기술 시장의 정성적 분석

Drivers	<ul style="list-style-type: none"> • 교제 및 엔터테인먼트와 같은 개인용 로봇의 높은 사용률 • 최신기술 개발을 위한 전세계 정부의 지원 	<ul style="list-style-type: none"> • 새로운 기술채택에 대한 꺼림 • 네트워크로 연결된 자율로봇과 관련된 위험을 방지하기 위한 표준화된 규제 부족 	Restraints
Opportunities	<ul style="list-style-type: none"> • 일하고 가치를 더하는 특수 응용 사례를 가진 로봇개발 강조 • 전 세계적인 고령 인구증가로 노인 지원 로봇에 대한 AI기반 수요증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 더 나은 의사결정을 하고 인간에게 안전한 로봇을 위한 AI개발 • 로봇을 상업화하기 위해 장시간 요구 	Challenges

[AI 로봇 시장의 동인/제약/기회/도전성 분석]

▣ ‘AI 실험로봇 및 스마트 연구실’ 기술개발의 경제성

< 연구 등을 위한 AI로봇시장 전망 >

(단위 : 억원, 환율: 1,200원 적용)

항목 \ 연도	2020	2021	2022	2023	CAGR
연구용 AI 로봇시장	6,164.4	8,037.1	10,478.8	13,662.3	30.38%

- 연구용 AI로봇 시장은 2020년 약 6,164억원에서 2023년 약 1조 3천억원까지 연평균(CAGR) 약 30.4%의 급격한 성장을 기대
 - 관련 전문가의 예측에 따르면, 향후 본 사업을 통해 개발된 신물질 개발용 AI 로봇기술은 연구용 AI로봇 전체 시장의 10%에 영향을 미칠 것으로 가정

< 기술개발을 통한 연구용 AI로봇시장 관련 예상 편익 >

(단위 : 억원, 환율: 1,200원 적용)

항목 \ 연도	2031	2032	2033	2034	2035	2036	전체 편익
세계 시장	97.8	127.5	166.2	216.7	282.6	368.4	1,259.2

- 본 사업의 기술개발을 통해 향후 연구용 AI로봇시장에 1,259억원의 편익(편익기간: '31년~'36년)이 예상되며, 이는 현재가치로 704.8억원에 달하며 B/C ratio는 1.72
 - 기술개발에의 투자금액은 총 485.6억원('22년~'27년)이며, 4.5%의 사회적 할인율※ 적용 시 현재가치로 410.9억원

※ 사회적 할인율 : 예비타당성조사 수행 총괄지침(제2판) (KDI, 2018)

※ 가치창출편익 = 세계시장규모 중 10%¹⁾ × 국내기업시장점유율²⁾(전체 시장의 9.4%) × 사업기여율³⁾(89.0%) × R&D기여율⁴⁾(35.4%) × R&D사업화성공률⁵⁾(46.0%) × 부가가치율⁶⁾(62.9%) (단, 환율 1,200원 적용)

1) 세계시장규모 : 본 사업의 기술개발은 이후 세계 시장의 10%에 영향을 미칠 것으로 추정.

출처. Artificial Intelligence(AI) Robots Market(MarketsandMarkets, 2018)

2) 국내기업시장점유율 : 본 사업의 기술개발이 이후 전체 시장의 9.4%를 점유할 수 있다고 가

정

출처. Artificial Intelligence(AI) Robots Market(MarketsandMarkets, 2018)

- 3) 사업기여율 : 본 사업의 투자금액(년 평균)^a을, 최근 3년('18년~'20년) 간 유사과제 투자금액의 평균^b(NTIS 과제 기준)과 본 사업 투자금액(년 평균)^a의 합으로 나눈 값 ($a/(a+b)$)
- 4) R&D기여율 : 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침, 2020
- 5) R&D사업화성공률 : R&D사업화를 통한 민간R&D투자 촉진방안 고용영향평가 연구 (고용노동부, 2015)
- 6) 부가가치율 : 2015년 산업연관표(한국은행, 2021)

5.3. 기대효과 및 활용방안

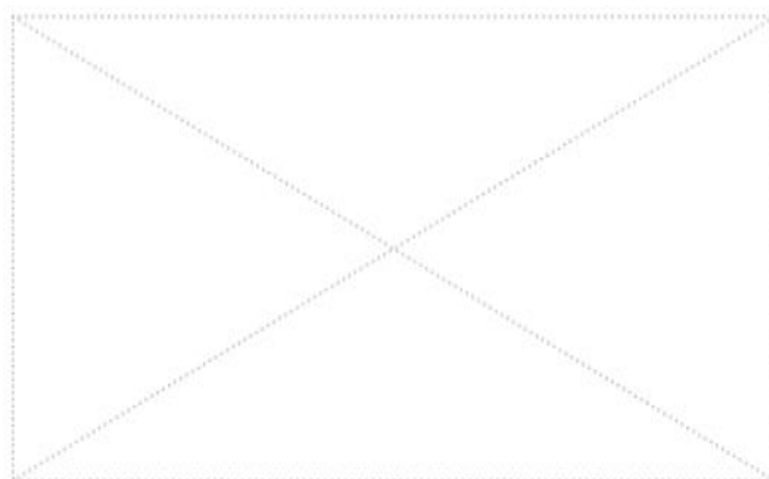
5.3.1. 과학, 기술적 측면

▣ 기대 효과

As-Is	To-be
<ul style="list-style-type: none"> • (시행착오 소재개발 방식) 신소재를 개발하기 위해 연구자가 무수히 많은 시행착오 실험과정을 거쳐야 함 • (계산-실험 간극 존재) 계산과학을 기반으로 소재설계 후 실험을 통해 소재개발 성공사례가 많이 발표되고 있지만, 현재 계산과학기술은 여전히 실험과의 간극 존재 (예, 계산과학이 제시한 소재가 합성이 되지 않는 경우 등) • (자동화 실험) 로봇 기술을 이용한 소재 연구가 진행 중이지만 주로 반복적 실험(예, 조합실험)의 효율성을 높이기 위한 자동화에 초점 • (동시에 다양한 성능을 갖는 소재 개발의 제약) 현재 계산과학 및 AI 기술을 통한 신소재 개발 연구는 주로 한, 두 가지 정도의 소재물성을 극대화 하는 연구 개발에 초점 • (AI 및 로봇 기술의 제한적 적용) 현재 AI 로봇 기술은 단순 반복적 실험에 제한적으로 활용되고 있기 때문에 다양한 분야에 맞춤형 적용에 한계가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • (4차산업혁명형 소재 R&D) AI 로봇이 스스로 소재 설계부터 합성·분석까지 수행하여 신소재 개발 (무인실험실 구현) • (계산-실험 간극 해소) 현재의 소재설계 방식은 기본적으로 소재의 ‘구조-물성’간의 상관관계에만 머물러 있어 실험-계산(이론)과의 간극이 존재하지만, AI 및 데이터 기반으로 ‘구조-물성-공정’간의 상관관계 규명이 가능하여 실험-계산간의 간극 해소 • (지능형 AI 로봇 실험) 자동화 로봇에 AI 기능을 부여하여, 로봇이 지능을 갖게 하고 AI 로봇 스스로 소재 개발이 가능 • (맞춤형 소재 개발) 소재를 상용화하기 위해서는 한, 두가지의 주요물성을 극대화 하는 것 보다는 여러 물성을 동시에 충족 시킬 수 있는 수요자 맞춤형식의 소재 개발 전략이 필요하고, 스마트 연구실을 통해 수요자 맞춤형 소재개발 가능 • (모듈화된 지능화된 실험실 환경의 표준화) 다양한 분야의 스마트 실험실 환경의 확산을 위하여 각 요소 기술의 모듈화 및 표준화하여 연구자 맞춤형 스마트 실험실의 확산에 기여

- (차세대 소재 분야 혁신 선도) 소재 개발 프로세스의 혁신을 위하여 AI 로봇 기술과의 융합 연구를 통하여 새로운 연구 분야 개척
 - 소재, AI, 로봇 기술의 융합을 통하여 차세대 소재 개발을 가속화할 수 있는 지능형 스마트 연구실 플랫폼 구축하여 국가 소재 분야 연구의 혁신 선도
 - 신소재 개발 프로세스의 지능화 및 자동화함으로써 나노입자 및 태양전지 설계 및 측정 분야의 경쟁력 확보 및 응용분야의 차별화

- 스마트 연구실에서 발생하는 양질의 데이터 구축 및 개방을 통하여 타 연구자들이 활용할 수 있도록 하여, 소재 분야 연구 능력 상향 평준화에 기여함
- **(AI 로봇 기술 기반의 리빙랩 구축)** 4차 산업혁명의 핵심 기술인 AI와 로봇 기술을 활용한 몰입형 연구 환경 구축
 - AI 로봇 기술의 선제적용을 활용한 스마트 연구실을 구축하여 연구자와 로봇, 로봇과 실험 장비와의 효율적인 상호작용을 위한 연구 분야 개척
 - 실험자 몰입형 원격 스마트 실험실 환경 구축을 통하여 모듈형 스마트 실험실에 대한 표준화 및 확산
 - 실험실 환경에서의 로봇 자율 주행 기술을 통하여 향후 로봇, 자동차, 드론 등 차세대 모빌리티 원천 기술 확보
 - 인간과 로봇의 협업 시스템의 확장을 통하여 사회 다양한 분야에 필요한 분야에 맞춤형 로봇 기술의 활용 가능
- **(포스트 코로나 시대의 새로운 실험실에 대한 패러다임 제시)** 중단없는 몰입형 연구실을 통한 세계적 경쟁력 확보
 - 포스트 코로나 이후 기존의 연구 환경의 문제를 해결함과 동시에 선제적으로 연구 환경을 혁신함으로서 소재 분야의 연구 경쟁력 확보
 - 무인실험실 환경 구축을 통하여 연구자의 안전을 확보하며, 24시간 365일 중단없이 실험을 진행함으로써 연구실 활용의 효율성 극대화
 - AI 기술을 통한 실험 및 설계의 자동화 및 최적화와 로봇을 통한 실험의 원격 수행을 통하여 연구자 몰입형 원격 실험실에 대한 새로운 모델 제시 및 모듈화를 통한 다양한 분야에 적용 가능

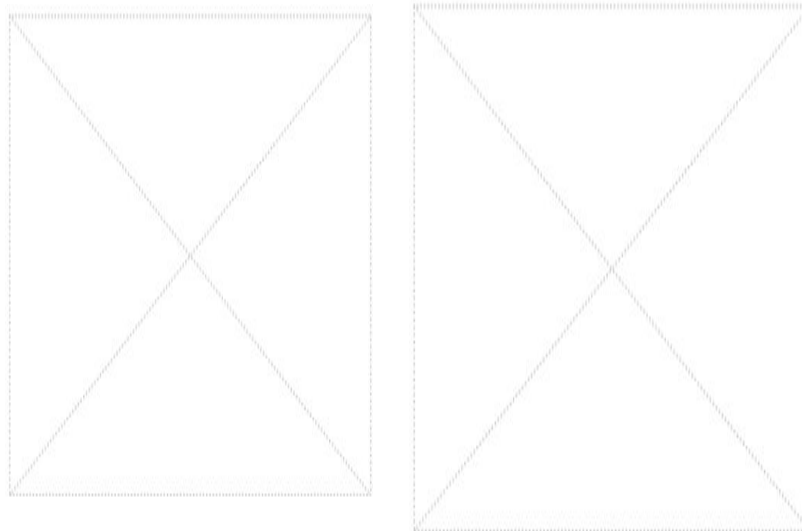


[과학, 기술적 측면에서의 기대효과 로드맵]

- (소재 개발 패러다임의 전환) 데이터, AI, 로봇공학을 융합한 지능형 소재개발 플랫폼 확보로 4차 산업형 소재 개발 패러다임 모델 제시
 - 향후 시범사업 분야(나노입자, 페로브스카이트 소재)외에 다양한 소재 및 바이오분야로 확장 가능 (소재강국 실현)
 - 개발된 지능형 소재개발 플랫폼은 무인화된 시스템으로서 대학 교육에도 활용 가능
- ※ 학생/교수가 원하는 소재물성을 원격으로 플랫폼에 입력하면 AI로봇이 스스로 소재를 합성해내는 과정 및 결과를 볼 수 있는 미래 교육현장 마련

AI로봇을 기반으로 소재개발 가속화 사례

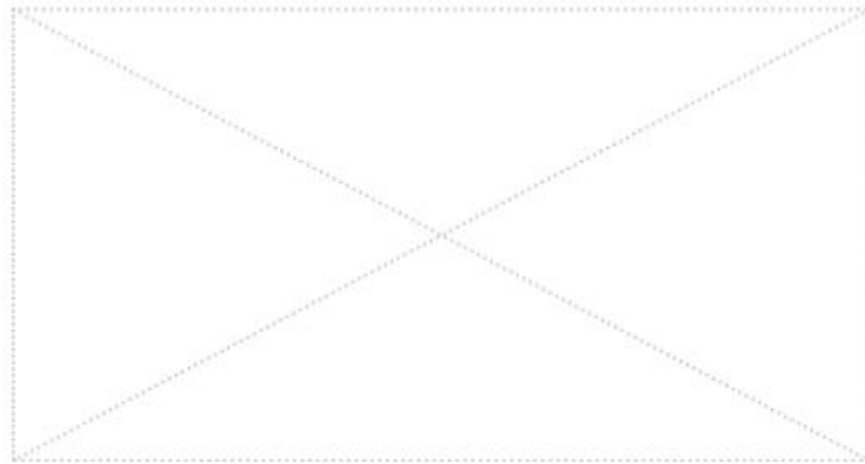
- 스마트 소재연구실은 인간의 도움없이 AI 로봇 스스로 소재를 개발하는 개념으로서, AI 기술이 다음 실험의 조건을 예측하고 로봇이 그 조건에서 실험을 수행하며 신소재 개발
 - 기존에 조합실험에 로봇을 사용한 경우가 있지만 이 경우는 단순 자동화 개념으로서 소재 특성을 최적화극대화 할 수 있는 다음 실험의 조건 예측이 없음
- 영국 리버풀 대학에서 AI 기능이 탑재된 주행 로봇을 기반으로 유기 광촉매 개발 시 10개의 실험변수에 대해 688번의 실험으로 성공적으로 신소재 개발 (Nature지, 2020년)
 - 10번의 실험변수에 대해 단순 자동화 실험을 진행할 경우 약 10^{10} 의 실험 필요
 - 실험변수가 많을수록 지능화된 AI 로봇이 소재 개발에 훨씬 가속화 가능



- **(양질의 소재 공정 및 물성데이터 조기 확보)** AI 로봇 자동화를 통한 소재 데이터 대량·신속 생산하고, 이를 국가소재연구데이터센터에 이관하여 타연구자 활용 가능
 - 소재 연구 혁신 허브 구축 및 소재 연구 데이터 생성·활용 관련 연구를 통한 차세대 신소재 관련 산업 분야 개척
 - 자동화된 데이터 분석 및 활용 기술을 적극적으로 활용함으로써 소재 분야 경쟁력 확보
 - 스마트 실험실에서 발생하는 다양한 형태의 정형·비정형 데이터를 확보하고 공유함으로써 데이터 주도 차세대 소재의 설계, 측정, 최적화 시스템으로 활용 가능
- **(AI 로봇 원천 기술 확보 및 다양한 산업 분야로의 확산)** 소재 실험 용품 인식 및 로봇 자율주행 원천 기술을 통한 다양한 분야에의 응용 및 확산
 - 딥러닝 기반 AI 기술을 활용한 다양한 광학적 특성을 가진 실험 기기 인식 및 과지를 위한 데이터 확보 및 스마트 팩토리 분야에 활용 가능
 - 복잡한 실험실 환경에서의 로봇의 자율주행 기술을 확보함으로써 차세대 모빌리티 시장에 적용 가능
 - 연구자 몰입형 실험실 환경을 구축함으로써 향후 메타버스와 관련된 분야에서의 연구자-연구자, 연구자-로봇, 로봇-실험장비간 상호작용 분야에 활용 가능
- **(산업체 활용)** 개발된 AI 스마트 연구실을 관련 소재분야 산업체에 이전 등을 통해 소재개발의 비용을 획기적 절감효과 기대
 - AI 스마트 연구실에서 제안하는 소재개발 최적공정조건을 기반으로 파일럿 (Pilot) 테스트 단계에서 개발비용 절감 효과 기대
 - 스마트 연구실을 기술이전에 부담을 느끼는 소규모 산업체의 경우 스마트 연구실 개발기관에 사용료를 지불하며 이를 사용하여 소재개발 가능성을 타진하는 형태의 활용도 가능

5.3.2. 경제,산업적 측면

▣ 기대 효과



[경제,산업/사회,문화적 측면에서의 기대효과 로드맵]

○ 경제적 기대효과

- (AI 로봇기술의 소재산업 적용을 통한 신시장 개척) 소재+로봇 기술의 융합을 통한 신시장 창출
- (언택트 소재 시장 개척) 독성 물질 및 위험한 물질을 다루는 소재개발은 AI 스마트 연구실에서 대신하여 연구 수행
- AI 로봇을 통해 개발된 신소재(촉매, 디스플레이, 태양전지 분야) 확보를 통해 관련 산업 경쟁력 강화
- 기존 시행착오식 방법이 아닌 지능화된 AI 로봇이 신소재를 개발하게 되어 소재개발 비용 및 시간 단축
- (포스트 코로나시대 새로운 실험실 표준 모델 제시) 지금까지 실험실에서 직접 실험을 진행해야 하는 모델에서 벗어나 연구자의 몰입도, 안정성, 효율성을 극대화할 수 있는 새로운 형태의 실험실 모델 정립 및 다양한 분야에 맞춤형 실험실 확산
- (데이터 주도 사회에서의 산업 활성화) 스마트 실험실에서 발생하는 다양한 데이터의 활용 및 공유를 통하여 연구 및 관련 산업에 확산 속도를 가속화할 수 있음
- 기존의 연구자의 직관 및 경험에 의존하는 실험에서 데이터 기반 의사 결정

및 실험으로의 전환 가속화

□ AI 스마트 연구실 소재개발 산업체 활용시 경제성 분석

- (암모니아 합성 촉매 개발 사례) 독일 바스프(BASF)에서 하버-보슈법에 의한 암모니아 합성용 촉매 개발을 위해 4000여 가지의 촉매 조성을 갖고 10,000회의 반복실험 수행 (출처: 동아사이언스, '14)
- 10,000회 촉매개발 실험 수행에 따른 비용 산출
 - 촉매실험 1회 인건비: 100만원
 - *산업체 연구원 1인(월급: 400만원)은 한달에 4회 촉매실험 수행 가정
 - 촉매실험 1회 실험비용 (시약 및 분석료 등): 50만원
 - 1회 촉매실험 총비용: 150만원 (= 인건비 100만원 + 실험비 50만원)
 - 10,000회 실험비용: 150만원/회 × 10,000회 = 150억원
- 사업종료 후 AI 스마트 연구실 1개 구축 소요비용: 5억원*
 - *로봇, 실험자동화 장치 등
- AI 스마트 연구실 기술이전 후 산업체 촉매 개발 비용 산출
 - 기술이전료: 20억원
 - 1회 실험비용: 50만원 (기본적으로 인건비 zero)
 - 스마트 연구실을 통해 촉매 실험회수 50% 감소 효과
 - = 5,000회 x 50만원/회 = 25억원
 - 촉매 개발을 위해 필요한 총비용: 45억원*
 - *기술이전 20억 + 실험비 25억
 - AI 스마트 연구실 1개당 산업체 소재개발 비용 감축효과: 105억원*
 - *150억원 (사람에 의한 개발비용) - 45억원 (AI 스마트연구실)

5.3.3. 사회,문화적 측면

▣ 기대 효과

- 사회적 기대효과
 - (4차산업혁명형 인력양성) 지능형 AI 스마트 연구실 연구는 4차산업혁명형 미래실험실의 모델을 제시하고, 이를 통해 데이터·AI·로봇·소재기술이 융합된 4차산업혁명형 인재양성이 가능
 - 정부의 지원을 통해 리스크가 큰 도전적인 연구를 안정적으로 진행함으로써, 새로운 연구분야에서 전문적인 인력양성이 가능

6. 스마트 연구실 외 미래형 로봇 추가 상세기획

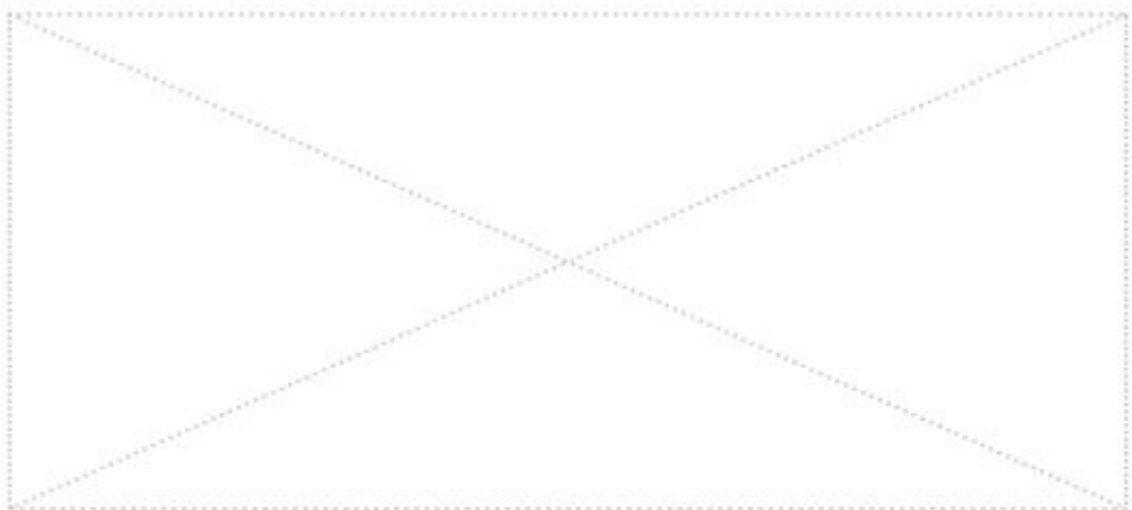
6.1.

세부추진과제 1: 재난현장 인명구조용 자율지능 소프트웨어 휴머노이드

6.1.1. 필요성

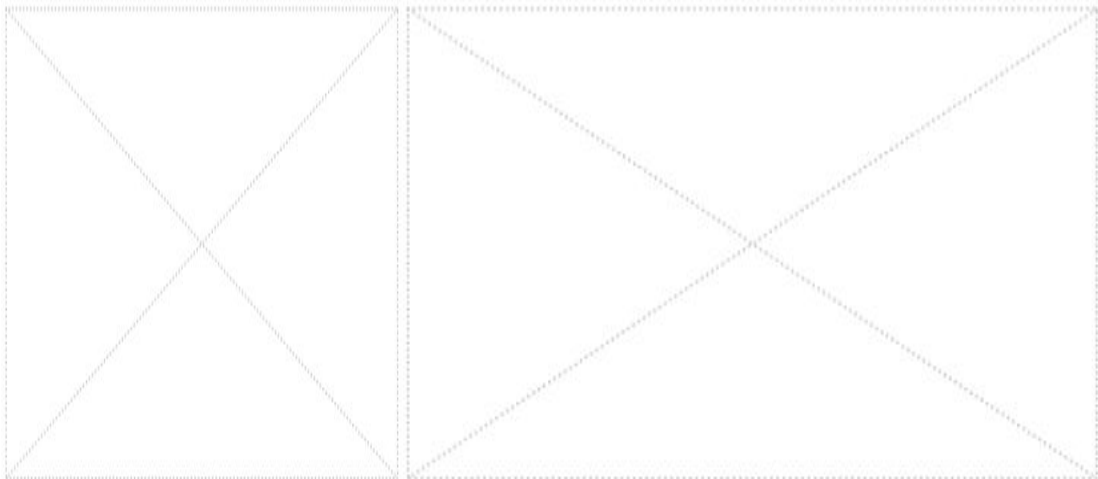
▣ 인명 구조용 자율지능 소프트웨어 휴머노이드 융합 로봇 플랫폼의 개요

- 본 플랫폼은 휴머노이드 로봇(Humanoid robot)과 소프트 로봇 (Soft Robot) 그리고 인공지능 (Artificial Intelligence: AI) 기술을 융합함으로써 기존 로봇 연구의 한계점을 돌파하고 인간 친화적인 인명 구조 로봇 시스템 개발 및 보급 기여하고자 함
 - 붕괴 위험이 있는 건물, 유독가스 유출 공장 등 사람이 투입되어 구조 활동을 하기 위험한 환경에서 인명 구조를 위한 다양한 작업이 가능한 휴머노이드 로봇을 개발
 - 소프트 로봇 기술을 활용하여 조난자 및 부상자 등 인명 구조시 안전한 물리적 상호작용을 제공하고, 돌발 상황이 발생가능한 현장에서 로봇이 외부 충격에도 잘 버틸 수 있도록 함
 - 인공지능 기반의 인체 동작 인식 기술과 인간-로봇 상호 소통 기술을 기반으로 구조 작업을 능동적으로 수행

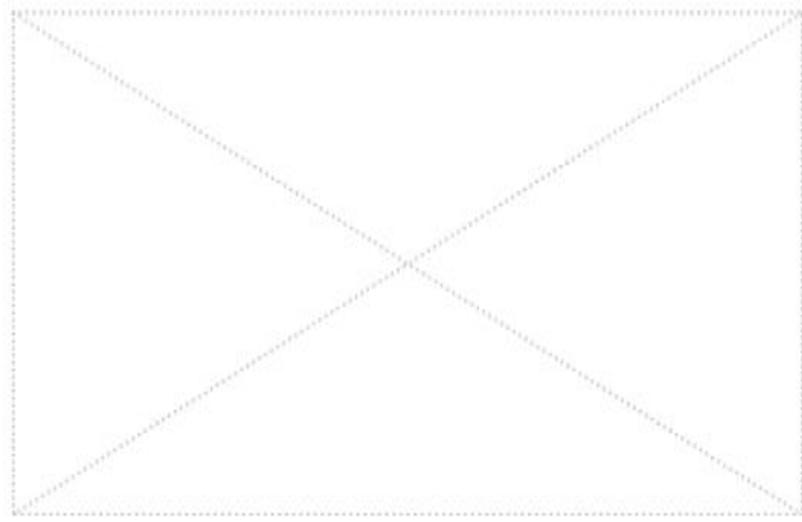


[재난 구조용 소프트웨어 휴머노이드 융합 로봇 플랫폼의 개요]

- 본 플랫폼은 각종 재난 현장에서 현장 작업 및 사람과 물리적 접촉을 통한 인명 구조를 수행하는 로봇
- 기존 형태의 로봇이 투입되어 사용되기 어려운 재난이 발생한 실내 환경에 고립된 사람의 구조 작업을 수행
 - 재난 현장에서 실종자 탐색, 원격 진료 및 응급처치, 부축 및 탈출 경로 확보 등 신체적 접촉을 포함한 다양한 인명 구조작업을 수행하기 위해 아래와 같은 핵심 기술을 적용
 - 재난이 발생한 인간 생활 환경에서의 자유로운 이동 및 작업 수행을 위한 휴머노이드 로봇의 전신 제어 및 이족 보행 기술
 - 실내 공간에서 인명 탐색을 위한 로봇의 자율 및 원격 이동 기술
 - 조난자의 위치를 파악하고 재난 지역 모델링을 위한 실시간 SLAM 기술
 - 조난자의 상태와 자세를 파악하기 위한 인공지능 기술
 - 인명 구조 작업을 위한 사람과 로봇 사이에 안전한 물리적 상호작용을 위한 제어 기술
 - 의료진의 원격 진료 및 응급처치를 위한 원격 제어 기술



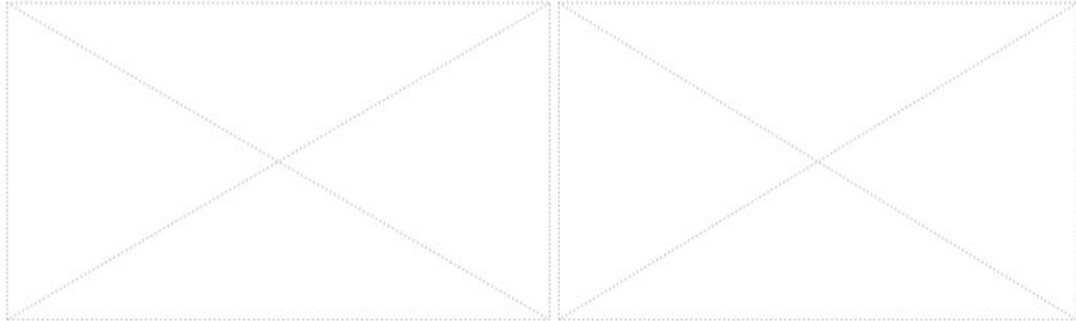
[2018년 폭발사고가 발생했던 포천화력발전소 사고 현장(좌), 2021년 암모니아가 유출된 김포의 한 공장. 높은 경사의 계단, 좁은 통로, 각종 설비들의 진로 방해로 인해 인간형 로봇이 아니면 투입되기 어려움]



[재난현장 인명 구조 사진. 인체 접촉을 통한 구조 작업이 필수적임]

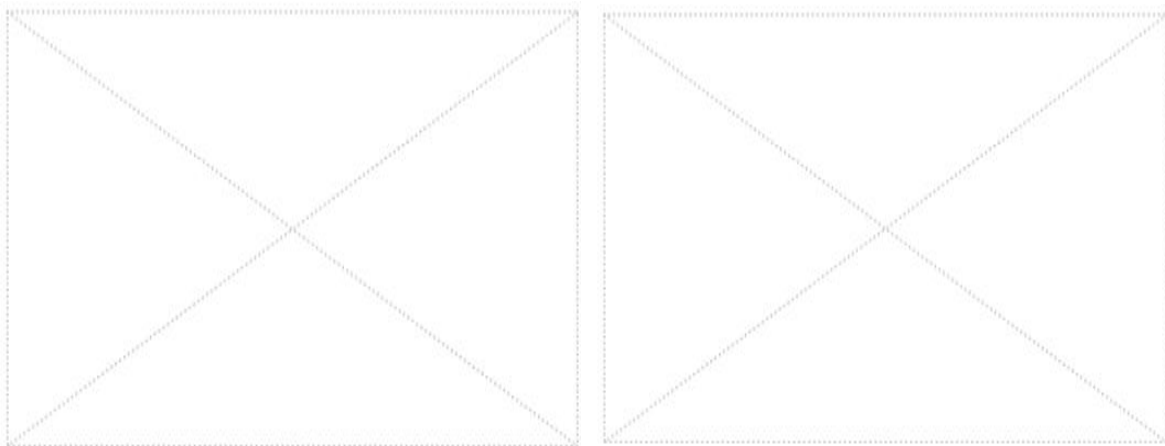
- 본 플랫폼은 안전함을 증대시켜 로봇이 다양한 재난현장에서 사람과 밀접 서비스를 제공할 수 있도록 함
 - 로봇의 활용 분야를 사람과의 접촉까지 확대시켜 위험한 재난 현장에서의 로봇 활용성을 증대시킬 것으로 기대됨

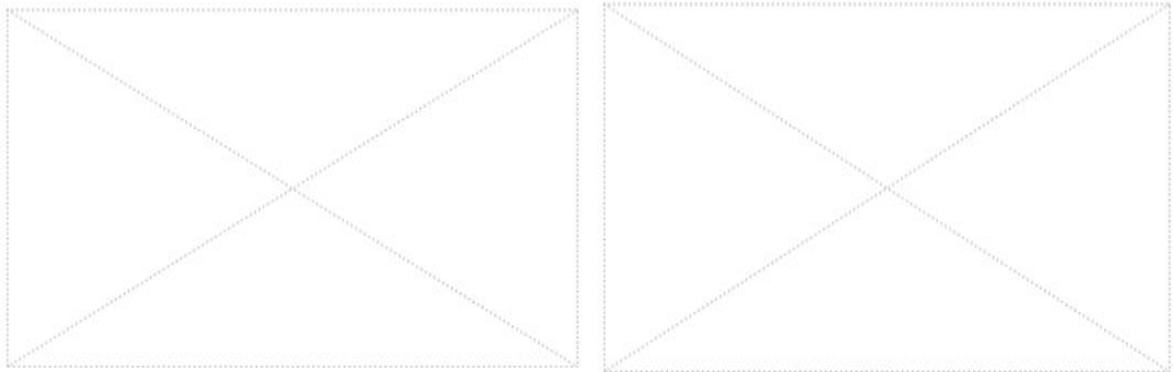
▣ 인명 구조용 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇의 필요성



[큰 위험이 동반되는 소방관의 구조 업무]

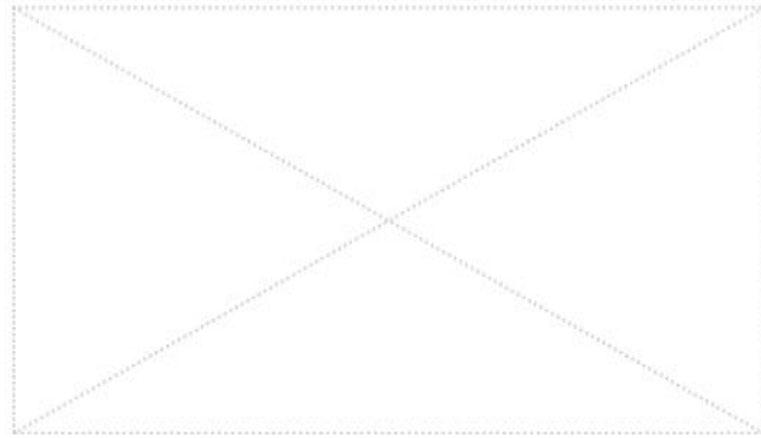
- 인명 구조 활동의 위험성으로 다수의 소방관이 순직 또는 상해로 인한 질병을 앓고 있음. 2020년 기준 1,004명의 소방관이 공상을 입었으며 2명이 순직하였음. 2022년에도 평택의 물류센터 신축 공사장 화재로 인명구조에 나섰던 소방관 3명이 순직하였음. 여전히 소방관은 위험한 재난현장에 투입되고 있음. 이에 따라 2016년부터 2019년까지 4년간 소방공무원 건강 이상자는 평균 66 %로 전체 공무원 건강 이상자의 2.8배이며, 재직자 중 사망자의 평균 연령 역시 2016~2020년 기준 45세로 가장 낮음. 이런 소방관의 노력에도 2011~2020년까지 423,317건의 화재 사고가 발생하고 3,085명의 사망자가 발생함.





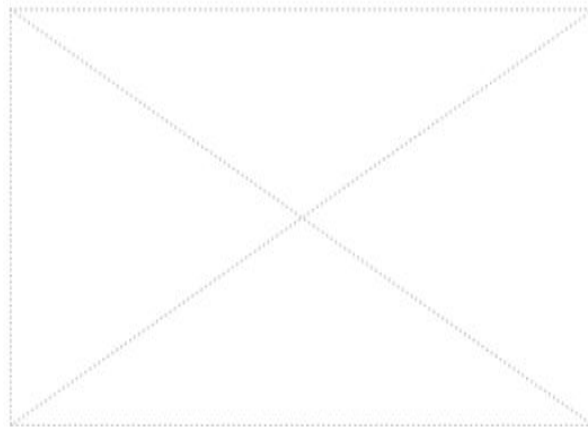
[다양한 재난현장의 구조: 광주 건물 붕괴 사건 현장, 빙벽 구조 현장, 수해 재난현장, 해일 재난 현장]

- 화재 현장 뿐만 아니라 태풍, 지진, 해일 대설 등의 위험한 재난 현장에 인명을 구조하기 위한 작업이 수행됨. 서울시 119 안전센터에 따르면 020년 기준 1개소당 평균 8만 명이 넘는 인구를 담당하고 있음. 2020년 출동 건수는 143,850건으로 약 12만명의 인명을 구조하였음. 이미 2022년 1월 24일 기준 화재 592건 구조 2248건 구급 27,457건 기타 2,586건의 재난이 발생하여 출동하였음.
 - 팬더믹 이후 재난 구조 활동은 더욱 어려운 실정임. 구급대원들은 출동 시 구급차 내부를 비닐로 덮고 방호복을 갈아입고 있음.
- 재난 현장은 시야 확보의 부족, 유독 가스 발생, 지형 지물에 의한 찰과상 등의 이유로 2차 피해가 발생하고 있는 실정임. 이에 따라 각 재난 현장에 로봇을 투입하는 것에 대한 수요는 많이 있으나 크기가 큰 로봇이 비좁은 재난현장에 투입되는 것에는 어려움이 있음.
 - 대부분의 실내 재난 현장의 경우 사람의 크기에 맞춰있기 때문에 거대한 로봇 투입이 어려움. 특히 재난 상황으로 인하여 지형과 지물이 어지럽게 놓여 있기 때문에 일반적인 로봇의 보행으로는 진행이 어려움.
 - 휴머노이드 로봇은 사람과 유사한 형태와 외형을 가지고 사람의 동작을 모방할 수 있기 때문에 다른 형태의 기개발된 재난구조 로봇은 투입되기 어려운 실내 재난환경에서 구조 작업을 원활히 수행할 수 있으며 소프트 로봇 기술을 활용하여 사람과 안전하게 접촉할 수 있음.



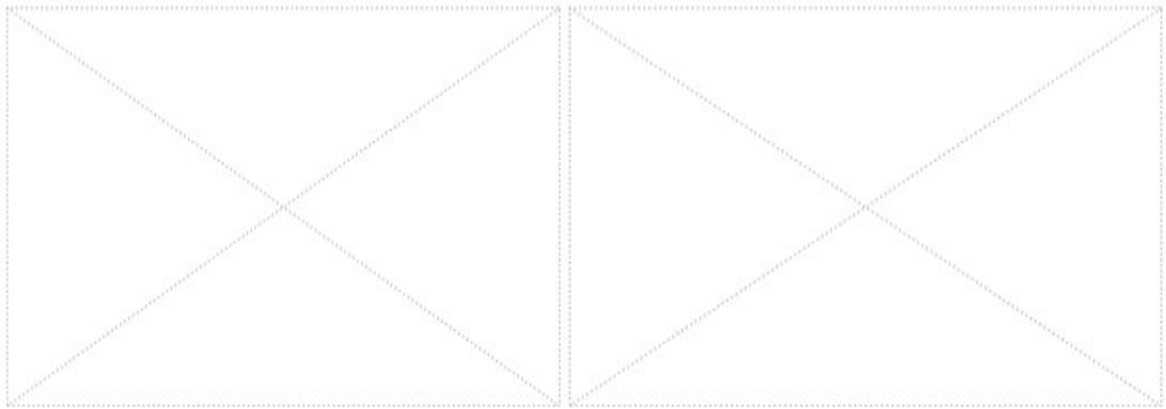
[소프트 로봇 기술을 통해 안전하게 사람을 안아줄 수 있는 일본의 돌봄 로봇 ROBEAR]

- 사람이 투입되기 위험한 환경에서 구조 활동을 수행할 수 있는 로봇을 통해 불가능했던 환경에서의 인명 구조 활동 수행 및 큰 위험 부담을 안았던 기존 인력의 고충을 해결할 수 있음



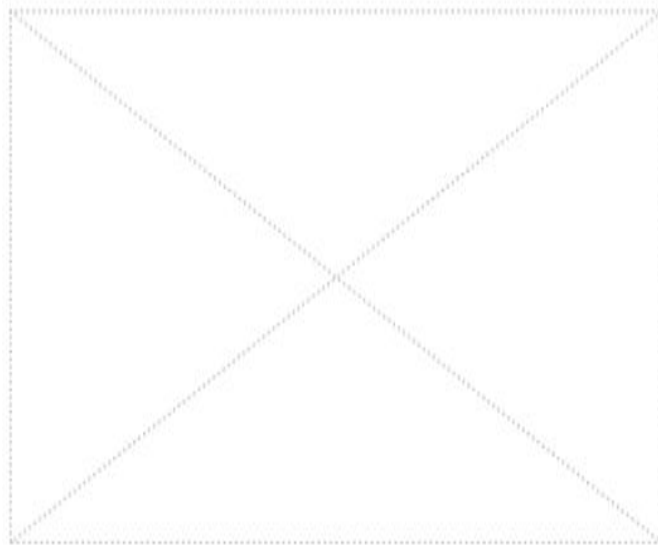
[Darpa 프로젝트에 참여한 Boston Dynamics의 Pet-Proto]

- 재난 대응 로봇에 대한 수요가 급증하고 있으며 이를 위해 다양한 로봇이 개발되고 있음. 특히 2012년부터 2015년에는 ‘붕괴된 건물과 기타 재난 지역에서 인명 구조 및 대응 활동을 할 수 있는 로봇’을 주제로 달과 그랜드 챌린지(Darpa Grand Challenge)가 수행되었음. 하지만 재난대응 로봇 기술의 발전에 비해 인명 구조에 대한 로봇 연구는 많이 부족함.



