

극한분야 R&D 활성화 방안 수립연구 기획

(Study on the System and Research Strategy of Extreme Science)

연구기관 : 한국표준과학연구원

2018. 6. 5.

과 학 기 술 정 보 통 신 부

안 내 문

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

과학기술정보통신부 장관 유 영 민

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

본 보고서를 “극한분야 R&D 활성화 방안 수립연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 6. 5.

요약 보고서

1. 과제개요

가. 추진 배경

□ 국가 안보 기초 과학 연구

- 에너지 자원의 고갈, 우주항공개발을 통한 신산업 독점 및 안보 위협, 국민 안전을 위협하는 대기 및 환경오염, 첨단무기 개발 등을 대상으로 하는 극한연구는 국가안보 (에너지, 우주항공, 환경, 국방)와 직결되어 있음
- 선진국은 극한 기초과학을 지속 가능한 성장을 위한 국가 미래 성장 동력의 초석으로서 인식하고, 4차 산업혁명의 성공적인 대응과 국가 생존과 관련된 미래 신산업의 발굴이라는 측면에서 국가 주도하에 장기적으로 진행하고 있음
- 우리나라의 기초연구는 학계와 산업계 발전을 위한 순수 및 목적성 기초연구로 나누나, 극한 연구와 관련이 되는 국가의 에너지안보, 환경안보, 우주항공안보, 국방 등과 같이 국가의 존립에 연관된 안보 기초연구를 수행하는 기초연구프로그램은 없음.

□ 국가의 학문적·기술적 뿌리 확보

- 우리나라는 막대한 연구개발 투자에도 불구하고 연구개발의 후발주자로 학문적, 기술적 종속상태에서 벗어나지 못했음
- 극한 연구는 과학적 발견의 신대륙으로써, 미래과학발전의 한 방향이므로 극한연구 활성화를 통해 first mover로서 학문적, 기술적 뿌리 확보가 필요함
- 극한 연구는 4차 산업 혁명에서 주요 주제 중의 하나인 Big data를 넘어, 보다 근본적인 Big measurement 시대를 적극적으로 준비할 필요가 있음.

(※ Big measurement는 하버드 대학의 Frans Spaepen 교수가 2018년 처음 제안한 것으로써, 자연의 본질을 근본적으로 해석하고, 활용하기 위해서는, 측정의 확장과 확대보다 신뢰성 있는 데이터를 확보하자는 개념으로, 새로운 물리적 현상 발견과 새로운 물리적 개념 발견을 예측하고 있으며, 현재의 측정 기술 문제로 발생한 제한적 정보인 Big data의 문제 해결과도 관련이 있음)

나. (가칭) 콜롬버스 프로젝트의 추진

- 미지의 과학적 발견 및 발명의 신대륙을 탐사하기 위한 극한 기초 연구기반과 청사진을 제공하는 본 극한R&D 활성화 기획을 (가칭) 콜롬버스 프로젝트로

명명함

다. 극한 연구의 정의 및 특징

□ 극한 연구의 정의

○ 극한 연구는 기존 연구와 달리

- 접근 불가능하였던 극한환경을 구현, 제어, 측정, 활용하는 연구
- 극한환경 신현상·신물질의 발견과 극한 신기술을 발명으로 독자적인 학문적, 기술적 뿌리를 확보하는 연구
- 4차 산업 혁명에 필요한 극한 요소기술 개발과 4차 산업혁명 이후에 다가올 Big Measurement 시대에 적극 대응하여 국가적 고부가가치 신산업을 견인하는 연구

□ 극한 연구의 특징

- 극한연구는 기존 산업화 기술군의 기초, 응용, 활용 연구와 같은 순차적인 발전 단계와는 달리, 발견이 선행되며, 동시다발적으로 진행되며,
 - ① **Grand Challenge and Discovery**: 극한환경 구현을 통한 새로운 도전이나 중대한 발견,
 - ② **Profound Understanding**: 신물질이나 신현상의 이해나 기구해석,
 - ③ **New Initiative**: 극한기술의 접목을 통해 새로운 연구 및 기술 분야 창출연구가 진행되는 특성이 있으며, 점진적 발전이 아니라 혁신적인 기술 점프를 동반하는 특성이 있음
- 항공우주, 국방, 에너지, 환경 등과 같은 국가안보 산업과 맞닿아 국가 간의 기술거래나 아웃소싱이 불가능한 분야이기 때문에 독자적인 연구개발 필요함
- 순수 기초 연구이면서 동시에 목적지향성 기초 연구임

라. 극한 R&D 활성화 기획연구의 정의

극한연구의 구체적인 성격과 특징을 파악하여, **국내 극한연구 활성화와 저변을 확대하고, 우리나라 미래의 독자적 학문·기술적 뿌리 확보, 21세기 신산업 창출에 기여하는** 중장기 극한연구 개발에 관한 청사진을 제시하는 연구임

마. 과제의 필요성

□ 과학 기술적 필요성

- 과학기술의 미개척 분야인 극한 연구는 새로운 발견과 발명의 신대륙이며, 인류 과학문명의 큰 진전과 혁신적인 변화를 가져올 신현상이나 신물질 발견의 가능성이 높아 노벨상 수상도 기대됨
- 극한화는 다가올 Big measurement 시대의 핵심 요소이면서, 4차 산업혁명의 초연결화, 초지능화와 더불어 미래과학기술 발전의 3대 필수 방향중 하나로써, 체계적인 연구개발 정책이 필요하며, 국가안보와 직결된 연구주제이기 때문에 지속성장을 위한 학문적, 기술적 뿌리의 독자적 확보 추구

□ 경제 산업적 필요성

- 극한현상/물질의 발견과 극한기술 발명의 스핀-오프를 통해 국방, 우주항공, 에너지, 환경 등의 국가안보와 직결된 고부가가치 신산업 트리거링이 가능함 (2011년도 OECD 우주경제보고서에서 우주연구개발의 경제효과를 투자대비 약 7-11배로 산정함)

□ 사회 문화적 필요성

- 4차 산업혁명 시기에는 막대한 에너지 수요가 발생하며, 고밀도 에너지 물질이나 기능성 신소재의 발견가능성이 큰 극한환경 연구가 시급함
- 에너지 분야의 고효율 극한기술 확보로 대규모 에너지 공급설비가 불필요하여 님비현상 (nimby)과 같은 국가, 사회적 문제를 해소할 수 있음

2. 국내외 극한연구개발 동향분석 및 시사점

가. 국외동향

□ 미국

- New Science & Discovery를 목표로 국가안보관련 극한연구를 국립연구소에서 미션으로 수행해 오고 있으며, 인프라와 지식/기술 축적과 기술전파, 협력연구의 코어 역할을 담당하고 있음. 특히, Big measurement라는 화두를 제시하여, New Science & Discovery로 과학계의 새로운 주도권 확보가 예상됨.

- 극한 구현 및 측정 기술 개발과 더불어 에너지 관련 극한 소재, 항공우주소재, 3D 금속 프린팅 소재, **국가안보 및 전략 소재 등 극한소재 연구**가 활발함
- NASA나 Oak Ridge 국립연구소는 부양 장치로 3000 도씨를 넘어서는 초고온 환경에서의 물질 구조를 실시간 관측하기 위하여 X-선 기반의 방사광 가속기나 중성자 가속기와 융합한 극한 인프라를 구축하였음

□ 중국

- 최근 기초과학에서의 **노벨상 수상**과 극한 관련 기술개발을 통한 **신산업 창출**을 목표로 극한 전문연구기관들을 설립, 투자를 확대하고 있음
 - 세계선도 연구역량 강화를 목표로 한 중국 과학기술 발전 중장기 계획 (16개 핵심사업으로 구성)에서 **다중극한연구소 사업 (SECUF)**을 4위에 선정하여(2014년) 시행 중에 있음
 - 연구인력 600명 규모의 **초고압연구소 (HPSTAR, 2012년)** 설립하여 극한연구투자로 **극한 장치 개발 산업을 촉진**시키고자 함

□ 일본

- **문부과학성**은 미래를 담당하는 과학기술 분야 중 하나로 **극한기술을 선정**하여 세부 분야별 연구개발을 진행 중에 있음
- 국제우주정거장에 설치된 정전기 부양장치 (ELF)를 운영하고 있는 JAXA는 지상 마이크로 중력환경에서의 초내열 금속의 용융연구를 진행하고 있으며, 방사광가속기인 Spring-8에서 실시간 원자 구조 측정을 성공한 바 있음
- **국립재료연구소 (NIMS)**는 1966년부터 **고온 크리프 물성 데이터베이스**를 축적해오고 있으며, 1000기 이상의 크리프 시험기를 운영하고 있음

□ 유럽연합

- EU 8개국이 공동으로 첨단산업에 필요한 탄소 결합물질, 초강도 물질 개발, 항공(우주)산업 및 기간산업에 요구되는 신소재 개발에 대한 연구 (ULTMAT program)를 추진 중에 있음.
- 유럽항공우주국 (ESA)은 ThermoLab 프로젝트를 통해 **국제우주정거장에서의 신소재 연구**와 함께 다수의 소규모 Topical team을 운영하고 있음
- EU는 ^3He 초유체 연구 프로젝트를 통해서 mK 이하의 극저온을 구현할 수 있게 되었고, 극저온 공동 설비인 **European Microkelvin Platform**을 저온과학 연구자들이 공동 활용할 수 있도록 지원하고 있음

나. 국내동향

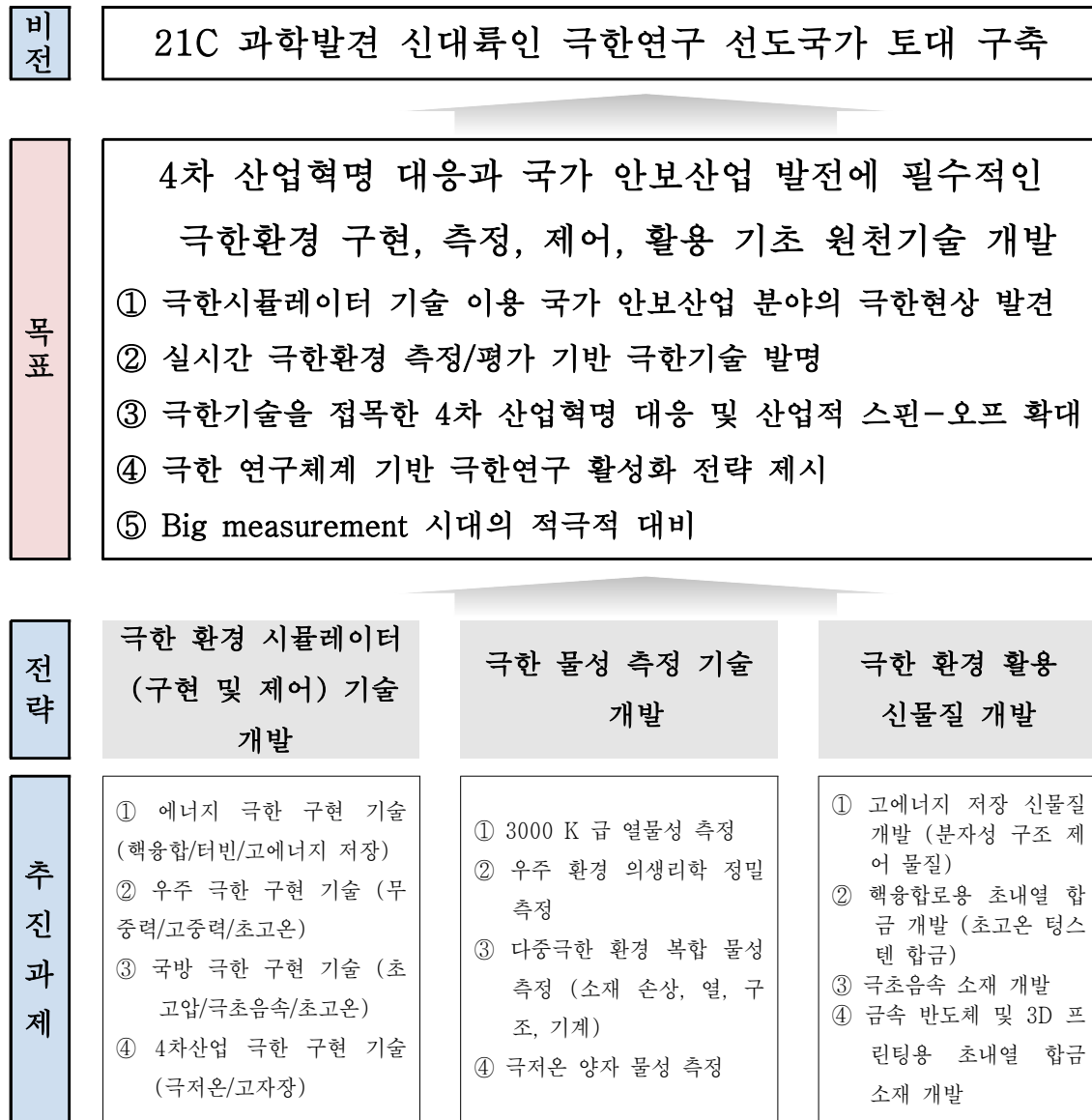
- 80년대 후반부터 극한 연구개발에 대한 국가적 차원의 필요성 제기로 수차례의 기획이 있었으나, 장기적인 추진 여건은 형성되지 못했음
- 국가기간산업과 기초원천기술의 확보라는 극한기획의 초기 의도와 달리 민간 산업의 수요가 존재하는 지엽적인 요소기술 연구만 진행되어 광범위한 기반기술 개발은 이루어지지 않았기 때문임

다. 국내 극한연구에 대한 시사점

- 선진 극한연구시스템의 특징과 최근 극한 연구투자 확대
 - 선진국은 극한연구를 국가안보관련 미션을 부여받은 국립연구소를 중심으로 수행하며, 안보와 관련된 국가적 인프라, 지식, 기술의 축적, 추적, 전수가 중장기적으로 이루어짐
 - 중국은 2010년 이후에 막대한 극한연구 투자를 통해 단기간에 과학적 성과뿐 아니라 극한기술 및 장치 산업의 기반을 구축하고 있음
- 극한연구 부문의 first mover가 되기 위한 우리나라의 대응책
 - 우리나라는 시장중심 및 단기성과 도출에 집착한 나머지, 산업적 수요가 있는 소수의 극한요소기술을 제외한 국가안보와 연계된 포괄적인 극한연구 기반이 확보되지 못했음
 - 국가의 지속가능한 성장을 확보하기 위한 미래안보 기초원천기술을 확보하기 위해서는, 개인연구자 중심의 단기적, 비목적적 극한연구는 지양하고, 극한연구의 장기적 전략수립과 활성화 정책 마련이 시급함.
 - 국가안보를 목표로 하는 극한 기초연구를 장기적으로 끌어갈 컨트롤 타워 필요.

3. 사업목표 및 내용

가. 사업의 비전 및 목표



나. 사업의 범위

□ 극한의 개념적 분류

○ 개념적 분류에서 살펴본 극한연구 범위는

- 기존 기술로 '접근'과 '측정'이 불가능했던 미지의 영역을 연구함으로써, 새로운 물리적 현상과 신물질을 발견할 수 있는 영역
- 그리고 기존 기술로 '접근'가능하나, 과학적 신개념과 측정 영역의 획기적 확장이 이루어지는 영역임

○ 보다 구체적으로

- 접근 불가능 영역에는 환경적 극한 (구현)과 융합적 극한 (한계돌파)이 존재하며, 접근 가능 영역에는 개념적 극한 (이해, 발견)과 기술적 극한 (측정, 제어)이 존재함

○ 4차 산업혁명 이후에 다가올 Big Measurement 시대에 부합하는 영역임



□ 산업적 측면에서 살펴본 극한영역

- 아래 표와 같이 4차 산업혁명 연계, 에너지, 환경, 바이오, 항공우주, 국방 등의 분야로 극한기술을 나타내 볼 수 있음
- 언급된 산업들의 특성을 살펴보자면 국가 간 기술거래나 정보 공유 및 아웃소싱이 불가능한 국가안보과 직결된 분야들로서 독자적인 연구개발 및 정보의 확보가 필요한 연구영역임
- 극한 연구의 영역은 4차 산업혁명에 대응하는 분야와 4차 산업혁명 이후 (Beyond the 4th industrial revolution)에 발생할 연구영역으로 정의할 수 있음



다. 기대성과 및 파급효과

☐ 극한과학 분야 세계 선도를 위한 중장기 극한 연구방향 마련

- 국가 안보측면에서 가치/중요도가 높은 **중점 추진주제의 도출과 극한 연구플랫폼 발굴·육성·지원에 대한 전략적이고 중장기적인 방안 수립**
- 극한연구의 새로운 정의와 국가적인 중장기 로드맵에 근거한 **극한연구가 유기적으로 수행될 수 있는 연-학-산 네트워크 체계 확보**

☐ 새로운 학문적/기술적 뿌리 확보를 통한 국가 과학기술의 위상 제고

- 종래 연구 패러다임을 획기적으로 전환한 한국형 극한연구시스템 모델 구축으로 **선진국형 연구문화 기반조성** (Grand Challenge and Discovery, Profound Understanding, New Initiative)
- 새로운 과학적 발견과 발명의 신대륙이라 할 수 있는 극한환경의 구현과 활용을 통한 **신학문, 신기술 분야의 확보 및 현재의 추종적 연구시스템을 탈피하여 새로운 분야의 선도자로 자리매김함**
- Big Measurement 시대의 과학적 주도권 확보

☐ 인류의 활동 영역 확장과 지속 성장을 위한 21세기형 첨단산업 기반 구축

- 에너지, 환경, 국방, 항공우주, 소재, 바이오 분야에 필요한 **극한 기반 지식 확충과 신기술 개발로 미래 안보산업을 트리거링함**

- 극한연구의 특수성을 고려한 국가차원의 스핀-오프 체계 구축과 함께 극한 요소기술을 접목한 4차 산업혁명 대응기술의 개발을 통해 과학 패러다임 전환기의 새로운 화두를 선점함

4. 사업추진의 당위성

가. 사업추진의 시의성

- 과학기술 발전의 포화기에 미개척인 극한 영역의 혁신적 연구접근을 통해 새로운 학문적, 기술적 뿌리를 확보해야 할 시기임
- 최근 해외 극한연구 규모의 급격한 확대와 함께 국가 안보 산업과 직결된 극한 기초연구의 중요성으로 지속가능한 형태의 극한연구체계 확보 시급
- 2018년에 제기된 새로운 화두인 Big Measurement 시대의 선제적 대응 시급.

나. 정부지원의 필요성

- 극한연구는 국가 안보산업 (에너지, 항공우주, 환경, 국방)과 직결된 분야이기 때문에 국가주도의 중장기적인 연구개발과 연구시스템 확충이 필요함
- 국가 간 기술이전이나 거래가 불가능하고, 국가의 존립에 직결된 분야이기 때문에 극한연구는 장기적인 지식의 축적과 기술의 추적이 가능하며, 국가 안보기술 개발을 미션으로 하는 국가연구소에서 추진할 필요가 있음
- 극한환경의 구현과 극한현상 및 극한기술의 발견과 발명으로 시작되는 극한연구는 산업화가 진행된 종래 기술에 비해 기술개발 사이클이 길고, 기초기반의 성격이 짙으며, 신산업 트리거링과 같은 후방효과는 매우 클 것으로 판단되기 때문에 초기 연구개발은 국가 주도로 진행할 필요가 있음

다. 타사업과의 차별성

- 소규모 개인기초연구로 좁은 범위의 극한 요소기술에 관한 연구가 진행되고 있으나 가시적 성과나 극한지식의 축적을 기대할 수준은 아님
- 항공우주, 핵융합, 원자력 연구개발을 미션으로 하는 출연연은 산업적 수요와 목적형 개발 사업에 치중하여 극한환경의 기초원천기술 연구 (국가안보 목적형 기초원천연구)는 미비한 실정임

5. 중점추진과제 도출

가. 도출과정

□ 후보과제 선정 및 중점 추진과제 도출 절차

단계	주요내용
극한 기획 위원회 구성·운영	○ 자문위원회 - 기술전문가 14명(산·학·연 및 정책전문가) ○ 세부기획위원회 - 5개 기술분야, 기술전문가 41명 - 초고온/초고압, 무중력/고중력, 극저온, 극한소재, 극한바이오 분야
극한연구 인식 설문조사	○ 극한연구 활성화 토론회 개최 ○ 극한연구 수요 및 인식 설문조사 - 극한바이오 등 수요가 큰 5개 분야 선정
극한연구 후보과제 구성(82개)	○ 극한관련 산학연 전문가 대상으로 극한기술 수요조사 실시 - 82개 기술수요제안서 접수 (연구계: 53, 학계: 29) - 극한분야, 극한성, 중복성, 차별성 등의 분석을 통한 후보과제 스크리닝
세부기획 과제 선정(5개)	○ 제2차 총괄위원회 ('18. 2. 28.) - 사업취지와 부합성 및 유사기술 그룹핑을 통하여 5개 과제로 통합·선정
세부분과별 기획추진	○ 과제별 세부기획위원회 구성·운영 - 5개 과제 세부기획 보고서 및 추진계획 도출 - 각 분과별 극한연구 추진체계 기획

나. 추진과제 개요

유형	과제명	극한분야
연구단	초고온-초고압 극한환경 구현/응용기술 개발	초고온-초고압
	중력제어 지상플랫폼 및 측정기술 개발	무중력-고중력
	다중실험용 고자기장-극저온 통합시스템 개발	극저온
	초고온-초음속 다중극한환경 대응 초내삭마 소재 개발	극한소재
	무중력 환경 활용 장기유사조직배양 기술 개발 및 종양 내 항암제 전달 영향 연구	극한바이오

6. 사업추진 체계 및 전략

가. 추진체계

□ 사업추진체계

- 극한 연구는 국가안보 기초과학과 국가의 학문적·기술적 뿌리를 확보, 그리고 국가의 미래 신산업 창출의 토대를 마련하는 중요한 분야임
 - 국가간 정보교류와 기술이전이 어렵고, 막대한 예산과 장기적으로 추적 가능한 지식 및 기술 축적이 필수적인 분야이기 때문에 지속적 기술 개발 및 지식 전수를 위한 인력양성이 필요함
 - 극한 연구를 활성화하기 위해서는 정부주도하에 극한 연구를 목적적 미션으로 수행할 수 있으며, 장기적이며 전략적으로 분야 육성과, 관련 지식 및 기술의 독자적 확립을 위한 사업추진 체계 및 전략이 필요함.
 - 부처내 극한연구 담당과를 신설하여 장기적이며 전략적으로 극한 연구분야를 육성하여야 하며, 다음의 두 가지 연구단과 목적형 극한 기초원천 연구를 담당할 조직과 전문관리기관으로 구성되는 추진 체계 필요.
 - － 부처 내 극한연구 담당과
 - － 극한 인프라 연구단
 - － 극한 활성화 전략 기획단
 - － 전문관리기관
- ※ 극한 인프라 연구단은 연구사업의 시의성이나 국가 안보 기초과학의 밀접성을 고려하여 4개의 연구단으로 구성하며, 다중극한 측정 연구단 (초고온/초고압), 중력 극한연구단 (무중력), 양자 극한연구단 (극저온), 첨단 전략 극한소재연구단 (극한소재) 이며, 극한 연구를 미션으로 수행하면서, 협동 연구기관 및 대학과의 유기적 연계를 통해 극한 관련 연구를 지원할 수 있는 거점 연구단 임.

<<사업추진체계도>>



나. 추진전략

- 극한 연구 활성화를 통해 극한 연구의 전략적 목표 달성과 극한 연구의 다양성, 우연성, 도전성을 확보할 수 있도록 다음의 네 가지 전략방안을 제시함.
- － 극한 인프라 조기 구축
- － 허브연구소 중심의 극한 연구 네트워크 구축
- － 국가 안보 극한 기초연구 방향 설정
- － 지속가능한 극한 연구 생태계 조성



목 차

(요 약)	i-xii
1. 과제 개요	1
가. 추진배경	1
나. (가칭) 콜롬버스 프로젝트의 추진	5
다. 극한연구의 정의 및 특징	6
라. 극한 R&D 활성화 기획연구의 정의	7
마. 과제의 필요성	7
2. 국내외 극한연구개발 동향분석 및 시사점	15
가. 국외동향	15
나. 국내동향	23
다. 국내 극한연구에 대한 시사점	24
3. 사업목표 및 내용	27
가. 사업의 비전 및 목표	27
나. 사업의 범위	27
다. 기대성과 및 파급효과	33
4. 사업추진의 당위성	36
가. 사업추진의 시의성	36
나. 정부지원의 필요성	37
다. 타 사업과의 차별성	38
5. 중점추진과제 도출	41
가. 도출과정	41
나. 추진과제 개요	44
6. 사업추진 체계 및 전략	57

가. 추진체계	57
나. 추진전략	60
7. 맺음말	65
(붙임자료)	68
붙임 1. 기획자문위원회 명단	68
붙임 2. 과제 세부기획 자료	69
붙임 3. 극한연구인식 설문항목 및 결과	198
붙임 4. 기술수요조사 안내문 및 결과	201
붙임 5. 중점추진과제 수요제안서 (RFP)	208
붙임 6. 특허동향 조사보고서	216



1. 과제개요

가. 추진배경

나. (가칭)콜롬버스 프로젝트의 추진

다. 극한연구의 정의 및 특징

라. 극한 R&D 활성화 기획연구의 정의

마. 과제의 필요성

1. 과제 개요 (추진 배경/정의/필요성)

가. 추진 배경

과학적 발견과 발명의 신대륙인 극한연구는 4차 산업혁명 이후 (Big measurement 시대) 성장 동력이자 국가안보와 직결되어 있으며, 우리나라의 과학적, 기술적 뿌리 확보가 가능한 분야임

- 에너지, 우주항공, 환경, 국방은 21세기 첨단 기간산업이며, 종래 기술종속에서 벗어나 극한연구 부문의 선도자로 자리매김해야 함

■ 국가 안보를 위한 극한과학 연구

- 인류는 지속가능한 성장을 위해, 우주, 심해, 극지, 지구심부, 행성 등 시공간의 제약을 뛰어넘는 극한 환경으로 활동영역을 확장하고 있으므로, 이에 필요한 21세기 첨단 안보산업인 에너지, 우주항공, 환경, 국방 등에 역량을 집중하고 있음.
- 화석 연료의 고갈, 에너지 자원의 무기화, 우주개발을 통한 신산업 독점 및 안보 위협, 국민안전을 위협하는 대기 및 환경오염, 첨단 무기 개발에 따른 국가 간 새로운 질서 재편 등은 관련 극한연구가 산업 뿐 아니라, 국가적 안보와 직접 관련됨을 의미하며, 이들 문제의 해결은 종래 기초연구와 다른 새로운 접근이 요구되며, 우주, 심해, 극지, 지구심부, 행성 등의 극한 환경 연구를 통해 해결하고자 세계 각국에서 노력하고 있음.
- 예를 들어, 초고온 환경에서의 전력 생산을 통한 환경오염 감소, 핵융합 발전을 통한 지속적 에너지 공급 및 상용화, 달 및 행성 탐사를 통한 새로운 에너지원 개발, 초음속 미사일 또는 비행체 개발, 스페이스 X 프로젝트 등은 각국에서 극한 환경 모사 활용, 극한 접근 기술 개발, 극한 환경 활용 기술 개발 등의 다양한 노력을 보여주는 사례임.
- 따라서, 극한 환경과 관련된 이들 분야는 산업적 의미 뿐 아니라, 선진국은 극한 기초과학을 지속 가능한 성장을 위한 국가 미래 성장 동력의 초석으로서 인식하고, 4차 산업혁명의 성공적인 대응과 국가 생존과 관련된 미래 신

산업의 발굴이라는 측면에서 국가 주도하에 장기적으로 진행하고 있음

- 최근, 중국의 유인 우주선 발사, 우주정거장 개발 등은 관련 기초연구가 국가 주도하에 진행되어 왔으며, 미국의 스페이스 X 프로젝트처럼 향후 우주여행산업의 초석을 독자적으로 마련한 것임.
- 그러나 우리나라의 기초 과학 연구는 산업을 지원하는 측면에서 대학을 중심으로 진행되어 왔으나, 이제 극한 관련 기초과학이 국가 안보와 관련된 새로운 미래 산업에 관련된 분야로써 인식하고, 4차 산업혁명의 성공적인 대응과 국가 생존과 관련된 미래 신산업의 발굴이라는 측면에서 극한 기초과학 연구개발을 정부 주도하에 장기적으로 진행해야 할 필요성이 있음.
- 우리나라의 기초연구는 학계와 산업계 발전을 위한 순수 및 목적성 기초연구로 나누나, 극한 연구와 관련이 되는 국가의 에너지안보, 환경안보, 우주항공안보, 국방 등 국가의 존립에 연관된 안보 기초연구를 수행하는 기초 연구 프로그램은 없음.

■ 국가의 학문적·기술적 뿌리 확보

- 우리나라는 GDP 대비 연구개발 투자비가 전 세계 2위임에도 불구하고, 아직도 대부분의 학문적, 기술적 성과의 원천을 발굴하고 있지 못함. 이것은 서구 과학문명을 따라가는 후발주자로서 연구개발 투자가 이루어져 왔기 때문임. 이러한 학문적 기술적 종속 상태에서 벗어나지 못하므로 노벨상 수상의 한계가 있는 것임.
- 학문적 기술적 독립을 이루기 위해서는 후발주자가 아니라, 선도자 (first mover)로서 연구개발을 시도해야 하며, 과학발전의 역사에서도 극한의 구현, 접근, 제어, 활용이 새로운 학문과 기술문명을 이끌었고 선도자의 입지를 공고화하는 역할을 보여왔음.
- 또한 기존 일반환경에서의 새로운 연구주제 도출 한계를 극복하기 위해 현재는 초연결화, 초지능화로 연구가 진행되고 있으나, 미래과학 발전방향의 주요한 축인 극한화는 현재 구체적으로 인식되지 않았음.

* 극한화의 역할과 과학발전의 예시

1. 철의 제련과 고온 고압 제어 가능: 고온 환경 구현, 제어기술, 전기발생이 가능했던

고온 고압의 구현 및 제어가 가능한 증기기관 발명 등은 철기문명의 도래나 근대 산업혁명을 촉발시켰던 극한 환경 구현의 사례임.

2. **초미세, 초정밀 제어기술:** 크기 및 진공 극한을 구현 및 제어하여 오늘날의 전자, 반도체 기술혁명을 거쳐 인류의 과학문명은 새로운 도약이 필요한 시기로 이끌었음.
3. 오늘날 4차 산업에 필요한 양자컴퓨터, 인공지능, 로봇, 금속 3D 프린팅, 빅데이터 산업등의 초지능 혹은 초연결이 성공하기 위해서는 새로운 에너지원과 다양한 물성 정보를 필요로 하며, 이는 **복합 다중 극한 환경을 극복함**으로써 달성될 것으로 예상함.



- 극한연구는 인류 과학문명 발전의 역사와 함께 동반되어 왔으며, 각 시대에 있어서 과학적, 기술적 한계를 돌파하는 중요한 요소이며, 극한 환경은 **과학적 발전의 신대륙** 역할을 해왔음.

*** 극한화와 신발견: 과학 발전의 패러다임**

- 과학발전 패러다임에서 볼 수 있는 것처럼 20C 반도체, 나노 기술혁명은 18, 19C에 있었던 크기, 속도, 온도 등의 다양한 극한 현상 발견과 이해에 기반하여 발생함 (양자론, 상대론, 반도체, 초전도체).
- 현대기술은 18, 19C에 이뤄졌던 극한 발견과 발명의 다양한 활용과 응용을 통해 폭발적으로 산업적 산물을 쏟아냈으며 현재 시점에 포화기에 도달하였고, 인류문명의 새로운 도약을 위해서 신발견 혹은 신과학의 시기가 도래하였음
- 현재 시점에서 새로운 과학기술적 발견과 발명은 인류가 경험해 왔던 과거나 현재의 보편적인 환경에서 더 이상 일어날 수 없고, 21세기를 위한 신발견은 **우주, 행성, 지구심부, 극지와 같은 극한환경에서 발생할 가능성이 높음.**



- 극한 연구는 4차 산업 혁명의 주요 주제인 Big data를 넘어, 보다 근본적인 Big measurement 시대를 적극적으로 준비할 필요가 있음.

※ Big measurement는 하버드 대학의 Frans Spaepen 교수가 2018년 처음 제안한 것으로써, 자연의 본질을 근본적으로 해석하고, 활용하기 위해서는, 측정의 확장과 확대보다 신뢰성 있는 데이터를 확보하자는 개념으로, 새로운 물리적 현상 발견과 새로운 물리적 개념 발견을 예측하고 있으며, 현재의 측정 기술 문제로 발생한 제한적 정보인 Big data의 문제 해결과도 관련이 있음

나. (가칭) 콜롬버스 프로젝트의 추진

■ 미지의 과학적 발견 및 발명의 신대륙을 탐사하기 위한 극한 기초 연구기반과 청사진을 제공하는 본 극한R&D 활성화 기획을 (가칭) 콜롬버스 프로젝트로 명명함

- 콜롬버스 프로젝트 내에 허브연구소 중심의 연구체계 확보, 극한현상의 발견, 극한기술의 발명, 극한요소기술을 접목한 스핀-오프를 포함하는 방대한 규모의 극한연구 청사진이 제시됨



다. 극한 연구의 정의 및 특징

극한 연구는 종래 접근이 불가능했던 미지의 극한환경 구현을 통해 미증유의 극한현상의 발견과 극한기술을 발명하는 연구임

- 국가안보와 연계되어 독자적 기술개발이 불가피한 특성을 가지며, 새로운 현상·물질의 발견, 기구이해, 신산업 창출이 가능함

■ 극한 연구의 정의

극한 연구는 기존의 일반환경에서 진행되는 연구와 달리

- 기존 기술로는 접근 불가능한 미지의 극한 환경을 구현, 제어, 측정, 활용하는 연구
- 극한 환경 신현상·신물질의 발견과 극한 신기술 발명으로 독자적인 학문적, 기술적 뿌리를 확보하는 연구
- 4차 산업 혁명에 필요한 극한 요소 기술 개발과 4차 산업혁명 이후에 다가올 Big Measurement 시대에 적극 대응하여 국가적 고부가가치 신산업을 견인하는 연구

■ 극한 연구의 특징

- 극한연구는 기존 산업화 기술군의 기초, 응용, 활용 연구와 같은 순차적인 발전 단계와는 달리, 발견이 선행되며, 동시다발적으로 진행되며,

- ① **Grand Challenge and Discovery**: 극한환경 구현을 통한 새로운 도전이나 중대한 발견,
- ② **Profound Understanding**: 신물질이나 신현상의 이해나 기구해석,
- ③ **New Initiative**: 극한기술의 접목을 통해 새로운 연구 및 기술 분야 창출연구가 진행되는 특성이 있으며, 점진적 발전이 아니라 혁신적인 기술 점프를 동반하는 특성이 있음

- 산업적인 측면에서 극한연구는 항공우주, 국방, 에너지, 환경 등과 같은 국가 기간산업과 맞닿아 국가 안보와 관련되므로, 국가 간의 기술거래나 아웃소싱이 불가능한 분야이기 때문에 독자적인 연구개발 필요.
- 순수 기초 연구이면서 동시에 목적지향성 기초 연구임
- 이러한 독특한 특징으로 인해 여러 차례의 연구개발 시도에도 불구하고 선행 극한관련 연구의 경우 일부 응용연구와 산업화가 가능한 부분에서 구체적인

성과물들이 형성되었으나 극한연구 부문 전반에 걸친 저변의 확장이 전무한 실정임

라. 극한 R&D 활성화 기획연구의 정의

극한연구의 구체적인 성격과 특징을 파악하여, **국내 극한연구 활성화와 저변을 확대하고, 우리나라 미래의 독자적 학문·기술적 뿌리 확보, 21세기 신산업 창출에 기여하는** 중장기 극한연구 개발에 관한 청사진을 제시하는 연구임

마. 과제의 필요성

극한화는 미래과학기술의 주요 발전 방향이며, 극한연구는 인류 활동영역의 확장에 필요한 막대한 에너지원 수급, 독자적 학문적 기술적 뿌리 확보, 고부가가치의 신산업 트리거링의 측면에서 연구 수요가 큼

□ 과학기술적 필요성

- 극한화는 다가올 Big measurement 시대의 핵심요소이면서, 4차 산업혁명의 초연결화, 초지능화와 더불어 미래과학기술 발전의 3대 필수방향 중 하나로써, 체계적인 연구개발 정책이 필요함 (※ 미래과학기술의 정책방향 (물리학과 첨단기술 2006년))
 - － 제4회 과학기술예측조사 (2015~2035)에서는 3000 도씨의 초고온과 수십만기압의 초고압을 이용한 신물질 합성 기술 개발을 예측함.
- 인류사적으로 볼 때 콜럼버스의 신대륙 발견은 지구 구체설의 확립과 유럽-아메리카의 교류를 확대하였고, 감자, 옥수수, 금, 은의 풍부한 공급에 기반하여 유럽의 기아문제의 해결과 중앙집권적인 국가를 형성하는 기반이 되었고, 궁극적으로는 식민지 개척과 주식회사 및 산업혁명의 기반이 되는 등, 인류사

에 혁신적인 변화를 가져왔음.

- 이러한 관점에서 **과학기술의 미개척 분야인 극한 연구는 새로운 발견과 발명의 신대륙이며**, 인류 과학문명의 큰 진전과 혁신적인 변화를 가져올 것으로 기대함.

- **신물질 발견**: 과학기술적, 산업적 파급효과가 매우 큰 신기능성 물질(초고 밀도 에너지 저장용 분자성 물질, 상온초전도체, 금속 반도체, 원/분자 조립 신구조체)의 발견 가능성이 높음
- **노벨상**은 인류 문명발전에 기여가 큰 **새로운 과학적 발견과 발명에 수여** 되어 왔으며, **극한 환경은 새로운 발견과 발명의 가능성이 매우 높은 분야**로 **노벨상 수상 가능성이 높은 분야**임

- **인류는 지속가능한 성장을 위해 우주, 행성, 심지구, 심해, 극지 등 시공간의 제약을 뛰어넘는 극한환경으로 활동영역을 확장하고** 있으며, 관련 산업의 성공을 위해서는 극한환경에 관한 연구가 선제적이고 필수적으로 진행되어야 함. 특히 극한연구는 4차 산업혁명과 연계된 여러 기술적인 한계 돌파를 가능케 할 뿐만 아니라 4차 산업혁명 이후에 새로운 과학기술 키워드로 거대 부가가치를 창출하는 **신산업 전인**의 실마리를 제공할 수 있음.

※ 우리나라의 2020년 달탐사 계획, 미국 나사의 화성탐사

※ 미국의 스페이스X 프로젝트는 2018년 일반인 우주관광을 계획, MIT와 록히드 마틴은 2025년까지 상용핵융합에너지 발전을 계획

- 보다 구체적으로 극한 연구는 21세기 국가과학기술의 핵심기반으로서, 에너지, 환경, 국방, 항공우주 등의 국가 안보와 직결되는 분야들로, 성과물의 **국가 간 공유나 기술이전은 불가할 뿐만 아니라 아웃소싱도 불가함**. 또한 우리나라 독자적 과학적, 기술적 뿌리를 확보를 위해서는 정부주도로 극한분야에 중장기적 연구개발과 기술자립이 필요함.

- 화석연료 및 저에너지 효율에 기인한 환경오염 및 미세먼지 문제 해결과 국가 안보와 직결되는 항공우주, 에너지 (핵융합발전), 국방 기술 개발, 4차 산업혁명 대응은 수천 도씨, 수만 기압, 고 방사능, 극저온 등의 극한 환경 구현과 제어, 측정 기술과 극한 소재 개발이 요구됨
- 에너지/항공우주/국방 산업의 극한연구 성과물은 국가간 기술거래가 불가능하므로 중장기적 정부주도의 독자적 연구개발이 필요함

※ 2018년 러시아(아반가르드)와 인도(브라모스)는 극초음속 미사일 발사 성공

○ 우리나라도 현재 4차 산업혁명 대응과 21세기 신산업 창출을 위해 극한 연구 활성화 필요성이 지속적으로 제기되고 있음

－ 1985년 이후 극한연구에 지속적인 관심으로 기획이 다수 진행되었으나 극한연구가 갖는 원천적 발견/발명과 산업적 성과물 간의 괴리를 메우지 못한 관계로 일부의 요소기술을 제외하고는 극한 연구전반에 걸친 중장기적인 발전 청사진을 제시하지 못한 선례가 있음

※ 극한 기술 개발 (과기처, 1985년), 극한기술개발에 관한 연구조사 사업 (1994년, 과기처, KIST), 극한환경대응 융합원천기술 사업기획 (2010년, 교과부), 제1회 과학기술예측조사 (1995~2015): “3,000℃ 온도 및 열물성 측정기술 개발”, 제4회 과학기술예측조사(2015~2035):“섭씨 3000도 이상의 고온과 10만 기압 이상의 고압 환경을 이용 신물질개발 기술”, X-project 연구 기획 사업(2014년), IT 미래 기획단의 “미래전망 자료집 (2020년)”, 미래소재디스커버리사업 (2017).

□ 경제 산업적 필요성

○ 극한연구 개발의 결과물로서 극한현상/물질의 발견과 극한기술 발명의 스핀-오프를 통해 국방, 우주항공, 에너지, 환경 등의 국가안보와 직결된 신산업 트리거링은 물론 민간부문의 산업 활성화도 가능함

－ 극한요소기술의 융합은 고효율의 초고온 터빈발전이나 핵융합발전을 통해 미세먼지나 환경오염의 해결과, 극한환경 고에너지 물질이나 극초음속기 소재의 개발을 통해 에너지와 국방에 관련된 국가 안보현안의 기초원천기술을 제공할 수 있음

－ 아래 그림에서 살펴볼 수 있는 것처럼 미국 NASA는 1976년 이후 우주항공 관련 미션과 극한연구 개발을 통해서 발생한 기술을 민간부문으로 스핀-오프함으로써 투자 대비 7-11배의 막대한 경제적 부가가치를 형성하고 있음

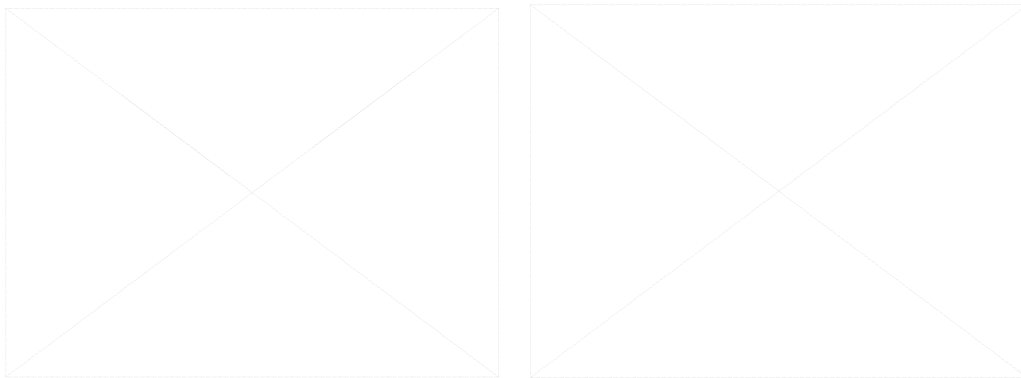
※ <https://spinoff.nasa.gov/> 사이트 참고



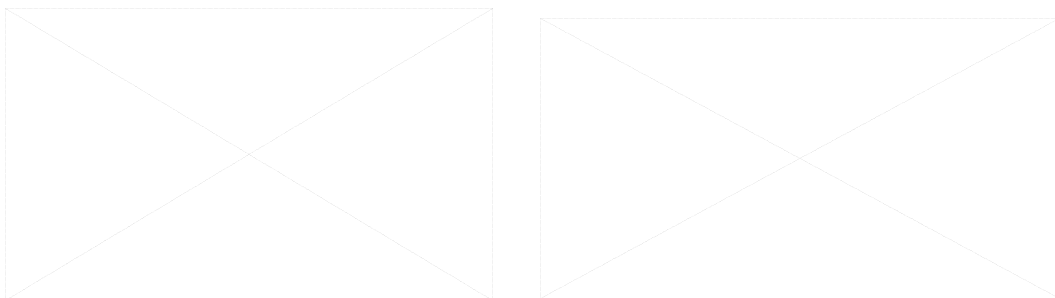
- 차세대 초내열 발전이나 미래 에너지원으로 판단되는 핵융합 발전의 경우 각각 1000, 3000 도씨에 육박하는 초고온 운용환경에서의 소재 물성이나 신뢰성 측정기술이나 데이터가 필수적이며, 관련된 극한기술의 발명과 측정 및 소재 기술 연구가 필요함.
 - － 핵융합 발전의 경우 1억 도씨 이상의 초고온 플라즈마를 안정적으로 가두고 효율적인 열교환을 통해 발전공정을 수행해야 되기 때문에 1차벽이나 디버터 소재를 3000 도씨까지 운용할 수 있는 텅스텐으로 바꾸려고 ITER (2015년)와 KSTAR (2017년)에서 계획하였으나 이들 소재의 **초고온에서의 구체적 열물성 측정이 없어서 곤란을 겪고 있음**
 - － 핵융합로에서는 텅스텐의 열피로 특성, 초고온에서의 기계강도 변화, 방사선에 의한 결함의 발생과 전파 등은 필수적으로 연구되어야 하며, 초고온 극한환경의 구현과 소재물성의 융합적인 측정에 대한 연구개발 필요성이 큼
- 미래학자 앨빈 토플러는‘부의 미래’에서 우주개발이 7-12배의 경제적 파급효과가 있음을 주장하였고, 2011년도 OECD 우주경제 분야 보고서에서도 우주활동으로 파생되는 직간접적인 경제효과가 투자대비 약 7-11배 정도임을 확인하였음.
 - － 우주항공 분야 극한연구의 가치는 새로운 발견과 같은 순수과학적 진보나

지구환경 황폐화에 대응하는 우주식민지 건설은 물론 NASA Technology Transfer와 같이 정부주도로 개발된 우주관련 극한기술을 민간영역으로 이전함으로써 부가가치를 발생시키는 것이 있음.

- 정부주도로 진행되던 우주개발에 관한 연구에 최근들어 스페이스 X나 구글과 같은 민간기업들이 참여하기 시작하였고, 각국 정부주도의 우주환경 극한연구는 제임스 웹 우주망원경이나 반사경 지름이 500 m에 육박하는 텐옌전과망원경, 거대 마젤란 망원경 등과 같이 보다 광범위하고 대규모로 진행되고 있음.



- 극한소재 분야의 경우 국방분야와 연계하여 극한연구의 필요성이 크게 부각되고 있으며, 한 사례로 최근 러시아는 신 냉전의 서막 일컬어지는 신형 슈퍼 무기 5종을 공개하였으며, 이들은 주로 서방의 미사일 방어체계를 무력화하기 위한 극초음속 기술이 채택되어 있음.



- 상업적 우주산업 시대 개막과 함께 국내에서도 국제경쟁력을 확보하기 위해 최근 수정된 제 3차 우주개발 진흥 기본계획을 수립하고 최종 목표로 소행성 귀환선 자력발사 기술을 확보하고자 함. 이를 위해서 우주항공 및 극초음속 체계 분야의 핵심 소재로서 2000°C 이상의 극한 환경에서 적용 가능한 초고

온 세라믹스 (Ultra-high temperature ceramics, UHTC) 관련 연구가 진행되고 있음. 또한 초음속 공력가열 환경(마하 5이상, 2,000 - 3,000 도씨 범위) 하에서의 시스템을 보호할 수 초고온 세라믹스 코팅 소재연구가 진행됨.

- 기존 가온온도를 뛰어넘는 극한 환경용 차세대 초내열합금이 개발되어 고온용 부품으로 적용하게 되면, 냉각을 실시하지 않거나 혹은 적은 냉각만으로 터빈 및 엔진 구동이 가능하고 효율을 극히 향상시킬 수 있음. 초내열 합금은 우주·항공 및 국방, 원자로 핵융합 분야에도 적용 가능하여 높은 출력과 함께 연비까지 우수한 항공기나 미사일 등의 개발이 가능하게 함.

- 녹는점 2000℃ 이상의 Mo, Nb, W, Ta 등의 고용점 금속 베이스 합금들과 metal-silicide composite 및 high entropy alloy 극한 고온용 합금에 대한 연구가 필요하며. 미국의 경우 NASA jet propulsion 연구소와 Oak Ridge 국립연구소 등 정부기관과 Lockheed Martin, Boeing IDS 등 군수업체 그리고 GE, P&W, Siemens-Westinghouse와 같은 민간기업과 연구를 수행하여 기술 개발을 주도하고 있음.

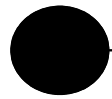
- 극저온 기기(펌프, 밸브류)가 대량 사용되고 있는 고부가 가치 선박인 LNG 선박의 수주량이 꾸준히 증가하고 있지만, 기본 재료의 국산화나 재료 및 부품 성능 평가에 대한 체계적 연구가 부족한 상태임. 따라서 현재 세계적 경쟁력을 갖춘 선박용 극저온 기기에 대한 재료 및 성능 평가 기반을 구축함으로써 국내 기술력 제고 및 기업의 제품 설계 및 수주 능력 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

□ 사회 문화적 필요성

- 21세기는 달 및 화성 탐사뿐만 아니라, 에너지 확보를 위한 지구 자원 탐사 등으로 극한 환경에 대한 인류 활동이 요구되고 있으며, 자연환경과 어울리면서도 보다 효율적인 생존 전력을 위해서 핵융합 발전과 같은 제어 가능한 극한 환경 활용의 길을 모색하고 있음.

- 스티븐 호킹은 100년 이내로 인류가 생활의 영역을 확장 시키지 못하면 인류 생존에 큰 위협이 생길 것이라고 예측을 했었고, 이미 SpaceX, Blue Origin, Stratolaunch System 등의 R&D 회사들은 추진체 개발 뿐만 아니라 화성의 정착/식민화 프로그램들에 박차를 가하고 있음.

- 핵융합 발전, 수소 에너지, 우주항공 등의 다양한 산업분야에서 고효율의 극한 환경 형성과 운용기술이 확보될 경우 도심 내 소규모 분산형 에너지 시스템의 운용을 통해 종래 님비현상 (nimby)으로 인해 국가, 사회적 문제를 유발해 왔던 도심 내 에너지설비, 송전시설 등의 건설에서 자유로울 수 있을 뿐만 아니라 정부의 관련 정책수행도 보다 원활할 수 있음.
- 4차 산업혁명의 시기에 기존의 기계화, 대량생산과 소비를 기반으로 한 제조업 뿐만 아니라 금융, 바이오, 유통, 엔터테인먼트 등 경제, 사회, 문화 전 분야에서 초연결화를 통한 융합이 이루어지면서 훨씬 많은 양의 에너지 및 자원을 요구하게 되며, 기존의 한계를 넘을 수 있는 극한환경에서의 에너지 물질이나 신소재에 관한 연구개발이 시급함



2. 국내외 동향

가. 국외동향

나. 국내동향

다. 국내 극한연구에 대한 시사점

2. 국내외 극한연구개발 동향분석 및 시사점

가. 국외동향

극한 연구를 정부주도로 수십 년간 지속해 오고 있으며, 빅데이터 활용, 초고온, 초고압 시스템의 방사광 가속기 융합과 국제우주정거장 설치를 통해 보다 고도의 극한환경 측정 연구를 시도하고 있음

- 특히 중국은 2010년대 들어 극한연구에 막대한 연구비 투자와 극한 관련 장치 산업을 활성화하고자 함 진행

□ 미국

- 극한 연구는 New Science and Discovery를 목표로 에너지, 국방, 우주와 관련된 국립연구소 (LLNL, LANL, NASA)에서 미션으로 수행해 오고 있음.
- 특히 Big measurement라는 화두를 제시하여, New Science & Discovery로 과학계의 새로운 주도권 확보가 예상됨.

※ LLNL: Lawrence Livermore National Lab., LANL: Los Alamos National Lab., SRNL: Savannah River National Lab., NASA: National Aeronautics and Space Administration, BNL: Brookhaven National Lab., NBNL: Lawrence Berkeley National Lab. 등

- 극한 구현 및 측정 기술 개발과 더불어 에너지 관련 극한 소재¹⁾, 항공우주소재²⁾, 3D 금속 프린팅 소재³⁾, 국가안보⁴⁾ 및 전략 소재⁵⁾ 등 극한 소재 연구가 활발함.

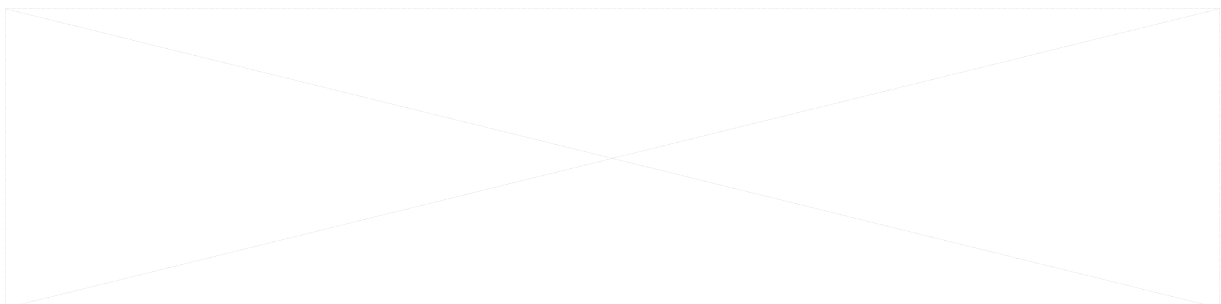
※ ¹⁾미국의 에너지국 (DOE) (Materials under extreme environments (BRN, DOE, 2007년)), ²⁾항공우주소재는 미공군 (AFRL) (Aerospace Materials for Extreme Environments Program Review (2017년)), ³⁾3D 금속프린팅 극한 소재(LLNL, LANL), HEMI(Hopkins Extreme Materials Institute)⁴⁾, CMI(Critical Materials Institute)⁵⁾

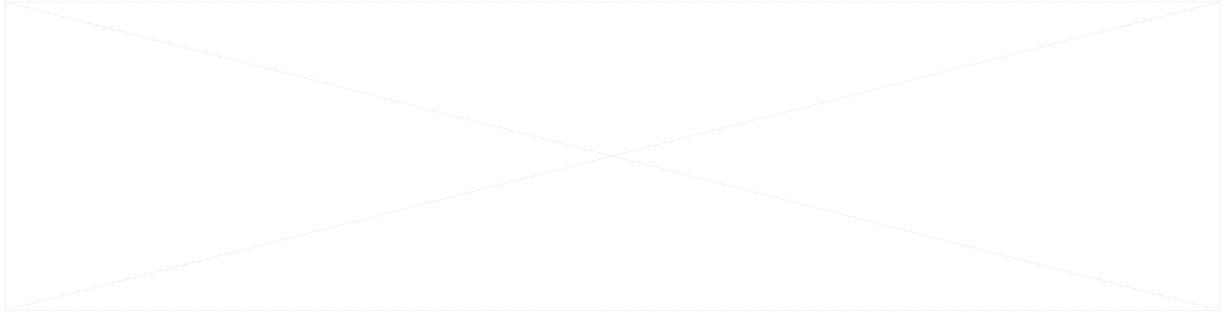
- 연방항공국 (FAA)에서 Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) Program을 통해 보잉, GE, 프랫 앤 휘트니, 롤스로이스, 하니웰 등 5개의 메이저 기업 주관으로 2015 - 2018 연간 총 2,500억 원 규모로 연구 개발을 수행 중에 있음

- 극한 소재 분야의 경우 AFLOW (Automatic-FLOW for Materials Discovery)와 같은 빅데이터 활용과 MGI (Materials Genome Initiative) 사업을 병행함으로써 소재개발 주기를 7년에서 2년 이하로 축소하는 연구를 활발히 수행하고 있음.