[재난 대응 휴머노이드 로봇 대회 Darpa Grand Challenge의 컨셉(좌)과 실제 대회에서 로봇의 모습(우)]

- 미군에서 20억 달러 규모로 수행한 달과 달과 프로젝트에서는 원자력 발전소 사고 현장을 가장하고 휴머노이드 로봇은 자동차의 운전, 계단과 고르지 않은 표면을 걷고, 좁은 통로로 이동, 전동 공구를 사용하여 벽을 뚫는 등 미션을 통해 재난현장에 투입될 수 있는 로봇을 평가함.

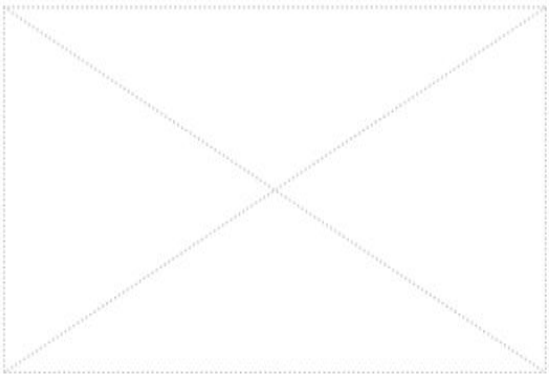
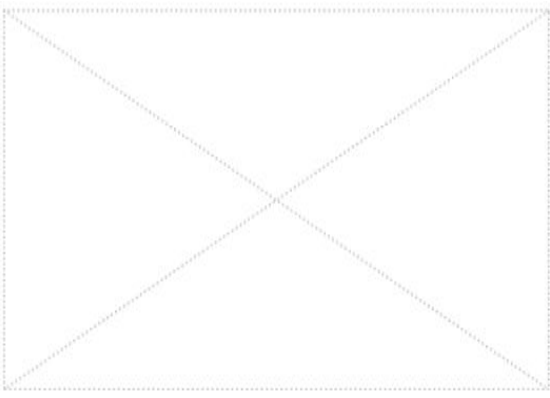
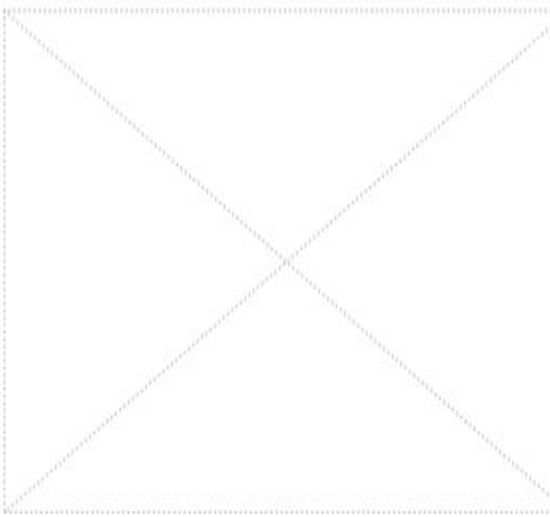


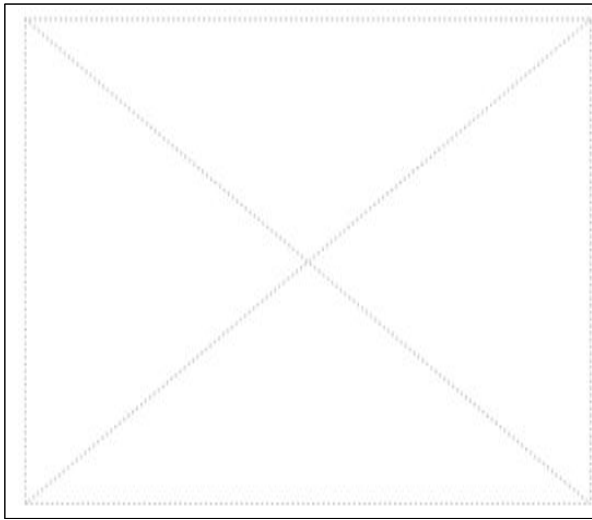
[원자력 발전소 재난 대응로봇 암스트롱]

- 국내에서는 한국원자력연구원에서 원자력 발전소에서 활용하기 위한 재난대응 로봇 암스트롱을 개발하였으며, 벨브를 돌리고, 무거운 장애물을 움직이는 등의 작업을 할 수 있도록 하였음. 다양한 작업 수행을 위해 상체는 휴머노이드 타입으로 제작됨.

○ 안전한 인명 구조를 위한 로봇에 대한 수요 역시 급증하고 있으나, 관련된 로

봇의 개발이 많이 부족한 실정이며 아래와 같은 해외 연구가 있음

구조 로봇 사진	구조 로봇 설명
	<p>- 미 육군 의료 연구 및 군수품 사령부의 원격 의료 및 첨단 기술 연구 센터에서 지원하여 개발된 Battlefield Extraction-Assist Robot(BEAR)은 전장에서 부상자를 구출하는 로봇임. 최대 500파운드를 들어올리고 운반하기 위해 유압을 활용함.</p>
	<p>- HURCULES (Humanoid ResCUe robot for calamity response)는 전장/재난 지역에서 전투원/거동이 불편한 환자를 들어 올려 이송하는 임무와 폭발물이나 위험물을 처리 및 이동하는 두 가지 임무를 수행하기 위해 개발된 반 휴머노이드 구조 로봇임.</p>
	<p>- 재난 대응을 위해 MIT에서 만든 2족 보행 로봇인 HERMES은 안정적인 로봇 구동을 위해 원격 조작용 웨어러블 로봇을 착용함.</p>

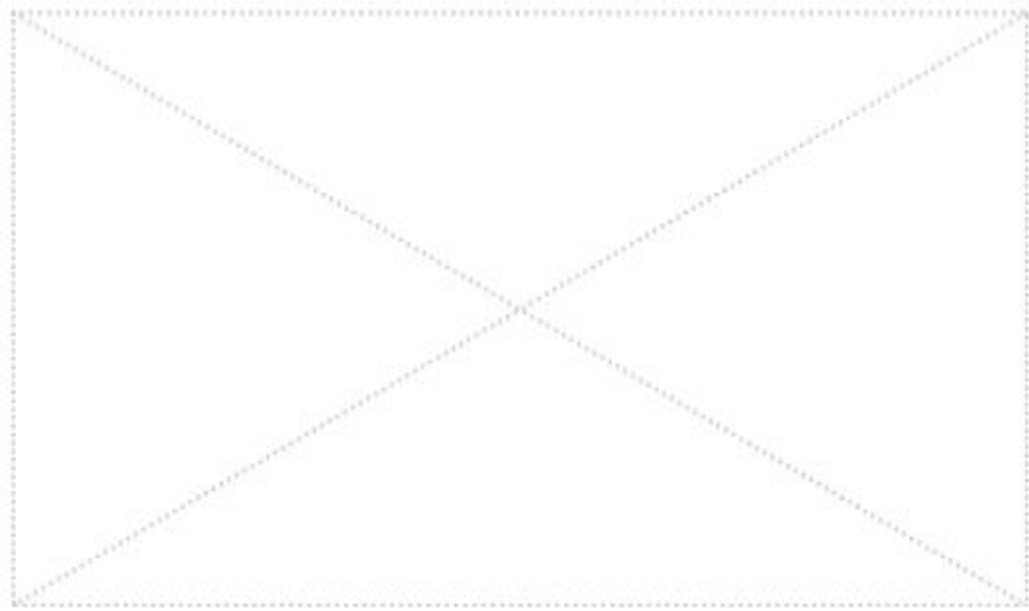


- 일본 지진 구조 로봇 RoboCue는 재난 현장, 특히 폭탄 현장에서 피해자를 찾아 안전하게 구조하도록 설계됨. 초음파 센서와 적외선 카메라를 사용하여 갇힌 사람을 찾고 부상자를 카트에 부드럽게 실어 안전한 곳으로 이송함.

- 기개발된 인명 구조 로봇은 대부분 야외 환경에서 사용하는 것을 목적으로 만들어졌으며, 다수가 사람과 유사한 상체 구조를 차용하여 안전한 인명 구조를 하고자 함. MIT의 HERMES만이 휴머노이드 형태로써 실내 환경 인명 구조를 목적으로 하고 있으나 연구용 플랫폼으로써 출력이 낮아 실제 재난지역 투입은 어려움.
- 일부 재난현장의 경우 안전상의 문제로 인명 구조원이 투입하기 전 안전 점검을 필요로 함. 하지만 로봇은 어떤 환경에도 쉽게 투입되어 구조작업을 할 수 있기 때문에 신속하고 빠른 인명 구조를 수행할 수 있음.

▣ 경제 / 산업적 측면에서의 필요성

- 세계적으로 발생하는 재난 건수의 증가를 비롯한 여러 고무적인 요인에 힘입어 유망함. 쓰나미, 지진, 테러 공격, 화산 폭발, 산업 재해 및 핵 용해 등의 재난은 구조가 필요한 사상자를 발생시키며 긴급 구조대원들 생명의 위험은 수색 및 구조 로봇을 사용하여 완화 가능함.
- 시장조사 기관 모토르 인텔리전스에 따르면 재난구조 로봇 시장은 점차 커지고 있으며, 2019년 22억7000만달러 규모인 글로벌 안전 로봇 시장은 매년 8% 안팎으로 성장해 2025년 35억9000만달러에 이를 것으로 전망됨.
- 수색 및 구조 애플리케이션의 경우 2016년 이족형 인간형 로봇이 시장의 53%의 가장 큰 점유율을 차지하고 있음. 이족형 모션 유형의 시장은 2016년에 680만 달러로 평가되었으며 2023년에는 1억 9590만 달러에 이를 것으로 예상됨.
- 전 세계 수색 및 구조 로봇 시장의 주요 공급업체는 다음과 같음.
 - 보스턴 다이내믹스, 하이드로날릭스, 콩스베르그 해양, 록히드 마틴사, 플리어 시스템즈, Inc., 하우엔하우테크놀로지스, Northrop Grumman Corporation, 플라이언트 에너지 시스템 LLC, 사브 AB, 탈레스 그룹
- 인간과 유사한 형태의 휴머노이드 로봇과 다양한 구조에 투입이 가능하며 소프트웨어 로봇의 융합은 인간의 안전한 구조활동에 이바지할 수 있기 때문에 손쉽게 추가 노동력으로 활용 가능
- 휴머노이드 로봇 시장은 2023년 39억 6250만 달러로 성장할 것으로 예상됨. 인간의 삶과 밀접한 시장이기 때문에 소프트 휴머노이드 로봇 플랫폼은 원천 기술의 선제적 확보를 통해 다양한 시장에 적용이 가능할 것으로 예상됨
 - 휴머노이드 로봇을 연구하는 대표적인 기업 및 기관으로는 SoftBank(일본), ROBOTIS(한국), KAWADA ROBOTICS(일본), Honda Motor(일본), UBTECH ROBOTICS(중국), Hajime Research Institute(일본), Hanson Robotics(홍콩), DST Robot Co.(한국), PAL Robotics(스페인), Toyota Motor(일본), ROBO GARAGE Co.(일본), Istituto Italiano di Tecnologia(이탈리아), Engineered Arts(영국), Robotics Lab(스페인) 및 미국 항공 우주국(NASA)가 있음.



[Domestic application to hold largest share of top service robotics market by 2025]

- 공공복지 및 사회 안정을 위한 기술로써, 높은 시장가치와 더불어 국민 삶의 수준 개선에 큰 영향을 줄 수 있음

6.1.2. 기술 정의

▣ 개발 플랫폼의 목표

- 공장, 빌딩, 발전소 등 사람이 일을 하거나 거주하는 실내 공간에 발생한 재난 환경에서의 인명 구조를 목표로하며 아래와 같은 임무를 수행
 - 로봇이 재난 환경을 이동하며 재난 지역을 조사하고 조난자를 탐색
 - 조난자 발견시 위치를 알리고, 다친 사람의 원격 진료 및 응급 처치 수행
 - 조난자와 함께 이동 및 재난 지역 탈출

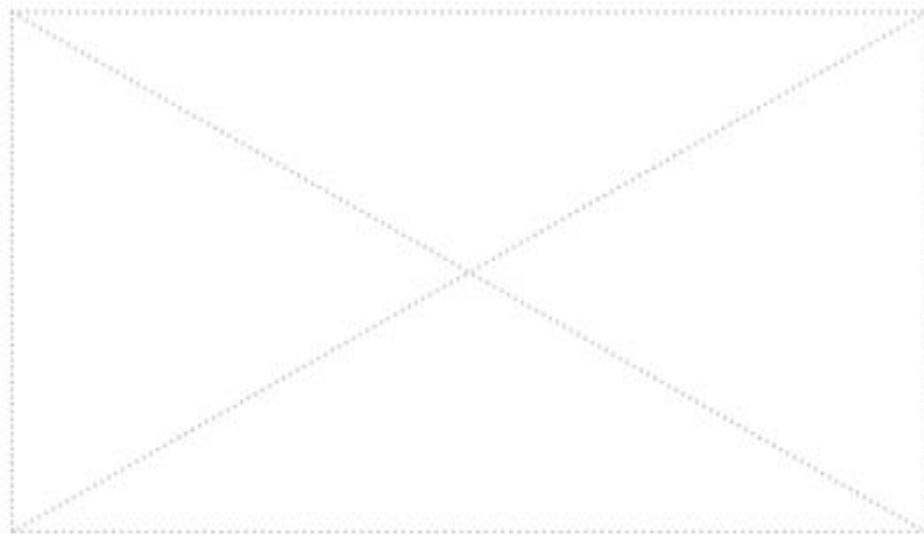
▣ 개발 플랫폼의 제공 기능

- 로봇 플랫폼은 인간 성인 크기이며, 이족 보행 및 양팔을 포함한 전신을 움직이는 관절을 보유하여 사람과 유사한 동작을 수행이 가능한 휴머노이드를 기반으로 하며, 사람의 연골 및 근육과 유사한 형상의 소프트 로봇 기술을 통해 사람과 안전한 접촉을 가능하도록 함.
- 장애물이 많은 재난지역에서 안전하게 이동할 수 있는 휴머노이드 로봇의 이동 제어 기술
 - 로봇 동역학 모델과 센서 기반의 전신 제어를 통해 환경 또는 사람과의 안전한 물리적 상호작용(pHRI)이 가능
 - 로봇의 동역학을 고려한 이동 기술을 적용하여 보행 및 사람과 상호 작용 중에도 균형을 잘 유지할 수 있도록 함.
 - 자율 및 원격 제어를 통한 보행을 통해 사람을 탐색하고 사람과 함께 이동할 수 있도록 함
 - 고도화된 이동 기술을 통해 복잡한 실내 환경에서의 높은 모빌리티를 제공
 - 로봇 기립 기술을 통해 돌발 상황에 의해 로봇이 넘어지더라도 다시 일어나서 작업에 복귀 할 수 있음
- 자율지능 소프트 휴머노이드 로보틱스는 안전한 물리적 상호작용을 위해 소프트 로봇 기술과 힘 제어 기반의 유연한 제어 방식을 제공

- 따뜻하고 폭신한 소재의 소프트 스킨을 활용한 로봇 하드웨어 개발을 통해 안전도를 높임과 동시에 사용자에게 친밀감을 제공
 - 로봇이 넘어질 경우 파손되는 것을 막기 위한 안전 장치로써 소프트 로봇 기술을 적용
 - 소프트 센서를 활용하여 접촉에 대한 신호 검출이 가능하게 하여 사람과 로봇의 접촉 여부를 판단할 수 있게 함
 - 안전한 재료와 동력원의 소프트 액추에이터를 활용하여 인간의 근육처럼 유연하고 다양한 동작을 구현하고 부드러운 움직임을 통해 호흡과 같은 생체 활동을 모사
- 재난 지역 탐색 및 모델링 기술을 통해 재난 지역의 상황을 사용자에게 제공
- 비전 (vision), 라이다 (LiDAR) 센서 등을 통해 실시간으로 재난지역 지도를 생성하여 관제지에서 재난지역 상황을 파악할 수 있도록 함
 - 재난지에서 발견한 조난자의 위치를 제공
- 인공지능 기반 기술로 조난자의 상태를 파악하고 이에 맞춰 구조 작업을 수행하여 안전하게 구조하기 위한 기술 제공
- 로봇 비전 센서 정보로부터 재난 환경속에 있는 조난자를 식별
 - 로봇의 비전 센서 기반 시각 정보를 바탕으로한 인공지능 기반 조난자의 3D 자세 추정, 상태 추정을 통해서 사람의 상태에 대한 정보 제공 및 로봇의 맞춤형 동작 생성으로 안전하게 사람과 물리적 상호작용 수행
 - 실제 사람의 동작을 기반으로 인명 구조 동작을 생성을 하여 안전하고 자연스러운 동작으로 인명 구조 활동을 수행
- 원격 제어를 통해 원격 진료 및 응급 처치 수행
- 로봇의 원격 제어를 통해 전문 의료진이 조난자의 건강상태를 진단하는 등 원격 진료, 로봇을 통한 응급 처치 수행, 구호품을 통해 조난자 스스로 응급치료할 수 있도록 가이드 제공

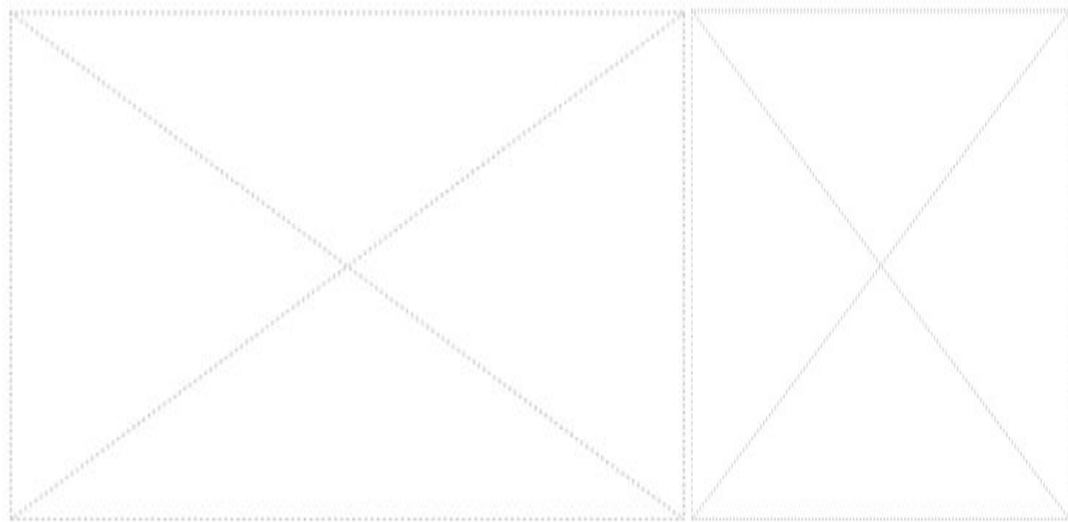
6.1.3. 국내외 연구 동향 및 차별성

▣ 휴머노이드 로봇



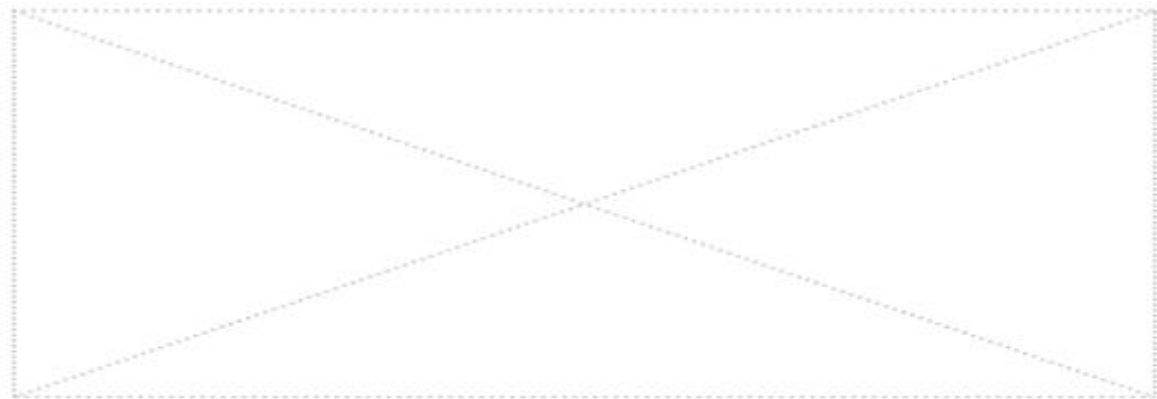
[Boston Dynamics에서 개발된 휴머노이드 로봇]

- 현대자동차에서 인수한 Boston Dynamics를 필두로 하여 Honda, Toyota, 최근에는 Tesla와 같은 자동차 회사들이 최근 5년 동안 가장 적극적으로 휴머노이드 로봇에 관한 연구를 수행하는 집단으로서 이들은 보행 기반 모빌리티 기술 개발에 초점을 맞추고 있음. 특히 Boston Dynamics는 가장 앞선 이족 보행 기술을 보유하여 휴머노이드로봇이 사람 못지 않은 모빌리티를 가질 수 있음을 증명함
 - 이들이 개발한 휴머노이드 로봇은 아직 연구 및 홍보용으로 활용되고 있으며 인명구조와 같은 구체적인 미션 수행은 이뤄지지 못하고 있음
 - 인명 구조를 위해 환경을 탐사하고 구조 행위를 위한 사람-로봇 물리적 상호작용 등에 대한 연구는 보고된 바 없음



[Disney에서 개발한 공연용 휴머노이드 로봇]

- Disney 사는 휴머노이드 로봇 기술을 선도하는 기업 중 하나로서, 영화나 놀이공원과 같은 엔터테인먼트용 휴머노이드 로봇 기술을 개발하고 있으며, 사람의 동작을 자연스럽게 모방하기 위한 기술과 표정, 몸짓, 대화를 통한 상호작용 기술을 개발하고 있음
 - 엔터테인먼트를 위한 기술 중심으로 개발되어, 제한된 작업만 수행 가능함. 공개된 기술들은 대부분 동작의 모사나 사람과의 비접촉 상호작용과 관련된 연구로써 인명 구조와 같은 작업 수행에는 적합하지 않음.



[DARPA Robotics Challenge에 참여한 MIT 팀의 휴머노이드 로봇 재난대응 기술 사진들. 환경 인식, 이족보행, 환경에 대한 조작 등 재난대응에 필요한 다양한 기술을 선보였음]

- 2015년 치뤄진 DARPA Robotics Challenge에서는 원전 사고 지역을 가장한

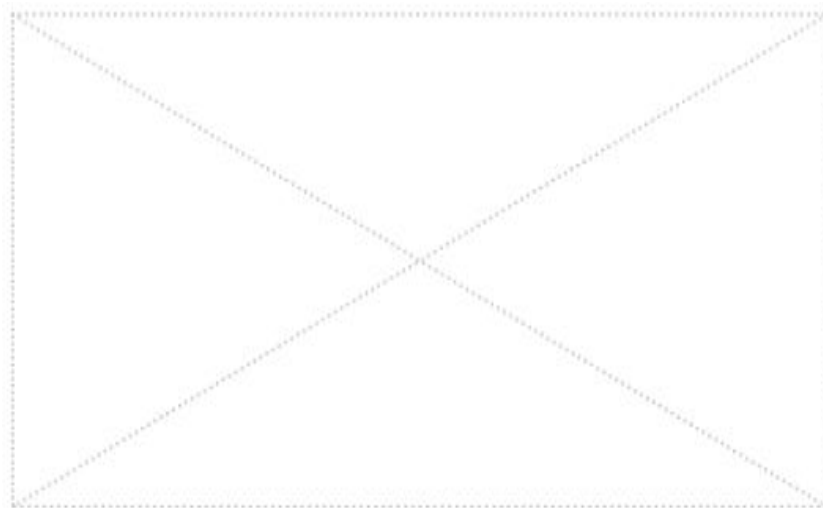
환경에서 휴머노이드 로봇을 통한 재난 대응 기술을 시험했음. 복잡한 지형을 이동하고 밸브를 잠그고 잔해물을 치우는 등 재난 대응을 위한 기초적인 작업이 성공적으로 수행될 수 있음을 선보였음.

- 대회의 특성상 정해진 환경에서만 작업 수행을 했으며, 인명 구조와 같이 사람과의 상호작용을 포함한 기술은 없음.

○ 이탈리아 IIT, 독일의 DLR, 한국 서울대학교의 박재홍 교수 연구팀 등에서는 관절 토크 제어 기반의 유연하고 안전한 방식의 휴머노이드 로봇 제어 기술을 개발하고 있음

- 강체로 구성된 로봇의 관절의 탄성 또는 동작 제어를 통해 유연함을 얻는 방식이므로 소프트 스킨을 적용하려는 제안하는 플랫폼과는 차이가 있음

▣ 소프트 로봇



[하버드대에서 개발된 소프트 웨어러블 로봇]

○ 세계적 기업인 Apple, Facebook 등의 IT 기업에서는 증강 현실 구현 및 새로운 의사소통의 방식을 개발하기 위하여 소프트 로봇을 연구하고 있음

- 주로 작은 힘으로 촉각 자극을 주는 방식이 연구되고 있음

○ 국제 기업인 Ford, Amazon, 현대 자동차 등의 인력을 필요로 하는 기업에서는 부상 방지 및 근력 보조를 위하여 소프트 웨어러블 로봇을 연구하고 있음

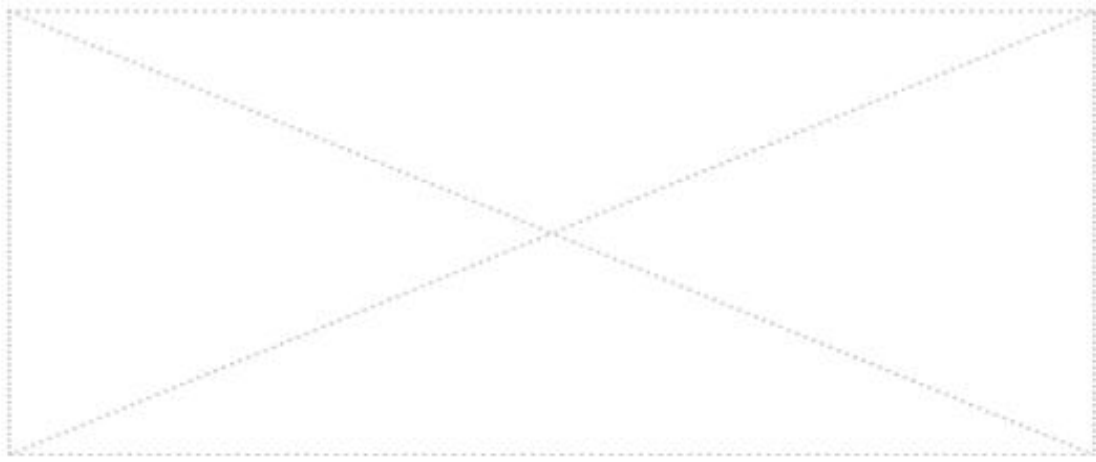
- 주로 자세 교정에 한정되어 있음

○ 최근 미국의 Harvard, Standford, 서울대를 포함한 다수의 명문 대학에서 소프

트 로봇의 특성을 활용한 그리퍼, 재활/근력 보조용 웨어러블 로봇 개발이 수행되고 있으며 이 연구 성과는 Top 저널인 Nature나 Science에 논문 표지로 소개되고 있음

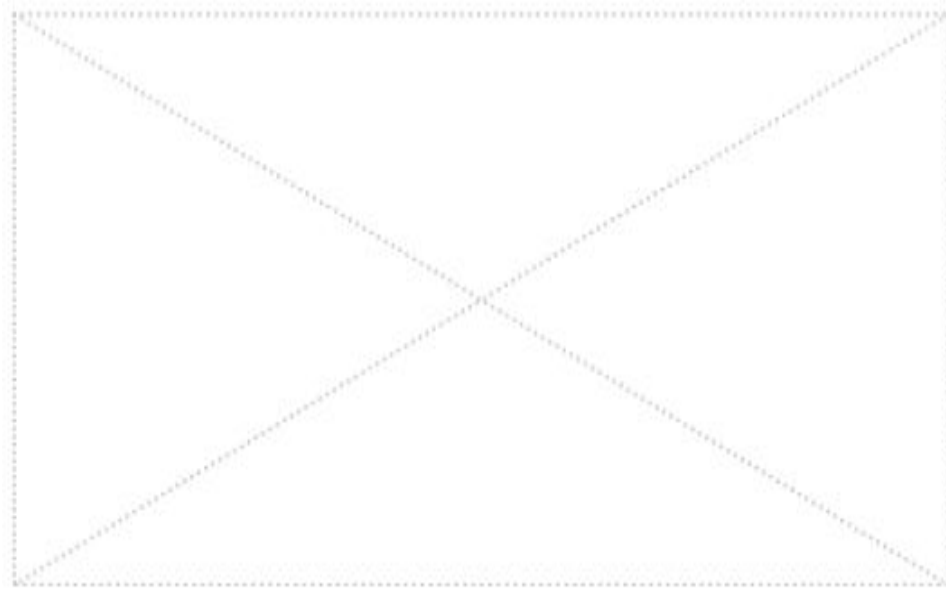
- 소프트 로봇은 유연하고 자유도가 높으나 기존의 로봇에 비하여 힘이 약하기 때문에 적용 가능한 작업이 한정적임

■ 소프트 로봇 융합형 휴머노이드 로봇

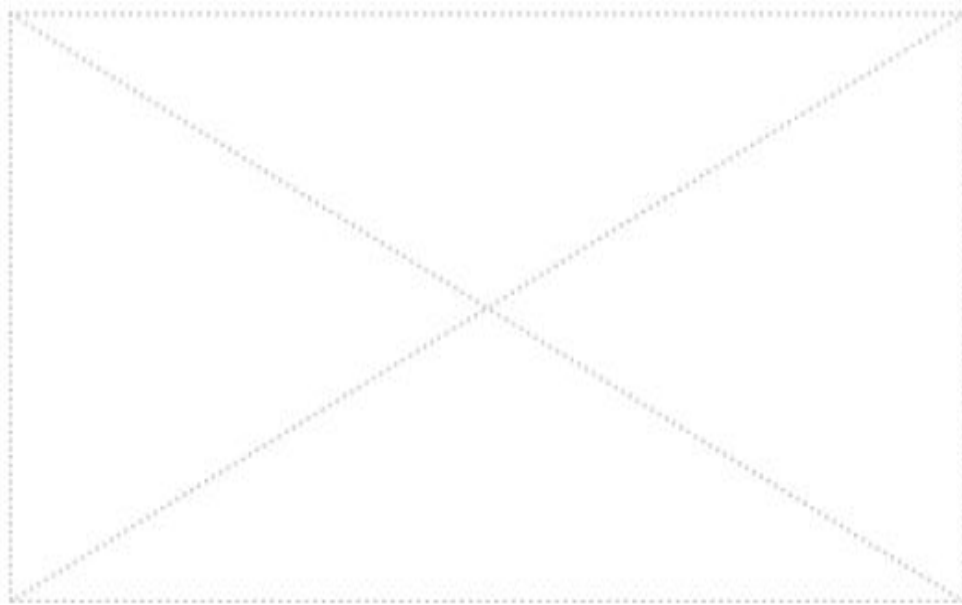


[뮌헨공대에서 개발된 전신에 인공피부 부착한 휴머노이드 로봇]

- 독일 TUM의 Gordon Cheng 교수 연구팀은 2019년 휴머노이드 로봇 전체에 촉각 센서를 입혀 외부와 로봇 간의 접촉을 인지하도록 하여 사람과 로봇의 안전한 상호작용을 구현한 바 있음
 - 활용한 로봇의 스킨은 촉각 센싱을 위한 것으로 직접적인 충격 흡수는 어려움
- 일본 AIST에서는 에어백을 적용하여 휴머노이드 로봇이 안전하게 넘어질 수 있도록 하는 방법을 개발하여 소프트 물질을 부분적으로 적용하여 안전성을 얻을 수 있음을 보였음
- 일본 RIKEN에서 2006년 개발한 RI-MAN은 소프트 물질로 로봇의 표면을 둘러싸고 촉각 센서 등을 활용하여 사람과 안전한 상호작용이 가능하게 하여 그 가능성을 선보임
 - 동작이 느리고 제한된 동작만 가능하며 위치 제어 방식을 활용하여 외란에 유연한 관절 반응을 만들기 어려움

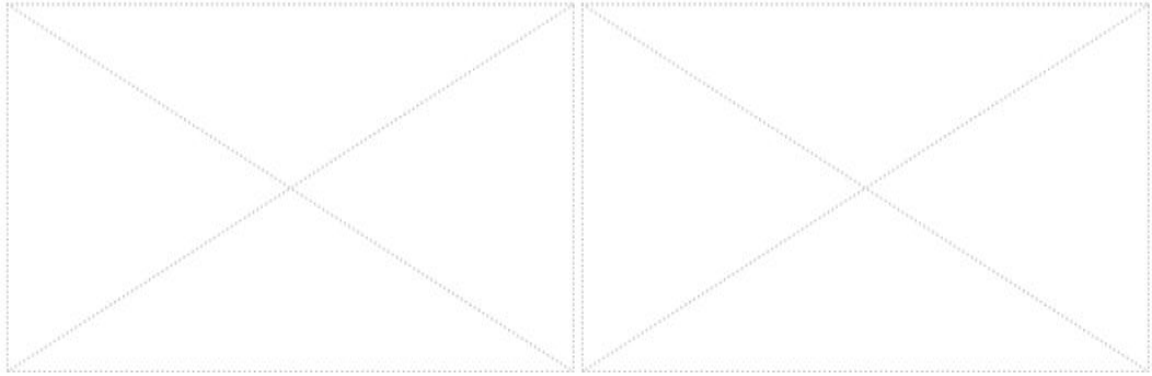


[일본 AIST에서 개발한 휴머노이드용 에어백]



[일본 RIKEN에서 개발한 소프트 스킨 기반의 휴머노이드 로봇]

▣ 재난 구조용 로봇



[텍사스 A&M 엔지니어링 실험소의 로봇 지원 수색 및 구조 센터(CRASAR)]

- 자연 지형과 같은 비정형 현장 환경에서 작업하면서 위험하고 비반복적인 작업을 위험 없이 수행할 수 있는 스마트 서비스 로봇에 대한 수요가 늘고 있음.
 - 기존 구조 로봇의 서비스는 인간-로봇 간의 접촉 및 상호작용과 관련된 서비스 부족

- 텍사스 A&M 대학교(미국)의 CRASAR(로봇 지원 수색 및 구조 센터) 및 캐나다 수색 및 구조 자원 봉사 협회(캐나다)와 같이 수색 및 구조 작업에 참여하는 여러 협회가 있음.
 - 드론을 기반으로 하며 인간-로봇 간의 접촉 및 상호작용과 관련된 서비스 부족

6.1.4. 특허 분석

▣ 촉매 나노입자 설계용 AI 스마트연구실 연구동향

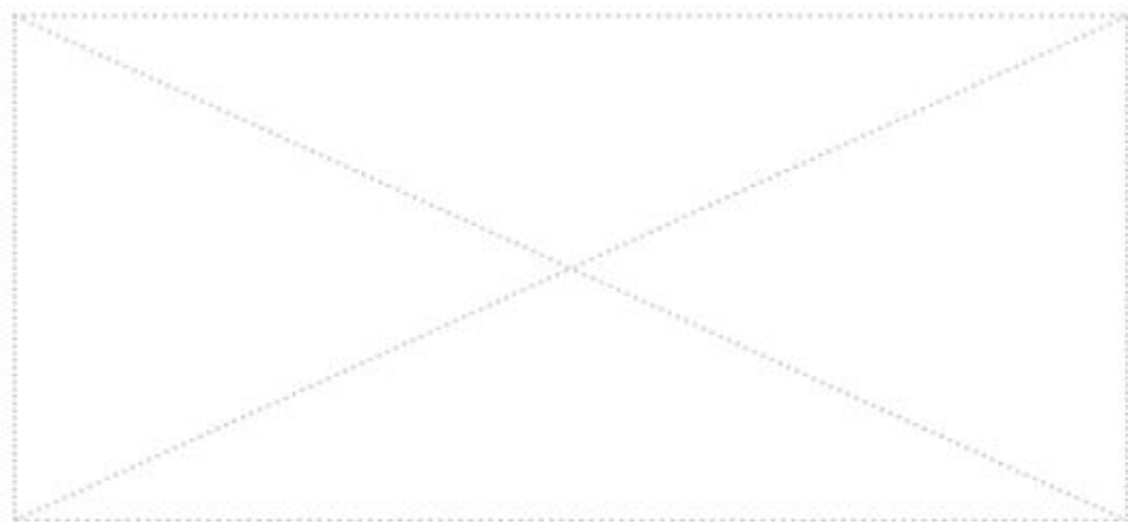
- 검색기간 : ~2022년 1월까지 검색된 특허
- 범위 : 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인 : 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB : Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

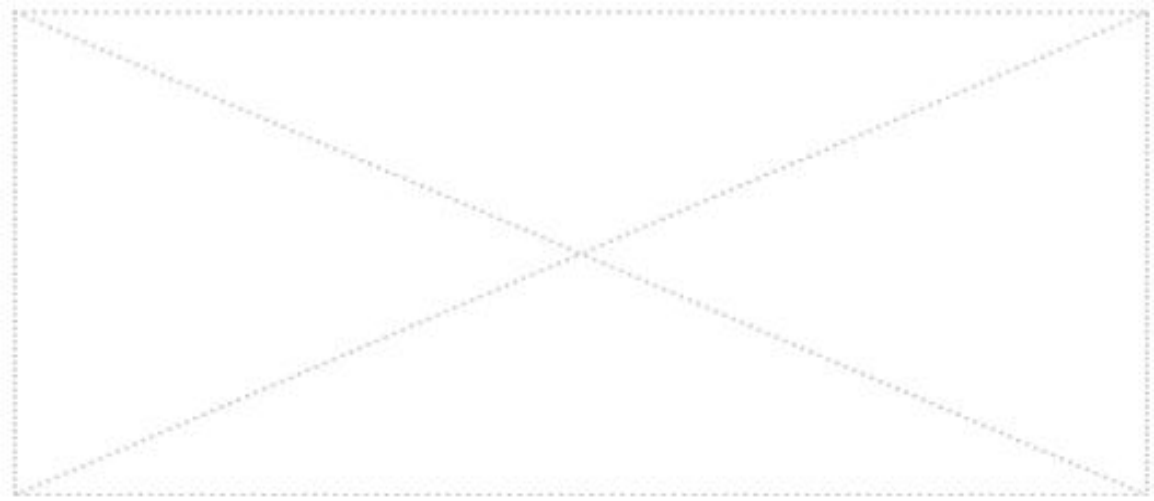
검색식				
((휴머노이드* humanoid* 휴먼* 인간* human*) near5 (로봇* 로보* robot*)) and (인터랙션* 인터랙트* interact* 상호작용* "상호 작용*" 교감* 느낌* feel* cummun* 감성교류* "감성 교류*" "emotional interchange*" 신체접촉* "신체 접촉*" "physical contact" "body contact*" 컨택* 콘택* contact* 포옹* embrac* cuddl* 허그* hug* 소프트* soft* 부드* smooth* 연성체* ductilit* 신축* 연체* 유연* 휘어* 플렉시블* 플렉서블* flexibl* fluid* pliabl* pliant* 고무* rubber* 변형* transfor* 피부* 스킨* skin* 기계학습* "기계 학습" learn* train* 러닝* 학습* "artificial intelligence" 인공지능* "인공 지능")				
한국	미국	일본	유럽	합계
659	587	229	181	1,656

▣ 연도별 특허발표 현황

- 검색된 특허 1,656건을 중복제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 222건의 특허가 최종 선정되었음
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함. 즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님
- 미국(91건, 41%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 한국(69건, 31%), 일본(36건, 16%), 유럽(26건, 12%) 순임
- 참고로, 본 과제의 검색 범위를 휴머노이드, 소프트로봇, 감성 교감 등에 포커싱을 하여 좁게 찾으면, 검색되는 건수가 거의 없기에, 다소 범위를 넓혀서 검색하였음

구분	02	03	04	05	06	07	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	총합계
유럽	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	10	1	2	2	2	2	1	1	26
일본	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	7	3	6	0	3	1	0	36
한국	0	1	0	0	3	3	7	3	7	4	2	2	6	6	2	10	8	5	0	69
미국	0	1	0	0	1	0	2	2	3	3	3	7	15	10	16	8	10	7	3	91
계	1	4	2	2	6	5	11	7	12	9	6	20	29	21	26	20	23	14	4	222



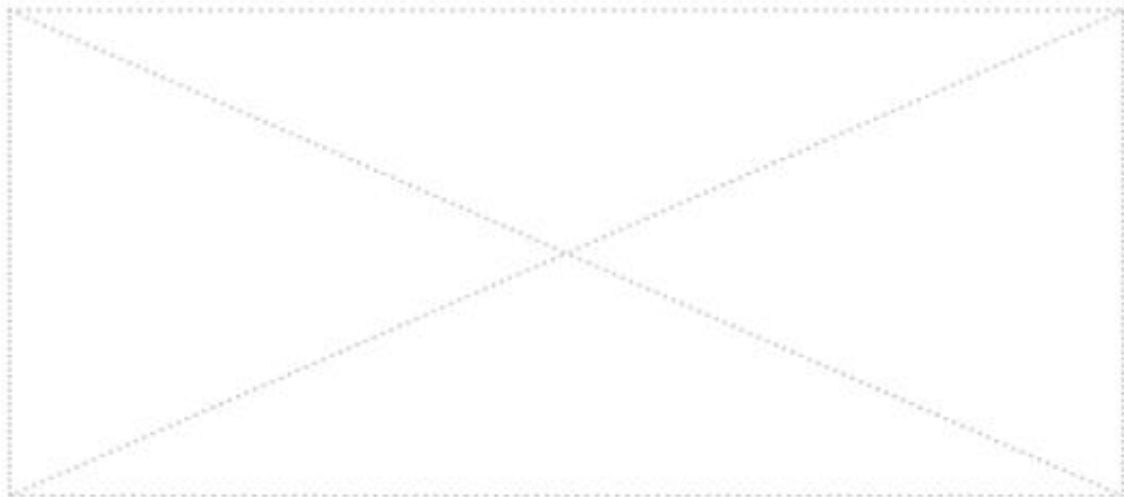


■ 국가별 특허발표 현황

○ 상위 10개 출원인은 아래와 같음

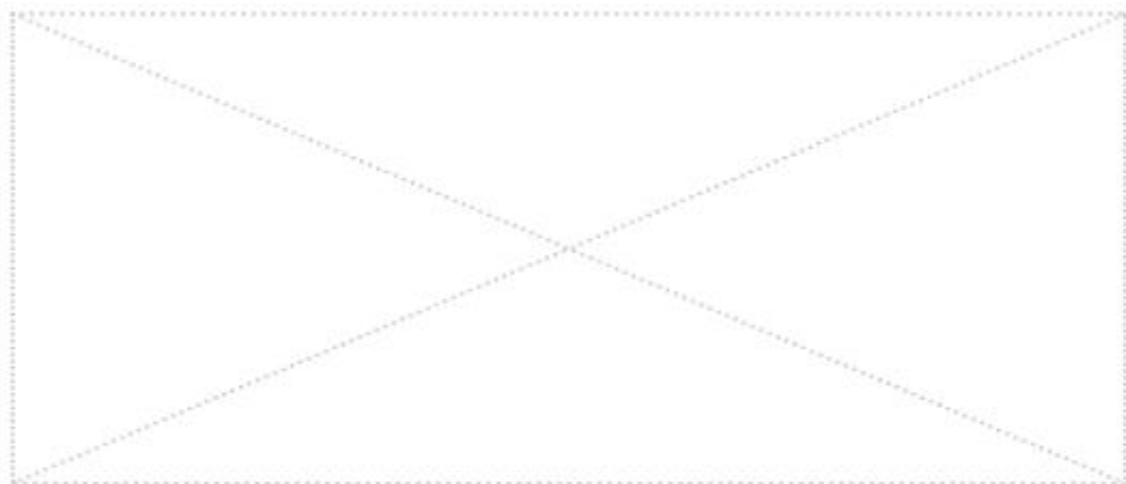
○ Softbank Robotics Europe이 27건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음

순위	기관	특허수	비율
1	Softbank Robotics Europe	27	27.6%
2	한국전자통신연구원	22	22.4%
3	The Johns Hopkins University	9	9.2%
4	FANUC Corporation	9	9.2%
5	ADVANCED TELECOMMUNICATION RESEARCH INSTITUTE INTERNATIONAL	6	6.1%
6	Amazon Technologies, Inc.	5	5.1%
7	Aldebaran Robotics	5	5.1%
8	한국과학기술원	5	5.1%
9	인하대학교 산학협력단	5	5.1%
10	KUKA Systems GmbH	5	5.1%



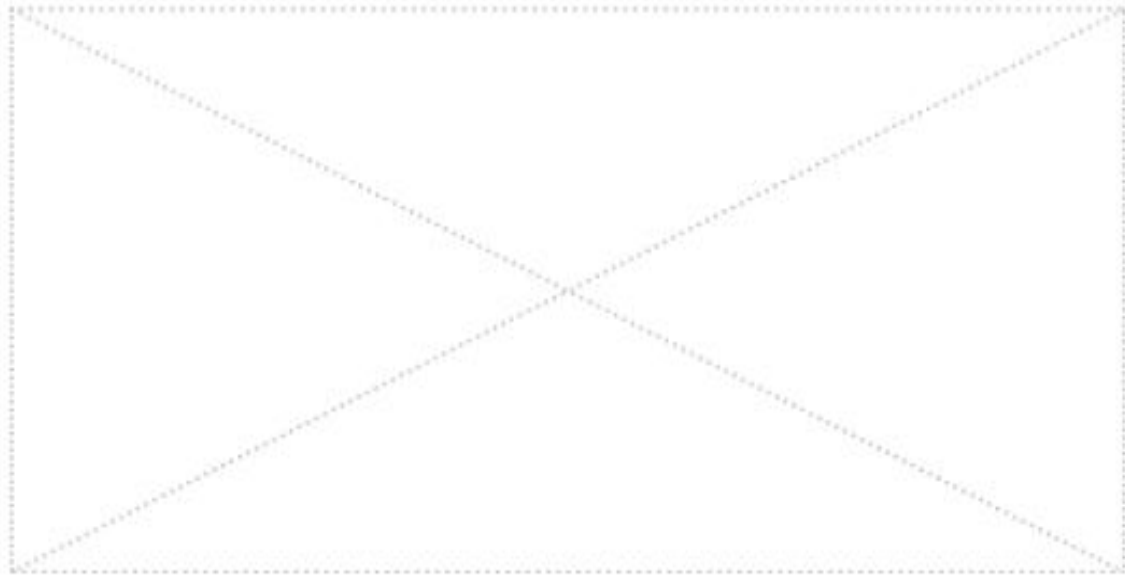
- 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음
- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 한국이 39건으로 가장 많으며, 그 뒤로 미국(27건), 일본(20건) 및 유럽(12건) 순임

순위	기관	유럽	일본	한국	미국	특허수
1	Softbank Robotics Europe	3	11	6	7	27
2	한국전자통신연구원	0	0	22	0	22
3	The Johns Hopkins University	1	2	1	5	9
4	FANUC Corporation	0	0	0	9	9
5	ADVANCED TELECOMMUNICATION RESEARCH INSTITUTE INTERNATIONAL	0	6	0	0	6
6	Amazon Technologies, Inc.	1	1	0	3	5
7	Aldebaran Robotics	4	0	0	1	5
8	한국과학기술원	0	0	5	0	5
9	인하대학교 산학협력단	0	0	5	0	5
10	KUKA Systems GmbH	3	0	0	2	5
합계		12	20	39	27	98



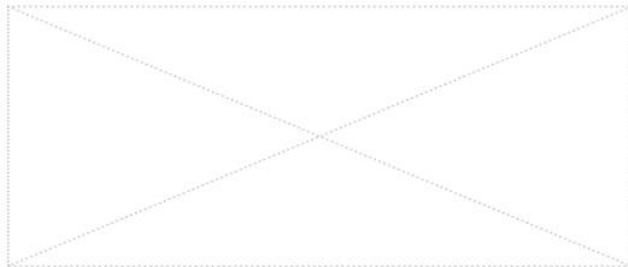
- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 743회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에서도 미국이 높게 나타나고 있음
- 즉, 상위 출원인 중에 다양한 국적의 출원인이 많지만, 실제로는 미국에서의 특허출원 활동이 가장 활발하며, 심사관 등에 의해 인용되는 빈도도 미국에서 가장 높음

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	743	60	12.38
한국	567	62	9.15
일본	222	24	9.25
프랑스	212	32	6.63
독일	54	11	4.91
대만	45	4	11.25
스위스	14	4	3.50
중국	9	9	1.00
이스라엘	9	1	9.00
영국	4	5	0.80
네덜란드	1	1	1.00
캐나다	0	1	0.00
아일랜드	0	1	0.00
인도	0	2	0.00
이탈리아	0	3	0.00
케이맨제도	0	1	0.00
싱가포르	0	1	0.00
글로벌 평균	110.59	13.06	4.05

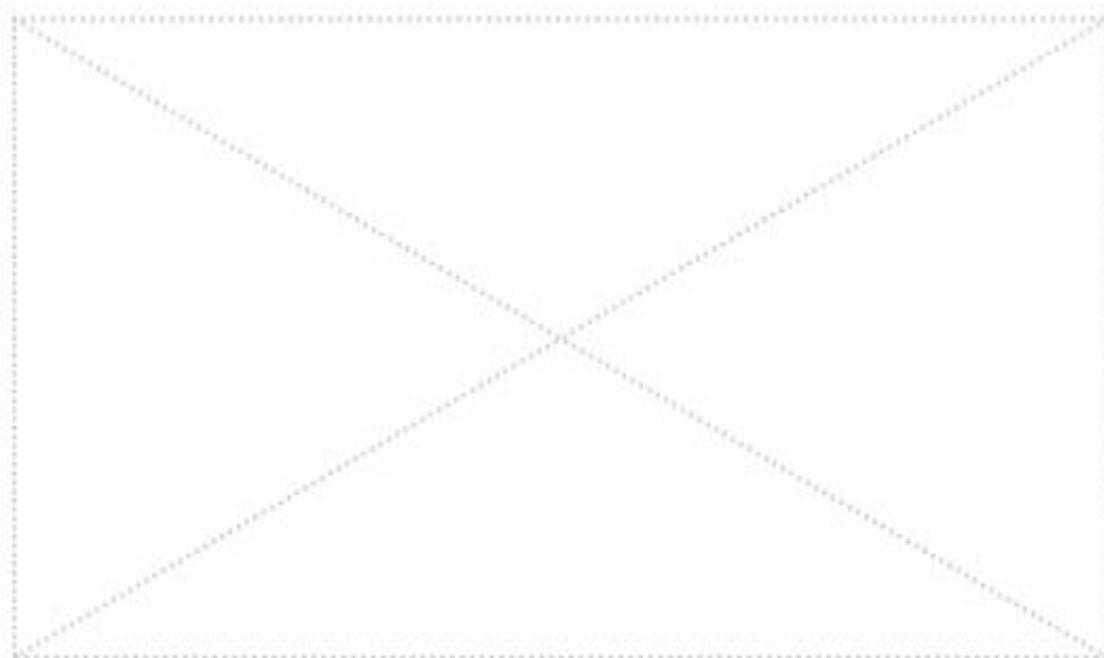


■ 기술수명 주기별 동향

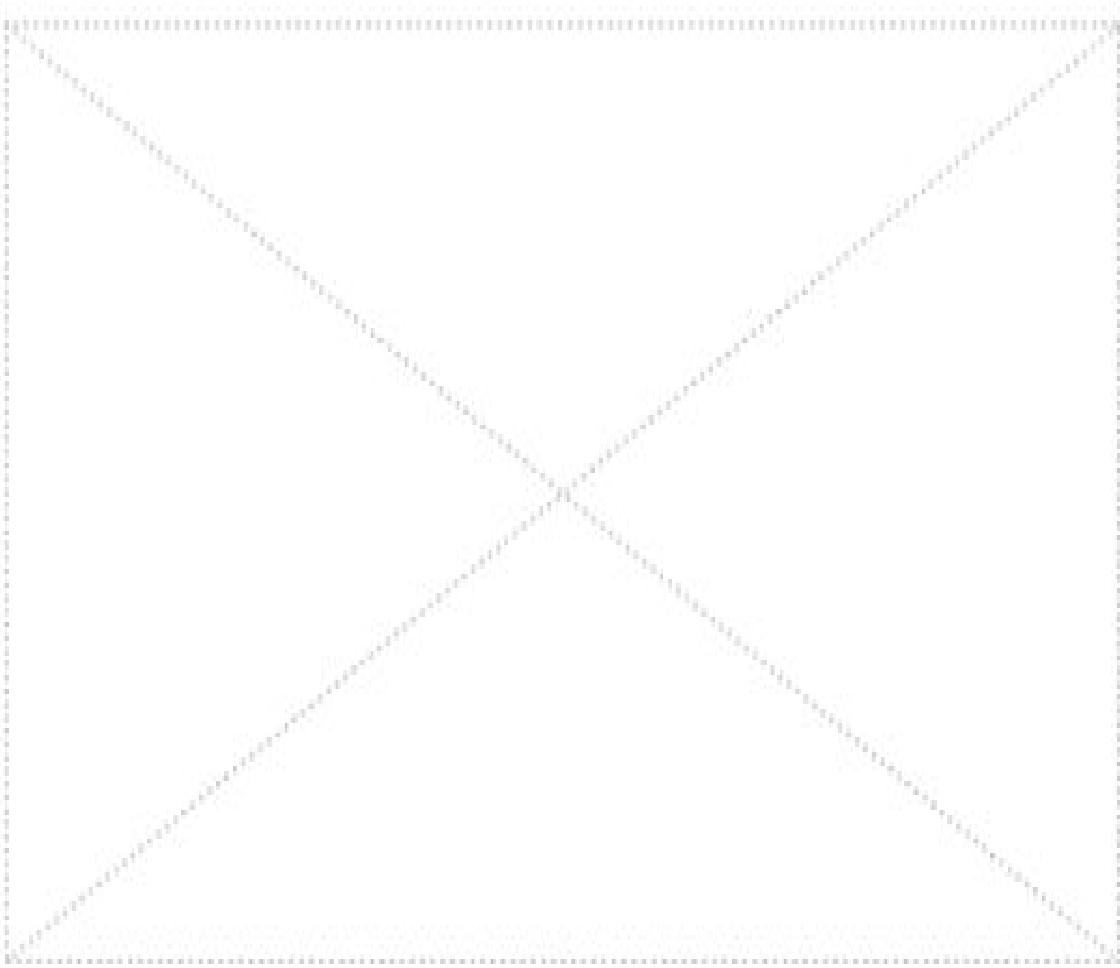
- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 출원건수는 계속적으로 증가하다가 3구간부터 최근구간까지 비슷한 출원 건수를 나타내고 있으며, 출원인수 역시 계속적으로 증가하다가 5구간에서 다소 감소하고 있으므로 성장기로 볼 여지도 있고 약간 성숙기로 진입하고 있는 것으로 볼 여지도 있음. 따라서, 본 기술분야는 지속적으로 연구개발이 되고 있으며 향후 특정 출원인이 집중해서 연구개발하고 있는 분야로 판단할 수도 있음. 한편, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 휴머노이드, 소프트로봇, 감성 교감 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것이므로, 만약 본 분석을 휴머노이드, 소프트로봇, 감성 교감 등에 좁혀서 찾는다면, 성장기에 해당될 것이며, 이는 바꿔 말하면, 기술 선점의 기회가 넓게 열려 있는 것으로 볼 수 있음



출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간



▣ 키워드 맵

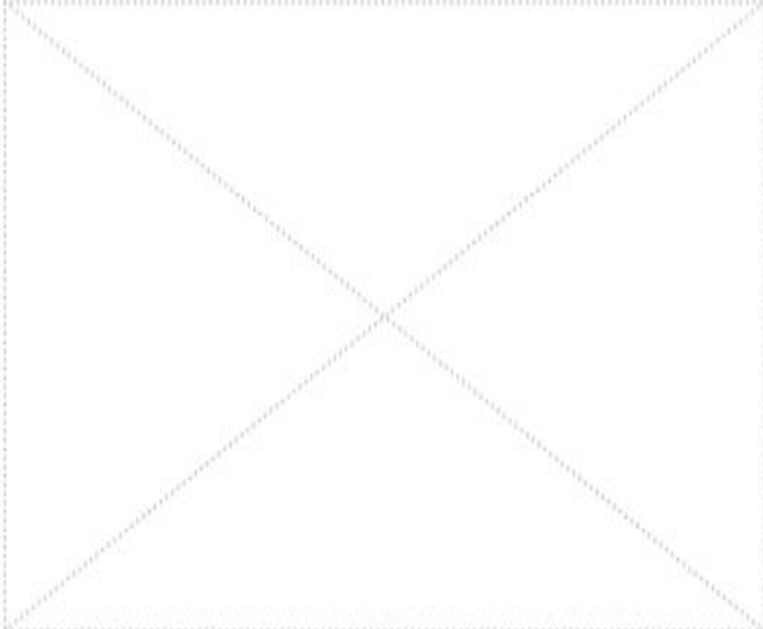


- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 VISIBLY, MEDICATION, COLLISIONS, INCIDENTS, EVASIVE ACTION 등이 키워드로 포진하고 있으며, 가장 외곽 부분에 MOBILE ROBOT, ROBOTS, POTENTIAL INTERACTION, ACTIONS BASED 등의 키워드가 일부 포진하고 있기는 하지만, 아직 “휴머노이드”, “소프트로봇”, “감성 교감” 등의 키워드가 그다지 활성화되지 않은 것으로 판단됨

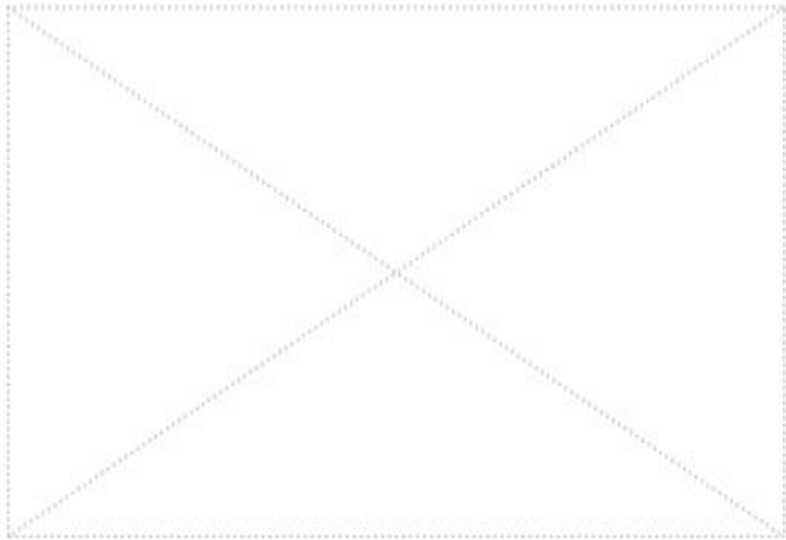
■ 핵심 특허

- 유효특허를 대상으로 위와 같은 분석을 진행하였음. 222건의 유효특허 중에서 아래와 같은 핵심특허들이 일부 검색되었음
- R&D를 투입하고 관련 특허를 창출하기 위해서는, 아래와 같은 핵심특허와는 차별화되도록 할 필요가 있으며, 아래의 특허들의 청구항에 따르면, 휴머노이드 로봇이 주위에 존재하는 사람의 이미지, 음성, 행위 등을 감지한 데이터를 바탕으로 사람과 상호작용하는 부분에 특화되어 있음

발명의 명칭	자율 생활 능력을 갖는 휴머노이드 로봇		
출원번호	2016-7032129	등록번호	2103624
출원일	2015.04.17	등록일	2020.04.16
출원인	소프트뱅크 로보틱스 유럽	발명자	벨트롭, 테일러, 매이종니어, 브루노, 몽샤스, 제롬
요약	본 발명은 주위를 탐색하여, 특히, 인간이 존재할 때를 결정하고, 필요에 따라 상기 인간과의 활동에 참여하기 위한 휴머노이드 로봇과 관련된다. 로봇의 운영 체제는 로봇에서 추출기(센서 및 처리부)에 의해 수신되는 정보를 처리하고, 현재 조건 및 인간과의 체결의 히스토리를 기초로 우선순위화되는 활동(제스처, 대화 등...)의 리스트를 만들고, 어느 활동이 런칭될 것인지를 결정하고 액추에이터가 활동을 실행하게 하도록 구성된다. 로봇의 보호 조건이 또한 수행될 활동의 리스트에서 고려된다.		
대표청구항	휴머노이드 로봇(110)으로서, 상기 휴머노이드 로봇은 로봇에 의해 실행되기 위한 활동을 불러오고 저장하기 위한 처리부로 연결된 메모리(213) - 활동은 사전-프로그램된 로봇 행동과 상기 행동의 런칭 조건을 포함하는 매니페스트 파일의 쌍으로 구성되고, 상기 런칭 조건은, 메모리 내의 하나 이상의 변수에 대한 사전정의된 조건에 따라 활동이 런칭될 수 있는지를 정의하고, 상기 활동은 사전정의된 우선순위와 연관되고, 상기 사전정의된 우선순위는, 가장 높은 우선순위부터 가장 낮은 우선순위로, 로봇을 보호하기 위한 제약을 고려하는 활동을 위한 보호 우선순위, 로봇 주위에 형성된 복수의 체결 구역 내에서, 하나 이상의 인간의 존재를 고려하는 활동을 위한 대화 우선순위, 로봇에 의해 자율적으로 수행될 수 있는 활동을 위한 자율		

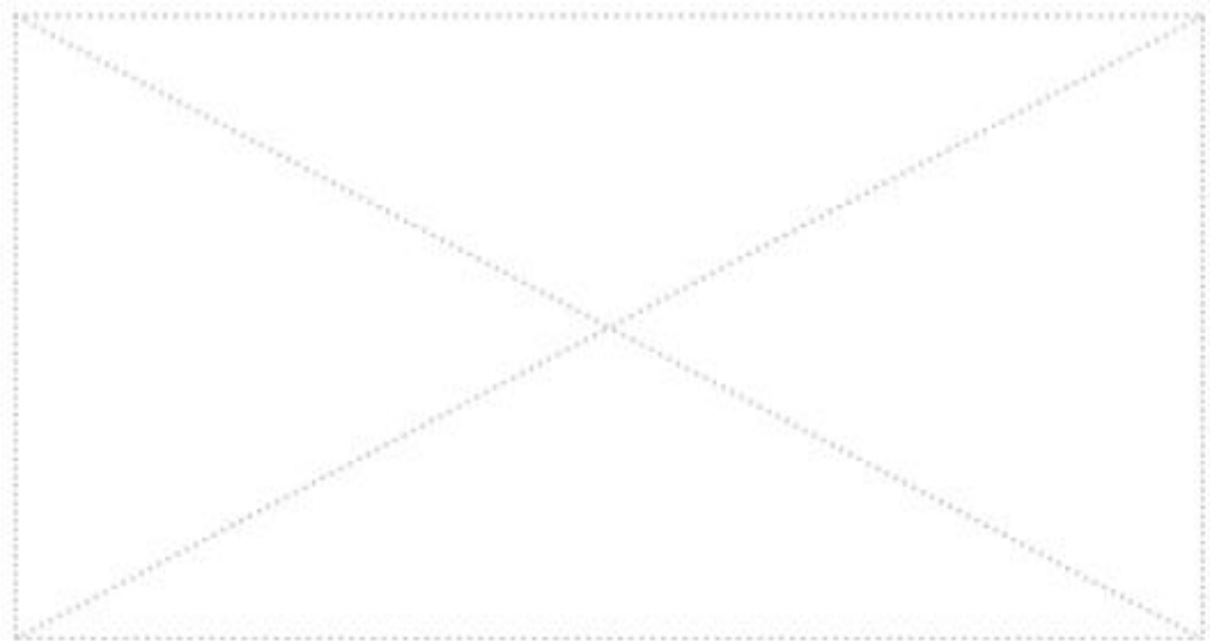
	<p>우선순위를 포함하는 그룹에서 선택됨 - , 상황, 이벤트 및 로봇 주위 장면 내 인간과의 대화 중 하나 이상을 특징 짓는 이미지, 소리, 터치, 및 관성 신호의 추출기(211), 조명 신호, 디스플레이된 정보, 소리, 음성, 운동 중 하나 이상의 동작의 액추에이터(212) - 상기 하나 이상의 동작은 행동에 속함 - 를 포함하고, 상기 휴머노이드 로봇은, 런칭 조건이, 가장 높은 우선순위를 갖지 않은 활동을 제거하기 위해 우선순위화된 리스트를 필터링하고, 우선순위화 된 리스트가 둘 이상의 활동을 포함할 때, 우선순위화된 리스트를 랜덤화함에 의해 충족된 사전정의된 활동의 우선순위에 따라 우선순위화된 활동 리스트를 자동으로 생성하고, 상기 우선순위화된 활동 리스트에서 첫 번째 활동을 선택하며 상기 활동의 실행을 하나 이상의 액추에이터에게 명령하기 위한 마인드 모듈(230)을 더 포함하는, 휴머노이드 로봇.</p>
대표도면	

발명의 명칭	Engaging in human-based social interaction for performing tasks using a persistent companion device		
출원번호	15/074684	등록번호	11148296
출원일	2016.03.18	등록일	2021.10.19
출원인	NTT DISRUPTION US, INC.	발명자	Cynthia Breazeal
요약	<p>A persistent companion robot detects human interaction cues through analysis of a range of sensory inputs. Based on the detected cue, the robot expresses a skill that involves interacting with human through verbal and non-verbal means to determine a second interaction cue in response to which the robot performs a second skill such as facilitating social interactions between humans, performing utilitarian tasks, informing humans, and entertaining humans.</p>		
대표청구항	<p>A method of humanized interaction to express a skill by a persistently present social robot, comprising:</p> <p>detecting a first one human interaction cue with a social robot by:</p> <p>detecting a presence of at least one human in proximity to the social robot via at least one of listening to the human speak, seeing the human, and receiving physical contact by the human, wherein listening comprises capturing audio that includes at least one audible noise produced by the human, wherein seeing comprises capturing video that includes at least a portion of the human, and wherein receiving physical contact comprises detecting contact via a tactile sensor;</p> <p>analyzing at least one of the captured audio, the captured video and the detected contact to detect the least one human interaction cue, wherein the social robot facilitates interaction through non-verbal communication between the human and the social robot, the non-verbal communication comprising movement and positioning of a plurality of moveable segments of the social robot to strike a pose that corresponds to a context of the detected first human interaction cue;</p> <p>retrieving, based on the detected first human interaction cue, a first robot skill from a remote data source, the first robot skill expressible by the social robot for facilitating human interaction;</p>		

	<p>expressing the first robot skill by the social robot performing at least two of emitting a sound cue that facilitates communication, emitting lighting effects via an ambient LED, emitting natural language speech via an audio output feature of the social robot, moving a plurality of segments of the social robot to facilitate audio and video image communication to the human, moving at least one segment of the social robot to form an expressive pose of the robot appropriate for the skill, and displaying imagery on a display screen of the social robot for communicating a response to the detected first human interaction cue;</p> <p>repeating the steps of detecting for a second human interaction cue and retrieving a second robot skill; and</p> <p>expressing the second robot skill by performing at least two of the expressing steps, wherein expressing at least one of the first robot skill and the second robot skill comprises expressing a range of personality traits that adapt over repeated interactions with the human to provide improved human companionship.</p>
대표도면	

6.1.5. 개발 목표 및 내용

- ▣ 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 플랫폼은 휴머노이드의 강점과 소프트 로봇의 강점을 융합하여 다양한 작업 및 사용자와의 물리적 접촉을 통한 구조 작업을 안정적으로 수행할 수 있도록 함
- ▣ 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 플랫폼에 AI 기술을 접목하여 사용자에게 대한 의도를 파악하고 및 맞춤형 구조 작업 수행을 가능하게 함
- ▣ 일상생활에서의 활용을 포함한 인간과의 접촉을 필요로 하는 인명 구조 로봇 분야에서도 활용이 효과적으로 이루어질 수 있도록 함



[재난 구조용 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 플랫폼 시스템 구성도]

▣ 연구개발 내용

- 소프트 로봇과 결합할 수 있으면서도 재난 현장에서 운용이 가능한 휴머노이드 로봇 골격 설계 및 개발
 - 계단, 사다리, 좁은 통로, 문 등 각종 지형 및 지물 장애물로 인하여 접근이 어려운 현장에서 균형을 잡고 이동할 수 있도록 설계해야 함.

- 로봇의 이동 및 팔을 조작함에 있어서 안전하고 유연한 힘 제어가 가능한 최적화 기반 전신 제어 기술의 개발
 - 다관절로 구성된 휴머노이드 로봇 전신을 움직임에 있어서 제어 솔루션은 무수히 많으며 동시에 관절 제한과 같은 다수의 제약 조건을 만족시켜야 하므로 최적화 기반의 전신 제어 기술을 개발하여 로봇의 상위 제어기로 활용함
 - 계층적 작업 구조 및 다수의 제약 조건을 만족할 수 있는 제어구조를 개발하여 사람과의 안전한 접촉 및 균형 유지 등을 높은 우선순위로 한 로봇 제어가 가능하도록 함
 - 상해를 입고 있는 사람을 구조하기 위해서 사람과 로봇의 안전한 물리적 상호작용이 필요하므로, 소프트 물질과 유연한 제어 기법을 통해 안전성을 확보함
- 사람과 거부감 없이 접촉할 수 있도록 부드럽고 안전한 신소재 개발
 - 사람과 부드럽게 접촉할 수 있어야 하며 독성이 없는 안전한 재료 개발
- 사람의 근육처럼 부드럽고 유연한 움직임을 낼 수 있는 소프트 액추에이터 개발
 - 활용이 용이한 범용형 액추에이터를 개발하여 인체의 소근육과 유사한 형태와 움직임으로 다양한 동작을 구현
 - 이동시 고르지 못한 표면이나 장애물에도 균형을 잡을 수 있도록 하지 소근육을 구현
 - 구조자의 체형에 상관없이 안정적이고 유연하게 접촉할 수 있는 소프트 액추에이터 기술 개발
- 소프트 로봇 기술을 활용한 낙상 충격 흡수 시스템 개발
 - 예상치 못하게 낙상 사고가 발생할 경우 로봇의 본체 및 구조자의 충격을 흡수하고 피해를 최소화할 수 있도록 소프트 로봇 기술 개발
- 사람/대상과 접촉 시 대상의 움직임 및 액추에이터의 성능을 감지하기 위한 소프트 센서 기술 개발
 - 접촉 시 대상에 가해지는 힘, 사람의 움직임 등을 측정할 수 있는 소프트 센서를 개발하여 소프트 스킨에 내장하고 정보를 전달받아 제어에 활용
 - 소프트 센서는 안정적으로 힘의 위치와 크기를 3차원적으로 분석할 수 있도록 시스템 구현

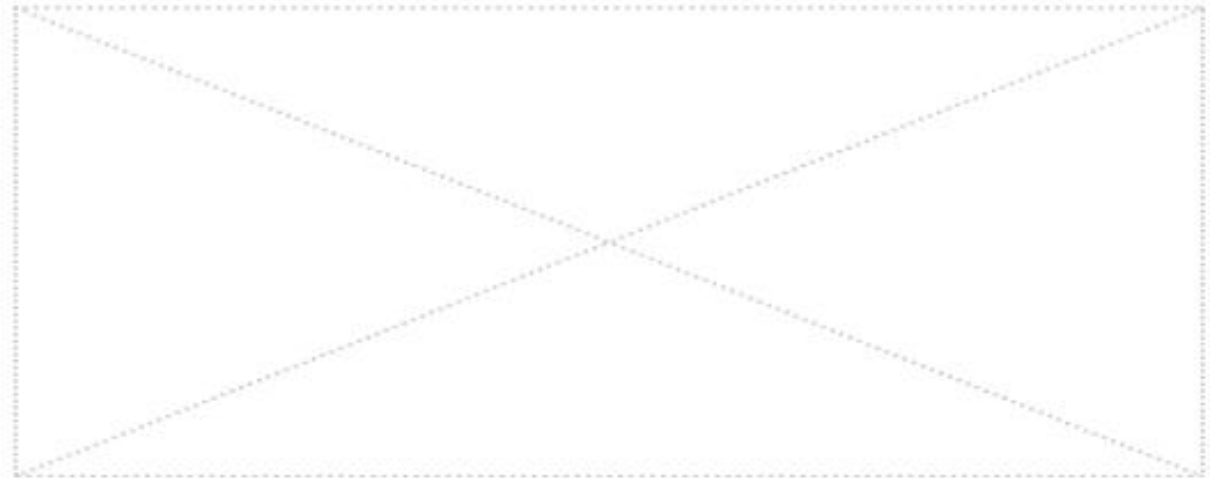
- 대상을 포착하기 위한 비전 인식 기술 개발
 - 작업 대상을 포착하고 대상에 따른 로봇의 동작 크기 및 접근 경로 등을 제어하기 위한 정보를 제공하는 기술 개발
- 다양한 작업을 수행하기 위한 작업 플래닝 기술 개발
 - 장애물에 맞추어 다양한 작업을 수행할 수 있도록 플래닝 기술 개발
 - 실종자를 식별하여 부상정도에 따른 맞춤형 플래닝 기술 개발
 - 안전한 경로로 인명을 구조하여 복귀할 수 있는 매핑 및 플래닝 기술 개발
- 사람과 로봇의 자연스러운 물리적 상호작용을 위한 pHRI (physical Human Robot Interaction) 기술 개발
 - 로봇과 사람의 접촉을 만들기 위해 사람의 자세, 위험 요소를 분석하고 안전함과 편안함을 주기 위한 최적의 로봇 자세와 동작 생성 기술 개발
- 사람과 로봇의 자연스러운 상호작용을 위한 HRI (Human Robot Interaction) 기술 개발
 - 로봇과 사람의 상호작용을 위해 음성 인식 기술 및 의도 파악 기술 개발
- 의료진의 원격 진료 및 응급 치료를 위한 원격 제어 기술
 - 정밀한 원격 작업을 위한 원격 제어 기술과 햅틱 기술의 개발

6.1.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

■ 추진체계

- 재난현장 인명 구조용 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 설계는 휴머노이드 로봇 개발 Lab, 소프트 로봇 개발 Lab, 인공지능을 활용한 사용자 인식 Lab 3개의 세부 개발팀으로 나누어 진행
- 주관기관은 로봇 플랫폼 개발 경험이 풍부한 KIST AI 로봇 연구소가 담당하고, 4개의 국내 참여기관과 공동연구로 진행
 - 주관기관은 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 개발 총괄 업무 및 3개의 Lab 별 세부 개발팀의 총괄 책임 역할을 담당
- 휴머노이드 로봇 설계 및 제어 그룹에서는 주관기관인 KIST 외 2개의 국내 참여기관으로 구성
 - 휴머노이드 로봇 개발 경험이 풍부한 KIST 지능로봇연구단에서 로봇 하드웨어의 설계 및 제작, 로봇의 제어 시스템 개발, 자율주행 시스템 개발 및 시스템 통합 역할을 담당
 - 참여기관 1은 사람과 로봇의 물리적 상호작용을 위한 pHRI 기술 개발
- 소프트 로봇 설계 및 제어 그룹에서는 주관기관인 KIST 외 2개의 국내 참여기관으로 구성
 - 소프트 로봇 개발 경험이 풍부한 KIST 지능로봇연구단에서 소프트 로봇의 액추에이터 설계 및 제작, 소프트 로봇의 제어 시스템 개발 및 시스템 통합 역할을 담당
 - 참여기관 2는 소프트 스킨 제작을 위한 신소재 개발 및 물성 테스트, 참여기관 3은 소프트 센서 기술 개발을 담당
- 인공지능을 활용한 사용자 인식 그룹에서는 주관기관인 KIST 외 1개의 국내 참여기관으로 구성
 - 인공지능 및 사용자 의도 파악 연구 경험이 풍부한 KIST AI 로봇 연구소에서 비전 센싱 기술을 활용한 동작 인식 및 모사, 대상 파악, 경로 탐색, 음성인식, 인간-로봇 상호작용 연구 및 시스템 통합 역할을 담당
 - 참여기관 4은 재난 인명 구조용 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 활용을

위한 인터페이스 개발 역할을 담당



[재난현장 인명구조용 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 플랫폼 개발 추진 체계]