※ 4차 산업혁명을 위한 소재개발 혁신- 빅데이터의 활용, 이동현 저

- 초고압, 고에너지 연구 전문기관인 Lawrence Livermore 국립연구소는 국방/에너지와 관련된 국가의 극한연구를 기관 미션으로 수행하며, 극한연구 인프라와 지식/기술 축적과 극한관련 연구소나 대학으로의 기술전파와 협력연구의 코어 역할을 담당하고 있음.
- 초고압 분야는 다이아몬드 앤빌 셀 (DAC)를 이용하여 Mega-bar 규모의 초고압을 형성하는 것과 함께 국소 레이저로 시료를 가열하여 수천 K의 온도에도달함으로써 궁극적으로 지구내부의 환경을 모사하고, 이로부터 화산이나 지진의 메커니즘을 이해함은 물론 지구내심에서의 물질생성과정 등을 규명하는 연구가 포함되어 있음.
- Washington 대학교의 Carnegie 연구소는 레이저 가열이 가능한 다이아몬드 앤빌셀을 활용하여 5000 K, 100 GPa 수준의 초고온, 초고압 환경을 구현하였고, 이를 기반으로 극한환경에서의 고에너지 물질 합성에 대한 연구를 수행하고 있음.
- DAC 내부의 미소 시료에 대한 구조 측정을 위해서 실시간 회절 기술과 결맞음 X-선을 이용한 시간분해 연구 및 전기적/열적 물성 측정에 대한 연구가 진행되고 있으며, 각국의 방사광 가속기에서 초고압 연구를 위한 전용빔라인을 운용하고 있음.





- 초고온 금속 소재 연구의 활성화를 위해 에너지성은 정전기 부양장치 확산 프로젝트 (2007~2011년)를 진행한 바 있음



- 구체적으로 NASA나 Oak Ridge 국립연구소의 경우 정전기 부양이나 전자기 부양 장치를 이용하여 3000 도씨를 넘어서는 초고온 환경을 구현하고, 이 때의 물질 구조를 실시간 관측하기 위하여 X-선 기반의 방사광 가속기나 중성자가속기와 융합 시킨 장비를 구축하였음
- 미국 NASA, 유럽 ESA, 일본 JAXA, 러시아 FSA, 캐나다 CSA 회원국이 1998년부터 건설하여 현재까지 운영되고 있는 국제우주정거장(ISS)으로서 우주환경에서 인간의 생리, 생물학적 특성, 물리학적 특성, 지구/우주관측 등이 가능한 우주실험 플랫폼임

- 국제우주정거장의 무중력 환경을 이용한 우주실험의 경우 NASA, ESA, JAXA, CSA, ROSCOSMOS 등에서 추진하고 있으며, 650여 개의 우주 극한 연구 중에 절반이상이 생명공학 및 의생리학 분야의 주제임
 - 최근 유인 우주탐사의 관심이 높아지고, 우주인의 장기비행과 관련한 생명/의생리학 분야와 이와 관련된 기술검증 실험에 집중이 되고 있음을 나타냄
- NSF와 공군연구소 (AFOSR)에서는 초고온 재료의 연구 방향을 정립하기 위한 워크숍을 통해 초고온 재료로 비산화물계 세라믹의 경우 ZrB_2 , ZrC , HfB_2 , HfC , HfN , SiC 및 흑연 등을, 산화물계 세라믹은 $Y_3Al_5O_{12}$, 금속은 레늄을 포함시켰음
- Oak Ridge 국립연구소에서도 고온용 극한소재의 물성평가에 대한 연구를 수행 중이며, 특히 극한환경 구현을 위한 진공, 수소, 수증기, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 질소 분위기 등 다양한 가스환경에서의 크리프 물성 평가 설비에 대한 투자를 1970년대부터 지속적으로 수행해 오고 있음
- 공군연구소의 경우 세계 최초로 내화원소 고엔트로피 합금을 텅스텐, 니오븀, 몰리브덴, 탄탈륨을 용융하여 개발하였으며, 미국은 물론 중국과 러시아에서도 고온강도는 물론 경량화와 연성확보를 위하여 알루미늄, 티타늄, 실리콘과 같은 원소를 첨가한 새로운 합금 개발 연구를 추진하고 있음.
- 기존 Ni기 초내열합금을 뛰어넘는 면심입방기지를 갖는 Co-Al-W계 초내열합금이 연구되고 있으며, 고용합 합금을 형성하기 위하여 3,440°C 용점의 텅스텐을 비롯하여 3,200°C의 레늄, 3,000°C의 탄탈륨, 2,600°C의 몰리브덴, 2,500°C의 니오븀(Nb)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있음
- 2000년대에 초고온용 합금 개발을 위해 General Electric과 Air Force에서 주조용 Nb기 고온합금 개발을 진행한 바 있음

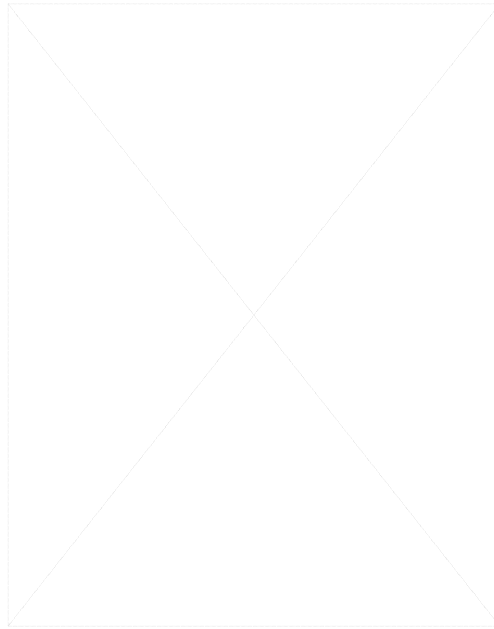


- Microcosm사는 공군연구소와 합작하여 극저온용 연료 저장용기를 탄소섬유 복합재료로 제작하였으며, 2005년 NASA는 XCOR Aerospace사와 함께 극저온 환경(10 K 이하)에서 사용 가능한 액화산소 저장용기를 개발한바 있음

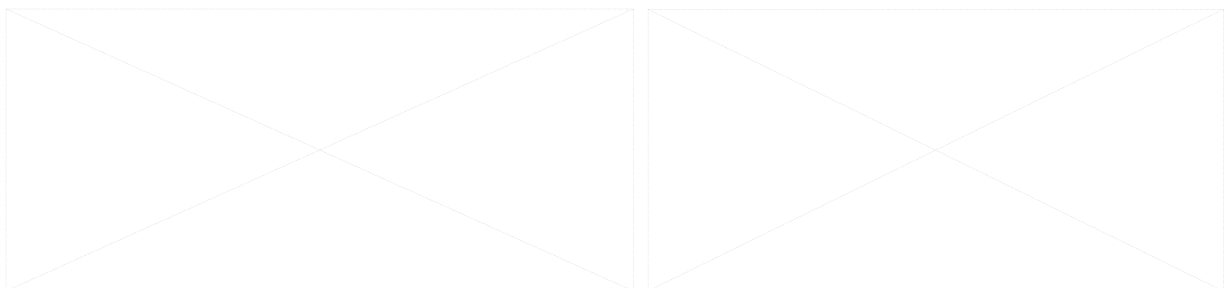


□ 중국

- 최근 기초과학에서의 **노벨상 수상**과 극한 관련 기술개발을 통한 **신산업 창출**을 목표로 극한 전문연구기관들을 설립, 투자를 확대하고 있음
 - － 세계선도 연구역량 강화를 목표로 한 중국 과학기술 발전 중장기 계획 (16개 핵심사업으로 구성)에서 **다중극한연구소 사업 (SECUF)**을 4위에 선정하여(2014년) 시행 중에 있음
 - － 연구인력 600명 규모의 **초고압연구소 (HPSTAR: Center for High Pressure Science & Technology Advanced Research, 2012년)** 설립
 - － 극한 과학 투자로 **극한 장치 개발 산업을 촉진시키고자 함**



- 텐궁 이후에 독자적인 우주정거장 플랫폼 건설을 수행 중에 있으며, 2023년까지 건설을 완료하고, 이를 유인 우주탐사 및 무중력 실험을 위한 플랫폼으로 활용할 계획임
- 국방분야에서 극초음속 활공체 (HGV)를 탑재한 탄도미사일 동평-17의 시험 발사에 성공하였으며, 이를 연구 개발한 고온기체동역학 국가중점실험실은 마하 35가 넘는 시속 4만 3200km에 이르는 HGV를 시험할 수 있는 풍동 시설을 건설하고 있음
 - 풍동 내부에 날개 길이가 3 m에 이르는 비행체를 장입할 수 있으며 최신 원자력 발전소의 발전량의 절반에 해당하는 1 GW의 에너지가 발생하며 비행체 표면온도는 7000 도씨를 넘어설 것으로 예상함



- Beijing 대학교를 중심으로 국방 분야의 관통자, 핵융합에서 내방사화 특성이 우수한 W과 Ta 및 초고온용 Nb기 고온합금에 대한 연구를 수행하고 있음.

□ 일본

- **문부과학성**은 미래를 담당하는 과학기술 분야 중 하나로 **극한기술**을 선정하여 세부 분야별 연구개발을 진행 중에 있음
 - ※ 2009년 STEPI 우주과학기술 분석자료
- 무중력 환경 모사 장치인 정전기 부양장치 개발로 2800 K 이상의 극한 소재의 물성 측정 기술에 독보적이며, 국제우주정거장의 일본 모듈인 KIBO에 부양장치 (ELF)를 설치하여 극한 소재를 연구하고 있음
- ELF의 구축과 운용책임을 맡고 있는 JAXA는 지상에서의 마이크로 중력환경을 구축하여 초내열 금속의 용융연구를 진행해 오고 있으며, 정전기 부양장치를 일본의 3세대 방사광가속기인 Spring-8에 설치하여 실시간 원자 구조 측정을 성공한 바 있음
- 최첨단 차세대 연구개발 지원 프로그램을 통해 궁극의 내열성을 가진 초고온 재료로 Mo-Si-B계 신합금 개발 연구를 진행하였음
- 국립 재료연구소 (NIMS)는 1966년부터 현재까지 고온 크리프 물성 데이터베이스를 축적해오고 있으며, 이를 위하여 1,000기 이상의 크리프 시험기를 운영하고 있음
 - 이러한 연구 인프라와 지속적인 투자를 바탕으로 다수의 100,000시간 (약 11년) 크리프 데이터를 확보하고 있으며, 2009년 보도자료에 따르면 1969년에 크리프 측정을 실시한 시편은 약 40년간 (348,310시간) 시험을 진행하고 있는 경우도 있음
- 2003년에 JAXA는 Kakuda 우주센터에 극저온 시험시설을 구축하고, 극저온용 2차구조물 복합재료를 이용한 극저온 연료탱크를 개발하였고 H-IIA 발사체에 장착하여 시험운행한 바 있음



(<http://www.nims.go.jp/eng/news/press/2009/06/p200906160.html>)

□ 유럽연합

- 주요 EU 8개국이 공동으로 첨단산업에 필요한 탄소 결합물질, 초강도 물질 개발, 항공(우주)산업 및 기간산업에 요구되는 신소재 개발에 대한 연구를 추진 중에 있음.
- 독일 DLR에서는 정전기, 전자기, 공력 등의 기구를 이용하는 다양한 초고온 환경을 구현할 수 있는 부양장치를 방사광가속기 (PETRA-III)와 융합하여 초고온 액체의 실시간 구조측정 등의 극한연구를 수행하고 있으며, 초고온 내열소재의 결정화 과정을 연구함으로써, 초고온 극한 환경에 놓이 터빈소재 개발과 물질의 형성의 근본메커니즘을 연구하고 있음.
- 프랑스에 위치한 유럽 방사광가속기 (ESRF)에서는 다수의 초고압용 빔라인들을 운용하고 있을 뿐만 아니라, 최근에는 4세대 가속기 (EURO-FEL)에 초고압용 다이아몬드 앤빌셀이나 동적 셀과 같이 초고압 환경을 구현할 수 있는 장치를 구축하였음
- 유럽항공우주국 (ESA)은 우주정거장에서의 신소재 개발을 위해서 ThermoLab project를 진행하였고, 지속적 연구를 위해 여러 개의 소규모의 Topical team을 운영하고 있음
- Ni기 초내열합금을 뛰어넘는 Nb, Mo기반의 차세대 소재를 개발하기 위해 독일, 오스트리아, 영국, 프랑스, 체코, 이탈리아를 중심으로 ULTMAT 프로그램을 수행한 바 있으며, 프랑스, 영국, 독일 기관을 중심으로 HYSOP 프로젝트에서는 초내열 소재의 인성향상이나 Nb-Si기 합금의 내산화, 내식성 향상에

관한 연구를 추진하였음

- 유럽우주개발기구 (ESA)는 CFRP 극저온 복합재 용기와 연결관을 제작하였으며, 오스트리아의 Magna Steyr사는 2004~2008년간 자동차용 수소저장 시스템 개발과 극저온 연료 저장용기를 개발한 바 있음
- 100여년 전 액체헬륨을 액화시키는 기술로부터 시작하여 3He-4He 희석식 냉동기술, 자기냉동기술 등으로 발전해 온 극저온 분야연구는 유럽과 미국 등의 선진국을 중심으로 냉동기술의 상업화가 진행되었음
- 3He의 초유체 연구를 위한 프로젝트를 통해서 mK 이하의 극저온을 구현할 수 있게 되었고, 유럽연합의 경우는 3He 프로젝트를 통해서 구축된 시설인 European Microkelvin Platform을 통해 저온과학 연구자들에게 공유하고 있음 (<http://empplatform.eu>)

나. 국내동향

80년대 이후 여러 회에 걸쳐 극한연구 수요의 확인과 기획이 진행되었으나 일부 산업적 수요가 연계된 극한요소기술 외에는 사장됨
- 국가안보와 연계된 극한 연구주제를 다룰 중장기적인, 기초연구 플랫폼 미비

- 80년대 후반부터 극한 연구개발에 대한 국가적 차원의 필요성 제기로 수차례의 기획이 있었으나, 장기적인 추진 여건은 형성되지 못했음
 - ※1988년도에 과기처 주관으로 극한연구 국책연구개발 사업단이 발족되었으나 1단계 연구추진 이후에 와해되었음
 - ※1994년도에 과기처 주관으로 “극한기술 개발에 관한 연구조사 사업”이 기획되었고, 2010년도에도 “극한환경 대응 융합원천기술 개발 기획 사업”이 추진되어 신기술 융합형 성장동력 사업에 일부 주제가 편성되어 연구가 추진됨
- 국가기간산업과 기초원천기술의 확보라는 극한기획의 초기 의도와 달리 민간 산업의 수요가 존재하는 지엽적인 요소기술 연구만 진행되어 광범위한 기반기

술 개발은 이루어지지 않았기 때문

□ 국내 극한관련 주요 연구집단과 연구동향

- 국내 중장기 **극한연구 프로그램은 없으며**, 개인 소규모 기초연구를 통해 일부 관련 연구 진행
- 초고온/초고압 분야는 표준연, 원자력연, 재료연을 필두로 일부 대학에서 3000 K 수준의 환경 구현연구를 진행하였음.
- 극한환경(원자로, 플라즈마) 노출 후 시료의 성능을 평가하는 연구는 진행되었으나, 실시간 정밀 물성 평가는 미미함.
- 극저온 분야의 경우 mK 범위의 기초, 양자현상을 발견/이해하는 연구가 주를 이루고, 산업적 수요에 대응하여 수 K 수준의 냉동기나 액화기술을 개발하는 과제도 존재함.
- 극한소재 분야의 경우 대다수의 경우 산업적 수요가 존재하는 아극한 영역(hypo-extreme, 온도의 경우 2000 도씨 미만)의 연구가 주를 이루었음.
- 우리나라도 1985년 이후 극한 연구에 지속적인 관심과 기획이 진행되었으나, 외국에 비해 연구 진척이 매우 미미함
- 현재 4차 산업혁명과 21세기 신산업 창출을 위해 극한 연구 활성화 필요성이 지속적으로 제기

※ 극한 기술 개발 (과기처, 1985년), 극한기술개발에 관한 연구조사 사업 (1994년, 과기처, KIST), 극한환경대응 융합원천기술 사업기획 (2010년, 교과부), 제1회 과학기술예측조사 (1995~2015): “3,000℃ 온도 및 열물성 측정기술 개발”, 제4회 과학기술예측조사(2015~2035):“섭씨 3000도 이상의 고온과 10만 기압 이상의 고압 환경을 이용 신물질개발 기술”, X-project 연구 기획 사업(2014년), IT 미래 기획단의 “미래전망 자료집 (2020년)”, 미래소재디스커버리사업 (2017).

다. 국내 극한연구에 대한 시사점

우리나라의 지속가능한 성장을 위한 미래 안보 기초원천기술 확보를 위해서는 극한연구개발 활성화를 통한 극한연구의 퍼스터 무버 (first mover)로 자리매김할 필요가 있음

□ 선진 극한연구시스템의 특징과 최근 극한 연구투자 확대

- 선진국은 극한연구를 미션을 부여받은 국립연구소를 중심으로 수행하며, 안보와 관련된 국가적 인프라, 지식, 기술의 축적, 추적, 전수가 중장기적으로 이루어짐
- 시장이 형성되어 있는 종래 산업적 수요에 의한 연구개발과 달리, 극한연구는 새로운 기초원천적인 국가 기간산업을 창출하는 특성이 있음
- 중국은 2010년 이후에 막대한 극한연구 투자를 통해 단기간에 과학적 성과뿐 아니라 극한기술 및 장치 산업의 기반을 구축하고 있음.

□ 극한연구 부문의 퍼스터 무버가 되기 위한 우리나라의 대응책

- 우리나라의 경우 시장 중심 및 단기성과 도출에 집착한 나머지, 민간산업의 수요가 존재하는 소수의 요소기술에 집중하여, 국가 안보와 관련된 (에너지, 환경, 항공우주, 국방 등) 포괄적인 극한연구 기반이 확보되지 못했음.
 - ※ 극한연구는“산업적 애로기술 해결”을 목표로 하는 상용화 과제와 달리 관련 산업, 시장, 인프라, 연구인력 등이 전반적으로 미흡하며, 개발된 극한기술이 상용화되기까지 수 십 년이 소요됨
 - ※ 우주항공에 관한 극한연구 전문집단인 미국 NASA의 경우 50년대부터 국가 주도의 극한연구를 추진하였고, 2010년대에 접어들어 민간부문(예를 들어 스페이스X)에서 스핀-오프 기술들의 상용화가 진행되고 있음
- 국내에서 여러 차례 극한기획이 진행됨에도 불구하고 연속성부재로 국가 미래 안보 및 산업 창출에 관한 극한연구 및 연구체계 확립, 인력양성, 관련 커뮤니티의 성장이 없었음. 따라서 국가안보를 목적으로 하는 극한 기초연구를 장기적으로 끌어갈 컨트롤 타워 필요.
- 따라서, 국가의 지속가능한 성장을 확보하기 위한 에너지, 환경, 우주항공, 국방 등의 미래 안보 기초원천기술을 확보하기 위해서는, 기존의 국내 소수 개인연구자 중심의 단기적, 비목적적 극한 연구는 지양하고, 국가의 미래 산업 창출과, 퍼스터무버 (first mover)로서의 독자적인 학문적 기술적 뿌리 확보를 위해서 극한연구의 장기적 전략 수립과 네트워크 구축과, 연구과제 발굴과 연구 지원 정책 등의 극한 연구 활성화 정책 마련이 시급함.



3. 사업목표 및 내용

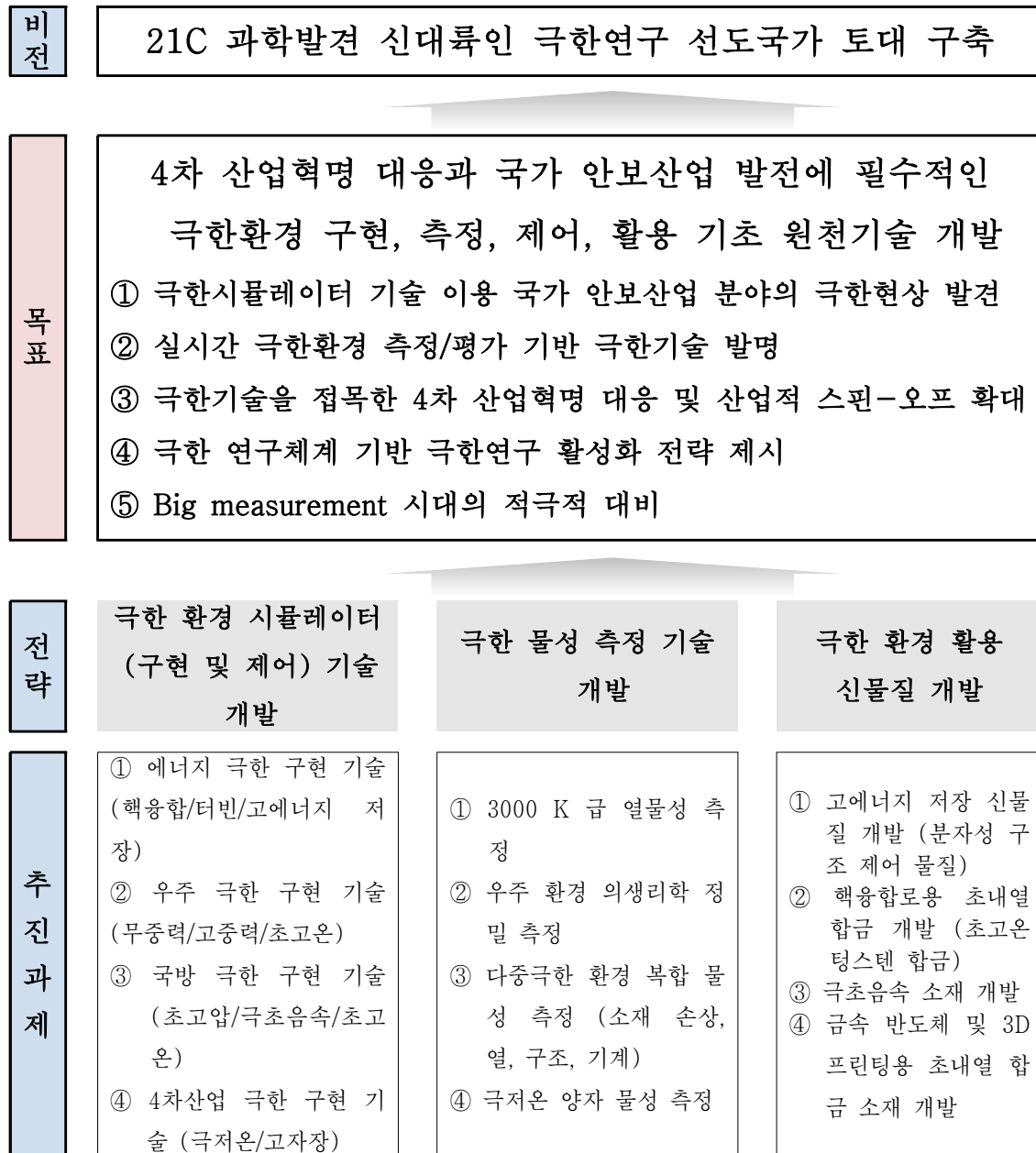
가. 사업의 비전 및 목표

나. 사업의 범위

다. 기대성과 및 파급효과

3. 사업목표 및 내용

가. 사업의 비전 및 목표



나. 사업의 범위

극한연구의 범위는 개념적 분류와 4차 산업혁명 키워드를 포함하는 산업발전의 측면에서 살펴볼 수 있었음

- 개념적 분류에서 환경적, 융합적, 개념적, 기술적 극한 분류 가능
- 산업적 측면에서 4차 산업혁명에 대응하는 아극한과 이후의 극한연구로 분류 가능

본 극한 R&D 활성화 기획 연구 사업은 극한 연구의 범위로 아래의 개념적 분류와 산업발전의 측면에서 범위를 고려하였음.

○ 극한연구 범위는 기존 기술로

- ‘접근’과 ‘측정’이 불가능하여, 인류가 접근 못했던 미지의 영역을 연구함으로써, 새로운 물리적 현상과 신물질을 발견할 수 있는 연구영역,
- 그리고 ‘접근’과 ‘측정’이 가능하나, 과학적 신개념과 측정 영역의 획기적 확장이 이루어지는 영역으로 정의함

- 환경적 극한 (구현)
- 융합적 극한 (한계돌파)
- 개념적 극한 (이해, 발견)
- 기술적 극한 (측정, 제어)

- 이러한 ‘접근’ 과 ‘측정’ 영역의 확장과 확대는 다가올 Big Measurement 시대에 매우 부합하는 개념임.



- 개념적 극한 (이해, 발견): 접근 가능하나 과학적 개념의 깊은 이해와 신개념 정립을 통해 인위적으로 구현할 수 있는 연구 영역으로써, 공간 및 시간 차원의 확장 및 축소, 존재하는 개념의 기술적 적용 및 변형을 바탕으로 하는 극한 영역임.
- 해당 예로써, 크기극한을 구현하는 초소형 고집적 소자 구현, 저전력 반도체 소자 구현, 초고속 연산 가능한 양자컴퓨팅, 무저항 초전도체, 무점성 초유체, 신개념 소재 발견 공정 (MGI), 무저항 금속반도체, 나노부품 등의 생산에 활용될 원/분자조립 기술 등이 있음.
- 환경적 극한 (구현): 개념적 극한과는 달리, 자연에 존재하나, 기존의 기술로 접근 불가능한 환경에 대한 연구 영역으로써, 극한 환경 구현 자체가 연구 대상인 영역임.
- 즉, 태양 표면, 지구 심부 압력, 우주 심부이하 온도, 무중력/고중력 등이 그 예임. 개념적 극한에서는 과학적 개념의 깊은 이해와 개념적 변형에 의한 새로운 발견이 가능했다면, 환경적 극한은 구현 자체로 새로운 현상을 발견할 가능성이 높은 영역임. 해당 예는, 화석연료나 종래의 휴대용 전원을 대체할 수 있는 초고온, 초고압 하에서 발생하는 고에너지밀도의 분자성 물질 (다이아몬드 구조의 질소가스 고형체, 폴리머상으로 고형화된 일탄화탄소, 금속수소) 임.

- **기술적 극한 (측정, 제어):** 기존 일반 환경의 측정 한계를 확장하는 극한 연구 영역으로써, 인류의 활동영역 확장에 따른 산업 발전의 문제를 해결하는 연구 영역임. 예를 들면, 미세먼지 등의 환경문제를 해결할 초고효율 터빈 내열소재나 핵융합 발전의 안정적인 운용을 담보할 3000 K 내열소재 개발 등이 있으며, 극한기술의 산업적 스핀-오프에서 직접적인 수요가 있는 극한소재 물성 데이터베이스 등이 포함됨.

- **융합적 극한 (한계돌파):** 기술적 극한을 적극적으로 뛰어 넘어, 실제 존재하는 다중극한환경(초고온, 초고압, 고자장, 극저온, 무중력 등등)을 실험실 수준에서 극한모사시스템 (extreme simulator) 으로 구현하는 연구영역으로써, 안정적으로 극한환경을 제어, 유지할 수 있도록 개발된 실험실 수준의 극한모사시스템은 새로운 극한현상이나 극한물질의 발견과 이해를 가능케 할 뿐만 아니라, 현재 수준의 기술적, 산업적 측정이나 제어능력을 새로운 극한영역으로 확장시키는 역할을 하게 됨. 이는 핵융합, 우주선 개발, 국방 등에 해당함.

○ 산업적 측면에서 극한영역을 살펴보면, 아래 그림과 같이 4차 산업혁명 연계, 에너지, 환경, 바이오, 항공우주, 국방 등의 분야로 극한기술을 나타내 볼 수 있음



- 특히 위에 언급된 산업들의 특성을 살펴보자면 국가 간 기술거래나 정보 공유 및 아웃소싱이 불가능한 국가안보와 직결된 분야들로서 독자적인 연구개발 및 정보의 확보가 필요한 연구영역임
 - 이러한 예시로 고밀도 에너지 저장용 신물질인 다이아몬드형 질소, 미세먼지 등의 환경문제를 해결할 초고효율 터빈 내열소재, 핵융합 발전의 안정적인 운용을 담보할 3000 K 내열소재 및 극한기술의 산업적 스핀-오프에서 직접적인 수요가 있는 극한소재 물성 데이터베이스 등이 포함됨
- 그리고 본 기획에서 정의되는 극한연구 영역은 기존 항공우주, 핵융합, 에너지소재, 국방 등의 R&D 사업과 극한적인 측면에서 차별성을 두드러지게 보이게 되는 연구영역으로 설정함
 - 궁극적으로 실제 극한환경을 보다 잘 모사할 수 있는 시스템이나 측정기술을 확보하는 것을 목표로 하나 현재의 미흡한 극한연구 상황에 비추어 단일 극한환경부터 최종목표치에 준하게 설정하였음
 - 구체적으로 본 기획에서는 극한연구 영역을 초고온/초고압, 무중력/고중력, 극저온(고자기장), 극한소재, 극한바이오의 영역으로 나누어 국내외 연구동향을 조사하고, 조기에 국내 극한연구 역량을 관련 선진국 수준으로 끌어올리거나 각 분야에서 선도적인 역할을 수행할 수 있게끔 하는 핵심 연구주제 및 연구체계의 발굴을 목표로 기획연구를 추진하였음



- 마지막으로, 극한 연구의 영역은 4차 산업혁명에 대응하는 분야와 4차 산업혁명 이후 (Beyond the 4th industrial revolution)에 발생할 연구영역으로 정의

할 수 있음.

- 인류 과학문명의 지속적인 성장과 발전을 위해서 현재 과학문명의 포화기를 돌파할 새로운 과학혁명의 수요가 급증하고 있으며, 초연결화와 초지능화를 주요 개념으로 하는 4차 산업혁명이 새로운 화두로 자리매김하기 시작하였음.

- 접근 가능하나 기존의 기술로 측정 할 수 없어, 연구 개발이 필요한 영역으로써, 가까운 미래에 폭발적 성장이 기대되는 최첨단 산업 영역으로서 4차 산업혁명의 화두들과 맞닿아 있는 분야임

※ 예를 들자면 미래에너지 공급의 중심이 될 핵융합 발전, 종래의 가공을 통한 제조 (cutting & machining)를 탈피하여 새로운 부품, 제품의 가공, 제조 기술 (additive machining)로 주목받고 있는 금속 3D 프린팅, 하루에 전 지구적인 여행을 가능케 하는 극초음속 여객기나 극초음속 로켓이나 미사일 기술의 기반이 되는 소재, 항공우주 관련 소재, 부품 기술이 포함됨

- 아래 그림과 같이 극한연구의 혁신적, 기술적 퀀텀점프 (quantum jump)의 결과로 획득되는 성과물이라기보다는 현재 기술적 한계를 점진적으로 돌파하는 과정에서 발생하는 산물이기 때문에 엄밀한 개념에서 본 극한연구 영역은 아극한 영역 (hypo-extreme regime)에 있다고 할 수 있음

- 일부 연구자들은 4차 산업혁명의 주요 화두로 “극한화”* 를 포함하는 경우도 있지만, 종래 과학기술적 성과물을 빅데이터로 활용하고 네트워크를 형성하여 보다 능동적으로 이용할 수 있게 하는 4차 산업혁명과 달리 극한연구는 인류의 활동영역 자체를 우주, 심지구와 같이 종래에 접근이 곤란하였던 영역으로 확장하는 것을 목표로 한다는 측면에서 4차 산업혁명의 이후에 발생할 연구영역으로 판단됨.

※ 미래과학기술의 정책방향 (물리학과 첨단기술 2006년)

- 결론적으로 극한 연구는 4차 산업혁명의 보다 확장된 모델로서의 기반을 제공할 것이며, 연구 영역의 개념으로 볼 때 다가올 Big Measurement 시대를 선제적으로 대비할 수 있을 것으로 판단함.



다. 기대성과 및 파급효과

극한과학 분야 세계 선도를 통해 학문적/기술적 뿌리를 확보하고, 21세기
형 신산업을 견인함

- 종래의 기술 종속을 탈피한 선진국형 극한연구시스템을 뿌리내리고,
극한 신기술 개발을 바탕으로 미래안보산업을 견인함

☐ 극한과학 분야 세계 선도를 위한 중장기 극한 연구방향 마련

- 국가 안보측면에서 가치/중요도가 높은 중점 추진주제의 도출과 극한 연구플랫폼 발굴·육성·지원에 대한 전략적이고 중장기적인 방안 수립
- 국가 안보산업과 직결된 극한 연구의 기술축적과 기술추적 가능성 및 영속성을 담보할 수 있는 연구체계 확보
- 극한연구의 새로운 정의와 국가적인 중장기 로드맵과 마일스톤에 근거한 극한연구가 유기적으로 수행될 수 있는 연-학-산 네트워크 체계 확보

☐ 새로운 학문적/기술적 뿌리 확보를 통한 국가 과학기술의 위상 제고

- 종래 연구 패러다임을 획기적으로 전환한 한국형 극한연구시스템 모델 구축으로 선진국형 연구문화 기반조성 (Grand Challenge and Discovery, Profound Understanding, New Initiative)
 - 새로운 과학적 발견과 발명의 신대륙이라 할 수 있는 극한환경의 구현과 활용을 통한 신학문, 신기술 분야의 확보 및 현재의 추종적 연구시스템을 탈피하여 새로운 분야의 선도자로 자리매김함
 - Big Measurement 시대의 과학적 주도권 확보
- 인류의 활동 영역 확장과 지속 성장을 위한 21세기형 첨단산업 기반 구축
- 에너지, 환경, 국방, 항공우주, 소재, 바이오 분야에 필요한 기반 지식 확충과 신기술 개발로 미래 안보산업을 트리거링 함.
 - 극한연구의 특수성을 고려한 국가차원의 스핀-오프 체계 구축과 함께 극한요소기술을 접목한 4차 산업혁명 대응기술의 개발을 통해 과학 패러다임 전환기의 새로운 화두를 선점함
- 극한연구의 산업적 예상 성과
- 신개념 배터리 (금속수소, 다이아몬드형 질소)
 - 지속 가능한 소규모 핵융합로
 - 신개념 반도체 (금속 반도체)
 - 극초음속기 개발
 - 3D 금속 프린팅 정밀 제어
 - 중력제어 난치병 치료제
 - 환경오염 및 미세먼지 저감 초내열 터빈 개발
 - 다중극한을 이용한 신기능성 소재 개발
 - 항공우주용 엔진 독자 개발



4. 사업추진의 당위성

- 가. 사업추진의 시의성
- 나. 정부지원의 필요성
- 다. 타 사업과의 차별성

4. 사업추진의 당위성

가. 사업추진의 시의성

4차 산업혁명이 주요 키워드로 부상하고, 후속 연구주제로 관련 선진국에서 극한연구에 대한 관심이 확대되고 있는 시점에 극한연구 분야의 선도자 역할을 하기 위한 능동적이고, 혁신적인 연구접근이 시급함

□ 기술 산업적 포화기에 미개척 극한 연구영역의 혁신적 연구접근을 통해 새로운 학문적, 기술적 뿌리를 확보해야 할 시기임

- 대량생산에 기반한 전자, 반도체, 나노산업의 팽창이 포화단계에 도달함에 따라 초연결화, 초지능화를 주요 화두로 하는 4차 산업혁명의 대응이 과학기술계의 주요관심으로 부상하였음
- 4차 산업혁명의 주요 키워드의 하나로 “극한화”를 손꼽기도 하지만, 극한연구는 4차 산업혁명의 후속하는 연구분야 (Beyond 4th industrial revolution)로 국가 안보산업과 연계되어 있음
- 전 세계 대부분의 국가들이 4차 산업혁명의 대응에 치중하는 시기에 보다 선제적으로 4차 산업혁명 이후에 급속도로 다가올 극한연구 관련 대비가 필요한 시기임
- 극한 영역은 과학기술 분야의 미개척 신대륙이며, 종래의 종속적, 추종적 연구를 탈피하여 새로운 과학적 발견과 발명을 기반으로 한 주도적으로 학문의 장을 여는 시도가 필요한 시기임

□ 최근 해외 극한연구 규모의 급격한 확대와 함께 지속가능한 형태의 극한연구체계 확보가 시급함

- 미국, 유럽연합의 지속적인 극한 연구의 범위와 규모의 확대와 함께 2010년대 들어 중국은 국가적 차원으로 극한연구 규모를 확대하고 있으며, 이를 통해 에너지, 자원, 극한분야의 산업경쟁력을 크게 끌어 올리고 있음
- 국외 동향에 비추어 극한연구는 시의 적절한 선택으로 판단되며, 국내에서 수차례 극한연구를 활성화 시키고자 하는 기획에도 불구하고 경제, 산업적 후방효과를 중심으로 하는 가치판단으로 인해 포괄적인 극한연구시스템이 갖춰지지

못한 반복된 전철을 탈피해야 할 시점으로 판단됨

- 국가 안보산업과 직결된 극한 연구주제에 대한 중장기적인 연구전략과 중점 진행과제에 대한 밑그림을 바탕으로 지속적인 연구능력과 성과의 축적을 시도해야할 시점임

□ 2018년에 제기된 새로운 화두인 Big Measurement 시대의 선제적 대응 시급함

나. 정부지원의 필요성

극한연구는 국가간 기술거래가 불가한 안보산업에 관한 연구이며, 막대한 부가가치의 신산업을 트리거링할 수 있기 때문에 정부주도의 중장기적인 연구개발과 연구체계 확보가 필요함

□ 극한연구는 국가 안보산업 (에너지, 항공우주, 환경, 국방)과 직결된 분야이기 때문에 국가주도의 중장기적인 연구개발과 연구시스템 확충이 필요함

- 미국의 경우 국방, 항공, 에너지 관련 국립연구소가 극한연구의 중추로 확보된 연구능력과 기술을 산학연으로 전파시키는 체계를 확보하고 있으며, 중국의 경우 초고압 연구소(HPSTAR) 설립이나 SECUF 사업 추진과 같이 국가주도의 극한연구 투자와 개발을 진행하고 있음
- 우리나라의 경우 각 세부 극한연구분야의 중점추진 분야의 확인과 함께 극한연구 부분이 지속적으로 성장할 수 있도록 연구 확산체계, 전문 커뮤니티, 연구인력 확충 등의 연구시스템을 확충하기 위한 정부지원이 시급함

□ 국가 간 기술이전이나 거래가 불가능하고, 국가의 존립에 직결된 분야이기 때문에 극한연구는 장기적인 지식의 축적과 기술의 추적이 가능하며, 국가 안보기술 개발을 미션으로 하는 국가연구소에서 추진할 필요가 있음

- 국방, 우주항공, 핵융합, 에너지와 같은 극한 연구분야의 경우 선진국에서배타적으로 진행되고 있는 바 기술의 습득이 매우 어려운 측면이 있음
- 종래 매우 좁은 극한 요소기술에 관한 소규모 개인기초연구의 경우 개인 연구자의 상황에 따라 연구성과가 사장될 공산이 컸고, 극한 연구의 지속성과 확장성은 물론 관련 지식의 축적을 위해서 국가주도의 연구개발이 필요함

- 극한환경의 구현과 극한현상 및 극한기술의 발견과 발명으로 시작되는 극한연구는 산업화가 진행된 종래 기술에 비해 기술개발 사이클이 길고, 기초기반의 성격이 짙으며, 신산업 트리거링과 같은 후방효과는 매우 클 것으로 판단되기 때문에 초기 연구개발은 국가 주도로 진행할 필요가 있음
 - 우주관련 연구는 투자대비 10배 이상의 고부가가치를 형성하기 때문에 스페이스 X와 같은 민간회사에서 상업적 우주개발을 시도하고 있으나, 제대로 된 의미의 극한연구는 국내에서 아직까지 시도단계에 있음
 - 종래 산업적 애로기술을 극복할 수 있는 극한 요소기술의 개발이나 신산업을 견인할 수 있는 극한기술의 확보와 이의 스핀-오프에 대한 시도도 극한 연구 단계에서 진행되어야 하나, 극한 신산업 발생으로 인한 국가 전반적인 산업구조의 변화에 대해서는 국가가 주도적으로 대응해야 함

다. 타사업과의 차별성

국가 안보산업을 대상으로 하는 극한연구는 “중장기 목적형 기초원천” 사업의 특성을 갖고 있어서 종래의 소규모 개인기초연구나 목적형 시스템 개발사업에서 다를 수 없는 분야임

- 소규모 개인기초연구로 좁은 범위의 극한요소기술에 관한 연구가 진행되고 있으나 가시적 성과를 창출하거나 극한지식의 축적을 기대할 수준은 아님
 - 대학 연구자들의 개인기초연구나 일부 출연연구소의 기관고유사업에서 극한기술을 연구하고 있으나 극한 전반의 기술적 향상을 꾀할 수 있는 규모의 연구는 전무함
 - 과학기술정보통신부의 미래소재디스커버리 사업의 경우 기존에 없었던 새로운 기능성을 확보한 창의소재를 개발하는 극한소재 부문과 유사한 사업이 존재하나 현실적인 과제 선정에 있어서 산업적 수요가 큰 부문에 국한된 좁은 영역의 극한연구가 진행되고 있음
- 항공우주, 핵융합, 원자력 연구개발을 미션으로 하는 출연연은 산업적 수요와 목

적형 개발사업에 치중하여 극한환경의 목적형 원천기술 연구는 미흡한 실정임

- 항공우주연구소는 발사체나 위성체 개발 사업에, 핵융합연구소의 경우 ITER 건설과 후속 상용핵융합로 개발사업에 대한 연구에 치중하고 있으며, 관련 극한환경에서의 발견이나 발명에 연관된 원천 극한연구를 추진하지 못하고 있음
- 또한 관련분야 기초연구사업의 경우 연구개발 지원규모나 자격 면에서 진입에 제약이 있음
- 우리나라의 기초연구는 학계 및 산업계 발전을 위한 순수 및 목적성 기초연구 성격이 강하며, 극한 연구는 국가의 에너지안보, 환경안보, 우주항공안보, 국방 등 국가 안보와 관련된 기초연구이며, 순수 기초 연구이면서 동시에 목적지향성 기초 연구의 성격을 가지고 있으므로 극한 연구를 위해서는 새로운 사업이 필요함.



5. 중점추진과제 도출

가. 도출과정

나. 추진과제 개요

5. 중점추진과제 도출

가. 도출과정

□ 후보과제 선정 및 중점 추진과제 도출 절차

단계	주요내용
극한 기획 위원회 구성·운영	○ 자문위원회 - 기술전문가 14명(산·학·연 및 정책전문가) ○ 세부기획위원회 - 5개 분야, 기술전문가 41명 - 초고온/초고압, 무중력/고중력, 극저온, 극한소재, 극한바이오 분야
극한연구 인식 설문조사	○ 극한연구 활성화 토론회 개최 ○ 극한연구 수요 및 인식 설문조사 - 극한바이오 등 수요가 큰 5개 분야 선정
극한연구 후보과제 구성(82개)	○ 극한관련 산학연 전문가 대상으로 극한기술 수요조사 실시 - 82개 기술수요제안서 접수 (연구계: 53, 학계: 29) - 극한분야, 극한성, 중복성, 차별성 등의 분석을 통한 후보과제 스크리닝
세부기획 과제 선정(5개)	○ 제2차 총괄위원회 ('18. 2. 28.) - 사업취지와 부합성 및 유사기술 그룹핑을 통하여 5개 과제로 통합·선정
세부분과별 기획추진	○ 과제별 세부기획위원회 구성·운영 - 5개 과제 세부기획 보고서 및 추진계획 도출 - 각 분과별 극한연구 추진체계 기획

□ 기획 추진경과

○ 기획위원회 구성

- 자문위원회 및 4개 세부기획 분과 구성, 초기계획과 달리 “비평형/준안정 분과”의 구성이 불가해짐.

○ 제 1차 총괄위원회 개최 ('18. 1. 12. 한국표준과학연구원)

- 극한R&D 활성화 기획의 경과보고
- 극한의 정의, 기획범위 등에 대한 논의

○ 분과별 기획회의 실시 ('18. 1. 18. ~ 지속)

- 분과별 실무위원회 구성

- 분과별 기획의 목표, 범위, 극한연구 주제 도출을 위한 정보수집 회의
- 극한R&D 활성화 토론회 개최 ('18. 1. 29. 연구재단 서울청사)
 - 극한연구의 정의와 필요성, 국내외 극한연구 현황 발제
 - 패널토론을 통한 극한연구 활성화 기획에 담아야할 내용에 대한 논의
 - 극한연구 인식 설문조사 (51매의 설문지 자료 수집)
 - 구성된 4개의 기획분과 외에 요구되는 분야의 설문조사를 통해 “제 5세부 극한 바이오 분과 추가”
- 극한연구분야 기술수요조사 1차 진행 ('18. 2. 11. ~ 2. 23. 총 82개 조사서 취합)
- 자문위 기획진행 사항 보고 ('18. 2. 26. 포스텍(PAL), 부산대)
 - 극한 세부분과 및 기획진행 상황 보고
 - 극한기술 수요조사서 취합결과 보고 (기존사업과의 차별성, 극한성에 관한 기술 자문 진행)
 - 국내 극한관련 기구축 인프라 탐방결과 보고 및 극한연구 인프라 및 연구체계의 조기구축 방안 자문
 - 해외 극한연구의 방향 및 궁극적 목표에 대한 자문
- 제 2차 총괄위원회 개최 ('18. 2. 28. 한국표준과학연구원)
 - 각 분과별 기획진도 점검
 - 극한기술 수요조사서의 내용분석 결과 논의
 - 중간보고서 준비 및 향후 기획회의 계획 논의
 - 극한관련 기구축 인프라 탐방 및 상황 보고
- 극한R&D 활성화 기획사업 중간보고 ('18. 3. 7.)
 - 분과별 기획상황에 대한 진도보고
 - 기술수요조사서 분석에 기반한 로드맵/핵심연구주제 도출 결과 보고
 - 향후 추진 계획 정리
- 제 3차 총괄위원회 개최 ('18. 5. 4. 한국표준과학연구원)
 - 분과별 기획성과물 발표 및 소개
 - 분과별 기술개발 수준, 환경, 배경 등에 대한 비교 방안 논의
 - 세부 분과별 극한기술 대비표 작성안 논의
 - 분과별 핵심 사업기획안 도출 논의
- 국외 극한전문가 자문 ('18. 5. 24.-25. 한국표준과학연구원, '18. 5. 28. 서울대학교)

- 이종현 교수 (Iowa 주립대), Frans Spaepen 교수 (Harvard 대학), Takeshi Egami 교수 (Tennessee 대학/Oak Ridge 국립연구소)
- 국외 3D 프린팅을 포함한 Additive manufacturing 연구동향 소개
- 항공기 엔진 등의 초고온 금속 3D 프린팅 관련 국외 산업화 동향 소개
- 고온 용융금속, 콜로이드 등의 구조해석 연구동향 소개
- 중성자 가속기 융합 액상 구조해석의 발전방향 소개
- 극한환경 연구와 접목된 Big measurement 개념의 발생에 대한 소개

나. 추진과제 개요

초고온-초고압 극한환경 구현/응용기술 개발

□ 추진배경 및 과제내용

- 인류는 현재의 경제, 사회적 체제를 유지하기 위해 막대한 량의 화석연료를 사용하고 있으며, 이들 연료나 2차전지의 음극물질은 50 ~ 100년 이내에 고갈된다는 예상이 있을 뿐만 아니라 정유나 이용공정에서 온실가스, 미세먼지나 독성 화합물들을 발생시키는 문제가 있음
- 따라서 탄소 중립적(carbon-neutral) 이고, 안전성이나 효율성이 높은 전력 생산과정이나 고밀도 에너지 저장물질 개발에 대한 관심이 증가하고 있음
 - 4세대 원자로의 하나인 VHTR은 운전온도를 400 °C에서 1000 °C로 상승시켜서 에너지효율을 50 %까지 증가시키는 것을 목표로 하고 있으며, 1억도씨의 플라즈마를 안정적으로 가두어 전력을 생산코자 하는 핵융합발전의 경우 운전온도를 1000 °C에서 3000 °C까지 상승시키는 것을 목표로 함 (ITER, 2015)
- 고온운전과 높은 효율을 확보하기 위해 핵융합로의 일차벽이나 디버터를 고융점의 텅스텐 소재로 제작하는 시도들이 있으며, 이들의 안전한 운용을 위해서는 초고온 극한환경에서의 열적, 기계적, 미세조직 안정성이 담보되어야 함
- 뿐만 아니라 철강산업이나 초고온 삭마환경에 놓이는 항공우주 및 국방산업의 경우 신소재 개발을 위해 시뮬레이션을 사용하고 있으나 초고온 극한환경에서의 측정데이터가 아닌 추정치를 사용함으로써 계산의 정확도가 떨어지는 문제점이 존재함
- 신에너지원으로 각광받고 있는 수소가스는 초고온, 초고압을 이용해 고밀도 에너지 저장체로 변환하거나 초전도 물질로 연구가 되고 있으며, 공기 중의 구성요소인 질소나 일산화탄소의 경우 초고온-초고압 극한환경에서 폴리머상의 고에너지 밀도 준안정상이 형성되는 것이 확인되었음
- 초고온 플라즈마 혹은 삭마환경에서 소재의 열적, 기계적 특성 및 손상측정이나 물질을 구성하는 원자 혹은 분자결합을 심각하게 변화시킬 수 있는 초고온-초고압 극한환경에서의 신소재 혹은 고에너지 물질 연구는 종래 산업적 한계를 뛰어넘는 기술적 도약뿐만 아니라 새로운 학문이나 신산업을 트리거링할 수

있는 가능성이 있음

- 초고온-초고압 극한환경의 구현/응용기술 개발 과제는 아래 그림과 같이 지표면 상의 대기압, 실온 상태에서부터 맨틀, 지구외핵과 내핵으로 접근하는 초고온 혹은 초고온-초고압 극한환경을 공중부양이나 다이아몬드 앤빌셀 기술을 확장하여 구현하는 부분과 형성된 극한환경을 적극적으로 활용하여 고에너지 신물질을 합성하는 부분의 내용을 포함하고 있음
- 특히 초고온-초고압 극한환경의 구현, 제어는 물론 형성된 다중 극한환경 내에서 시료의 물성변화를 실시간으로 다면적으로 측정하는 기술은 최근 새롭게 등장하고 있는 “Big Measurement”와도 연계되어 있음



□ 과제목표

- 초고온-초고압 극한환경의 구현과 함께 극한환경에 노출된 시료에 대한 Big measurement 기술을 개발하고, 이를 활용하여 고기능성이나 고에너지 밀도를 갖는 신물질 합성기술을 개발하고자 한다.
- 1단계(3년): 초고온 혹은 초고온-초고압 (> 2500 K, 50 GPa, $\sim$ Tpa/s) 극한환경 발생 및 제어기술 개발
 - 공력 부양을 활용한 초고온 (1000 K) 산화물 환경의 구현과 라만 및 엑스선

산란을 활용한 실시간 원자-분자 구조 변화 측정

- 정전기력 부양을 활용한 금속 및 반도체 물질의 초고온 (5000 K) 환경을 진공상태에서 구현하고 고체-액체 상전이시 열물성 및 구조변화의 측정
- 다이아몬드 앤빌셀을 활용하여 초고압 (~ 100 GPa) 혹은 레이저가열 기술의 융합을 통한 초고압-초고온 (~ 100 GPa, 5000 K) 극한 환경 구현

○ 2단계(3년): 다중 극한환경 노출 시료의 Big measurement 기술 개발

- In-situ 상태에서 전기/자기/기계 물성 및 구조변화를 엑스선 및 라만 산란을 통해 측정
- 시간분해 엑스선 측정을 통해 마이크로초에서 피코초 시간 영역에서 일어나는 초고속 구조변화를 측정함
- 초고온-초고압 상태에 놓인 물질의 전기/자기/기계 및 열복사 물성 등을 측정함

○ 3단계(4년): 실시간 극한환경 (>5000 K, >100 GPa, 100 TPa/s) 측정 인프라 상에서 고기능성, 고에너지 밀도 신물질 개발

- 다양한 고온 소재의 크리프 거동을 실시간으로 측정하여 고온 소재를 발굴함
- 다차원 비평형 극한 신에너지 물질 발견/합성 기술 개발 (Fe 신구조, HEA, BMG)

○ 전체단계(10년): 극한연구 사이트랩 구축 및 다중극한연구 활성화 기반 마련

□ 추진전략(로드맵) 및 방안





- 극한 환경을 활용한 신소재 개발은 극한 환경을 구현하고 제어할 수 있어야 하며, 극한 물성을 측정하는 기술 개발이 동시 다발적으로 진행되어야 가능함
- 1, 2단계의 초고온-초고압 극한환경 구현과 측정기술 개발을 기반으로 3단계에 극한 신물질 발견과 합성에 대한 연구를 수행할 예정이며, 초고온 혹은 초고온-초고압 극한인프라의 경우 기구축된 장비의 개선을 통해 진행함으로써 막대한 규모의 신규예산 투입없이 조기구축과 운영을 가능케 함
- 기존 기술에서 접근 불가능했던 극한환경을 구현하고, 새로운 측정을 가능케 함으로써 신물질 발견이나 합성원천기술 개발과 과학적 난제 해결 등의 굵직한 성과들이 기대되며, 3단계의 주요 주제인 고에너지나 새로운 기능성을 갖는 신물질 원천기술을 1, 2단계에서 기초물성 연구부터 시작함으로써 사업 성공률을 높일 수 있음
- 본 과제의 목표 완성을 위해서는 오랜 시간동안 축적되고 traceability 가 높은 극한환경 발생 및 측정 기술과 지식이 필요하므로 ‘거점 연구소’기반의 연구시스템 운영 필요

중력제어 지상플랫폼 및 측정기술 개발

□ 추진배경 및 과제내용

- 우주플랫폼 활용 이전에 지상 모사시설을 활용한 지상연구로 새로운 현상 및 물성 발견 가능
- 지상 모사시설 활용 연구 후, 추가적인 검증 및 연구가 필요한 분야에 따라 국제협력 등을 통한 국제우주정거장(ISS) 등의 무중력 환경 활용 연구 수행
- 우주로 인간의 활동 영역 확대 → 극한 무중력/고중력 환경 활용 연구를 통한

미래먹거리 신산업 창출 및 선점

○ 미래 우주탐사를 위한 과학기술의 방향

- 지구를 벗어나 2030년대 유인 화성탐사(고중력→무중력→저중력 환경 경험) 시대로 이행
- 미국 NASA 뿐만 아니라 민간기업(예; Space-X 등)의 우주탐사/우주산업 활용 참여
- 우주공간의 무중력 환경에 따른 신체변화 및 생명 안정성을 위한 대응방향 연구(NASA 등 국제우주정거장 건설/운영국가들은 2024년까지 우주 진출을 위한 플랫폼으로 국제우주정거장 활용. 이후 민간으로 이양 운영 논의중)
- 우주공간의 무중력 환경을 활용한 기초물리 연구 및 이를 활용한 산업적 제품생산 연구
- 민간의 우주여행 상품화 추진 및 우주산업을 통한 부가가치 창출 추진

○ 중력제어 지상플랫폼 및 측정기술 개발은 재료, 생명, 연소공학 분야에 활용성이 넓은 마이크로 중력 혹은 고중력 플랫폼을 구현하고, 이를 운용하여 중력제어 극한환경 내의 다양한 시료의 거동을 측정하는 연구를 포함함