▣ 연구개발 로드맵

○ 1년 차: 기반 원천 기술 개발

- 휴머노이드 로봇 개념 설계
- 인명 구조를 위한 pHRI용 사람-로봇 상호작용 모델 개발
- 근육 모사를 위한 소프트 액추에이터 재료 및 구동 메커니즘 개발
- 안전한 소프트 스킨 신소재 개발 및 물성 테스트
- 유연한 소프트 센서 개발 및 안정성 테스트
- 인공지능을 활용한 장애물 및 환경 인식 시스템 구축
- 인공지능을 활용한 구조 경로 최적화 시스템 구축
- 인공지능을 활용한 구조자 인식 시스템 구축
- 인공지능을 활용한 구조자 상태 맞춤형 플래닝 시스템 구축
- 인공지능을 활용한 음성 인식 시스템 구축
- 사람-로봇 인식에 관한 연구 및 하드웨어 디자인

○ 2년 차: 설계 및 시스템 구축

- 휴머노이드 로봇 상세 스펙 및 골격 상세 설계
- 개발한 pHRI를 위한 시스템 설계
- 로봇 전신제어 기술 개발
- 소프트 액추에이터 군집 제어 기술 개발
- 소프트 스킨 신소재 최적화
- 소프트 센서 최적화 및 로봇 부위별 센싱 범위 구체화
- 인공지능을 활용한 장애물 및 환경 인식 시스템 테스트
- 인공지능을 활용한 구조 경로 최적화 시스템 테스트
- 인공지능을 활용한 구조자 인식 시스템 테스트
- 인공지능을 활용한 구조자 상태 맞춤형 플래닝 시스템 테스트
- 인공지능을 활용한 음성 인식 시스템 테스트
- 사람-로봇 디자인 평가 및 최적화

○ 3년 차: 가공 및 구동 / 제어

- 소프트 액추에이터와 스킨과 결합된 휴머노이드 로봇 제작

- pHRI를 위한 시스템의 구현
 - 로봇 자율주행 기술 구현
 - 소프트 액추에이터를 활용한 근육 구현
 - 소프트 스킨 제조 및 소프트 센서 내장
 - 인공지능을 활용한 디지털 트윈 시스템 구축
 - 인공지능을 활용한 구조 동작 시뮬레이션
 - 인공지능을 활용한 대상 맞춤형 테스크 플래닝 설계
 - 인공지능을 활용한 다양한 시나리오 및 음성 인식 시스템 구현
 - 소프트 휴머노이드 외형 목업 설계
- 4년 차: 시스템 통합 및 최적화
- 하드웨어 및 제어를 위한 시스템 통합
 - 인공 지능 시스템 통합
 - 개발한 요소 기술들의 성능 검증 및 최적화
 - 사용자 평가를 통한 개선점 도출
- 5년 차: 시스템 최적화 및 사용자 평가 테스트
- 전체 시스템의 통합과 GUI 개발
 - 통합 하드웨어의 인공 지능 시스템 적용 및 최적화
 - 인간-로봇 상호작용 평가 테스트를 통한 최종 시스템 안정화 및 완성

6.1.7. 소요 예산

▣ 사업 기간 : 5년 (2022~2026년)

▣ 사업비 규모 : 국비 총 200억 원 (26억 원/년)

▣ 연차별 연구비

[단위: 억 원]

구분		'22	'23	'24	'25	'26	계
정부 (출연 금)	휴머노이드 로봇 기술	20	20	20	20	20	100
	소프트 로봇 기술	10	10	10	10	10	50
	인공지능 기술	10	10	10	10	10	50
소계		40	40	40	40	40	200
총 사업비							200

▣ 사업비 산출 근거

- 본 과제의 필요인력은 약 11명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 미래창조과학부에서 지원하는 로봇 개발 연구의 평균 연구비는 20억 원/년 규모임

전문가 1	로봇 설계 전문가
전문가 2	로봇 제어 전문가
전문가 3	로봇 자율주행 전문가
전문가 4	pHRI 전문가

전문가 5	소프트 로봇 및 액추에이터 전문가
전문가 6	소재 전문가
전문가 7	소프트 센서 전문가
전문가 8	동작 인식 및 모사를 위한 인공지능 전문가
전문가 9	사용자 의도 파악 및 음성인식 전문가
전문가 10	인간-로봇 상호작용 전문가
전문가 11	영상 분석 전문가

○ 전문가 필요성

- 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 하드웨어 개발은 전자, 기계, 재료, 화학 등 다양한 분야의 기술 융합과 지식이 필요하므로 각 분야 다수의 전문가를 필요로 함
- 자율지능 소프트 휴머노이드 로봇 소프트웨어는 다양한 동작 구현과 작업 수행을 위하여 최첨단 인공지능 기술과 사용자 의도 파악이 중요함
- 특히 사람과 로봇이 안정적인 물리적인 상호작용을 하기 위해서는 안전을 위하여 재료의 안전성, 힘 제어, 동작 제어 등 고려해야 할 다양한 인자를 확인하고 연구할 전문가가 필요함
- 사람이 로봇과 편안하게 상호작용을 하기 위해서는 심리적, 심미적 요소 역시 고려하여야 하기 때문에 해당 전문가를 필요로 함

○ 재료비 필요성

- 휴머노이드 로봇은 뼈대 설계, 가공, 제작에 활용되는 고가의 전자 장비 및 부품, 유지보수 비용 등에 재료비 20억 원 이상이 필요하며, 완성도 높은 외형의 로봇 디자인에 약 5억 원 이상이 필요하여 약 25억 원 이상의 하드웨어 비용이 필요할 것으로 예상됨
- 소프트 로보틱스 기술 구현을 위해서는 소프트 메타리얼 개발을 위한 화학 실험 인프라 구축 및 다양한 소재와 화학 약품을 구매하기 위하여 재료비가 5억 이상 필요하며 물성 실험을 위한 고가의 장비나 시험비가 필요하므로 10억

이상의 비용이 소모될 것으로 예상됨

- 물체 인식, 의도 파악, 동작 인식 등을 위하여 AI 장비 구축을 위한 재료비가 5억 이상 필요할 것으로 예상되며 사용자 친화형 인터페이스 개발에 2억 이상 소모될 것으로 예상됨

- 개발과정에서 플랫폼의 성능 테스트를 위해 사람을 동반한 실험이 수행되어야 하므로 약 2 억 원의 실험 비용 및 분석 비용으로 1 억 원이 발생할 것으로 예상됨

6.1.8. 기대효과

■ 물리적 효과

- 물리적으로 사람과의 접촉을 통해 인명구조에 직접적으로 도움을 줄 수 있는 로봇으로 활용 가능
- 섬세한 동작 구현을 통해 다양한 작업을 수행하는 로봇으로 활용 가능
- 노동력이 소모되었던 일상생활의 가사노동, 산업 현장에서의 노동 등을 기존 설비 그대로 로봇 대체 가능
 - 줄어드는 인력난 문제 해결과 위험한 현장 노동으로 유발되었던 근골격계 질환 방지 가능

■ 사회적 효과

- 재난 현장에서 인명을 구조하며 발생하는 2차 인명 피해를 막을 수 있음
- 골든타임 내에 즉각 재난 현장 수색을 실시하고 빠르게 인명을 구조함으로써 인명 피해를 최소화 할 수 있음
- 좁은 실내 공간에서도 인명을 구조할 수 있기 때문에 다양한 재난현장에 직접적인 투입이 가능함

■ 학술적 효과

- 세계 최고 수준의 완성도를 가지는 새로운 개념의 로봇 플랫폼을 선보임으로써 한국이 로봇 기술 선진국임을 홍보하고 첨단 기술을 보유한 국가라는 인식을 전달할 수 있음
- AI, HRI, 로봇 제어, soft materials 등 여러 가지 기술을 통합한 실용적 플랫폼으로써, 이를 활용해 여러 가지 학문이 융합된 의미 있는 학술적 연구 성과들을 얻을 수 있을 것으로 기대함
- 소프트 로봇을 적극적으로 활용한 인명 구조용 휴머노이드 로봇 플랫폼이 학계에 발표된 바 없으므로 하이임팩트 저널에 출판하여 학술적 파급 효과를 기대할 수 있음

- 다양한 재난현장에 대해 장애물 회피나 타격 등의 다양한 물리적 반응을 구현할 수 있음
- 소프트 로봇과의 연구 융합을 통해 다양한 동작을 구현할 수 있으며 타 로봇에 비해 높은 균형감을 유지할 수 있음

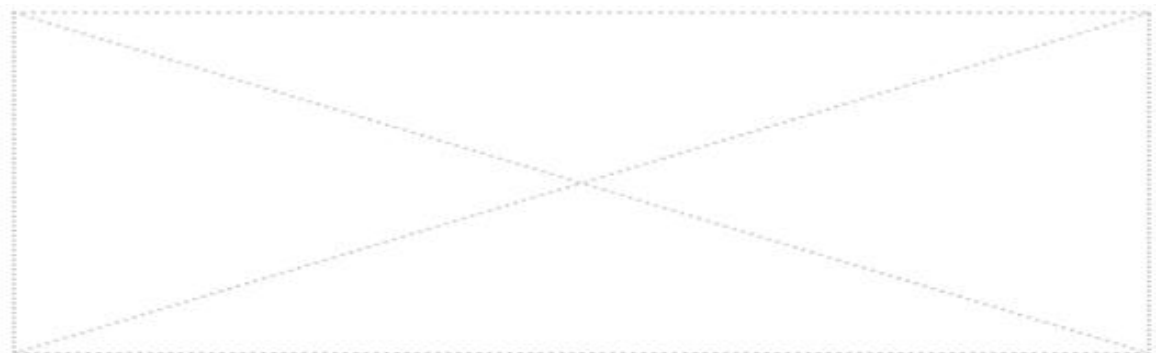
■ 경제적 효과

- 전세계적으로 일어나는 다양한 재난현장에 투입할 수 있으므로 다양한 시장이 형성되고 관련 기술을 선점할 수 있을 것으로 기대됨. 또한 관련하여 양질의 일자리를 창출할 수 있을 것으로 기대됨
- 훈련된 인재들에 대한 인명피해를 최소화 함으로써 인재를 보호할 수 있으며 의료비용을 절감할 수 있음
- 일상생활에서 활용하려고 했던 다양한 로봇 플랫폼을 안정적으로 운용할 수 있는 다양한 기술들을 이전 가능
- 실제 로봇이 안전하게 사람과 신체 접촉을 하고 인명 구조를 하는 모습을 성공적으로 보여 로봇에 대한 거부감을 감소시킴으로써 근접 서비스 로봇의 시장 진입을 가속화

6.2.1. 필요성

▣ 탐사용 로봇 기술의 개요

- 본 기술은 사람이 물리적으로 접근하기 어려운 공간을 탐사하여 정보를 수집하고 이를 송수신할 수 있는 로봇 기술로, 사막과 심해, 나아가 우주와 같은 극한 환경하에서도 활동할 수 있는 로봇을 의미함
- 본 제안 로봇 기술은 우리 삶에 이미 자리 잡고 있는 스마트 로봇을 넘어 미지의 해양 탐사를 가능하게 해줌으로써 해당 기술을 보유하고 있는 선진국과의 기술 격차를 줄이고, 미래 자원 확보 및 국내 산업의 개발 경쟁력을 더욱 높일 수 있는 기반을 제공
- 제안하는 로봇은 자율주행 기능뿐 아니라 필요한 물리적 기능을 수행할 수 있는 액츄에이터, 인지/판단 등을 가능하게 하는 비전 시스템, 그리고 이를 구동할 수 있는 에너지 공급 솔루션을 모두 포함한 시스템으로, 현재 미국과 중국, 유럽을 중심으로 우주 행성 탐사, 해저 탐사, 지하 배관 탐사 등에 도입하고자 노력하고 있음
- 다양한 센서를 통해 탐사 지역에 대한 자료를 수집할 뿐 아니라 응급 구조 시 긴급 보급품 수송, 오지로의 상품 배송 등 일반 모빌리티가 수행하기 어려운 다목적 임무까지 수행 가능한 로봇 기술

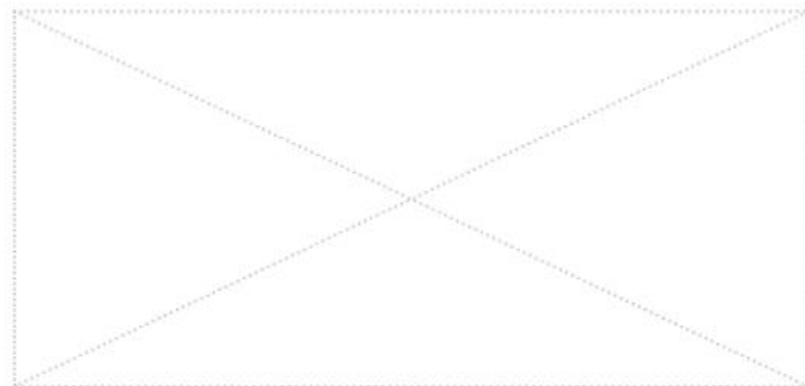


[탐사용 로봇의 적용 분야]

(출처: (좌) 타이거, 현대차, (우) www.hackster.io)

■ 소프트 로봇 도입의 필요성

- 소프트 로봇 기술은 2010년 초부터 크게 주목 받고 있는 새로운 로보틱스 분야로, 기존의 딱딱한 부품들이 연결된 로봇과 달리 자연 및 생체로부터 영감을 받아 본연의 부드러움과 기계적 순응성을 가지면서 필요에 따라 큰 변형이 가능한 로봇 기술임
- 최근 큰 주목을 받고 있는 자연 모사 로봇 및 생체 기반 로봇 역시 소프트 로보틱스 분야의 응용으로 기존의 정통 로봇들이 수행하지 못하였던 임무를 수행하기에 적합한 형태로 발전하고 있음
- 탐사용 로봇의 경우 목표 지역에 따라 인장/수축을 통한 형상 변화가 가능하다면 공간에 대한 제약이 크게 줄어들 뿐 아니라 좁은 지역에서의 정교한 탐사가 가능하여 자연 생명체를 모사한 소프트 로봇이 큰 주목을 받고 있음
- 로보틱스 분야의 축적된 노하우와 경험을 보유한 기술 선진국과 경쟁하기 위해서는 로봇에 대한 패러다임의 전환은 필수적
 - 기존 로봇 공학자들이 하드한 소재를 활용하여 더 정교하고 제어가 용이한 로봇구현에 대한 연구를 수행하였다면, 2015년 이후 변형이 용이하도록 기계적 순응도가 높은 구조체와 소프트 티슈를 도입한 소프트 로봇에 대한 관심이 크게 증가하고 있음
 - 탐사 로봇 뿐 아니라 소프트 로봇 기술은 향후 사람과 긴밀하고 안전한 교감이 가능한 인간 친화적인 시스템으로 발전해 나갈 것임
 - 특히 마이크로 스케일의 소프트 로봇은 수술을 위한 소프트 도구, 약물 전달, 웨어러블 기기, 인공 장기 및 티슈 모사 등에 크게 활용될 것으로 기대



[소프트 로봇으로의 패러다임 변화]

(출처: Sci. Transl Med. 9, eaaf3925 (2017))

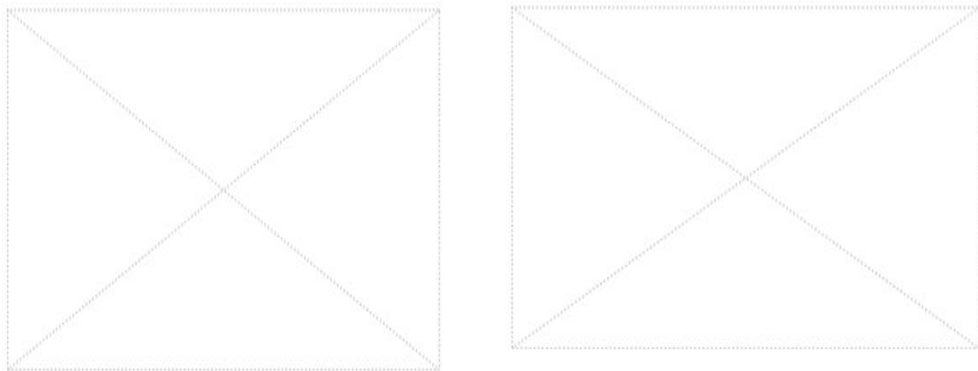
탐사용 소프트 로봇에 대한 연구 사례 1

- 주변 환경과 지역에 따라 형상을 변화 시키는 소프트 로봇 개발
 - 미국 UC Santa Barbara Elliot W. Hawkes 교수팀
 - 공압을 통해 동물과 로봇의 보행과 유사한 거동을 보이는 소프트 로봇 개발
 - 좁고 복잡한 구조물을 통과할 수 있어 해저 탐사나 구조 등에 적합



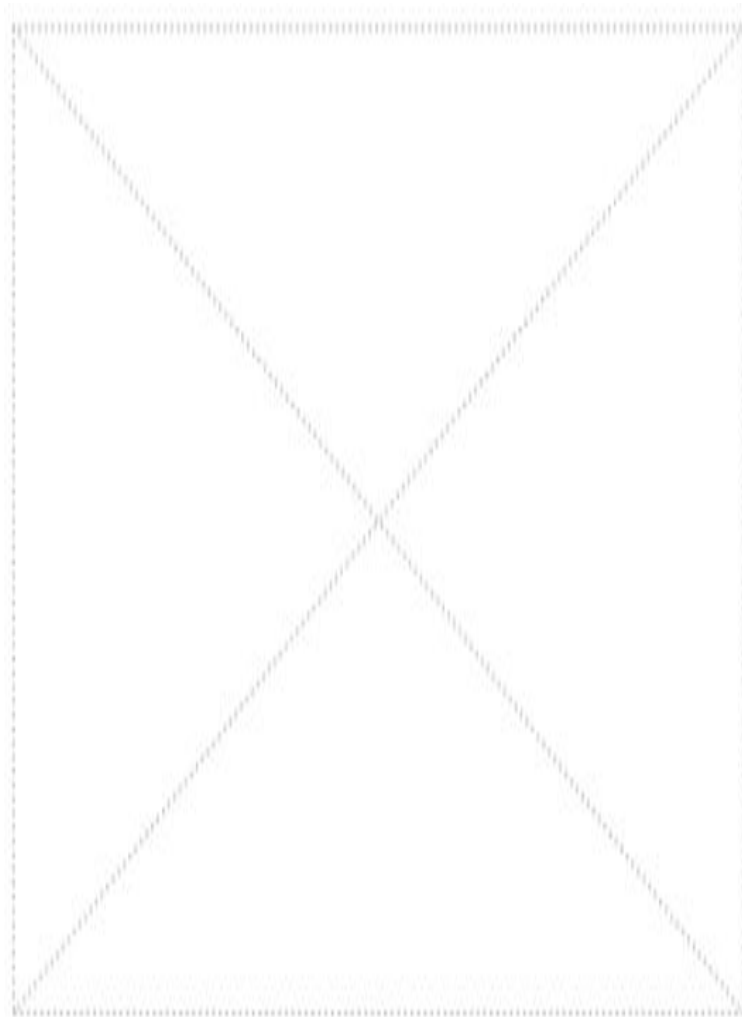
탐사용 소프트 로봇에 대한 연구 사례 2

- 음향 통신 모듈 기반 해저 탐사용 소프트 로봇
 - 미국 메사추세츠 공과대학 Robert K. Katzschmann 교수팀
 - 생물체를 모사하여 부력을 제어할 수 있는 유닛과 통신 모듈, 그리고 비전 시스템을 도입하여 물리적인 연결 없이 심해를 탐사할 수 있는 이동 능력을 갖추



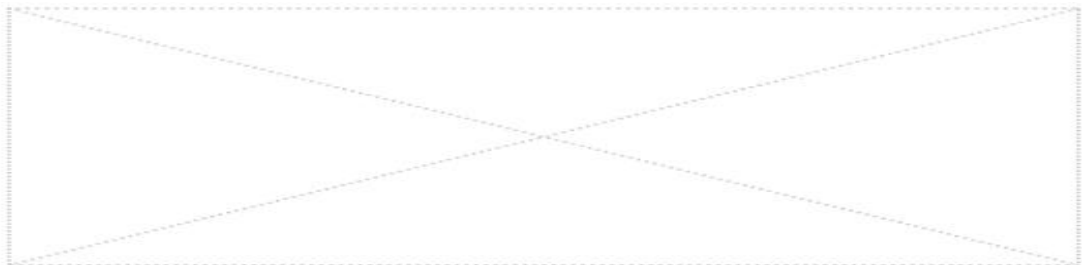
탐사용 소프트 로봇에 대한 연구 사례 3

- 분홍 뿔치 모사한 자가발전 소프트 로봇을 통해 마리나 해저 지형을 탐사
 - 중국 Zhejiang University Tiefeng Li 교수팀이 2021년 Nature 지에 연구 결과를 보고
 - 분홍 뿔치를 모사하여 사람의 물리적 접근이 어려운 해저 지형을 탐사하는 로봇을 개발하여 실증
 - 극한의 수압하에서도 소프트 바디와 디자인을 통해 자유로운 탐사가 가능
 - 배터리를 탑재하여 전원 연결 없이 심해 지역 탐사 가능

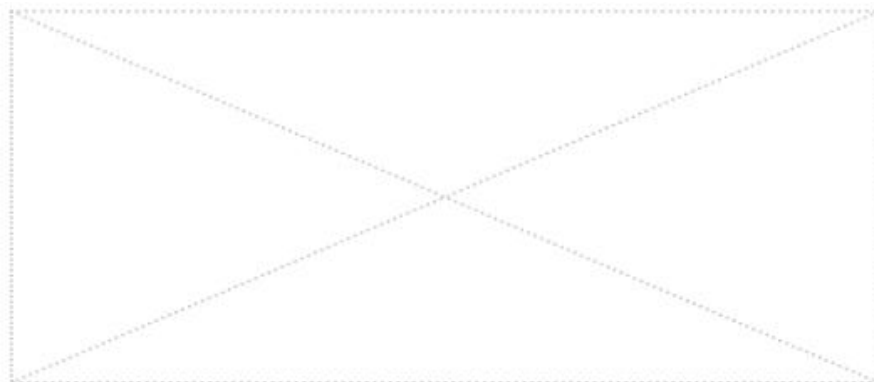


- 소프트 로봇은 변형 가능한 소재부터 로봇 디자인, 제작 공정, 액츄에이팅 메커니즘 등에서 기존 로봇과 차별화된 연구가 필수적
 - 소프트 로봇은 근육과 피부와 같은 생체 소재와 비슷한 모듈러스 (<10 Mpa 이하)를 가지는 소재를 사용함
 - 환경친화적인 소재부터 극한 환경에서의 임무까지 목적에 맞는 소재 선정 및 개발이 필요함
 - 탐사 로봇의 경우 목적과 환경에 맞는 에너지 공급과 그에 따른 다양한 액츄에이션을 구현할 수 있는 전략이 필수적

- 과거의 소프트 로봇의 연구 트렌드는 소프트 소재 개발과 거동 메커니즘, 그리고 간단한 시뮬레이션과 데모 수준이었다면, 현재는 실제 환경에서 활용 가능한 대면적 로봇 구현과 센서 탑재, 그리고 기계학습을 통한 스마트 컨트롤 기술에 대한 연구가 활발하게 진행
 - 환경친화적인 소재부터 극한 환경에서의 임무까지 목적에 맞는 소재 선정 및 개발이 필요함
 - 탐사 로봇의 경우 목적과 환경에 맞는 에너지 공급과 다양한 액츄에이션을 구현할 수 있는 전략이 필수적



[소프트 로봇에 널리 사용되는 소재와 물성]



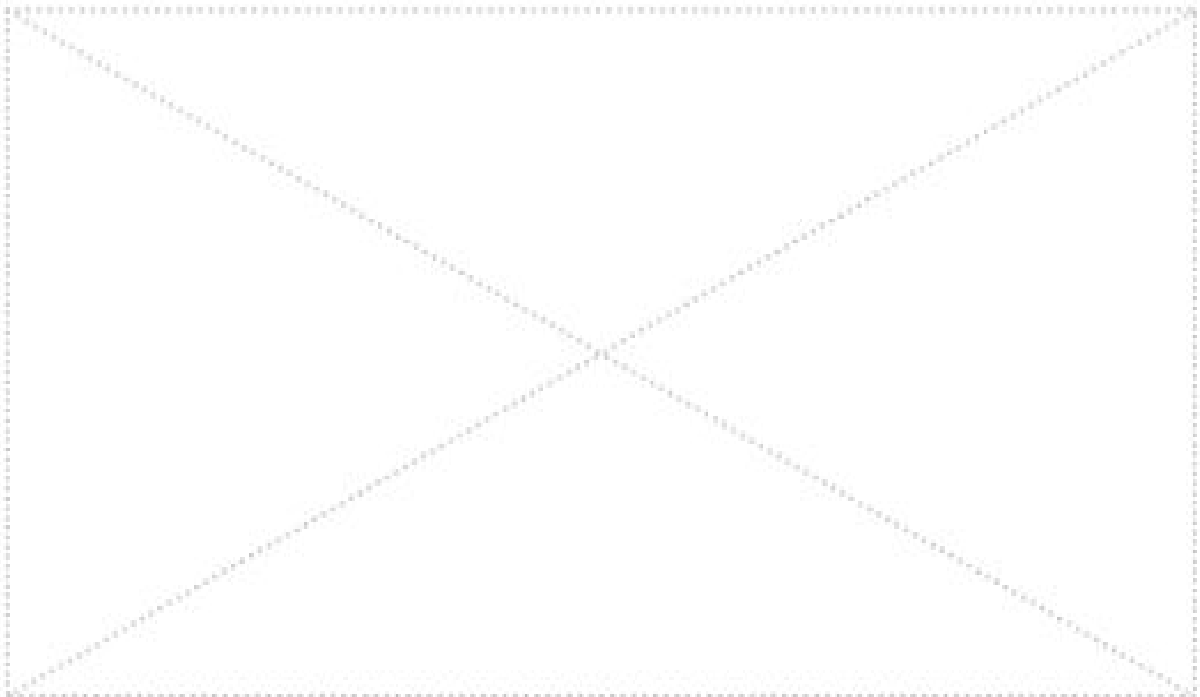
[인체 친화적인 소프트 로봇, 사막 탐사용 로봇과 물고기를 모사한 해양 탐사 로봇]

■ 경제/산업적 측면에서의 필요성

- 소프트 로봇 기술의 미래는 자연과 생물체를 모사하는 수준을 넘어 빠른 환경 적응력으로 인간이 접근하기 어려운 영역을 개척할 수 있을 것으로 기대
 - 최근 소프트 로봇에 대한 연구 동향으로 자연 생명체 모사, 소프트 manipulation, 수술용 로봇, 바이오메디컬 마이크로 로봇, 재활치료 및 신체 보조 로봇, 탐사 및 구조 로봇 등이 있음
 - 소프트 로봇 특유의 모핑 능력과, 자가 치유, 친환경 생분해가 가능한 소재가 활발하게 연구되고 있음
 - 특히 소프트 소재 고유의 특성으로 사람과 물리적으로 안전한 상호작용이 가능하여 현재 바이오메디컬 산업에서도 큰 주목을 받고 있음
 - 자유롭게 변형 가능하며 다기능 센서를 탑재한 소프트 로봇에 대한 성장이 가장 높을 것으로 예상되며, 이를 위한 소재, 소자, 공정 기술 개발에 대한 투자가 이어질 것으로 기대
- 글로벌 소프트 로봇 시장은 2019년 기준 \$573.8 M 이며, 2027년까지 \$3.41B 까지 성장할 것으로 예상
 - 2020년부터 2027년까지 연 평균 30.7% 성장이 예상됨
 - 자유롭게 변형 가능하며 다기능 센서를 탑재한 소프트 로봇에 대한 성장이 가장 높을 것으로 예상되며, 이를 위한 소재, 소자, 공정 기술 개발에 대한 투자가 이어질 것으로 기대
- 산업 자동화 시장의 성장이 글로벌 소프트 로보틱스 시장 성장을 촉진하고 있으며 특히 선진국 내 중소/중견 기업에서 활발하게 연구개발 중이나 국내 연구 수준은 미비함
 - Bioservo Technologies AB, Cyberdyne Inc., Ekso Bionics Holdings, Inc., F&P Robotics AG, Festo AG, ReWalk Robotics Ltd, RightHand Robotics Inc., Roam Robotics, Soft Robotics Inc., Yaskawa Electric Corporation 등의 기업 등이 본 기술을 선도하고 있음
 - 현대자동차 그룹에서 보스턴 다이내믹스를 인수함으로써 로봇 산업과 모빌리티 산업에 대한 투자가 시작되고 있지만, 차세대 소프트 로봇에 대한 연구와 지원은 부족한 상황
 - 관련 국내 산업의 경쟁력 향상을 위해서는 이에 대한 투자 필요

○ 탐사용 소프트 로봇을 활용할 수 있는 해양정보 시장은 연평균 10.53% 성장할 것으로 전망

- 해양 어플리케이션을 위한 로봇 기술은 연구용 탐사 뿐 아니라 운송과 국방 분야에서도 활용도가 높으며, 위험을 완화 시켜 인간의 안전을 향상
- 스탠포드 대학교에서 개발한 해저 휴머노이드 잠수정 로봇인 'OceanOne' 은 해양 탐사용으로 개발되었으며, 인간을 모사하여 팔과 다리 같은 부분을 가지고 있음
- 스스로 위치를 지정하면서 사용자와 양방향으로 통신을 수행하며, 실시간 비디오 영상을 제공함으로써 해저 상황을 탐사하기에 적합함
- 이를 통해 미지의 영역을 탐사하고 지속적인 정보를 획득하는 것에 대한 부가가치는 계속해서 증가할 것으로 기대
- 소프트 로봇이 인간이 접근하기 어려운 지역을 탐사하는 목적에는 적합하나 기존 로봇들과 비교하여 실용성과 효율성을 높이기 위해서는 액츄에이팅 능력과 에너지 발전/저장 능력 등이 개선되어야 함
- 또한 장시간 탐사를 위해 스스로 환경으로부터 에너지를 수득하여 동작할 수 있는 무전원 탐사 로봇이 개발되면 현재 탐사용 로봇의 한계를 뛰어넘을 수 있을 것으로 기대



[소프트 로봇 시장의 규모와 연평균 성장]

6.2.2. 기술 정의

▣ 무전원 해저 탐사용 소프트 로봇 기술 개발

- 본 소프트 로봇 기술은 대표적인 해저 생명체인 어류를 모사하여 인간이 물리적으로 접근하기 어려운 지역을 탐사하며 정보를 수집하고 송수신할 수 있는 기술
- 목표 탐사에 적합한 소프트 로봇 모델링과 센서 및 통신 모듈 집적화, 기계 학습을 통한 판단 능력, 극한 환경에서의 안정성 평가 등을 포함
- 기존의 외부 전원을 이용한 전력 공급이나 배터리를 통해 탐사를 수행하는 것이 아닌 주변 환경으로부터 스스로 에너지를 획득하여 동작
- 예를 들어 해양 탐사 로봇의 경우 물고기를 모사하여 심해의 수압하에서 자유로운 활동 뿐 아니라 부력을 이용한 모션이 가능한 소프트 로봇 기술
 - 부력 컨트롤 유닛과 수압 하에서도 액츄에이션을 가능하게 하는 기술, 탐사용 카메라와 통신 모듈이 포함된 소프트 로봇
 - 탐사에 필요한 에너지를 해양 환경으로부터 획득
- 목표 탐사 지역에 적합한 소프트 로봇을 모델링하고 탐사 지역의 환경 하에서의 안정성 예측
 - 최적화된 소프트 로봇의 크기와 디자인, 그리고 액츄에이팅 방식을 제안하고 이를 통해 목표 지역에서 인간이 활동하기 어려운 한계를 극복
 - 예를 들어 해양 탐사 로봇의 경우 크기에 따라 바닷속에서 움직임이 달라질 것이며 크기가 작은 경우 해류를 극복하지 못한 단점이, 크기가 클 경우 저항을 받으면서 에너지를 많이 소모하는 단점이 있음
 - 설계된 소프트 로봇에 대해 탐사 지역의 환경을 고려하여 동작 안정성 예측하고 평가
- 탐사 지역의 정보를 수집하고 송수신 할 수 있는 센서와 통신 모듈 기술
 - 목표 탐사 지역의 정보를 수집할 수 있는 모듈 (카메라 및 센서) 제안과 집적화 기술
 - 현재까지 보고된 기술은 자연 생명체를 모사하여 극한 환경을 극복하여 이동할 수 있는 소프트 로봇을 제작하고 이를 제어할 수 있는 기술

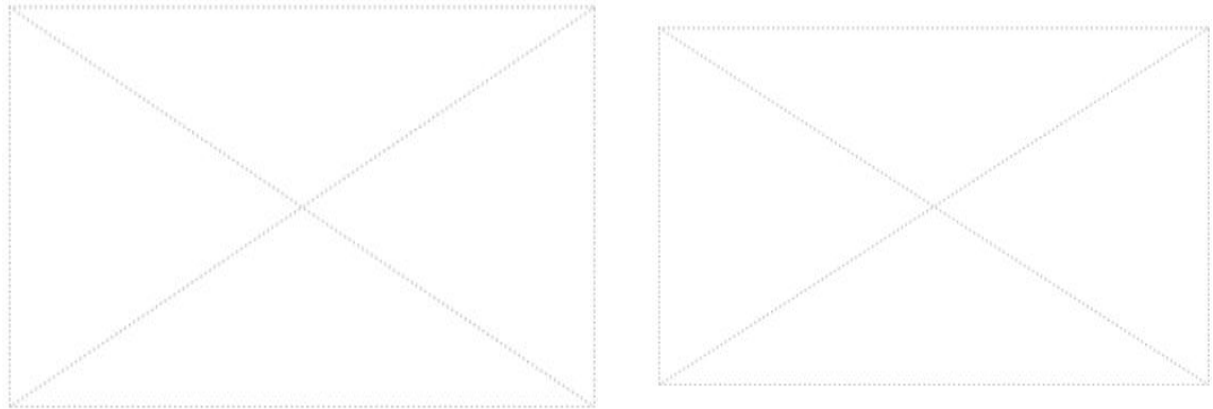
- 목표 지역에서의 정보를 수집하고 통신 모듈을 도입하여 탐사 로봇과의 사용자 간의 정보 송수신이 가능하다면 이를 통해 탐사 로봇의 정확한 위치 파악이 가능하며 해당 지역의 정보를 실시간으로 제공할 수 있음

○ 외부 전원 공급 없이 주변 환경으로부터 에너지를 취득하여 활동하는 untethered 소프트 로봇 기술

- 전원 연결로부터 자유로운 폼팩터를 가짐으로써 탐사 효율성을 극대화

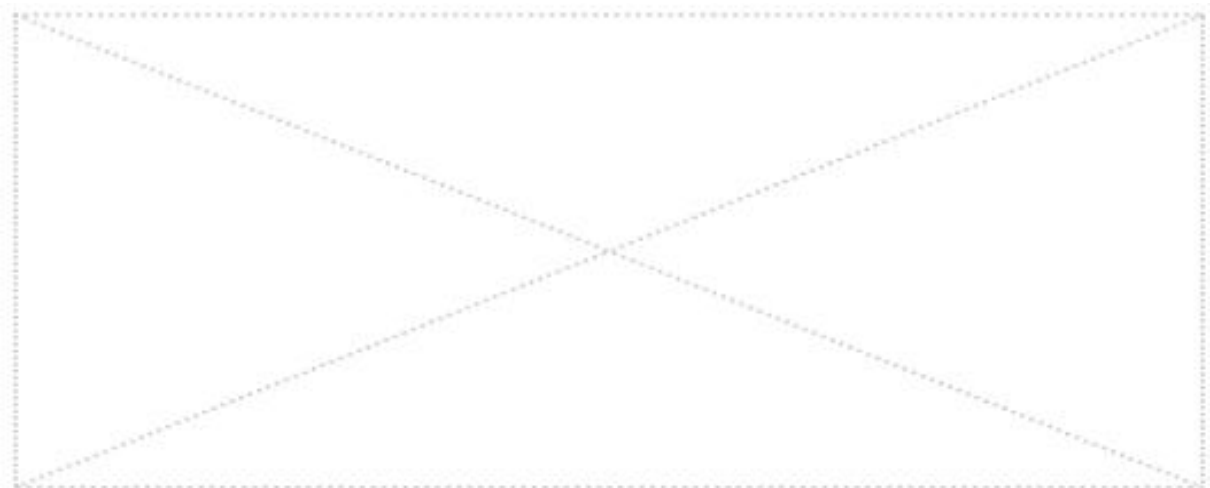
- 에너지원으로는 태양열, 압력, 온도 차이를 활용하는 태양전지, 압전, 열전 소자 활용 등이 있으며 목표 탐사 지역의 환경을 고려하여 에너지 하베스터를 집적화하는 기술 개발

- 필요시 취득된 에너지를 저장하여 지속적인 탐사가 가능한 소프트 로봇 기술



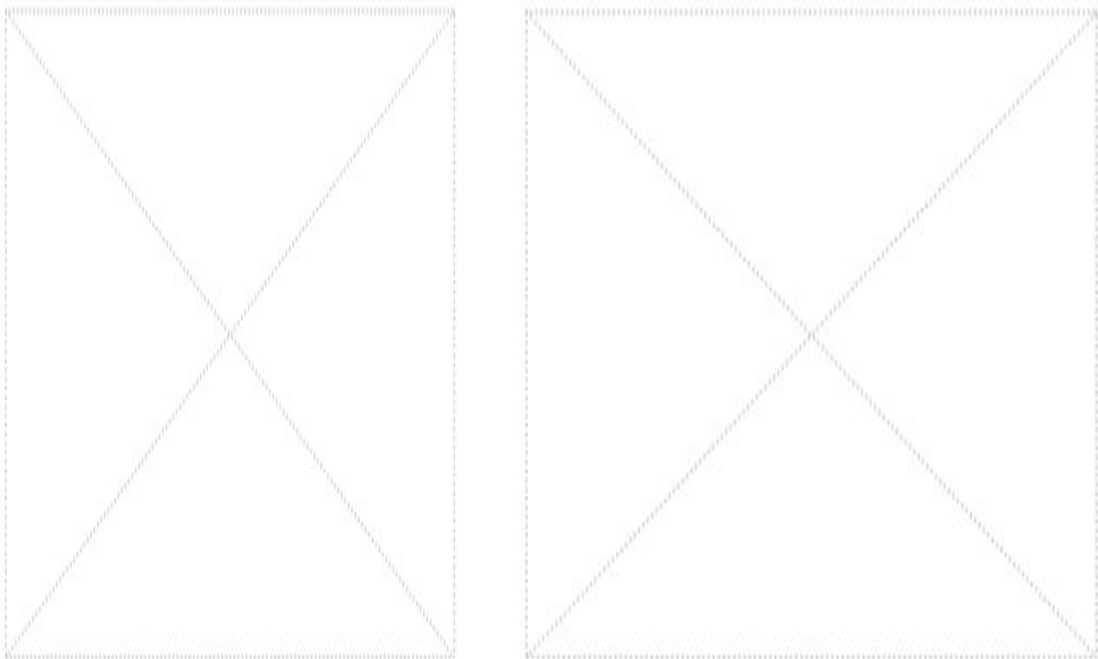
[탐사용 소프트 로봇의 모듈]

(출처: Sci. Robot. 3, eaar3449(2018))



[지속가능한 에너지와 발전 모듈]

- 원격 제어 가능한 무인 탐사라는 효율성 외에 자가 발전 로봇을 통해 지속 가능한 탐사 능력 또한 매우 중요한 요소
 - 현재 배터리 없이 동작하는 소프트 로봇은 쌍안정 (bistable) 구조체를 도입한 연구 결과가 대표적임
- 해저 환경하에서의 탐사, 무선 통신 및 에너지 하베스팅/저장에 적합한 로봇 제어 알고리즘 개발 필요
- 본 과제에서 개발된 무전원 소프트 로봇 기술은 해양 연구의 기준을 한단계 올려줄 수 있을 뿐 아니라 해양 환경에서 발생하는 인재에 대해서도 빠르게 대응할 수 있음
 - 무인 정찰 시스템으로 빠르고 안전한 탐사 및 정찰이 가능
 - 자연 모사 기술을 통해 해양 환경하에서 최적의 동작이 가능한 소프트 로봇 기술 확보
 - 장시간 탐사 능력을 갖춤으로써 배터리 등의 전원 공급을 통해 구현되었던 기존의 소프트 로봇 기술의 한계를 극복함



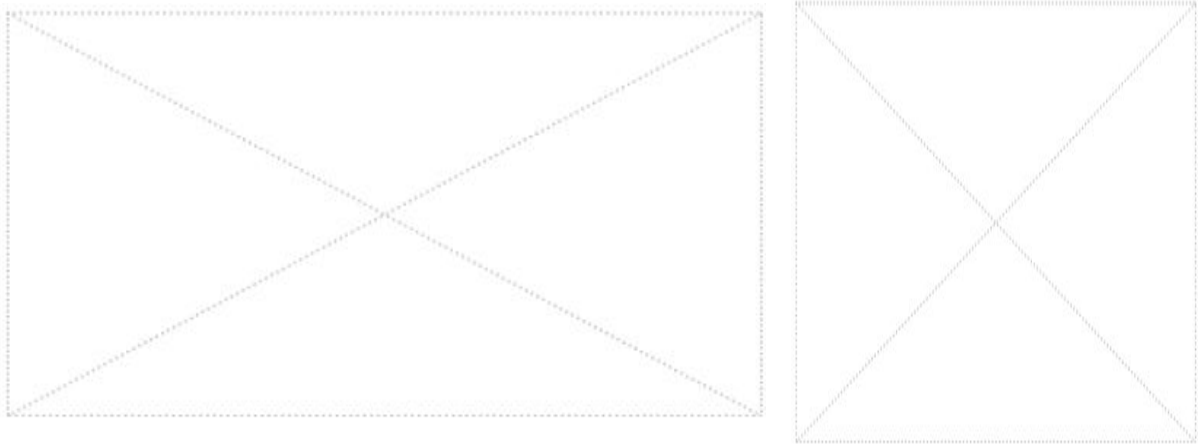
[쌍안정 구조체를 도입한 무전원(untethered) 소프트 로봇]

(출처: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115, 5698 (2018))

6.2.3. 국내외 연구동향 및 차별성

▣ 배터리 기반 소프트 로봇을 이용한 마리아나 해구 탐사

- 중국 Zhejiang University Tiefeng Li 교수팀 연구 결과
 - 2021년 3월 네이처지에 발표 및 “Soft robot reaches the deepest part of the ocean” 이라는 제목으로 네이처지 News and Views에 하이라이트
- 바다 생명체를 모사하여 바다 가장 깊은 곳에서도 탐사할 수 있는 소프트 로봇 개발
 - 기존의 금속 소재로 구성된 로봇은 외부 환경에 대한 변화와 대응에 소극적
 - 소프트 바디와 전자 시스템이 효율적으로 분산되어 있어 수압에 대한 저항을 최소화
 - 배터리 내재화를 통해 자가 구동 기반 지속적인 탐사 가능
 - 소프트 소재 및 모션을 넘어 주어진 환경에 적합한 로봇 및 시스템 디자인이 매우 중요
- 현재까지 밝혀지지 못한 미지의 해저 탐사가 가능하게 할 중요한 기술로 기대

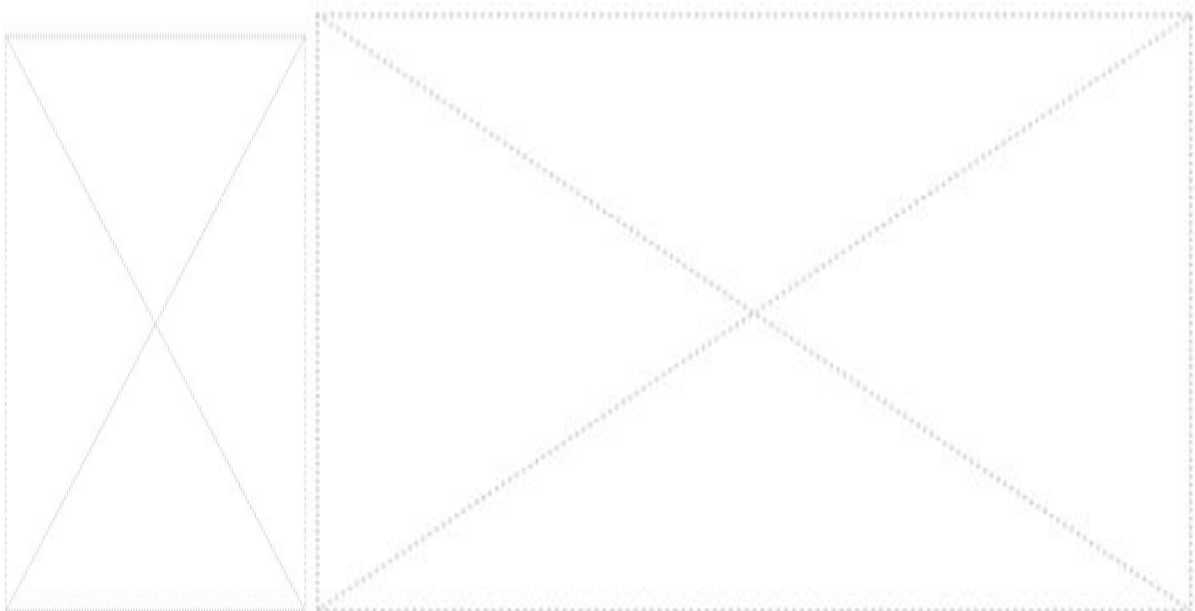


[어류를 모사한 소프트 로봇을 이용한 해저 탐사]

(출처: (좌) Nature 591, 35 (2021),(우) Nature 591, 66 (2021))

■ 해저 생태계 탐사가 가능한 음파 제어 소프트 로봇 물고기

- 미국 MIT Katzschmann 교수팀 연구 결과
 - 2018년 3월 Science Robotics지 발표
- 실제 바다 생명체를 모사하여 해양 환경하에서 자유롭게 움직일 수 있는 소프트 로봇 기술
 - 소프트 바디를 통해 바다 생명체의 움직임을 그대로 재현할 수 있어 해당 바다 생명체의 근접 관찰 및 교감이 가능할 것으로 기대
 - 무선 통신 및 배터리에 의한 전원 공급을 통해 해양 생명체를 지속적으로 탐사 가능
 - 수심에 따라 부력을 감지하여 최대 18m의 해저에서도 소프트 로봇의 모션을 최적화하며 탐사 가능
- 해저 환경에서 소프트 로봇의 크기에 따른 움직임 제한과 수영을 통한 탐사 속도는 개선되어야 함
 - 현재 바다 생명체 대비 탐사 속도가 4배에서 20배까지 차이
 - 음파를 통한 통신 모듈의 한계

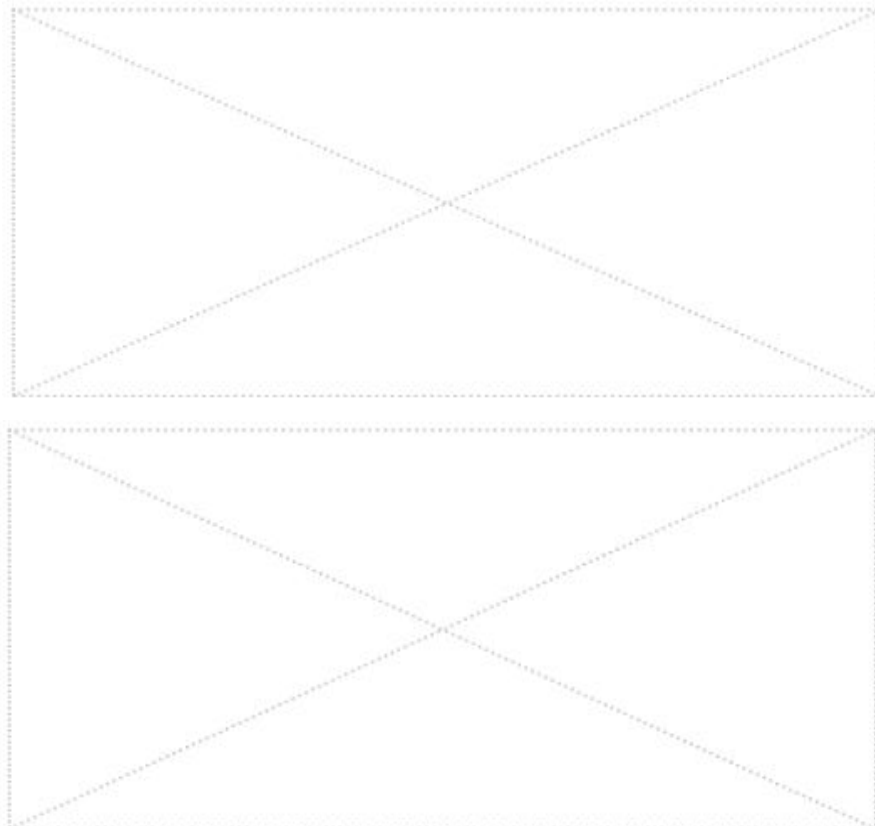


[음파 통신 모듈을 이용해 다이버가 직접 소프트 로봇에 명령을 내려 해저 탐사]

(출처: Sci. Robot. 3, eaar3449 (2018))

■ 지형에 따라 스스로 성장하며 탐사하는 소프트 로봇

- 미국 University of California, Santa Barbara Elliot W. Hawkes 교수팀 연구 결과
 - 2017년 2월 Science Robotics지 발표
- 주어진 지형 환경에 맞추어 스스로 형상을 변화시키는 소프트 로봇 기술
 - 좁은 지형을 통과하거나 사람 혹은 생물체가 물리적으로 접근할 수 없는 곳을 탐사할 수 있게 하는 핵심 기술
 - 공압식으로 구동하는 소프트 로봇의 길이를 늘리거나 줄이는 것 뿐 아니라 방향 전환 역시 가능하며 생명체의 움직임을 모사할 수 있음
- 해저 탐사를 위해서는 공압식 구동의 한계 극복이 필요
 - 수압이나 기압이 다른 환경하에서 공압 구동을 통한 변형이 어려움
 - 해저 탐사를 위해서는 공압 뿐 아니라 목표 환경하에서도 변형이 가능한 소재와 구동 방식에 대한 연구개발이 필요

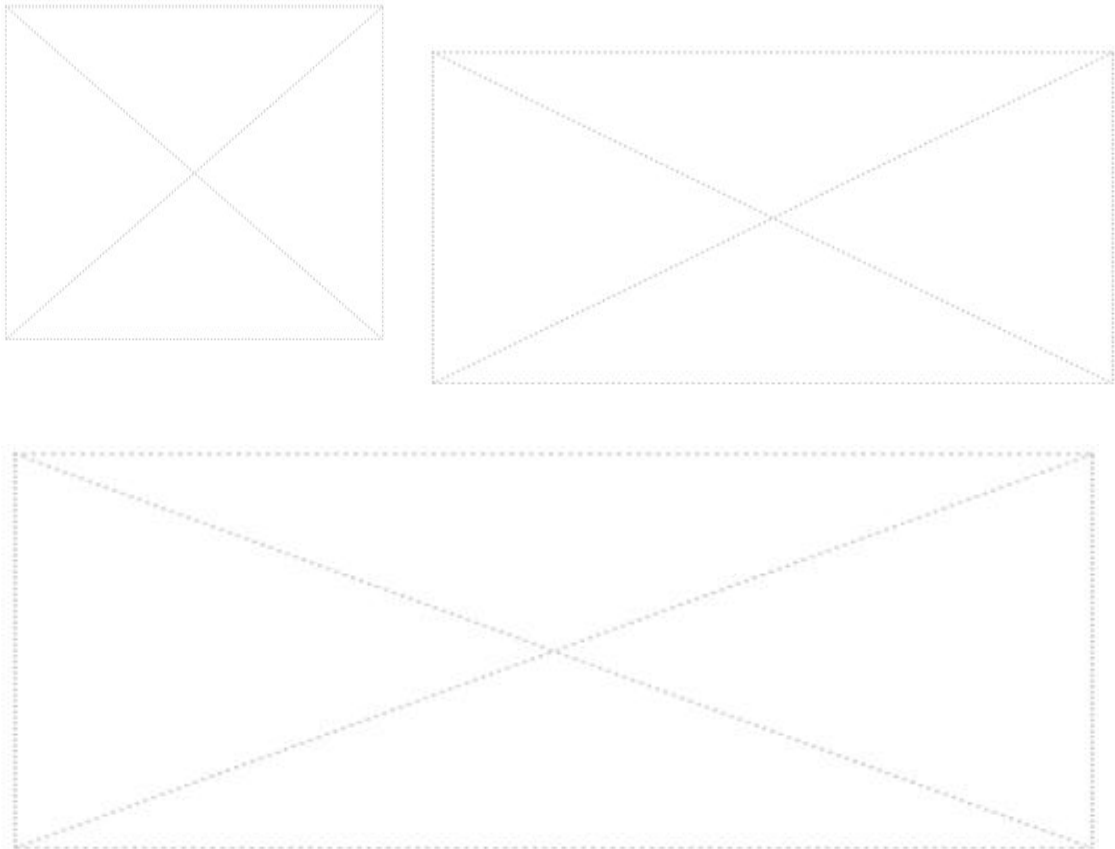


[스스로 형상 변화가 가능한 공압식 소프트 로봇]

(출처: Sci. Robot. 2, eaan3028 (2017))

▣ 국내외 연구결과와의 차별성

- 본 해양 탐사용 소프트 로봇 기술 개발은 현재 국내에서 연구 진행을 더디게 진행되고 있으며, 해외 연구진에 의해 활발하게 연구가 진행되고 있음
 - 미국과 중국의 대학을 중심으로 소프트 로봇 기술이 활발하게 진행
 - 육지 환경이 아닌 고수압의 해양 환경에서 탐사가 가능한 소프트 로봇 기술 개발은 지금까지 연구가 되지 못한 도전적인 영역
 - 특히 지속적인 해양 탐사를 위해서는 주변 환경으로부터 스스로 에너지를 수득하여 구동 가능한 자가 발전 소프트 로봇 기술 개발이 필수적
 - 현재 바다 위의 부표 등에서 자가 발전 시스템을 활용하고자 하는 노력이 보고되고 있으나 해저 환경에서는 연구가 진행된 바 없음
 - 해양 생명체를 모사한 소재, 로봇 디자인, 구동/통신 시스템, 그리고 에너지 발전 및 저장 시스템까지 집적화된 소프트 로봇을 통해 미지의 영역에 대한 탐사 및 연구가 가능할 것으로 기대



[해양 환경에서 자가 발전 가능한 에너지원과 발전 방향]

(출처: Nano Energy 61, 1 (2019), Nat. Commun 12, 616 (2021))

6.2.4. 특허 분석

▣ 특허 분석 개요

- 검색기간 : ~2022년 1월까지 검색된 특허
- 범위 : 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인 : 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB : Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

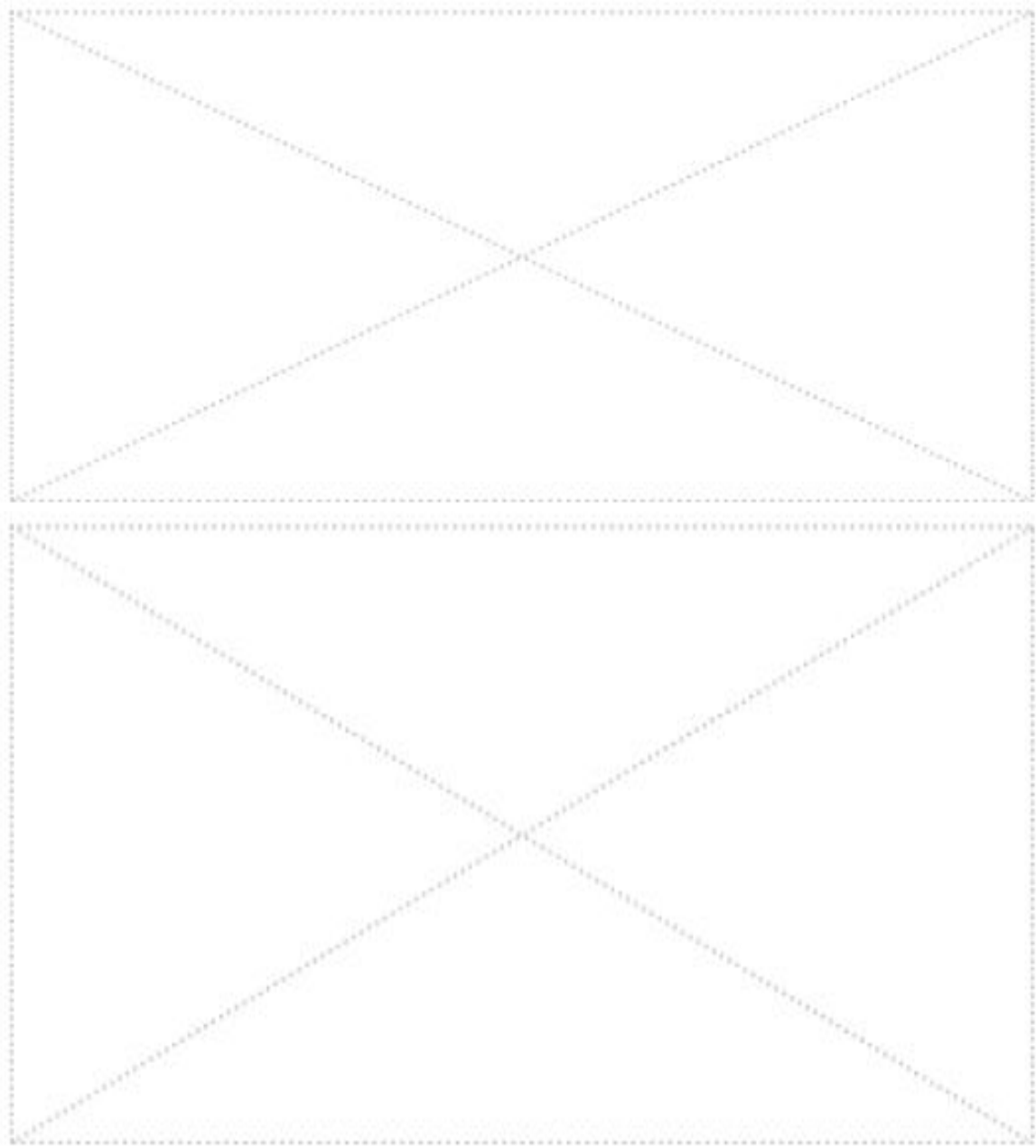
검색식				
(해저* 해양* 바다* 바닷* 심해* 수심* 수중* 수륙* 잠수* 수영* ocean* sea* submerg* "under water*" swim*) near3 (로봇* 로보* robot* "에너지 하베스팅*" "에너지 하베스트*" "energy harvest*" "harvest energy*" "에너지 변환*" 에너지변환* "energy convers*" "에너지 저장*" 에너지저장* "energy storag*" energystorag* "power harvest*" "harvest power*" "power conver*" "power storage*" "에너지 전환*" 에너지전환* "energy conves*" "energy chang*" 무전원* "no power*" 자가발전* "private power station*" "independent power*" "self generat*")				
한국	미국	일본	유럽	합계
866	886	345	281	2,378

▣ 연도별 특허발표 현황

- 검색된 특허 2,378건을 중복제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 544건의 특허가 최종 선정되었음
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함. 즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님
- 한국(280건, 51%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며 일본(132건, 24%), 미국(102건, 19%), 유럽(30건, 6%) 순임

구분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
유럽	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0
일본	2	0	6	7	7	9	8	0	2	3	2	3	2	0	1	2
한국	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	4	0
미국	1	1	0	1	2	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	1
계	3	1	6	9	10	10	12	0	2	4	3	3	3	2	6	3

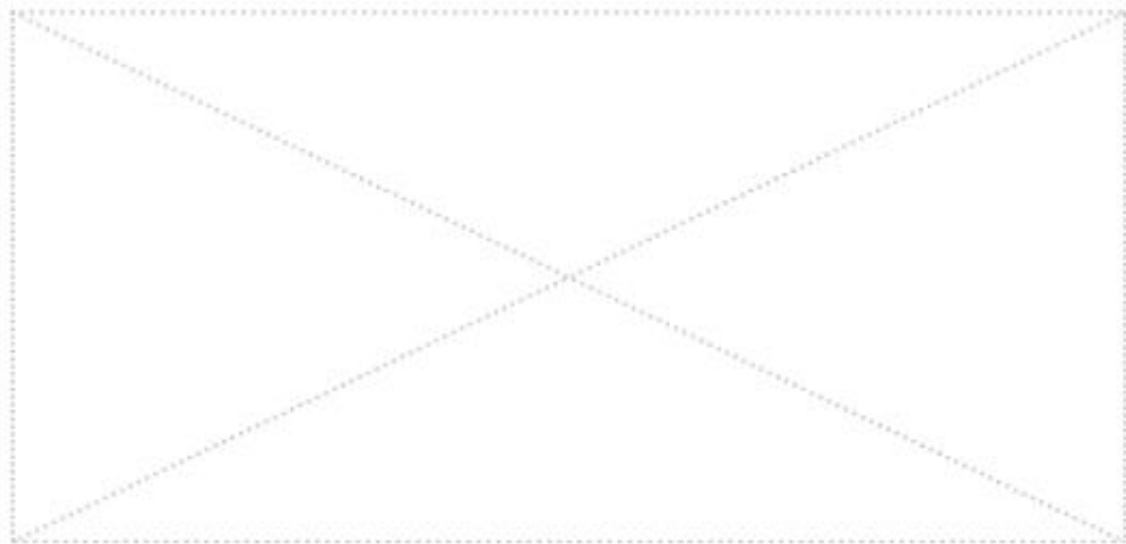
구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	총합 계
유럽	1	2	0	2	2	5	5	4	0	2	0	0	2	2	0	0	30
일본	6	2	1	4	6	5	9	5	5	6	12	4	6	3	4	0	132
한국	3	4	4	23	19	25	43	30	19	15	20	15	27	13	10	0	280
미국	4	7	5	7	10	15	5	5	6	4	2	8	5	6	2	1	102
계	14	15	10	36	37	50	62	44	30	27	34	27	40	24	16	1	544



■ 국가별 특허출원 현황

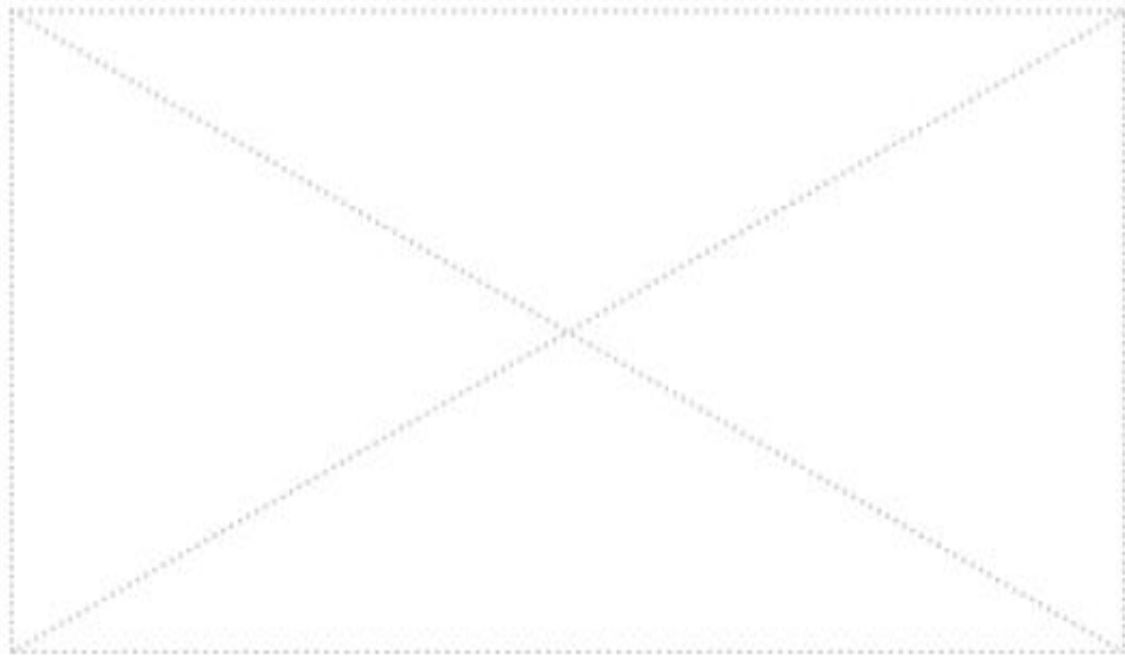
- 상위 10개 출원인은 아래와 같음
- 한국해양과학기술원이 45건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음.

순위	기관	특허수	비율
1	한국해양과학기술원	45	24.7%
2	삼성중공업 주식회사	24	13.2%
3	The Abell Foundation, Inc.	22	12.1%
4	MITSUBISHI HEAVY IND LTD	20	11.0%
5	한국생산기술연구원	17	9.3%
6	대우조선해양 주식회사	13	7.1%
7	MITSUI E&S HOLDINGS CO LTD	12	6.6%
8	포항공과대학교 산학협력단	10	5.5%
9	한국로봇융합연구원	10	5.5%
10	한국해양대학교 산학협력단	9	4.9%



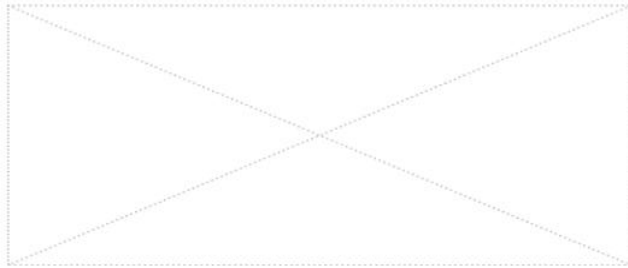
- 출원인 국가별 특허 수 및 피인용도
- 국가별 특허 피인용 합계는 미국이 1,232회로 가장 많고, 평균 피인용 횟수에 서도 미국이 높게 나타나고 있음
- 즉, 상위 출원인 중 한국 국적의 출원인이 많지만, 미국의 특허가 심사관 등에 의해 인용되는 빈도가 가장 높으므로 기술적으로는 미국이 우세함. 즉, 한국 은 양적 우세, 미국은 질적 우세로 말할 수 있음

구분	피인용 합계	특허 수	평균 피인용
미국	1,232	112	11
한국	734	261	2.81
일본	485	97	5
대만	62	6	10.33
호주	27	7	3.86
덴마크	23	3	7.67
프랑스	20	10	2
이스라엘	19	2	9.5
캐나다	15	4	3.75
영국	10	6	1.67
노르웨이	7	9	0.78
사우디아라비아	5	5	1
아랍에미리트	3	1	3
스위스	3	1	3
중국	2	7	0.29
독일	2	5	0.4
이탈리아	2	1	2
쿠웨이트	2	1	2
핀란드	0	2	0
홍콩	0	1	0
네덜란드	0	3	0
글로벌 평균	126.33	25.90	3.34

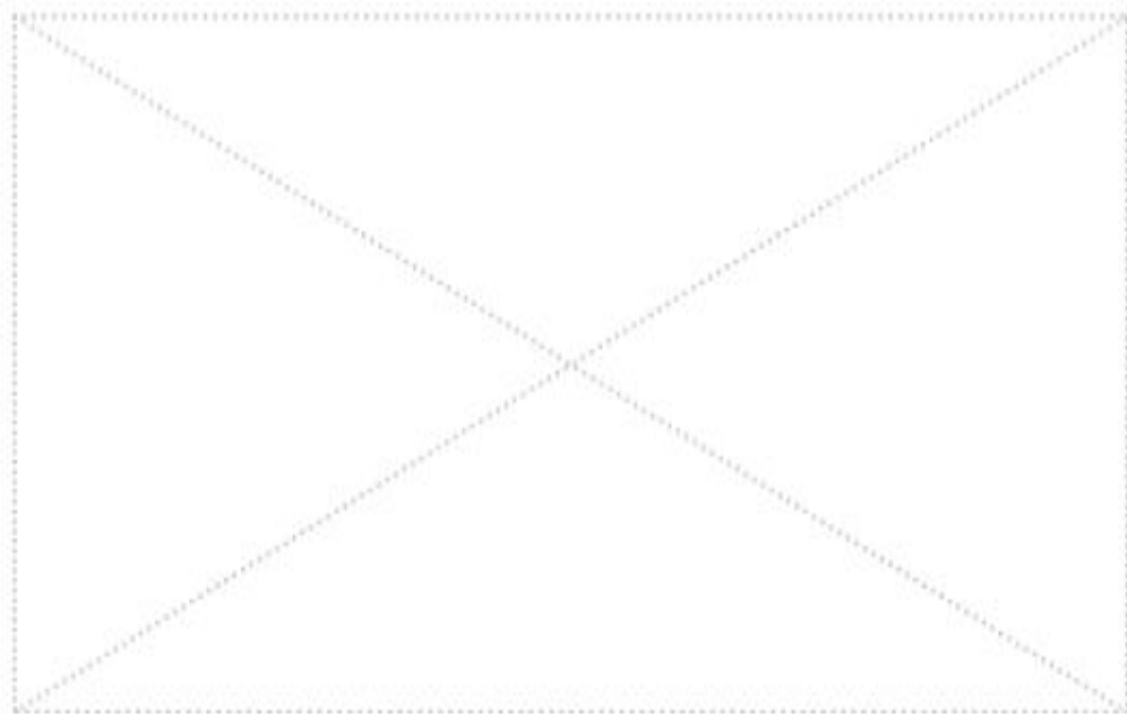


■ 기술수명 주기별 동향

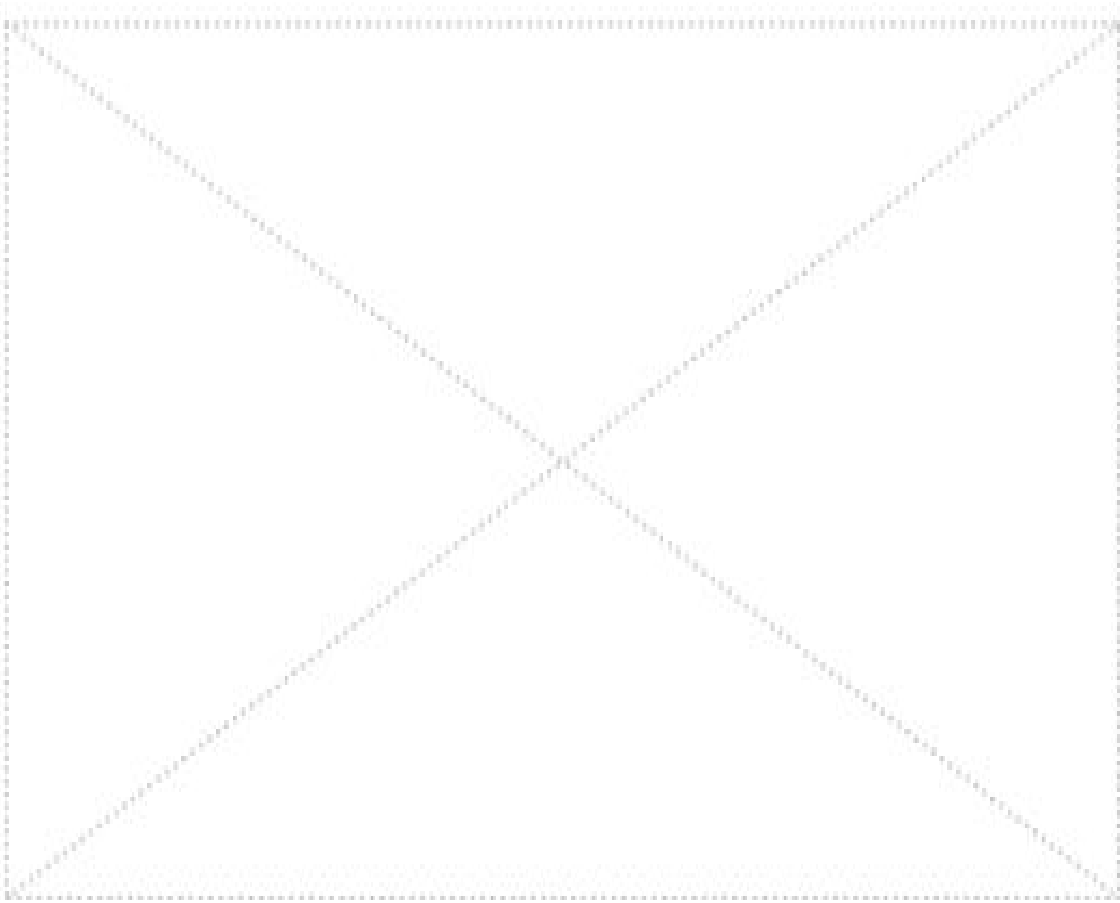
- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 1구간부터 5구간까지 출원인 수 및 특허 출원건수에 있어서 큰 변화가 없으므로, 어느 하나의 단계로 규정 짓기 어려운 상태로 보임



출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간



▣ 키워드 맵




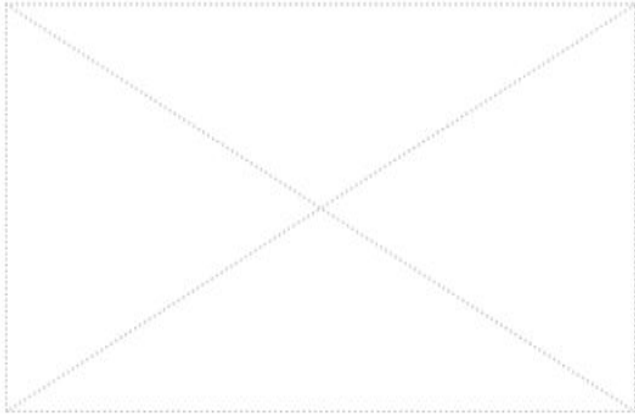
- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 POWER GENERATION EQUIPMENT, 모터구동부 등이 키워드로 포진하고 있으며, 가장 외곽 부분에 배터리, 위치정보 등의 키워드가 일부 포진하고 있기는 하지만, 아직 “무전원”, “하베스팅” 등의 키워드가 그다지 활성화되지 않은 것으로 판단됨

■ 핵심 특허

- 유효특허를 대상으로 위와 같은 분석을 진행하였음. 544건의 유효특허는 주로 수중 로봇과 해양에너지 발전에 관련된 특허이며, 그 중 아래와 같은 핵심특허가 검색되었음
- R&D를 투입하고 관련 특허를 창출하기 위해서는, 아래와 같은 핵심특허 대비하여 차별화되도록 할 필요가 있으며, 아래의 청구항에 따르면, “a battery powering a plurality of electronics”, “작업 로봇에 분리 가능하도록 탑재되고, 상기 작업 로봇에 전원을 공급하는 전원 공급부를 포함하며, 상기 전원 공급부의 충전 또는 교체를 위하여 상기 작업 로봇으로부터 분리되어 부력에 의하여 수면으로 상승하거나 수중에서 유영하여 소정의 위치로 이동하는 제1 전원 공급용 로봇 및 제2 전원 공급용 로봇”이라고 기재하고 있는 등 수중로봇에는 배터리가 포함되어 있고 수중로봇의 구성요소에 대해 특화되어 있으므로, 자가 발전 등으로 차별화를 도모할 여지가 있음

발명의 명칭	Gliding robotic fish navigation and propulsion		
출원번호	15/655072	등록번호	10589829
출원일	2017.07.20	등록일	2020.03.17
출원인	Board of Trustees of Michigan State University	발명자	Xiaobo Tan, Feitian Zhang, Jianxun Wang, John Thon
요약	<p>A robotic submersible includes a housing having a body and a tail. In another aspect, a pump and a pump tank adjust the buoyancy of a submersible housing. In a further aspect, a first linear actuator controls the pump and/or a buoyancy, and/or a second linear actuator controls a position of a battery and/or adjusts a center of gravity. Another aspect includes a pump and at least one linear actuator that control gliding movements of the housing. In still a further aspect, a motor couples a tail with a body, such that the motor controls the movements of the tail to create a swimming movement. Moreover, an additional aspect provides a controller selectively operating the pump, first actuator, second actuator, and motor to control when swimming and gliding movements occur.</p>		
대표청구항	<p>A robotic submersible comprising: a housing including a body and a tail;</p>		

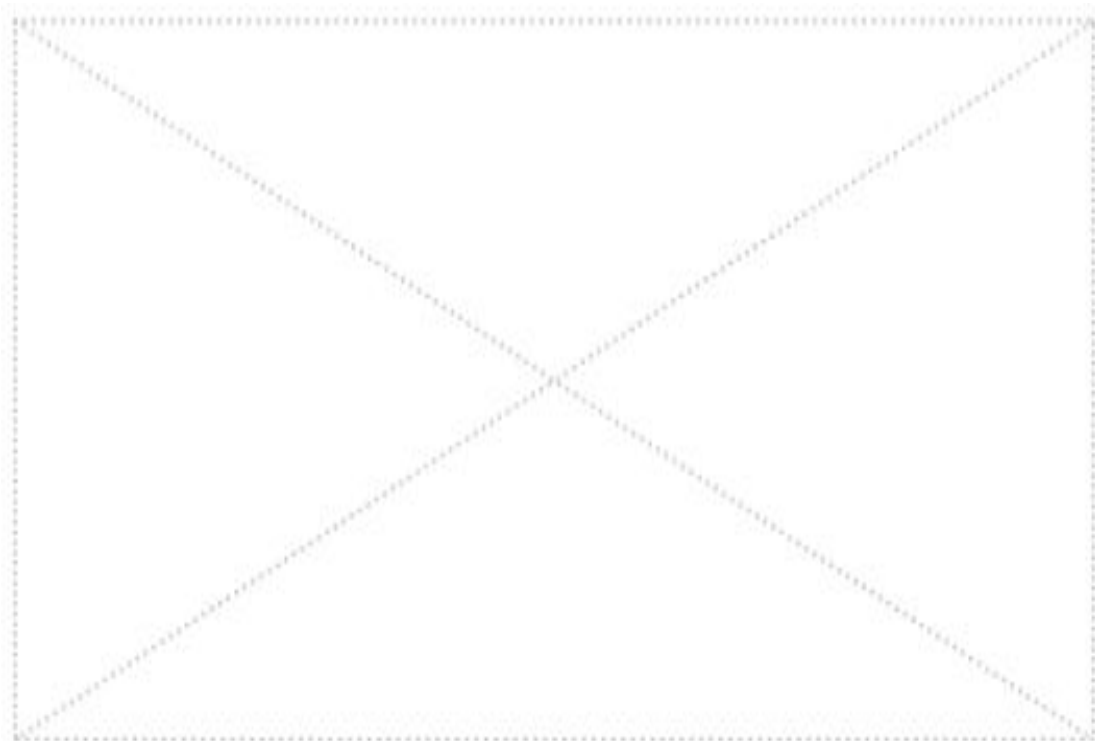
	<p>a pump and a pump tank adjusting a buoyancy of the housing; a first linear actuator controlling the pump; a battery powering a plurality of electronics; a second linear actuator controlling a position of the battery and adjusting a center of gravity; a controller controlling the pump and second linear actuator; the pump, first linear actuator and second linear actuator controlling gliding movements of the housing; at least one motor coupling the tail with the body, the motor controlling the movements of the tail to create a swimming movement in an operating condition; a propeller coupled to the housing and being configured to propel the housing in another operating condition; and the controller selectively operating the pump, first linear actuator, second linear actuator, and motor to control when the swimming and gliding movements occur.</p>
대표도면	