□ 과제목표

- 무중력/고중력을 모사하는 지상 플랫폼을 이용하여 우주 극한환경을 구현하고, 극한환경에 노출된 시료의 측정 및 활용기술을 개발한다.
- 1단계(3년) : 극한기술 융합을 통해 중력(무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 구축 및 측정기술 개발

- 2단계(3년) : 극한환경(무중력, 고중력, 비접촉) 활용 생명/의학/재료물성 및 기능성 신소재 분야 기술개발
- 중력 (무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 개발 및 측정기술 개발
 - 생명/극한바이오 연구 분야 플랫폼: Clinostat (무중력 환경 모사), Centrifuge (고중력 환경 모사) 등 개발
 - 재료 물성 연구 분야: Levitator (정전기/전자기/가스부양 등) 이용 비접촉 환경 재료물성 측정
 - 연소 특성 연구 분야: Drop tower (수십 m 또는 100 m 급)
 - 신소재 합성 연구 분야: 마이크로중력 하 고부가가치 광학볼렌즈 (직경 8 mm 이상)
 - 광학적/강유전/유전특성을 갖는 기능성 신소재 발견

□ 추진전략(로드맵) 및 방안



- 본 과제의 목표 달성을 위해서는 기계, 전자, 전기, 광학, 재료, 물리, 화학, 생명 과학/공학, 의학 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 산학연 연계와 개방형 연구시스템 운영 필요
- 기존의 기술에서 접근 불가능했던 영역을 지상기반 모사시설로 구현하므로, 실험실 수준의 기반장비 구축 및 생명/의학, 소재, 연소 등의 분야에 대한 활용으로 과학적 난제 해결 및 새로운 현상 발견이 주요 성과물임
- 재료의 열물성은 결정 성장과 응고 현상을 정량적으로 파악하는 데 필요한 기초 자료이며, 이는 유리, 철강, 반도체 결정성장 산업계의 요구에 부응할 수 있음

다중실험용 고자기장-극저온 통합시스템 개발

□ 추진배경 및 과제내용

- 극저온 분야는 응용기술과 인류지식의 지평을 넓히는 기초연구에 중요한 극한 분야 중 하나로, 이전의 노벨 물리학상의 약 ~10 %가 당시로서는 “극저온”에서 일어나는 현상의 발견과 관련되어 있음
- 극저온 환경의 구현과 극저온환경이 기초과학의 근원적인 탐구와 돌파의 기회를 제공하고 있음을 시사하고 있다고 볼 수 있음
- 극저온관련 구체적인 연구 사례
 - 액체헬륨으로 구현된 저온환경에서 초전도현상 발견(Onnes, 1913)
 - 저온에서 액체헬륨의 초유체현상 이론적 설명 (Landau, 1962)
 - 저온에서 발현하는 초전도 현상 이론적 설명(Bardeen,Cooper and Schrieffer, 1972)
 - 저온에서 발현하는 초전도체에서 조셉슨효과 예측 (Josephson, 1973)
 - 저온에서 액체헬륨의 초유체현상 발견(1934) (Kapitsa, 1978)
 - 저온 고자기장에서 양자홀효과 발견(Klitzing, 1985)
 - 고온 초전도현상 발견 (Bednorz and Müller, 1987)
 - He-3에서의 초유체현상 발견 (Lee, Osheroff, Richardson, 1996)
 - 저온 고자기장에서 분수전하를 가진 양자유체 발견(Laughlin, Stoermer and Tusi, 1998)
 - 초전도와 초유체의 이론적 설명 (Abrikosov, Ginzburg, Leggett, 2003)
 - 고자기장 저온환경하에서 그래핀에서 Dirac fermion 발견 (Novoselov and Geim, 2010)
- 기 수행된 국내 극저온 과제들은 해외의 상용시스템을 활용한 연구가 절대 다수이기 때문에 첨단연구 측면에서는 종래 해외기술과 구별되는 한국형 뿌리기술이 전무한 실정임
- 뿐만 아니라 혁신적인 연구를 위해서는 극저온과 동시에 구현될 수 있는 고자기장, 초고압 등의 극저온기반 다중극한 환경이 필수적으로 요구되고 있음
- 극저온 기반의 다중 실험환경은 고자기장과 극저온의 통합시스템 구축을 통해 가능하며, 온도, 자기장의 안정성과 같은 구현 및 제어연구가 주를 차지함

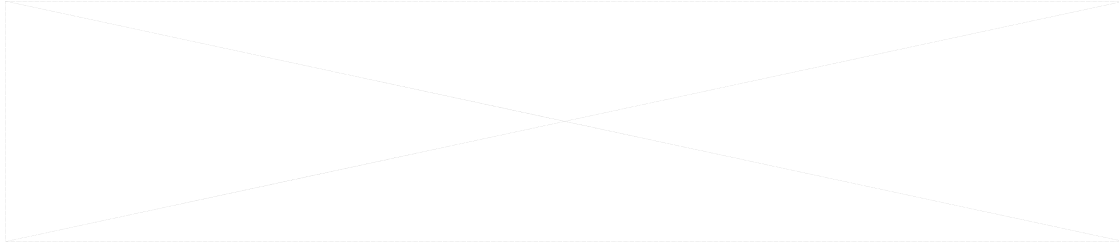


□ 과제목표

- 저전력-고자기장 기반 극저온 통합 다중실험 인프라 구축 및 활용기술 개발을 목표로 한다.
- 1단계(3년): 저전력-고자기장 기반의 극저온 환경구현 (다중실험용 top-loading 프루브 개발)
 - Top-loading dilution 극저온 시스템과 통합이 가능한 30 T급 초전도 자석 설계 및 제작
 - 자기장의 크기 및 균일도를 소급성을 가지는 절대측정방법으로 평가
 - 자기장 안정도 평가, 초전도자석 quenching의 감지 및 전류제어기술 개발
 - 초전도 자석에서 발생하는 stray B-field 차폐기술 개발 및 평가
 - 고자기장 초전도 전자석과 통합이 가능한 top-loading dilution 극저온 시스템(100 mK 이하) 개발
 - 다중실험용 실험을 위한 top-loading 프루브 개발 (전기적 특성 평가용 정밀 프루브 및 원자/자성 현미경용 프루브 개발)
 - 극저온과 온도 안정성을 소급성을 가지는 절대측정방법으로 평가
- 2단계(3년) : 고자기장-극저온 통합시스템 성능평가 및 활용 다중실험기술 개발
 - 통합시스템을 이용한 다중실험 가능성 확인
 - 통합시스템의 신뢰성 평가, 설치 및 운용

□ 추진전략(로드맵) 및 방안

- 본 과제의 목표의 성공적 완성을 위해서는 기계, 전기, 전자, 열, 유체, 재료, 측정 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 산학연 연계와 개방형 연구시스템 운영 필요함



초고온-초음속 다중극한환경 대응 초내삭마 소재 개발

□ 추진배경 및 과제내용

- 북한의 핵 및 미사일 개발과 러시아 및 중국의 첨단 극초음속 무기 체계들의 개발로 국민의 안전이 위협받고 있으며 이에 효과적으로 대응하기 위한 극초음속 방어체계 관련 R&D 가 요구됨.
- 극초음속 체계는 nose tip, 엔진 노즐 등이 극고온, 극고속 환경에 비교적 장시간 노출되며, 이런 극한 환경 하에서 안정적으로 형상 및 특성을 유지하는 고성능의 초고온 세라믹스는 전체 극초음속 체계의 성능에 결정적 영향을 미치는 핵심 소재임.
- 기존의 로켓은 초고온, 초고속 환경에 1분 미만의 단기간 노출되어 삭마 및 산화 특성이 좋지 않은 탄소/탄소 복합재료도 대응이 가능하였으나 최근 개발되고 있는 극초음속 체계는 최소 수분 이상으로 지속 시간이 증가하여 기존 소재로는 대응이 불가능함.
- 최근 우주 산업분야에서 가장 주목받고 있는 Space X사의 팰컨 9과 같은 재사용 발사체 제조를 위해서는 초고온, 초음속의 가혹 환경에서 반복사용이 가능한 nose tip 및 노즐목 소재 개발이 필수적임.
- 초고온, 초음속, 고압력의 다중 극한환경에서 우수한 내삭마 특성 및 반복 사용성을 나타내는 소재 개발
 - 전산모사를 통하여 극초음속 환경하의 nose tip과 유사한 Mach 2, 2000℃의 환경 및 노즐목의 환경 영역인 2000℃, Mach 1, 20 bar 조건에서 우수한 내삭마 특성과 반복 사용성을 갖는 조성 및 미세구조 도출

- 전산모사를 통하여 도출된 조성을 갖는 고품위 원료 제조 및 복잡형상 소재 제조를 위한 성형 공정 개발
- 제조된 복잡 형상 소재의 특성 평가 및 비파괴 진단기술 개발: 초고온 물성 등 다양한 데이터 구축의 기반이 될 소재 물성 측정·평가 및 신뢰성 확보 기술
 - 소재 기본 물성 측정 : 상온 및 고온 강도, 탄성율, 파괴인성
 - 소재 결함의 비파괴 측정 기술 : 3D 스캔 형상 측정, CT, 초음파, IR 등
- 실 환경 및 유사 실환경에서의 성능 평가를 통한 재사용 성능 검증
 - 개발된 소재의 arc-jet plasma wind tunnel 시험을 통한 극초음속 모사환경 하에서의 내삭마 특성 및 재사용성 검증 (2000℃, Mach 2, 흑연노즐 대비 3배 이상 삭마저항성)
 - 개발된 소재의 로켓 장착 및 분사를 통한 실환경에서의 노즐목 내삭마 특성 및 재사용 성능 검증 (2000℃, Mach >1, 20 bar, 흑연노즐 대비 3배 이상 삭마저항성)

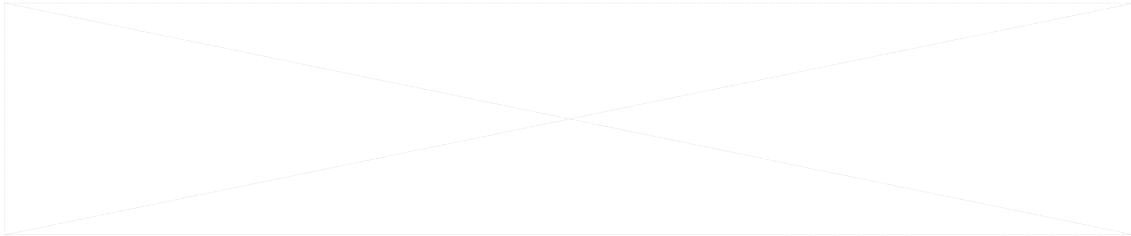
□ 과제목표

- 극초음속 환경 하에서 반복사용이 가능한 다중 극한환경용 초내삭마 소재 개발한다.
 - 극초음속 환경하 nose tip의 운용조건 만족소재 개발
 - 추력 분사 시 로켓 노즐목의 운용조건 만족소재 개발
 - 제작된 소재의 비파괴 품질검사 및 극한환경 반복운용 성능 평가
- 1단계(3년): 전산모사를 통한 다중 극한환경 대응 가능형 신조성, 새로운 미세구조 도출 및 이를 적용한 고품위 원료, 신소재 개발
- 2단계(3년) : 개발된 소재의 대형화, 복잡 형상화 기술, 품질 검사 방법 개발 및 아크젯 플라즈마 풍동, 로켓을 이용한 극한 환경 반복 성능 검증

□ 추진전략(로드맵) 및 방안

- 본 과제의 목표 완성을 위해서는 전산, 재료, 공정, 기계, 광학, 열 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 학-연 연계형 연구시스템 운영 필요
- 다중 극한환경 하에서는 소재의 미소한 조성 및 구조 차이로도 큰 특성 차이가 나타나기 때문에 다중 극한환경용 소재 제조 경험이 있는 기관 참여가 필요
- 선진국에서도 미구현 상태인 다중 극한환경 하에서의 재사용 소재 개발은 매

우 도전적인 목표이며, 이 소재는 E/L (수출입 통제)에 속하는 전략 소재이므로 개발 성공 시 재사용 발사체 분야의 주도권 확보에 큰 도움이 될 수 있음



무중력 환경 활용 장기유사조직배양 기술 개발 및 종양 내 항암제 전달 영향 연구

□ 추진배경 및 과제내용

- 마이크로중력 환경을 활용하여 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발
 - 사람의 장기유사조직은 일반적인 세포배양과 다르게 실제 장기와 유사하여 질환 연구와 치료방법에 응용이 가능함
 - 마이크로중력 환경을 활용하면 삼차원 (3D) 장기유사조직의 배양이 매우 효율적으로 만들 수 있기 때문에 유용함
- 마이크로중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구
 - 종양조직에 마이크로중력 환경을 이용하여 압력을 줄이게 되었을 때, 항암제 전달이 원활하게 이루어질 것으로 예상함
 - 마이크로중력/고중력 환경을 활용하여 항암제 전달과정을 연구하고 약물 전달을 용이하게 하는 시스템 개발
 - 종양조직 내 마이크로중력 환경과 약물전달, 항암효과와의 관계를 규명하고 최종적으로 난치성 종양에 약물전달을 효율적으로 하여 항암치료를 증진시킴

□ 과제목표

- 무중력/고중력 환경활용 생명/의학 분야 난치병 치료기술 개발

- 1단계(3년): ① 무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양, 암과 같은 난치병 치료 기술 기초 연구, ② 중력 변화에 대한 세포/조직 대응 측정 기초 연구
- 2/3단계(6년): ① 무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양 시스템 개발 및 장기 배양 기술개발, ② 종양 내 약물전달 효율 증진 및 치료효과 증대 기술 연구

□ 추진전략(로드맵) 및 방안

- 장기유사조직 배양 기술을 통해서 암, 당뇨, 치매 등의 난치성 질환 치료 연구 시스템 구축 및 치료제 개발 연구, 종양조직에 항암제 전달을 향상시켜서 사망률 1위인 암을 치료할 수 있는 새로운 치료방법을 모색함
- 생명/의학 분야는 장기간의 연구가 필요하므로 1단계 무중력환경 모사시설을 활용하고, 2단계부터는 국제협력을 통한 우주기반 플랫폼 활용 모색이 필요함



6. 사업추진 체계 및 전략

가. 추진체계

나. 추진전략

6. 사업추진 체계 및 전략

: 극한 연구는 앞서 기술한 바와 같이 에너지, 우주항공, 환경, 국방 등의 분야에서 국가 안보 기초과학 연구와 국가의 학문적·기술적 뿌리를 확보, 그리고 국가의 미래 신산업 창출의 토대를 마련하는 중요한 분야이며, 국가간 정보교류와 기술이전이 매우 어려운 분야임. 또한 막대한 예산과 장기적으로 추적 가능한 지식 및 기술 축적이 필수적인 분야이며, 지속적 기술 개발 및 지식 전수를 위한 인력양성이 필요함. 따라서, 극한 연구를 활성화하기 위해서는 정부주도하에 극한 연구를 목적적 미션으로 수행할 수 있으며, 장기적이며 전략적으로 분야 육성과, 관련 지식 및 기술의 독자적 확립을 위한 사업추진 체계 및 전략이 필요함. 이에 극한 관련 담당 전문 부처 신설하여 장기적이며 전략적으로 극한 연구분야를 육성하여야 하며, 다음의 두 가지 연구단과 목적형 극한 기초원천 연구를 담당할 조직과 전문관리기관으로 구성되는 추진 체계 필요.

- 부처 내 극한연구 담당과
- 전문관리기관
- 극한 인프라 연구단
- 극한 활성화 전략 기획단

가. 추진체계

극한연구는 크게 “국가안보”와 “신학문/신산업”을 견인을 목표로 하는 두 갈래의 분류체계를 가지며, 조기에 극한인프라를 구축하는 것과 관련 연구생태계를 확보하기 위한 체계를 형성함

□ 연구 사업단 구성

○ 극한 연구 전문 관리 부처 기관

- 산업 발전이나 순수 학술적 목적의 기초연구 정책과는 달리 국가 안보 기초과학 연구와 국가의 학문적·기술적 뿌리를 확보를 통한 극한 과학 선진국 위상 달성, 그리고 국가의 미래 신산업 창출의 토대 마련을 위해 극한 연구를 정책적으로 구상하고, 관리, 평가, 운영하는 과기정통부 내 전문 관리 부처.
- 극한 인프라 연구단 선정 및 극한 활성화 전략기획단 선정을 위한 정책 마

련 및 극한 거점연구/연구시스템이 확립 이후 각 극한 미션을 국가연구소의 미션으로 재정립 및 장기 운용체계 마련

○ 극한 인프라 연구단

- 극한환경 구현, 제어, 측정, 활용을 위한 극한기술 개발과 극한 연구에 필요한 인프라 구축을 주도하는 연구단
- 연구사업의 시의성이나 국가 안보 기초과학의 밀접성을 고려하여 4개의 연구단으로 구성: 다중극한 측정 연구단 (초고온/초고압), 중력 극한연구단 (무중력), 양자 극한연구단 (극저온), 첨단 전략 극한소재연구단 (극한소재)
- 극한 연구를 미션으로 수행하면서, 협동 연구기관 및 대학과의 유기적 연계를 통해 극한 관련 연구를 지원할 수 있는 거점 연구단.
- 기구축 인프라를 초기 플랫폼으로 하여 각 협동연구기관의 극한요소기술을 하나의 플랫폼 상에 구현하는 형태로 진행

○ 극한활성화 전략기획단

- 극한 활성화 전략기획단은 국가안보 (national security)와 학문적·기술적 뿌리 확보를 위한 극한 연구의 주제와 범위를 설정하며, 극한 인프라 연구단의 효율적 활용을 위한 학연산의 연구지원 프로그램 개발, 극한연구 부문의 활성화를 위한 인력 양성 프로그램 개발, 그리고 극한 연구 커뮤니티 운영 및 극한 연구 성과물의 스핀-오프 체계를 마련하기 위해서 구성
- 전략기획단은 인프라 연구단장과 다수의 연학산의 극한 연구 전문가들로 구성된 극한연구협의체를 통해 극한연구와 연구체계 수립에 관련된 지속적인 자문을 받아 운영함
- 특히 극한연구협의체를 통해 긴급하게 떠오른 국가안보 현안에 대응할 수 있도록 할 뿐만 아니라 종래 산업적 애로기술의 극한요소를 접목한 해결책의 제시와 같은 구체적인 연구주제의 피드백도 담당함

<<사업추진체계도>>



□ 사업기간 및 지원규모

○ 총 사업기간 및 지원규모:

- 극한인프라연구단 (6년, 350억원): 각 극한부문별 인프라 구축범위와 내용, 성격에 따라 50-100억원 규모로 탄력적으로 운영
- 극한활성화전략기획단(6년, 20억원): 극한연구개발 활성화를 위한 연구지원 프로그램, 커뮤니티 확대, 전문인력 양성을 위한 프로그램 발굴, 연구성과물의 스핀-오프 지원 프로그램 운영
- 극한연구소/연구시스템이 확립된 이후는 각 극한미션을 국가연구소의 미션으로 재정립 및 장기 운용체계 확보

○ 극한인프라연구단 연구단계: 2 단계 (3+3)

- 1단계는 극한환경 발생과 제어, 2단계는 실시간 측정기술 융합에 중점
- 세부 극한분야의 국내 역량 정도에 따라 탄력적으로 1단계에 극한인프라 구성을 완료하고, 2단계에 중장기 운용체계를 확보할 수도 있고, 극한요소기술의 스핀-오프를 고려할 수도 있음
- 2단계 연구기간 역시 세부 극한분야의 역량정도에 따라 탄력적으로 조정 가능함

나. 추진전략

: 극한 연구 활성화를 통해 극한 연구의 전략적 목표 달성과 극한 연구의 다양성, 우연성, 도전성을 확보할 수 있도록 다음의 네 가지 전략방안을 제시함.

- 극한 인프라 조기 구축
- 허브연구소 중심의 극한 연구 네트워크 구축
- 국가 안보 극한 기초연구 방향 설정
- 지속가능한 극한 연구 생태계 조성

극한연구 네트워크 (허브연구소-산학연 이용자 네트워크)와 극한협의체의 전문가 자문을 중심으로 인프라의 조기구축, 전문인력/커뮤니티 활성화, 개발 기술의 스핀-오프까지 전주기적 연구활성화를 위한 전략을 구사

□ 극한 인프라의 조기 구축

- 기 구축된 극한 인프라 성능개선 전략: 극한연구의 활성화는 극한 환경을 구현하고 측정할 수 있는 기술 개발의 선행을 필수적으로 요구함. 따라서, 극한 환경 구현 및 측정 기술 개발로 극한 인프라의 조기 구축이 필수적이며, 국내에 기 구축된 관련 극한 인프라의 성능 개선 전략이 필요함
- 융합형 극한 인프라 구축: 여러 기관에 걸쳐 구현된 개별 극한요소 기술들의 융합 및 협력을 통해 완성형 극한인프라를 구축하며, 구축 관련 기관들이 극한인프라를 운용한 극한연구의 주체로 설정함
- 효율적 극한 인프라 활용 유도: 기 구축된 인프라의 개선 및 국가 안보 기초 과학 면에서 경쟁력 있는 시급한 극한 인프라 요구 수렴으로 기 구축된 극한 관련 인프라의 활용성 확대와 함께 극한 인프라의 조기구축을 유도함

□ 허브연구소 중심의 극한 네트워크 구축

:극한 연구는 극한 환경의 구현 (또는 접근)과 측정이 가능해야 시작할 수 있으나, 구현과 측정을 위해서는 극한 환경을 예측하고 접근 및 측정 가능한 기술 및 소재 개발이 선행이 요구됨. 그러나 극한 환경의 접근과 측정 없이는 극한 기술 소재 개발이 불가능하여, 극한 연구는 극한 환경 구현, 측정, 활용, 예상 등이 동시다발적으로 이루어지므로 초기 투자 비용이 매우 크며, 각 개별 연구 지식 및 기술의 추적과 전수를 위해서는 극한 허브 연구소 중심의 극한 네트워크 구축이 필요.

- 극한 허브 연구소 설정: 타 연구기관 및 대학의 원활한 극한 연구를 위해, 초기 투자 비용과 기술적 난이도가 높은 극한환경의 구현, 제어, 측정, 활용 기술 개발로 극한 기술 인프라를 제공하고, 극한 연구의 지속성과 확장성의 중심이 되는 극한 허브 연구소 설정 필요.
 - 기 구축된 인프라에 극한환경을 가혹화하기 위한 요소기술을 융합하거나 극한환경에 노출된 시료의 정밀분석을 위한 측정기술 제공
 - 극한인프라 개선연구를 진행하는 연구주체들의 공동의 “극한환경 이용 발견/발명”에 관련된 집단 기술주제 도출 및 연구수행
- 극한 연구 네트워크 구축: 각 극한 허브 연구소의 극한 기술 인프라 제공은 연구기관과 개별 연구자 간 네트워크 구축으로 극한 연구의 다양성과 활성화

를 도모하며, 극한 인프라의 개방적 운용 극대화를 위한 연구지원 전략을 마련함.

- 학연산 연구집단에서 확보하고 있는 다양한 극한 관련 연구개념이나 주제를 구축된 극한 인프라를 통해 수행.
- 초기 구축된 극한인프라의 제한적일 수밖에 없는 사양이나 성능을 일반 이용자들의 다면적이고 복합적인 수요성능에 맞추기 위한 지속적인 장비개선 전략 제시 (국가안보 현안 등 극한연구 시급성, 과급 활용성에 기반한 인프라 개선의 전략 필요)
- 극한연구는 구현, 발전/이해, 애로기술의 돌파가 동시다발적으로 일어나는 특징을 가지고 있기 때문에 극한 연구 네트워크 구축으로 각 극한 분야의 발전 정도에 따른 동시다발적 연구를 통합적 연구 수행 전략 필요.
- 극한 연구 네트워크 구축을 통해 확보한 극한 요소기술 및 데이터베이스를 종래 산업기술과 접목하여 애로기술 돌파 전략으로 추진함

□ 국가안보 관련 극한기초연구 방향 설정

: 극한 연구는 에너지, 우주항공, 환경, 국방 등 국가안보와 밀접한 기초연구분야이므로 극한 연구의 활성화를 위해서는 극한 기초연구의 장기적인 발전방향 설정으로 극한 연구의 활성화의 무게 중심이 되는 전략이 필요.

- 에너지 분야는 4차 산업 혁명의 성공으로 지속성장 가능성을 확보하는데 핵심적인 국가 안보 과학이므로, 극한 기초 연구를 핵융합, 네트워크 및 인공지능, 그리고 로봇 산업의 필요한 신에너지 원천 확보를 위한 극한 기술 개발로 설정하여 관련 극한 기초연구의 활성화를 유도
- 우주항공 분야는 자원개발을 위한 행성탐사, 우주여행 및 전 세계 1일 생활권 실현, 미래 인류 활동기지 마련 등, 국가의 미래 생존과 영토확장, 그리고 미래 신산업 창출과 관련된 국가 안보 분야이므로, 극한 기초 연구를 항공우주용 극한 소재 (바이오 포함) 및 극한 기술, 극한 환경하 생체 연구, 우주 생물 연구 등의 극한 기초 연구 활성화를 유도.
- 환경 분야는 화석 연료 기반의 발전으로 발생하는 환경 오염 및 미세먼지로 국민 건강과 국가 미래 환경을 위협하는 국가 안보이므로, 초고온 운용 터빈 기술 및 소재개발을 통한 완전 연소와 오염 저감 및 해소기술, 신에너지 원천 개발을 통한 환경 오염 개선에 관한 극한 기초 연구 방향 설정 필요.

- 국방 분야는, 초음속 미사일 개발, 고출력 우주레이저 개발 등 새로운 국방 기술의 발달로 국가 안보에 직접적인 영향을 미치고 있으므로, 보다 근본적인 관련 극한 기초연구를 수행할 필요.

□ 지속가능한 극한연구 생태계 조성

- ： 과거 “경제 발전을 위한 산업적 수요에 맞춘 극한요소 기술 개발”에 초점을 맞춘 수 차례의 기획은 단기적 성과 집중으로 극한 연구의 저변확대와 지속성을 담보하지 못하였음. 이는 극한 기초연구의 국가 안보적 중요성과, 과학 발생기에 해당하는 기초원천성과 미래 가능성을 저평가됨으로써 발생되었음. 본 극한연구 활성화 기획은 극한연구의 “확장성과 지속가능성”에 방점을 두고 추진되었으며, 이를 위해서 극한 전문연구인력의 양성으로부터 극한연구 성과의 선순환적인 스핀-오프까지 고려한 포괄적인 극한연구 생태계 마련 전략을 제시함
- 극한 연구는 관련 산업시장이 없거나 미미하여 자생적 연구 생태계 조성이 어려우나, 국가 미래와 안보와 관련된 매우 핵심적 분야이므로, 국가의 주도의 허브 연구소 지정과 극한연구 네트워크 구축으로 확장성과 지속성의 근간이 되는 코어 연구체계 구축이 필요.
- 극한분야의 지속적인 확장을 담보할 수 있는 극한 전문연구인력의 양성프로그램 마련과 극한 커뮤니티 형성이 필요
- 극한기술에 바탕한 스핀-오프는 여타 산업분야에 비해 고부가가치 산업이지만, 높은 기술적 수준을 요구하기 때문에 상용화 수준까지 지속적으로 극한연구 네트워크에서 측정데이터나 극한요소기술을 공급할 필요가 있으며, 이러한 허브연구소와 스핀-오프 기업 간의 밀접한 관계를 바탕으로 상용화 지원 정책 수립 필요.



7. 맺음말

7. 맺음말

과학기술은 자연을 대상으로 하는 순수한 호기심과 경제, 산업의 현안을 해결하고자 하는 방향으로 진행되어 왔음. 오늘날의 **과학기술은 점차 국가의 미래 산업과 존립을 담보하는 중요한 요소**로 작동하며, 이러한 기조는 국방산업 뿐 아니라, 이미, 항공우주, 통신, 반도체, 소재 및 철강 등 산업 전반에 걸쳐 나타나고 있음. 이러한 변화를 주도한 것은 지속 가능한 성장에 대한 우려를 불식시키기 위한 미래 예측과, 그에 대응하는 인간의 활동 영역을 확장시키는 과정이었음. 특히, 지속가능한 성장의 기반이 되는 에너지 개발, 환경 개선, 미지의 자원 확보 및 생존 영역 확보를 위한 극지 및 우주개척 등은 극한 환경에 대한 관심과 극한 기술의 개발이 요구되었고, 선진국은 지난 40~50년간 꾸준히 관련 극한 연구를 지속해 왔음.

우리나라도 극한 연구에 대한 필요성은 80년대 중반부터 인지하였으나, 급속한 경제성장을 위한 산업 지원에 필요한 분야 중심으로 극한 연구를 진행하다 보니 미래의 과학적 신대륙, 그 결과로써의 신산업 발생의 신대륙인 극한 환경에 관한 연구가 체계적으로 지속되지 못하였음. 특히, 극한 기초연구는 단기적 기술성과 창출에 비효율적이라는 시각이, **국가안보 기초연구라는 현실적인 면과, 그리고 신산업 창출의 잠재적 가능성을 간과하게 만들었음**. 우리나라의 과학기술이 선진국을 추격하는 입장 (follower)에서 선도하는 입장 (first mover)으로 바뀌기 위해서는 미지의 미개척지인 극한 연구를 적극 수행하여 고유의 학문적 기술적 뿌리를 확보해야 함. 이는 **극한 연구가 우리나라의 국가 안보 기초과학과 미래의 신산업 창출이라는 측면 뿐 아니라, 노벨상 수상의 가능성도 열어줄 수 있는 분야임**을 의미함.

극한화는 초연결화, 초지능화와 더불어 **미래 과학 발전의 한 방향**이며, 인류 문명은 각 시대마다 그 시대의 한계를 극복하는 기술혁명의 형태로 발전되어 왔음. 현재 과학기술 분야에서 4차 산업혁명이 주요 화두가 되고 있으나, 인류 문명의 지속가능한 성장을 위해서 인간의 활동 영역을 극한영역으로 확장하는 것은 불가피하게 다가올 것으로 판단됨. 4차 산업혁명 이후에 새로운 현상 및 물질의 발견과 새로운 기술의 발명으로 대별되는 Big Measurement 시대를 능동적으로 준비하기 위해서 정부주도로 극한연구의 체계적인 활성화가 시급함.

따라서, 본 기획에서는 에너지, 우주항공, 환경, 국방 등의 분야에서 **국가 안보**

기초과학 연구와 국가의 학문적·기술적 뿌리를 확보, 그리고 국가의 미래 신산업 창출의 토대를 마련하는 극한 연구의 활성화를 위해서, 정부주도 하에 극한 연구를 고유임무로 수행할 수 있으며, 장기 전략적으로 분야 육성과, 관련 지식 및 기술의 독자적 확립을 위한 사업추진 체계 및 전략을 제시함. 극한 연구의 활성화를 위해서 극한연구 담당팀을 부처에 신설하여 장기적이며 전략적으로 극한 연구분야를 육성할 필요가 있으며, 극한 인프라 연구단과 극한 활성화 전략 기획단, 그리고 전문관리기관을 두어 체계적인 극한 연구 관리를 해야 함. 또한 극한 인프라의 조기 구축, 거점 연구소 설정과 극한 연구 네트워크 구축, 국가 안보 극한 기초 연구 방향 설정 및 지속 가능한 극한 연구 생태계 조성으로, 극한 연구의 전략적 목표 달성 방안을 제시함.



붙임자료

1. 기획자문위원회 명단
2. 과제 세부기획자료
3. 극한연구인식 설문항목 및 결과
4. 기술수요조사 안내문 및 결과
5. 중점추진과제 수요제안서 (RFP)
6. 특허동향 조사 보고서

(첨부1) 자문위원회 명단

자문위원회 위원

성명	소속 및 직급	비고
허정은	한국연구재단	
김시진	한국연구재단	
정세영	부산대학교 나노융합공학과 교수	자문위원장
권동일	서울대학교 재료공학부 교수	
권수용	한국표준과학연구원 정책전략부장	
김광무	참엔지니어링 대표이사	
박성진	포항공과대학교 물리학과 교수	
신현준	포항방사광가속기 방사광연구단장	
양형진	고려대학교 반도체물리학과 교수	
이윤우	한국표준과학연구원 책임연구원	
최기혁	항공우주연구원 책임연구원	
최형순	한국과학기술원 물리학과 교수	
이근우	한국표준과학연구원 (기획사업 책임자)	042-868-5744 gwlee@kriss.re.kr
이윤희	한국표준과학연구원 (간사)	042-868-5385 uni44@kriss.re.kr

(첨부2) 과제 세부기획 자료

(1) 초고온-초고압 극한환경 구현/응용기술 개발

1. 과제 개요

가. 과제의 정의

1) 정의

: 우주, 지구 심부, 해저, 극지 등 인류의 활동 영역의 확장과 에너지, 환경, 항공 우주, 안보 산업을 통한 인류의 지속 가능한 성장에 필요한 초고온/초고압/초고속의 기초원천기술 확보를 활성화하는 연구.

- 초고온/초고압/초고속 원천 기술 개발을 통해 고에너지 신물질 개발, 고효율을 발전, 초고속 및 극한 환경 이동 수단 개발과 안전한 환경 및 안보를 확보하여, 100년 이내, 화석 연료의 고갈을 극복하고, 인류의 지속 성장 가능성을 확보하는 연구.
- 에너지, 항공우주, 환경, 국방 산업에 필요한 초고압 (100 GPa ~ TPa), 초고온 (> 6000 K) 극한환경을 실험실 단위에서 구현, 제어, 측정, 활용하는 연구.
- 미지의 초고온-초고압 극한 환경에서의 새로운 물리적 현상을 발견하고, 초고속 실시간 원자, 분자 구조 측정으로 극한 물성 메커니즘을 이해하여 학문적, 기술적 뿌리를 확보하는 연구.



2) 범위

: 초고온/초고압/초고속 극한 환경 구현에 필요한 극한 발생 기술과 극한 물성 측정 기술.

측정대상이 되는 극한 기술은 다음과 같다.

- 온도: 2500 ~ 6000 K
- 정적압력: 10 ~ 600 GPa (대기압의 수십만 배에서 수백만 배)
- 동적압력: 1000 GPa/s
- 고속변형: > 1 Km/s
- 극한 환경 물성 실시간 측정 기술: 초고온/초고압 환경하에서 원자 크기 및 원자 시간 단위에서의 구조 및 열물성 측정 기법 개발

나. 과제의 필요성

1) 과학기술적 측면

- 극한 환경은 새로운 과학적 발견의 신대륙으로써, 새로운 물리적 현상의 발견과 새로운 측정 기법의 개발로 인류의 지식 및 산업 확장에 지대한 영향을 끼쳐왔음.

- 초고온/초고압/초고속 분야는 에너지, 환경, 항공우주, 국방 분야의 핵심 분야로써, 신물질의 발견과 극한 환경 제어를 통한 원천기술 확보로 21세기의 **노벨상 확보 가능성이 매우 높은 분야임.**

- 우리나라도 이제 **추격형 연구에서 벗어나 first mover형 연구로의 전환**을 시도하고 있으며, 초고온-초고압 복합 환경 및 초고속 측정 연구는 세계적으로도 극소수의 연구 집단만이 시도할 수 있는 미지의 미개척 분야이며, 원자 및 분자 크기 및 시간에서 물질의 거동을 측정하면 물질의 생성원인을 근본적으로 이해함으로써, 우리나라도 **first mover로써 학문적 기술적 뿌리를 확보할 가능성이 매우 높음.**

- 인류는 우주, 지구 심부, 해저 등 초고온/초고압의 극한 환경으로 활동 영역 확장을 추구하고 있으나, 극한 환경과 극한 환경에서의 물성은 아직 미지의 영역으로 남아 있음. 따라서 **성공적인 극한 환경으로의 확장을 위해서는 초고온/초고온 환경의 구현과 측정 기술 개발이 선행되어야 함.**

- 특히 초고온/초고압과 관련된 에너지, 환경, 국방 기술등 국가안보와 관련된 과학기술적 지식은 **국가간 공유가 매우 어려우므로 관련 극한 분야의 연구 활성화와 자립화가 필요함.**

- 21세기 신산업은 에너지 신물질 개발에 달려있음. 예를들면, 환경오염, 미세먼지 감소를 위해서는 초고온-초고압 환경에서 사용가능한 터빈 소재개발로 발전 효율을 높일 필요가 있으며, 무공해, 대용량, 지속성을 확보한 대체 에너지 저장 물질 개발 등은 전력소모가 많은 인공지능, 로봇, 네트워크 등의 4차 산업의 돌파구를 찾는데 핵심적인 요소임. 하지만, 신물질의 형성은 주로 초고온/초고압을 통해서 이루어지므로, 다양한 극한 물성을 보유한 에너지 신물질 개발을 위해서는 초고온/초고압의 극한 영역에서 물성 및 구조 데이터 베이스 확보와 관련 물성 측정 기술 개발이 필수적임.

- 최근 에너지 원으로 소개된 하이드레이트는 초고압에서 생성되므로, 에너지 자원 탐사나, 소재개발을 위해서는 초고온/초고압 발생 장치와 극한 환경 하에서의 열적, 구조적, 기계적 물성 측정 기술 개발이 선행되어야 함.

2) 경제 산업적 측면

철강/항공우주/국방 산업: 기존 저가 정책 중심의 철강 생산은 후발 주자인 중국과 인도에 자리를 내주고 있으므로, 국내 철강 업체은 신강종 개발의 중요성을 인지하고 있음. 하지만, 신강종 개발을 위해서는 정확한 초고온 용융 물성 측정이 필요하나, 관련 물성 측정 기술개발은 미미함. 초고온의 환경에 놓이는 항공우주 소재와 국방소재 역시 열적, 기계적, 구조적 특성에 대한 물성 측정 기술의 진전이 미미해 항공우주 및 국방의 자립화에 어려움을 겪고 있음. 따라서, 국내에서 개발된 극한 환경 소재의 물성 측정과 평가 기술개발로 관련 소재 산업의 우수성을 확보와 산업 발전에 도움을 줄 수 있음.

- **핵융합 발전:** 안전하고 지속 가능하며 효율이 높은 발전을 위한 핵융합로 개발은 발전 온도에 사용하는 소재의 온도 한계에 달려있음. ITER (2015년)와 KSTAR (2017년)는 현재 발전온도 1000 °C를 3000 °C까지 올리고자 핵융합로 내부의 디버터 소재를 텅스텐으로 바꾸고자 하나, 초고온에서의 구체적 물성연구 없이는 그 초고온에서의 발전의 안전성을 담보하기 어려움. 따라서, 저렴하고, 안전하며, 지속성과 효율성을 담보한 성공적인 핵융합로 발전소 건설을 위해서는 초고온의 물리량을 측정하는 기술 및 소재 개발이 필수적임.

- **자원탐사:** 지구 및 행성 자원 탐사는 기본적으로 초고온 뿐 아니라, 초고압 환경에 놓임. 이런 초고압 환경에 놓인 소재는 에너지 자원으로 활용될 수 있으나, 이를 탐사하기 위한 장치의 소재 역시 초고압 환경에 놓이므로, 초고압 환경에서의 물성을 측정하는 것은 이런 극한 환경에 접근하기 위한 필수조건임. 하지만, 이런 초고압의 극한 환경에서 물성을 측정하거나, 소재를 개발하는 기술은 아직 전세계적으로 개발 초기 단계임. 한편, 최근 에너지 원으로 소개된 하이드레이트는 매우 큰 압력 하에서 생성되므로, 이러한 에너지 자원 탐사나, 소재개발을 위해서

는 초고압 발생 장치와 초고압 하에서의 열적, 구조적, 기계적 물성 측정 기술이 필요함.

－ 고에너지 및 신기능성 신물질 개발 산업: 보통의 환경에서 생산되는 신기능성 소재는 이미 포화상태를 이루었으며, 기능성을 가진 소재라 하더라도 작동환경이 매우 다른 극한 환경에서는 제대로 기능성을 발휘할지 장담할 수 없음. 따라서 극한 환경에서 합성되고, 극한 환경에서 동작할 수 있는 새로운 기능성 소재 개발은 향후 극한환경의 탐사뿐 아니라, 신소재 산업의 출구가 될 수 있음. 또한 초고압 하에서는 고에너지 농축 신물질을 개발할 가능성이 높아, 새로운 개념의 배터리 및 에너지원으로 사용될 수 있어 산업적 파급효과가 매우 클 것으로 기대함.

3) 사회문화적 측면

－ 21세기는 달 및 화성 탐사 뿐만 아니라, 에너지 확보를 위한 지구 자원 탐사 등으로 극한 환경에 대한 인류 활동이 요구되고 있으며, 자연 환경과 어울리면서도 보다 효율적인 생존 전략을 위해서 핵융합 발전과 같은 제어 가능한 극한 환경 활용의 길을 모색하고 있음. 지난해 고인이 되신 스티븐 호킹 박사는 100년 이내로 인류가 생활의 영역을 확장 시키지 못하면 인류 생존에 큰 위협이 생길 것이라고 예측을 했었음. 이미 SpaceX, Blue Origin, Stratolaunch System 등의 R&D 회사들은 추진체 개발 뿐 만 아니라 화성의 정착/식민화 프로그램들에 박차를 가하고 있음.

－ 핵융합 발전, 수소 에너지, 우주항공 등의 다양한 산업분야에서 고효율의 극한환경 형성과 운용기술이 확보될 경우 도심 내 소규모 분산형 에너지 시스템의 운용을 통해 종래 님비현상으로 인해 국가, 사회적 문제를 유발해 왔던 도심 내 에너지설비, 송전시설 등의 건설에서 자유로울 수 있을 뿐만 아니라 정부의 관련 정책수행도 보다 원활할 수 있음.

－ 4차 산업혁명이 임박한 이 사회적 시점에서 기존의 기계화/대량생산과소비를 기반으로 한 제조업뿐만 아니라 금융/바이오/유통/엔터테인먼트 등 경제/사회/문화

전 분야에서 hyper connectivity를 통한 융합이 이루어지면서 훨씬 많은 양의 에너지 및 자원을 요구하게 됨. 따라서, 기존의 한계를 넘을 수 있는 에너지 물질이나 신소재 개발을 위해서는 초고온 및 초고압의 극한 환경을 구현하고 in-situ 상태에서 물성 및 구조의 변화를 실시간으로 측정을 하고 분석 및 해석을 할 수 있는 R&D 체계 확립은 요청됨.

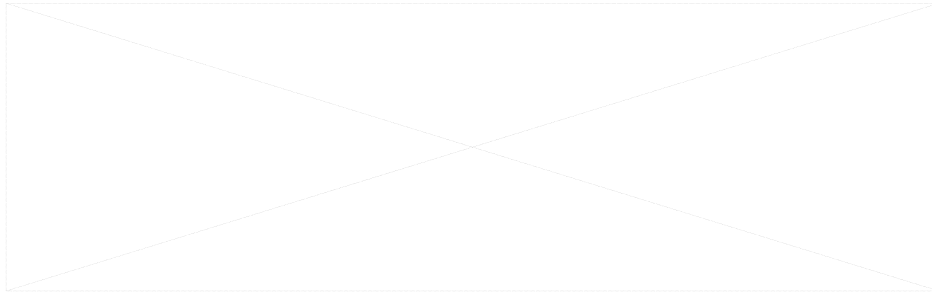
2. 국내외 극한연구개발 동향분석

가. 국외동향

- (미국) 미국은 새로운 발견을 통한 신과학 창출과 국가 안보와 관련된 에너지, 신소재, 국방 분야의 극한 연구를 미션으로 설정하여 NASA, Lawrence Livermore National Lab (LLNL), Los Alamos National Lab (LANL) 등의 국립 연구소를 중심으로 초고온/초고압 연구를 진행하고 있음.
 - Washington state university와 Lawrence Livermore 연구소에서는 다이아몬드 앤빌셀을 활용하여 300 ~ 600 GPa에 이르는 정적 초고압력 환경을 구현하였고 레이저 heating을 통하여 섭씨 2000도에서 6000도까지 이르는 초고온 환경 또한 동시 구현을 하였음. 또한 동적 다이아몬드 앤빌셀 원리를 활용하여 50 Tera-pascal/s에 이르는 동적 압력을 제어 할 수 있음.
 - 초고압 환경에서 신물질을 발견하기 위한 노력을 하고 있으며, 초고압 환경하 금속 수소 발견, 분자성 고에너지 신물질을 합성, 고압을 이용한 수소 생산 기법 개발 등의 학문적 기술적 성과를 창출함.
 - 초고온 분야에서는 NASA나 ORNL등의 기관에서 Electrostatic levitation (ESL), electromagnetic levitation (EML) 그리고 aerodynamic levitation (AL)의 부양 방법 등을 사용하여 3000 C에 이르는 초고온 환경을 구현 하였음.
 - 2007 ~ 2016년까지 이러한 초고압-초고온 환경 발생장치를 X-ray synchrotron (Argonne National Lab (APS))이나 Neutron source (Oak Ridge National Lab (ORNL))와 결합하여 물질의 실시간 구조의 변화를 측정하는 capability를 보유함으로써, 극한 환경에서의 다양한 물성을 동시에 측정 기술을 개발하고 있음.
 - LLNL 과 LANL 에서는 4차 산업의 주요 분야인 금속 3D 프린팅 산업을 위해

서 초고온 물성 연구가 전산모사를 통해 진행되고 있으나, 연구결과의 신뢰성을 위해서는 초고온 물성 확보가 필수적임을 인식하고 연구개발을 시작함.

- 2000년초반 미국 Advanced Photon Source (APS)나 Advanced Light Source (ALS)등의 국립연구소에서는 옹스트롬 (10⁻¹⁰ 미터) 미만의 공간분해능과 100 피코(10⁻¹²)초 시분해능을 갖는 초고속 시분해 엑스선 산란 기법을 확보함 (그림 참조).



<3세대 방사광을 활용하여 초고속 구조변화를 측정하는 시분해 엑스선 산란 방법. 미국, 일본, 유럽 등에서는 국가에서 운영하는 시분해 거점 기반 연구소들이 형성되어 있음>

- 2010년에 SLAC National Lab에서 Linac Coherent Light Source (LCLS)라는 엑스선 레이저(X-FEL)를 개발을 함으로서 fundamental atomic frequency보다도 빠른 시간분해능을 구현함.
- 결맞는 엑스선 산란 기법을 활용하여 기존에는 측정이 불가능했던 ensemble average된 원자/분자 동역학을 측정할 수 있는 측정방법을 개발 중임 (그림 참조).



<Ensemble-average된 평형상태에서 원자들의 움직임을 측정할 수 있는 초고속 x-ray photon correlation spectroscopy 방법은 X-FEL에서 실현 가능한 기술임. 미국, 일본, 유럽에는 지난 수년간 극한환경내 초고속 구조 연구를 수행할 수 있는 기반을 확보함>

– 미국에서는 지난 십 수 년간 초고온/초고압 극한분야 연구의 활성화를 위해 지속적으로 많은 예산을 투자해왔음 (밑 테이블 참조).

Funding Agency	액수 (원)/ (기간)	분야
Department of energy (DOE), Basic Energy Science (BES)	17 억/ (2017)	Next generation corrosive-resistant material; chemistry under extreme environment (극한환경 소재 연구)
DOE, Office of fossil	86 억/ (2017)	Development of innovative technologies to enhance efficiency of power systems

energy		(초고온 환경 연구)
National Science Foundation (NSF)	50억/ (2009 - 2011)	Center for advanced vehicle and extreme environment electronics (극한환경 전자 소재 연구)
NSF	4.5 억 (2008)	Studying hydrogen at ultra-high pressure (초고압 연구)
NSF	72 억/ (2007-2010)	<u>COMPRES</u> : community facility and infrastructure development for high-pressure mineral physics and geoscience (초고압 시설 기반 구축)
NSF	71 억/ (2012-2015)	Consortium for material properties research in earth science: <u>COMPRES</u> (초고압 시설 기반 구축)
Air-force Research Lab	220 억/ (Since 2017)	Develop high speed, high temperature structural analysis methods and technologies for extreme operating conditions in current and future air vehicles (초고속, 초고온 연구)
Air-force Research Lab	200 억/ (Since 2017)	Investigates and develops energetic materials and technology that safely and securely optimize survivability, cost, and weapon lethality for air-delivered munitions (극한환경 연구)
Air-force Research Lab	90 억/ (Since 2017)	Develop and evaluate lightweight, active, adaptive, multi-functional, high temperature, and durable material systems for extreme environments and hypersonic applications (초고온 및 극한환경 연구)

DOE, BES	~2,400 억/ (2017)	Construction and instrumentation (대형 시설: LCLS-II, APS upgrade ect.))
NSF	17 억/ (2010)	Development of electrostatic levitation chamber at Spallation Neutron Source (초 고온 연구)
NSF	4.5 억/ (2012)	Studying ordering and phase transitions in supercooled metallic liquids and glasses (초고온 연구)
NSF	4.2 억/ (2013 - 2015)	Investigation of deeply undercooled liquids and high temperature phase-transitions (초고온 연구)

<미국 초고온/초고압 극한연구 활성화를 위한 연구 펀딩 사례들>



<미국, 일본, 중국, 유럽등에 국가에서는 초고온 연구를
수행할 수 있는 ESL, EML, AL 장비들을 운용하는 거
점 연구소들이 있음>

- (중국) 최근 중국은 기초과학에서의 노벨상 수상과, 극한 관련 기술개발을
통한 신산업 창출을 목표로 매우 활발히 극한 전문연구기관들을 설립, 투
자를 확대하고 있음.

- 600 명 규모의 **초고압연구소** (HPSTAR: Center for High Pressure Science & Technology Advanced Research, 2012년) 설립
- 세계선도 연구역량 강화를 목표로 한 중국 과학기술 발전 중장기 계획 (16개 핵심사업으로 구성)에서 초고온, 초고압, 극저온, 고자장 등을 구현할 수 있는 **다중극한연구소 사업 (SECUF)**을 4위에 선정하여(2014년) 시행 중에 있음.
- 또한, 최근 초고온 환경을 발생시키고 초고온 물성을 측정할 수 있는 정전기 부양 장치 (electrostatic levitation (ESL))를 완성하여 보급하고 있으며, 우주정거장에 설치를 추진하고 있음.
- 중국은 극한 과학 투자로 자국내 **극한 장치 개발 산업을 촉진시키고자 함** .



<미국, 중국, 유럽 등의 국가에서는 in-situ 초고압 연구를 진행 할 수 있는 기반을 십 수 년 동안 준비함>

- (일본) JAXA에서는 ground-base ESL 뿐만 아니라 international space station 에서 정전기 부양장치 (ESL)를 설치하여 초고온 실험을 다양한 중력 상태에서

극한 물성 및 극한 소재 개발 연구를 수행하고 있음.

- 또한 ESL 장치를 세계최고 수준의 3 세대 광원 (Spring-8)에 설치하여 실시간 원자 구조 측정을 하는데 성공하였다.
- 오사카 대학의 극한연구소(Kyokugen)의 경우 초고압-극저온 환경으로 이행함에 따라 나타나는 주기율표 상 원소의 초전도 현상을 측정하는 것을 주요 연구 주제로 하고 있으며, 초고압-극저온 환경에서 반도체, 금속, 초전도체로의 상전이 거동을 관측하고 있음.
- 2000년 중후반에 Spring-8에 시분해 빔라인을 구축하는 것으로 시작으로 2012년에는 세계에서는 두 번째로 X-FEL을(SACLA) 구현을 함으로서 최근에 많은 결과들을 보여주고 있는 실정임.

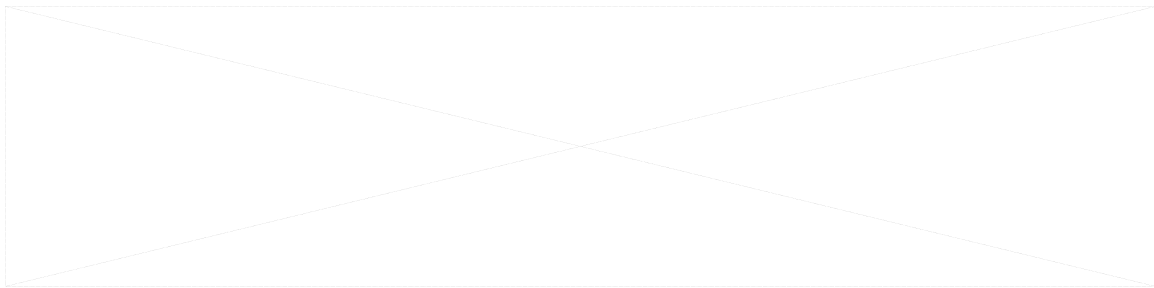


- 도쿄대학의 경우 멀티엔빌을 이용한 대규모 압축이나 다이아몬드 나노필러를 이용한 초고압화 연구를 수행하여 500 GPa에 육박하는 초고압 극한환경을 구현한 바 있음

■ (유럽) 독일 DLR에서는 ESL, EML, AL등의 초고온 환경 구현 장치들을 방사광에 (PETRA-III) 구현을 하여 실시간 구조 및 물성 측정 실험 등을 수행하고 있고 유럽의 방사광인 ESRF에는 여러 개의 초고압용 빔라인들이 운용되고 있

음.

- Thermolab project (2009~2014)는 전세계 10 여 국가가 참여하는 ESA 의 철강소재 물성 및 신강종 개발 연구사업으로써 초고온 열물성을 측정하였음.
- 유럽 또한 ESRF라는 유럽공동체가 운영하는 빔라인에 시분해 빔라인을 90년대 말부터 구축하여 많은 연구 결과 및 기술들을 확보해왔으며 2017 년도에 세계에서 가장 큰 규모의 X-FEL (Euro-FEL)을 구축함으로써 앞으로 최고 수준의 시분해 기술을 확보하게 되었음.
- 최근에는 4-세대 가속기 (EURO-FEL)에 DAC이나 dDAC등의 초고압 환경 구현장치들을 설치하여 초고속 물성 및 구조 측정 실험에 첫걸음을 내딛고 있음 (밑의 그림 참조).



<해외 초고온/초고압 환경내 실시간 구조 연구가 가능한 시설들의 예>

나. 국내동향

- 국내의 초고압 및 초고온 연구는 선진국들에 비하여 활성화 되지 않아 많이 뒤쳐져 있는 현실임.
- 표준연, 서울대, 연세대 그리고 국방연구원 등에 30 GPa의 압력을 만들어 낼 수 있는 DAC을 활용한 연구들이 진행이 되고 있음.
- 최근에 표준과학연구원은 1 TPa/s에 동적 압력 환경을 구현 할 수 있는 dDAC 기술을 개발하였음.
- 표준과학연구원은 국내 최초로 정전기 부양장치를 개발하여 3500℃급 초고온 환경 구현 및 물성 측정 기술을 개발하고 있음.
- 전북대 플라즈마 응용 연구센터는 플라즈마 아크를 활용하여 약 5000 C의 초고온 환경을 구현 할 수 있는 기술을 보유하고 있으나, 정밀 물성 및 소재 평가를

위해서 초고온 물성 측정 기술 개발을 요청하고 있음.

- 국가 핵융합연구소 역시 초고온의 극한 환경에서 요구되는 소재의 물성 측정 및 소재 평가 기술 개발을 요청하고 있음.
- 최근 포항가속기 연구소는 4세대 광원인 XFEL 건설을 완료하여 피코초 이하의 원자시간단위에서의 물질의 거동을 연구할 수 있는 초고속 측정의 기반을 확보하였음. 이에 초고온 및 초고압의 극한 환경과의 결합 연구가 필요한 실정임.
- 제4회 과학기술예측조사 (2015~2035)에서는 초고온-초고압 (10만 대기압, 3000 C)의 극한 환경을 활용한 신소재 개발 기술을 예측하고 있으나, 기술개발은 아직 미미한 상태임.
- 국내에는 현재 두 가지 종류의 광원이 (PLS-II, PAL-FEL) 구축되어 있음. PLS-II에는 시간분해 연구 인프라가 없음. PAL-FEL에는 초고속 시분해 실험이 가능하지만 한 번에 한 가지 종류의 실험만이 가능한 한계가 있고, 특히 ‘극한환경’과 같이 난이도가 높은 상황에서 초고속 시분해 측정을 할 수 있는 연구 및 기술 기반이 없음.

다. 국내 극한연구 수요에 대한 시사점

국내 극한연구의 수요를 조사하기 위해서, 세부 기획위 활동의 국내외 연구동향 파악과 더불어, 극한 기술 수요조사서와 특허 분석을 실시하여 다음과 같은 시사점을 분석하였음.

■ 시사점 분석:

○ 현황 분석

- 우리나라의 초고온/초고압 분야의 극한 연구는 선진국에서 연구성공사례를 개별 연구자가 추적, 모방하는 수준에서 진행되고 있음.
- 초고온/초고압/초고속 극한 연구는 막대한 초기 예산과 장시간의 원천기술 축적이 요구되나, 국내에서는 아직 본격적인 투자가 이루어지지 않아 자생적 극한기술 축적은 미미함.
- 초고온/초고압/초고속 분야는 cutting-edge에 있는 연구영역으로써, 기술적 상용화를 위한 시장이 미미하거나 존재하지 않으므로 민간주도의 연구와 인력

양성에 어려움이 있음.

－ 한국표준과학연구원, 전북대 플라즈마 응용센터, 포항가속기 연구소, 국방 과학연구원 등 국내에서는 초고온/초고압/초고속 기술이 일부 구축되어 있으나, 극한 기술의 기술적 난이도와 활용도가 서로 상이하며, 극한 환경 구현에도 불구하고 실질적인 신뢰도 확보를 위해서는 측정 및 평가기술 개발이 적극적으로 이루어져야 함.

○ 전망 분석

－ 21세기 새로운 과학적 발견 및 발명을 통해 학문적 기술적 뿌리를 확보하여 first mover 로서 자리매김 하기 위해서는 미지의 미개척지인 극한 연구에 집중해야 함.

－ 특히, 미래 신기능성 소재 및 에너지 신물질 개발은 4차 산업 (금속 3D 프린팅, 인공지능, 로봇 등)의 성공에 필수적인 요소로써, 초고온 초고압의 극한 환경의 구현과 제어, 활용을 통해 이루어지며, 보다 근본적인 제어와 활용을 위해서는 실시간으로 물성 및 구조를 측정하고 분석 할 수 있는 기술개발이 요청됨.

－ 조사된 초고온/초고압 관련 특허들은 실제 상용화 단계에 있고 다루는 고도나 압력의 영역이 본 과제의 초고압 개념보다 100~1000 배 이상 낮은 편임. 따라서 초고온 및 초고압 상태 물질의 열적 특성을 측정하기 위한 새로운 장치 개발과 극한 환경을 활용한 신물질 개발은 원천특허를 확보할 가능성이 매우 높음.

－ 극한 설비 구축 외에도 기 구축된 극한 설비를 운용, 및 활용할 수 있는 연구지원제도 마련하여 극한 연구의 단계별, 시기별, 역량별 연구지원으로 극한 연구를 활성화 할 필요가 있음.

－ 특히, 연구의 규모와 지식 추적과 전문성 유지 등이 필요한 에너지, 국방, 환경, 항공우주 등의 극한연구주제는 국가 안보와 관련이 있으므로 정부출연 연구원에서 담당하며, 극한 연구의 허브를 담당해야 함.

－ 제4회 과학기술예측조사 (2015~2035)는 초고온-초고압 (10만 대기압, 3000 C)의 극한 환경을 활용한 신소재 개발 기술을 예측하고 있으므로, 시

급히 진행될 필요가 있음.

* 다음의 아래는 극한기술 수요조사서의(초고온-초고압 분과 40 여개) 분석과 초고온/초고압의 키워드로 특허 조사로써, 4가지 종류로 분류된 특허 항목들을 도출하였음.

■ 기술수요조사서 분석:

극한환경 인프라 분류	극한 연구 주제	필요한 극한환경 조건
고출력 레이저 Shock	- 레이저 내폭조사에 의한 고에너지밀도플라즈마 발생 및 계측 기술 개발 - 신물질 개발을 위한 극한 물리 환경 구현 및 초고속 물성분석 기술개발 - 초고강도 세라믹 소재개발을 위한 초고속레이저 피닝 기술 - x 선자유전자레이저와 초강력레이저의 결합을 통한 극한물질의 초고속 연구 플랫폼 개발	- Terawatt 급의 강력 펄스 레이저 (펨토초, 나노초)와 실험을 수행 할 수 있는 in-situ 시료 환경 - 초고속 구조 및 물성 변화를 측정할 수 있는 엑스선과 레이저 타이밍 (fs ~ ps) 장치와 산란 패턴을 측정 방법
초고압 다이아몬드 엔빌셀	- 초고온/초고압 과도 경로제어에 대응하는 실시간 상전이 기구 규명 - 포항방사광가속기 초고압-초고온 빔라인(end-station) 구축 및 활용	- 초고압 상태를 (~100 GPa) 구현 할 수 있는 실험 환경 - 초고압과 초고온 상태를 동시에 구현 할 수 있는 기술

	• 초고압 혹은 초고온 조건을 이용한 신물질 합성 및 구조 분석/물성 측정 • 초고압 초미세구조 실시간 이미징 및 분광분석 기술 개발 • 초고압/고온에서 나노기공 형성 기구 규명을 통한 나노포러스 금속의 형상제어 기술 개발 • 초고온/초고압 환경에서 발생하는 안정상/준안정상의 상태방정식(Equation of state, EOS) 측정	• 시료의 온도, 압력 및 구조의 변화를 실시간 측정 할 수 있는 시료 챔버 • In-situ 실시간 시료의 온도, 압력, 물성 및 구조를 측정할 수 있는 통합 측정 시스템
비접촉 부양환경	• 핵융합 플라즈마 대면 후보소재의 초고온 열물성 데이터베이스(DB) 개발 • 초고온 소재 DB 및 다변화 원료 기반 실운용 시스템 3D 프린팅 기술 • 부양환경 다목적 신물질 합성 및 물성 측정 플랫폼 개발 • 부양 환경 초고온 열량 측정 기술 개발 • 3500℃급 초고온 열적 재료물성 정밀측정 장비구축 및 신합금 개발 활용	• 초고온 상태 (2000 ~ 3500℃)를 구현 할 수 있는 고출력 레이저 • 초고온 및 액체상태의 시료를 다룰 수 있는 비접촉 부양환경 • In-situ 실시간 시료의 온도, 열물성 및 구조를 측정 할 수 있는 통합 측정 시스템
아크가 열풍동	• 우주물질 지구 진입 시의 초고온 극한환경 모사 및 평가기술 연구 • 초고온/초고속 충격 실험 및	• 초고온 (< 5000 ℃)) 및 초고속 (< 마하 5) 시료 환경 • In-situ 실시간 물성

	멀티스케일 해석 기술 개발을 통한 물성 데이터베이스 구축 • 초고온 환경에서의 소재 보호를 위한 초고온 세라믹스 코팅 기술 개발	및 구조 측정
--	---	---------

<극한 연구 소요조사로부터 발굴된 초고온/초고압 4대 분야>

■특허분석:

- 초고온-고압 상태를 만들고 측정을 하기 위해 필요한 장비/기술

- 초고온-고압 상태에서 신 물질 제작
- 초고온-고압 상태를 다뤄야하는 응용 분야
- 초고온-고압 상태를 견딜 수 있는 물질

3. 개발목표 및 내용

에너지, 항공우주, 국방 분야의 기술이나 관련 정보는 대부분 초고온/초고압 극한 환경에서 발생하는 것으로서 국가의 안보와 차세대 경제발전의 교두보 확보와 밀접하게 연관되어 있어 다음의 핵심 연구주제들이 초고온/초고압/초고속 극한 분야 연구 활성화에 필수적일 것으로 판단함.

가. 최종목표

초고온-초고압 (온도 6000 K, 압력 100 GPa)의 개별 및 융복합 극한 환경의 구현과 초고속 실시간 물성 추적 기술 개발 (밑의 그림 참조).

- 초고온/초고압 극한 환경 구현 및 제어 기술 플랫폼 개발
- 초고온/초고압 극한 환경 융합물성 측정 기술 개발
- 초고온/초고압 극한 환경 활용 신물질 개발
- 극한 연구 활성화 지원 시스템 개발



<초고온-초고압 극한 연구 플랫폼의 Schematics>

나. 단계/연차별 목표

- 1 단계 목표: 온도 > 2500 K 초고온 환경, 50 GPa 압력, ~ TPa/s 동적 압력 극한 환경 구현 기술 개발 및 실시간 구조 측정 기술 개발. 극한연구 이용자 수요 조사 및 이용자 협회 구성.
- 2 단계 목표: 온도 > 3500 K 단일 초고온 환경, > 100 GPa 및 5000 K 복합 초고온-초고압 환경 구현 및 시분해 구조 및 열물성 측정 기술 개발. 다중극한 연구를 위한 이용자 시설 인프라 구축 및 R&D 핵심 실험실 추가 구성.
- 3 단계 목표: 온도 > 6000 K, 압력 > 100 GPa, 동적 압력 1 TPa/s 다차원 극한환경 구현 및 초고속 시분해 원자-분자 구조 추적 기술 개발. 이용자 협회를 주축으로 한 극한 환경 연구 인프라 운영 및 과제 개발.

다. 세부과제 구성 및 연구개발 내용

1 초고온-초고압 극한환경 구현 및 제어 기술 플랫폼 개발

국내에서는 초고온 및 초고압의 환경 구현과 제어가 선행되어 극한 환경에 접근이 용이해야 관련 극한 물성 연구 및 금속, 반도체, 산화물 등의 초고온 내열 소재 개발 연구가 활성화 될 수 있음. 따라서, 초고온-초고압의 개별 및 다중 극한 환경을 구현하고 제어하는 다음의 기술을 개발해야 함.

① 초고온 Aerodynamic Levitation (~ 3000 K) 개발 및 라만 및 엑스선 산란을 활용한 실시간 원자-분자 구조 물성 측정 기술

: 항공우주, 발전, 초음속 비행체 개발에 필요한 극한 환경 구현 및 초내열 산화물 소재의 초고온 구조 물성 측정

② 초고온 Electrostatic Levitation을 활용한 금속 및 반도체 물질의 초고온 (up to 5000 K) 물성 측정 기술 개발

: 금속 3D 프린팅, 핵융합 발전로 소재, 에너지 발전을 위한 초내열 터빈 소재, 초음속 비행체 소재 개발에 필요한 극한 환경 구현 및 물성 측정 기술

③ Diamond Anvil Cell 기술과 레이저 가열 기술을 이용한 초고압-초고온 (~ 100 GPa, 5000 K) 환경 구현 기술과 가변 압력 (1TPa/s)에 따른 신소재 개발 기술

: 고밀도 에너지 신물질 개발, 무공해 배터리용 신기능성 물질 개발, 국방소재를 위한 물질의 상태도 제작, 준안정 비평형 신물질 개발에 활용.

2 초고온/초고압 극한환경 융합물성 측정기술 개발

극한 환경 융합 물성 측정 기술 개발은 에너지, 항공우주, 국방, 환경 소재의 물성을 측정하고 평가하는 기술 개발로써, 기초과학면에서 원천 측정 기술 개발로 학문적 기술적 뿌리 확보뿐 아니라, 국내에서 개발된 극한 환경 소재의 신뢰성을 확보하여 미래의 국내산업의 대외적 경쟁력을 담보하기 위해 다음의 기술이 우선적으로 확보되어야 함.

① 초고온 초고압 상태에서 일어나는 물질의 열/전기/자기/기계 물성 및 구조변화 산란 측정기술 (엑스선, 중성자 및 라만 산란 등).

: 초고온/초고압 환경내에서 발견된 신물질의 특성 평가 및 극한소재의 물질 상태를 결정하고 상태변화를 실시간으로 평가하는 기술

② 원자 시간 (마이크로초에서 피코초)에서 물질의 변화를 근본적으로 이해할 수 있는 시간분해 엑스선 측정 기술 개발

: 극한 환경에서 형성되는 물질의 근본 메커니즘 규명 및 국방소재의 신뢰성 확보를 평가하는 기술

3 초고온-초고압 환경 활용 신물질 개발

제4회 과학기술예측조사 (2015~2035)에서 예측했듯이 초고온-초고압 (10만 대기압, 3000 C)의 극한 환경에서는 다양한 신물질을 개발할 수 있음. 따라서 본 연구에서는 크게 에너지, 및 국방 소재 개발의 활성화를 위해 아래의 기술을 개발해야 함.

① 다차원 비평형 경로 연구를 통한 극한 신에너지 물질 발견/합성 기술 개발

: 금속 수소, 고에너지밀도 고분자 신물질, 고강도 신기능성 물질, 무공해신개념 배터리 및 신에너지원 개발

② 다양한 고온 소재의 크리프 거동을 실시간으로 측정하여 고온 application 적합한 소재를 발굴함.

: 제트엔진, 핵융합로 발전, 국방 소재 개발

4 극한연구 활성화 지원 시스템 개발

극한 연구는 막대한 초기 투자비용과 고난이도의 극한 환경 구현, 제어, 측정 기술 개발이 필수적이라서 단기에 성과를 창출할 수 없는 속성이 있음. 또한 상업화를 통한 시장형성에 오랜 시간이 걸리므로 민간에서 인력을 양성하기 어려움. 그러나 극한 연구는 에너지, 항공우주, 핵융합, 환경, 국방 등 국가안보와 관련된 분야로써, 국가간 정보교환이 불가한 측면이 있으므로 독자적 개발이 필수적이며, 정부의 장기적, 지속적 지원책이 필요함. 따라서 아래의 극한 연구 활성화 지원 시스템 개발이 필요함.

예를 들면, 미국 Ames Laboratory의 Critical Materials Institute은 극한연구에 필요한 장비, 인력, 제원 등을 제공하기 위해서 One Integrated Team이라는 공동 운영체를 구성하였음. 또한 미국 DOE 산하의 Energy Office of Nuclear Energy에서도 전국에 퍼져 있는 국립연구소들의 활용 활성 방안으로 GAIN

(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) 프로그램을 제안 및 지원하여 막대한 예산을 필요로 하는 연구의 수행을 거점연구소의 활용을 통해서 해결하고자 함 (그림 참조).



<Big measurement를 위한 국가 종합적 연구 플랫폼 (미국)>

① 초고온/초고압/초고속 극한 연구를 국가 안보의 기초연구로써 담당할 기구 및 부처 설정.

: 미국의 경우 극한 기술을 DOE와 DOD, 그리고 AFRC에서 담당하고 있음.

② 초고온/초고압/초고속 극한 기술 개발을 미션으로 수행하는 거점 연구소 선정으로 극한 연구의 지속성 확보, 극한 연구시설 및 운영체계 마련과 극한 연구의 허브로 활용하는 정책 마련.

③ 극한 연구 이용자 협회를 구성하여, 해당 연구분야의 수요조사 및 이용자층 분석으로 국가의 미래를 결정하는 극한 연구주제 발굴 및 극한 거점 연구소의 연구시설을 효율적으로 활용하는 정책 개발 필요.

③ 개인 및 대학이 거점 연구소의 초고온/초고압/초고속 극한연구시설 활용을 위해 기초 연구과제 지원 정책 개발 필요.

라. 기술개발 로드맵

4. 추진전략 및 체계

: 초고온/초고압 분야의 극한 연구는 국가안보와 직접적으로 연관이 되는 에너지,



<초고온/초고압 극한연구 세부과제 로드맵>

우주항공, 국방 등의 분야의 기술 확보가 필수적인 분야임에도 불구하고 막대한 초기 예산투자, 장기적 추적 가능한 지식 및 기술 축적이 가능한 연구 기반의 부재로 미국, 유럽, 일본 등의 선진국뿐만 아니라 최근에는 중국에 비해도 현격히 뒤쳐져 있음. 따라서 해당분야의 연구를 시급하게 활성화하고 단시간에 국가 안보에 필요한 기초과학 지식 및 기술을 개발하기 위해서는 정부주도하에 체계적인 극한 연구를 수행 할 수 있는 체계 및 전략이 필수적임. 궁극적으로 해당 극한 연구분야를 활성화하기 위해서는 다음과 같이 세 가지 연구 분과위와 이를 조율할 수 있는 운영협의회가 필요함.

- 초고온/초고압 연구기반 분과위
- 초고온/초고압 핵심 주제/콘텐츠 발굴 분과위
- 초고온/초고압 연구 활성화 전략 분과위

가. 추진체계

□ 연구 사업단 구성

○ 초고온/초고압 연구기반 분과위

- 초고온/초고압 연구 기반 분과위의 주요 기능은 해당 극한 환경의 구축, 제어, 측정에 필요한 통합적 극한 연구기반의 구축을 주도함.
- 해당 분야의 극한 연구를 주 미션으로 수행하는 동시에, 협동 연구 및 대학 기관의 허브 역할을 할 수 있는 거점 연구소를 기반으로 구성됨.
- 장기적으로 지식 및 기술 축적이 가능하고 접근이 가능한 동시에 정부의 요구에 민첩하게 반응을 할 수 있는 기관에서 극한 연구 기반 구현 역할을

담당함.

○ 초고온/초고압 핵심 주제/콘텐츠 발굴 분과위

- 초고온/초고압 분야의 극한범위를 설정하고 국가안보에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 기초과학의 핵심주제를 도출하기 위해 구성함.
- 초고온/초고압 극한 연구분야에 실질적으로 활동을 하고 있는 전문가들로 구성하여 지속적으로 해외 선진 기관의 연구방향, 기술수준 그리고 수요 등을 파악함.
- 최근 국가안보 현황 및 앞으로의 동향을 파악하고 대응 할 수 있도록 연구 주제의 방향을 제시함.

○ 초고온/초고압 연구 활성화 전략 분과위

- 극한 연구 활성화 전략 분과위는 궁극적으로 극한연구 기반 활용의 활성화를 목적으로 한 이용자 협회를 구성함.
- 극한 연구 기반과 극한 핵심주제 도출 분과의 효율적 활용을 위한 연구 지원 프로그램 개발, 인력 양성 프로그램 개발, 그리고 연구 문화 및 성과물 홍보 체계를 마련함.
- 극한 연구 활성화 전략 분과위는 초고온/초고압 연구 전문가들로 구성된 운영위원회의 지속적인 자문을 받아 운영함.

<<사업추진체계도>>



□ 사업기간 및 지원규모

○ 총 사업기간 및 지원규모:

- 연구기반 분과위 (10년, 100억원): 세계적 수준의 초고온/초고압 극한 연구기반을 구축하기 위해 100억원 규모로 운영
- 핵심 주제/콘텐츠 발굴 분과위 (10년, 10억원): 국가 안보에 관련된 극한 범위와 주제 등을 지속적으로 파악하고 연구방향 및 핵심 주제들을 도출하는 프로그램을 운영함.
- 연구 활성화 전략 분과위 (10년, 10억원): 초고온/초고압 분야 연구의 활성화를 위한 연구지원 프로그램 개발 및 이용자협회를 운영함.

나. 추진전략

: 초고온/초고압 극한환경을 실험실 단위에서 구현하고 연구를 수행 할 수 있는 연구 기반과 시급한 국가 안보에 관련된 핵심과제를 도출할 수 있는 연구를 수행하는 동시에 지속성 및 확정성이 있는 극한 이용자 커뮤니티의 확보를 위해 다음과 같은 전략방안을 제시함.

- 초고온/초고압 연구 기반 구축
- 허브연구소 기반 통합 연구 플랫폼 구축
- 국가 안보 관련 극한 기초연구 방향 설정
- 지속적인 성장이 가능한 극한 연구 생태계 조성

□ 초고온/초고압 연구 기반 구축

- 초고온/초고압 분야의 통합적 연구 기반 구축은 막대한 초기 예산을 필요로 하기 때문에 국내에 기존에 구축된 극한 연구기반의 활용 및 성능 개선 전략이 필요함.
- 해당 극한 환경 구현 및 측정 기술은 기술력을 확보, 유지, 관리하고 관련 정보를 지속적으로 보유 및 전파할 수 있는 허브 연구소를 설정하여, 극한연구를 기관의 미션으로 설정하여 중장기적으로 연구개발이 이루어져야 함.
- 허브 연구소는 극한과 관련된 기초표준 물성 측정 뿐 만 아니라, 다양한 분야

에서 필요로 하는 물성 측정과 측정 물리량의 신뢰도 연구로, 학계 및 산업계의 접근이 용이함과 안정적 연구기반 시설을 제공함.

- 기존에 여러 기관에 걸쳐 개발된 개별 극한 용소 기술의 융합을 통해 통합적 극한 플랫폼을 구축함.
- 국가 안보 기초과학 발전에 시급성이 있는 인프라 요수 수렴 및 주제를 발굴하고 구축된 연구기반의 활용성 확대를 유도함.

□ 허브연구소 기반 통합 연구 플랫폼 구축

- 초고온/초고압 분야의 극한 연구는 막대한 초기 투자비용과 오랜 시간동안의 기술 및 지식의 축적을 요구함. 따라서 극한환경의 통합적 구현, 제어, 측정 기술을 종합적으로 개발하고 기술 인프라를 제공할 수 있는 허브 연구소의 설정이 필요함.
- 국제 경쟁력이 있는 연구를 수행하기 위해 국가가 중점적으로 도전해야 할 연구 과제를 발굴하고, 거점 극한 시설을 효율적으로 운영, 관리하기 위한 자문 연구 협의체 구성이 필요함.

□ 국가 안보 관련 극한 기초연구 방향 설정

- 초고온/초고압 극한 연구 분야는 에너지, 우주항공, 국방 등 국가안보와 밀접한 기초연구분야이므로 기존의 우연의 발견/이해보다는 국가안보 현안 등 극한연구 시급성 파급 활용성을 고려한 목적성이 있는 연구 전략을 제시함.
- 초고온/초고압 극한환경의 구현, 극한 현상의 발견, 그리고 극한 기술의 활용 등을 동시다발적으로 수행할 수 있는 핵심 연구주제 발굴하는 동시에 다면적 연구전략 발굴이 필요함.

□ 지속적인 성장이 가능한 극한 연구 생태계 조성

- 현재 국내에는 해당 분야의 관련 산업시장의 발전이 미흡한 시기이기 때문에 국가 주도의 허브 연구소 지정과 극한연구 관련 연구과제 개발로 확장성과 지속성의 근간이 되는 연구체계 구축 필요함.
- 극한 연구는 국가의 미래 신과학 및 신산업 발생의 단초를 마련하는 것으로써, 중장기적인 지속적 연구가 필요하므로 극한 연구 인력을 양성하기 위한

프로그램 및 자생이 가능한 극한연구 커뮤니티 형성이 필요함.

- 극한기술은 4차 산업 혁명의 지속적인 성장에 필수적인 기술을 제공하는 고부가가치 산업이지만, 난이도가 높은 기술력을 요구하기 때문에 상용화 지원 정책의 수립이 필요함.
- 학계 및 산업계가 기 구축된 극한 연구시설의 활용으로 다양한 분야의 기초원천연구를 수행할 수 있도록 연구비 지원 정책 마련을 구안함.

5. 파급효과

가. 과학기술적 파급효과

- 초고온/초고압/초고속 극한 연구는 에너지/항공우주/환경/국방 등에 필요한 핵심 원천기초연구 분야로써, 본 연구분야 개발로 학문적 독립과 기술적 뿌리를 확보하게 됨.
- 에너지, 소재 등 분야에서 극한환경 활용을 이용한 초고효율 및 원천 기술이 확보될 경우 인류가 수 십 년 내에 직면할 에너지 고갈 및 공해 문제들에 대처 할 수 있음.
- 원자력 및 핵융합 등 4차 산업 발전 체계용 코어소재로 활용가능함
- 인공지능, 로봇, 금속 3D 프린팅 등 4차 산업에 필요한 에너지 원과 소재를 제공할 수 있음



<4차 경제혁명을 기반으로 급작스럽게 확장될 것으로 예상되는 인류 생활권을 유지하기 위해서는 새로운 에너지 자원의 개발이 필수적임>

나. 경제 산업적 파급효과

- 초고온, 초고압, 극저온, 초고속 등의 성격을 갖고 있는 21세기형 산업인 핵융합 발전, 항공우주 및 국방, 자동차 엔진, 수소신에너지, 신소재 분야에서 보다 고효율, 고기능성의 운용을 가능케 할 것으로 기대됨.
- 예를 들면 현재 원자력 발전소등의 가동 온도를 현 400 C에서 900 ~ 1000 C 까지 올리면 효율성이 두 배 이상 증가하게 된다. 결과적으로 자원의 효율성을 현격히 증가 시키면서 오염도를 두 배 이상 낮출 수 있음.



<초고압 상태에서 처리된 고에너지 물질
(CO)의 exothermic reaction>

- 에너지, 소재 등의 분야에서 극한환경 구현과 운용기술이 확보될 경우 현재와 다른 산업적 패러다임의 변화가 발생할 것으로 기대됨. 즉 현재 에너지 단지와 같은 집중적으로 운용되는 국가기간산업이 도심 내에서 운용되는 주유시설과 같은 소규모의 분산형 시설로 변화될 수 있으며, 에너지 소비처에서 바로 생산과 공급이 이뤄지는 새로운 산업적, 경제적 혁신이 가능할 것으로 기대됨.

- 초고압 연구는 공해를 발생하는 에너지 문제를 해결할 수 있음. 예를 들면 자원의 매립량이 제한적인 금속보다 지구에 풍부하고 공해가 없는 CO나 수소 등을 초고압 상태에서 처리를 할 경우 고효율 에너지 매개체로 쓸 수 있음 (그림 참조).

이처럼 극한 연구의 가치는 초고온 및 초고압 환경이 필요한 핵융합 발전과 관련된 소재 산업, 철강 및 국방 소재 산업에 적용되어 궁극적으로는 현재 시행착오에 의해 생산하고 있는 극한 소재 개발의 비용을 줄일 수 있다, 궁극적으로 기존의 점진적인 발전 모델을 탈피하고 혁신적인 진보를 할 수 있는 실마리를 제공해 준다.



<산업혁명과 극한연구 발전의 비교>

다. 사회문화적 파급효과

－ 21세기는 달 및 화성 탐사 뿐 아니라, 에너지 확보를 위한 지구 자원 탐사 등으로 극한 환경에 대한 인류 활동이 요구되고 있으며, 자연 환경과 어울리면서도 보다 효율적인 생존 전략을 위해서 핵융합 발전과 같은 제어 가능한 극한 환경 활용의 길을 모색하고 있음.

－ 핵융합 발전, 수소 신에너지, 우주항공 등의 다양한 산업분야에서 고효율의 극한환경 형성과 운용기술이 확보될 경우 도심 내 소규모 분산형 에너지 시스템의 운용을 통해 종래 님비현상으로 인해 국가, 사회적 문제를 유발해 왔던 도심 내 에너지설비, 송전시설 등의 건설에서 자유로울 수 있을 뿐만 아니라 정부의 관련 정책수행도 보다 원활할 수 있음.

－ 추격형 연구 문화에서 first mover 형 연구문화를 정착시킬 것으로 기대.

6. 소요예산

<I단계(3년), II단계(3년), III 단계(4년) 단계 연구개발예산>

(단위: 천원)

세세부 과제명	연간 연구개발예산			
	I 단계	II 단계	III 단계	
초고온-초고압 환경 구현 및 제어 기술 개발	1,000,000	1,500,000	1,000,000	
초고온-초고압 물성 측정 기술 개발	1,000,000	1,500,000	1,000,000	
초고온-초고압 환경 활용 신물질 개발	1,000,000	1,000,000	1,000,000	
핵심주제/콘텐츠 발굴 분과위 구성 및 운영	300,000	300,000	400,000	
연구 활성화 전략 분과위	300,000	300,000	400,000	
세부과제 합계	3,600,000	4,600,000	3,800,000	총 120 억원

7. 특이사항

가. 국가R&D 전략과의 연계

- 현재 국가 R&D 사업에서는 제 4차 산업의 중요성을 강조하고 있고 이
시점에서 필연적인 경제/사회/문화 전 분야에서 실마리를 제공할 수 있는

극한연구는 필수적임. 2017년 수행된 ‘4차 산업혁명을 선도하는 주요 기술 기술수준평가’ 보고서에 따르면 국방, 우주 및 에너지 분야와 관련된 극한산업의 파급효과는 아주 높으나 현재 국내 기술의 수준은 선진국 대비 매우 취약한 것으로 나타남. 특히 극한연구 분야의 전문성에 있어서도 현재 빠른 발전을 하고 있는 중국에 비해도 이미 뒤지고 있기 때문에 ‘극한연구의 활성화’의 시급성이 요구됨.



<극한 기술 파급효과 vs 국내 기술수준>



<4차 산업혁명을 선도하는 주요 기술 기술수준평가 (과학기술정보통신부, 정보통신기술진흥센터 2018)>

나. 타 국가연구개발사업 유사과제와의 차별성

- 극한 연구는 에너지, 항공우주, 핵융합, 환경, 국방 등 국가안보와 민감하게 관련된 분야임. 때문에 기존의 소규모 개인과제 위주의 연구전략 보다는 국가주도의 거점 연구소의 연합으로 운영되는 것이 바람직함.
- 기존에는 초고압, 초고온 환경을 구현하고 물성을 측정하려는 개별적 연구과제들은 있었음(그림 참조). 하지만 해외의 선진 연구기관과 경쟁을 하면서 궁극적으로 새로운 물성을 발견하고 신물질을 개발하는데 필요한 종합적인 기술력을 확보하기 위한 연구개발 사업은 없었음. 예를 들면 전북대의 초고온 플라즈마 풍동 사업은 막대한 예산을 들여서 초고온 환경을 구현 할 수 있는 장비를 구축하였지만, 그 환경을 제어하거나 그 환경 안에서 물성을 측정 할 수 있는 기술력은 부재한 상태임. 때문에 의미가 있는 결과물의 생성이 어렵고 이용자의 시설 활용도 또한 낮은 편임. 반면 포항방사광 가속기 같은 기관에 구축된 연구시설은 범용성은 상대적으로 높을 수 있으나 극한연구화 특화된 연구기관이 아니기 때문에 전문성 및 경쟁력이 현격히 떨어짐.
- 국내에 극한연구가 자리를 잡기 위해서는 단순히 극한환경을 구현하는 수준을



<국내 초고온/초고압 인프라 구축기관>

넘어서서 이제는 사용자의 필요에 의해서 환경의 조작/변경 및 제어가 가능하고 in-situ 상태에서 실시간 물성 및 물질 구조 측정이 가능해야 함. 궁극적으로 극한 연구가 성공적으로 활성화되기 위해서는 극한환경을 ‘구현’하고 그 안에서 일어나는 현상들을 ‘이해’하고 그 작동 원리나 파생된 기술들이 타학문이나 실용에 적용될 수 있는 ‘돌파’의 요소들이 준비되어야 함. 지금까지 극한연구 분야에서 이러한 종합적인 플랫폼을 구성하는 (그림 참조) 연구 개발 사업은 없었음.



<종합적인 극한연구 활성화를 위해 필요한 요소들>.

극한 환경 및 물성 측정 기술 개발의 어려움은 제 1차에서 4차까지 진행된 과학기술예측조사에 보듯이 기술 개발 자체의 어려움으로 발전이 어려웠음.본 세부에서 제시하는 초고온/초고압 극한 기술의 경우도 기술개발 자체의 어려움으로 기존에 개발된 바 없음.

－ 실제 기존 연구 과제를 통해 상용화된 열량 측정기술은 일반적으로 최대 1600 C 이하이고, 측정 속도는 분당 200 도 이하로써, 초고온에서 일어나는 빠른 반응에 의한 물질내의 변화를 측정하기는 매우 어려움. 또한 일반적으로 고체 뿐 아니라, 액체의 경우 접촉용기가 필요하므로 초고온을 형성한다고 해도 기존 접촉식 측정 방식에서는 오염과 불순물 형성을 피하기 어려움. 따라서, 초고온의 열적 특성을 안전하고, 정확하게, 그리고 오염없이 빠르게 측정하는 기술 개발이 필요함.

－ 기존 원자/입자 추적 측정 기술은, 시공간에 대한 평균 값을 구하는 것으로, 실제 원자 또는 미시 입자가 움직이는 피코 초 이하의 추적 측정 기술은 방사광을 제외하고는 실현된 바가 없으며, 상용화된 바도 없음.

－ 일반적으로 원자 구조와 분자구조는 별도의 측정 원리와 장치를 이용해 측정하

고 있음. 따라서 복잡한 물질의 경우, 상세 구조 파악의 어려움으로 물성 변화의 이해와 예측이 어려우며, 이는 신소재 및 신물성 개발과 이해에 장벽으로 작용한다. 이것은, 측정 원리가 서로 달라서 발생하는 것으로써, 물질 구조의 상세연구가 가능한 통합적 측정 기법 개발이 필요함. 또한 물질의 원자 및 분자 구조는 압력에 의해서 심각히 변하고, 이는 새로운 물성을 나타내는 원인이 된다. 따라서, 기계적 변화와 구조적, 열적 변화에 대한 동시 측정 기술 개발이 필요함. 이는 극한 환경을 활용한 신소재 또는 신기능성 특성의 형성 메커니즘을 파악하는데, 원자/분자 구조 실시간 동시 측정 기술 개발과 이에 따른 기계적 물성 변화를 측정하는 기술 개발은 핵심적임.

－ 따라서, 극한 환경을 활용한 신소재 개발은 극한 환경을 구현하고 제어할 수 있어야 하며, 극한 물성을 측정하는 기술 개발이 동시 다발적으로 진행되어야 가능함.

(2) 중력제어 지상플랫폼 및 측정기술 개발

1. 과제 개요

가. 과제의 정의 및 범위

1) 정의

지구중력(1 G)에 대비하여 마이크로중력 (백만분의 1 G)과 고중력 (5~10 G)를 지상에 구현, 제어, 활용하는 연구로써,

- 다양한 기초연구 분야 (생명, 의학, 인간생리, 연소, 재료, 우주/지구과학 등)에서 과학적 발견
- 고성능의 신약, 산업적 제품/부품 개발과 우주임무용 장비의 성능 평가 등을 가능하게 하는 연구

※ 무중력 ($\approx$ 마이크로중력, microgravity), 고중력 (hypergravity)



<무중력 우주환경 활용 및 우주기술의 스핀오프 (spin-off)>

2) 범위

본 과제는 우주공간의 직접적 플랫폼을 통한 무중력/고중력 극한 환경 활용 이전에 지상에서 모사장비, 시설을 이용해 무중력/고중력 모사 환경의 발생 및 활용 기술 모두가 동시에 요구되는 것으로 다음과 같은 기술적, 학문적 융합 (극한 바이오

포함) 성격의 주요 과제 범위를 제시함.

■ 무중력/고중력 활용을 위한 기반 인프라 기술 개발

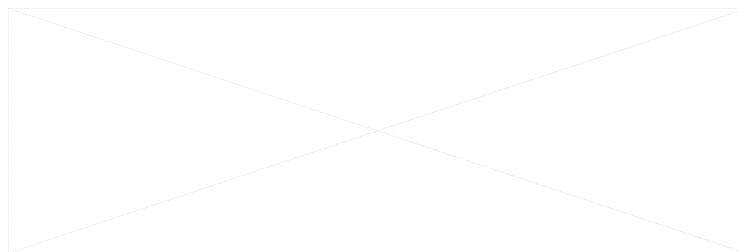
○ 극한 R&D 무중력/고중력 분야의 시스템 및 플랫폼 구축

- 무중력환경 모사를 위한 무중력시스템 개발 및 플랫폼 구축
 - ▶ Clinostat, 자유낙하탑, Levitator, 사운딩 로켓 등
 - ▶ 무중력 환경을 활용한 연구 (생명, 재료, 유체 등)에 필요한 시스템 및 플랫폼 구축하고 이를 통한 무중력 제어로 새로운 과학적 발견과 연구를 수행하는 기반장치 및 시설로 활용
- 고중력 환경 모사를 위한 Centrifuge 장비 개발/구축
 - ▶ G-force Centrifuge 시험장치
 - ▶ 고중력 환경을 활용한 연구 (생명, 의생리학)에 필요한 시스템을 구축하고, 고중력 환경에서 생명 또는 인간의 신체 변화 요인에 대한 이해를 통해 고중력 환경에 많이 노출된 분야의 해결연구에 필요한 기반장치로 활용

■ 생명/의학 연구 분야의 혁신적 기술개발

○ 무중력 (마이크로중력)에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구

- 종양조직에 마이크로중력을 이용하여 압력을 줄이게 되었을 때, 항암제 전달이 원활하게 이루어질 것으로 예상함
- 마이크로중력/고중력을 활용하여 항암제 전달과정을 연구하고 약물 전달을 용이하게 하는 시스템 개발
- 종양조직 내 마이크로중력과 약물전달, 항암효과와의 관계를 규명하고 최종적으로 난치성 종양에 약물전달을 효율적으로 하여 항암치료를 증진시킴



<정상조직 및 암조직의 약물 전달 과정>

○ 무중력 (마이크로중력)을 활용하여 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발

- 사람의 장기유사조직은 일반적인 세포배양과 다르게 실제 장기와 유사하여 질환 연구와 치료방법에 응용이 가능함
- 마이크로중력을 활용하면 삼차원 (3D) 장기유사조직의 배양이 매우 효율적으로 만들 수 있기 때문에 유용함



<삼차원 (3D) 장기유사조직 적용>

■ 재료/연소/유체 분야의 산업적 활용기술 개발

- (고성능 신소재 산업 활용 기술) 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학소재의 개발
 - 무중력 환경 하에서 재료를 용융하는 경우, 열적대류 및 침강/부유 현상이 일어나지 않으며, 정수압도 작용하지 않음. 특히, 용기를 필요로 하지 않으므로 용기 내벽과의 접촉이 없는 새로운 환경을 제공함 (지상에서 Levitator를 활용한 사전 연구)

나. 과제의 필요성 및 중요성

1) 경제적 측면

- 향후 인간의 우주로 삶의 영역 확대에 따른 무중력/고중력 극한 환경 활용 연구를 통한 산업, 경제적 기여가 가능한 미래산업 선점 및 부가가치 창출
 - 예로 국제우주정거장 (ISS) 플랫폼의 무중력 환경 활용 우주실험을 통한 스핀오프 (Spinoff)가 다양해지고 있음
 - 무중력 환경을 활용한 고순도 재료의 제품생산, 생명체의 다양한 유사장기 배양 등의 연구로 과학적 성과뿐만 아니라 부가가치 창출
- (세계적 이슈) 미래 우주탐사 과학기술의 방향
 - 우주공간의 무중력 환경을 활용한 기초물리 연구 및 이를 활용한 산업적 제품생산 연구
 - 민간의 우주여행 상품화 추진 및 우주산업을 통한 부가가치 창출 추진

2) 기술적 측면

- 무중력/고중력 환경은 지구상의 환경과 다른 조건을 인가하여 인간 등 생명

체, 다양한 물질 (재료, 유체) 등에 다른 물리적 현상이 발생함. 우주 활용이 본격화되면서 이러한 환경에 노출되는 빈도가 점점 증가하고 있는 상황에서 무중력/고중력 환경을 극복하거나 활용하여 과학/산업적 성과를 획득할 수 있는 연구 추진이 필요함

- 무중력/고중력 환경 극복: 우주라는 키워드가 예전에는 생소한 것이었으나 최근 유인 화성탐사, 우주관광 등이 민간까지 확대되고 향후에는 유인 우주탐사 시대를 맞이하게 될 것이 자명하므로 무중력 우주환경과 우주비행체의 지구재돌입 등에 따른 고중력 환경을 극복하기 위한 생명체의 안정성 연구가 선진국에서 활발하게 이뤄지고 있는바 국내에서도 관련 연구에 대한 확장이 필요한 시점임
- 무중력/고중력 환경 활용: 무중력/고중력 우주환경 (특히 무중력 환경)은 다양한 물질의 물리적 현상 등을 측정하는데 지상환경에 비해서 안정적인 조건을 제시하며 과학 실험 및 현상측정을 통한 결과를 지상환경에 활용 가능한 연구 분야임
- (학문적 이슈) 우주플랫폼 활용 이전에 지상 모사시설을 활용한 지상연구로 새로운 현상 및 물성 발견 가능
 - 우주공간의 무중력 환경을 활용한 연구를 통해 결과를 도출하는 데에는 장기간의 시간이 소요됨. 따라서 지상의 무중력 환경 모사시설 (예; 낙하탑, Levitator, Clinostat, 사운드로켓 등)을 활용한 새로운 생명 기전 현상 및 물질의 물성 등을 측정, 발견
- 지상 모사시설 활용 연구 후, 추가적인 검증 및 연구가 필요한 분야에 따라 국제협력을 통한 국제우주정거장 (ISS) 플랫폼 등을 이용한 무중력 환경 활용 연구 수행

3) 사회적 측면

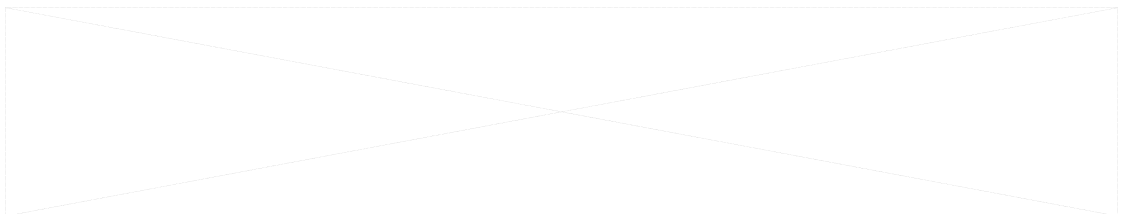
- 근래 들어, 미국항공우주국 (NASA)에서는 2030년대 인간의 직접적인 화성탐사를 위해 지구 근접 우주환경, 특히 무중력 환경에서 국제우주정거장 (ISS) 플랫폼을 활용하여 장기적으로 인간의 우주환경 적응 가능성에 대한 연구를 활발히 진행하고 있음.
- (세계적 이슈) 미래 우주탐사 과학기술의 방향
 - 지구를 벗어나 2030년대 유인 화성탐사 (고중력→무중력→저중력 환경 경험) 시대로 이행

- 미국 NASA 뿐만 아니라 민간기업 (예; Space-X 등)의 우주탐사/우주산업 활용 참여
- 우주공간의 무중력 환경에 따른 신체변화 및 생명 안정성을 위한 대응방향 연구 (NASA 등 국제우주정거장 건설/운영국가들은 2024년까지 우주 진출을 위한 플랫폼으로 국제우주정거장 활용. 이후 민간으로 이양 운영 논의 중)
- 우주공간의 무중력 환경을 활용한 과학적 성과와 산업적 활용을 통한 부가가치 창출을 동시에 추진하고 있음
- 국제우주정거장 활용 등 국내 연구 수요에 대한 기술적 발전 필요
 - 자유낙하탑 등을 활용한 무중력 환경 활용 분야의 연구 수요 증가와 생명 및 재료 등의 무중력 환경 활용 심화연구를 추진할 수 있는 궁극의 연구 플랫폼 활용이 필요한 시점임
 - 국제우주정거장을 활용한 우주실험용으로 직접 활용이 가능한 유인 우주기반 실험장비 시스템 개발 및 우주과학실험 수행의 기술력 제고

2. 국내외 기술개발 동향분석

가. 국외동향

- 해외 무중력/고중력 분야는 우주 및 항공, 국방 등의 분야에 대한 분명한 활용 목표를 갖고 다양한 분야 (생명, 재료, 유체 등)에 대한 연구가 진행되고 있으며 결과를 활용하고 있는 단계임
 - － 해외 선진국에서는 무중력/고중력 분야의 극한연구 플랫폼인 국제우주정거장 (ISS), 무중력비행기, 자유낙하탑, Centrifuge 등이 이미 구축되어 있으며 이를 활용하여 다양한 분야에서 결과를 도출하고 있음 (국내에서는 이와 관련된 플랫폼이 아직 미비한 상황이고 실제 관련 연구 수행 시에는 해외 플랫폼을 활용하고 있는 실정임)
 - － 최근 유인 우주탐사 분야의 관심이 높아지고, 우주인의 우주 장기 비행과 관련한 생명/의생리학 분야와 관련된 기술검증 우주실험에 집중이 되고 있음
 - － 특히, 최근 중국은 독자적인 우주정거장 플랫폼 건설을 수행 중에 있으며, 2023년까지 건설을 완료하고 이를 유인 우주탐사 및 무중력 실험을 위한 플랫폼으로 활용할 계획임
- 주요 국가별 국제우주정거장 (ISS) 무중력 환경 활용 우주실험 분야 비교
 - － 국제우주정거장 (ISS; International Space Station)
 - ▶ 미국 NASA, 유럽 ESA, 일본 JAXA, 러시아 FSA, 캐나다 CSA 회원국이 1998년부터 건설하여 현재까지 운영되고 있는 우주정거장으로써 우주환경에서 인간의 생리, 생물학적 특성, 물리학적 특성, 지구/우주관측 등이 가능한 우주실험 플랫폼 (*중국은 독자적으로 텐궁 운영)
 - ▶ 상대적으로 이용 비용 (수십~수백억 내외)이 많고 우주실험을 수행하기까지 준비 시간이 오래 걸림 (3~5년 내외)
 - ▶ 생명, 의생리학, 물리, 화학, 기술 개발/검증, 지구/우주과학 분야, 교육/홍보 등의 연구 분야에서 다양한 우주실험 임무가 수행되고 있음
 - ▶ ISS 운영 계획



<우주실험 분야 비교>

	ISS 활용 우주실험 ⇒ 유인 화성탐사 준비 및 우주의 산업활용
미국 NASA	■ 2010년대 ISS에서 수행된 우주실험 약 70%는 NASA에서 수행. 생물학/생리학, 물리학, 기술개발/검증, 지구/우주과학 분야에서 우주실험을 수행함. 주로 생물학/생리학 분야에 대한 실험에 중점 - 생물/생리학 실험 (동물학, 세포생물학, 결정성장, 미생물학, 식물학, 백신, 전반적 우주인 생물학 등) - 연소/화재안전, 유체흐름 및 재료 합성
일본 JAXA	■ 2010년대 ISS에서 수행된 실험의 약 15%는 JAXA에서 수행. JAXA도 NASA와 같은 4가지의 대 분야에서 우주실험을 수행. 주로 생물/생리학, 물리 (연소/유체/재료) 분야의 우주실험 진행
유럽 ESA	■ 2010년대 ISS에서 수행된 우주실험의 약 15%는 ESA에서 수행. JAXA와 매우 유사함. 주로 생물/생리학 분야와 물리 (연소/유체/재료) 분야의 우주실험을 수행

○ 국제우주정거장의 무중력 환경을 이용한 우주실험 활용 해외사례

- 2010년~2017년 동안 (Expedition23~Expedition54) 해외기관 (NASA, ESA, JAXA, CSA, ROSCOSMOS)의 ISS 활용 우주실험 수행 내용 분석
- 국제우주정거장에서 약 650여개의 임무가 수행되었으며 미국 NASA의 우주실험이 약 65%이상을 차지하고 있음(아래 그림에서 교육/홍보 관련 우주실험은 포함하지 않음)
- 해외 모든 기관에서 국제우주정거장에서 50%이상은 생명공학 및 의생리학 분야의 우주실험 수행되었음
- 최근 유인 우주탐사의 관심이 높아지고, 우주인의 우주 장기 비행과 관련한 생명/의생리학 분야와 이와 관련된 기술검증 실험에 집중이 되고 있음





○ 무중력 환경 모사 지상기반 시설

－ 운영 플랫폼별 무중력 환경 레벨 및 조성 시간



－ 자유낙하탑

- ▶ 낙하탑의 상단에서 실험장치를 자유낙하 시킴으로써 μ -G 환경을 형성하는 방식으로 상대적으로 이용 비용 (수백만원/회 내외)이 적고, 실험절차가 간소하여 전 세계적으로 널리 이용되고 있으나 μ -G시간에 제한 (~5초 이내)이 있음
- ▶ 짧은 시간의 무중력 (마이크로중력) 시간에 따라 주로 연소 (Combustion), 열유체 등의 실험들이 수행되고 있음

국가명	운영기관	명 칭	g-level	높이	낙하시간
미국	NASA	2.2s Drop-tower (Drag Shield)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	24m	2.2초
		Zero gravity facility (진공 drop channel)	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	155m	5.2초
유럽	ESA	Zarm Drop-tower (진공 drop channel)	$110^{-5} \sim 10^{-6}$	146m	4.5초
일본	MGLAB사 *현재비운영	(진공 drop channel)	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	150m	4.5초
	HASTIC	(Drag Shield)	10^{-4}	50m	3초
러시아	Makeyev State Rocket Center	(full scale space HW)	—	30m	2.4초
중국	National Microgravity Laboratory (NMLC)	(Drag Shield)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	116m	3.5초

— 무중력비행기(parabolic flight)

- ▶ 비행기가 포물선 모양의 궤적을 그리고 비행하는 동안 자유낙하 상태를 모사해 냄으로써 비행기 내부에 일시적인 μ -G 상태를 형성함
- ▶ 자유낙하탑에 비해 긴 μ -G시간 (20초 내외)을 형성할 수 있고 g-level을 조정할 수 있으나 상대적으로 실험비용 (수천만원/2 Flights) 많이 소요됨
- ▶ 운영국 : 미국 NASA, 일본 JAXA, 유럽 ESA, 러시아 GCTC, 캐나다 CSA 등
- ▶ 무중력 환경을 이용한 다양한 분야의 실험, 무중력 환경 체험용으로 활용

Non-Commercial Flight		Commercial Flight	
NASA (USA)	C-9B	Zero-G Corporation(NASA)	Airbus 300
CSA(Canada)	Falcon 20	Diamond Air Service(Japan)	MU-300/G-II
ESA(Europe)	Airbus 300	Atlas Aerospace(Russia)	IL-76 MDK
Gagarin Cosmonaut Training Center (Russia FSA)	Ilyushin II-76 MDK * 상업용으로도 이용됨		

나. 국내동향

- 국내에서는 무중력/고중력 분야의 연구가 전무하였으나 2008년 한국우주인배출사업을 통해 관련 분야의 관심이 높아졌고 이와 관련하여 일부 기초 과학 분야 (생명, 재료 등)의 연구가 수행되었음. 또한 공군 조종사의 고중력 영향에 대한 신체변화 등 생리학 연구가 일부 되었지만 해외와 비교해서 아직 기

초단계에 머물러 있음

- 한국항공우주연구원에서는 국내 최초로 한국우주인배출사업을 바탕으로 관련 기술과 활용 분야에 대해 연구를 수행해 오고 있음
- 국내에서는 무중력/고중력 환경 활용 분야 연구를 외국에서 직·간접적으로 경험한 연구자들이 소수 있으나, 관련 기술 개발 및 응용을 수행한 경우는 매우 적음
- 무중력/고중력 분야의 연구 인프라 또한 실험실 수준의 플랫폼을 활용하여 연구하고 있으며 실제 관련 연구 수행 시에는 해외 플랫폼을 활용하고 있는 상황임
- 국내 기반 인프라 사례 (대부분 시설 규모가 작고 매우 취약함)



다. 국내 극한연구 수요에 대한 시사점

- 무중력/고중력 분야 핵심 연구주제의 극한성
 - 궁극적으로 ‘우주’라는 키워드와 항상 연계되고 무중력 환경이 기존 지상 환경과 다른 이점 (고순도 결정, 세포배양 빨라짐 등)을 제공
 - **핵심 연구주제는 항상 무중력 환경을 기본 플랫폼으로 활용하는 것과 연계되어야 함**
- 무중력/고중력 분야 핵심 연구주제의 종래 연구주제와 차별성
 - **핵심 연구주제는 항상 무중력 환경을 기본 플랫폼으로 활용하는 것과 연계되어야 하는 것이 기존 각 분야 (생명, 재료, 연소 등) 연구와 차별화 됨**

- ISS와 같은 지속적 무중력 우주환경을 제공하는 플랫폼 활용이 궁극적으로 필요하지만 비용과 시간이 많이 소요됨. 따라서 **지상에서 무중력 환경을 모사할 수 있는 플랫폼 (drop-tower, parabolic flight, clinostat, levitator 등) 개발과 함께 연구**가 이루어진다면 비용과 시간을 절약하고 궁극적으로 유용하고 활용가능한 연구결과 도출이 가능할 것임
- 무중력/고중력 분야의 핵심연구 주제가 극한기획에서 다뤄져야 하는 이유
 - 지상기반 플랫폼을 활용한다면 학문적 성과 및 산업활용 측면의 지상기반 무중력/고중력 극한연구 분야로 분류하는 것이 타당함
 - 장기적으로 우주탐사, 활용 등으로 확대될 것으로 예상되지만 그 시점까지 본 극한 연구를 통해 무중력/고중력 환경 모사 지상 플랫폼을 활용하여 성과 도출 필요성이 있음
- 무중력/고중력 분야 극한연구 활성화를 위한 연구체계 제안
 - 무중력/고중력 분야 **거점연구기관을 지정하고 각 대학, 산업체와 연계하여 연구 수행** (연구 방향/주제의 체계적 도출, 진행, 결과의 취합 및 활용)
 - 거점연구기관은 기존 관련 기관 및 지속적 인력운영이 가능한 곳으로 선택
 - 거점연구기관은 산재된 기존 시설을 보완 활용하는 방안이 효과적으로 판단됨 (협력거점기관)

3. 개발 목표 및 내용

가. 최종목표

무중력/고중력 분야에서 추구하고 본 과제의 비전, 목표, 추진전략, 최종목표는 아래와 같다.