발명의 명칭	복합형 수중 작업 로봇 및 작업 로봇의 전원 공급 방법		
출원번호	10-2013-0062894	등록번호	10-1467887
출원일	2014.11.26	등록일	2014.11.26
출원인	삼성중공업 주식회사	발명자	최운서
요약	<p>본 발명은 복합형 수중 작업 로봇 및 작업 로봇의 전원 공급 방법에 관한 것으로, 수중에서 작업을 수행하는 작업 로봇, 및 작업 로봇에 분리 가능하도록 탑재되고, 작업 로봇에 전원을 공급하는 전원 공급부를 포함하며, 전원 공급부의 충전 또는 교체를 위하여 작업 로봇으로부터 분리되어 부력에 의하여 수면으로 상승하거나 수중에서 유영하여 소정의 위치로 이동하는 하나 이상의 전원 공급용 로봇을 포함하는 복합형 수중 작업 로봇을 제공한다.</p>		
대표청구항	<p>수중에서 작업을 수행하는 작업 로봇; 및 상기 작업 로봇에 분리 가능하도록 탑재되고, 상기 작업 로봇에 전원을 공급하는 전원 공급부를 포함하며, 상기 전원 공급부의 충전 또는 교체를 위하여 상기 작업 로봇으로부터 분리되어 부력에 의하여 수면으로 상승하거나 수중에서 유영하여 소정의 위치로 이동하는 제1 전원 공급용 로봇 및 제2 전원 공급용 로봇을 포함하며, 상기 작업 로봇은, 상기 제1 전원 공급용 로봇의 제1 전원 공급부 및 상기 제2 전원 공급용 로봇의 제2 전원 공급부로부터 제1 전원 및 제2 전원을 제공받고, 상기 제1 전원 및 상기 제2 전원의 전원 잔여량을 감지하여, 상기 제1 전원 및 상기 제2 전원 중 하나를 선택하고, 선택한 전원을 상기 작업 로봇의 각 기능부로 분배하여 공급하는 복합형 수중 작업 로봇.</p>		
대표도면			

6.2.5. 개발 목표 및 내용

▣ 연구개발 목표

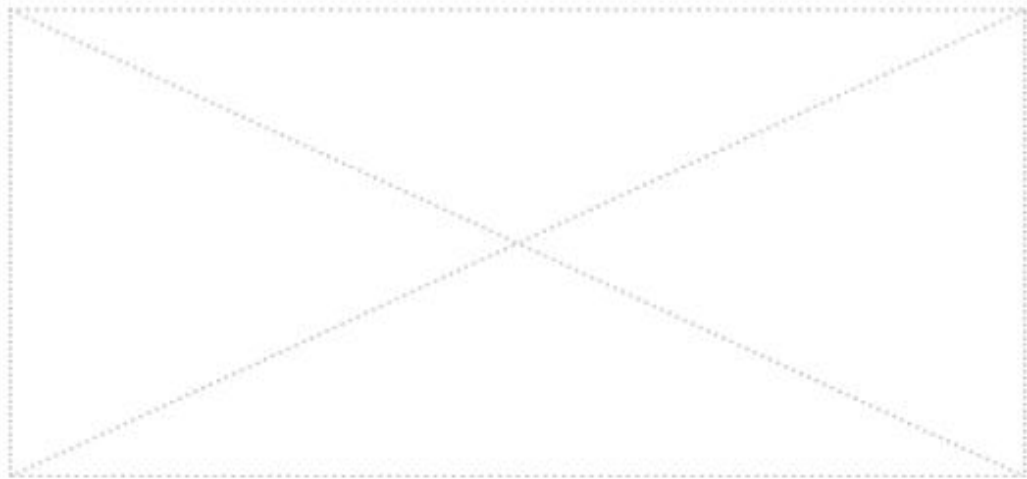
- 해저 탐사를 위한 소프트 로봇 기술 개발
 - 해저 환경에서 자유로운 움직임이 가능한 어류를 모사하여 해저 탐사용 소프트 로봇 기술 개발
 - 고수압에서도 동작이 가능한 소재 탐색 및 소프트 로봇 디자인
 - 해저 탐사를 위한 비전 시스템과 실시간으로 전송 가능한 통신 시스템
- 지속적인 탐사를 위한 자가 발전 무전원 소프트 로봇 기술
 - 해양 환경에서 스스로 에너지를 수득하여 구동 가능한 소프트 로봇 기술
 - 파도로부터 제공되는 마찰 에너지, 태양 에너지, 바다의 온도와 대기간의 온도차이 등 해양 환경에서 수득 가능한 에너지원을 활용하여 구동 가능한 소프트 로봇 기술
 - 수득된 에너지를 저장할 수 있는 시스템과의 집적화



[본 과제에서 제안하는 무전원 해양 탐사 소프트 로봇 개념도]

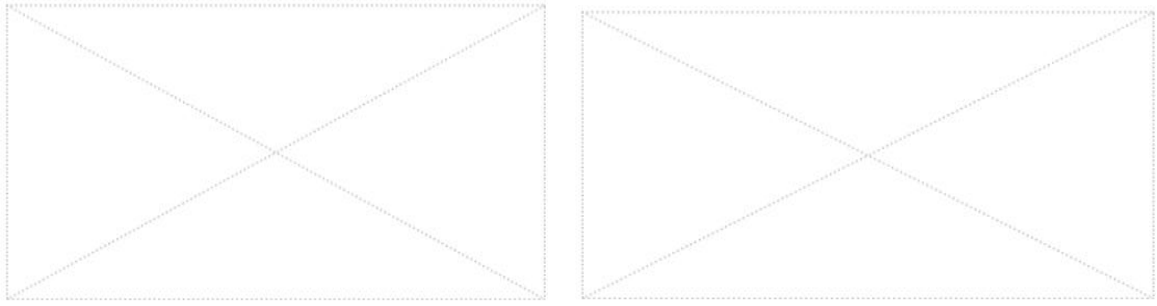
▣ 연구개발 내용

- 해저 탐사환경에 적합한 소프트 소재 선정 및 공정 기술 개발
- 해저 환경에서 자유로운 움직임이 가능한 자연 생명체 선정 및 모사 기술
- 높은 수압 환경하에서 자유로운 탐사가 가능한 소프트 로봇 디자인 최적화
- 해양 환경 탐사에 최적화된 소프트 로봇 제어 알고리즘 개발
- 해저 환경하에서 활동하는 자연 생명체 관찰 기술과 비전 시스템, 위치 추적 및 수집된 정보를 송수신 가능한 무선 통신 모듈 집적화 기술
- 소프트 로봇의 지속적인 탐사를 위한 초저전력, 경량 시스템 구축 기술
- 지속적인 해저 탐사를 위해 해양 환경에서 수득가능한 에너지 발전 모듈 기술 개발 및 에너지 저장 기술
- 위에 언급한 비전, 센서, 통신, 에너지 시스템을 집적화 할 수 있는 기술과 소프트 로봇의 해저 탐사에 적합한 시스템 디자인



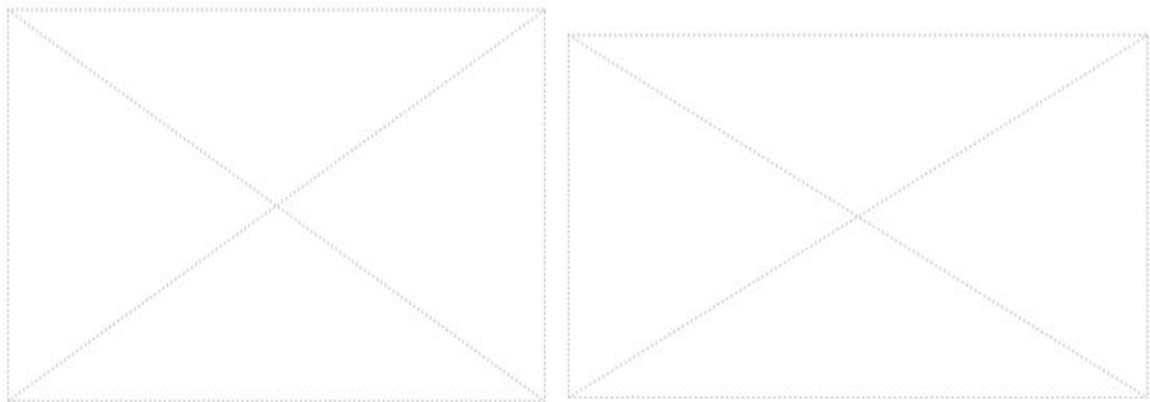
[해저 탐사를 위한 기존의 로봇과 소프트 로봇 역할 예상도]

(출처: Soft Robot. 12, 616 (2021))



[바다 생명체 모사 해저 탐사용 소프트 로봇]

(출처: (좌) Nature 591, 66 (2021) (우) UCSD Jacobs School of Engineering)



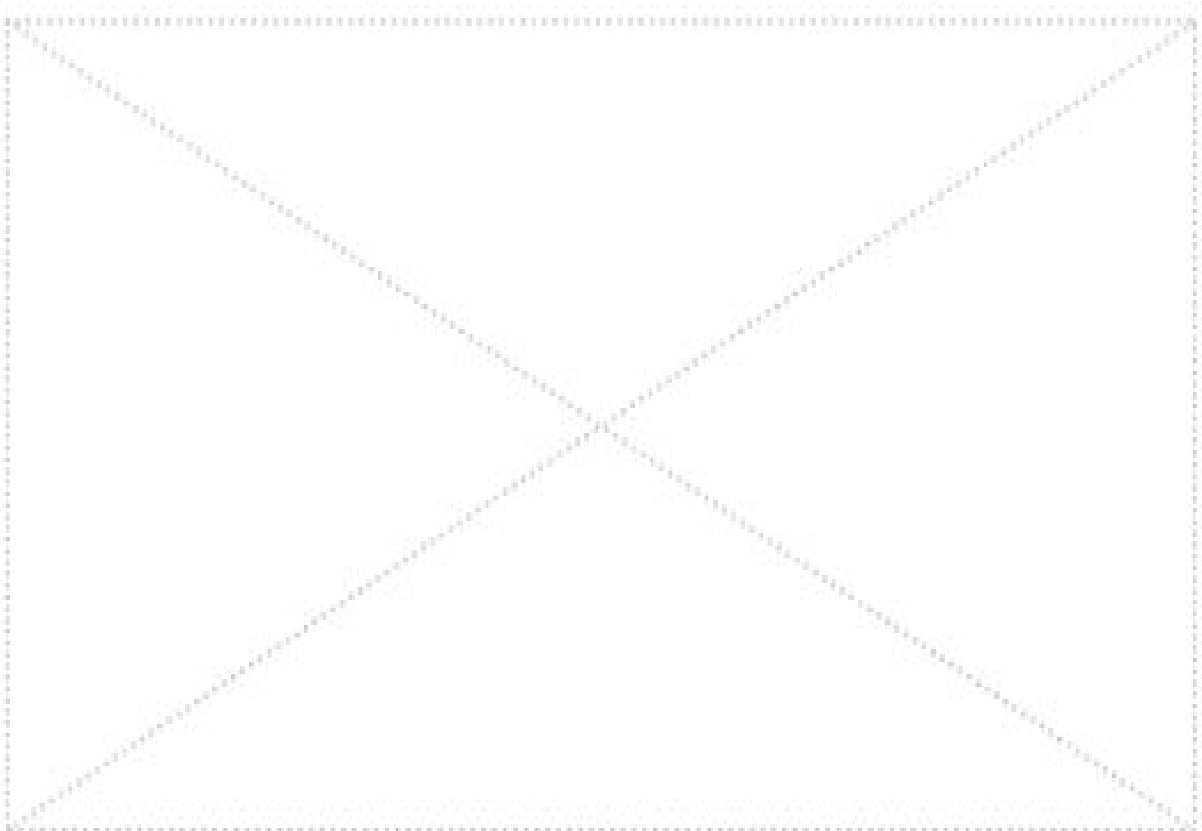
[해양 환경에서의 에너지 수득원- 예) 열전에너지, 태양에너지, 압전에너지]

(출처: (좌) Adv. Energy Mater. 9, 1900250 (2019) (우) Adv. Energy Mater. 10, 2001041 (2020))

6.2.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

■ 추진체계

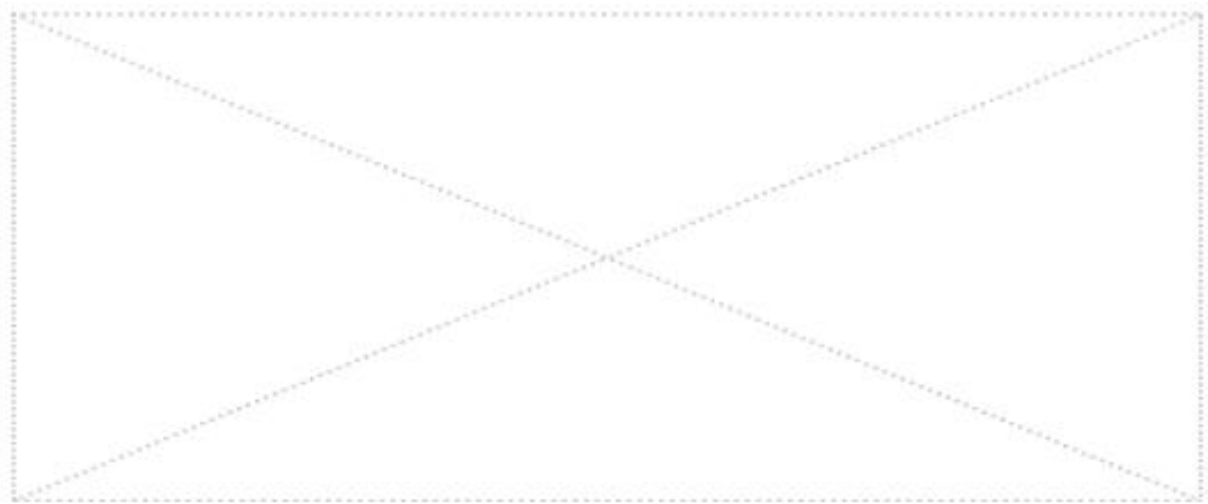
- 소프트 로봇 모델링 및 구현, 소프트 로봇 제어 알고리즘 개발, 그리고 통신 및 에너지 솔루션 구축 개발팀으로 나누어 진행
- 주관기관은 소프트 로봇 개발에 경험이 풍부한 연구 그룹이 담당하고, 해저 환경하에서 적합한 통신, 센서, 에너지 하베스팅 기술 개발, 그리고 소프트 로봇의 알고리즘 개발에 대한 전문가로 공동 연구팀 구축
- 해양 환경에서의 소프트 로봇 시제품 실증을 위한 전문가와 긴밀한 협업 구조 구축



[무전원 해양 탐사용 소프트 로봇 개발을 위한 연구진 구성 및 추진 체계]

▣ 연구개발 로드맵

- 소프트 로봇 모델링과 제어 알고리즘, 그리고 탐사에 필요한 센서와 통신 모듈, 에너지 수득 및 저장 모듈에 대한 연구를 병렬적으로 진행
- 해저 환경에서 자유로운 모션이 가능한 어류를 모사하여 소프트 로봇을 모델링하고, 부력 등을 고려하여 필요한 컴포넌트 디자인
- 해저 환경하에서 동작이 가능한 통신/센서/에너지 모듈 기술 개발과 이를 소프트 로봇에 집적화
- 각 세부기술을 집적화하고 최적화하는 연구단계가 필수적
- 해저 환경에서의 실증을 통해 소프트 탐사 로봇 활용 가능성 검증
- 해저 환경에서의 실증을 통해 소프트 탐사 로봇 활용 가능성 검증



6.2.7. 소요예산

▣ 사업기간 : 5년 (2023~2027년)

▣ 사업비 규모 : 국비 총 75억원 (15억원/년)

▣ 연차별 연구비

[단위: 억원]

구분		'22	'23	'24	'25	'26	계
정부 (출연금)	소프트 로봇 모델링 및 구현, 실증	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	37.5
	소프트 로봇 제어 알고리즘	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	7.5
	저전력 무선 통신 모듈	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	7.5
	탐사용 센서 모듈	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	7.5
	에너지 하베스팅 및 저장	3	3	3	3	3	15
소계		15	15	15	15	15	75
총 사업비		15	15	15	15	15	75

▣ 사업비 산출근거

- 무전원 해양 탐사용 소프트 로봇 기술은 현재까지 보고된 바 없는 미개척 연구 분야로 다학제간 전문가의 긴밀한 협업이 필수적
- 본 과제의 필요인력은 약 6명의 책임급 전문가가 필요하고(아래 표 참고), 미래창조과학부에서 지원하는 소프트 로봇 및 일렉트로닉스 평균 연구비는 2.5억원/년 규모로, 이를 본 과제에 환산하면 15억원/년 규모가 됨

전문가 1	소프트 로봇 모델링 전문가
전문가 2	소프트 로봇 제작 전문가

전문가 3	소프트 로봇 제어 알고리즘 전문가
전문가 4	무선 통신 시스템 전문가
전문가 5	카메라 모듈 및 센서 기술 전문가
전문가 6	에너지 하베스팅 및 저장 소자 전문가

- 3팀의 소프트 로봇 모델링, 제작, 제어 전문가 필요
 - 해양 탐사 소프트 로봇이라는 목적성을 바탕으로 연구가 진행되어야 하므로 유기적인 공동 연구가 필수
- 3팀의 통신/센서/에너지 모듈 전문가 필요
 - 해양 환경에서 동작 가능한 시스템 제작이 요구되며, 특히 지속 가능한 탐사를 위해 무전원 소프트 로봇 시스템은 수준 높은 연구를 요구
 - 에너지 수득원을 정의한 후 소프트 로봇을 구동할 수 있는 에너지 하베스팅과 이를 저장할 수 있는 시스템 개발이 중요

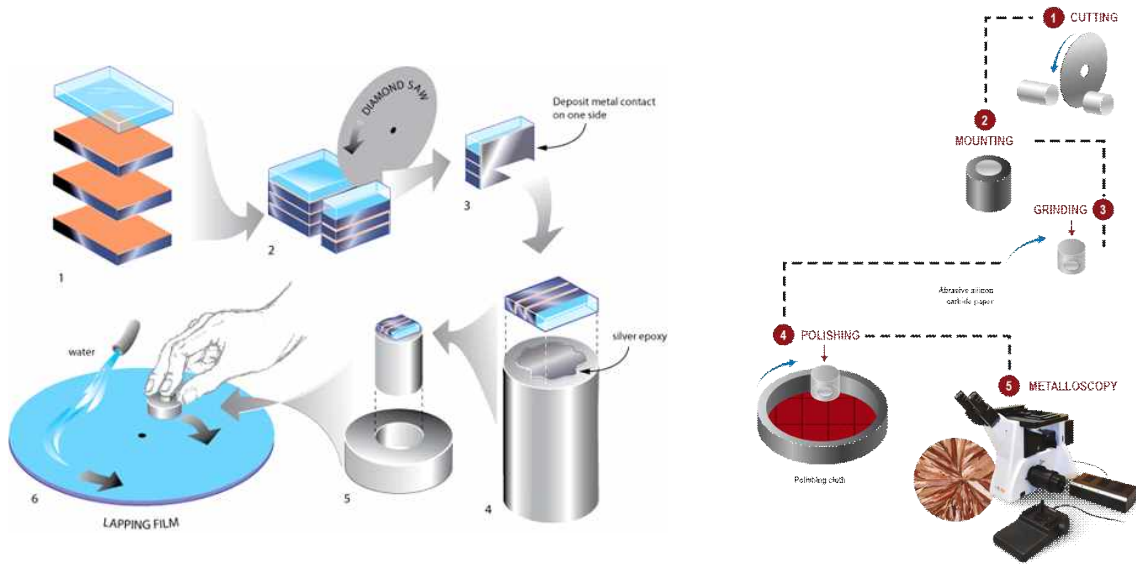
6.2.8. 기대효과

- 최근 우주와 같이 미지의 영역을 개척하는 연구 노력이 전세계적으로 치열한 가운데, 로봇을 이용한 해저 탐사를 통해 사람이 접근하기 어려운 지역을 개척할 수 있음
- 주변 환경 대응이 뛰어난 소프트 로봇을 통해 해저, 사막, 우주와 같이 극한 환경하에서의 로보틱스 응용이 가능함
 - 향후 다재다능한 지능형 로봇 도입이 가능하면 해저 환경의 생명체를 지속적으로 관찰/모니터링이 가능함
- 본 과제에서 제안하는 자가발전 무전원 소프트 로봇 기술은 배터리를 이용한 1회성 아닌 지속적인 탐사가 가능하게 함
- 무전원 해양 탐사 소프트 로봇 기술은 현재까지 개발되지 못한 수준 높은 연구이며, 미지의 영역을 탐사한다는 주 목적 뿐 아니라 사람이 접근하기 어려운 해양 사고 등에도 대응할 수 있어 기술적/경제적 파급력이 매우 높음

6.3.1. 필요성

▣ 배경

- 표면 전처리 (연마, polishing) 기술은 망원경, 현미경의 광학 렌즈 가공, 반도체 제조공정에서의 평탄화 등의 공정 및 제조 공정에 적용이 될 뿐만 아니라, 금속 소재, 세라믹 소재, 생체 소재 등의 다양한 소재의 미세조직의 관찰을 위하여 필수적인 전처리 공정로서 소재 연구에서의 핵심 공정임.
- 표면 전처리 공정에서 주요 공정변수는 소재 종류에 따른 강도/경도 등의 물성, 연마 패드, 슬러리, 압력, 패드 회전 속도 등이 있으며, 출력변수로는 전처리 후의 평탄도, 표면 결함 여부, 연마 후 두께가 있음. 상기 공정변수들의 제어는 실험자의 경험에 의존하고 있고 공정 최적화를 위한 데이터화는 수행된 바 없음.
- 시료 전처리 과정 중에 발생하는 나노 입자, 특히 납, 수은, 황, 비소 등의 독소를 포함하는 소재 표면 전처리는 독극 물질에서의 노출을 최소화하기 위하여 로봇 기반의 공정 기술이 필수적임.
- 소재 표면 전처리를 위한 AI 로봇은 IT, BT, NT, ET 등의 다양한 연구 환경에서 필수불가결하게 필요한 시료의 표면 전처리 공정에서 필요한 다양한 변수를 데이터베이스화하고 이를 기반으로한 인공지능 기술로 최적의 공정 변수를 확보 후, 로봇암을 매개체로 하여 시료 전처리 공정에서 광학 현미경을 활용한 미세구조 측정 및 불량 여부를 인공지능화한 로봇 시스템에 의해 모든 전처리 공정을 자동화하는데 있음.
- 소재개발에 있어 가장 기본적인 미세구조를 측정을 위한 전처리 기술을 자동화하는 프로그램으로 다양한 소재의 연구개발 비용과 시간을 절감할 수 있는 연구개발 환경 제공 가능함.
- 랩 스케일의 정밀 가공 장비 업체가 전무한 국내 산업환경에서 새로운 시장 분야 개척이 가능하며 나아가 세계적 경쟁력을 단시간에 끌어올릴 수 있음. 이에 새로운 국내산업을 창출하고, 개발 경쟁력 독점 가능함.



[(왼) TEM 관찰을 위한 시료 준비 과정 (오른) 표면 미세조직을 관찰하기 위한 표면 전처리 과정의 모식도]

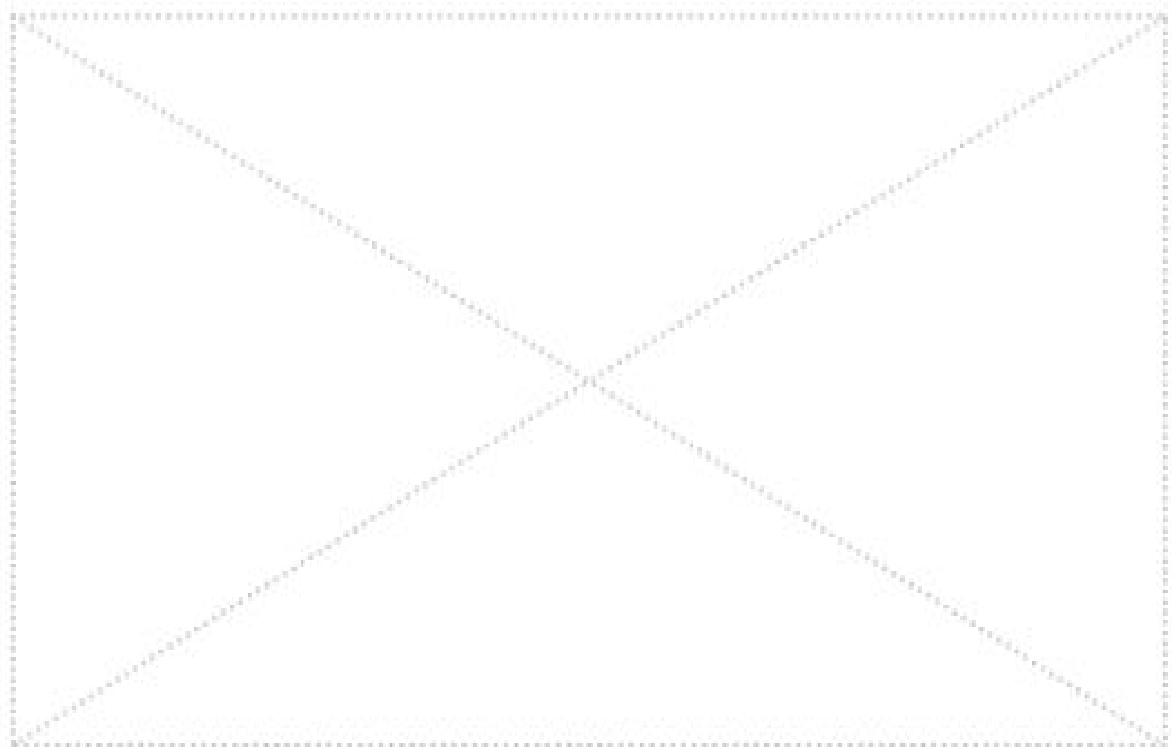
▣ 자동화된 랩 스케일 시료 표면 전처리 기술의 국내 전무

- 최근 AI 기술의 개발을 통해 기계 연마 및 가공 기술의 자동화 되고 스마트랩의 형태로 개발이 되고 있음. 이는 부품 공작 및 대구경 강관 등의 제조 산업 기반에 적용이 가능하며, 최근 국내외 업체들이 경쟁력을 키워나가고 있음.
- AI기반의 가공 기술은 비전문가임에도 불구하고 누구나 CAD 디자인만 있으면 변수 최적화에서 가공까지 스스로 진행하며 안전사고를 최소화할 뿐만 아니라 압도적인 생산성의 확보가 가능함.



[(왼) 스마트 기반의 시료 가공 플랫폼 장비 (오른) 현재 스마트 기술이 적용된 플랫폼 장비는 매크로한 기계 가공을 위한 목적임.]

- 또한 기존 공정 변수에 더해 냉각을 통한 열변위를 최소화 하여 높은 정밀도를 유지하므로 다양한 공정변수를 체계적인 제어가 가능하게 됨. 안전성과 가공 정밀성을 고려할 때, 가공 장비의 경우 스마트랩 또는 AI 로봇의 형태로 진화할 것으로 예상하고 있음.
- 이에 반하여 광학현미경에서 전자현미경에 이르기까지 다양한 소재의 미세구조를 관찰하기 위한 가장 필수 단계인 표면 전처리 장비는 대부분의 관련 연구실마다 한 대 이상 보유하고 있는 기반 장비임에도 불구하고 AI 기반의 자동화 시스템으로의 개발은 전무한 상황임.



[시료 표면의 전처리가 필요한 이미징 분석 기법과 미세구조의 관찰 예들]

- 이는 다양한 소재에 적용이 되는 랩 스케일에서의 표면 전처리 장비는 각 연구실의 다양성에서 야기되는 다양한 공정 변수의 확보가 불가능하기 때문으로 사료됨.
- 예를 들어, 세라믹 소재의 TEM 분석을 위한 시료 전처리는 최종적으로 10 um 두께까지 깨지지 않는 공정 조건이 필요하여, 정밀한 압력 제어, 짧은 미세구조 확인 시간 간격, 1 um 이하의 다이아몬드 분산 솔루션으로 마무리, 완벽한 평탄도 확보 등이 요구되지만, 철강 소재의 SEM 분석을 위해서는 두께는

무관하므로 높은 압력 (하지만 너무 높은 압력은 표면 전위 유발), 표면 전위 생성 억제를 위한 온도 제어 등의 다른 공정 변수들이 필요함.

■ 경제/산업적 측면에서의 필요성

- 국내 정밀 제조기술이 세계적으로 우위에 있음에도 불구하고 랩 스케일에서의 시료 연마 및 가공 장비 시장에서 차지하는 국내 시장 규모는 거의 전무한 실정이며, 해외 업체로부터 수입을 통해 국내 공급되고 있는 현실임. 표면 연마기는 관련 소모품 공급과 교체가 주기적으로 필요하므로 국내에서의 기술력 확보 부재는 해외 기술 및 업체의 장기적 귀속으로 이어지고 있음.



[랩스케일의 표면 가공 장비의 타입과 연도별 구축 상황. (세계 시장, 2016-2021)]

(출처: Secondary Sources and Information Center, 2021)

- 랩 스케일의 표면 전처리 기기의 세계 시장은 2020년 4억 4천만 달러 규모이며, 2027년 5억 6730 달러 규모로 예상하고 있으며, CAGR 3.6%로 성장을 이어나갈 것으로 조사됨. 국내의 막강한 정밀가공 기술을 바탕으로 AI 기반의 제어 기술을 접목하여 새로운 기술력을 확보 가능하며, 새로운 시장을 개척하고 해외로 진출할 수 있는 분야로 사료됨.

6.3.2. 기술 정의

■ 표면 연마 및 표면 미세구조 관찰

- 표면 미세구조 관찰용 시료 표면 처리
 - SEM/OM 미세조직 관찰: 연마휠, 연마액을 이용하여 미세 조직 관찰을 위한 표면 평탄화 및 표면 결함 제거



[랩스케일의 표면 가공 장비의 세계 지역별 점유율 현황 (2016-2021)]

(출처: Secondary Sources and Information Center, 2021)

- TEM/STEM 미세조직 관찰: 5 um ~ 10 um 두께의 막의 형태의 미세한 표면 가공 및 표면 결함 제거
- 미세구조 관찰 및 데이터 수집
 - 광학 시스템에서 x10~x200 수준의 표면 이미지 획득
 - 이미지 프로세싱을 이용한 크랙 (crack), 불량 부위 파악
 - 공초점 광학현미경을 이용한 고해상 미세조직 및 연마 두께 측정

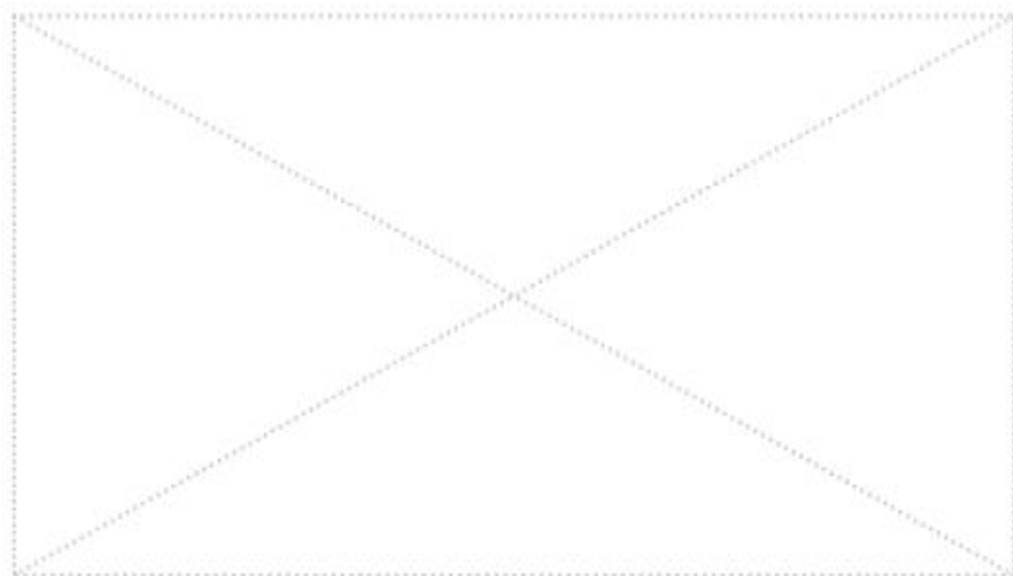
■ 로봇 제어

- 로봇 팔을 이용한 시료 정밀 이송
 - 다축 로봇 팔을 이용해서 신속하고 정확하게 시료를 연마기 (Polisher)와 광학 시스템 (현미경 또는 카메라) 사이에서 반복적으로 이송해야 함.
 - 연마기는 연마 수준에 따라서 여러 대의 스테이션이 존재할 수 있으므로, 로봇 팔은 충분한 작업 반경을 가져야 함.
 - 가능한 짧은 시간 내에 작업을 완료하기 위해서 신속한 움직임이 가능한 로봇 팔이 요구됨.
 - 반복 작업 신뢰성 확보가 요구됨
- 정밀 엔드이펙터 (end-effector)를 이용한 시료 연마
 - 시료를 연마기로 이송한 후, 연마를 하는 동안 원하는 방향으로 적절한 힘을 가할 수 있는 정밀 엔드이펙터가 필요함.

- 로봇 팔을 이용해서 직접 힘을 가할 수도 있지만, 이 경우 비교적 긴 로봇 팔의 링크들에 의한 비교적 큰 오차 발생 가능성이 있음.
- 따라서 작은 범위에서 정밀한 힘을 3축 방향으로 모두 가할 수 있는 기계구조를 갖는 엔드이펙터가 요구됨.

○ 3축 힘 정밀 센싱 및 피드백 제어

- 엔드이펙터에 장착된 정밀 로드셀을 이용해서 3축의 힘을 측정하고, 이를 피드백 정보로 이용해서 연마기에 가하는 힘을 제어함.
- AI를 통한 시료의 표면정보를 이용해서 가압 방향 및 힘의 크기를 계산할 수 있고, 이를 통해 연마 시간을 설정함.
- 힘 제어를 하면서 일정시간 연마를 한 후, 시료는 표면 관찰을 위해 광학 시스템으로 이송됨.



[AI 기반 로봇의 표면 전처리 공정 흐름도: 시료 이송 => 연마 (정밀 힘 제어) => 표면관찰 => 이미지 획득 및 처리 => 기계학습 => 재연마 전략 수립 => 시료 이송 및 재연마]

■ 인공지능을 위한 기계 학습

○ 광학 현미경 영상 디노이징 및 디블러링

- 광학 현미경 촬영 시 다양한 노이즈와 아티팩트로 인하여 분석과정에서 어려움이 발생할 수 있음.
- 선형 및 비선형 필터를 조합하여 광학 현미경 영상에서 발생하는 가우시안 노이즈와 푸아송 노이즈를 제거하는 디노이징 과정이 필요함.

- 촬영 시 움직임에 의해 발생하는 motion artifact와 초점이 맞지 않아 발생하는 블러 현상을 제거하기 위해, 블러 커널을 추정하고 디컨볼루션을 적용하여 선명한 영상을 만드는 디블러링 작업이 필요함.

○ 영상 화질 개선을 위한 초고해상도 영상화 작업

- 광학 현미경 영상의 제한된 해상도를 개선하기 위해 초고해상도 영상화를 적용함.

- 초고해상도 영상화는 저해상도 영상으로부터 고해상도 영상을 생성하는 방법으로 기존에는 다항식 기반의 interpolation 방법을 적용하여 수행하였지만, 최근에는 딥러닝 기반의 방법이 연구되고 있음.

- Generative Adversarial Network 기반의 초고해상도 영상화 방법을 적용하여 interpolation 과정에서 발생하는 블러 현상을 효과적으로 줄임.

○ 광학 현미경 영상의 3차원 복원

- 시료의 표면 연마 정도를 확인하기 위해 촬영한 2차원 영상을 이용하여 3차원 영상 복원 작업이 가능함.

- 재료의 표면을 나타내는 dense point cloud를 사용하여 3차원 좌표계에서 x, y, z 좌표로 정의되는 점들의 집합을 얻어 재료의 입체적인 구조를 파악할 수 있음.

○ AI 기술 (e.g., 머신 러닝)을 이용한 재연마 전략 수립

- 시료를 연마하는 과정에서 필요한 파라미터를 계산하기 위한 효율적인 방법이 필요함.

- 하드웨어의 비약적인 발전에 따라 컨볼루션 뉴럴 네트워크 (CNN) 에서 요구되는 계산량이 해결되면서 많은 연구 그룹에서 더 깊은 deep neural network를 경쟁적으로 개발하고 있음.

- CNN을 활용하여 전처리 된 영상에서 연마 정도를 파악할 수 있는 파라미터인 크랙 (crack), 불량 부위 등을 수치화할 수 있는 모델을 개발함.

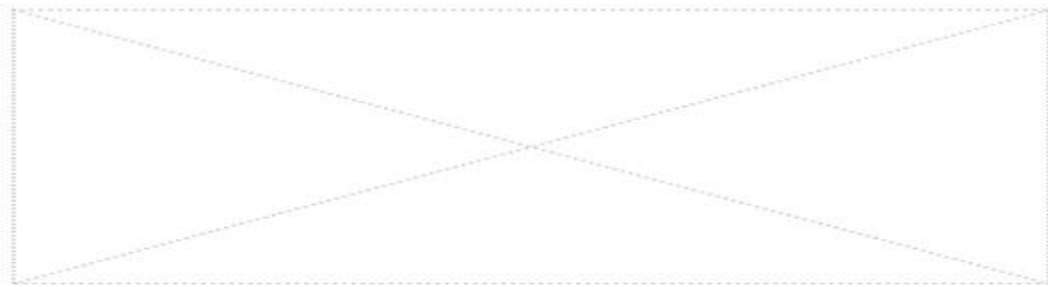
○ 힘 제어를 통한 재연마 작업

- CNN을 통해 수치화된 연마 정도 값을 이용하여 재연마 작업의 파라미터 산출.