□ 비전 · 목표 및 추진전략

비 전	무중력/고중력 환경에서 과학적 현상 이해 및 산업적 부가가치 창출		
목 표	무중력/고중력 환경모사 지상 플랫폼 활용 난치병 관련 의생리학적 문제해결 및 신소재 산업활용 기술 개발		
전 략	지상기반 인프라 구축/활용	생물/생명/의생리학 (극한 바이오 포함) 분야의 과학적 발견	재료/연소/유체 분야의 산업적 활용
추 진 과 제	○무중력/고중력 모사시 설 지상기반 인프라 구 축/운영 (Clinostat, Levitator, Drop tower 등)	○생명 및 난치병과 관련 된 의생리학적 의학문제 해결 ○무중력 환경에 의한 종 양 내 항암제 전달 영 향연구	○물질의 생성원리 규 명 및 고성능 신소 재 산업 활용 기술 개발

○ 지상기반 인프라 구축/활용

- (지상기반 인프라 구축/운영) 국내 전문가·시설 장비 여건 등을 감안하여 기존 인프라를 보완하여 최대한 활용 및 신규 장비 개발
- 생명(Clinostat/Centrifuge), 재료(Levitator), 연소(Droptower) 등

○ 생물/생명/의생리학 분야 (극한바이오 포함)의 과학적 발견

- (생명 및 난치병 관련 의생리학적 문제해결) 무중력 환경을 활용하여 장기유사조직(organoid) 배양 기술 개발
- (종양 내 항암제 전달 영향연구) 무중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구

○ 재료/연소/유체 분야의 과학/산업적 활용

- (고성능 신소재 산업활용 기술) 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학소재의 개발

[I. 무중력/고중력 분야 지상기반 인프라 구축/활용 기술 개발]

(1) 기반 인프라 구축/활용 기술 개발 연구 분야

○ 극한 R&D 무중력 및 고중력 분야의 시스템 및 플랫폼 구축

- 무중력환경 모사를 위한 무중력시스템 개발 및 플랫폼 구축

▶Clinostat, 자유낙하탑, Levitator 등

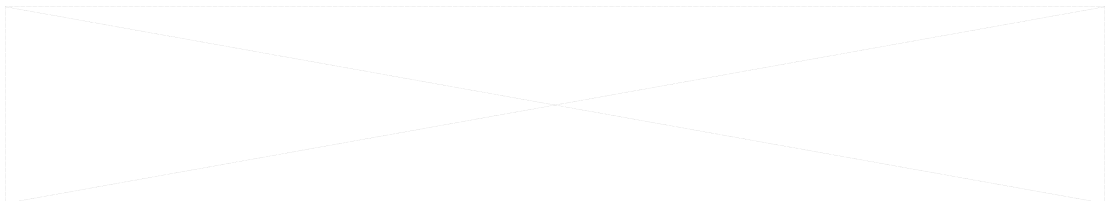
▶무중력 환경을 활용한 연구 (생명, 재료, 유체, 연소 등)에 필요한 시스템 및 플랫폼을 구축하고 이를 통한 무중력 제어로 새로운 과학적 발견과 연구를 수행하는 기반장치 및 시설로 활용

- 고중력 환경 모사를 위한 Centrifuge 장비 개발/구축

▶G-force Centrifuge 시험장치

▶고중력 환경을 활용한 연구 (생명, 의생리학)에 필요한 시스템을 구축하고, 고중력 환경에서 생명체 (인간)의 신체변화 요인에 대한 이해를 통해 고중력 환경에 많이 노출된 분야의 해결연구에 필요한 기반장치로 활용

※ 참고: 무중력 형성 설비 및 해당 설비의 g-level



(2) 각 기반 인프라 플랫폼의 세부 내용

□ 무중력 환경 모사를 위한 시스템 개발 및 플랫폼 구축

○ Clinostat (국내)

- 3차원의 무작위 운동방향을 제공하여 완벽하지는 않지만 마이크로 중력 환경 효과가 발생함
- 생명분야 세포배양시험에서 중력 요소를 상쇄하기 위해 사전시험 연구 차원에서 활용되어 가장 간단히 실험실 레벨에서 개발할 수 장비임
- 1 ~ 10 rpm 무작위 운동을 통해 약 $10^{-4}g$ 의 마이크로중력 환경 모사

○ 자유낙하탑

- 낙하탑의 상단에서 실험장치를 자유낙하시킴으로써 μ -G 환경을 형성하는 방식으로 상대적으로 운영비용이 작고, 실험절차가 간소하여 전 세계적으로 널리 이용되고 있으나 μ -G시간에 제한(~ 10 초)이 있음
- 1) 약 150m 수준의 진공 drop channel을 갖춘 자유낙하탑 구축 (낙하 시간 약 3초 내외)
- 2) 약 수십m 수준의 Drag Shield 형태의 자유낙하탑 구축 (낙하 시간 약 2초 내외): 중력 레벨의 질이 진공 낙하 채널형 보다는 떨어지지만 구축비용은 보다 저렴함

○ Levitator

- Air flow, 전기장, 자기장 등을 이용하여 원하는 샘플을 부양하여 안정적인 재료의 물성에 대한 특성을 시험할 수 있는 장비임

○ 무중력 비행기

- 비행기가 지구중심 방향으로의 등가속도의 자유낙하 운동을, 옆으로는 등속도 운동을 하며 포물선 모양의 궤적을 그리고 날아가는 동안 자유낙하상태를 모사해 냄으로써 비행기 내부에 일시적인 μ -G 상태를 형성함
- 자유낙하탑에 비해 긴 μ -G시간 (~ 20 초)을 형성할 수 있고 g-level을 조정할 수 있으나 상대적으로 실험비용 큼
- 국내에서는 운영이 되고 있지 않고 있으며, 미국 NASA, 일본 JAXA, 유럽 ESA, 러시아 GCTC, 캐나다 CSA 등 해외에서 운영되고 있음

○ 사운드 로켓

- 포물선비행과 원리는 비슷하나 더 높은 고도, 즉 준궤도 (sub-orbital) 비행을 통해 3분-15분가량의 미세중력환경을 조성시킬 수 있으며 주로 미세중력에서 작동하게 될 기기들의 성능평가나 상대적으로 긴 마이크로중력 환경이 필요한 실험에 활용
- 미국 NASA, 일본 JAXA, 유럽연합 ESA 중국 CNSA에 의해 주로 운용

□ 고중력 환경 모사를 위한 시스템 개발 및 플랫폼 구축

○ G-force Centrifuge 시험장치

- 공군 조종사의 고중력에 대한 훈련과 고중력 영향에 대한 연구를 위해 공군 항공우주의료원에 공군 조종사 훈련용 고중력 원심력 시험기가 구축되어 있음
- 공군에서 조종사를 위해 사용되는 g-test 장비와 유사하지만, 동물(설치

- 류)실험 수준의 사이즈 및 사양으로 설계/개발
- 고중력 생성 뿐만 환경제어/모니터링 기능 등을 포함

[II. 생물/생명/의생리학 (극한바이오 포함) 분야의 과학적 발견 연구]

(1) 생명/의학/의생리학 (극한바이오 포함) 분야의 과학적 발견 연구 주제

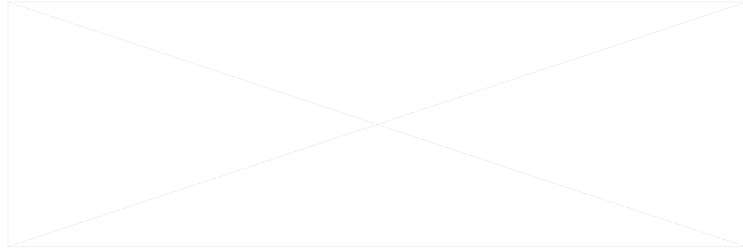
○ 연구주제 1

- 마이크로중력 환경을 활용하여 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발
 - ▶사람의 장기유사조직은 일반적인 세포배양과 다르게 실제 장기와 유사하여 질환 연구와 치료방법에 응용이 가능함
 - ▶마이크로중력 환경을 활용하면 삼차원 (3D) 장기유사조직의 배양이 매우 효율적으로 만들 수 있기 때문에 유용함



○ 연구주제 2

- 마이크로중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구
 - ▶종양조직에 마이크로중력 환경을 이용하여 압력을 줄이게 되었을 때, 항암제 전달이 원활하게 이루어질 것으로 예상함
 - ▶마이크로중력/고중력 환경을 활용하여 항암제 전달과정을 연구하고 약물전달을 용이하게 하는 시스템 개발
 - ▶종양조직 내 마이크로중력 환경과 약물전달, 항암효과와의 관계를 규명하고 최종적으로 난치성 종양에 약물전달을 효율적으로 하여 항암치료를 증진시킴



○ 연구주제 3

－ 무중력/고중력에 대한 운동계 대응 및 보호 기전 연구

- ▶근세포, 골세포, 연골세포는 중력 변화에 민감하게 반응하며 활성변화를 보임
- ▶만능줄기세포는 배양 조건에 따라 근세포, 골세포, 연골세포로 분화되며, 활성화 조절을 통해 각 조직(근육, 뼈, 연골)의 기능을 보호-유지할 수 있음



○ 연구주제 4

－ 무중력, 고중력을 이용하여 세포가 중력을 인식하는 방법에 대한 연구

- ▶세포가 중력을 인식하는 방법을 확인하고 관련 신호전달을 규명함
- ▶세포가 무중력 혹은 고중력 상황에 있을 때, 이러한 중력관련 신호전달이 어떻게 변화하는지 확인함
- ▶이들 기술을 활용하여 중력관련 질환인 근위축, 골다공증에 적용하여 극복 기술을 개발함

○ 연구주제 5

－ 무중력, 고중력을 이용하여 신경계 발달에 중력이 미치는 영향 연구

- ▶미래에 우주비행이 보편화 될 것으로 기대되지만 인간이 장시간 우주에서 생활할 때 중력의 변화가 뇌와 신경계에 미치는 영향은 알지 못함
- ▶무중력과 고중력 환경에서 신경세포 구조와 시냅스 형성의 변화를 알아 보고, 관여하는 유전자를 밝힘



<고중력이 모델생물 C. elegans의 운동신경발달에 미치는 영향. A) 원심분리기를 이용한 고중력에서의 선충 배양방법. B) 정상중력에서 자란 선충의 DD/VD 뉴런의 axon들은 몸의 한쪽에서 반대편으로 일직선으로 이동하여 목표에 정상적으로 도달하는 데 반해, 고중력에서 자란 선충들에서는 axon의 진행경로가 바뀌거나 목표에 다다르지 못한 DD/VD 뉴런들의 수가 증가.>

○ 연구주제 6

- 무중력, 고중력을 이용하여 중력변화가 노화에 미치는 영향 연구
 - ▶이제까지의 수명과 노화 연구는 지구의 중력환경에서 진행되어온 관계로, 다른 중력 환경에서 이들에 변화가 있는지는 알려진 바가 없음.
 - ▶이전 연구에서 중력의 변화가 노화 관련 유전자들의 발현에 영향을 미친다는 것은 알려졌지만 그로 인해 어떤 변화가 있는지는 모르는 상태
 - ▶무중력과 고중력이 수명에 미치는 영향과, 노화와 관련된 세포 현상들에 변화를 가져오는지 알아보고 유전적 경로를 밝힘

○ 연구주제 7

- 우주환경 생물오염 방지 기술 개발
 - ▶우주환경 생존 가능 미생물 확보 (기 확보된 극한미생물 활용 및 신규 극한미생물 분리)
 - ▶우주극한환경에서 극한미생물 포자 및 미배양 미생물의 생존 지속성 분석
 - ▶달 탐사선 표면 유사 구조물에서 우주환경 생존 극한 미생물 제거 기술 연구

(2) 생명/의학/의생리학 (극한바이오 포함) 분야 연구구현 방안 및 과학적 차별성

□ 생명/의학/의생리학 (극한바이오 포함) 분야 연구 구현 방안

○ 마이크로중력 구현

- 3D 클리노스탯(clinostat)

- 하지현수모델(hindlimb suspension)
- 국제우주정거장
- 고중력 구현
 - 원심분리기(centrifuge)
- 연구 내용의 과학적 차별성
 - (가) 제안된 연구 내용을 통한 새로운 과학적 발견 내용
 - 만능줄기세포 활용을 통한 새로운 발견
 - 중력 변화에 따른 줄기세포 반응(분화, 활성화)에 대한 새로운 발견
 - 줄기세포 분화와 활성화 조절을 통해 중력에 따른 운동계 기능 보호
 - 제안된 우주환경 생물오염 방지 기술 개발 연구 내용을 통한 새로운 과학적 발견 내용
 - 우주 극한환경에서 생존 가능한 극한생물 추적 및 제거 기술 확보
 - (나) 제안된 연구 및 관련 분야 내용의 해외동향 및 사례
 - 근조직 연구 동향
 - 중력 변화에 의해 나타나는 근위축 관련 신호전달분자들의 발현 또는 활성 변화 조사; 국제적으로 바이오소재 (천연, 합성)를 이용한 근위축 방지 연구가 대세임
 - 골조직과 연골조직 연구 동향
 - 중력이 골아세포 (골형성 세포) 및 용골세포 (골분해 세포)의 활성화에 미치는 영향이 연구의 대세이며, 적정 운동프로그램을 조사하는데 초점을 맞춤
 - 3D 프린팅을 이용한 연골조직 재생 연구 진행 중임
 - 우주의 마이크로중력 환경을 암 연구에 응용
 - 우주의 마이크로중력 연구가 3차원 조직 배양 등을 암 연구에 매우 유용할 수 있음이 제안됨 (Becker JL et al, Nature Review Cancer 2013)
 - 최근에 Nature에서 npj Microgravity라는 새로운 저널을 발간하여 관련 연구 출판을 시작하였음
 - 우주환경 생물오염 방지 기술 개발에 응용
 - NASA는 우주탐사선을 통한 외계 행성 및 위성의 생물학적 오염 방지를 위하여 Handbook for the Microbial Examination of Space Hardware (NASA- HDBK-6022, 8.17.2010) 발간

□ 생명/의학/의생리학 (극한바이오 포함) 분야의 연구 기대성과

○ 운동계 분야의 기대성과

- 우주인의 근위축, 골소실, 연골소실을 예방할 원천기술 확보
- 고령화 시대의 운동계 노화 및 재활치료 기술 개발에 활용

○ 무중력/고중력 분야의 생명연구 기대성과

- 장기유사조직 배양 기술을 통해서 암, 당뇨, 치매 등의 난치성 질환 치료 연구 시스템 구축 및 치료제 개발 연구
- 종양조직에 항암제 전달을 향상시켜서 사망률 1위인 암을 치료할 수 있는 새로운 치료방법을 모색함

○ 신경과학 분야의 기대성과

- 지구 밖에서의 삶이 뇌와 신경계, 그리고 궁극적으로 행동을 어떻게 변화하는지 알아볼 수 있음
- 치료하기 어려운 신경질환 및 인지장애의 치료방법 제시

○ 노화 분야의 기대성과

- 지구 밖에서의 환경이 수명과 노화에 어떤 영향을 미치는지 알 수 있음
- 수명과 노화에 관한 새로운 접근을 통해 수명연장과 노화방지에 기여할 수 있음

[III. 재료/연소/유체 분야의 과학/산업적 활용 기술 개발]

(1) 재료 분야의 과학/산업 활용 기술개발 연구주제

□ 연구주제: 대형사이즈의 블렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학 소재의 개발

- 우주환경의 마이크로중력(microgravity)하에서 재료를 용융하는 경우, 열적대류 및 침강/부유 현상이 일어나지 않으며, 정수압도 작용하지 않음. 특히, 용기를 필요로 하지 않으므로 용기 내벽과의 접촉이 없는 새로운 환경을 제공함
- 그러나, 마이크로중력 환경하에서의 용융실험은 많은 비용이 소요되므로, 우주실험전에 지상에서 부유(levitation) 기술을 이용한 용융기술을 확립하여야 함
- 부유용융기술을 활용하면, 지금까지 불가능했던 과냉각 영역에서 고온 용액의 고정밀 열물성 측정이나 준결정의 창제, 나노단위의 초미세 조직의

형성 등 신소재의 개발이 가능함

- 부유기술에는 아래 표에 나타난 바와 같이 초음파(acoustic)법, 가스(aerodynamic)법, 전자기(electromagnetic)법, 정전기(electrostatic)법 등이 있음. 아래 표에 각 부유방식에 따른 특징을 지상과 마이크로중력 환경조건하에서 비교하여 정리함

<대표적인 부유기술의 특징 (지상조건 (1G)과 마이크로중력 환경 ($10^{-6}G$))>

	Acoustic	Aerodynamic	Electromagnetic	Electrostatic
부유 시료의 종류	모든 종류(◎)	모든 종류(◎)	전도성 시료(△)	대전하면 모든 종류(○)
부유 시료의 질량	수 g	수 g	수 g	수백mg(×)
부유 분위기	가스 분위기(△)	가스 분위기(△)	가스 분위기 고진공(○)	가압 분위기 고진공(○)
가열과 부유의 독립성	독립(○)	독립(○)	비독립(△)	독립(○)
관찰 시야	넓음(○)	넓음(○)*; 좁음(△)**	좁음(△)	넓음(○)
부유방울의 변형	약간大	大	大	小(○)
장비규모/부유기술*	비교적 쉬움(○)	쉬움(◎)	비교적 쉬움(○)	피드백 제어 필요(△)
고온에서의 안정성	나쁨(×)	좋음(○)	좋음(○)	좋음(○)
기타		온도 구배		지상에서는 불활성 가스 불가
ISS 장치	Space DRUMS	-	EML(ESA)	ISS실험예정(JAXA)

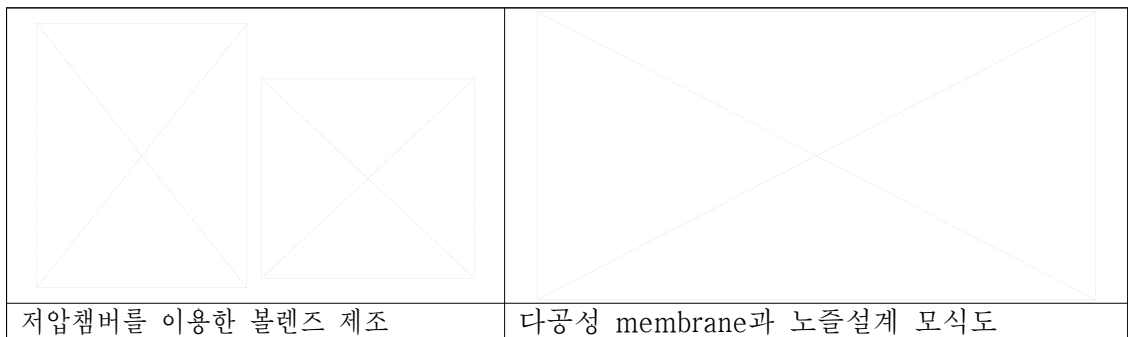
*지상조건 (1G), **마이크로중력 환경 ($10^{-6}G$)

- 전통적인 소재의 용융에는 아래의 왼쪽 그림에 나타난 바와 같이 용기(도가니)를 사용함. 따라서, 용기로부터의 오염을 피할 수 없으며, 응고과정에서 용기 벽으로부터의 불균일 핵생성과 결정화가 잘 일어남. 이에 비해, 부유기술은 용기로부터의 용융체의 오염을 방지하며, 응고과정에서의 불균일 핵생성을 최소화할 수 있는 장점이 있음. 또한, 비교적 낮은 냉각 속도에서도 높은 과냉도를 가진 용융체(melt)를 얻을 수 있음



<전통적인 소재용융법과 비접촉 무용기(containerless) 부유용융법의 특징>

- 이상과 같이 부유 용융(levitation melting)기술에서는 용융체의 과냉도가 매우 크므로 비정질 유리나 실온에서는 존재하지 않는 고기능 준안정상(metastable phase)의 생성이 가능함. 또한, 무용기(containerless) 용융이므로 도가니 사용 시 발생하는 불순물의 혼입이 없고, 그에 따라 초고순도 물질의 제조와 균일핵생성이 가능함
- 따라서, 본 연구에서는 아래 그림에 나타낸 바와 같이 다공성 membrane을 최적으로 설계한 후 아래쪽에서 가스를 흘려보내는 구조를 만든다면 최종적으로 8 mm 이상의 고 부가가치의 광학볼 렌즈를 개발할 수 있을 것으로 판단되며, 만일, 이 연구가 성공적으로 수행될 수 있다면, 관련 산업계에 막대한 경제적 파급효과를 가져올 것으로 기대됨



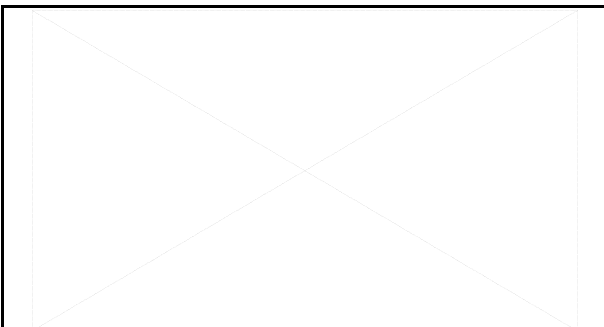
(2) 재료 분야의 과학/산업 활용 기술개발 세부내용

□ 연구의 추진전략 및 방법

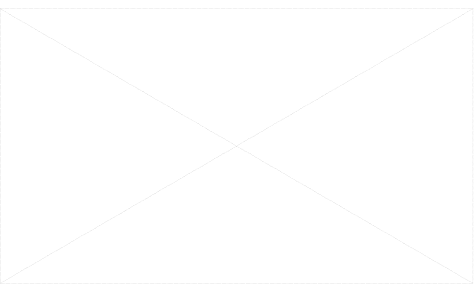
- 비접촉식 가스 부양장비의 운용 및 해석
 - MFC (Mass Flow Controller)를 이용한 가스의 유량 조절
 - 자체 개발한 LabView프로그램을 이용하여 CO₂ laser의 출력을 제어
 - sample의 부양(levitation) 및 용융과정을 CCD카메라로 in-situ 관찰
 - 방사온도계를 사용하여 온도측정 수행
 - 고출력 laser의 방출로 인한 안전사고를 방지하기 위하여, 레이저에 대한 반사율이 높은 알루미늄재질의 판재를 이용하여 레이저를 차폐
 - 큰 직경의 샘플을 용융시키기 위해, 기존의 100W급 레이저 설비(1대 보유)에 추가로 2대를 더 구입하여 레이저의 파워를 높임
- 다공성 membrane nozzle 설계: 샘플을 안정적으로 부양시키기 위해서는 membrane nozzle을 최적으로 설계하는 것이 핵심기술임. 본 연구의 초기에는 가공이 용이한 흑연을 이용하여 시제품을 설계하고, 최종적으로는

Al(2,000계열) 합금을 방전가공하여 다공성 nozzle을 설계함. 향후 실험에서는 molten droplet를 안정적으로 부양시킬 수 있도록 다양한 형상과 크기를 갖는 nozzle을 설계함

- X-선 흡수 분광법(XAFS)를 활용한 국부구조분석: 포항 방사선 가속기(PLS)내 X-선 흡수 분광법(XAFS)을 활용하여 원자배열 미세구조를 해석함. 무용기 부유용융법으로 제조한 비정질 샘플을 유발을 이용하여 곱게 분쇄하고, 스카치 테이프에 얇게 도포하여 측정함. Ti와 Zr의 국부구조 분석을 위해 K-edge 측정시 각각 Ti, Zr 호일을 사용하여 보정하고, 이를 통해 준안정상의 국부구조(주로 배위수)를 체계적으로 조사함

	
XAFS 빔라인 도식도	X-선 흡수 분광법의 원리

- 굴절률 측정: 제조한 샘플의 위, 아래 면을 평행하게 경면 처리하여 측정 샘플을 제작함. Spot size가 작은 Ellipsometer (RC2-Small Spot, J.A. Woollam Co.)를 이용하여 샘플의 486.1 nm, 589.3 nm, 656.3 nm 파장대의 굴절률을 측정하고 이를 통해 Abbe number를 계산함. 비정질 샘플의 밀도는 아르키메데스법을 이용하여 측정함. 그리고, Lorentz-Lorenz equation을 통해 molar polarizability를 구하고, Oxygen polarizability 값을 계산함
- XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)를 활용한 비가교 산소비율의 정량분석: 비가교 산소의 비율은 유리에 존재하는 망목수식체에 의해 결정되고 굴절률과 깊은 연관을 가지고 있음. 따라서, 비가교 산소의 비율을 계산하기 위해 샘플을 경면연마하여 XPS실험을 수행함

	
XPS의 측정 개략도	O _{1s} 에 대한 XPS분석 예: 비가교 산소(530.93eV)와 가교 산소(531.33eV) 피크

- 온도에 따른 in-situ 유전을 측정: 온도에 따른 유전특성의 변화를 측정하기 위해, 1200℃까지 승온할 수 있는 furnace에 전극처리가 된 시편을 자체 제작한 알루미나제 지그(Pt전극과 도선용 Pt 와이어 매립)에 장입하고 Impedance analyzer에 연결함. Impedance analyzer와 온도지시기는 RS-232C 통신케이블로 컴퓨터에 연결되고 LabView를 통해 실시간으로 데이터를 수집, 디스플레이 함
- 준안정구조 해석: 준안정상의 해석을 위해 DSC열분석, in-site 고온XRD, EPMA분석을 수행
- 연구 내용의 과학적 차별성
 - 새로운 신소재의 발견
 - levitation 연구에 의해 얻어진 결과는 준안정상 및 뛰어난 물성을 갖는 새로운 재료의 설계 및 제조수법을 제공할 수 있음. 다양한 형태의 준안정상의 제조가 가능하므로 획기적인 광학적/강유전특성/유전특성을 갖는 전혀 새로운 신소재의 개발이 기대됨
 - 마이크로중력 환경하에서는 중력이 작용하는 지구상에서는 만들 수 없는 새로운 재료의 개발이 가능하며, 재료의 미세구조, 공정, 물성간의 정량적인 관계를 예측함에 있어 매우 중요함. 향후, 마이크로중력하의 연구를 통하여 신소재는 물론이고 물리학, 화학 등의 분야에도 새로운 현상 및 원리를 발견할 수 있음
- 연구 분야의 전망
 - 본 연구에 의해 얻어진 결과는 다양한 형태의 준안정상의 제조가 가능하므로 획기적인 광학적 특성을 갖는 고 부가가치의 광학소재, 반도체 소재의 개발이 기대됨
 - 재료의 고온 열 물성치는 결정 성장과 응고 현상을 정량적으로 파악하는데 필요한 기초 자료임. 무용기 부유용융법을 활용하여 고온 용융체의 열

물성을 정밀하게 측정할 수 있으므로 유리, 철강, 반도체 결정성장 산업계의 요구에 부응할 수 있음

- 우주기초과학 연구분야, 특히 신소재개발 연구에 대한 지속적인 투자는 지구상에서는 만들 수 없는 새로운 신소재 개발을 가능하게 하며, 고부가가치의 창출이 기대되는 우주산업의 활성화에도 크게 기여할 수 있음

나. 단계/연차별 목표

- 무중력/고중력 분야 (극한 바이오 포함)의 연구는 우선 1단계 3년 동안 인프라 구축 및 기초 연구를 수행하고, 이를 기반으로 2단계의 중/장기적 핵심적인 연구를 진행함
- 1단계는 단기 3년으로 수행하며, 2단계는 1단계의 3년에다 3년을 추가하여 총 6년으로 진행하며 또한, 장기적 연구를 위해 추가 3년을 통해 최대 9년까지 장기적 연구를 통해 핵심연구 및 관련 기술을 개발함

구 분	단 계 별 목 표
1단계(3년) (2019~2021)	○ 중력 (무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 개발 및 측정기술 개발 - 생명/극한바이오 연구 분야 플랫폼: Clinostat (무중력 환경 모사), Centrifuge (고중력 환경 모사) 등 개발 - 재료 연구 분야: Levitator (정전기/전자기/가스부양 등) - 연소 연구 분야: Droptower (수십 m 또는 100 m 급) ○ (생명/의학 분야) ①무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양, 암과 같은 난치병 치료 기술 기초 연구, ②중력 변화에 대한 세포/조직 대응 측정 기초 연구 ○ (재료 분야) 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 광학소재 기초 연구

구 분	단 계 별 목 표
2단계 (중기 3년; 2022~2024), (장기 6년; 2022~2027)	○ (생명/의학 분야_장기 연구 연계) ①무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양 시스템 개발 및 장기배양 기술개발, ②종양 내 약물전달 효율 증진 및 치료효과 증대 기술 연구, ③중력 특이적 생체조직 보존기술 연구, ④중력 변화에 대한 세포/조직 대응 측정 응용 연구 및 기술개발 ○ (재료 분야) 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학소재 개발 기술연구 ○ (연소 분야) 유동/화학 측정기술 및 중력장 열유동 제어기술 연구

다. 세부과제 구성 및 연구개발 내용

- 무중력/고중력 분야 (극한 바이오 포함)의 연구에서는 무중력/고중력 환경을 지상에서 모사할 수 있는 기반 인프라 구축, 운영, 활용과 이를 기반으로 생명/의학 분야의 핵심적 연구와 재료 분야에서 가능성 있는 연구 주제를 제시함

분야	세부과제명	최종목표
무중력/고중력 극한환경 모사 기술 개발	○ 중력 (무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 개발 및 측정기술 개발	무중력/고중력 환경활용 기반 플랫폼 개발 및 측정 시스템 구축
무중력/고중력 극한환경 활용 생명/의학 분야 기술 연구	○ 무중력 환경 활용 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발 ○ 무중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구	무중력/고중력 환경활용 생명/의학 분야 난치병 치료 기술 개발
무중력 극한환경 활용 광학 소재 개발	○ 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학소재의 개발	무중력 극한환경 활용 고성능 광학소재 개발, 비접촉식 물성 측정기술 및 데이터 구축

라. 기술개발 로드맵



☐ 각 분야별 목표

- (인프라 기술) 무중력/고중력 모사시설 지상기반 인프라 구축
- (생물/생명, 의생리학) 제안된 연구주제에 따른 무중력 환경에서 새로운 과학적 발견
- (재료/신소재) 무중력 모사환경 시설을 활용한 새로운 금속의 생성원리 규명 및 고성능 신소재 등의 산업활용 기술 개발
- (연소/유체) 무중력 모사환경 시설을 활용한 새로운 과학적 현상을 관찰과 이해

☐ 중점 분야

- 무중력/고중력 모사시설 지상기반 인프라 구축/운영
- 생명 및 난치병과 관련된 의생리학적 의학 문제 해결
- 물질의 생성원리 규명 및 고성능 신소재 산업활용 기술 개발

☐ 핵심과제 도출 및 로드맵



4. 추진전략 및 체계

가. 추진체계

- 본 과제는 지상기반 무중력/고중력 환경 모사 시설을 이용한 극한환경의 발생, 측정, 활용에 있어서 다양한 분야 (생명/의학/극한 바이오, 재료, 연소 등)의 학문적, 기술적 융합이 필요함. 따라서 거점 연구기관을 중심으로 'Microgravity Research Center(안)'를 구성하고 관련 연구기관, 대학교, 산업체 등과 체계적인 공동연구 시스템을 구축함
 - 거점연구기관은 각 관련 기관과 협력, 연계하여 기반 인프라를 효과적으로 관리/운영하고, 나아가 중장기적으로 무중력/고중력 분야의 활용, 발전을 위한 로드맵 제시 등 컨트롤 타워의 역할을 수행함
- 장기적으로 자체적인 우주기반 플랫폼 (예; 초소형위성, 재진입캡슐, 우주정거장 등)과 연계하는 기술을 개발하고, 꼭 필요한 연구 분야는 국제협력을 통한 우주기반 플랫폼 공동 활용 연구로 확대함



<추진체계>

나. 추진전략

- 무중력/고중력 극한 환경 발생/모사 기술개발은 산업체와 학계의 필요성과 현실적으로 구현 가능한 기술을 전략적으로 선택하고, 현재 소규모로 산재되어 있는 각각의 무중력/고중력 환경 연구 인프라를 효과적으로 연계, 활용할 수 있도록 함
- 무중력/고중력 분야 극한 환경 이용 기술은 극한 환경 모사/발생 인프라 시설과 결합된 것으로 기초적인 연구뿐만 아니라, 산업활용 연구도 가능하도록 진행함. 또한 기존 인프라를 지속적으로 보완, 개선하여 활용함으로써 실험환경의 신뢰성을 높이도록 함
- 무중력/고중력 분야 극한 환경 활용 인프라 시설은 대외적으로 공개하고, **OPEN LAB**의 형태로 운영하여 최대의 성과를 효율적으로 내고자 함. 또한 본 연구를 통해 획득된 기술은 산업체에 이전하여, 실제 생산에 활용될 수 있도록 함
- 무중력/고중력 분야의 기술은 향후 유인 우주탐사 기술과도 밀접한 관계가 있으므로 2030년대 유인 화성탐사 등에 국제협력으로 참여할 수 있는 기반기술 확보에도 기여할 수 있게 함



<추진전략의 개요도>

5. 파급효과

가. 사회적 파급효과

- 본 과제의 기술과 연구대상은 기계, 전자, 전기, 광학, 재료, 물리, 화학, 생명 과학/공학, 의학 등 융·복합 기술 및 지식을 요구하므로, 관련 연구 인력은 다양한 지식을 습득하고, 국내 최초의 종합적인 무중력/고중력 환경 활용기술 확보를 통한 새로운 학문, 기술 및 산업 발생 촉진과 석·박사급의 전문 인력 양성에 기여함
- 무중력/고중력 환경 활용 기술의 개발/응용은 향후 유인 우주탐사 시대를 대비하여 청소년과 일반 대중의 과학 대중화에 기여

나. 기술적 파급효과

- 무중력/고중력 환경 지상기반 인프라 활용 기술은 기존에 장기간/고비용 측면의 우주기반 인프라를 일정부분 보완하는 극한환경을 제공할 수 있는 기술로써, 다양한 학문 및 산업과 융합하여 새로운 물리현상과 산업활용 기술 개발, 그리고 극한 환경 측정 기술이라는 시너지 효과를 낼 수 있는 기술임
- 인프라 시스템 및 플랫폼 구축 연구 분야 파급효과
 - 무중력 환경에서는 대류현상이 일어나지 않으므로 재료, 유체, 생명 분야의 과학적 현상에 대한 이해도를 높이기 쉬우므로 지상기반 인프라를 이용한 새로운 과학적 발견이 기대됨
 - 이러한 과학적 현상의 이해는 국내 발사체, 위성개발, 항공기 등에서 해외 의존적인 부품, 장치의 국산화 가능함
- 생명/의학/극한 바이오 연구 분야 파급효과
 - 운동계 분야: 우주인의 근위축, 골소실, 연골소실을 예방할 원천기술 확보. 고령화 시대의 운동계 노화 및 재활치료 기술 개발에 활용
 - 의학 분야: 장기유사조직 배양 기술을 통해서 암, 당뇨, 치매 등의 난치성 질환 치료 연구 시스템 구축 및 치료제 개발 연구. 종양조직에 항암제 전달을 향상시켜서 사망률 1위인 암을 치료할 수 있는 새로운 치료방법을 모색함
 - 신경과학 분야: 지구 밖에서의 삶이 뇌와 신경계, 그리고 궁극적으로 행동을 어떻게 변화하는지 알아볼 수 있음. 치료하기 어려운 신경질환 및 인지장애

의 치료방법 제시

- 노화 분야: 지구 밖에서의 환경이 수명과 노화에 어떤 영향을 미치는지 알 수 있음. 수명과 노화에 관한 새로운 접근을 통해 수명연장과 노화방지에 기여할 수 있음
- 고중력 분야: 고중력 환경에 많이 노출되어 있는 사람 (예; 공군 조종사 등)들의 인체변화에 대한 주요 이슈사항 해결에 기여

○ 재료 분야 연구의 파급효과

- 본 연구를 통하여 철강, 유리, 반도체 산업에서 요구하는 소재의 초고온 열물성치를 제공할 뿐만 아니라, 열물성을 정밀하게 평가하는 기술을 체계적으로 확립할 수 있음
- 비접촉식 부유로를 활용함으로써 준안정상 및 뛰어난 물성을 갖는 새로운 재료의 설계 및 제조수법을 제공할 수 있음. 이를 통해 기존 소재와는 전혀 다른 물성을 갖는 획기적인 광학, 반도체 신소재의 개발이 기대됨

다. 경제적 파급효과

- 국제적으로 무중력/고중력 환경 활용 기술을 이용한 생명/의학 분야의 신약, 소재 등의 개발과 응용은 태동기에 있으므로, 지상기반 무중력/고중력 환경 활용 기술에 대한 다양한 기술의 확보 가능성이 높으며, 생명/의학, 소재 분야 등의 기술 국산화 및 고부가가치 원천특허 기술 확보가 가능함
- NASA, JAXA 등 우주 선진국의 다양한 우주기술 스핀오프 (spin-off) 사례에서 처럼 본 과제의 생명/의학, 재료 등의 분야에서 산업적 파급효과가 큰 고부가가치 성과가 나올 것으로 예상
- 21세기 우주개발, 유인 우주탐사 산업은 그 경제적, 산업적 잠재 가치가 충분히 예상됨 (예; 해외 민간기업의 유인 우주탐사 참여). 따라서 본 연구과제의 기술은 이러한 잠재적 가치를 촉발 시키는 한 부분으로 작용할 것으로 기대함.
- 의약품 및 신소재 개발로 고부가가치 상품 개발에 크게 기여하여 국가 산업경쟁력 제고에 기여할 수 있음.

6. 소요예산

(단위: 억원)

분야	세부과제명	1단계			2단계				합계
		'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25~ '27	
무중력/고중력 극한환경 모사 기술 개발	○ 중력 (무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 개발 및 측정기술 개발	7	5	5	2	2	2	3	26
무중력/고중력 극한환경 활용 생명/의학 분야 기술 연구	○ 무중력 환경 활용 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발	2	2	2	5	5	5	20	41
	○ 무중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구	2	2	2	5	5	5		21
무중력 극한 환경 활용 광학 소재 개발	○ 대형사이즈의 볼렌즈와 인조다이아몬드 응용을 위한 고성능 광학 소재의 개발	2	2	2	5	5	5	5	26
합 계		13	11	11	17	17	17	28	114

7. 특이사항

가. (정량적) 성과지표 (총 6년)

- 국내외 논문 게재: 8편/년 (총 48편)
- 국내외 논문 발표: 8건/년 (총 48건)
- 국내외 특허 출원: 4건/년 (총 24건)

나. 국가 R&D 전략과의 연계

- 국가우주개발중장기계획(4.미래 우주활동영역 확보를 위한 우주탐사 전개, 4-2.국제협력 기반의 심우주 탐사: NASA, JAXA 등과 협력을 통한 ISS 활용 우주실험 수행)에 국제협력으로 일부 반영되어 있음
 - 그러나, 이를 위해서는 본 과제를 통해 자체적인 지상기반 인프라 구축 및 이를 활용한 과학적, 산업적 성과 창출이 필요함
- 본 과제는 무중력/고중력 극한 환경과 생명/의학/극한 바이오, 재료, 연소 등 다양한 분야의 기술이 결합한 것으로 과학기술적 난제, 특히, 생명/의학, 재료, 연소 등의 분야에서 난제를 획기적으로 돌파 하며, 새로운 과학적 현상을 발견할 수 있을 것으로 예상함

- 또한 기존에 시도되지 않았던 새로운 난치병 치료기술 및 소재 개발의 시도로 고부가가치 산업을 창출하여, 21세기 성장동력 산업인 우주탐사, 생명/의학 등의 산업과 연계할 수 있을 것으로 기대함

다. 타 국가연구개발사업 유사과제와의 차별성

- 궁극적으로 ‘우주’라는 키워드와 항상 연계되고 무중력 환경이 기존 지상 환경과 다른 이점 (고순도 결정, 세포배양 빨라짐 등)을 제공
- 핵심 연구주제는 항상 무중력 환경을 기본 플랫폼으로 활용하는 것과 연계되어야 하는 것이 기존 각 분야 (생명, 재료, 연소 등) 연구와 차별화 됨
- ISS와 같은 지속적 무중력 우주환경을 제공하는 플랫폼 활용이 궁극적으로 필요하지만 비용과 시간이 많이 소요됨. 따라서 지상에서 무중력 환경을 모사할 수 있는 플랫폼 (drop-tower, parabolic flight, clinostat, levitator 등) 개발과 함께 연구가 이루어진다면 비용과 시간을 절약하고 궁극적으로 유용하고 활용가능한 연구결과 도출이 가능할 것임
- 본 연구과제는 일부 소규모 인프라는 이전에 있었으나, 생명/의학 연구 분야는 이전에 시도되지 않았던 새로운 기술개발 과제으로써, 극한환경 모사/발생 기술, 측정 기술, 난치병 치료 개발 기술이 동시에 요구되는 융복합적 기술 과제임
- 본 기술은, 우주개발사업의 당면한 문제 해결을 위한 위성체, 발사체, 추진체의 연구와는 달리, 다가올 유인 우주탐사 시대에 우주정거장을 이용한 다양한 분야의 학제간 사전연구에 필요한, 지상기반 연구 시스템을 최초로 제공하는 의미가 있음

(3) 다중실험용 고자기장-극저온 통합시스템 개발

1. 과제의 개요

가. 과제의 정의 및 범위

1) 정의: 자연계에 존재하지 않는 인위적으로 구현 가능한 낮은 온도 ($<2.75\text{K}$ (우주배경온도)) 및 다중극한 환경으로, 기존 기술로는 접근 불가능한 미지의 극한 환경을 구현, 제어, 활용



나. 과제의 필요성

1) 과학기술적 측면

극저온 환경은 응용기술과 인류지식의 지평을 넓히는 기초연구에 중요한 극한환경중의 하나다. 이전의 노벨상 연구분야를 극저온 환경과 관련된 분야로 분석해 보면 물리학상의 약 $\sim 10\%$ 가 당시로서는 최첨단의 “극”저온에서 일어나는 현상의 발견과 관련되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 예는 극저온 환경의 구현과 극저온환경이 기초과학의 근원적인 탐구와 돌파의 기회를 제공하고 있음을 시사하고 있다고 볼 수 있다. 저온관련 구체적인 연구 예는 다음과 같다:

- 액체헬륨으로 구현된 저온환경에서 초전도현상 발견(Onnes, 1913)
- 저온에서 액체헬륨의 초유체현상 이론적 설명 (Landau, 1962)

- 저온에서 발현하는 초전도 현상 이론적 설명 (Bardeen, Cooper and Schrieffer, 1972)
- 저온에서 발현하는 초전도체에서 조셉슨 효과 예측 (Josephson, 1973)
- 저온에서 액체헬륨의 초유체현상 발견 (1934) (Kapitsa, 1978)
- 저온 고자기장에서 양자홀효과 발견 (Klitzing, 1985)
- 고온 초전도현상 발견 (Bednorz and Müller, 1987)
- He-3에서의 초유체현상 발견 (Lee, Osheroff, Richardson, 1996)
- 저온 고자기장에서 분수전하를 가진 양자유체 발견 (Laughlin, Stoermer, and Tusi, 1998)
- 초전도와 초유체의 이론적 설명 (Abrikosov, Ginzburg, Leggett, 2003)
- 고자기장 저온환경하에서 그래핀에서 Dirac fermion 발견 (Novoselov and Geim, 2010)

기존의 극저온 관련 수행과제의 경우는 해외에서 제작된 상업적으로 구입 가능한 시스템을 활용하여 연구를 진행하기 때문에 첨단 극저온 관련 연구가 추격형인 경우가 많았다. 따라서, 첨단 극저온 다중극한을 이용한 주도적인 연구를 위해서는 기존에 제시된 기술과 구별되는 한국형 뿌리기술의 확보가 필요하다. 뿐만 아니라, 혁신적인 연구를 위해서는 극저온과 동시에 구현될 수 있는 고자기장, 고압등의 극저온기반 다중극한 환경이 필수적으로 요구되고 있다.

2) 경제산업적 측면

한국의 산업구조는 경공업에서 시작하여 중공업으로 발전해 왔다. 이제는 기술발전을 토대로 일반소비자가 아닌 highend 제품을 필요로 하는 연구 R&D장비산업이나 항공우주산업등의 고부가가치 시장을 목표로 시장을 개척할 필요가 있다. 고부가가치 연구장비 시장에 진입하기 위해서는 활발한 극한연구등을 통해서 얻어진 기술을 활용할 필요가 있다.

3) 사회문화적 측면

과거의 과학연구의 부산물이 인류의 의료나 안녕에 기여한 바는 크다. 예를 들어 X-ray, MRI 등은 의료장비는 잘 알려진 과학연구의 부산물이다. 예측하기는 어렵지만 인류의 첨단기술이 집약된 극한연구는 이제까지 존재하지 않았던 새로운 기술을 획득하게 되는 기회를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 극한연구는 사회문화적인 측면에서도 인류의 안전에 필요한 도약적인 기술을 제공할 잠재력을 가지고 있다고 생각할 수 있다.

2. 국내외 극한연구개발 동향분석

가. 해외 연구동향

■ 극저온 발생기술은 100년전에 액체헬륨을 액화시키는 기술로부터 시작하여, 3He-4He 희석식 냉동기술, 자기냉동기술등으로 발전해 왔다. 언급된 4He냉동기 기술, 희석식 냉동기 기술, 자기냉각기술은 각각 약 1세기, 1/2세기, 1세기 넘게 선진국을 중심으로 기술이 성숙되었고 대부분의 냉동기술이 상업화되었다. 이를 발판으로 극저온 기술선진국이 극저온환경에서의 연구를 주도할 수 있었다. 특히, 3He의 초유체 연구를 위한 프로젝트를 통해서 sub-mK이하의 극저온을 구현할 수 있게 되었다. 예를 들어, 유럽연합의 경우는 3He 프로젝트를 통해서 구축된 시설을 극저온연구환경을 요구하는 과학프로젝트를 위해서 활용하는 European Microkelvin Platform등이 현재 진행되고 있다.

나. 국내 현황

■ 국내에서는 80년대 후반에 극한기술협의회 발족과 함께 극저온연구가 본격적으로 시작되었다. 대부분의 기초연구는 선진국에서 상업화된 장비 도입을 통해서 이루어졌고, 한국기계연구원과 같은 정부출연연구소를 통해서 독자적 기술을 확보하려는 추격형 개발사업이 진행되었다. 짧은 기간의 연구와 개발의 역사에도 불구하

고 SQUID 자기센서(한국표준과학연구원), 저온검출기(한국표준과학연구원), 고온초전도 선재(서남(주))개발등이 수행되었다. 세계적 수준의 상업 의료용 뇌자도 장치(한국표준과학연구원), 암흑 물질저온검출기(한국표준과학연구원), 저전력-고자기장 자석개발(서남(주))등의 우수한 성과를 이루는 바탕이 되었다.

다. 국내 극한연구 수요에 대한 시사점

- 현재까지는 선진국과의 기술격차와 원천기술의 부족으로 추격형 기술개발 및 기초연구가 이루어졌다. 그럼에도 불구하고 언급된 예처럼 저온응용기술측면에서는 짧은 연구기간에도 의미 있는 기술적 성취를 이룩하였다.
- 극저온 관련 기술은 독자적이고 주도적인 기초연구를 위해서는 국가가 지원해야할 필수적 원천기술로 판단된다. 가령, 가까운 미래에 실현될 양자통신, 양자컴퓨팅등에 필수적인 환경으로, 기초 원천연구와 더불어 산업화에 대비해서 국가적 차원의 지원이 필요해 보인다.
- 기존의 선진국이 1세기동안 (20세기) 이룩한 성숙된 극저온기술을 추격하고 답습하는 전략보다는 기술적으로 장벽이 높지 않더라도 필요한 기술을 발굴하여 차별화되는 한국형 관련기술을 확보할 필요가 있다고 판단된다. 또한 관련 기술개발과 기초연구를 통해서 저온전문가양성을 기대해 볼 수 있다.
- 본 기획연구를 통한 기술수요조사서에 따르면 극저온관련 극한연구는 일반적으로 해외의 극저온연구동향과 비교해서 극저온자체의 요구보다는 저온과 고자기장, 압력 등의 다중극한에 대한 요구가 있음을 확인 할 수 있었다.

3. 개발목표 및 내용

가. 최종목표

한국형 극저온-다중극한 뿌리 기술을 확보하고 다중실험이 가능한 극저온 다중극

한시스템 구축 및 운용.

소프트웨어적인 관점에서 극저온 다중극한 연구를 위한 인적자원의 컨소시움을 구성하여 원천연구주제를 발굴하고 로드맵을 작성하여 극저온 다중극한 연구를 활성화 시킴.

나. 단계/연차별 목표

구 분	단 계 별 목 표
1단계(3년) (2019~2021)	1. 다중실험 수행을 위한 고자기장-극저온 통합시스템 개발 및 운용 - 저전력-고자기장 시스템(30 T) 설계 및 개발 - 저전력-고자기장 시스템과 통합가능한 다중실험용 극저온(100 mK)시스템 설계 및 제작 - 다중 실험 및 사용자를 위한 다용도/개별 프루브 설계 및 제작 2. 컨소시움 구성 및 기존 극저온 시스템 활용 프로그램 - 극저온 다중극한 컨소시움 구성하여 구축된 기존 극저온 시스템 활용 프로그램 제안
2단계(3년) (2022~2024)	1. 다중실험 수행을 위한 고자기장-극저온 통합시스템 개발 및 운용 - 저전력-고자기장 시스템(30 T)과 극저온 (100 mK) 시스템 통합 및 평가 - 다용도/개별 프루브 성능테스트 및 평가 - 통합시스템을 이용한 다용도/다중실험 가능성 확인 2. 컨소시움 구성 및 기존 극저온 시스템 활용 프로그램 - 극저온 다중극한 컨소시움에서 구축된 기존의 극저온 시스템 활용한 프로젝트 수행
3단계(3년) (2025~2027)	1. 다중실험 수행을 위한 고자기장-극저온 통합시스템 개발 및 운용 - 고자기장-극저온 통합 시스템 신뢰성 평가, 설치 및 운용 - 극저온 다중극한 실험 수행 2. 컨소시움 구성 및 기존 극저온 시스템 활용 프로그램 - 극저온 다중극한 컨소시움을 주축으로 통합시스템 운용 및 활용 - 컨소시움을 중심으로 로드맵작성 및 전문가 양성

다. 세부과제 구성 및 연구개발 내용

* 다중실험용 고자기장(30 T)-극저온(100 mK) 통합시스템 개발 및 운용

1) 다중실험용 저전력-고자기장 (30 T) 초전도 전자석 개발

- 저전력-고자기장 (30 T) 초전도 전자석 설계 및 제작, 자기장크기/균일도 절대측정, 안정도 평가
- 자기장 안정도 평가, 초전도자석 quenching의 감지 및 전류제어기술 개발
- 초전도 자석에서 발생하는 stray B-field 차폐기술 개발 및 평가

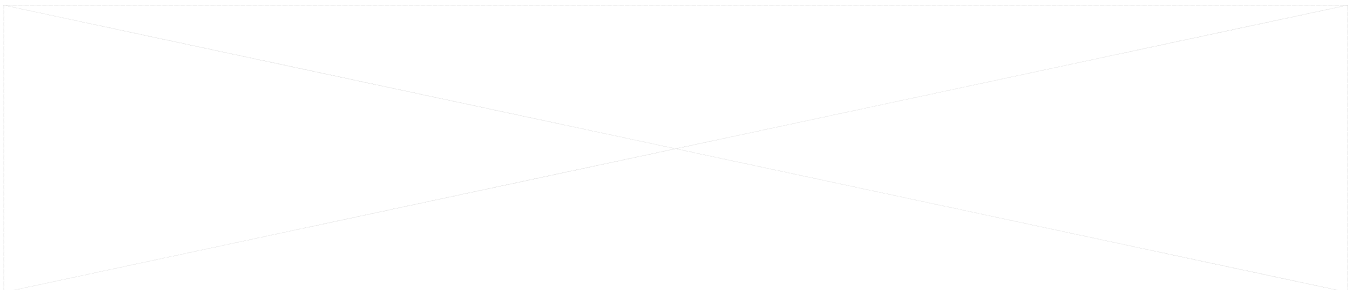
2) 다중실험용 극저온 시스템 개발

- 저전력-고자기장 시스템과 통합이 가능한 극저온(100 mK) 시스템 설계 및 제작
- 다중 실험을 위한 개별 top-loading 프루브 설계 및 제작 (예, 전기기적 특성 평가용 프루브 제작, 원자/자성 현미경 프루브 설계 및 제작, 극저온 열물성 측정 프루브 설계 및 제작 등)

3) 통합시스템 신뢰성평가 및 운용

- 고자기장-극저온 통합시스템을 신뢰성 평가, 설치 및 운용
- 고자기장-극저온 통합시스템을 이용한 다중/개별 실험 가능성 확인
- 극저온-고자기장 등 다중극한 환경에서의 온도 정밀 측정 기술 개발

* 극저온 연구 컨소시엄 구성 및 기존 극한 시스템 활용 프로그램 개발



- 극저온 연구 컨소시엄 구성 및 로드맵 작성
- 극저온 고자기장하에서의 양자물질 연구: 기존의 하나로 중성장 실험시설 활용 등
- 고자기장(20 T)-고압 (30 GPa) 다중극한을 이용한 고체물질특성 평가
- 회전축 구조체를 이용한 벡터자석 모사기술 개발
- He-free 극저온 구현 기술 개발
- 극저온-고자기장 다중 극한에서 발현되는 전하거동에 의한 전도도보편요동 연구

-

라. 기술 개발 로드맵

4. 추진전략 및 체계

가. 추진체계

- (1) 국내대학의 관련 원천기술발명자, 국내산업의 원천기술, 정부출연연

구소의 연구인프라를 최대한 활용하여 한국형 저전력 고자기장-극저온 통합시스템을 개발

- (2) 개발될 저전력 고자기장-극저온 통합시스템의 효율적인 활용을 위해서 처음부터 다중실험이 가능한 플랫폼을 고려
- (3) 다중 실험을 위해서 설계단계부터 대학과 중부출연연구소의 미래사용자를 중심으로 한 시스템 설계 및 개발 참여
- (4) 저전력 고자기장 설계 및 제작은 원천기술 발명자와 국내 산업이 담당
- (5) 다중실험이 가능한 극저온 시스템은 미래사용자인 대학과 정부출연연에서 개념설계, 설계에 참여
- (6) 구축되는 고자기장-극저온 시스템을 설치하고 운용하기 위해서는 장치운용을 위해서 필수적인 헬륨회수 및 공급인프라가 이미 구축되어 있고 관련 기술이 필요한 연구기관이 참여
- (7) 지속적인 운영을 위해서는 관련기술을 지속적으로 필요로 하는 미션을 가지고 있는 연구기관이 참여
- (8) 개발된 저전력-고자기장 전자석 시스템의 해외시장을 겨냥한 산업화 추진
- (9) 개발된 다중실험 고자기장-극저온을 대학과 국가 R&D에 효율적으로 활용
- (10) 개발 및 운영을 통해서 얻어진 지식과 정보를 획득하고 전문가를 양성

나. 추진전략



5. 파급효과

가. 과학기술적 파급효과

이전까지는 해외의 접근이 용이하지 않은 시설을 이용해서 제한적인 연구가 가능. 국내에 구축된 고자기장(30 T)-극저온(100 mK) 시스템을 이용한 주도적이고 심도 깊은 실험이 가능함.

나. 경제산업적 파급효과

특히 원천기술을 가지고 있는 저전력-고자기장 초전도 전자석 기술을 발판으로 세계시장을 겨냥한 산업화가 가능함.

다. 사회문화적 파급효과

양자통신, 양자컴퓨팅 등과 같은 국가안보와 관련되는 기반기술이 되는 독자적인 저온기술의 획득하게 될 것으로 기대함.

6. 소요예산

	1단계	2단계	3단계
예산	60 억원	60 억원	40 억원

7. 성과지표

구분	세부성과목표	가중치	성과지표 (착안점 및 기준)
고자기장-극저온 통합시스템 개발	저전력-고자기장		> 30 T
	초전도자 전자석 Bore 크기		> 40 mm
	자기장 균일도 (내경 40 mm, z축: ± 10 mm)		95 %
	극저온 시스템		< 100 mK
고자기장-극저온 통합시스템 개발	저전력-초전도 전자석 설계 및 제작		특허 3건 논문 3편
	다중실험용 극저온 프루브 설계 및 제작		특허 2건, 논문 3편
	통합시스템 신뢰도 평가		특허 2건 기술이전 2건
극저온 연구 컨소시엄 구성 및 기존	기 구축시스템 활용한 연구 개발		특허 2건, 논문 4편
극한 시스템 활용 프로그램 개발	극저온 로드맵 작성 및 발표		논문 2편

8. 극저온 다중극한 연구의 활성화에 대한 견해

○ 단기적 방안

극저온 다중극한연구는 다른 극한환경을 기반으로 한 연구와 마찬가지로 국내의 기술과 인력은 선진과학기술국가와 차이를 보이고 있다. 특히 현재의 물질분류에 기반한 연구는 방법론적인 온도, 자기장, 압력등과 같은 극한변수들을 구현하고 이용하는 실험환경의 돌파를 병행하고 있지 않아서 근본적인 기술의 진보와 과학적 발견을 저해하고 있다고 판단한다. 과학기술 선진국이 이미 선점한 극한분야가 아닌 기술적 난의도가 높지 않더라도 파급력이 있는 분야를 발굴하여 한국형 뿌리 기술을 개발할 필요가 있어 보인다. 이를 위해서 국내에 이미 구축되어 있는 극저온 관련시설을 활용하여 인력을 고용하여 전문인력을 양성하고 기 구축되어 있는 시설의 공동활용과 협력연구를 복돋울 수 프로그램이 필요하다. 지금까지는 국가는 구축되어 있는 극한관련시설의 공동활용을 중용하고 있지만, 연구시설의 공동활용이 수월하지 않은 이유 중에는 소프트웨어적인 공동활용 프로그램의 부재와 기존연구기관의 미션에 부가적으로 발생하는 공동활용에 필요한 연구인력 고용에 대한 프로그램이 부재하고 있다. 따라서, 기존의 구축된 하드웨어적인 관련 시설을 효율적으로 활용하기 위해서는 소프트웨어적인 공동활용 프로그램의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

○ 장기적 방안

극저온을 활용한 연구는 기초연구와 원천연구뿐만 아니라 양자정보통신기술과 같이 국가안보와 직접적으로 연결되어 있는 기반이다. 따라서, 장기적으로는 민간이나 대학이 아닌 국가연구기관과 조직을 활용하여 극저온거점연구소를 지정하거나 설립하여 지속적인 투자와 운용이 필요하다고 판단한다. 이미 수행되고 있는 관련 국가 R&D 자원과 인적자원을 재조직하여 미션을 정립하고 연구프로그램을 개발하고 적용할 필요가 있어 보인다.

해외 극저온 프로젝트: 유럽 1



해외 극저온 프로젝트 유럽 2

European Microkelvin Platform (2014-현재)

관련자료 "Memorandum of Understanding"자료 첨부 출처: <http://empplatform.eu>



(4) 초고온-초음속 다중극한환경 대응 초내삭마 소재 개발

1. 과제 개요

가. 과제의 정의 및 범위

1) 정의:

e. 극한 소재

- 기존의 극한소재 개발 과제들은 기획 단계부터 극한 환경에서의 실적용을 염두에 두고 기획되지 못하고 해외문헌의 개발 사례를 기반으로 극한 환경용 소재 제조만을 다루는 과제들이 대부분이었음. 이는 극한 환경용 소재를 실제 극한 환경에서 성능평가를 수행할 수 있는 여건이 많이 미흡하거나 극한 환경 구현을 위한 인프라의 존재 사실을 인식하지 못했기 때문임. 이에 따라 힘들게 개발한 소재도 실제 적용이 불가능했던 것이 우리나라의 지금까지의 현실이었음.
- 예를 들어 미래소재 디스커버리 과제의 극한 소재 부문의 경우 극한 소재 자체를 개발하는 과제로 기존에 알려진 조성과 방법을 이용하거나 이를 개선, 발전시켜 극한 환경에서 특성 구현이 가능한 소재를 제조하는 목적의 과제임. 그러나 제조된 극한 소재가 실제 극한 조건에서 적용이 가능한지를 조사하기 위해서는 극한 환경에 적합한 소재의 특성이 예측되어야 하며, 제조된 소재는 극한 조건이 구현된 환경 하에서 실험 되어야 하나 많은 경우 이를 위해서는 고가의 거대장비들이 필요하며 우리나라에서는 장비가 존재하지 않거나 존재 하더라도 접근이 어려워 현실적으로 측정이 불가능한 경우가 많았음. 따라서 실제 조건보다 완화된 유사, 모사 환경 하에서의 측정으로 실험 결과를 대체하는 경우들이 있음. 기존 과제들의 경우 많은 경우 극한 환경의 전산 모사, 극한 환경 구현, 극한 특성 평가 및 극한 소재 개발 과제들이 별개의 과제들로 진행 되었으며, 이에 따라 실제 극한 환경에서 사용 가능한 소재들의 개발에는 어려움이 있었음.
- 이와 달리 본 기획 과제에서는 향후에 진행되는 극한소재 개발 관련 과제들이 극한 환경 구현 - 극한 특성 평가 - 전산모사를 이용한 극한 특성 해석 - 극한 소재 개발의 상호 협력, 보완 및 적용을 과제의 기획 단계부터 고려하는 기반

구조를 마련하고자 함. 이를 통하여 극한 환경에서 사용하기 위한 소재 개발 시 그에 맞는 극한 환경 구현 및 특성평가를 동시에 고려하면서 과제를 진행할 수 있는 체계를 마련함으로써 지금까지는 미국, 러시아 등 극소수의 선진국에서만 가능했었던 실제 극한 환경에서 적용 가능한 다양한 소재의 개발을 현실화 할 수 있는 기반 환경 조성을 본 과제를 통하여 구현하고자 함.



<기존의 극한 소재 개발 방법과 본 과제를 통하여 제시 될 극한 소재 개발 방법의 비교>

2) 범위

나. 과제의 필요성

1) 과학기술적 측면

e. 극한 소재

- 미세먼지, 탄소 배출 저감 등과 연계된 에너지 효율 증대, 국방력 강화를 위한 성능 좋은 무기체계의 개발, 안전한 사회 구축을 위해 구조물들의 안정성 확보를 위한 특성 향상, 그리고 우주 탐사 및 개발을 위한 시스템 등에 대응하기 위하여 소재가 노출되는 환경들이 응력, 온도, 압력, 부식분위기, 방사분위기 등의 측면에서 점점 더 가혹해지고 있음.
- 따라서 소재들의 특성을 극대화하여 가혹한 극한 환경에서 활용하기 위한 연구나 기존 소재의 한계를 뛰어넘어 극한 분위기에서 사용이 가능한 새로운 소재들의 개발에 대한 수요가 증가하고 있음.
- 이러한 요구를 만족하기 위해서는 극한환경에서의 소재의 거동에 대한 기초적인 이해를 바탕으로 기존 소재의 한계까지의 특성을 증가시키거나 한계를 뛰어넘는 새로운 개념의 소재를 개발하고 이를 제조하기 위한 공정 개발과 극한 환경 구현을 통한 특성 평가를 수행하여 특성을 검증하는 통합적인 연구가 필요함.
- 그러나 극한환경을 구현하는데 필요하거나 극한환경에서 사용 가능한 극한소재에 대한 국내 연구 기반 및 체계적 연구 실적이 적을 뿐 아니라 소재 개발 후 극한환경 하에서의 특성평가 가능한 인프라도 절대 부족한 실정이어서 이에 대한 대책이 필요함.

① 극한환경용 세라믹스

- 2018년 3월 1일 러시아의 대통령인 블라드미르 푸틴은 신냉전의 서막이라고 일컬어지는 신형 슈퍼 무기 5종을 공개하였음. 이들 5가지 무기는 기존 서방의 방어체계인 MD (missile defence) system을 무력화하기 위한 목적으로 제작되었는데 이들 중 4종이 극초음속 체계로 구체적으로는 사정 거리가 무한대인 초장거리용 핵 추진 순항미사일, 최고 속도 MACH 20인 장거리용 RS-26 아방가르드 극초음속 미사일 체계, 최고 속도 MACH 10인 중장거리용 극초음속 킨잘 (Kinzhal) 미사일 체계 및 '오브젝트 4202'(object 4202)로 불리는 신형 극초음속(HGV) 탄두를 탑재한 차세대 극초음속 ICBM인 RS-28 '사르마트' 등임.



(a)

(b)

(c)

(d)

<러시아에서 발표한 신형 슈퍼무기들. (a) 극초음속 핵추진 순항미사일, (b)

RS-26 아방가르드, (c) 킨잘 (Kinzhal) 미사일, (d) 극초음속 ICBM인 RS-28 사르마트>

- 이에 대응하여 미국은 2018년 3월 3일 MD 정책의 전면적 수정 검토를 발표하는 등 향후 첨단 군사용 무기체계의 개발은 극초음속, 극고온의 극한 환경에서 작동되는 극초음속 체계에 집중 될 것으로 예상됨. 이에 따라 향후 세계적으로 극초음속 환경을 포함한 다양한 극한환경용 체계에 대한 연구가 집중 될 것으로 예상됨.
- 초고온 세라믹스 분야에서는 저온소결 및 산화저항성 연구 외에 초고온 세라믹 분말 대량 생산 기술 확보, 원료 분말의 고품질화, 장섬유 강화 복합체 제조에 의한 대형화 및 신뢰도 향상, 접합특성 향상 및 방전가공 (Electrical discharging machining) 등을 이용한 가공성 개선 등이 이루어 질 것으로 예상됨. 특히 원료 분말의 양산 및 고품질화 기술은 선진국들의 거래 제한 장벽을 넘어서 새로운 소재에 대한 주도권을 쥐기 위해서 반드시 필요할 것으로 생각됨.
- EU에서 진행 중인 C³HARME project는 위에서 언급된 소재 특성 개선 이외에 실제 부품에 적용하기 위한 크기 및 형상의 소재 제작이 목표로 되어있음. 따라서 향후에는 국내에서도 초고온 세라믹 소재의 실 적용을 위한 연구가 필요할 것으로 예상됨.

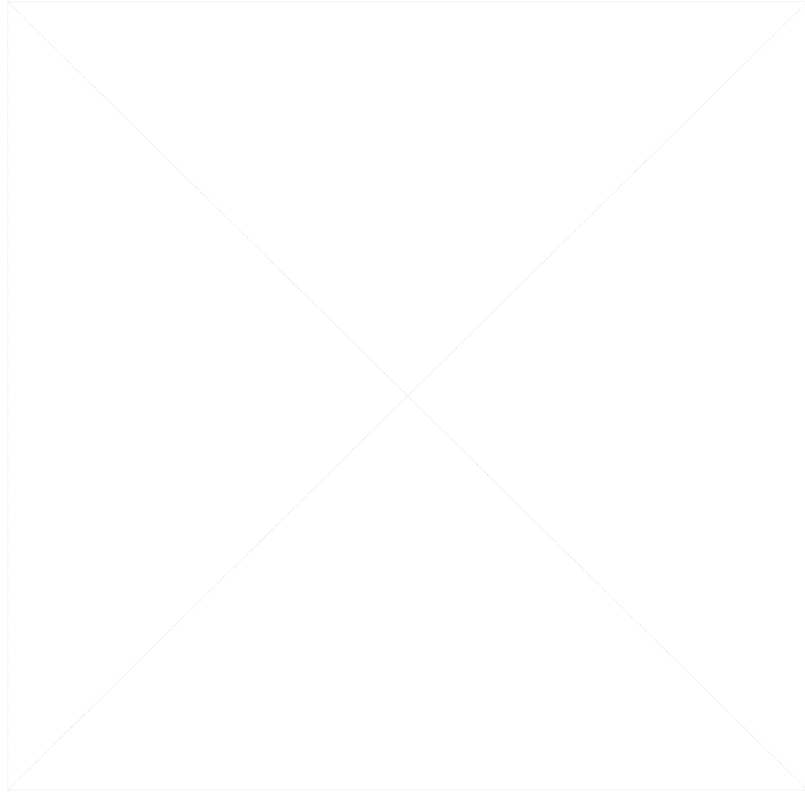
② 극한 고온 금속소재

- 현재 이론적으로 산소와 화석연료가 화학량적 결합(stoichiometric combination) 측면의 최적비율로 연소할 경우 온도는 약 1640℃ 이상까지 올라가게 됨. 따라서 현재 대표적 고온재료인 Ni기 초내열 합금의 경우 한계온도가 약 1150℃로 초고온용 터빈 소재로 사용하기 위해서 차가운 압축공기를 유입시켜 내부 온도를 조절하거나 냉각장치의 설치가 필수적임. 이러한 냉각에 의해 발전 및 항공체 비행 효율이 저하되는 문제가 발생함.



<GE에서 개발된 공냉장치가 장착된 가스 터빈>

- 기존의 초내열합금의 가용온도를 뛰어넘는 극한 환경용 차세대 고온 금속소재가 개발되어 고온용 부품으로 적용하게 되면, 냉각을 실시하지 않거나 혹은 적은 냉각만으로 터빈 및 엔진 구동이 가능하기 때문에 기존 대비 효율을 극히 향상시킬 수 있음. 이러한 장점은 발전뿐만 아니라 우주·항공 및 국방 분야에도 적용 가능하여 높은 출력과 함께 연비까지 우수한 항공기나 미사일 등의 개발이 가능함.
- 따라서, 녹는점 2000℃ 이상의 Mo, Nb, W, Ta 등의 고용점 금속을 기지로 갖는 합금들과 metal-silicide composite 및 high entropy alloy 등 극한 고온용 합금 등 지금까지 체계적인 개발연구가 진행되지 않았던 극한 신소재에 대한 연구가 필요하며 고용점 합금들의 경우 우주탐사선용 원자로나 핵융합 발전의 소재로도 연구가 필요함.



<초고온용 금속소재의 활용>

- 극한 고온용 금속의 연구 개발 방향은 고온물성, 파괴인성, 내산화 특성을 향상시키는 연구가 주로 진행되고 있으며, 이를 위해 제조공정 개발에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있으나 물성 개선에 대한 연구는 아직 기초적인 수준임.
- 국외의 경우, 1980년대부터 선진국을 중심으로 차세대 초고온 합금에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 미국의 경우 NASA jet propulsion 연구소와 Oak ridge 국립연구소 등 정부기관이 Lockheed Martin, Boeing IDS 등 군수업체 그리고 GE, P&W, Siemens-Westinghouse와 같은 민간기업과 연구를 수행하여 기술 개발을 주도하고 있음.

③ 극한 초내식 금속소재

- 금속이 특정한 환경에 노출되었을 때 열화되는 현상인 부식 현상은 오랜 기간 금속 분야에서 해결해야 할 근본 문제로 인식되어 왔음.
- 최근 공해, 산성비, 황사 등 부식에 영향을 미치는 인자들이 증가하고 있어 부식 예방을 통한 사회 비용 절감의 필요성이 더욱 높아지고 있음. 금속의 부식 방지 기술 개발은 국민 안전 및 재산 보호와 직결되는 매우 중요한 이슈임.
- 극한 환경(극산성, 고온/부식 복합 환경)에서 초내식 특성 발현이 가능한 소재

를 개발한다면 산업적으로도, 사회적으로도 파급 효과가 매우 클 것으로 기대 됨.

④ 고분자 복합재료

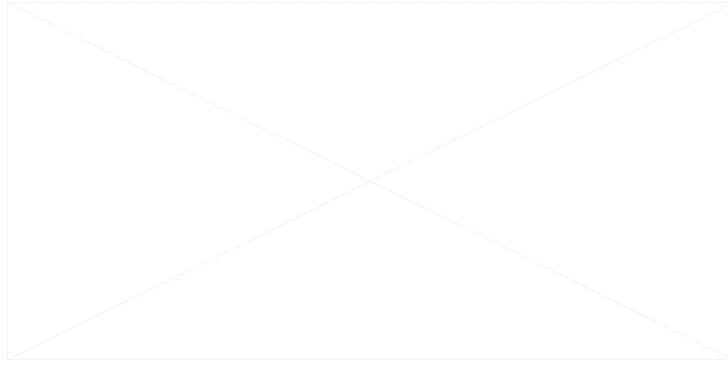
- 극저온 환경용 소재는 군사, 우주, 항공, 의료, 진공, 에너지, 전자, 수송, LNG 관련분야 등에서 널리 활용되고 있는데, 금속에 비해 경량이면서 극저온 환경에서 높은 기계적 강도를 유지하는 단일 구조재로서 복합재료가 기대를 모으고 있음. 극저온 복합재료는 극저온 환경에서 뛰어난 기계적 특성이외에 열전도도, 전기전도도 및 열팽창 계수 등 요구 사항을 만족 시켜야 함. 또한 복합재료에 대한 신뢰성 있는 극저온 물성 평가기술 확립도 매우 중요함. 국내에서는 극저온 복합재료에 대한 체계적 연구 및 기술개발 로드맵이 부재하기 때문에 미래 국가전략기반 소재인 극저온 재료에 대한 연구 개발 투자가 장기적 안목에서 절실함.
- 또 다른 응용으로서, 극저온 기기(펌프, 밸브류)가 대량 사용되고 있는 고부가 가치 선박인 LNG 선박의 수주량이 꾸준히 증가하고 있지만, 기본 재료의 국산화나 재료 및 부품 성능 평가에 대한 체계적 연구가 부족한 상태임. 따라서 현재 세계적 경쟁력을 갖춘 선박용 극저온 기기에 대한 재료 및 성능 평가 기반을 구축함으로써 국내 기술력 제고 및 기업의 제품 설계 및 수주 능력 향상에 도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨.
- 고분자 복합재료는 우수한 기계적 특성 및 성형성을 보유하고 있으나 200℃ 이하의 비교적 낮은 사용온도 범위로 인해 고온 환경에서의 응용분야가 제한됨. 미국, 일본을 중심으로 기술 선진국들은 고분자 복합재료의 고온 특성을 향상시켜 항공, 우주 분야에서 경량 구조 소재로서 일부 사용하고 있음. 특히, 450℃ 이상의 고온에서도 기계적 특성을 유지 할 수 있는 기술을 개발하여 기존 복합재료의 열적 한계를 극복한다면 금속, 세라믹 소재에 대한 대체가 가능한 경량화 구조용 부품을 항공, 우주 및 국방 분야에 이르기 까지 그 활용도를 크게 높일 수 있음.

2) 경제산업적 측면

e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스

- 2008년에는 2015년 분야 별 CMC 세계 시장은 연 8.3% 성장할 것으로 예측되었으나 2014년 분석된 2013-2018년 CMC 소재의 예상 성장률은 연 9.89% 성장할 것으로 상향 조정되었으며, 2016년 분석에 의하면 2016년 \$2.28 billion (2조 5천억원)에서 2025년 까지 연 평균성장률은 13%로 매우 빠르게 시장이 성장하는 분야로 예상됨.¹⁾

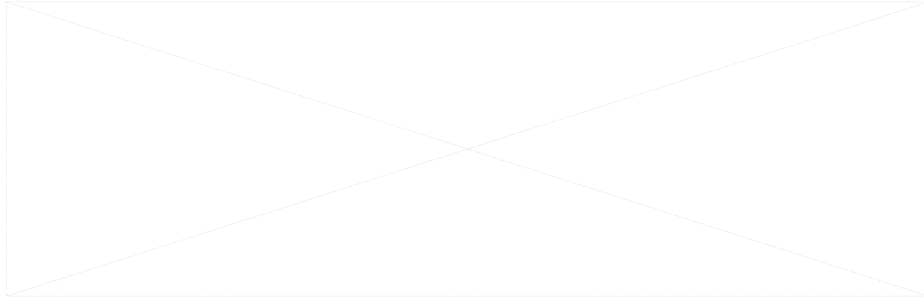


2014년부터 2025년까지 미국의 CMC 시장 규모 성장

- SiC계 세라믹 복합재료는 우주항공 및 군사 분야의 제한된 영역에서 주로 사용되어 왔으나 미래에는 저가격화 및 고성능화를 통하여 고부가가치를 갖는 고성능 세라믹 복합재료의 적용 범위를 기계/화학 영역과 에너지/환경 영역까지 확대시키기 위한 노력이 필요하며 자동차용 브레이크 디스크 등 일부 부분에서는 상용화가 진행되고 있음
- SiC계 CMC는 첨단 장비의 기술 수준을 결정짓는 핵심 소재이며 전략소재로써 기술 도입 및 제품 수입에 제한이 가해지는 소재임. 향후 섬유 강화 세라믹 복합재료의 시장이 고가인 우주/항공 분야 뿐 아니라 기계/화학 분야와 에너지/환경 분야로 확대될 것으로 예상되며, 이들 분야의 시장 또한 빠르게 성장할 것으로 전망됨.
- 민간 항공기용 가스터빈 시장 규모는 연 45조원으로 군용 가스터빈 시장까지 고려할 경우 가스터빈의 총 시장규모는 연간 100조원 이상의 거대시장임. 이중 고온 소재부가 차지하는 비율은 최소 10% 이상으로 향후 초내열 합금이 CMC로 대체 될 경우 소재 기준 연 10조원 이상의 거대 시장임.

1)

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-ceramic-matrix-composites-market>



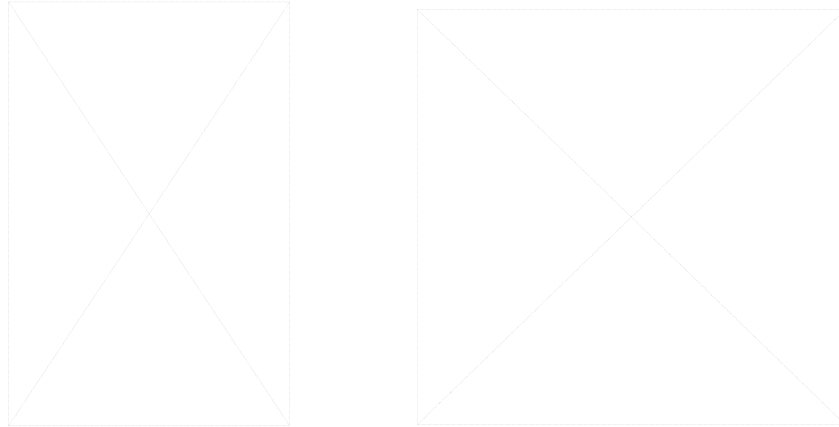
<최근 및 향후 10년간 발전용 가스터빈 시장 규모 추이>

- GE는 가스터빈 시장의 40% 이상을 차지하는 주요 생산 기업으로 GE가 가스터빈 고온부 소재를 초내열 합금에서 CMC로 대체하는 구체적인 활동을 시작하면서 롤스로이스, 프랫 앤 휘트니, 지멘스, IHI 등 기타 가스터빈 생산업체들도 고온부 소재를 CMC로 대체하는 연구를 최우선 과제로 지정하여 수행하고 있음.



<발전용 가스터빈 생산업체의 시장 점유율>

- CMC의 경우 GE에서 항공기용 가스터빈인 LEAP 엔진의 고온부 소재 중 5%를 CMC로 대체하여 2016년에 생산을 시작한 이후 빠르게 기존 엔진들을 대체해 나가고 있으며, 2020년 생산이 예정되어 있는 GE9X 엔진에서는 고온부 소재의 약 50%를 CMC로 대체할 것으로 예상됨.



<GE의 LEAP 엔진의 시장 점유율 변화 및 차세대 GE9X 엔진>

- GE는 Ashville에 양산용 공장을 2014년 10월에 완공하고 2016년부터 LEAP 엔진용 CMC 부품들의 양산을 시작하고 있으며 원료인 SiC 섬유 및 prepreg 양산을 위한 대규모 설비들을 2018년 Huntsville에 건설하였음. 따라서 복잡형상을 갖는 CMC 시장은 현재 시작단계로 생각되나 향후 연 10조원 이상의 거대시장을 형성할 것으로 예상됨.



<GE의 가스터빈용 CMC R&D 및 생산도>

② 극한 고온 금속소재

- 고온용 금속소재의 대표인 Ni기 초내열합금의 경우 전세계 superalloy 시장은 2016년 기준 41.7억 달러에서 2023년 79.5억 달러 (CAGR 9.7%)로 성장할 것으로 예측 (Statistics MRC 자료) 되고 있음. 초내열합금 시장은 항공기엔진, 가스터빈, 화학플랜트 등이 주도하고 있으며 특히 우주항공분야가 차지하는 비중이 55%, 발전용 및 산업용 가스터빈이 30% 가량으로 대부분을 차지함.
- 가스터빈의 경우, 세계 시장은 연평균 4%의 성장률로 2015년 160억 달러에서

2021년에는 205억 달러에 달할 것으로 전망되며 (Zion market research 자료) 초내열합금이 주로 사용되는 고온부품 시장은 2015년 약 72억 달러에서 연평균 7% 성장률로 시장규모가 확대될 것으로 전망됨.



<가스터빈 세계시장 규모 및 전망 (단위: 10억)>

- 항공기 엔진의 경우 니켈합금이 전체무게의 40%를 차지하며 상대적으로 가벼운 Ti 합금이 30%, 가격이 저렴한 steel 이 25%를 차지하기 때문에 전체 항공 엔진 부품 및 소재 시장의 상당부분을 점유할 것으로 추정됨.
- 항공기 엔진, 가스터빈 등은 효율향상이 필요하여 터빈 입구온도를 지속적으로 높이고 있어 기존의 초내열합금이 사용되던 부품들을 내열성능이 더 우수한 합금들로 대체할 경우 산업적 파급효과 클 것으로 기대됨.
- 또한 우주 탐사선 원자로나 핵융합용 소재로서 금속소재의 경우 당장의 실용화를 통한 산업적 파급효과는 기대하기 어려우나 극한환경에서 사용되는 소재의 독자적인 기술 개발을 통한 미래 에너지원 및 우주기술의 확보 측면에서 향후 국가 경쟁력의 지표가 될 매우 중요한 연구라 할 수 있음.

③ 극한 초내식 금속소재

- 러시아 이베코 화산의 온천의 -1.7, 미국 아이언 마운틴 광산 용출액의 -3.6등 극한 자연 환경에서는 negative PH 값을 갖는 극산성 환경이 형성될 수 있다는 보고가 이루어 지고 있음.
- 우주 생명체 탐사, 심해저 에너지 탐사와 같은 극한 환경 활동을 위해 극산성 및 복합 부식 환경에서의 금속의 부식 거동을 이해하고 이에 대응할 수 있는 초내식 소재 기술을 개발하는 것이 매우 필요함.
- 이렇게 개발 된 기술은 화학 플랜트, 석유 화학 산업, 바이오매스 연소 신재생 에너지 생산 등 고온과 부식이 동시에 이루어지는 복합 환경 분야에 적용이 가

능할 것으로 판단되어 산업적 파급력이 매우 클 것으로 기대됨.

④ 고분자 복합재료

- 초고내열성 고분자 및 고분자 복합재료는 자동차산업, 항공우주산업을 중심으로 적용되어지고 있음. 매년 금속 및 세라믹 제품을 대체해 가는 방향으로 연구가 진행되며, 이러한 소재는 헬리콥터, 미사일을 포함한 군수용으로 가장 많은 양이 사용되고 있으며, 일반 산업 용도로 그 이용이 크게 증가하고 있음.
- 전 세계 고내열 고분자 시장은 2016년 약 120억 달러로 추정되어 자동차, 항공, 우주 산업이 성장을 이끌고 있음. 고내열 고분자 시장의 중심은 주로 미국이며, 미국 시장은 2025년 40.5 억달러 정도로 추정됨.



고내열 고분자의 미국 시장 전망²⁾

3) 사회문화적 측면

e. 극한 소재

- 최근 급격하게 발생하고 있는 대기오염(미세먼지)과 지구온난화 문제를 해결하는 방안 중 발전 효율 개선이 가장 효율적인 방안으로 예상되고 있음(그림 참조). 발전 효율은 발전용 가스터빈의 터빈 입구 온도(TIT, Turbine Inlet Temperature)에 비례하여 증가하기 때문에 보다 높은 TIT에서 운용이 가능한 고온 소재를 개발할 경우, 연료 절감 효과 뿐만 아니라, 사회적 이슈가 되고 있는 환경 문제를 개선할 수 있을 것으로 판단됨.

2) Heat Resistant Polymer Market Analysis by Product (Fluoropolymers, Polyphenylene Sulfide, Polyimide, Polybenzimidazole, PEEK), By End-use, Regional Analysis, And Segment Forecasts, 2018-2025, Market Research Report, 2017



<시나리오별 CO₂ 배출 예상량과 CO₂ 배출 저감 방안 및 효과>

(자료: World Energy Outlook, 2010년)

- 극한 소재와 같이 소재 특성 발현의 근본적인 이해가 필요한 기초기술 분야가 발전할 경우 산업에 적용되는 응용기술 발전의 기반이 되기 때문에 과학기술 분야에서 국가 경쟁력 강화와 위상이 제고될 수 있으므로 연구 개발이 필요함.

2. 국내외 극한연구개발 동향분석

가. 국외동향

1) 주요 연구주제 측면

e. 극한 소재

- 초고온 소재는 항공·우주 분야 중 극초음속 체계의 엔진용 부품, 노즐 및 고온용 외벽 재료로의 적용을 위하여 미국, 일본, 프랑스, 영국, 독일, 러시아 및 중국 등의 국가연구소와 관련 업체에서 정부 주도하에 연구개발을 수행하고 있음.³⁾

① 극한환경용 세라믹스

- 04년 미국의 National Science Foundation (NSF)과 Airforce Office of Scientific Research (AFOSR)에서는 초고온 재료의 연구 방향을 정립하기 위

3) 극한환경재료 연구개발 및 기술기반 구축사업, 기획 보고서, 한국기계연구원 부설 재료연구소, pp. 33-60 (2008)

한 workshop을 수행하였음. 이 때 초고온 재료로 비산화물계 세라믹의 경우 ZrB_2 , ZrC , HfB_2 , HfC , HfN , SiC 및 Graphite 등을, 산화물계 세라믹은 $Y_3Al_5O_{12}$, 금속계 소재로는 Rhenium 등을 포함시켰음.

- UHTC 관련 연구는 고성능의 HfC 등의 섬유와 ZrB_2 , ZrC , HfB_2 , HfC , SiC , TaC 및 이들의 복합체 개발에 연구가 집중되고 있음. 또한 세라믹스의 단점인 낮은 신뢰도를 개선하기 위하여 다양한 세라믹 섬유로 강화된 탄소/ SiC 복합체, SiC/SiC 복합체 및 탄소/carbide, 탄소/Boride 계 CMC 개발을 위한 연구가 진행되고 있음.

미 국	○ Multidisciplinary University Research Initiatives (MURI) 프로그램 (2015-2019) 극고온에서 견딜 수 있는 소위 “entropy-stabilized alloys” 를 개발. 2,000°C 이상에서 열적 및 기계적으로 안정한 소재를 찾는 방법의 개발이 주된 요소로 신 물질을 만드는게 목적이 아닌 위의 특성이 가능한 소재를 시뮬레이션 등을 이용해 발견한 후 그 제조 방법을 도출하는 것이 과제 목표임
일 본	○ SIP-SM⁴I (2014-2018) 연 370억원 규모의 대규모 과제로 다양한 항공 우주소재 개발을 목표로 하고 있으며 그 중 세라믹 코팅 및 복합재료 평가 부분이 포함됨.
유 럽	○ X-MAT 프로젝트 (2013 - 2018) Univ. Birmingham에 의해 주도되며 분말 함침 및 CVI에 의한 UHTC-CMC 제작 및 특성 평가 ○ C³HARME 프로젝트 (2016-2020) 6개국, 12개 기관 및 기업들이 참여하는 100억원 규모의 대형 프로젝트. 마하 7 이상의 극초음속 체계의 열보호 소재 제조를 목표로 하고 있으며 사용온도 2800K, 열유속 15 MW/m 이상을 목표로 하고 있음. 최종 목표는 삭마율이 매우 낮은 로켓용 노즐과 대형 열보호 외부 패널 제작임. ○ EPICE (moteurs et intégration motrice) 프로젝트 (2020년 TLR9 예정) 프랑스에서 차세대 민간 항공기 엔진용 CMC exhaust cone 및 LP turbine blade 제조 project. 2025년까지 연료 소모량 25% 감축을 목표로 하고 있음.

② 극한 고온 금속소재

- 고온용 금속소재의 경우는 주로 군사적, 산업적 수요가 많은 Ni기 초내열합금에 대해 많은 연구 및 투자가 진행되어 왔음. 열기관들의 작동온도가 점점 높아지고 국방, 우주항공, 원자력 등 보다 가혹한 환경에서 사용이 필요한 고온소재에 대한 니즈가 증가하면서 기존 Ni기 초내열합금의 한계를 뛰어 넘는 다른 합금들에 대한 연구 개발이 진행되어 왔음.
- 2006년 Sato 등에 의해 Co 합금인 Co-Al-W계에서도 FCC 기지에 규칙격자를 갖는 안정적인 L12 γ' 상이 석출될 수 있음을 발견했는데 용점이 Ni기 합금보다 높아 고온재료로 사용될 수 있음이 고려되어 미국, 영국, 일본, 독일, 중국 등 기존 초내열합금 연구의 선진국들을 중심으로 수행되고 있음.
- 고온에서 사용되기 위해서는 우선 합금 자체의 용점이 높을 필요가 있음. 따라서 니켈에 비해 용점이 높아 기본적인 고온 특성이 우수한 고용점 원소를 기반으로 하는 합금들에 대한 연구가 추진되고 있음.
- 고용점 합금들로는 녹는점이 3,400°C 로서 가장 높은 금속인 텅스텐 (W)을 비롯하여 3,200°C의 레늄(Re), 3,000°C의 탄탈륨 (Ta), 2,600°C의 몰리브덴 (Mo), 2,500°C의 나이오븀(Nb), 1900°C의 바나듐 (V), 하프늄(Hf), 지르코늄 (Zr) 등이 있으며 원자력·항공·우주개발 등 고온에서 장시간 견딜 수 있는 재료의 필요성이 증가함에 따라 이러한 금속을 기본으로 한 합금을 사용하게 되었음.
- 이들 합금 중 현재 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 소재는 Mo, Nb으로 용점이 각각 2617°C, 2468°C에 달하며, 밀도 또한 10.28 g/cm³와 8.57 g/cm³로 낮기 때문에 초내열 합금의 주요 응용분야인 항공 또는 발전용 가스터빈 등에도 적용이 가능할 것으로 예상됨.
- 미국은 2000년대에 초고온용 합금 개발을 위해 General Electric과 Air Force에서 주조용 Nb기 고온합금 개발을 진행함.
- 유럽에서는 Ni기 초내열합금의 차세대 소재를 개발하기 위해 독일, 오스트리아, 영국, 프랑스, 체코, 이탈리아를 중심으로 ULTMAT(ULtra high Temperature MATerials for Turbines) 프로그램을 통해 Nb 및 Mo기 metal/silicide composite 합금 개발 연구를 수행함.
- 또한 프랑스, 영국, 독일 기관을 중심으로 HYSOP 프로젝트를 수행. 인성이 낮은 고온 소재에 대하여 공정 기술 개발을 통하여 기계적 특성을 향상시키는 방안이나 Nb-Si 기 합금의 내산화, 내식성 향상을 위한 방안에 대한 연구를 추

진하였음.

- 일본에서는 최선단 차세대 연구개발 지원 프로그램으로 “궁극의 내열성을 가진 초고온재료 개발 및 초고온 특성 평가” 과제를 통해 Mo-Si-B 계 신합금 개발 관련연구가 진행되었음.
- 연구를 위해 진공, 불활성, 수소 환원 분위기에서 최고 2600℃ 까지 승온이 가능한 열처리 장비, 1200℃까지 상분석이 가능한 고온 X선 회절장치, 1200℃ 까지 측정 가능한 전자기 초음파 탄성계수 분석 장비, 진공 및 Ar 분위기에서 2000℃ 까지 실험이 가능한 초고온 인장 크리프 시험기 등의 장비들이 활용되었음.



<초고온용 금속소재의 해외 연구 동향>

- 중국에서는 베이징 대학교를 중심으로 National Nature Science Foundation of China의 과제를 통해 초고온용 Nb기 고온합금에 대한 연구를 수행하고 있음.
- Ta과 W 합금의 경우 높은 비중과 충격 시 특징적인 파단양상을 보이기 때문에 국방 분야에서 관통자 등으로도 사용되기도 하지만 높은 용점과 우수한 내방사화 특성으로 인해 핵분열 또는 핵융합과 같은 원자력 분야의 극한환경에서의 활용을 위한 연구가 진행되었음.
- Ta 합금의 경우 고온강도나 크리프 변형 저항성 향상이나 Alkali metal compatibility 향상, 제조 공정 용이성 측면에서 연구가 진행되었음.
- W 합금의 경우 가장 연구가 활발하게 진행되고 있는 분야는 핵융합 분야임. 핵융합로의 대면재의 경우 고온 고압을 견뎌야할 뿐 아니라 중성자 조사로 인한

취화에 대한 저항성, 저방사화 등의 특성이 필요하며 현재 금속재의 경우 W의 사용가능 온도 범위가 가장 높은 것으로 알려져 있어 divertor의 소재로도 연구가 되고 있음.

- ODS (Oxide Dispersive Strengthening) 합금은 미세한 산화물 입자를 재료에 분산시켜 전위의 이동을 방해하고 고온에서도 강화상의 변화가 없어 높은 온도까지 강도가 유지되는 합금임. 기존의 ODS 합금의 경우 Ni 합금에 비해 더 높은 온도에서의 사용이 가능하나 크리프 강도가 높지 않음. ODS 합금의 경우 높은 stress exponent 값을 가지기 때문에 크리프 응력의 작은 증가에도 변형 속도가 크게 증가하여 크리프 도중 갑작스럽게 파단이 발생하는 경우가 있음. 또한 제조상에서 산화물을 균질하게 분포시키기 어려움이 있음. 이러한 한계를 극복하기 위해서 최근에는 Ni기지나 Fe기지가 아닌 고용점 원소를 기지로 하거나 고엔트로피 합금을 기지로 한 ODS 합금 개발이나 3-D 프린팅을 이용한 제조공정 등에 대한 관심이 높아지고 있음.
- 최근 비슷한 분율의 다수의 주요 원소로 구성된 고엔트로피 합금이 다기능 재료 및 차세대 구조재료로 각광을 받고 있음. 초고온용 소재로는 내화원소 기반의 BCC 고엔트로피 (HEA, high entropy alloy) 합금이 많이 연구되고 있음. 미공군 연구소에서 처음 개발된 내화원소 고엔트로피 합금은 W, Nb, Mo, Ta와 같은 내화원소들로 이루어져 있어 높은 녹는점과 고온 강도를 갖고 있음. 미국 주도하에 중국과 러시아 등 여러 나라에서 경량화와 연성확보를 위하여 Al과 Ti, Si 등과 같은 원소들이 첨가된 새로운 합금 개발에 매진하고 있음.

③ 극한 초내식 금속소재

- 세계 각국에서는 부식 대책 수립을 위해 국가적 지원 하에 실태조사를 실시하고 실정에 맞는 부식방지 표준 제정 및 가이드라인 제시를 실행하고 있음.
- 부식 비용 계산 방법에 따라 국가의 부식 비용이 다르게 평가되기 때문에, 기술 선진국들은 정책적으로 자국 부식측정 표준을 국제화하기 위해 노력하고 있음.
- 미국은 1949년 이래 3차례, 영국, 일본 중국은 2차례와 같이 각국은 국가의 부식 비용에 대한 조사를 수십년에 걸쳐 실시하고 있음
- 해외 각국은 금속구조물의 안전설계 및 유지보수를 위해 부식지도를 작성, 관리하고 있음. (부식지도, Corrosion map: 특정 재료에 대해 부식 속도가 동일한 지역을 연결한 지도, 구조물의 부식 속도와 사용연한 결정에 필수적으로 사용)

표. 각국의 국가 부식 비용 조사 결과

Country	Annual corrosion cost	% of GNP	Reference Year
UK	£ 1.365 billion	3.5	1970
USA	\$ 534 billion	6.0	1998
Japan	¥ 9694.7 billion	1.9	1997
Australia	\$ 2 billion	1.5	1982
USSR	\$ 6.7 billion	2.0	1969
W. Germany	\$ 6 billion	3.0	1969
Finland	\$ 54 million	—	1965
Sweden	\$ 77 million	—	1964
India	\$ 320 million	—	1961
Kuwait	\$ 1 billion	5.2	1987
China	\$ 35.5 billion	—	2000



<세계 부식 지도>

④ 고분자 복합재료

- 미국의 경우, Microcosm사는 미공군연구소 (AFRL)과 합작하여 Scorpius 프로그램의 일환으로 탄소섬유 복합재료를 이용한 극저온용 액화산소 저장용기를 제작하여 극저온 시험 및 안전성 평가를 하였으며 이를 SR-XM-1 로켓에 장착하여 성능평가를 하였음. 이 극저온 용기는 지름이 50cm, 길이가 110cm로 필라멘트와인딩 공법으로 제작되었으며 38 bar 정도의 내압에 견딜 수 있게 설

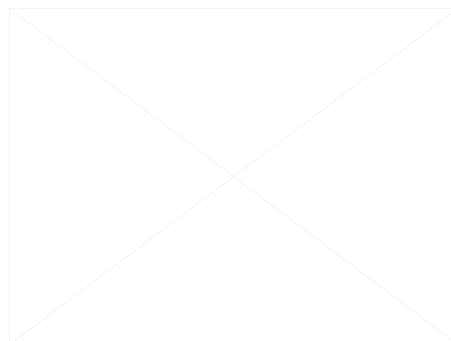
계되었음. NASA는 2005년 XCOR Aerospace사와 함께 "Long-Life, Light Weight Oxidation Resistant Cryogen Tank" 프로그램의 일환으로 7백만 달러를 들여 극저온 환경에서 사용 가능한 액화산소 저장용기를 개발하였고 내열특성이 향상되는 열경화성 불소중합체(Fluoropolymer) 수지를 사용함으로써 영하 260℃~280℃범위까지의 극한환경에서도 사용이 가능한 소재를 개발함. HyperComp사는 복합재 압력용기를 전문적으로 제작하는 회사로 NASA의 Deep Space Probes 프로그램의 일부로 NASA의 Marshall Space Flight Center와 함께 충격특성, 내열특성, 내화학적성 등 다양한 요구조건에 맞는 극저온 복합재 용기 및 파이프를 제작하였음. NASA의 Marshall Space Flight Center에서는 RLV (Reusable launch vehicles) 프로그램으로 Lockheed Martin사와 합작 하에 X-33비행체 시험에 탄소섬유/에폭시 저장용기를 장착하였음.



- 일본의 경우, JAXA 소속의 Kakuda 우주센터에서 2003년에 극저온 시험시설에 관한 기본 인프라를 구축하고, 로켓이나 인공위성 등에 사용되는 2차구조물 극저온 복합재료를 제작함. 또한 액화산소와 액화질소를 저장할 수 있고 -250℃ 범위까지 견딜 수 있는 LNG 탱크를 개발하여 H-II A 발사체에 장착/시험운행하였음.
- 유럽의 경우, ESA (European Space Agency)에서 필라멘트와인딩 공법으로 CFRP 극저온 복합재 용기와 연결관을 제작하였으며, 오스트리아 항공우주연구소는 자동차 부품회사인 Magna Steyr와 2004~2008년간 자동차용 수소저장 시스템개발을 위한 기술교류를 통해 탄소섬유 복합재료를 이용, 액화수소와 매탄가스를 저장할 수 있는 극저온 저장용기를 개발.

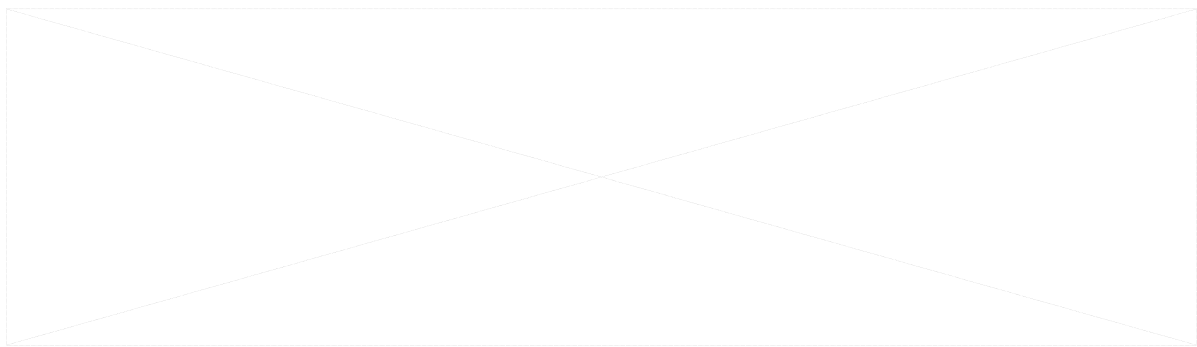


- Kaneka社 (일)는 '07년부터 우주항공 연구개발 기구 (이하, JAXA)와 공동으로 항공·우주용 비행선에 대해 내열성능이 필요한 금속재료 부품의 대체를 목적으로, 연구를 진행시켜 고내열성 탄소섬유강화 복합재료용 성형가공성이 우수한 신규 열경화형 polyimide 개발. Kaneka에서 보유하는 polyimide의 분자 설계, 합성 기술을 기반으로 JAXA와 공동으로 개발을 진행해 왔으며, 탄소섬유에 polyimide 올리고머를 피복시킨 시트 모양의 프리프레그를 용액침침법으로 제조하여 적층하여 가압/가열하여 복합재료를 제조함. 기존의 polyimide 올리고머는 용해성이 낮으므로 충분한 기계적 강도를 발현하기가 어려운 단점을 가지고 있어, 이를 해결하기 위해 중간체인 poly(amic acid)를 이용하였으나 이미드화 공정에서 발생하는 물분자로 인한 공극으로 최종 제품의 기계적 강도를 저하시키는 문제가 있었음. 개발된 새로운 열경화형 polyimide는 용해성을 크게 개선하여 복합재료 제조에 용이할 뿐만 아니라, 제조한 복합 재료는 370℃이상의 내열성과 높은 인성을 겸비한 물성을 가지고 있음. 또한, 레진 트랜스퍼 몰딩 (RTM)법을 이용한 고내열성 복합재료를 위한 새로운 열경화형 polyimide의 전개도 가능하게 됨. RTM 성형의 열경화형 polyimide는 고온 용융시 유동성이 매우 높고, 대폭적인 비용 절감과 생산성 향상이 전망됨.



열경화형 polyimide를 이용한 탄소섬유 복합재 (Kaneka)

- TenCate Advanced Composites社 (미)는 레이돔용 복합소재와 수지 시스템을 공급하는 전문회사로서 cyanate ester, epoxy 프리프레그, 접착제 및 syntactic foam, 저유전 상수, 낮은 loss tangent 및 저흡습성 등의 우수한 특징을 보유하고 있음. 안테나, reflectors, 레이돔, sonar domes, 마이크로파 투과 구조 및 레이더 흡수 구조재 등을 육상, 해상, 항공기 및 미사일용으로 제조하고 있음. 강화재로는 유리섬유, quartz 및 aramid 섬유 등을 활용



Electronically Transparent Materials – Low Dielectric Composites

- KDT 社 (미)는 국방 응용을 위한 고분자 복합소재용 수지 공급업체로 Organopolysilazane (상품명 : DI-200)를 생산하고 있으며, polyceramic matrix composites 제조에 활용하고 있음. Organopolysilazane 복합소재는 안테나 원도나 및 미사일 레이돔 등에 응용이 가능한 전기적 특성 및 열안정성을 보유하고 있음. 즉, 우수한 유전특성 및 매우 낮은 투과 손실 (8-14 GHz 주파수 영역에서 매우 안정)을 가지고 있음.

2) 극한연구 시스템 측면(연구비 지원, 인프라 구축/활용, 실적활용 및 파급, 인력양성 전반에 걸쳐)

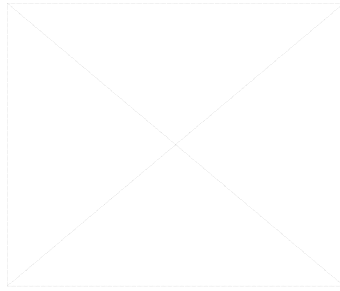
e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스

- 2018년 3월에 발표된 러시아의 극초음속 체계 개발에 대응하여 미국은 이를 뒤인 2018년 3월 3일 MD 정책의 수정 검토를 발표하였음.⁴⁾ 2018년 3월 극초음속 능력 개발이 미 국방부의 연구개발을 위한 기술 최고 우선순위 중 하나가 되었

음.⁵⁾

- 미 공군은 최근 극초음속 체계인 X-51의 개발과 시연을 가속하기 위한 예산을 두배 이상으로 증액시켰음.⁶⁾ 2017에서 2020 회계연도까지 예산은 1억3천만 달러에서 3억 9백만 달러로 증가했고, 2021년에는 2천2백만 달러가 추가될 예정임. 추가로 매년 2천5백만 달러가 스크램제트 엔진 개발을 지속하기 위해 배정됨. High-Speed Strike Weapon (고속 타격 무기) 프로젝트에 따라 극초음속 무기 체계의 2020년대 초반 개발과 배치를 앞두고 2019년에 비행 시험이 예정되어 있음.



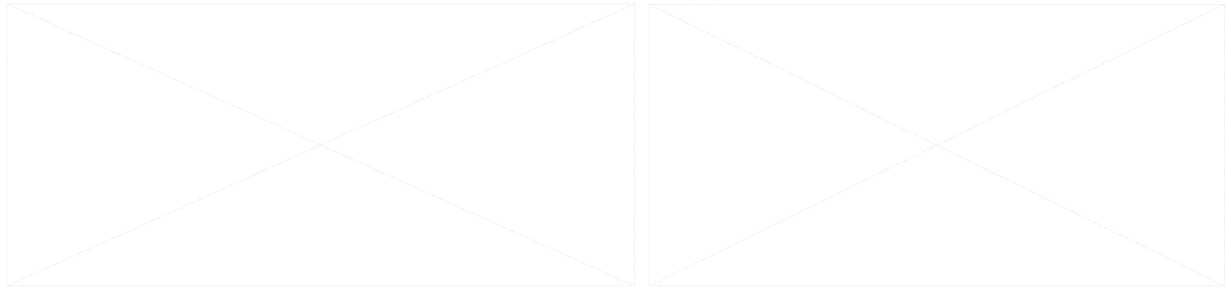
미국의 극초음속 시험기 X-51

- 미국 국가적 차원에서의 대규모 연구 투자도 활발하게 이루어지고 있으며 연방 항공국 (FAA)에서 Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) Program을 보잉, GE, 프랫 앤 휘트니, 롤스로이스, 하니웰 등 5개의 메이저 기업을 대상으로 2015 - 2018 연간 총 2,500억 원 규모로 수행 중임. 이들 중 보잉, GE, 롤스로이스에서 CMC 개발을 최우선 과제로 수행하고 있음.
- 중국은 최근 극초음속 활공체 (HGV·hypersonic glide vehicle)를 탑재한 탄도미사일 둥펑-17의 시험 발사에 성공하였으며 2020년 까지 실전 배치가 가능할 것으로 예상 됨.¹⁾ 고온기체동역학 국가중점실험실은 마하 35가 넘는 시속 4만 3200km에 이르는 HGV를 시험할 수 있는 풍동 시설을 건설 중임.²⁾ 날개 길이가 3m에 이르는 비행체가 들어갈 수 있는 풍동에서 발생하는 에너지의 양은 1기가와트(GW)로 최신 원자력 발전소 용량의 절반 이상임. 이 장비에서 발생하는 열은 태양의 표면보다 뜨거운 섭씨 7727도임.

4) <http://www.yonhapnewstv.co.kr/MYH20180303010300038/>

5) <https://milidom.net/news/904140>

6) <https://milidom.net/news/255870>



중국의 극초음속 체계 형상 및 초고속 대형 plasma wind tunnel

② 극한 고온용 금속소재

- 최근 열기관들의 작동온도가 점점 높아지고 국방, 우주항공, 원자력 등 보다 가혹한 환경에서 사용이 필요한 고온소재에 대한 니즈가 증가하면서 기존 Ni기 초내열합금의 한계를 뛰어 넘는 극한 고온용 합금 개발에 대한 연구가 해외를 중심으로 진행되어 왔음.
- 특히, 일본의 국립 재료연구소 (National Institute of Materials Science, NIMS)의 경우에는 고온재료연구그룹이 1966년부터 크리프 물성 데이터베이스를 축적하기 시작하여 현재까지도 지속적으로 활동 중임. NIMS가 국가적인 지원을 받아 단일 연구소 내에 1,000기 이상의 크리프 물성 측정장치를 보유하고 있으며 1960년대부터 지금까지도 지속적인 연구활동을 진행 중이라는 점은 국내의 연구환경 및 인식에서는 실현이 불가능한 업적임.
- 이와 같은 지속적인 투자에 따라 다수의 100,000시간 (약 11년) 크리프 물성 실측 데이터를 보유하고 있으며, 그들의 2009년 보도자료에 따르면 1969년에 크리프 측정을 시작한 시편이 약 40년간 (348,310시간동안) 지속적으로 진행 중인 경우도 있음. 이 때 당시의 세계 최고 기록은 독일의 지멘스에서 수립한 356,463 시간의 크리프 물성 데이터였음. 이와 같은 일본과 독일의 “극한시간” 데이터는 그들의 고온 극한소재에 대한 인식을 단적으로 보여주며 우리 정부 및 산업계의 인식과는 큰 차이가 있음을 극명하게 드러냄.



<일본 국립재료연구소 (NIMS)의 크리프 물성 측정 설비>

(<http://www.nims.go.jp/eng/news/press/2009/06/p200906160.html>)

- 그리고, 미국의 경우에도 역시 정부의 주도로 오래 전부터 고온내열소재에 대한 물성평가 설비에 대한 투자를 많이 해왔음. 미국의 Oak Ridge 국립연구소에서도 고온용 극한소재의 물성평가에 대한 연구를 수행 중이며, 특히 극한환경 구현을 위한 진공, 수소, 수증기, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 질소 분위기 등 다양한 가스환경에서의 크리프 물성 평가 설비에 대한 투자를 1970년대부터 지속적으로 수행해왔음.
- 이와 같이 미국, 유럽, 일본과 같은 선진국에서 진행 중인 고온극한소재에 관한 연구에서 각 국의 정부 주도로 수십년 동안 지속적인 투자가 이루어지고 있으며, 고온극한소재의 신뢰성의 핵심데이터인 “극한시간” 데이터를 경쟁적으로 생산하고 있음. 이와 같은 연구개발 투자는 국방, 에너지, 우주항공 등의 분야에서 필수적인 국가전략 연구분야이며 현재 우리 나라의 연구 인프라 및 연구 인력 및 연구비 등의 연구역량은 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있음.



<미국 Oak Ridge 국립연구소의 크리프 물성 측정 설비>

- 이와 같이 초고온 소재는 광범위한 장시간의 투자와 함께 개발 후 특성평가를 통한 물성의 검증이 필요하여 선진국의 경우 고온소재의 개발이 앞서 있을 뿐 아니라 이러한 소재가 개발되었을 때 이를 평가할 수 있는 기반이 구축되어 있음. 일본의 경우 대학에서도 분위기 제어가 가능하고 2000℃까지 실험이 인장, 크리프 실험이 가능한 장비를 사용하고 있음. 국내의 경우는 작은 시편으로 고온에서 압축 및 인장 실험을 할 수 있는 Gleeble 장비들을 제외하면 1,200℃ 이상 고온에서의 소재단위의 장시간 물성 평가가 가능한 장비가 아직 체계적으로 구축되어 있지 않음. 초고온 금속소재 분야에서 우수한 연구결과를 도출하기 위해서는 초고온에서 특성평가가 가능한 시험설비의 구축이 반드시 필요함.

③ 극한 초내식 금속소재

- 화학 부문에서 미래에 나아갈 방향으로 제시된 5개의 주제 중 “분자 수준에서 다양한 화학반응의 이해”는 금속의 표면 전기화학 반응과 관련됨.
- 부식은 금속 표면에서 전해질에 해당하는 매질에 노출되었을 때 금속 표면에서 산화와 환원 반응이 동시에 일어나면서 발생함. 부식 반응은 일반적으로 복합

한 과정을 거치는 것으로 알려져 있고, 각각의 금속이 특정 매질에서 발생하는 부식기구는 추정만 가능하고, 정확한 기구는 알려져 있지 않음.

- 금속이 negative pH 같은 극산성 분위기에 노출되었을 때 초기 산화거동을 측정/분석하고 pH 변수에 따른 부식량 변화를 추적할 수 있다면 큰 파급효과를 가질 수 있음.