6.3.3. 국내외 연구동향 및 차별성

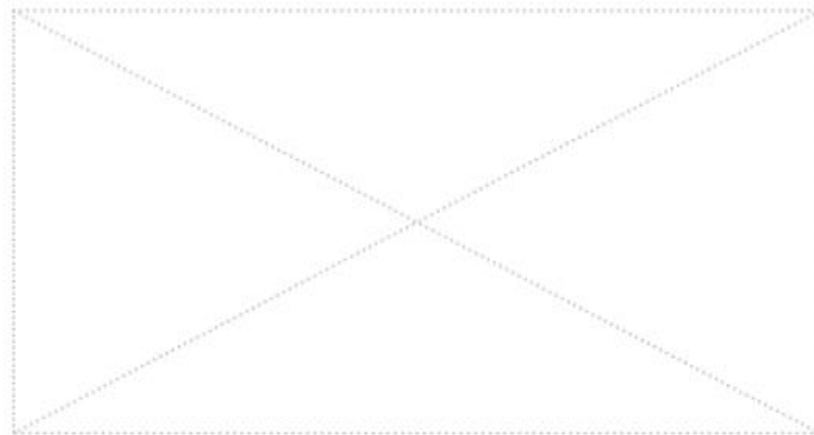
▣ 랩 스케일 시료의 기존 표면 전처리 기기

- 랩스케일 표면 전처리 기기는 수동형, 반자동형, 자동형 연마기로 나누어져 있으며, 자동화 연마기의 점유율이 점진적으로 증가하는 추세임.

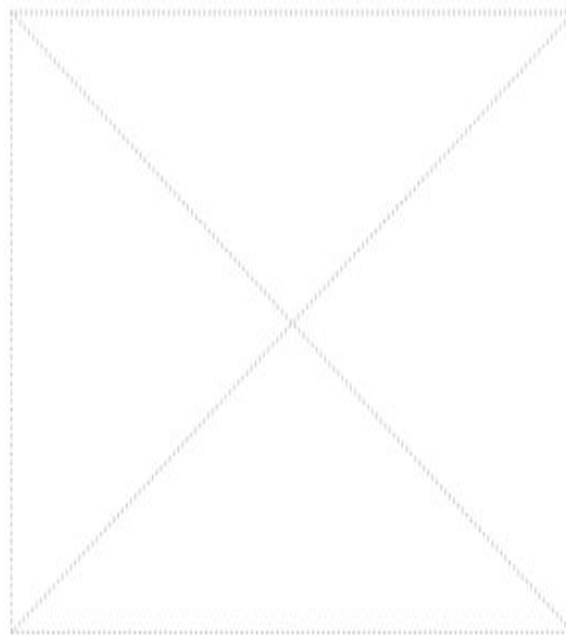


[(왼) 수동형 (오른) 자동형 표면 연마기. AI 기반의 로봇 제어에 의해 자동화된 표면 연마기는 현재까지 보고된 바 없음.]

- 수동형 표면 전처리 기기는 회전하는 연마휠을 제외하고는 인간에 의해 수행되는 형태임. 반자동형 표면 연마기는 시료를 연마휠에 고정/해제할 수 있으며 압력이 유압 방식으로 제어하고 있음. 연마휠의 회전 속도와 타이머 설정이 가능한 형태임. 이 두 형태의 표면 연마기 모두 연구 개발과 관련된 연구 수행은 되고 있지 않음.
- 캐나다의 제조업체인 Allied의 전처리 기기가 자동형에 가장 가까운 형태로 압력이 정밀하게 제어된다는 점을 제외하고는 실제 반자동형에 가까움.
- 랩 스케일에서의 시료 표면 전처리 기기의 첨단화, 자동화는 연구 현장에서 요구가 증대되고 있는 상황이나 연구개발의 측면에서는 정체 단계임. 특히 국내에는 정밀 표면 연마기는 100% 수입에 의존하고 있으며 국내 제조업체는 전무한 상황임. 이에 표면 전처리 기기의 국내 개발 동향은 전무한 상황임.
- 표면 전처리 기기의 제조 및 연구개발은 국가 별로는 북미, 유럽, 일본, 중국에서 주도 하고 있으며 대표적인 업체는 Struers, LECO, Buehler, Allied 등의 제조업체가 있으며 현재 자동화는 제조업체들의 주도적인 연구개발로 진행되어 왔음.
- 표면 연마기의 제조 및 연구개발은 국가 별로는 북미, 유럽, 일본, 중국에서



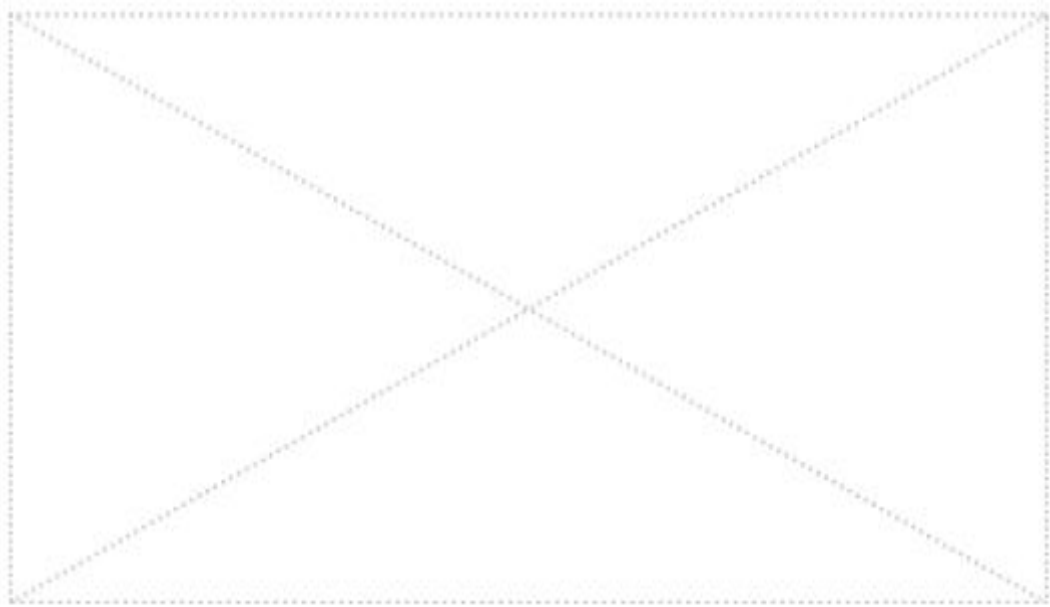
[수동형 자동형 표면 연마기의 시장 점유율의 현황과 예측]



[Allied 회사가 개발하고 공급 중인
자동형 표면 연마기의 외관]

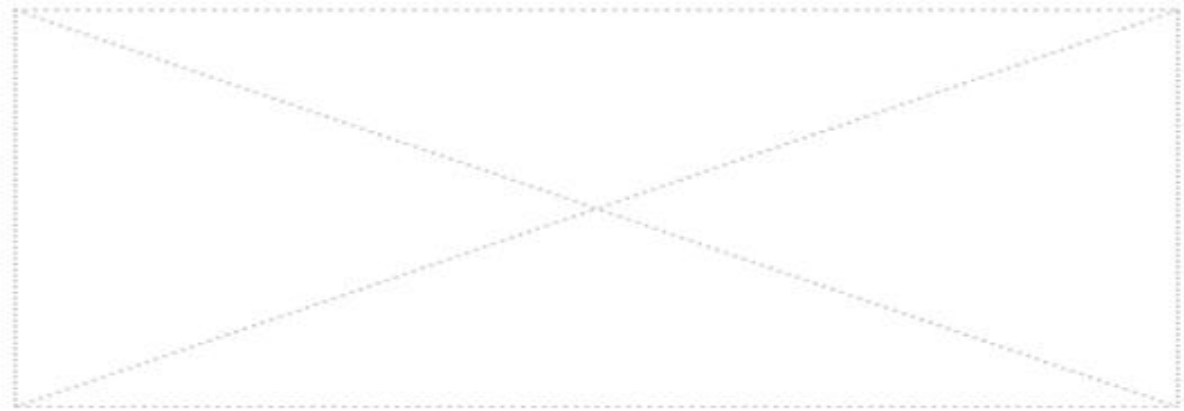
주도 하고 있으며 대표적인 업체는 Struers, LECO, Buehler, Allied 등의 제조업체가 있으며 현재 자동화는 제조업체들의 주도적인 연구개발로 진행되어 왔음.

▣ 정밀 표면 전처리 기기에 스마트 기술 접목의 필요성 증대



[랩스케일 시료 표면 전처리 기기 시장의 대표적 제조사와 2020년 기준 각 제조사 별 세계 시장 점유율. Struers, Buehler, QATM, Allied 가 대표적이며, Struers와 Buehler가 세계 시장의 50% 가깝게 차지하고 있음.]

- 4차 산업혁명 주도로 단일 수요 주체에서 시장의 종류와 개수가 폭발적으로 증가하며 이에 표면 연마기는 대상 소재의 다양성, 연마 후 미세조직 분석 기법 등에 따른 다양한 방식으로의 연마 기법 개발이 요구되어 짐.
- 이를 만족시킬 수 있는 기술적 변화는 소재의 물성과 연마기 파라미터 등의 데이터베이스에 기반하여 학습능력을 연마기에 적용하여야 함. 연마기의 주요 제조산업 선도국인 독일, 미국, 일본, 중국은 4차 산업혁명 대응 동향을 살펴보면 공통적으로 ICT기술과 제조업 융합을 중심으로 거시적 투자와 개발을 진행 중임. 하지만 대부분의 개발된 연마기는 랩 스케일 시료가 아닌 대형 기계부품에 적용되고 있음.
- 국내 업체 (휴먼터치)에서도 무인 자동화를 위한 로봇을 부착하고 인공지능을 접목한 스마트형 연마기를 개발한 사례가 있으나, 금속 및 세라믹 등의 원통형

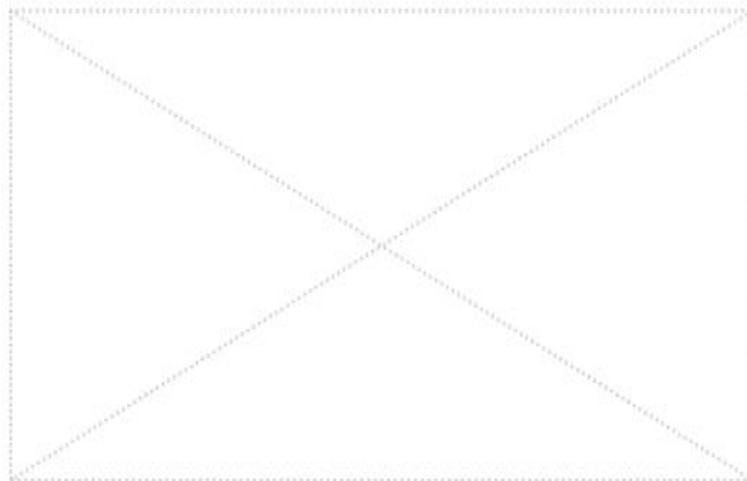


[랩스케일의 표면 가공 장비의 세계 지역별 시장규모 예측(단위: 백만 US달러, 2022-2027)]

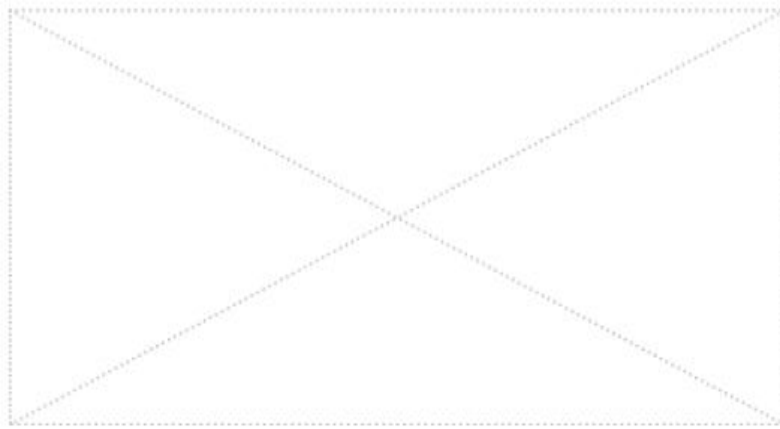
(출처: Secondary Sources and Information Center, 2021)

의 대형 제품의 표면을 정밀 가공하는 형태임.

- 현재까지 개발이 전무한, 데이터베이스 기반의 딥러닝 기술이 적용되고, 랩스케일의 시료 표면 전처리를 위한 정밀 연마 장비를 개발하기 위해서는, 관련 분야의 전문인력 양성, AI를 위한 공정변수 데이터베이스 축적, 원격제어·모니터링, 로봇시스템 적용 등의 연구 개발적 노력이 요구됨.



[국내업체인 휴먼터치에 의한 무인 자동화를 위해 개발된 스마트형 연마기. 대형 기기 가공에 적용됨.]



[중국 업체에 의해 개발된 스마트형 연마기의 외관. 대형 기기 가공용으로 제작됨.]

6.3.4. 특허 및 논문 분석

▣ 분석 개요

- 검색기간 : ~2021년 9월까지 검색된 특허
- 범위 : 서지, 요약, 대표청구항
- 검색 도메인 : 한국/미국/일본/유럽 공개 및 등록
- 검색 DB : Wintelips / Wisdomain(키워드맵)

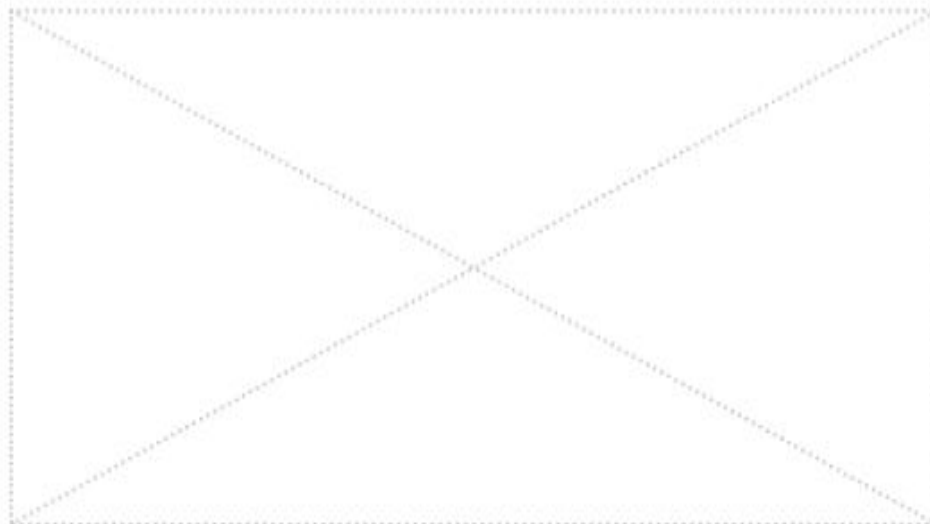
검색식				
(sample* specimen* 시료* material* 물질* 재료* 소재* metal* 금속* ceramic* 세라믹* bio* 바이오* compound* 화합물* skin* 피부*) and (((surface* 표면*) near3 (polish* 연마* treat* 처리* finishing*)) 표면 처리* “표면 처리”) and (experiment* 실험* microscop* 현미경* robot* 로봇* 로보트* "machine learning" 기계학습* "기계 학습" learn* train* 러닝* 학습* "artificial intelligence" 인공지능* "인공 지능" automation* 자동화*) AND (c* g* h*).IPCM.				
한국	미국	일본	유럽	합계
225	167	411	95	898

▣ 연도별 특허발표 현황

- 검색된 특허 898건을 중복제거하고, 관련도가 없는 특허를 노이즈 처리하여, 유효데이터로 181건의 특허가 최종 선정되었음.
- 참고로, 특허는 출원되고 나서 1년 6개월 이후에 공개되므로, 2020년 이후에는 미공개 특허가 존재함. 즉, 특허 출원 건수가 실제로 감소한 것은 아님
- 일본(97건, 54%)이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 나타났으며 유럽(37건, 20%), 미국(26건, 14%), 한국(21건, 12%) 순임
- 참고로, 본 과제의 검색 범위를 머신러닝, 자동화 등에 포커싱을 하여 좁게 찾으면, 검색되는 건수가 거의 없기에, 다소 범위를 넓혀서 검색.

구분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
유럽	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	2	3	0	1	3	3	
일본	1	5	9	8	6	6	7	2	4	1	2	4	9	2	1	3	
한국	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
미국	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	2	1	1	2	2	
계	1	5	9	9	8	6	9	5	5	4	4	9	10	4	8	9	
구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	총합계
유럽	4	2	1	2	1	2	0	1	1	0	0	1	3	1	0	0	37
일본	1	2	0	1	3	4	1	2	4	1	2	3	2	1	0	0	97
한국	0	1	1	3	0	1	4	2	1	1	0	1	0	0	1	0	21
미국	0	1	3	0	0	1	1	2	0	1	0	1	0	2	1	1	26
계	5	6	5	6	4	8	6	7	6	3	2	6	5	4	2	1	181

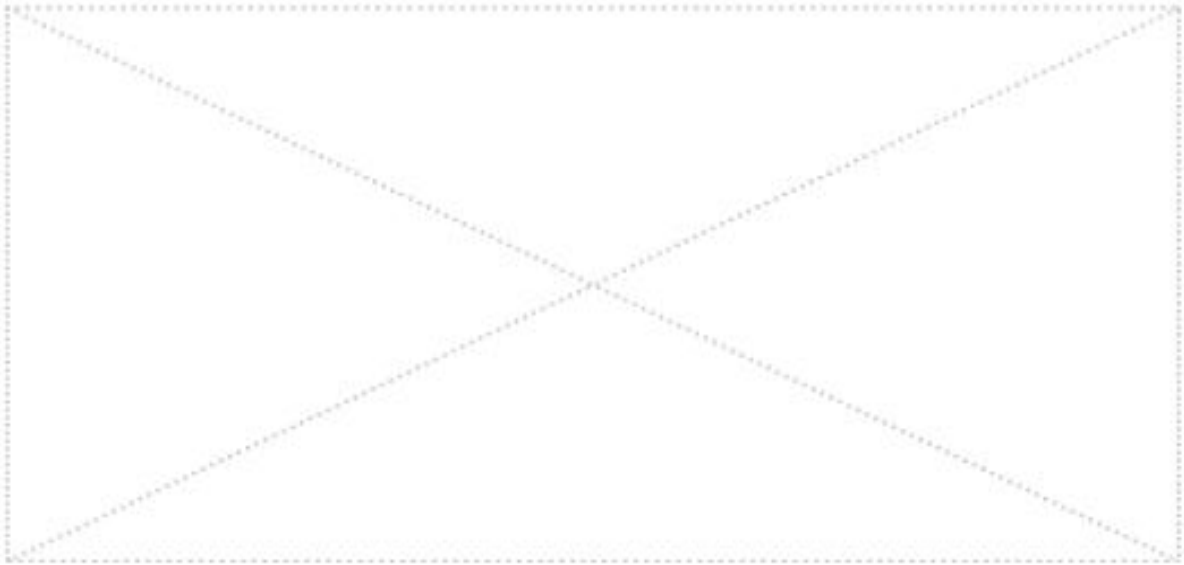
[연도 별, 주요 국가 별, 특허 발생 수. (1990~2021)]



[연도 별, 주요 국가 별, 특허 발생 수의 추이 그래프.
(1990~2021)]

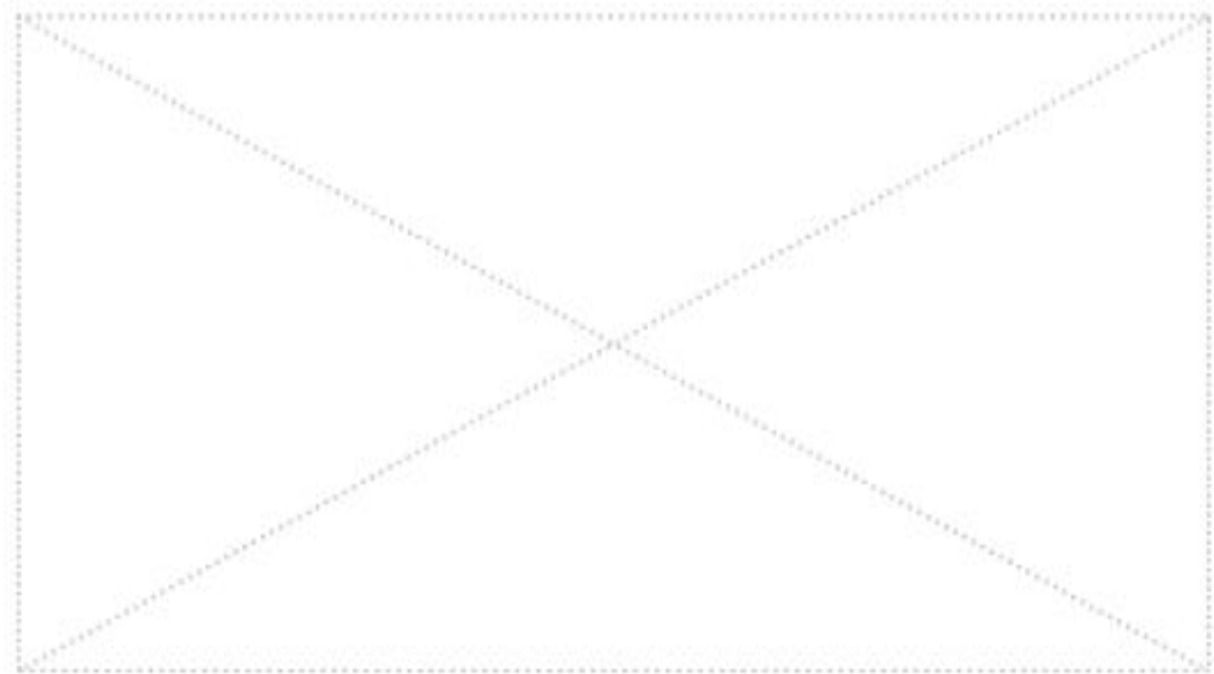
■ 국가별 특허발표 현황

- 상위 10개 출원인은 아래와 같음
- HITACHI CONSTR MACH가 10건의 특허를 출원하여 1위를 나타내고 있음. 또한, HITACHI 그룹을 모두 합하면, 25건의 특허를 출원한 것으로 나타남
- 상위 10개 출원인의 국가별 동향은 아래와 같음
- 상위 10개 출원인의 국가별 특허는 역시 일본이 46건으로 가장 많으며, 그 뒤로 유럽(9건), 한국(3건) 및 미국(2건) 순임



[조사된 관련 특허의 상위 10개 출원 기관 및 출원 국가 정보]

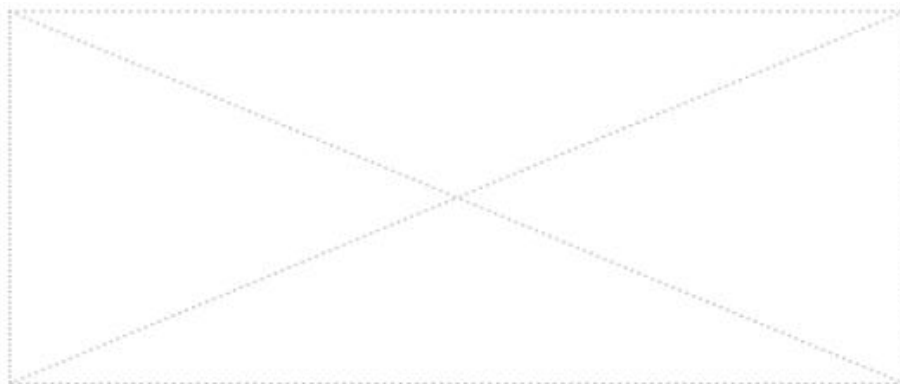
- 국가별 특허 피인용 합계는 일본이 372회로 가장 많으나, 평균 피인용 횟수에서는 2위인 미국보다 월등히 낮은 평균 피인용 횟수를 기록하고 있음. 참고로, 싱가포르의 피인용 합계 및 평균 피인용이 모두 216으로 나타나는데, 이는 싱가포르 특허 1건의 피인용이 216으로 나타나서, 평균 역시 216인 것임. 특허 건수가 1건이므로 정량적인 의미를 부여하기 어려움



[국가별 스마트 연마기 관련 특허 보유수와 피인용도 추이]

■ 기술수명 주기별 동향

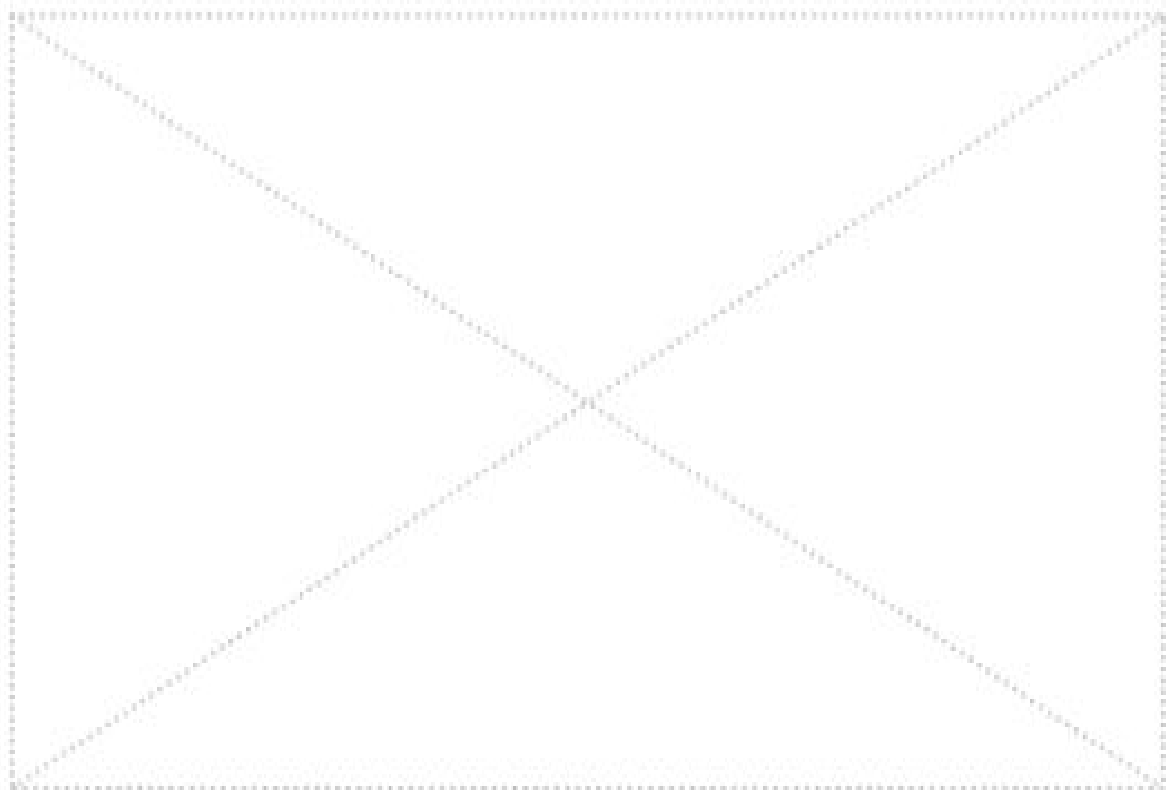
- 2년씩 묶어서 출원인수와 출원건수를 살펴보았을 때, 특정 구간으로 결정하기에는 다소 무리가 있음. 특히 출원 건수가 많지 않아서 이러한 현상이 나타남. 참고로, 앞서 언급하였듯이, 본 분석은 머신러닝, 자동화 등에 좁혀서 찾은 것이 아니라 다소 넓게 찾은 것임에도 기술성장주기 관련 일정한 패턴이 보이지 않는다는 것은, 바꿔 말하면, 기술 선점의 기회가 매우 넓게 열려 있는 것으로 볼 수 있음



[스마트 연마기의 주기별 동향]

출원연도	구간
2010~2011	1구간
2012~2013	2구간
2014~2015	3구간
2016~2017	4구간
2018~2019	5구간

▣ 키워드 맵



[스마트 표면 연마기 관련 키워드 맵]

- 키워드 맵에 따르면, 가장 높은 고도 부분에 결정면, 절삭공구, 표면연마면의 측정, 주사전자현미경 등이 키워드로 포진하고 있으며, 외곽 부분에 로봇, 자동화 등의 키워드가 일부 포진하고 있기는 하지만, 아직 “자동화”, “머신러닝” 등의 키워드가 거의 활성화되지 않은 것으로 판단됨

▣ 핵심 특허

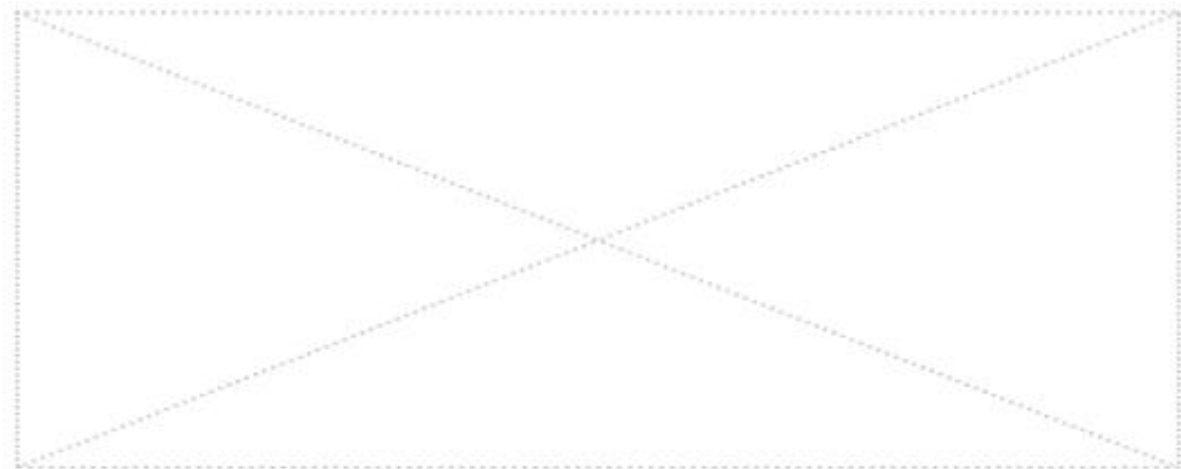
- 유효특허를 대상으로 위와 같은 분석을 진행하였음. 181건의 유효특허는 주로 표면의 미세 조직을 관찰하는 현미경과 관련된 특허로, 자동화 연마기 관련 특허 및 AI 기반 미세조직 데이터베이스 및 연마 공정 기술과 관련된 핵심 특허는 없음.
- 따라서, 본 기술과 관련하여 초정밀 로봇 암 기술, 3차원 영상화 기술, AI 기

반 연마기 플랫폼 기술과 관련하여 R&D를 투입할 여지가 충분히 있으며, 이와 관련하여 특허를 창출할 여지도 충분히 있음

6.3.5. 개발 목표 및 내용

▣ 개발 목표

랩스케일의 세라믹, 금속, 바이오 시료 등의 다양한 시료를 AI 기반으로 정밀 표면 전처리를 할 수 있는 요소기술을 개발하여 최종적으로 AI 기반의 로봇을 개발.



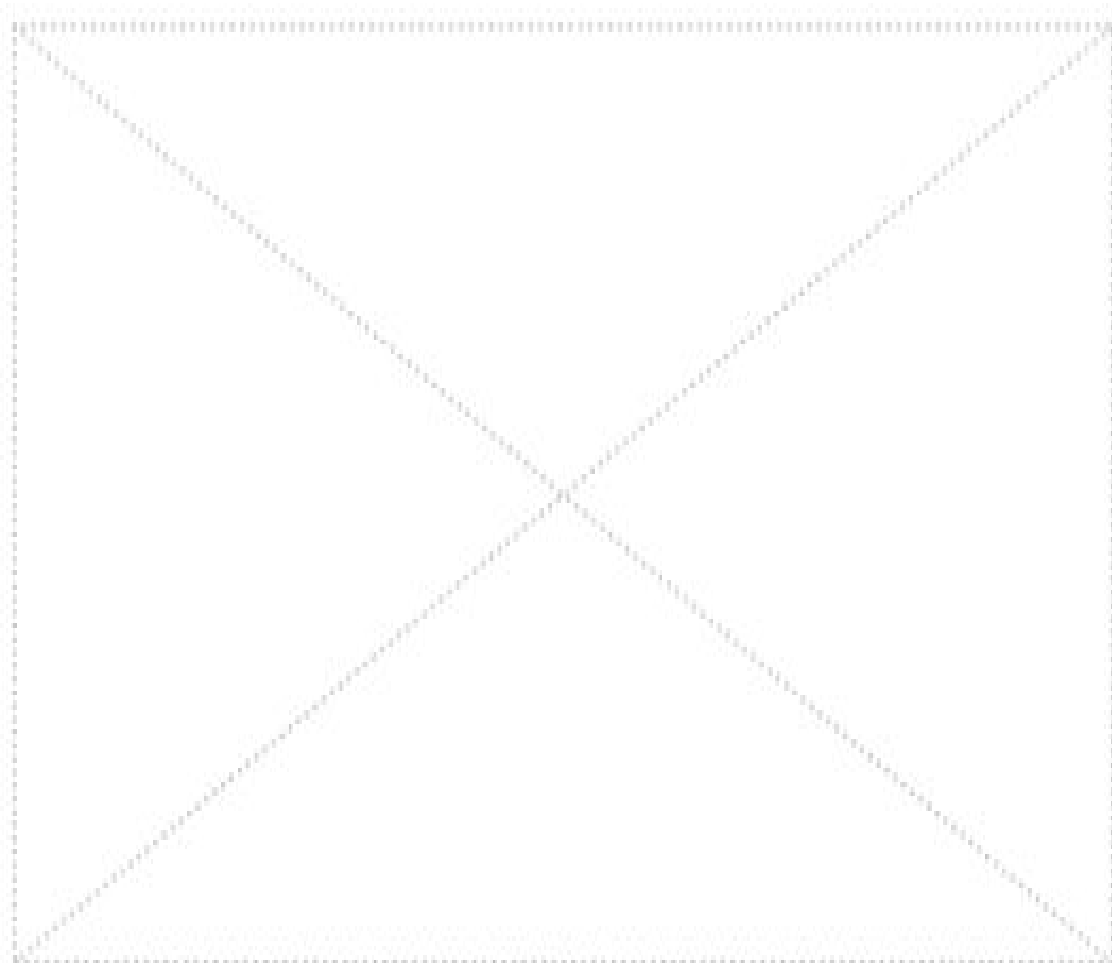
[머신러닝과 로봇 기반의 표면 전처리 AI 로봇 개발을 위한 모식도]

▣ 표면 처리 모듈 개발

- 연마기 공정변수 확보
 - 연마휠 회전 속도: 5-350 RPM (5 RPM 단위 증감)
 - 진동 및 소음 제거가 가능한 휠 회전 모터
 - 냉각액 분사 시스템 자동화
 - 1 μm 의 연마 분해능 확보
 - 압력 제어: 0-600 g (100 g 이하 증감 단위)

▣ 표면 관찰 모듈 개발

- 최적의 미세구조 관찰을 위한 광학 미경 구축 및 카메라 센서
 - CCD, CMOS, pixelated CCD 중 고감도의 미세구조 측정을 위한 센서 및 센서 컨트롤러 확보
- 관찰 배율: X20 ~ X200
- 광학 렌즈 타입: 장초점 (long focal) 광학 렌즈 활용
- 고해상화, 3차원 미세구조, 이미징 기법 기반의 두께 측정을 위한 공초점 현미경 도입

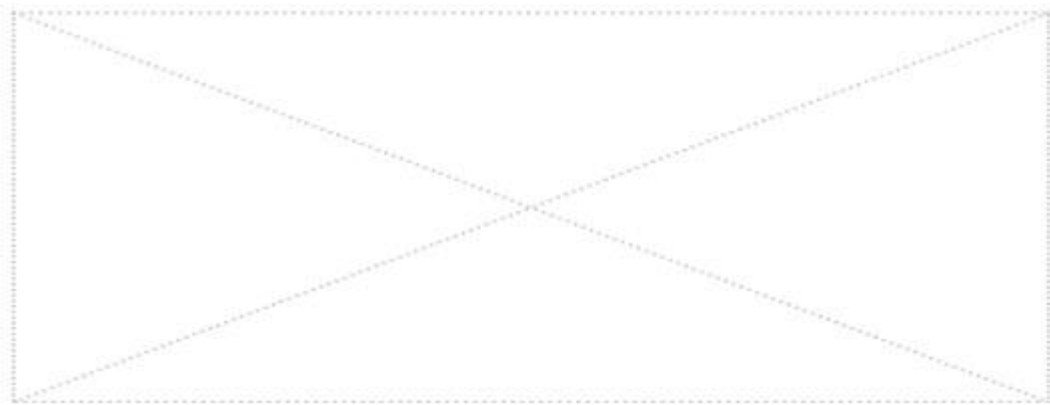


[공초점 현미경을 이용한 두께 측정 결과. 1 μ m 이하의 두께 변화 감지]

▣ 로봇 제어 모듈 개발

○ 다관절 로봇 팔

- 다관절 로봇 팔 (그림-19)을 이용한 시료 이송 시스템 개발
- 시료를 연마기 또는 광학 시스템 등 목표 지점으로 수평 이송 및 정렬
- 연마기에 올려진 시료에 수직으로 힘을 가하기 위해 z축 움직임이 가능한 자유도를 갖추고 있어야 함.
- 정확한 위치로 반복적인 이송을 위한 위치 제어 알고리즘 요구됨
- 로봇 팔 요구 스펙:
 - 자유도: 3 이상 (z축 자유도 포함)
 - 작업반경: 500 mm 이상
 - 가반하중: 5 kg 이상
 - 위치 반복 정확도: 1 mm 이하

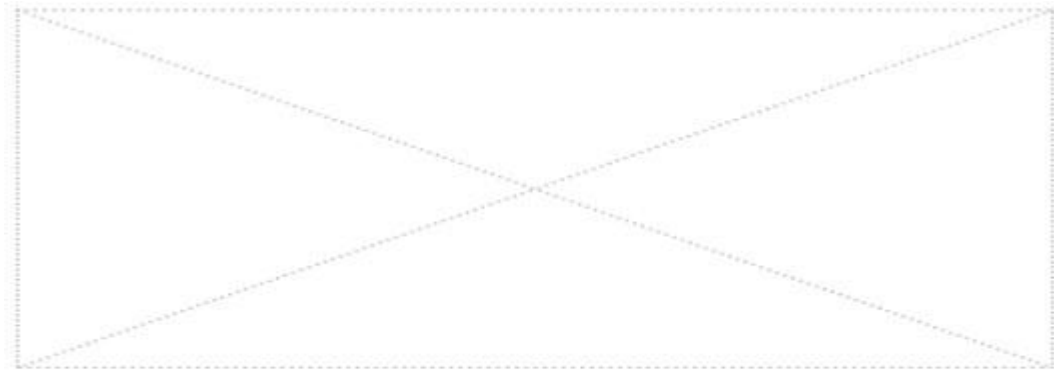


[다관절 로봇 팔의 예: Universal Robot (왼쪽), Fanuc SCARA Robot (오른쪽)]

○ 엔드이펙터 (End-Effector)

- 로봇 팔 끝단에 장착되어 시료에 가해지는 힘을 여러 각도에서 조절이 가능한 엔드이펙터 개발
- 다축으로 위치 및 힘을 정밀하게 제어가 가능한 평행 메커니즘이 적용된 로봇 매니플레이터 (그림-20) 개발

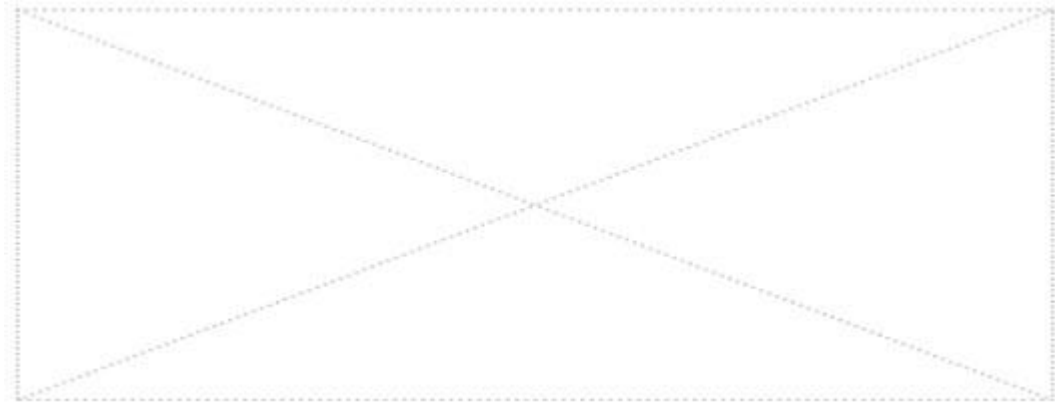
- 시료와 연마기 (Polisher) 표면 사이에 여러 각도로 힘을 가하기 위한 토크 제어 기능이 요구됨
- 수직 힘과 (x 또는 y 축으로 회전하는) 토크를 결합함으로써 시료의 원하는 부분에 적절한 힘을 가해서 특정 영역의 연마가 가능.
- 엔드이펙터 요구 스펙
 - 자유도: 3 이상 (x, y 축 회전 자유도, z 수직 자유도 포함)
 - 작업반경: 30 m 이상
 - 가반하중: 1 kg 이상
 - 위치 정밀도: 0.1 mm 이하



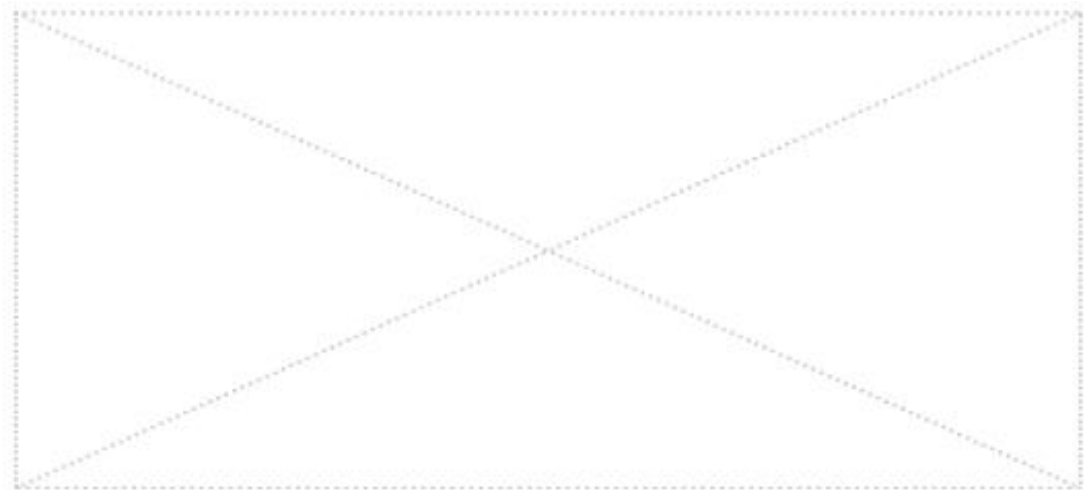
[평행 매커니즘을 이용한 다축 매니플레이터: 델타 로봇 (왼쪽) 및 스투어트 플랫폼 (오른쪽). 다 축으로 시료에 토크를 가할 수 있음.]