④ 고분자 복합재료

- 달탐사 계획에 따라 우주선 및 발사체에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나, 시스템 Integration 위주로 개발이 진행되고 있고, 극한환경에 적용되는 재료 및 부품은 전량 수입에 의존하고 있음. 예를 들어 극저온 환경에 적합하고 초경량인 복합재 액화산소저장용기 제조 및 체결 기술은 보유하고 있으나 원소재는 전량 수입에 의존하고 있음. 따라서 시스템 기술은 현재 상당한 기술력을 확보하고 있으므로 선진국으로부터의 기술 종속 탈피 및 기술 주도 기반 확보를 위해서는 재료에 대한 연구 개발 인프라 구축 및 기술 개발 로드맵 확보가 절실한 상태임.

나. 국내동향

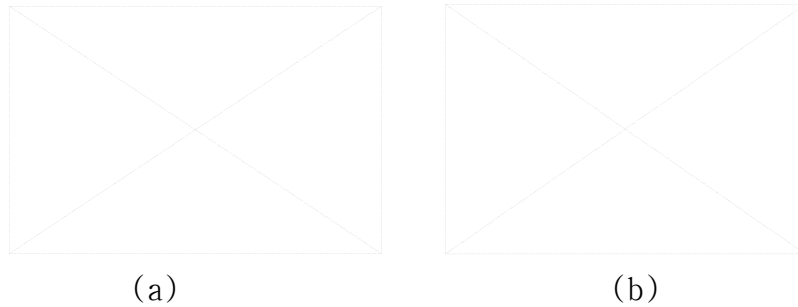
e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스

- 한국의 항공우주 분야를 포함한 군사 관련 수출은 2009 년 이후 2016년 까지 1100% 가까이 증가했음. 불안정한 국제 정세 및 높은 가격경쟁력, 한국이 자랑하는 재래식 무기의 수요에 바탕하여 방산무기 제조 업체가 성장하고 있으며 향후 2020년에는 아시아 최대의 무기 수출국인 중국을 추월 할 것으로 예상됨. 한국 항공 우주 산업 (KAI)과 한화 테크윈 등의 방위산업 수출 업체는 기술 이전 계약도 포함되어 있어 매우 높은 경쟁력을 보이고 있음.⁷⁾
- SiC 섬유의 원료가 되는 규소계 모노머를 2004년 부터 KCC가 생산하고 있으며 투비엠테크 (주)에서는 SiC 섬유제조의 원료가 되는 규소계 PCS 전구체를 세라믹기술원(KICET)의 기술 협조 하에 제조하고 있음. 세라믹기술원 및 서울과학기술 대학은 SiC 섬유 제조 기초 기술 개발을 (주) DACC와 함께 수행 중임. 탄소 섬유의 경우 (주) 효성과 전주 기계 탄소기술원이 양산을 위한 연구 개발을 진행하고 있으며 양산 설비의 설치를 완료하였음.
- 재료연구소에서는 섬유 사이에 SiC 필러의 함침을 위한 초미세 SiC 분말의 합

7) <http://mint.2ch.net/test/read.cgi/news4plus/1481030032/-100>

성 및 이를 이용한 고농도 슬러리 제조를 진행하였고 (그림) 고성능 섬유인 일본의 Tyranno-SA 섬유와 PCS계 전구체를 이용한 PIP 공정으로 SiC_f/SiC 계 섬유강화 복합재료로 $\phi 200 \times 100 \text{ mm}$ 급의 가스터빈용 라이너 소재를 개발하였음.



<(a) 재료연구소의 나노 SiC 필러 (b) 60vol% 슬러리의 유동성>



<재료연구소에서 제작한 SiC_f/SiC CMC>

표 3-4에 다양한 방법으로 제조된 세라믹 복합재료의 물성을 정리하였음.

표 . 제조공정에 따른 C_f/SiC 복합체의 물성⁸⁾

제조방법	CVI	PIP	MI
밀도 (g/cm^3)	2.1	1.8	2
기공율 (%)	10	10	2
인장강도 (MPa)	350	250	110
strain to failure (%)	0.9	0.5	0.3
탄성계수 (GPa)	90 - 100	65	65
압축강도 (MPa)	580 - 700	590	470

굽힘강도 (MPa)	500 - 700	500	190
열팽창계수 ($10^{-6}/K$)	3	1.16	-0.3
열전도율 (W/mK)	14.3 - 20.6	11.3 - 12.6	12 - 23

- 대형 CMC 소재는 아직까지 시장이 많이 활성화 되어 있지 않은 관계로 국내에서는 국가출연 연구소 중심으로 대형화를 위한 연구가 진행되고 있음. 한국 원자력연구원 (KAERI)에서는 CVI 공정을 이용하여 ϕ 200 mm 급의 원통형 SiC_f/SiC 의 제작을 위한 연구를 수행하고 있으며 영남대학교와 함께 희토류계 소결조제를 사용한 액상 소결법으로 $200 \times 200 \times 3$ mm 크기의 평판형 SiC_f/SiC CMC를 제조하였음. 에너지기술 연구원에서는 MI 공정을 이용하여 ϕ $400 \times 100 \times 3$ mm 크기의 원통과 $300 \times 300 \times 5$ mm 크기의 평판형 SiC_f/SiC CMC를 제조하였음. 재료연구소에서는 PIP 공정을 이용하여 ϕ $200 \times 100 \times 4$ mm 크기의 원통형 CMC 제조를 수행하였음.
- 국내의 극초음속 관련 연구는 선진국들에 비하여 많이 뒤쳐져 있는 현실임. 전북대 고온 플라즈마 연구센터에 $3000^{\circ}C$ 이상, Mach 5의 환경까지 구현 가능한 2.4MW 급의 arc jet plasma wind tunnel이 설치되어 있고 표준과학연구원은 $3500^{\circ}C$ 급 초고온 측정 기술을 보유하고 있음. 또한 국방과학연구원 (ADD)에서는 극초음속 체계 관련 연구가 진행되는 것으로 알려져 있음.

② 극한 고온용 금속소재

- 고온용 금속소재의 경우 주로 Ni기 초내열합금에 대한 연구가 주류를 이루고 있었으며 출연연구소인 재료연구소를 중심으로 수행되었음. Ni기 초내열합금의 온도수용성을 증가하는 초고온용 금속소재에 대해서는 체계적인 계획 수립이나 연구지원이 없었으며 최근 국방과학연구원/한국생산기술연구원/서울대학교 등에서 극한 고온용 내열 소재 및 제조 기술에 대한 기초적인 탐색 연구를 진행하고 있음. 고융점 기반 소재로는 한밭대학교에서 기초연구의 일환으로 Mo기지 내열금속소재에 대하여 주로 내산화성 및 표면코팅 관점에서 수행한 바 있으며 Ta이나 W 기지 금속소재의 경우도 아직 심도있는 연구가 진행되지 못하였음. 이처럼 국내에서는 극한 고온용 내열합금 개발에 대한 연구가 본격적으로 시작되지 않아 기술선점을 위해 빠른 연구 추진이 필요함.

8) Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, The advent of mesoscopic solar cells, 12th ECERS conference, 2011, Stockholm, 2011



<아크용해를 이용하여 제조한 Nb기 고온합금 잉곳 및 미세조직>

- 초고온 소재는 개발 후 특성평가를 통해 물성을 검증해야 하지만 작은 시편으로 고온에서 압축 및 인장 실험을 할 수 있는 Gleeble 장비들과 초소형시편의 피로, 크리프 등의 고온 기계적 특성을 1400℃ 정도 까지 단시간 측정할 수 있는 실험장비를 제외하면 국내에는 1,200℃ 이상 고온에서 소재단위의 장시간 물성 평가가 가능한 장비가 아직 체계적으로 구축되어 있지 않음.
- 최근 실험상 블레이드를 평가할 수 있는 가스터빈 고온부품 신뢰성 평가 실험장비가 전력연구원에 구축되었으며 실제 블레이드를 장착하고 900℃ 이하의 온도에서 3600rpm으로 회전시키며 블레이드의 건전성을 실험하는 장비이나 사용 한계 온도가 900℃ 정도이어서 초고온 소재로 제작된 부품을 평가하기는 어려움. 초고온 금속소재 분야에서 우수한 연구결과를 도출하기 위해서는 초고온에서 특성평가가 가능한 시험설비의 구축이 반드시 필요함

③ 극한 초내식 금속소재

- 부식과 관련된 국가표준으로 KS 120종을 수립하여 대응하고 있으나, 일본 표준을 차용한 내용이 대부분임.
- 2006년부터 3개년에 걸쳐 한국부식방식학회 주관으로 부식비용 실태조사가 이루어졌으며, 연구 결과 국내 GDP의 2.6-2.9% 정도가 부식 문제 해결을 위한 비용으로 사용되고 있음이 확인되었음.
- 극산성, 복합부식 환경에서의 부식대응에 대해서는 제대로 된 국가의 지원이 이루어지지 않고 있음.

- 유사과제인 산업통상자원부 주관의 ‘극한환경용 구조물 부식제어 융합기술기반 구축사업’은 도료 개발, 용접 기술, 도장방식 전문가 양성 등 산업계 활용 기술에 국한되어 개발되고 있으며, 환경도 진정한 극한환경이라기 보다는 해수부식, 대기부식과 같은 일반적으로 부식이 잘 일어날 수 있는 환경을 다루고 있음.

④ 고분자 복합재료

- 국내의 위성용 발사체 개발과 관련하여 한국기계연구원과 항우연 공동으로 복합재 액화연료 저장용기 개발 사례가 있으며, 수소 저장용 350 bar 급 고압 탱크는 한국기계연구원 부설 재료연구소와 (주)이노콤이 공동으로 개발한 사례가 있음. 그리고, 극저온용 펌프, 밸브 및 냉각장치/열교환기 등 극저온 기기의 성능 평가센터를 한국기계연구원에 구축하여 국제 인증 기반을 확보함. 현재는 관련 산업이 형성되고 있는 단계라 극저온 소재 관련 산업의 국내 인프라가 미약하지만, 향후 수소에너지, 원자력산업, 항공우주 등의 분야에서도 극저온 관련 소재의 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상됨.



- Polyimide 수지는 많은 학연 기관에서 연구 개발되어 왔으나, 상용화 측면에서는 매우 미흡하여 대부분 수입에 의존하고 있는 실정임. Polyimide 필름의 경우는 대부분 DuPont(美), Ube(日), Kaneka(日)에서 독점화 하고 있고, 국내에서는 SKC 코오롱 PI에서 상용화에 성공하였음. 국내 자동차 산업 및 항공우주 산업의 발전과 더불어 고내열성 고분자 복합재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있음. 상용 고분자 적용 연구는 다수 수행되었으나 탄소복합재 내열도는 최대 300℃ 수준이지만 최근 복합재 기지로 적용이 가능한 polyimide (PI) 기반 고분자 합성
- Polyimide와 Quartz 연속섬유로 구성되며, 저유전성 초내열 복합소재에 관한 국내 기술개발은 거의 전무한 실정임. 일부 polyimide내에 CNT 등 나노 탄소

를 이용한 기초 연구 사례가 있으나, 연속 섬유를 활용한 polyimide 복합소재 개발에 대한 연구는 거의 없음. Polyimide의 성형성이 취약하여 체적율이 높은 연속섬유 복합재의 기술적 난이도는 매우 높음.

다. 국내 극한연구 수요에 대한 시사점

e. 극한 소재

- 최근 러시아, 중국 등 주변 열강들에 의한 극초음속 체계 개발 경쟁이 격화되고 있으며 우리도 이에 대응하기 위하여 극초음속 체계용 초고온 세라믹스 소재에 대한 수요가 형성될 것으로 판단됨.
- 극한고온 금속소재의 경우 대표적 고온 소재인 니켈기 초내열합금에 대한 연구가 국내 항공기엔진 및 발전용 가스 터빈의 독자 시스템 개발에 대한 연구들이 진행되고 향후 효율향상 등을 이유로 초고온 소재에 대한 수요가 증가될 것으로 전망됨.
- 또한 국방, 우주, 핵융합 분야 등에서도 극한 소재에 대한 연구 및 개발이 요구되고 있음. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 국내 극한 소재 기술 관련 연구 기반은 매우 취약한 실정임.
- 극한 소재 연구는 선진국과의 기술격차가 존재하며 이를 극복하기 위해서는 장기간의 지원이 필요함.

3. 개발목표 및 내용

가. 최종목표

나. 단계/연차별 목표

다. 세부과제 구성 및 연구개발 내용

e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스

□ 추진배경

- 러시아 및 중국의 첨단 극초음속 무기 체계들의 개발로 국민의 안전이 위협받고 있으며 이에 효과적으로 대응하기 위한 극초음속 방어체계 관련 R&D 가 요구됨.
- 극초음속 체계는 nose tip, 엔진 노즐 등이 극고온, 극고속 환경에 비교적 장시

간 노출되며, 이런 극한 환경 하에서 안정적으로 형상 및 특성을 유지하는 고성능의 초고온 세라믹스는 전체 극초음속 체계의 성능에 결정적 영향을 미치는 핵심 소재임.

- 기존의 로켓은 초고온, 초고속 환경에 1분 미만의 단기간 노출되어 삭마 및 산화 특성이 좋지 않은 탄소/탄소 복합재료도 대응이 가능하였으나 최근 개발되고 있는 극초음속 체계는 최소 수분 이상으로 지속 시간이 증가하여 기존 소재로는 대응이 불가능함.
- 북한의 핵 위협 및 세계적인 연구방향에 대처하기 위해 민수용 및 군용 극초음속 체계를 구현하기 위한 연구가 필요함
- 극초음속 체계에 대응하는 극한 환경 구현 및 측정을 위한 기반 시설 확보와 극한 환경 하에서 특성이 유지되는 극초음속용 초고온 세라믹스 소재의 개발이 시급히 요구됨

비 전	“극초음속 체계 대응 핵심소재의 국산화 실현”		
목 표	“2000℃, Mach 2 이상에서 삭마율 $1 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ 인 소재 개발”		
전 략	전산모사를 통한 최적 신조성 도출	첨단 공정을 이용한 고품위 신조성 원료 및 소재 제조	극초음속 대응 환경 특성 평가 및 개선
추 진 과 제	① 산화막의 열적 안정성 ② 산화층 상변태 안정화 ③ 기지상의 열적, 기계적 특성 및 부식 내구성을 위한 최적조성의 전산 모사를 통한 도출	① 이상공침-입체장애법 등 첨단 공정 개발 ② SPS를 이용한 비산화 물 합성공정 등의 개발 로 전산모사를 통해 도 출된 신조성의 고품위 분말 합성 및 소재 제 조	① Arc-jet plasma 및 로켓 모터 이용 특 성 평가 ② 정밀 손상 분석을 통한 실환경 모사조 건에서의 소재 삭마 거동 정밀 분석

① 전산모사를 통한 최적 신조성 도출

- Mach 5 이상의 극초음속 환경하에 노출되는 소재에서 요구되는 핵심 특성 도출

산화물 특성	상 안정성	비산화물 특성	섬유 특성
·고온, 고압 변형을 고려 시 산화로 형성된 다성분 계 산화물의 용점은 최소 2500℃ 이상 요구	·온도 변화에 따른 산화물 의 상변태 및 이에 따른 균열 형성 억제가 소재 내구성 향상에 필수적임	·모상인 비산화물의 용점 은 최소 3000℃ 이상 ·습도, 산화, 부식 및 열전 달을 등의 최적화 필요	·초고온에서 섬유 특성 변 화 분석 ·탄소계 섬유의 극한 환경 하에서의 산화거동 분석

- 기존 전산모사 방법은 극한환경 노출시의 소재거동 분석에는 한계가 있으며, 극한 환경에 노출될 때의 소재 변화를 반영할 수 있는 전산모사 기법 개선이 요구됨
- 전산모사를 통하여 도출된 신조성 소재의 삭마 후 분석 결과와 모델링 결과의 비교 분석에 의한 전산모사 모델 개선
- 도출된 전산모사 모델과 실제 삭마 결과 비교
- 예측 모델과 실제 결과와의 차이점을 반영한 전산모사 모델의 개선 및 이를 이용한 개선된 조성 도출

② 첨단 공정을 이용한 고품위 신조성 원료 합성

- 전산모사로 도출된 다성분계 신조성을 제조하기 위해서는 다성분들 간의 균일한 혼합이 극도로 중요하며 이는 기존의 milling 공정에 의한 분말 혼합으로는 달성 불가능
- 공침법에 기반한 습식 공정은 가격이 저렴하고 양산이 용이하나 다성분을 동시에 공침시키기 어려우며 특히 조성이 늘어날수록 더 어려워짐. 최근 개발된 이상공침-입체장애공정은 이러한 문제를 최소화 하면서도 가격 인상을 억제 할 수 있는 공정으로 평가됨
- 습식 공정은 양산 시 균일성 등에 문제가 있을 수 있으므로 제조 가격은 상승하나 품질 균일성 및 크기, 양산성 등에서 우위가 있는 plasma torch 법 등 건식공정을 이용한 다성분계 원료 분말 합성공정 개발도 동시에 요구됨
- 공침법, 플라즈마법으로 제조된 신조성의 다성분계 산화물 분말은 개선된 방전플라즈마소결법 (M-SPS, modified spark plasma sintering) 등의 첨단 환원공정을 통하여 오염 및 입성장을 억제하면서 고순도, 다조성의 나노 초고온 세라믹스로 제조하기 위한 기술 개발이 필요함

③ 극초음속 대응 환경 하 특성 평가 및 소재 개선

- 극초음속 체계의 첨두부가 받게 되는 환경과 유사한 극한 조건의 구현이 가능한 arc jet plasma wind tunnel을 이용하여 제조된 첨두부의 극초음속 환경 하에서의

성능평가 수행이 필요

- 침두부 형상 노출 시 최적의 플라즈마 환경 조건 설정, 침두부 삭마 시 온도, 속도 등 극한환경의 정밀 분석 기술 개발
- 극초음속 체계의 추진부 환경과 유사한 환경에서의 삭마특성 평가를 위해서 노즐목에 초고온 세라믹 소재를 적용한 소형 로켓의 연소를 통한 삭마특성 평가가 필요
- 노즐목의 크기, 형상 및 초고온 세라믹과 지지체 등의 비율을 고려한 최적 형상 설계 및 이를 적용한 로켓 연소 평가, 노즐부 삭마 시 온도, 속도 등 극한환경의 정밀 분석 기술 개발
- 고해상도 TEM/EDS 등을 이용한 삭마 후 소재 열화거동 정밀 분석 및 그 결과의 시뮬레이션 재적용을 통한 소재 특성 개선

□ 사업예산 및 기간 : 50억원 / 5년(2019~2023년)

□ 참여기관 및 역할

- (재료연구소-주관) 도출된 최적 신조성 원료의 합성 및 이를 이용한 Nose tip 및 노즐목 소재 제작
- (표준연구원-참여) 2000℃, Mach 2 이상의 극한 조건에서의 시편의 온도 특성 평가방법 개발
- (세라믹기술원-참여) 초고온세라믹스용 프리세라믹 폴리머 제작
- (전북대학교-위탁) Arc jet plasma 풍동을 이용한 2000℃, Mach 2 이상의 극한 조건에서의 시편 삭마 특성 측정
- (서울대학교-위탁) FactSageTM 프로그램을 이용한 극한 환경용 최적 조성 도출
- (KAIST-위탁) 로켓 모터를 이용한 극한 조건 추진체에서의 초고온 세라믹스 노즐목 삭마 특성 평가

② 극한 고온용 금속 소재

□ 추진배경

- 최근 우주·항공 및 발전 분야에서 초고온에서 사용이 가능한 금속 소재에 대한 필요성이 증가하고 있음.
- 이론적으로 산소와 화석연료가 화학량적 결합 측면에서 최적비율로 연소할 경우 온도는 약 1640℃로, 현재 대표적 고온재료인 Ni기 초내열 합금을 사용할 경우 내부 냉각유로 구성이 필수적임. 이러한 냉각에 의해 발전 및 항공체 비행 효율이 저하되는 문제가 발생함.
- 극한 고온에서 사용가능한 차세대 초고온 금속소재가 개발되면 냉각을 실시하

지 않거나 혹은 적은 냉각만으로 터빈 및 엔진 구동이 가능하기 때문에 기존 대비 효율을 극히 향상시킬 수 있음. 또한, 우주·항공 및 국방 분야에도 적용 가능하여 높은 출력과 함께 연비까지 우수한 항공기나 미사일 등의 개발이 가능함.

- 해외에서는 선진국을 중심으로 극한 고온용 금속에 대한 연구가 시작되었지만, 국내에서는 아직 정부차원에서의 적극적인 연구가 이루어지지 않았기 때문에 소재 개발 연구가 시급히 필요함.

비 전	“초고온에서 사용 가능한 극한 고온용 금속소재 개발”		
목 표	"초내열합금 가용온도 150℃ 이상 확장형 극한고온용 신합금 개발"		
전 략	극한 고온용 합금 성분계 개발	소재 및 부품 제조 공정 기술 개발	초고온 물성 평가 기술 개발
추 진 과 제	① 초고온용 metal and silicide in situ composite 합금 개발 ② 고용점 금속기반 합금의 열역학 DB 구축 ③ 전산모사 기반 합금설계 기술 개발	① 물성평가용 시료 주조 기술 개발 ② 극한 고온용 합금 분말 제조기술 개발 ③ 3D 프린팅을 이용한 부품화 기술 개발 ④ 열간등방압성형을 통한 고밀도화 기술 개발	① 초고온 크리프 특성 평가 기술 개발 ② 초고온 압축 및 인장 강도 평가 기술 개발 ③ 고온 내산화성 평가 기술 개발

① 극한 고온용 합금 성분계 개발

- 초고온에서 사용이 가능한 고용점 금속 기반의 metal and silicide in-situ composite 합금 설계 기술 개발
- 열역학 기반의 전산모사를 통한 합금 설계를 위해서는 합금의 열역학 DB가 있어야 가능하지만, 현재 초고온용 합금에 대한 열역학 DB가 구축되어 있지 않음.
- 고용점 금속 (Mo 혹은 Nb) 및 내화금속 기반의 고엔트로피 합금의 열역학 DB 구축
- 전산모사 기반의 초고온용 합금설계 기술 개발

- 기존의 초고온용 합금의 고온 물성 DB 구축을 통한 설계 플랫폼 구축
- 초고온 물성 평가 결과의 피드백을 통해 고온 물성, 고온 내산화성, 상온 연성 등이 우수한 초고온용 합금 도출

② 소재 및 부품 제조 공정 기술 개발

- 진공 혹은 플라즈마 아크 용해를 이용한 물성 평가용 시료 고순도 주조 기술 개발
- 금속 3D 프린팅을 위해서는 유동도 확보를 위해 구형의 미세한 분말이 필요하며 산화물 형성 방지를 위해 고순도 금속 분말이 필요함.
- 초고온용 합금의 경우 녹는점이 높기 때문에 기존의 gas atomization 방식으로 분말 제조가 어려움.
- 고용점 금속 기반의 metal and silicide in situ composite 고순도 구형 분말 제조기술 개발
- 3D 프린팅의 공정변수(laser power, scan speed, focus off-set, hatching distance 등) 제어를 통한 미세조직 및 상 제어가 가능한 부품 제조기술 개발
- 열간등방압성형을 통한 3D 프린팅 부품 고밀도화 기술 개발
- 주조 혹은 3D 프린팅 후 냉각 시 급속 냉각으로 인해 비평형 상들이 형성되기 때문에, 상분율 및 미세조직 제어를 위한 최적 열처리 공정 도출

③ 초고온 물성 평가 기술 개발

- 초고온용 합금 및 부품화 제조 기술이 개발되어도 현재 국내에 구축된 크리프 특성 평가 최대 온도는 1150 °C 수준으로 극한 고온 환경에서의 고온 물성의 장기적인 안정적 평가가 어려움.
- 초기 합금개발 단계에서는 금속 초소형시편에 대한 약 1400°C 정도까지 고온특성의 평가가 가능한 장비를 사용하여 크리프 특성 및 합금원소 영향 분석 등의 기본 data 확보에 활용
- 초고온용 합금의 물성 평가를 위해 1400°C 이상 분위기 제어 및 장시간 평가가 가능한 고온 물성 평가 인프라 구축
- 1400°C 이상의 초고온에서의 크리프 특성 평가 기술 개발
- 초고온 압축 및 인장 강도 평가 및 DB 구축
- 초고온 내산화성 평가 장비 및 기술 개발

□ 사업예산 및 기간 : 75억원 / 5년(2019~2023년)

□ 참여기관 및 역할

- 극한 고온용 합금 성분계 개발
- 소재 및 부품 제조 공정 기술 개발
- 초고온 물성 평가 기술 개발

③ 극한 초내식 금속소재

비 전	“극산성/ 복합 부식 환경에서의 금속 부식 거동 이해 및 한계 극복 기술 개발”		
목 표	“Negative PH 등의 극산성 환경, 500℃ 이상의 고온+부식의 복합 부식 환경에서 금속의 부식 메커니즘 이해 및 초내식 합금 기술 개발”		
전 략	극산성 환경 구현 기술	극산성 초내식 합금기술	복합환경 초내식 합금 기술
추 진 과 제	① 극산성 분위기 측정 및 보정 기술 ② 안정적 극산성 분위기 구현 시스템 기술	① 거대 장비를 이용한 초기 부식층 해석 기술 ② pH 레벨별 장기 부식 거동 측정 및 해석 기술 ③ 전산모사 기반 극산성 초내식 합금 설계 기술 ④ 표면처리를 통한 극산성 초내식 성능 구현 기술	① 복합 부식 환경 장기 열화 거동 측정 및 해석 기술 ② 전산모사 기반 복합 환경 초내식 합금 설계 기술 ③ 표면처리를 통한 복합 환경 초내식 성능 구현 기술

① 극산성 환경 구현 기술

- (극산성 분위기 측정 및 보정 기술) 일반적인 PH 측정 장비인 유리막 전극을 이용한 PH 측정기는 극 산성에서 정확도가 심각하게 저하됨. 극산성 환경 대응 재료 연구를 위해서는 negative PH 영역까지 측정이 가능한 PH 측정 기법을 확보하고, 정확한 값을 보정할 수 있는 이론적 기반의 확보가 필요함.
- (안정적 극산성 분위기 구현 시스템 기술) Negative PH등의 극산성 환경을 구현하고, 장시간 재료 물성 평가 시에도 이를 안정적으로 유지하기 위한 시스템 기술을 개발함. 특히 시험 과정에서 재료와의 반응에 의해 시스템 내 수소 활동도 변화가 있는 경우 이를 감지하여 능동적으로 분위기를 제어하는 기술을 개발할 필요가 있음.

② 극산성 초내식 합금 기술

- (거대 장비를 이용한 초기 부식층 해석 기술) 금속의 부식은 다양한 조건의 영향을 받으며 복잡한 과정을 거쳐 발생함. 따라서 금속 표면에 초기에 형성된 부식층을 해석하고 분석하는 일은 매우 중요함.
 - － 거대 장비 또는 고도 분석을 이용하여 금속 표면의 부식층을 정확하게 해석하고 분석한다면 극산성 환경에서 금속의 부식 기구를 분석하고 이를 해결하기 위한 기술을 개발하는데 큰 도움이 될 것으로 판단됨.
- (pH 레벨별 장기 부식 거동 측정 및 해석 기술) 극산성 조건은 금속의 부식을 가속화시킬 것으로 판단되며 negative pH 같은 극산성 조건에서의 부식 거동을 측정하고 해석하기 위하여 pH 1 - 4 정도의 다양한 산성 조건에서 부식 거동을 측정할 필요가 있음. 또한 단기 측정된 부식 거동과 장기 측정된 부식 거동의 연관성을 파악하여 단기 측정값의 신뢰성을 높여 부식 측정을 효율적으로 수행할 필요가 있음.
- (전산모사 기반 극산성 초내식 합금 설계 기술) 극산성 조건에서의 내식성 향상을 위해서는 실험적인 시도를 통한 합금 개발보다는 전산모사를 이용하여 효율적으로 합금의 조성을 설계할 필요가 있음. 전산모사를 이용하여 특정 원소 첨가에 따른 효과를 보다 효율적으로 예측한다면 실제 합금 설계 및 개발에 큰 도움이 될 것으로 판단됨.
- (표면처리를 통한 극산성 초내식 성능 구현 기술) 극한 환경에서의 내식성 향상을 위해서는 합금 설계를 통한 소재 자체의 내식성 향상도 필요하지만 표면처리를 통하여 부식반응이 실제 발생하는 표면의 안정성 향상도 필요함. 다양한 표면처리를 이용한다면 소재의 실제 사용 시 내식성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨.

③ 복합환경 초내식 합금 기술

- (복합 부식 환경 장기 열화 거동 측정 및 해석 기술) 고온+산성 복합 부식 환경에서는 재료의 부식 속도가 단독 환경에 비해 급격히 증가하는 경향이 관찰됨. 특히 고온에서는 이온 상태의 금속 및 가스의 확산이 재료의 부식 거동을 결정하는 바, 재료의 결정립계를 통한 부식 거동에 대한 이해가 필요함. 복합 부식 환경 대응 초내식 합금 개발을 위해서는 500℃ 이상의 온도와 산성 분위기를 동시에 갖는 복합 부식 환경에서 재료의 열화 거동을 장기적으로 측정하고 해석하는 기술의 개발이 필요함.
- (전산모사 기반 복합 환경 초내식 합금 설계 기술) 복합 부식 환경에서의 내식성을 갖는 초내식 합금을 설계하기 위해서는 고온에서의 산화물, 질화물, 황화물

등 각종 화합물 형성에 대한 전산 열역학적 해석 기술의 개발이 필요함. 금속 및 가스이온의 입내, 입계 확산 거동에 대한 전산모사 계산 결과를 바탕으로 복합 환경에 적용하기 위한 초내식 합금을 설계하는 기술을 개발함.

- (표면처리를 통한 복합환경 초내식 성능 구현 기술) 모재의 합금 설계를 통한 초내식 성능 구현은 제품의 크기 및 구조에 따라 생산 기술적, 비용적 한계에 부딪힐 수 있음. 코팅, 이온주입, 기계적 충격 등 표면 처리를 통해 복합 환경에서 초내식 성능을 구현할 수 있는 기술을 개발함.

□ 사업예산 및 기간 : 70억원 / 7년(2019~2025년)

□ 참여기관 및 역할

- 극산성 환경 구현 기술 개발
- 극산성 초내식 합금 개발
- 복합환경 초내식 합금 개발
- 극산성 초내식 표면처리 기술 개발

④ 고분자 복합재료

□ 추진배경

- (초고내열 고분자 복합재) 기존 고분자 복합재료는 우수한 기계적 특성 및 성형성을 보유하고 있으나 고분자 기지의 한계로 낮은 사용온도를 가짐. 따라서 복합재료의 열적 한계를 극복한다면 금속 (Al alloy, Ti alloy 등), 세라믹 소재를 대체할 수 있는 경량화된 구조용 부품 제조 가능
- (극저온 고분자 복합재) 극저온 환경에서의 소재 물성 측정은 주로 금속소재로 극히 제한되어 있음. 고분자 또는 고분자 복합재의 극저온 환경에서의 열전도도, 전기전도도, 열팽창계수 측정은 새로운 평가 방법을 개발하고 이에따른 측정 환경을 구축하는 것이 필요함.

□ 초고내열 고분자 복합재

① 고분자 기지의 초고내열화를 위한 기반 소재 개발 연구

- 초고내열 고분자 지지 수지 기술 개발
- 3차원 나노탄소다공체 프리폼 개발

② 고분자 기지의 초고내열화 기술 및 이를 적용한 고분자 복합재료 성형 공정 연구

- 3차원 나노탄소다공체 프리폼에 의한 고분자 사슬 유동의 나노구속효과 확보 및 구멍

- 개발된 초고내열 수지 및 나노탄소 다공체 프리폼 적용을 통한 초고내열 복합 재료 성형공정 기술 연구

- 고분자 기지 수지의 유리전이온도 향상 및 내열 특성 확보 연구

③ Short term 사용온도 500℃급의 탄소섬유 보강 고분자 복합재료 기술 연구

- 나노탄소소재 및 탄소섬유로 보강된 500℃급 고분자 복합재료 평판 시제 제조
- 복합재료의 초고온 환경에서의 물리화학적 및 기계적 특성 DB 구축

④ 사업예산 및 기간 : 30억원 / 5년(2019~2023년)

⑤ 참여기관 및 역할

- (재료연구소-주관) PI 기반 수지의 복합재료 적용성 검토, 고분자 사슬의 고온 유동성 억제를 통한 추가적인 내열도 향상 기술 개발 및 개발 복합재료의 극한 환경에서의 물성 DB 구축
- (표준연구원-참여) 고분자 복합재의 고내열 조건에서의 소재 특성 평가방법 개발
- (생기연-참여) Polyimide 수지 적용 탄소복합재용 중간재 제조 연구
- (경북대-위탁) 고분자 내열도와 인성 향상용 신규 additive 합성 연구
- (숭실대-위탁) 복합재 기지용 Polyimide 합성 연구

□ 극저온 고분자 복합재

- 기존에 고분자의 극저온 물성을 향상시키는 방법으로 유리전이온도(Tg)가 낮은 additive를 혼합하거나 저 Tg 단량체를 공중합 또는 nanofiller 등을 첨가하는 방법을 적용하여 왔음. 그러나 이러한 방법들은 특성 향상의 한계가 뚜렷하고 trade-off 물성 극복에 어려운 점이 있음.
- 이러한 문제를 해결하기 위해 고분자 기지 (Polymer matrix)의 chain backbone 에 비대칭 구조의 연성 화합물을 도입하여 나노/마이크로 단위의 상분리 구조를 구현하여 극저온 환경에서의 취동 거동을 억제하고자 함. Trade-off 물성을 극복하기 위해 cross linking density와 상분리 구조를 조절하는 방법을 적용함. 또한 복잡한 상분리 구조를 가지면서 cross linking density가 조절된 고분자의 극저온 환경에서의 파괴거동을 규명하고자 함.
- 극저온 환경에서 고분자 복합재료의 물성에 큰 영향을 미치는 다른 인자로서, 보강 섬유와 기지수지의 열팽창계수 mismatch임. 이 mismatch에 의해 발생하는 delamination은 섬유 표면에 mechanical interlocking을 부여하고 섬유 적층 구조를 조절함으로써 극복하고자 함. 또한 극저온 열팽창계수 측정은 고분자 복합재료에

적합한 새로운 평가 방법을 개발하고자 함.

① 사업예산 및 기간 : 25억원 / 5년(2019~2023년)

② 참여기관 및 역할

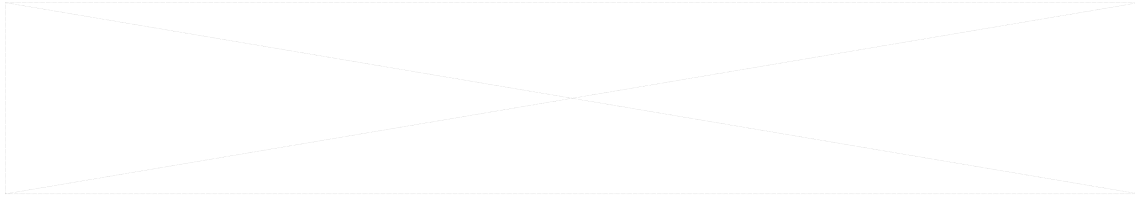
- (재료연구소-주관) 극저온용 고분자 수지 개발, 복합재 성형 공정 및 부품 개발
- (표준연구원-참여) 극저온 환경에서의 섬유보강 복합재 물성 평가
- (KIST-참여) 극저온 환경에서의 복합재 전기전도도, 열전도도 및 치수안정성 측정 및 DB 구축
- (부산대-위탁) 극저온 고분자 복합재 성형을 위한 소재 물성 정량화 연구

라. 기술개발 로드맵

e. 극한 소재

- 극한 소재 분야의 연구를 세계적으로 선도하기 위해서는 기존 국내 극한 소재분야의 연구 중 가장 취약한 부분인 전산 계산 및 전산 모사 분야의 개발이 가장 시급히 요구되는 것으로 판단됨.
- 이에 세라믹/금속/고분자 분야에서 기존 극한 조건에서의 성능을 뛰어넘을 수 있는 새로운 조성을 전산모사를 통하여 도출해 낼 수 있는 전산과학 기법의 개발이 필요함. 더불어 소재의 거시적/미시적 구조 최적화를 통한 극한 환경에서의 특성 개선을 위한 시뮬레이션 기법 육성을 통하여 국내 극한환경 소재의 기본기를 향상시키는 것이 우선적으로 필요할 것으로 판단됨.
- 이와 더불어 초고온/극초음속 환경의 구현이 가능한 고가의 플라즈마 풍동 장비가 원래 목적에 적합한 실험이 가능하도록 시급한 개선이 필요할 것으로 판단됨.
- 또한 극한 고온에서 사용되는 소재의 특성을 평가할 수 있는 인프라를 구축해야 개발 소재의 특성에 대한 검증과 극한환경에서의 특성 기술 개발 수행이 가능함.
- 중기적으로는 단기과제에서 구현된 전산모사 기술을 바탕으로 도출된 극한 환경용 복합 조성 물질의 합성과 계산을 통하여 극한 환경에 적합할 것으로 판단된 복잡한 미세구조를 실제로 구현할 수 있는 제조 기술을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단됨.
- 장기적으로는 중기까지 얻어진 결과들을 융합하여 도출된 새로운 조성의 소재와 극한환경에 최적화된 미세구조를 갖는 극한 환경용 소재를 제조하고 이를 해당 극한 환경용 체계에 적용하여 특성 평가를 수행함으로써 세계를 선도하는

극한 환경용 체계를 구현하는데 직접적인 기여를 하는 것을 목표로 함.



● 핵심과제 도출

- 극한 소재용 원료 및 구조의 전산모사 기법 개발 (단기 3년)
- 극한 환경용 복합 조성 원료 및 복합 소재 제조 공정 개발 (중기 6년)
- 다차원 극한 환경용 소재 제조 기술 및 체계 적용 물성 DB 확보 (장기 10년)
- 극초음속 체계 대응 초고온 세라믹스 섬유강화 복합재료 개발 및 특성 DB 개발 (장기 6~10년)
- 초고온에서 사용 가능한 극한 고온용 금속소재 개발 (중기 5년)
- 고융점 금속원소 기반 초고온용 소재 기술 및 시스템 적용 특성 DB 개발 (장기 6~10년)
- 극산성/복합 부식 환경에서의 금속 부식 거동 이해 및 한계 극복 기술 개발 (장기 6~10년)

4. 추진전략 및 체계

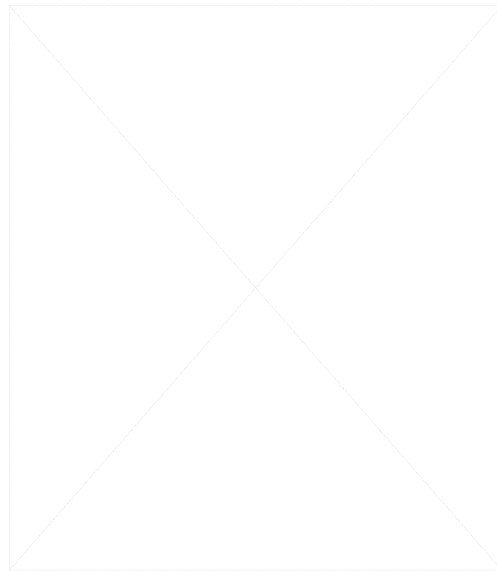
가. 추진체계

e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스



② 극한 고온용 금속 소재



③ 극한 초내식 금속소재



나. 추진전략

e. 극한 소재

① 극한환경용 세라믹스



② 극한 고온용 금속 소재



③ 극한 초내식 금속소재



④ 고분자 복합재료



5. 파급효과

가. 과학기술적 파급효과

- 원자력 및 핵융합 등 차세대 발전 체계용 코어소재로 활용 모색
- 극초음속 여객기, 재사용 우주선 등 향후 민간의 첨단 기술 확산에 기여
- 극초음속체계용 초고온 세라믹 소재 개발을 통한 교통 수단의 혁신 조성

- 기존 금속소재의 특성을 뛰어넘는 새로운 금속소재 연구 분야 도출
- 초고온 특성평가 인프라 구축 시 개발 고온소재의 특성 평가를 통한 건전성 확보 및 고온소재 개발 활성화 가능함.
- 열기관 설계 시 소재 및 환경조건에 대한 제약 완화로 효율적이면서 경쟁력을 갖춘 시스템 개발 가능
- 창의적이고 도전적인 기초연구 확대 및 세계적 기초연구 거점 조성
- 극저온 환경에서 고분자 내부의 복잡 상분리 구조의 파괴거동을 연구하여 취성 거동 억제 원리를 규명할 수 있음.
- 초고내열 고분자 복합재료 개발을 통해 우주발사체, 미사일의 radomes, engine vanes, thermal skins, exhaust ducts, high-temperature bearings, downhole drilling components 등 우주 항공 및 국방분야에 폭 넓게 적용이 가능

나. 경제산업적 파급효과

- E/L (수출입 통제) 품목인 핵심 소재의 국산화를 통한 국산 방산업체들의 해외 시장 개척에 기여
- 가스터빈 등의 열기관 효율 향상으로 인한 경쟁력 확보를 통한 수입대체 및 해외시장 확보
- 이미 선진국에서는 극저온용 고분자 복합재료를 이용하여 가스 저장 소재, 우주선/발사체에 적용하고 있으나 국내의 시스템 기술은 현재 상당한 기술력을 확보하고 있지만 재료 및 부품은 전량 수입에 의존하고 있음. 상기 연구를 통해 소재에 대한 기술 종속 탈피 및 기술 주도 기반을 확보할 수 있음
- 초고내열 고분자 복합재료 국산화를 통해 기존 전량 수입에 의존하고 있는 고온 PCB용 수지를 일부 대체할 수 있을 것으로 예상됨.

다. 사회문화적 파급효과

- 북한, 러시아 및 중국의 신기술 개발 및 국방 위협으로부터 국민을 안전하게 보호하기 위한 첨단 국방 기술용 핵심소재를 개발 함으로써 체계 개발에 기여하고 국민의 안보위협 저감
- 극한 환경 신소재 연구분야에서 선진국과의 기술격차 감소, 혁신적인 연구분야 역량 강화

6. 소요예산

7. 특이사항

가. 성과지표

나. 국가R&D 전략과의 연계

- 018년 정부 연구개발 3대 분야 9대 중점 투자 방향에서 3대 분야에 “미래선도 과학기술 역량 강화”가 포함되어 있으며 그 중 “자율적인 창의·도전연구 강화”가 포함되어 있음. 극한환경 소재 연구는 도전적인 연구이며 그 이면에 첨단연구 기반 강화가 필요함.

다. 타 국가연구개발사업 유사과제와의 차별성

부처	사업명	과제명	연구책임자 (소속기관)	주요내용	연구규모 (기간, 연구비)	차별성
과학기술정보통신부	한국생산기술연구원주요사업	H급 가스터빈용 초내열합금 개발	박광석 (한국생산기술연구원)	Nb기 차세대 내열합금 주조 기술 개발 및 기초 물성평가	‘16.01~‘17.12.31 (500백만원)	이전 과제는 기초기술 연구로 Nb 합금의 잉곳주조 기술과 기존 소재의 기초 물성 평가 과제이었으나 본 과제는 합금설계, 분말제조 공정 기술, 부품화 공정기술, 초고온 특성 평가 기술 까지 종합적인 연구를 추진하고자 하므로 차별성 있음.

- 유사과제인 산업통상자원부 주관의 ‘극한환경용 구조물 부식제어 융합기술기반 구축사업’은 도료 개발, 용접 기술, 도장방식 전문가 양성 등 산업계 활용 기술에 국한되어 개발되고 있으며, 환경도 진정한 극한환경이라기 보다는 해수부식, 대기부식과 같은 일반적으로 부식이 잘 일어날 수 있는 환경을 다루고 있음.

<투자 현황>

(단위:백만원)

부처	구분 (중점분야, 사업, 과제)	연구비 (2003~2017)										
		03 ~0 4	05	06 ~0 8	09	10	11	12	13	14 ~1 5	16	17
산업통상 자원부	극한환경용 구조물 부식제어 융합 기술기반구축사업										2,000	2,000

<기술개발 과제 현황>

(단위:백만원)

부처	구분	사업명	과제명	연구책임자 (소속기관)	주요내용	연구규모 (기간, 연구비)
산업통상 자원부		신재생에너지 핵심 기술 개발	해상풍력 구조물의 설계수명 확보를 위한 최적 부식관리 기술 개발	김도형 (한국전력공사)	해수 분위기 풍력구조물의 수명을 위한 부식 관리 기술 개발	2014-2017 연간 800
산업통상 자원부		지역특화 산업육성	주방용기 소재 다변화용 고내식성 친환경 세라믹 코팅제 개발	이용진 (대한화인세라믹)	주방용기 내식성 향상을 위한 세라믹 코팅 소재 개발	2015-2017 연간 161.5
미래창조과학 부		원자력 원천 기술	초미세 활성 나노입자를 활용한 부식환경 제어 및 응력부식균열 방지 메커니즘에 관한 연구	이상율 (한국항공대학교)	나노입자를 활용한 부식 제어 기술 개발 및 응력부식균열 기구 연구	2013-2016 연간 282
미래창조과학 부		중견연구자 지원	강재-콘크리트 복합구조 부재의 부식내하성능 평가법 개발	김인태 (부산대학교)	복합구조소재의 하중하의 부식 평가 기술 개발	2014-2017 연간 100
미래창조과학 부		원자력 융합 핵심 기술 개발	장수명 원전용 매설배관 수화학 및 부식 최적관리 시스템 개발	김영식 (안동대학교)	원자력 발전용 배관의 내식성 향상 및 부식관리 기술 개발	2013-2016 연간 455

(첨부3) 극한연구 인식 설문항목 및 결과

■ 설문조사 내용

본 설문은 극한연구의 범위와 정의는 물론 향후 연구개발 전반의 청사진을 마련하는 데 있어서 중요한 기초자료로 활용될 예정입니다. 귀하의 소중한 의견을 제시해 주시기 바랍니다.

1. 21세기 과학입국을 목표로 과학기술정보통신부에서 주요하게 추진해야 하는 정책과 연구지원 방향은 무엇이라고 생각하십니까?

- a. 새로운 기초, 원천분야의 발굴을 통한 뿌리 학문 확보
- b. 기초, 원천 연구성과의 산업적 활용 지원
- c. 국가차원의 거대 연구인프라의 발굴 및 구축
- d. 기초, 원천 연구 전문인력의 육성 및 관련 커뮤니티 확대 지원
- e. 기타의견()

2. 귀하가 생각하시는 우리나라의 극한분야 과학기술과 신산업은 어느 수준에 있습니까? (1: 극히 미흡, 2: 미흡, 3: 보통, 4: 우수, 5: 매우 우수)

- a. 과학역량 면에서 ()
- b. 인프라 면에서 ()
- c. 커뮤니티 면에서 ()
- d. 전문인력 면에서 ()

3. 귀하가 생각하시기에 극한연구 활성화의 필요성은 아래 측면에서 어느 수준에 있다고 보십니까? (1: 극히 낮음, 2: 낮음, 3: 보통, 4: 높음, 5: 매우 높음)

- a. 뉴사이언스(노벨상 수상자 배출) 확장면 에서 ()
- b. 21세기 신산업 도출 면에서 ()
- c. 기타 측면과 수준을 표기 (/)

4. 극한 연구를 국가에서 주도해야 되는 여러 이유 중 가장 우선되는 항목은 무엇이라고 생각하십니까?

- a. 극한 연구의 중장기, 지속적 특성 때문에
- b. 극한 연구의 공공성 및 안보관련성 때문에
- c. 미지 탐색영역이고, 당장 산업적 양산이 곤란한 특성 때문에
- d. 국가 전략적 산업과 연계되어 있기 때문에



(첨부4) 기술수요조사 안내문 및 결과

극한R&D 활성화 기획 사업을 위한 기술수요조사

(한국연구재단 정책기술전략팀, '18. 2. .)

1. 목 적

- 과학기술정보통신부 및 한국연구재단에서 「극한 R&D 활성화 기획사업」을 추진 중에 있으며, 일선 연구자의 극한환경 관련 연구개발 수요를 반영하여 향후 국가 연구개발사업을 추진하고자 극한 유망기술분야의 기술수요조사를 실시하고자 함

2. 수요조사 개요

- 수요조사의 성격
 - － 21세기의 새로운 발견, 측정 및 장치 개발로 새로운 과학의 돌파구로 인식되는 극한 연구를 통해 우리나라의 학문적 기술적 뿌리 확보와 미래신산업 창출의 초석을 마련하고자, 본 기술조사를 실시함.
 - － 본 기술조사는 극한 연구의 특징이라 할 수 있는 극한의 구현(인프라, 제어, 측정 등), 이해(기초원천 원리), 돌파(극한 기술을 이용한 종래 애로기술의 해결) 분야에서 실시하고자 함.
- 수요조사 분야
 - － 극한 분야 전반에 걸쳐 국가차원의 원천기술 확보 및 기술경쟁력 제고를 위해 시급히 추진이 필요한 유망기술분야

구분	기술수요조사 대상 분야 분류
1	초고온/초고압 분야: 에너지/자원, 국방, 우주 등과 관련하여 초고온, 초고압 환경의 안정적 구현, 제어, 측정, 활용과 극한환경 내에서 물질거동 분석 및 물질합성 등의 전반에 관한 연구
2	무중력/고중력 분야: 항공우주 등과 관련하여 발생할 수 있는 극한환경 내에서의 생물, 물리, 화학적인 현상과 관련된 연구
3	극저온 분야: 극저온 환경에서 발생하는 특수한 물리, 화학적 현상을 발견하고, 극저온 환경의 제어 및 활용하는 연구 전반
4	극한 바이오 분야: 극한환경에서 발생하는 자연 및 인공현상과 관련된 연구 전반
5	극한 소재 분야: 극한환경 전반의 구현이나 극한환경 내에서 특수한 기능성을 갖는 소재 합성, 제조 및 활용 전반에 관한 연구

3. 수요조사 응모기간 : '18. 2. 13~ '18. 2. 20, 18시 까지

4. 접수 방법

- 문의 : 연구재단 정책기술전략팀 김시진 연구원(042-869-7857, sjkim@nrf.re.kr)

극한 R&D 활성화 기획 사업을 위한 기술수요조사

안내말씀

안녕하십니까?

본 기술수요조사는 과학기술정보통신부와 한국연구재단에서 극한 R&D 활성화 사업기획 및 구체적으로 극한분야의 유망 국가연구과제의 발굴을 위해 실시하고 있습니다. 본 기술수요조사는 우리나라의 극한분야의 종합적인 청사진을 마련하기 위한 기본자료로 사용될 예정이니, 보다 포괄적이고, 중장기적인 측면까지 고려한 의견을 개진해 주시기를 부탁드립니다. 귀하께서 응답하신 모든 내용은 절대 비밀이 보장되오니 바쁘시더라도 귀한 시간 내주셔서 이번 조사에 응해주신다면 감사하겠습니다. 본 사업의 기획·추진에 귀하의 소중한 의견이 유용하게 활용될 수 있도록 많은 협조와 지원 부탁드립니다.