○ 정밀 힘 센싱 및 제어

- 다축 힘 센싱이 가능한 정밀 로드셀 (그림-21)을 엔드이펙터에 장착
- 로드셀에서 측정된 힘을 피드백으로 이용한 다축 힘 제어 알고리즘 개발
- 정밀 힘 제어 (그림-22)를 위한 고주파 (500~수 kHz) 제어루프 구성을 위한 제어 회로 및 시스템 설계
- 힘 센서 요구사항
 - 센싱 자유도: 3 이상 (x, y 축 토크, z축 힘 포함)
 - 최대 센싱 힘 범위: 50 N
 - 센싱 힘 해상도: 0.5 Nmm (x, y 축 토크) 이하, 0.05 N (z축 힘)이하



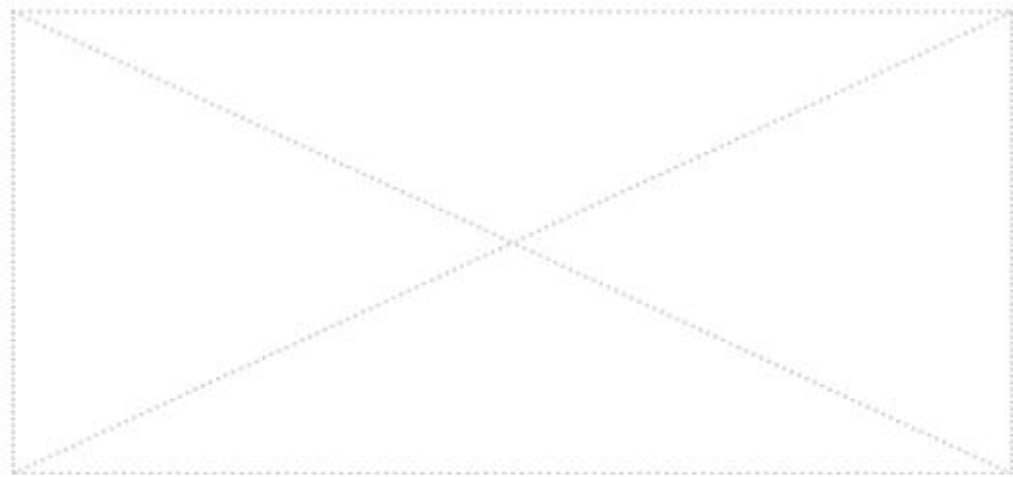
[다축 힘 센싱이 가능한 정밀 로드셀의 예: ATI Nano (왼쪽) 및 Futek (오른쪽)]



[힘 피드백 제어를 위한 블록 다이어그램의 예]

■ 기계 학습 모듈 개발

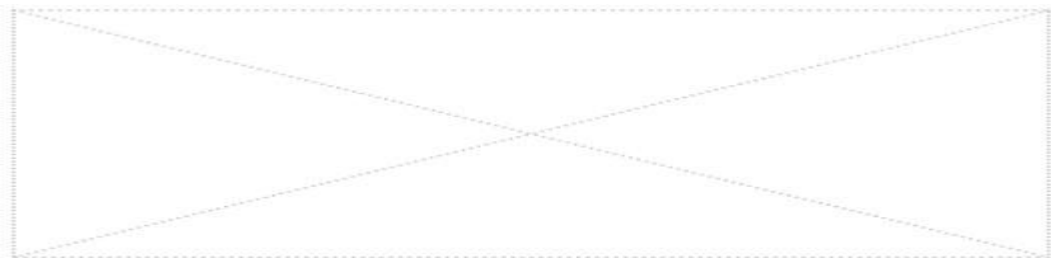
- 실험 parameter의 상세 기술/개괄식/필요시 그림 활용
- 영상 화질 개선
 - 광학 현미경 영상에서 발생하는 노이즈 및 아티팩트들을 제거하는 방법 개발
 - 화질 개선 및 정확한 분석을 위해 해상도를 높이는 super resolution 수행



[영상 화질 개선 예: 원본 광학 현미경 영상 (왼쪽) 및 화질 개선 결과 (오른쪽)]

○ 광학시스템에서 이미지 획득

- 현미경(Edge-3D Research Microscope)으로 재료의 z축을 따라 일정한 간격으로 촬영한 이미지 획득

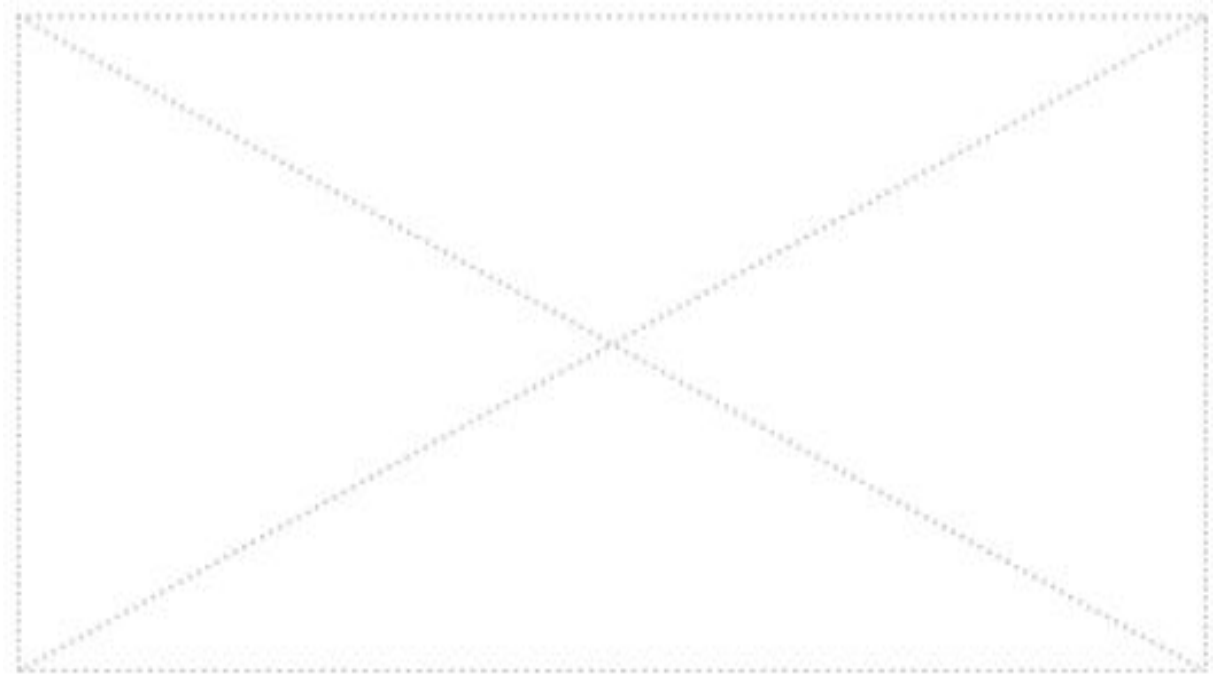


[3차원 재구성 기술 중 dense point cloud 적용의 예]

- 촬영된 이미지에서 3차원 재구성 기술 적용
- 3차원 좌표계에서 X,Y,Z 좌표로 정의되는 점들의 집합을 얻은 후 재료의 표면을 나타내는 3차원 재구성 기술을 적용하여 재료의 입체적인 구조 파악

○ CNN을 이용한 연마 정도 측정

- 연마 정도를 불량 및 크랙률에 대해 수치를 활용하여 정답 데이터화
- 전처리된 영상을 인풋으로 사전에 기록된 연마 정도를 정답으로 활용하여 CNN 모델을 학습
- 다양한 데이터를 학습시키기위해 데이터 증강기법을 사용하여 데이터셋 보강
- 연마 정도를 측정하기에 가장 적합하도록 하이퍼 파라미터 최적화를 하여 하여 최고의 성능을 낼 수 있도록 하고자 함.

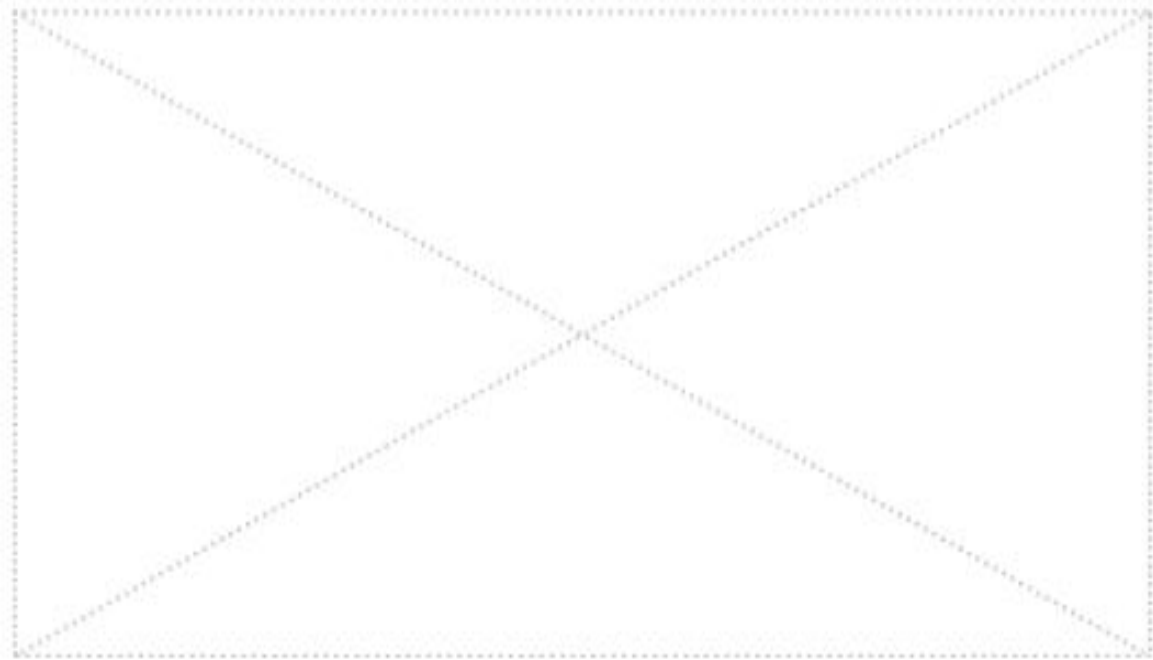


[CNN을 이용한 연마 정도 측정 방법의 예]

- 연마 정도 측정치를 통한 재연마 작업
 - 연마 정도 측정치를 활용하여 재연마 작업을 위한 공정 파라미터 변환

6.3.6. 추진체계 및 연구개발 로드맵

▣ 추진체계



▣ 연구개발 로드맵

연구 내용		2023	2024	2025	2026	2027
표면처리 모듈개발	연마기 공정 변수 확보					
	최적의 미세구조 관찰을 위한 광학 미경 구축 및 카메라 센서 구축					
표면관찰 모듈개발	연마기 공정 변수 확보					
	최적의 미세구조 관찰을 위한 광학 미경 구축 및 카메라 센서 구축					
	시스템 검증 및 플랫폼화					
로봇제어 모듈개발	다관절 로봇 팔을 이용한 시료 이송 시스템 개발					
	여러 각도에서 조절이 가능한 엔드이펙터 개발					
	정밀 힘 센싱 및 제어 알고리즘 개발					
기계학습 모듈개발	영상 화질 개선 및 3차원 영상 재구성 방법 개발					
	연마 정도 측정을 위한 AI모델 개발					
	개발 AI모델을 이용한 재연마 시스템 적용 및 최적화					

6.3.7. 소요예산

▣ 사업기간 : 5년 (2023~2027년)

▣ 사업비 규모 : 국비 100억원 (20억원/년)

▣ 사업비 산출근거

- 광학장비, 정밀 연마 장비 등의 기반 설비가 필요하며 이를 제어하기 위해서는 기존의 상용화된 로봇암이 아닌 정밀한 힘과 위치 제어가 가능한 새로운 로봇암의 개발이 필요함. 소재 전처리 연마공정 중에 축적된 영상 데이터와 연마 공정 파라미터는 연계된 형태로 데이터베이스화하기 위한 저장 서버 구축과 데이터베이스를 기반으로 머신러닝에 의해 새로운 공정 파라미터를 설계하는 계산 서버가 함께 구축이 되어야 함.

- 본 과제의 수행을 위해서는 (1) 시료 전처리 및 미세구조 측정 기술, (2) 정밀 로봇암 설계 및 제어 기술, (3) 측정 데이터베이스 구축 및 머신러닝 기술의 3개 분야의 전문가가 필요하며 세 가지의 기술 및 장비가 융합된 형태로 개발 가능함. 2021년 “연구장비 개발 및 고도화 지원사업”에서의 “연구장비 핵심기술 개발사업”에서 요소 기술 개발 당 3억원/년 내외의 지원금액이 책정되었고, 본 기술 개발을 위해서는 R&D 업체의 참여도 필요하므로, 연간 20억원 규모의 예산은 적절함.

6.3.8. 기대효과

▣ 안전사고 예방, 경험적 사고의 데이터베이스화

재료분석 연구원인 A씨는 새로운 재료를 분석하기 위한 준비작업이 항상 고역이다. 이 작업은 많은 부분이 수작업 또는 수동으로 이루어져서 시료 전처리를 해야하는 경우에는 아침 일찍부터 저녁 늦게 까지 실험실에서 시간을 보낼 수 밖에 없다. 재료의 표면 과찰 및 분석을 하기 위해서는 시료의 표면을 매우 균일하게 연마를 해야 한다. 시료를 연마할 수 있는 장비가 있긴 하지만, 시료 표면의 연마 정도를 매번 현미경으로 관찰해야 하고, 현미경 관찰을 바탕으로 연마가 덜 된 부분을 미세하게 손으로 조정하면서 연마를 하다 보니, 준비 작업에 오랜 시간이 필요할 뿐만 아니라, 연마 도중에 손을 다치는 경우도 많다. 또한 미숙한 조작으로 시료를 오히려 손상시켜 버리면, 새로운 시료를 가지고 작업을 처음부터 다시 시작해야하는 어려움도 있다. 더구나, 힘을 주는 정도와 힘의 방향을 미세한 범위에서는 항상 일정하게 조절하는 것이 어려워서, 시료 준비 시간과 정확도를 예측하기에 무척이나 큰 어려움을 겪고 있다. 또한, 새로운 연구원이 들어오면 이 작업을 교육시키고 연습시키는 데에도 오랜 기간이 필요하다. 특히 납이나 수은 등 독극 물질이 포함된 시료를 다루는 경우 연마과정 중에 발생하는 미세 분말에 늘 신경이 쓰이던 터였다.

하지만, 새로 개발된 “소재 표면 전처리 AI 로봇”을 이용한 다음부터는 직접 시료 전처리 작업을 할 필요가 없어서, 시료 전처리에 사용해야만 했던 시간을 연구에 투자할 수 있어서, 연구 효율과 생산성이 대폭 향상되었다. 새로운 시스템은, 시료를 로봇에 장착을 하고 시작 버튼만 누르면 된다. 그 후 부터는 로봇이 알아서 시료를 연마하고, 연마 정도를 AI기반으로 자동으로 처리된 현미경 이미지를 통해서 시스템이 스스로 판단한다. 이 경우에는 연마와 이미지 프로세싱 작업이 자동으로 반복적으로 수행이 되기 때문에 연마가 완료될 때까지는 사람이 개입할 필요가 없어 연구환경이 훨씬 안전해졌다. 따라서 업무 효율성의 극대화를 기대할 수 있다. 또한, 전처리된 시료의 연마 품질도 관리가 되기 때문에, 일관성 있는 실험 및 분석결과를 기대할 수 있게 되었다.

이제 A씨는 더 이상 재료 연마 작업 때문에 스트레스를 받지 않아도 되고, 뛰어난 연구 결과를 내면서도, 오히려 저녁이 있는 삶을 누릴 수 있어서, 일과

생활의 균형을 유지할 수 있게 되었다.

▣ 연구능률 향상, 삶의 질 제고

암세포의 운동성 분석 연구 분야에서 일하고 있는 연구원 B씨는 세포의 기계적 특성을 분석하기에 용이한 칩 설계를 담당하고 있다. 자기장의 변화에 따라 발생하는 세포의 작은 움직임을 추적하려면 칩의 표면이 매우 균일해야 한다. 연구원 B씨는 기존의 칩들을 사용해서 만든 시스템에서는 자신이 원하는 성능을 낼 수 없음을 인지하고 깊은 고민에 빠졌다. 하나의 칩을 만들기 위해 너무나 많은 시간과 노력을 요할 것임이 자명하기 때문이다. 실험을 위해서는 최소 몇 십개의 칩이 필요한데 연마기를 사용하여 수동으로 하나하나 연마할 경우에 거기에 드는 시간과 노력이 엄청나게 된다. 그리고 각각의 칩들이 균일한 결과를 낼지도 미지수이다. 업체에 외주를 맡기려고 알아보았으나 그마저도 쉽지 않다. 칩을 소량 생각하는 대부분의 업체들은 찍어낼 수 있는 장비만 있을 뿐 정교한 연마를 위한 장비를 보유하고 있지 않다.

그러던 어느 날 재료 분석 파트에서 일하고 있는 연구원 C씨와 연구의 고충을 나누는 기회게 생겼다. B씨는 연구와 관련된 자신의 고민을 얘기하다가 우연히 C씨로부터 재료 분석 쪽에서는“소재 표면 전처리 AI 로봇”을 이용하여 손쉽게 연마를 하고 있는 것을 듣게 된다. 새로운 시스템은 칩을 로봇에 장착을 하고 시작 버튼만 누르면 된다. 그 후 부터는 로봇이 알아서 재료를 연마하고, 연마 정도를 AI기반으로 자동으로 처리된 현미경 영상분석을 통해서 시스템이 스스로 판단한다. 자신이 원하는 균일한 표면을 달성할 때까지 이 시스템은 자동으로 연마와 분석 작업을 반복적으로 수행하기 때문에 사람이 개입할 필요가 없으며, 칩들마다의 표면의 균일성 정도도 거의 일정하다. 더더군다나 연마를 반복 수행하면서 획득한 현미경 영상들을 사용하여 3차원 영상 복원까지 진행해 주니 전체 칩의 형태를 3차원적으로 관찰하며 칩 설계의 방향을 구상할 수 있게 된다.

B씨는 표면 전처리 AI 로봇 덕분에 요즘 살 맛이 난다. 그 동안 연구의 성과가 미미하여 스트레스를 받았었는데 칩 설계가 자신의 생각대로 이루어지니 그 후의 실험들도 자신이 세운 가설대로 착착 진행이 되어 큰 성과를 내었다. 세포의 운동성에 대한 안정적인 실험을 통해 암세포의 운동성이 일반 세포의

운동성과 확연하게 다르고 암세포의 단계별로 그 운동성이 다름을 입증할 수 있었다. 이러한 어려운 실험을 완성할 수 있게 해준 AI 로봇에 B씨는 늘 감사해 한다.

6.3.9. 발전방향

▣ 과학기술예측조사(2015~2035)에서 “산업간 및 기술간 융합 가속화”, “신소재, 나노물질 등의 안전성 문제”, “고속련 정밀 제조 및 첨단 제조 기술의 중요성” 등의 단기적인 이슈와 “가사 및 서비스 로봇의 대중화”, “뉴로 정보의 활용” 등의 장기 이슈에 부합함.

▣ 데이터 플랫폼 발전전략에서 데이터 전 주기 활성화와 통합 관리를 위한 민관 협력 기반의 “데이터 플랫폼 생태계 조성”에 부합하며 “데이터 혁신 기반 디지털 경제 선도국가” 건설에 이바지 가능함.

▣ R&D의 우수 성과를 제고하고 연구의 효율성 및 전략적 추진을 위한 연구환경의 기반을 조성하는데 있음.

- 표면 분석을 위한 가장 기본적인 절차이며 연구자의 노동 집약이 필요한 정밀 표면 연마 공정을 스마트화하여 AI 로봇에 적용하여 연구의 효율성을 증진시키는데 있음.
- 수집된 시료의 표면 영상 데이터는 데이터베이스화할 수 있을 뿐 아니라, 표면 미세구조와 관련된 분석 및 공정 설계에 활용이 가능함.

▣ 기술적 열등에서 벗어나 선도기술의 선점 가능

- IT 소재, 에너지 소재, 바이오 소재 등의 다양한 소재 연구를 세계적으로 선도하고 있음에도, 표면 연마와 관련된 기반 기술 및 장비 기술은 후진적 위치에 있음.
- 시료 전처리를 위한 AI 로봇 구축은 로봇, 인공지능, 소재 분석 등의 분야가 융합된 새로운 기술로서 기반 장비와 기술을 국산화하고 새로운 기술 시장을 점유할 수 있는 분야임.

■ “국가 소재 연구데이터 센터“ 사업과의 연계성

- 최적화된 소재 별 연마 공정 조건과 소재 별 표면 영상의 데이터베이스화는 “소재 공정조합설계 연구사업”과 “소재 측정분석 공유 서비스 연구사업”과의 데이터베이스와 연계가 가능
- 데이터 베이스의 공유 서비스를 통해 연구자들의 공동활용이 가능하며 이로부터 새로운 연구방법론의 유도가 가능하며 원천 소재의 신속한 개발과 상용화를 이끄는 기반기술로 발전 가능함.

■ 융합연구의 결정체로서 다양한 분야 연구 사업과의 연계 창출

- 기초과학연구 및 산업연구분야 모두에서 수요가 클 것으로 예상되며 국가 기초과학연구의 위상 및 국가기반 산업의 세계시장 진입 가능
- 의생명 분야 실험에 널리 사용되는 피펫팅 자동화 시스템 개발, 병리 슬라이드 전처리 자동화 시스템 개발 등으로의 연계, 확장이 가능

참고 문헌

■ 참고 문헌

1. “QLED가 효자” 삼성전자, 글로벌 TV 시장 14년 연속 1위 (동아일보 <https://bizn.donga.com/3/all/20200219/99784821/2>)
2. J. Jo, D. Jo, S. Lee, S. Yoon, H. Lim, B. Lee, Y. R. Do, H. Yang, ACS Appl. Nano Mater. 2020, 3, 1972
3. “삼성·LG전자 TV 1분기 글로벌 시장 평정, 점유율 52% 넘어” (매일경제 <https://www.mk.co.kr/news/business/view/2021/05/502771/>)
4. “4분기 삼성 QD-OLED 양산...관 커지는 OLED TV 시장” (이데일리 <https://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=03614566629144368&mediaCodeNo=257>)
5. “삼성이 키운 QLED TV까지 중국 업체 추격 시작됐다” (조선일보 <https://biz.chosun.com/it-science/ict/2021/06/13/SRVHOHW7CJC5FOWIG2LEFUUYRQ/>)
6. “디스플레이용 QD 소재 기술 동향 및 향후 추진 방향” (한국산업기술평가관리원 https://m.kosen21.org/info/gtbReport/gtbReportDetail.do?articleSeq=GTB_000000000164819)
7. E. Jang, Y. Kim, Y. Won, H. Jang, S. Choi, ACS Energy Lett., 2020, 5, 1316
8. Y. Won, O. Cho, T. Kim, D. Chung, T. Kim, H. Chung, H. Jang, J. Lee, D. Kim, E. Jang, Nature, 2019, 575, 634
9. Daniel Salley, Graham Keenan, Jonathan Grizou¹, Abhishek Sharma¹, Sergio Martín & Leroy Cronin, Nature Communication, 2020, 06, 2771

10. Changcheng Yu, Qi Xiong, Kai Yang, Haibiao Chen, Feng Pan, *Advanced Materials Technologies*, 2021, 02, 2001036
11. Huachen Tao, Tianyi Wu, Sina Kheiri, Matteo Aldeghi, Alán Aspuru-Guzik, Eugenia Kumacheva, *Advanced Functional Materials*, 2021, 09, 2106725
12. Robert W. Epps, Michael S. Bowen, Amanda A. Volk, Kameel Abdel-Latif, Suyong Han, Kristofer G. Reyes, Aram Amassian, and Milad Abolhasani, *Advanced Materials*, 2020, 06, 2001626
13. Kate Higgins, Sai Mani Valleti, Maxim Ziatdinov, Sergei V. Kalinin*, and Mahshid Ahmadi, *ACS Energy Letters*, 2020, 05, 3426
14. Yi Shen, Nopphon Weeranoppanant, Lisi Xie, Yue Chen, Marcella R. Lusardi, Joseph Imbrogno, Mounji G. Bawendi and Klavs F. Jensen, *Nanoscale*, 2017, 05, 7703
15. Benjamin Burger, Phillip M. Maffettone, Vladimir V. Gusev, Catherine M. Aitchison, Yang Bai, Xiaoyan Wang, Xiaobo Li, Ben M. Alston, Buyi Li, Rob Clowes, Nicola Rankin, Brandon Harris, Reiner Sebastian Sprick, Andrew I. Cooper, *Nature*, 2020, 583, 237–241
16. Pengsong Li, Anuj Kumar, Jun Ma Yun, Kuang Liang Luo, Xiaoming Sun, *Science Bulletin*, 2018, 63, 645–662
17. Mikhail S. Ermolin, Petr S. Fedotov, *Reviews in Analytical Chemistry*, 2016, 35, 185–199
18. Jiagen Li, Junzi Li, Rulin Liu, Yuxiao Tu, Yiwen Li, Jiaji Cheng, Tingchao He, Xi Zhu, *Nature Communication*, 2020, 11, 2046
19. Sourav Bhattacharjee, *Journal of Controlled Release*, 2016, 235, 337–351

20. Yuta Suzuki, Hideitsu Hin, Takafumi Hawaii, Kotaro Saito, Masato Kotsugi, Kanta Ono, Scientific Report, 2020, 10, 21790
21. H. Sumioka et al., Sci. Rep., 2013, 3, 3034
22. 연도별 소방공무원 순직(2011~2020 통계연보자료)
23. 2020년도 화재통계연감 (소방청)
24. 서울특별시 119 안전센터 1개소당 시민통계 (서울특별시)
25. 서울시 119 구조활동 실적(소방서별) 통계 (서울특별시)
26. 월별 재난 발생 통계(서울종합방재센터)
27. Humanoid Robot Market-Global Forecast to 2023 (Markets and Markets)
28. Top Robotics Market with COVID-19 Impact Analysis & Global Forecast to 2025 (Markets and Markets)
29. Allied Market Research, 2020, Robotics Technology Market Statistics – 2027
30. Market Research Future, 2021, Household Robot Market Research Report: By Component (Product, Services), By Type (Domestic, Entertainment) and By Application (Housecleaning, Lawn mowing, Companionship, Toys & hobby systems, Elderly assistance, Others) & Forecast to 2027
31. Markets and Markets, 2021, Industrial Robotics Market worth \$75.3 billion by 2026
32. Markets and Markets, 2020, Medical Robots Market By Product & Service [Instrument & Accessories, Robotic Systems (Surgical Robots, Rehabilitation

Robots)], Application (Laparoscopy, Radiation Therapy, Pharmacy), End User (Hospital, Ambulatory Surgery)–Global Forecast To 2025

33. A. E. Block et al., 2021 ACM/IEEE Int. Conf. HRI., 2021, 380–388
34. X. Zheng et al., J. Robot. Mech., 2020, 32, 51–58
35. A. E. Block and K. J. Kuchenbecker, Int. J. Soc. Robot., 11, 49–64
36. E. Park and J. Lee, Robotica, 2014, 32, 133–142
37. J. Engelsberger et al., 2014 IEEE–RAS Int. Conf. Humanoid Robot., 2014, 916–923
38. Y. Lee, Auton. Robot., 2016, 40, 457–472
39. G. Cheng et al., Proc. IEEE, 2019, 107, 2034–2051
40. S. Kajita et al., 2016 IEEE–RAS 16th Int. Conf. Humanoid Robot., 2016, 637–643
41. T. Mukai et al., IEEE Trans. Robot., 2008, 24, 505–512
42. C. Laschi, and R.J. Wood, Sci. Robot., 2021, 6, eabh4443
43. J. Kim et al., Science, 2020, 365, 668–672
44. R.M. Johansson–Pajala et al., Int. J. Soc. Robot., 2020, 12, 1103–1117
45. H. Melkas et al., Int. J. Med. Info., 2020, 134, 104041
46. N. Davies, Eng. Tech., 2016, 11, 58–61
47. G. Li et al., Nature, 2021, 591, 66

48. C. Laschi, M. Calisti, Nature, 2021, 591, 35
49. R. K. Katzschmann, J. DelPreto, R. MacCurdy, D. Rus, Sci. Robot. 2018, 3, eaar3449
50. E. W. Hawkes, L. H. Blumenschein, J. D. Greer, A. M. Okamura, Sci. Robot. 2017, 2, eaan3028
51. M. Cianchetti, C. Laschi, A. Menciassi, P. Dario, Nat. Rev. Mater. 2018, 3, 143
52. D. Rus, M. T. Tolley, Nature, 2015, 521, 467
53. C. Laschi, B. Mazzolai, M. Cianchetti, Sci. Robot. 2016, 1, eaah3690
54. Ellen T. Roche et al. Sci. Transl. Med. 2017, 9, eaaf3925
55. T. Chen, O. R. Bilal, K. Shea, C. Daraio, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018, 115, 5698
56. F. Xi, Y. Pang, G. Liu, S. Wang, W. Li, C. Zhang, Z. L. Wang, Nano energy 2019, 61, 1
57. Q. Zhang et al. Nat. Commun. 2021, 12, 616
58. 해양·선박용 로봇 기술 시장 (출처 : Frost & Sullivan, Emerging Robotic Technologies for Marine Applications, 2017), 연구개발특구진흥재단
59. 해양신산업동향 2018 6월호, 한국해양수산개발원

첨부

수정·보완요구사항 반영내역

- 과제명 : 지능형로봇 기반 융합 연구개발 추진전략 기획 연구
- 주관연구기관(책임자) : 한국과학기술연구원 (한상수)

전문기관의 수정·보완요구사항	수정·보완요구사항 반영내용 요약	적용 페이지
<ul style="list-style-type: none"> ○ 신소재/신물질 개발을 위한 AI 기반 스마트 연구실 구축은 합성과 평가가 복잡하지 않은 소재연구 분야에서는 매우 효율적이지만, 그러한 기반 구축을 통해 효율성을 담보하기 어려운 분야도 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 특히 실험실 자동화를 위한 인공지능 기반 로봇 기술이 AI 기반 스마트 연구실의 플랫폼으로 제시되고 있는데, 이러한 기술 기반이 연구개발을 위한 효율적 플랫폼으로 활용될 가능성이 높은 제반 분야에 대해 보다 구체적인 설명이 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가의견과 같이 AI 기반 스마트연구실의 효율적 플랫폼화를 위해, 본 기획에서는 향후 성공가능성이 높은 소재분야를 선정하여 상세기획을 진행함 ○ 성공가능성을 높이기 위해서는 소재 합성·분석이 상대적으로 용이하고, 고가장비가 필요로 하지 않아야 하며, 이에 대한 소재분야로 우선적으로 나노입자와 유무기 페로브스카이트 분야를 선택함 <ul style="list-style-type: none"> - 해당내용은 ‘3.1.2. 사업추진 전략 및 세부추진 과제’에 구체적으로 보완설명함 	<p>54~55</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 현재 국내 연구기반을 고려할 때 향후 5년간의 연구를 통해서 보고서에서 제안하고 있는 연구내용과 목표가 적절한 수준인지에 대한 보다 세밀한 검토가 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상세기획 시 분야별 전문가가 현재 국내 연구현황을 분석하고 이를 기반으로 각 과제별 목표를 설정함 ○ 스마트연구실 사업 전체에 대한 성과목표를 세밀히 검토하여 내용을 보완함 <ul style="list-style-type: none"> - 3.5. 성과목표 및 지표 항목 추가 	<p>216~217</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다만 제시된 AI 기법의 적용시 얻게 되는 활용 효과에 대한 내용이 조금 더 정량적인 측면에서 제시되면 객관성을 높일수 있을 것으로 판단됨 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최근 영국 리버풀 대학에서 AI 로봇을 기반으로 유기 광촉매 개발 시 10개의 실험변수에 대해 688번의 실험으로 성공적으로 신소재 개발 사례 보고 (Nature지, 2020년) <ul style="list-style-type: none"> - 10번의 실험변수에 대해 단순 자동화 실험을 진행할 경우 약 10¹⁰의 실험 필요 - 해당내용 ‘5.3. 기대효과 및 활용 방안’에 추가 설명함 	<p>250</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 3개 총괄과제의 연관성 및 최종적인 성과물에 대한 구체적인 제시가 부족하다고 판단됨. 각 총괄과제가 통합된 형태의 성과물에 대 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트연구실 사업 전체에 대한 성과목표를 세밀히 검토하여 내용을 보완함 <ul style="list-style-type: none"> - 3.5. 성과목표 및 지표 항목 추 	<p>216~217</p>

한 제시가 필요함	가	
○ 4장의 “효율적 과제 추진을 위한 제안”에서 3개 총괄과제의 연구계획 및 투자계획에 대한 타당한 논리의 보완이 필요함	○ 3개의 총괄과제별로 연구계획별 필요 전문가 및 주장비 구축 비용을 산출하여 관련 투자계획에 대한 설명 보완	222~228
○ 기존 사업과의 차별화가 소재개발 실험 자율화 측면이므로 차별화된 성과물 제시 필요	○ 소재 합성 및 물성평가 관점에서 스마트 실험실의 실험 재현성과 소재 개발 효율성 관점의 성과지표 추가 제시	216~217
○ 추가적인 미래형 로봇 추가 상세 기획이 본 최종보고서에 포함되는 것에 대해 검토가 필요함 (전체적인 기획보고서의 목표에 부합되지 않는 것으로 판단됨)	○ 본 연구기획은 지능형 로봇의 소재 응용 분야 (스마트연구실)를 주로 다루는 것을 목표로 하지만, 타응용 분야에 대한 상세기획도 수행하고 이를 하나의 chapter로 구성 - 해당내용은 과기부 요청 사항	-
○ 기획자문위원들이 주로 소재 합성 쪽 전문가로 구성이 되어있고, 스마트 연구실 연구를 위한 로봇 제작과 제어 기술, 인공지능 관련 전문가가 부족함.	○ 본 연구기획에는 KIST 내외 20여 명의 기획(자문)위원이 참여하였고, 이 중 소재 분야 전공자 10명, 로봇 및 인공지능 분야 전공자가 10여명 참여하였음 - 기획(자문)위원의 명단과 전공 리스트를 표1-1에 구체화 ○ 특히, 스마트연구실의 총괄과제3(실험자동화를 위한 AI로봇 기반 기술 개발)은 인공지능 및 로봇 전문가를 주축으로 기획됨	18
○ 데이터·AI·로봇 관련 전문가를 일부 참여시키거나, 별도 자문을 요청하여 관련된 국내산업과 연구 기반 시설 현황을 정확히 파악하여 향후 스마트 연구실 구축을 위해 실질적으로 필요한 요소 기술과 연구 인력에 대한 내용을 포함하는 것이 좋겠음	○ 3장의 스마트연구실 총괄과제 3개의 상세기획 시 해당과제의 요소기술 및 필요 전문가 부분의 내용을 기 도출하였음 - 총괄과제1: 3.2.7 항목 참고 - 총괄과제2: 3.3.7 항목 참고 - 총괄과제3: 3.4.7 항목 참고	98, 133~135 , 206~209