2018년 2월

한국연구재단 정책기술전략팀

■ 수요조사 양식

제안 분야 분류 (5개 분류중 선택)	작성방법) 5개 기 분류된 극한분야 외의 경우 “기타-세부 극한분야”를 명기			
제안 분야명	예시) *** 환경에서의 &&& 현상 발견, 000를 위한 000 기술 개발			
제안 분야의 필요성				
제안 분야의 연구목표				
제안 분야의 주요 연구접근법	☐ 기 구축된 거대공공 설비 이용 ☐ 새로운 극한환경 구현 인프라 구축	작성방법) 극한연구에 필수적인 극한환경의 구현과 활용 방법을 기구축된 장비를 이용하는 것인지, 새로운 인프라 구축을 동반하는 것인지 해당 란에 체크하고 구체적인 연구접근법을 기입		
제안 분야의 주요 연구내용	☐ 극한 환경 구현 (인프라, 제어, 측정) ☐ 이해(기 초원천 원리) ☐ 돌파 (극한 기술을 이용한 종래 애로기술 의 해결)	작성방법) 해당 란에 체크하고 구체적인 연구내용을 기입		
제안 분야의 기대 및 파급효과	작성방법) 새롭게 형성될 수 있는 과학/학문, 산업적 파급 등 자유롭게 기재			
예상되는 총 연구기간/ 연구비	예시) 5년(3+2)/ 연 5억 내외			
제안자 인적사항	성명		소속기관, 직위	
	전화번호		E-mail	

번호	제안명
1	핵융합 플라즈마 대면 후보소재의 초고온 열물성 데이터베이스(DB) 개발
2	포항방사광가속기 초고압-초고온 빔라인(end-station) 구축 및 활용
3	초미세 영역 초고압 환경 구현 기술 개발과 이를 이용한 나노/양자 물질 상전이/상변태 연구
4	초고진공 형성을 위한 진공 펌프용 소재 개발
5	초고자장용 초전도 선재 소재 및 구조 개발
6	초고온용 세라믹 섬유강화 복합재료 개발
7	초고온용 내화원소 고엔트로피 합금 설계 및 제조 기술 개발
8	초고온용 Ta 합금 및 공정 기술 개발
9	초고온/초고압 환경에서 발생하는 안정상/준안정상의 상태방정식(Equation of state, EOS) 측정
10	초고온/초고압 과도 경로제어에 대응하는 실시간 상전이 기구 규명
11	초고온/초고속 충격 실험 및 멀티스케일 해석 기술 개발을 통한 물성 데이터베이스 구축
12	초고온 환경에서의 소재 보호를 위한 초고온 세라믹스 코팅 기술 개발
13	초고온 환경에서 열차단을 할 수 있는 초경량/초고온 단열 복합재 기술 개발
14	초고온 소재 DB 및 다변화 원료 기반 실운용 시스템 3D 프린팅 기술
15	초고온및초고압환경하에서원자,분자구조실시간동시측정기술개발
16	초고온 내마모 산화물분산강화(ODS) 합금 설계 및 3D 프린팅 제조 기술 개발
17	초고압/고온에서 나노기공 형성 기구 규명을 통한 나노포러스 금속의 형상 제어 기술 개발
18	초고압 혹은 초고온 조건을 이용한 신물질 합성 및 구조 분석/물성 측정
19	초고속 작동 기능성 전자 소자를 위한 ps 영역의 소재 원자 거동 연구
20	초고강도 세라믹 소재개발을 위한 초고속레이저 피닝 기술
21	중성자 회절분석 장치를 위한 고압력 및 고온 오븐 개발
22	정지형 발전부품의 고온 작동온도 운영을 위한 세라믹 열차폐 코팅기술 개발

23	재난상황에서인적오류대처를위한극한환경인간거동기반기술개발
24	우주환경생물오염방지기술개발
25	우주환경 극한 방사선 조사에 견딜 수 있는 광학재료 연구
26	우주항공/방위산업에서 요구되는 초고온/초내열 세라믹 복합체 제조용 전구체 개발 및 이를 이용한 성형체 제조 및 세라믹 전환기술
27	우주물질지구진입시의초고온극한환경모사및평가기술연구
28	우주 환경 하 평형, 공간인식, 우주멀미 기전규명 및 치료시스템 개발
29	우주 환경 및 극한 산업환경 적용을 위한 탄화규소(SiC) 기반 초소형 센서소자 개발
30	양자홀 국소화, 전도도 보편요동, 노이즈 등 결함과의 상호작용 연구
31	양자임계 현상 연구를 위한 고온초전도자석 기반 초고자기장 기술 개발
32	양자 고저항 표준 구현을 위한 극저온-고자기장 다차원 극한시스템 구축
33	실시간 초박막 합성과 중성자/방사광 엑스선 분석 기술 개발
34	신물질 개발을 위한 극한 물리환경 구현 및 초고속 물성분석 기술개발
35	부양환경 다목적 신물질 합성 및 물성 측정 플랫폼 개발
36	부양환경 초고온 열량 측정 기술 개발
37	벌크 극한환경 3D 프린팅 공정기반 파손감지-치유형 안전 신소재 개발연구
38	무중력환경 모사를 위한 무중력시스템 개발 및 플랫폼 구축
39	무중력-고중력 환경에 대한 운동계 활성화 기전 연구
40	무중력/고중력 환경에서 고체연료의 가연한계 및 화염전파 특성
41	무중력, 고중력을 이용하여 중력변화가 노화에 미치는 영향 연구
42	무중력, 고중력을 이용하여 신경계 발달에 중력이 미치는 영향 연구
43	무중력, 고중력을 이용하여 세포가 중력을 인식하는 방법에 대한 연구
44	무중력 심우주 환경에서 안혈관 및 안신경계 이상 변화를 추적 및 진단, 예방치료할 수 있는 토달케어 시스템 기술의 개발
45	무중력 및 고중력 환경에서의 감염/면역계 질환 연구

46	無절연 (No Insulation) 고온 초전도 기술을 이용한 초고자기장 기술 개발
47	마이크로 중력에 의한 중양 내항암제 전달 영향 연구
48	레이저 내폭조사에 의한 고에너지밀도플라즈마 발생 및 계측 기술 개발
49	달표면 발전소 및 다목적 이동체용 연료전지 시스템의 극한환경 적용 기술 개발
50	다중극한 물성연구를 위한 이용자 분석시설 및 인력양성을 위한 유니랩 (UniLab) 구축
51	나노 탄소물질 기반 경량,유연 극한환경 단열소재 개발
52	나노구속효과를 이용한 사용온도 500℃ 급 초고내열 고성능 복합재료 개발
53	기관 표면의 초고온/초고압 환경 구현에 의한 초경질 입방질화탄소 ($c-C_3N_4$) 및 고기능성 육방정질화탄소($h-C_3N_4$) 제어 기술 개발
54	극한환경과 극초단 광자극에 의한 soft mater의 특이 물성 유도 및 측정 기술 개발
55	극한환경 (온도 및 외부하중) 대응 구조물의 탄소 나노튜브 적용 기술 개발
56	극한환경 미생물 기초 및 응용 연구
57	극한 환경용 초고온용 세라믹 분말 합성 기술 개발
58	극한 환경에서의 변성단백질과 물의 상호작용 변화 측정 기술개발 및 물과 단백질의 상호관계 규명
59	극한 핵융합 환경에서 내열성과 중성자 조사저항성을 갖는 저방사화 고엔트로피 합금 개발
60	극한 초고온용 경량 세라믹 소재 개발
61	극한 진공압력차 정상상태 유지 고주파(RF) 플라즈마 윈도우 기술 개발
62	극한 세슘(Cs) 노출 환경에서 미생물의 급속진화 현상 규명
63	극한 방사선환경 방사선원 위치 추적 기술 개발
64	극한 고온용 금속 소재 개발
65	극초음속/초고온/고방사능 환경 대응 장섬유강화 세라믹 복합체 및 평가기술 개발
66	극저온용 배터리를 위한 탄소계 전극소재 및 액화 가스 전해질 개발
67	극저온용 금속소재 및 평가기술 개발
68	극저온/고자장/고압 환경하에서 유무기 페로브스카이트 물질 거대 열량효과발견

69	극저온/고자기장 다중극한환경하에서의 중성자회절 연구 환경 구축
70	극저온 환경에서의 수소저장용기 사용중 검사 기술 개발
71	극저온기반다중극한환경에서의정밀측정기술개발
72	극산성 환경 대응 초내식 특성 발현을 위한 표면 제어 기술
73	극미소 유량제어를 위한 광기계적 유체 주사 기술
74	고중력환경 모사를 위한 Centrifuge 장비 개발
75	고융점 원소 기반 초고온용 합금 개발
76	고온환경 사용을 위한 SiC/SiC CMC 섬유강화복합재의 내환경 코팅기술 개발
77	고방사선·고압·고온 환경 구현을 통한 첨단 소재 성능 평가
78	고내구성 텅스텐 합금 설계, 제조, 특성평가 및 가공 기술 개발
79	x선자유전자레이저와 초강력레이저의 결합을 통한 극한물질의 초고속 연구 플랫폼 개발
80	950 ℃ 이상의 고온환경용 나노산화물 분산강화형 고엔트로피 합금 개발
81	3500 ℃급 초고온 온도 범위에서의 기초 선행 열적 재료물성 정밀측정을 위한 장비구축 및 측정된 물성치를 통한 내화금속 신합금 개발 활용
82	10K 사용온도를 보유한 고강도 고분자 복합재료 기술 개발

(첨부5) 중점추진과제 수요제안서 (RFP)

과제제안요구서(RFP)

		RFP번호	연구단-1
연구사업명	초고온-초고압 극한환경 구현/응용기술 개발		
1. 연구목표	온도 5000 K, 압력 100 Gpa의 극한 환경의 구현과 초고속 원자/구조/물성 추적기술 개발		
◇ 최종 목표			
○ 초고온-초고압 극한환경 발생 및 제어 기술 개발 (~ 5000 K, 100 Gpa, 1 PGpa/s)			
○ 초고온-초고압 극한환경 융합물성 측정 기술 개발 (in-situ 라만 및 엑스선 산란, 열복사 및 온도 측정, ms ~ us 시분해능)			
○ 초고온-초고압 환경 활용 신소재 개발			
◇ 단계별 연구개발 목표			
○ 1단계(3년) : 온도 > 2500 K 초고온 환경, 50 Gpa 압력, ~ Tpa/s 동적 압력 극한 환경 구현 기술 개발 및 실시간 구조 측정 기술 개발.			
○ 2단계(3년) : 온도 > 3500 K 단일 초고온 환경, > 100 Gpa 및 5000 K 복합 초고온-초고압 환경 구현 및 시분해 구조 및 열물성 측정 기술 개발. 다중극한 연구를 위한 이용자 시설 인프라 구축 및 R&D 핵심 실험실 추가 구성.			
○ 2단계(3년) : 온도 > 5000 K, 압력 > 100 Gpa, 동적 압력 1 PPa/s 다차원 극한환경 구현 및 초고속 시분해 원자-분자 구조 추적 기술 개발.			
2. 연구내용 및 범위(예시)			
○ 초고온=초고압 환경 구현 및 제어 기술 개발 :			
- Aerodynamic Levitation을 활용한 초고온 (1000 K) 산화물 환경의 구현과 라만 및 엑스선 산란을 활용한 실시간 원자-분자 구조 변화 측정.			
- Electrostatic Levitation을 활용한 금속 및 반도체 물질의 초고온 (up to 5000 K)) 환경을 진공상태에서 구현하고 고체-액체 상전이시 열물성 및 구조변화의 측정.			
- Diamond Anvil Cell 기술을 활용하여 초고압 (~ 100 Gpa) 정압 상태와 레이저 heating을 통한 초고압-초고온 (~ 100 Gpa, 5000 K) 한상태 구현함.			
○ 초고온-초고압 극한환경 융합물성 측정기술 개발 :			
- In-situ 상태에서 전기/자기/기계 물성 및 구조변화를 엑스선 및 라만 산란을 통해 측정.			
- 시간분해 엑스선 측정을 통해 마이크로초에서 피코초 시간 영역에서 일어나는 초고속 구조변화를 측정함.			
- 초고온-초고압 상태에 놓인 물질의 전기/자기/기계 및 열복사 물성 등을 측정함.			

○ 초고온-초고압 환경 활용 신물질 개발 - 다양한 고온 소재의 크리프 거동을 실시간으로 측정하여 고온 소재를 발굴함. - 다차원 비평형 극한 신에너지 물질 발견/합성 기술 개발 (Fe 신구조, HEA, BMG).			
3. 특기 사항			
○ 본 과제의 목표 완성을 위해서는 오랜 시간동안 축적되고 traceability 가 높은 극한 환경 발생 및 측정 기술과 지식이 필요하므로 ‘거점 연구소’ 기반의 연구시스템 운영 필요 ○ 극한 환경을 활용한 신소재 개발은 극한 환경을 구현하고 제어할 수 있어야 하며, 극한 물성을 측정하는 기술 개발이 동시 다발적으로 진행되어야 가능하다. ○ 초고온-초고압 극한환경 발생 및 측정 평가 기술과, 신소재 원천기술 개발은 기본적으로 기반장치구축이 필수적이므로, 1단계의 기반설비구축 경험이 있는 기관의 주도가 필요 ○ 신소재 원천기술 개발은 2~3단계에 중점적으로 이루어지나, 과제 성공률을 높이기 위해 1단계 1차년도부터 기초물성연구 시작 필요 ○ 기존의 기술에서 접근 불가능했던 영역을 구현하므로, 실험실 수준의 기반장비 구축 및 신물질 원천기술 개발과 과학적 난제 해결 및 새로운 현상 발견이 주요 성과물			
총예산	91 억원	총 연구기간	3단계(10년)/91년

과제제안요구서(RFP)

2. 무중력/고중력 분야		RFP번호	연구단-2
연구사업명	중력제어 지상플랫폼 개발 및 측정기술 개발		
1. 연구목표			
◇ 최종 목표			
○ 무중력/고중력 환경 지상 모사 플랫폼을 이용한 우주 극한환경 구현, 측정 및 활용기술 개발			
◇ 단계별 연구개발 목표			
○ 1단계(3년) : 극한기술 융합을 통해 중력(무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 구축 및 측정기술 개발			
○ 2단계(3년) : 극한환경(무중력, 고중력, 비접촉) 활용 생명/의학/재료물성 및 기능성 신소재 분야 기술개발			
2. 연구내용 및 범위(예시)			
○ 중력 (무중력/고중력) 제어 지상 플랫폼 개발 및 측정기술 개발			
- 생명/극한바이오 연구 분야 플랫폼: Clinostat (무중력 환경 모사), Centrifuge (고중력 환경 모사) 등 개발			
- 재료 물성 연구 분야: Levitator (정전기/전자기/가스부양 등) 이용 비접촉 환경 재료물성 측정			
- 연소 특성 연구 분야: Drop tower (수십 m 또는 100 m 급)			
- 신소재 합성 연구 분야: 마이크로중력 하 고부가가치 광학볼렌즈 (직경 8 mm 이상)			
- 광학적/강유전/유전특성을 갖는 기능성 신소재 발견			
3. 특기 사항			
○ 본 과제의 목표 달성을 위해서는 기계, 전자, 전기, 광학, 재료, 물리, 화학, 생명 과학/공학, 의학 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 산학연 연계와 개방형 연구시스템 운영 필요			
○ 기반장치구축이 필수적이므로, 거점연구기관을 중심으로 1단계의 기반설비구축 경험에 있는 기관의 참여가 필요			
○ 기존의 기술에서 접근 불가능했던 영역을 지상기반 모사시설로 구현하므로, 실험실 수준의 기반장비 구축 및 생명/의학, 소재, 연소 등의 분야에 대한 활용으로 과학적 난제 해결 및 새로운 현상 발견이 주요 성과물임			
○ 재료의 열물성은 결정 성장과 응고 현상을 정량적으로 파악하는 데 필요한 기초 자료이며, 이는 유리, 철강, 반도체 결정성장 산업계의 요구에 부응할 수 있음			
총예산	50억원	총 연구기간	2단계/6년

과제제안요구서(RFP)

3. 극저온 분야		RFP번호	연구단-1
연구사업명	다중실험용 고자기장(30T)-극저온(100mK) 통합시스템 개발		
1. 연구목표			
◇ 최종 목표 ○ 저전력-고자기장 기반 극저온 통합 다중실험 인프라 구축 및 활용기술 개발 - 저전력하 30 T 초전도 전자석 개발 및 신뢰성 평가 - 극저온(100 mK 이하) 환경구현 및 다중실험용 프루브 개발 - 저전력-고자기장(30T)과 극저온(100 mK) 통합시스템이용 다중실험기술 개발 ◇ 단계별 연구개발 목표 ○ 1단계(3년) : 저전력-고자기장 기반의 극저온 환경구현 (다중실험용 top-loading 프루브 개발) ○ 2단계(3년) : 고자기장-극저온 통합시스템 성능평가 및 활용 다중실험기술 개발			
2. 연구내용 및 범위(예시)			
○ 저전력-고자기장(30 T) 초전도 전자석 개발 - Top-loading dilution 극저온 시스템과 통합이 가능한 초전도 자석 설계 및 제작 - 자기장의 크기 및 균일도를 소급성을 가지는 절대측정방법으로 평가 - 자기장 안정도 평가, 초전도자석 quenching의 감지 및 전류제어기술 개발 - 초전도 자석에서 발생하는 stray B-field 차폐기술 개발 및 평가 ○ 다중실험용 극저온(100 mK 이하) 환경구현 - 고자기장 초전도 전자석과 통합이 가능한 top-loading dilution 극저온 시스템 개발 - 다중실험용 실험을 위한 top-loading 프루브 개발 (전기적 특성 평가용 정밀 프루브 및 원자/자성 현미경용 프루브 개발) - 극저온과 온도 안정성을 소급성을 가지는 절대측정방법으로 평가 ○ 고자기장-극저온 시스템통합 - 통합시스템을 이용한 다중실험 가능성 확인 - 통합시스템의 신뢰성 평가, 설치 및 운용			
3. 특기 사항			
○ 본 과제의 목표의 성공적 완성을 위해서는 기계, 전기, 전자, 열, 유체, 재료, 측정 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 산학연 연계와 개방형 연구시스템 운영 필요함 ○ 고자기장-극저온 시스템을 설치하고 운용하기 위해서는 장치운용을 위해서 필수적인 헬륨회수 및 공급인프라가 이미 구축되어 있는 연구기관의 참여가 필수. 지속적인 운영을 위해서는 관련기술을 지속적으로 필요로 하는 미션을 가지고 있는 연구기관의 참여가 필수적임			

○ 고자기장-극저온 통합시스템을 필요로 하는 사용자를 지원할 수 있는 전문인력의 확보가 필수적임

총예산	100 억원	총 연구기간	2단계/6년
-----	--------	--------	--------

과제제안요구서(RFP)

4. 극한소재 분야	RFP번호
연구사업명	초고온, 초음속 다중 극한 환경 대응 초내삭마 소재 개발
1. 연구목표	
◇ 최종 목표 ○ 극초음속 환경 하에서 반복 사용이 가능한 다중 극한환경용 초내삭마 소재 개발 - 극초음속 환경하 nose tip의 운용조건 만족소재 개발 - 추력 분사 시 로켓 노즐목의 운용조건 만족소재 개발 - 제작된 소재의 비파괴 품질검사 및 극한환경 반복운용 성능 평가 ◇ 단계별 연구개발 목표 ○ 1단계(3년) : 전산모사를 통한 다중 극한환경 대응 가능형 신조성, 신 미세구조 도출 및 이를 적용한 고품위 원료, 신소재 개발 ○ 2단계(3년) : 개발된 소재의 대형화, 복잡 형상화 기술, 품질 검사 방법 개발 및 Arc-jet plasma wind tunnel, 로켓을 이용한 극한 환경 반복 성능 검증	
2. 연구내용 및 범위	
○ 최근 우주 산업분야에서 가장 주목받고 있는 Space X사의 팰컨 9과 같은 재사용 발사체 제조를 위해서는 초고온, 초음속의 가혹 환경에서 반복사용이 가능한 nose tip 및 노즐목 소재 개발이 필수적임. ○ 초고온, 초음속, 고압력의 다중 극한환경에서 우수한 내삭마 특성 및 반복 사용성을 나타내는 소재 개발 - 전산모사를 통하여 극초음속 환경하의 nose tip과 유사한 Mach 2, 2000℃의 환경 및 노즐목의 환경 영역인 2000℃, Mach 1, 20 bar 조건에서 우수한 내삭마 특성과 반복 사용성을 갖는 조성 및 미세구조 도출 - 전산모사를 통하여 도출된 조성을 갖는 고품위 원료 제조 및 복잡형상 소재 제조를 위한 성형 공정 개발 ○ 제조된 복잡 형상 소재의 특성 평가 및 비파괴 진단기술 개발: 초고온 물성 등 다양한 데이터 구축의 기반이 될 소재 물성 측정·평가 및 신뢰성 확보 기술 - 소재 기본 물성 측정 : 상온 및 고온 강도, 탄성율, 파괴인성 - 소재 결함의 비파괴 측정 기술 : 3D 스캔 형상 측정, CT, 초음파, IR 등 ○ 실 환경 및 유사 실환경에서의 성능 평가를 통한 재사용 성능 검증 - 개발된 소재의 arc-jet plasma wind tunnel 시험을 통한 극초음속 모사 환경 하에서의 내삭마 특성 및 재사용성 검증 (2000℃, Mach 2, 흑연노즐 대비 3배 이상 삭마저항성) - 개발된 소재의 로켓 장착 및 분사를 통한 실환경에서의 노즐목 내삭마 특성 및 재사용 성능 검증 (2000℃, Mach >1, 20 bar, 흑연노즐 대비 3배 이상 삭마저항성)	
3. 특기 사항	
○ 본 과제의 목표 완성을 위해서는 전산, 재료, 공정, 기계, 광학, 열 등의 융합형 기술과 지식이 필요하므로 학-연 연계형 연구시스템 운영 필요	

○ 다중 극한환경 하에서는 소재의 미소한 조성 및 구조 차이로도 큰 특성 차이가 나타나기 때문에 다중 극한환경용 소재 제조 경험이 있는 기관 참여가 필요 ○ 선진국에서도 미구현 상태인 다중 극한환경 하에서의 재사용 소재 개발은 매우 도전적인 목표이며, 이 소재는 E/L (수출입 통제)에 속하는 전략 소재이므로 개발 성공 시 재사용 발사체 분야의 주도권 확보에 큰 도움이 될 수 있음			
총예산	100억원	총 연구기간	2단계/6년

과제제안요구서(RFP)

5. 극한바이오 분야		RFP번호	연구단-2
연구사업명	무중력 환경 활용 장기유사조직배양 기술 개발 및 종양 내 항암제 전달 영향 연구		
1. 연구목표			
◇ 최종 목표			
○ 무중력/고중력 환경활용 생명/의학 분야 난치병 치료기술 개발			
◇ 단계별 연구개발 목표			
○ 1단계(3년) : ①무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양, 암과 같은 난치병 치료 기술 기초 연구, ②중력 변화에 대한 세포/조직 대응 측정 기초 연구			
○ 2/3단계(3년+3년) :①무중력 환경을 활용한 3차원 장기배양 시스템 개발 및 장기배양 기술개발, ②종양 내 약물전달 효율 증진 및 치료효과 증대 기술 연구			
2. 연구내용 및 범위(예시)			
○ 마이크로중력 환경을 활용하여 장기유사조직 (organoid) 배양 기술 개발			
- 사람의 장기유사조직은 일반적인 세포배양과 다르게 실제 장기와 유사하여 질환 연구와 치료방법에 응용이 가능함			
- 마이크로중력 환경을 활용하면 삼차원 (3D) 장기유사조직의 배양이 매우 효율적으로 만들 수 있기 때문에 유용함			
○ 마이크로중력 환경에 의한 종양 내 항암제 전달 영향 연구			
- 종양조직에 마이크로중력 환경을 이용하여 압력을 줄이게 되었을 때, 항암제 전달이 원활하게 이루어질 것으로 예상함			
- 마이크로중력/고중력 환경을 활용하여 항암제 전달과정을 연구하고 약물 전달을 용이하게 하는 시스템 개발			
- 종양조직 내 마이크로중력 환경과 약물전달, 항암효과와의 관계를 규명하고 최종적으로 난치성 종양에 약물전달을 효율적으로 하여 항암치료를 증진시킴			
3. 특기 사항			
○ 장기유사조직 배양 기술을 통해서 암, 당뇨, 치매 등의 난치성 질환 치료 연구 시스템 구축 및 치료제 개발 연구, 종양조직에 항암제 전달을 향상시켜서 사망률 1위인 암을 치료할 수 있는 새로운 치료방법을 모색함			
○ 생명/의학 분야는 장기간의 연구가 필요하므로 1단계 무중력환경 모사시설을 활용하고, 2단계부터는 국제협력을 통한 우주기반 플랫폼 활용 모색이 필요함			
총예산	50억원	총 연구기간	3단계/9년

(첨부6) 특허동향조사 보고서

극한연구 기획

특허동향조사 보고서

I. 개요

1. 분석배경 및 목적

가. 분석 배경

- 본 “극한연구 특허동향 분석”은 현재의 과학적 이슈와 기술발전의 포화상태를 극복하고 혁신성장을 이끄는 새로운 기술 확보를 위해 추진하고자 하는 극한연구 활성화 관련 사업기획의 일환임
- 특허분석을 통해 극한 연구의 당위성과 연구방향을 검토함과 동시에 전략적이고 내실 있는 사업기획을 위해 한국표준과학연구원이 발주한 사업임

나. 분석 목적

- 극한연구는 인류의 기술적 한계로 접근하기 어려운 극저온, 초고압 등의 극한 환경을 연구하고 새로운 현상과 물질을 발견하여 인류의 활동영역을 확장하고, 신산업 창출의 기반을 마련할 수 있는 연구임
- 이에 미국과 유럽을 중심으로 국가 주요 연구기관 주도의 극한 연구 인프라 기술 개발을 추진 중에 있음
- 그러나 현재까지 우리나라의 극한연구는 태동기 단계로, 연구 인프라, 인력 및 커뮤니티 부족, 다중 극한환경을 측정·제어할 기술력 미흡, 종합관리시스템 부재 등 극한환경 자체에 접근하여 연구 수행이 가능하게 할 연구지원체계 마련이 필요한 상황임
- 본 특허동향조사 보고서는 미래 산업을 주도할 수 있는 초고온/초고압, 무중력/고중력 및 바이오, 극저온, 극한소재에 관련된 최근 특허동향 및 핵심특허 현황 등을 파악하여 본 극한연구 사업 추진의 타당성에 대한 객관적인 특허정보를 제공하기 위함

2. 분석 범위

- 본 분석에서는 극한연구와 관련된 특허분석을 진행함에 있어 주로 극한 환경 구현, 핵심 소재·부품·설비 및 응용기술을 대상으로 조사함
- 기술분류 체계는 중분류 항목에 초고온/초고압, 무중력/고중력 및 바이오, 극저온, 극한소재 분야로 분류하고, 각 중분류 항목은 다시 소분류 항목으로 세분화하여 분석을 진행하였으며, 특허 분석 대상 국가는 미국 및 유럽을 대상으로 최근 7년간의 특허를 검색하여 분석함

가. 분석대상 특허 검색 DB 및 검색범위 한정

1) 분석대상 특허⁹⁾

[표 1] 검색 DB 및 검색범위

자료 구분	국 가	검색 DB	분석구간	검색범위
공개·등록특허 (공개·등록일 기준)	미국	WIPS DB	2011.01.01. ~ 2017.12.31.	특허공개, 특허공개(공표), 특허공개(재공표) 전체문서
	유럽			EP-A(Applications) 및 EP-B(Granted) 전체문서

※ 정량분석구간: 미국, 유럽 - 2011.01~2017.12(출원년도)

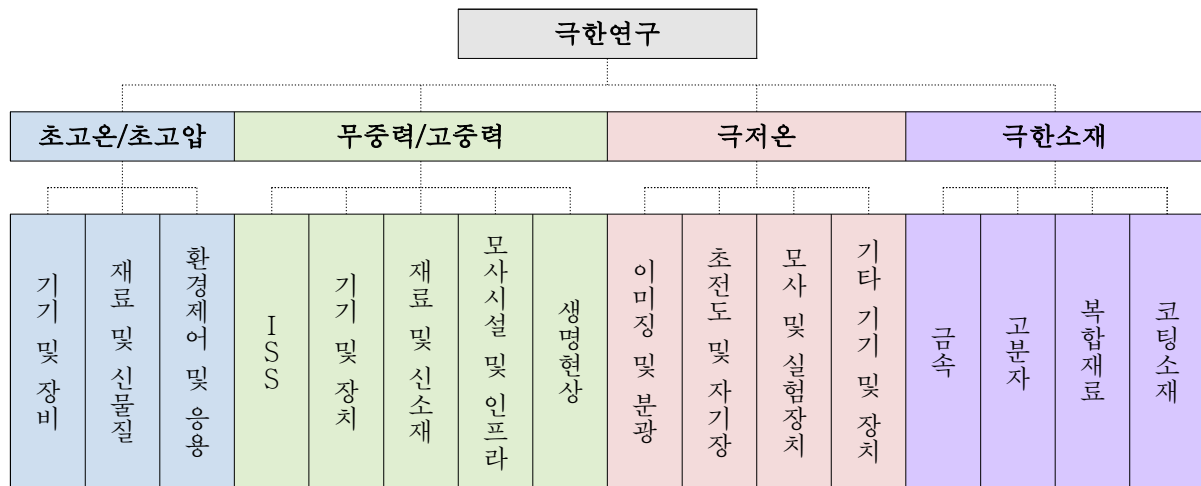
※ 정성분석구간: 전체 분석구간 대상

9) ※ 미국 및 유럽특허: 출원일 기준으로 분석하며, 일반적으로 특허출원 후 18개월이 경과된 때에 출원 관련정보를 대중에게 공개하고 있음. 따라서 아직 미공개 상태의 데이터가 존재하는 2017년 자료는 유효하지 않으므로 정량분석은 2011년~2016년까지 유의미한 데이터로 인정됨. 단, 정성분석은 가장 최근 특허자료까지 포함시킴

나. 분석대상 기술

1) 기술분류 체계

- 극한연구 대상 초고온/초고압, 무중력/고중력(바이오 포함), 극저온, 극한소재 4개의 중분류로 분류할 수 있으며, 세부기술로서 기기 및 장치, 환경 모사 설비, 응용분야 등에 따라 모두 16개의 소분류가 존재함
- 특허분석 대상에서 각 극한연구 분야에서 상용화 기술과 연계된 특허권의 경우 분석에서 제외하였음



<극한연구 분야 기술트리>

- 중분류 단위에 중복되는 설비 및 부품(공통부품)의 경우 연관 기술들의 용도가 가장 빈번하게 활용되는 기술분야로 분류하였음

2) 기술분류 기준

[표 2] 검색 DB 및 검색범위

대분류	중분류	소분류	검색개요 (기술범위)
극한연구	초고온/ 초고압	기기 및 장비	Diamond anvil cell(DAC), 원자로 등 초고온/초고압 환경 구현 장치
		재료 및 신물질	나노스피어, 초고온 세라믹, 합금 등 극한 환경 소재 개발 또는 물성 변화
		환경제어 및 응용	Levitorator 등 모사환경 구축 및 실험장치
	무중력/ 고중력	ISS	우주정거장, 우주실험 모듈 설계, 부속기기 등
		기기 및 장치	다양한 무중력환경에 관련된 부속기기 및 제조공정
		재료 및 신소재	무중력 환경에서의 소재 제조

		모사시설 및 인프라	중력 제어, 자유낙하탑 등 모사환경 구축
		생명현상	무중력, 방사선 환경에서의 생명현상
	극저온	이미징 및 분광	극저온 이미징 및 분광학 관련 기술
		초전도 및 자기장	저전력-고자기장 구현, 초전도체
		모사 및 실험장치	극저온 및 초전도 모사환경 구현
		기타 기기 및 장치	냉각장치 및 구성 부품류
	극한소재	금속	극한 환경 내 제조 또는 극한 환경 내구성 합금류
		고분자	고분자 수지 등
		복합재료	신조성 고품위 소재 등
		코팅소재	극한환경 보호 또는 방호 관련 소재

다. 유효특허 선별 기준 및 결과

1) 통계용 데이터 구축

[표 3] 데이터베이스 구축 과정

특허검색	노이즈 제거	데이터 정비	DB 구축
2011.01~2017.12 출원공개된 미국, 유럽 특허 검색	- 해당 기술 분야와 무관한 특허 1차 노이즈 제거 - 분야별 기술전문가 2차 노이즈 제거	- 연구주제 및 출원 데이터 분석 - 기술분류 및 핵심특허 (상세 분석기술) 선별 - 각 극한분야에서 상용화 기술에 관한 특허 제외	극한연구 분야 특허 DB 구축 완료
- 초고온/초고압 - 미국: 216건 - 유럽: 104건 - 무중력/고중력 - 미국: 168건 - 유럽: 46건 - 극저온 - 미국: 862건 - 유럽: 401건 - 극한소재 - 미국: 275건 - 유럽: 128건	- 초고온/초고압 - 미국: 15건 - 유럽: 0건 - 무중력/고중력 - 미국: 49건 - 유럽: 15건 - 극저온 - 미국: 16건 - 유럽: 4건 - 극한소재 - 미국: 9건 - 유럽: 3건	- 초고온/초고압 핵심기술 - 미국: 8건 - 유럽: 0건 - 무중력/고중력 - 미국: 11건 - 유럽: 1건 - 극저온 - 미국: 5건 - 유럽: 2건 - 극한소재 - 미국: 4건 - 유럽: 0건	핵심기술 연구동향 분석

- 2011년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 출원된 미국특허, 유럽특허를 대상으로 분석 데이터 구축

○ 특허검색 : 해당 분야별 산·연 전문가들로 구성된 전문위원회에서 결정된 키워드 적용

○ 노이즈 제거

: 해당 기술과 무관한 특허 제외

: 본 특허분석의 목적은 미지의 극한 연구와 관련이 있는 원천기술 또는 연구동향 파악에 있어 관련성이 있는 기술현황을 분석하는 것으로 기존 산업분야의 상용화 단계에 있는 특허는 제외함

○ 데이터 정비 : 누락된 정보의 삽입, 다양한 명칭으로 작성된 출원인(소유권자)명, 발명자명의 통일화 등 표준화 작업

2) 유효특허 선별 결과

○ 극한연구 관련 분야의 특허는 미국, 유럽을 대상국으로 한정하여 WIPS DB에서 검색함

[표 4] 검색 DB 및 검색범위

중분류	소분류	유효데이터 건수		
		USPTO	EPO	합계
초고온/초고압	기기 및 장비	6	0	6
	재료 및 신물질	5	0	5
	환경제어 및 응용	4	0	4
무중력/고중력	ISS	4	2	6
	기기 및 장치	14	3	17
	재료 및 신소재	6	0	6
	모사시설 및 인프라	21	7	28
	생명현상	4	3	7
극저온	이미징 및 분광	1	0	1
	초전도 및 자기장	8	2	10
	모사 및 실험장치	3	2	5
	기타 기기 및 장치	4	0	4
극한소재	금속	4	0	4
	고분자	0	1	1
	복합재료	3	1	4
	코팅소재	2	1	3
총계		89	22	111

II. 극한연구 특허동향

1. 연도 구간별 기술동향

- 극한연구의 연구분야별 연도별 출원추이를 살펴보면 다양한 극한 연구 관련 기술이 급격한 증감 없이 지속적인 출원동향을 나타내는 것으로 판단됨
- 무중력/고중력 기술분야의 경우 극한 바이오 분야 기술을 포함하고 있고 ISS, 우주실험 모듈 등 우주/항공분야 관련기술의 출원으로 인해 상대적으로 많은 출원건수를 나타내고 있음
- 극한연구 기술분야별로 상세 분석이 필요한 핵심특허의 경우 초고온/초고압 8건, 무중력/고중력 12건, 극저온 7건, 극한소재 4건으로 선별되었음
- 따라서 각 기술분야별 미지의 극한연구와 직접적인 관련성이 있는 핵심기술은 매우 제한적으로 출원되고 있으며, 전체 출원건수 보다 개별 핵심특허의 중요도를 파악하는 것이 유의미한 것으로 판단됨



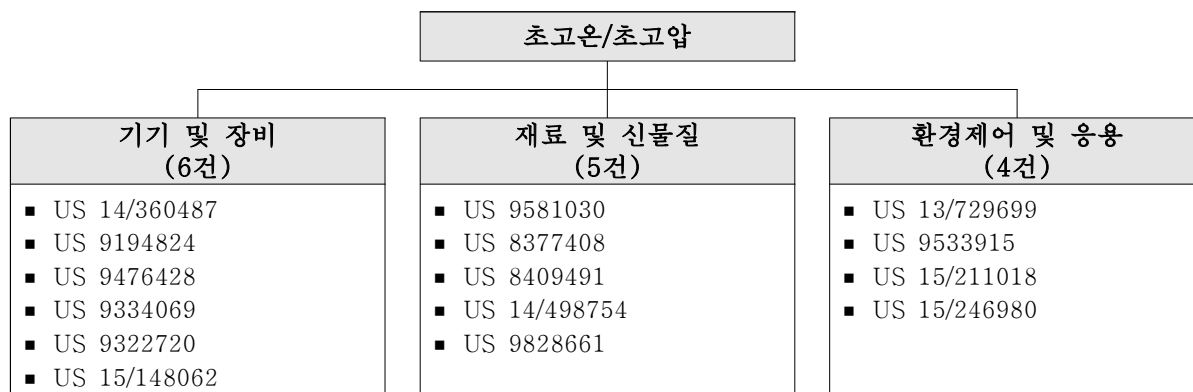
구분	초고온/초고압	무중력/고중력	극저온	극한소재
출원특허	15건	64건	20건	12건
핵심특허	8건	12건	7건	4건

<연도별 세부기술 동향>

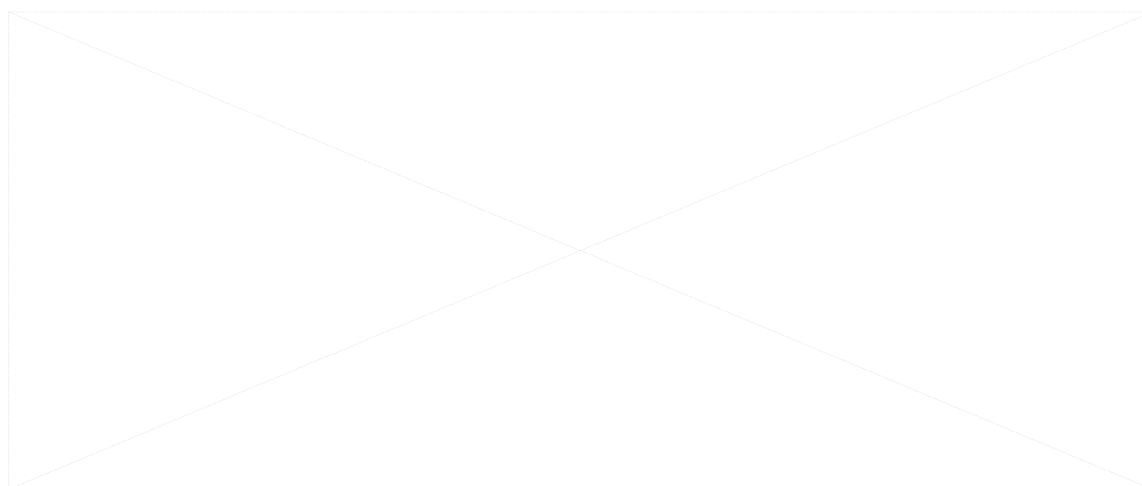
2. 세부기술 분야별 동향

가. 초고온/초고압

☐ 출원동향



- 초고온/초고압 분야 세부기술은 초고온/초고압 상태를 구현하거나 측정 및 분석과 관련된 기기 및 장비기술, 재료 및 신물질 합성 기술, 기타 환경제어 및 응용기술 분야로 분류함
- 전체 출원 건수 15건 중 기기 및 장비 관련기술이 6건, 재료 및 신물질 5건, 환경 및 응용기술 4건으로 조사됨



<연도별 세부기술 동향(초고온/초고압)>

- 전체 출원 건수가 제한적이므로 연구동향에 대한 분석은 한계가 있으나 과거 초고온/초고압 환경 연구를 위한 기기 및 장비 기술에 주류를 이루었던 것에 비해 재료, 신물질 및 환경제어 등 기술 분야가 다양화되고 있는 것으로 판단됨

☐ 분석대상 기술 현황

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
US9581030 Ultra high temperature environmental protection coating	US9194824 Anvils and ultra-high pressure apparatuses using the same		US9828661 Nickel-based super heat resistant alloy and method of manufacturing the same		US15/211018 Ultra High Temperature Environmental Protection Coating	
US8377408 Process for the production of carbon nanoparticles and sequestration of carbon			US9322720 Use of aluminum nitride to obtain temperature measurements in a high temperature and high radiation envi		US15/246980 ELECTROSTATIC LEVITATION CRYSTAL GROWTH APPARATUS FOR SOLUTION AND CRYSTAL GROWING METHOD USING THE SAME	
US8409491 In-situ formation of reinforcement phases in ultra high temperature ceramic composites						

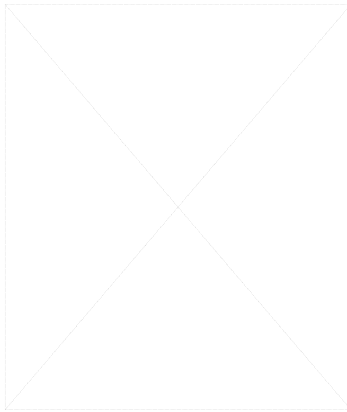
[표 5] 분석 대상기술 목록

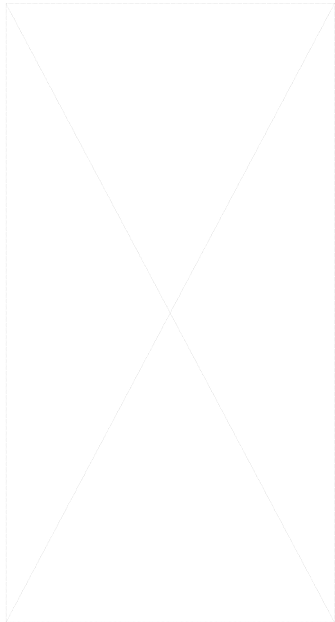
연번	소분류	출원번호 (출원일)	등록번호 (등록일)	발명의 명칭	출원인
1	기기 및 장비	US13/425647 (2012.03.21.)	US9194824 (2015.11.24.)	Anvils and ultra-high pressure apparatuses using the same	US SYNTHETIC CORPORATION
2		US14/186244 (2014.02.21.)	US9322720 (2016.04.26.)	Use of aluminum nitride to obtain temperature measurements in a high temperature and high radiation envi	U.S. Department of Energy
3	재료 및 신물질	US13/011675 (2011.01.21.)	US9581030 (2017.02.28.)	Ultra high temperature environmental protection coating	Lockheed Martin Corporation
4		US13/090053 (2011.04.19.)	US8377408 (2013.02.19.)	Process for the production of carbon nanoparticles and sequestration of carbon	High Temperature Physics, LLC
5		US13/215206 (2011.08.22.)	US8409491 (2013.04.02.)	In-situ formation of reinforcement phases in ultra high temperature ceramic composites	The United States of America as Represented by the Administrator of the National Aeronautics & Space Administration (NASA)
6		US14/515675 (2014.10.16.)	US9828661 (2017.11.28.)	Nickel-based super heat resistant alloy and method of manufacturing the same	Korea Atomic Energy Research Institute
7	환경제어 및 응용	US15/211018 (2016.07.15.)	—	Ultra High Temperature Environmental Protection Coating	Lockheed Martin Corporation
8		US15/246980 (2016.08.25.)	—	ELECTROSTATIC LEVITATION CRYSTAL GROWTH APPARATUS FOR SOLUTION AND CRYSTAL GROWING METHOD USING THE SAME	KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE

- 분석대상 기술은 초고온/초고압 기술분야의 선행연구 중 기술경쟁 가능성이 있거나 연구분야별 주요 이슈와 관련성이 있는 핵심기술을 선

별함

- 주요 출원인은 대부분 국가연구기관 및 Lockheed Martin, US SYNTHETIC과 같은 글로벌 전문기업에 국한되어 있으므로 아직까지 연구분야가 제한적이며, 국가 주도의 프로젝트를 중심으로 연구가 이루어지고 있는 것으로 판단됨

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Anvils and ultra-high pressure apparatuses using the same		
출원인	US SYNTHETIC CORPORATION	출원국가	US
특허번호	9194824	출원일	2012-03-21
기술분야	방사선 회절	법적상태	등록
패밀리 특허	-		
기술요약	Polycrystalline diamond ("PCD") anvils and associated ultra-high pressure apparatuses employing such anvils. The PCD anvils include an anvil body defining an anvil face. The anvil body comprises a plurality of diamond grains defining a plurality of interstitial regions, with a metal-solvent catalyst occupying at least a portion of the plurality of interstitial regions. The plurality and diamond grains and the metal-solvent catalyst of the PCD collectively exhibit a coercivity of about 115 Oe or more and a specific magnetic saturation of about 15 G·cm ³ /g or less.		
대표도면			
대표 청구항	1. A polycrystalline diamond anvil for use in an ultra-high pressure apparatus, comprising: an anvil body defining an anvil face, the anvil body comprising: a plurality of bonded diamond grains directly bonded together and defining a plurality of interstitial regions, the plurality of bonded diamond grains having an average grain size of 30 μm or less; a metal-solvent catalyst occupying at least a portion of the plurality of interstitial regions, the metal-solvent catalyst present in a concentration from 1 weight % to 6 weight %; wherein the plurality of diamond grains and the metal-solvent catalyst collectively exhibit a coercivity from 115 Oe to 250 Oe; and wherein the plurality of diamond grains and the metal-solvent catalyst collectively exhibit a specific magnetic saturation of about 15 G·cm³/g or less.		
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Use of aluminum nitride to obtain temperature measurements in a high temperature and high radiation environment		

출원인	U.S. Department of Energy	출원국가	US
특허번호	9322720	출원일	2014-02-21
기술분야	온도측정	법적상태	등록
패밀리 특허	—		
기술요약	An aluminum nitride piezoelectric ultrasonic transducer successfully operates at temperatures of up to 1000° C. and fast (>1 MeV) neutron fluencies of more than 1018 n/cm2. The transducer comprises a transparent, nitrogen rich aluminum nitride (AlN) crystal wafer that is coupled to an aluminum cylinder for pulse-echo measurements. The transducer has the capability to measure in situ gamma heating within the core of a nuclear reactor.		
대표도면			
대표 청구항	1. A temperature sensing apparatus for testing a nuclear reactor, the temperature sensing apparatus comprising: an electrode; a piezoelectric wafer connected electrically to the electrode, the piezoelectric wafer withstanding neutron fluencies of 1018 n/cm2 or more; a sensor block that thermally expands with a change in temperature in the nuclear reactor, the sensor block being connected to the piezoelectric wafer; a compression mechanism; and a transducer housing and a cap, both the transducer housing and the cap enclosing the piezoelectric wafer, the electrode, the sensor block, and the compression mechanism; wherein the transducer housing and the cap are electrically grounded, and the sensor block and the compression mechanism are connected electrically to the transducer housing and the cap; and wherein the apparatus is configured to measure within the nuclear reactor a time an ultrasonic pulse takes to travel from a first end of the sensor block to a second end of the sensor block and back to the first end of the sensor block.		
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Ultra high temperature environmental protection coating		
출원인	Lockheed Martin Corporation	출원국가	US
특허번호	9581030	출원일	2011-01-21

기술분야	액체 또는 타유동성 물질 표면 전처리(건열)	법적상태	등록
패밀리 특허	US 2016-0319135, US 2012-0189871		
기술요약	An environmental protective coating (EPC) for protecting a surface subjected to high temperature environments of more than 3000 degree F. The coating includes a dense platelet lamellar microstructure with a self-sealing, compliant binder material for holding the platelets together. The platelets may be formed from materials that are resistant to high temperatures and impermeable, such as ceramics. The lamellar microstructure creates a tortuous path for oxygen to reach the surface. The binder material may have free internal volume to increase the strain capability between the platelets and absorb increased volume during operation. The binder may be formed from a material that is softer and has a lower temperature capability than the platelets to provide the system with the required compliance and sealing capability. The binder may have sufficient glass content and glass-forming content for initial and long-term sealing purposes.		
대표도면			
대표 청구항	1. A method of protecting an oxidative surface of an aircraft comprising: a. forming a binder by mixing together ceramic mortar and elongate refractory oxide shells that are hollow and have ends open on opposing sides; b. forming a mixture by mixing the binder with refractory material platelets, wherein the mixture has an amount of volatile material; c. applying the mixture to the oxidative surface which is selected from the group consisting of a turbine blade surface, an exhaust washed surface, and an aircraft wing surface; d. forming a protective layer on the surface by heating the mixture to a temperature so that at least some of the volatile material volatilizes to create free volume voids at random locations in the binder; and e. operating the aircraft to expose the protective layer to at least 2000° F. thereby inducing a strain in a portion of the layer that is absorbed by the free volume voids to substantially minimize stress in the layer from the induced strain.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Process for the production of carbon nanoparticles and sequestration of carbon		
출원인	High Temperature Physics, LLC	출원국가	US
특허번호	8377408	출원일	2011-04-19
기술분야	나노 구조의 제조 또는 처리	법적상태	등록
패밀리 특허	JP6030558, CN103221338, BR112013006672, US9260308, US2015-0376012, US2015-0210558, IN02965/CHENP/2013, WO2014-0014495, US2014-0014495, JP2013-542907, US2013-0295000, KR10-2013-0121098, EP2619134, CN103221338, US8420042, CA2810543, WO2012-040303, US2012-0068124, US2011-0256049		
기술요약	Process for producing carbon nanospheres and other nano materials with carbon dioxide and magnesium. The carbon dioxide and magnesium are combusted together in a reactor to produce carbon nanospheres and magnesium oxide, which are then separated to provide the individual reaction products. The reaction occurs at a very high temperature, e.g. 2000° F.-5000° F. and also produces large amounts of useful energy in the form of heat and light, including infrared and ultraviolet radiation. Other oxidizing agents such as aluminum can be combined with the magnesium, and the metal oxides produced by the reaction can be recycled to provide additional oxidizing agents for combustion with the carbon dioxide. By varying the reaction temperature, the morphology of the carbon products can be controlled.		
대표도면			
대표 청구항	1. A process for producing a carbon product, comprising the steps of combusting carbon dioxide and magnesium together at a temperature of about 2000° F.-5000° F. to produce carbon nanoparticles, magnesium oxide, and heat and light energy, separating the carbon nanoparticles from the magnesium oxide and any other reaction products, and recovering the separated carbon nanoparticles.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	In-situ formation of reinforcement phases in ultra high temperature ceramic composites		
출원인	The United States of America as Represented by the Administrator of the National Aeronautics & Space Administration (NASA)	출원국가	US
특허번호	8409491	출원일	2011-08-22
기술분야	나노 구조	법적상태	등록
패밀리 특허	-		
기술요약	A tough ultra-high temperature ceramic (UHTC) composite comprises grains of UHTC matrix material, such as HfB₂, ZrB₂ or other metal boride, carbide, nitride, etc., surrounded by a uniform distribution of acicular high aspect ratio reinforcement ceramic rods or whiskers, such as of SiC, is formed from uniformly mixing a powder of the UHTC material and a pre-ceramic polymer selected to form the desired reinforcement species, then thermally consolidating the mixture by hot pressing. The acicular reinforcement rods may make up from 5 to 30 vol % of the resulting microstructure.		
대표도면			
대표 청구항	1. A method of forming a ceramic composite, the method comprising: mixing a pre-ceramic polymer and a solvent into a powder of an ultra-high-temperature ceramic (UHTC) material, and allowing the pre-ceramic polymer to coat grains of the UHTC material approximately uniformly, wherein the process of mixing comprises: (i) creating a slurry comprising the powder of the UHTC material, the pre-ceramic polymer and the solvent; (ii) producing droplets of the slurry; and (iii) removing or separating at least a portion of the solvent from the slurry, wherein said UHTC material is a boron-containing material, comprising at least one of HfB₂ and ZrB₂ and having a melting temperature of at least 2000° C.; thermally consolidating the mixture at a consolidation temperature of at least about 2000° C. for a thermal consolidation time interval in a range of about 30-180 minutes and at an applied pressure of at least 10 MPa; and allowing acicular reinforcement rods or fibers or whiskers to grow from the UHTC grains during thermal consolidation.		
서지사항	기술요지		

발명의 명칭	Nickel-based super heat resistant alloy and method of manufacturing the same		
출원인	Korea Atomic Energy Research Institute	출원국가	US
특허번호	9828661	출원일	2014-10-16
기술분야	합금	법적상태	등록
패밀리 특허	KR10-1601207, KR10-2015-0104318, US2015-0252462		
기술요약	The present invention relates to a nickel-based super heat resistant alloy and a method of manufacturing the same. In the nickel-based super heat resistant alloy according to the present invention, an amount of solid solution strengthening elements (chromium, cobalt, molybdenum, or tantalum) is adjusted to improve a mechanical property, such as a creep property, at high temperatures, and aluminum or titanium is included in a predetermined amount to improve a corrosion property. The nickel-based super heat resistant alloy has excellent elongation, strength, and creep properties at normal temperature and high temperatures, and thus it is possible to manufacture parts of, by way of non-limiting example, a thermoelectric power plant, an aircraft, or a very high temperature reactor in various shapes on a large scale.		
대표도면			
대표 청구항	1. A nickel-based heat resistant alloy comprising: 20 to 25 wt % of chromium (Cr), 10 to 15 wt % of molybdenum (Mo), 10 to 17 wt % of cobalt (Co), 0.01 to 0.15 wt % of carbon (C), 0.01 to 1 wt % of zirconium (Zr), 0.01 to 1 wt % of hafnium (Hf), 0.01 to 5 wt % of tantalum (Ta), 1 to 100 ppm of boron (B), 0.01 to 1 wt % of aluminum (Al), and a balance of nickel (Ni), wherein the nickel-based heat resistant alloy is polycrystalline and does not comprise titanium (Ti) or an aligned eutectic reinforcing fibrous phase.		

서지사항	기술요지
발명의 명칭	Ultra High Temperature Environmental Protection Coating

출원인	Lockheed Martin Corporation	출원국가	US
특허번호	15/211018	출원일	2016-07-15
기술분야	방화 페인트	법적상태	공개
패밀리 특허	US2012-0189871		
기술요약	An environmental protective coating (“EPC”) for protecting a surface subjected to high temperature environments of more than 3000 degree F. The coating includes a dense platelet lamellar microstructure with a self-sealing, compliant binder material for holding the platelets together. The platelets may be formed from materials that are resistant to high temperatures and impermeable, such as ceramics. The lamellar microstructure creates a tortuous path for oxygen to reach the surface. The binder material includes engineered free internal volume, which increases the elastic strain of the EPC. The binder is softer than the platelets, which in combination with its free volume increases pliability of the EPC. The binder may have sufficient glass content and glass-forming content for initial and long-term sealing purposes.		
대표도면			
대표 청구항	1. A coating for protecting a surface comprising: heat resistant platelets arranged in layers on the surface; a compliant binder between the platelets and the surface; and elongate voids in the binder having a generally rectangular cross section so that the binder material is formed into axially spaced apart elongate layers connected by axial web members.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	ELECTROSTATIC LEVITATION CRYSTAL GROWTH APPARATUS FOR SOLUTION AND CRYSTAL GROWING METHOD USING THE SAME		
출원인	KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE	출원국가	US
특허번호	15/246980	출원일	2016-08-25
기술분야	단결정 성장	법적상태	공개
패밀리 특허	US 2016-0362811, KR 10-1622593, WO 2015-130025		
기술요약	An electrostatic levitation crystal growth apparatus for a solution and a crystal growing method using the same. The apparatus may include an upper electrode, a lower electrode vertically spaced apart from the upper electrode, a power supply unit configured to apply a vertical electrostatic field between the upper electrode and the lower electrode, and a droplet dispenser configured to eject a solution into a region between the upper and lower electrodes and thereby to form a solution droplet. The solution droplet may be maintained in a charged state and may be electrostatically levitated against the gravity exerted thereon, by the vertical electrostatic field. The solution droplet may be evaporated in the electrostatically levitated state, and a solute dissolved in the solution may be grown to form a crystal.		
대표도면			
대표 청구항	1. An electrostatic levitation crystal growth apparatus, comprising: an upper electrode; a lower electrode vertically spaced apart from the upper electrode; a power supply unit configured to apply a vertical electrostatic field between the upper electrode and the lower electrode; and a droplet dispenser configured to eject a solution into a region between the upper and lower electrodes and thereby to form a solution droplet, wherein the solution droplet can be maintained in a charged state and electrostatically levitated against a gravity by the vertical electrostatic field, the solution droplet can be evaporated in the electrostatically levitated state, and a solute dissolved in the solution can be grown to form a crystal.		

□ 결론 및 시사점

[표 6] 초고온/초고압 기술동향 시사점

기기 및 장비	재료 및 신물질	환경제어 및 응용
■ 초고압력 장치를 다결정질 다이아몬드 제조공정에 적용 ■ 원자로 테스트를 위한 온도 감지 장치	■ 3000°F 이상 환경에서의 EPC 방법 및 소재구성 ■ 원자로를 통한 탄소 나노스피어 및 나노소재 제조기술 (2000°F. -5000°F) ■ 초고온도 세라믹(UHTC) 복합체 제조기술 ■ 니켈계 초내열성 합금	■ EPC 코팅 환경 기술 ■ 정전기 부양식 결정 성장장치
 ■ 환경구현 및 제어기술 미비에 따라 산업적으로 활용범위가 확장되지 않고 있음	 ■ 초고온 환경에서의 원자-분자구조 변화 연구 필요성 ■ 화력 발전 플랜트, 초고온 가스로, 항공기 등 초고온 환경에 적용이 가능한 소재 개발 필요성	 ■ 초고온/초고압 환경 구현 및 제어에 대한 직접적인 연구 미비
→ 다양한 소재를 적용할 수 있는 물성변화 측정 및 시험 장비의 출현이 예상됨	→ 탄소소재, 합금, 세라믹 등 중점 전략 소재 분야를 선점할 필요성이 있음	→ 응용 연구의 기반이 되는 초고온/초고압 모사 실험장치 및 제어기술 선도 가능성 높음

- 초고온/초고압 기술분야는 극한환경 산업적으로 활용되는 구현환경의 임계점을 뛰어넘는 환경제어 기술의 필요성이 높은 것으로 파악됨
- 이를 통해 다양한 소재의 물성 및 구조 변화를 측정, 조절함으로써 신물질 개발이 가능할 것으로 판단됨
- 향후 초고온/초고압 환경에 활용이 가능한 소재 연구가 확대될 것으로 판단되며, 원자-분자구조 변화 등을 통한 신에너지 기술 출현도 예상됨

나. 무중력/고중력

☐ 출원동향

무중력/고중력				
ISS (6건)	기기 및 장치 (17건)	재료 및 신소재 (6건)	모사시설 및 인프라 (28건)	생명현상 (7건)
■ US 9517590 ■ EP 2012-772977 ■ US 13/986418 ■ US 15/040816 ■ EP 2016-772420 ■ US 15/607898	■ US 8580011 ■ US 8696794 ■ US 9334069 ■ US 13/854591 ■ US 14/014947 ■ US 9358167 ■ EP 2787217 ■ US 14/331729 ■ US 15/021360 ■ EP 2016-171800 ■ EP 2014-855959 ■ US 9586843 ■ US 9597686 ■ US 9808805 ■ US 9656426 ■ US 9759374 ■ US 15/475580	■ US 9108370 ■ US 9340445 ■ US 9041010 ■ US 14/555234 ■ US 9759664 ■ US 9688902	■ US 9360210 ■ US 9212818 ■ EP 2641023 ■ EP 2641022 ■ US 13/272851 ■ US 13/341229 ■ US 13/594518 ■ US 9065309 ■ US 9024487 ■ US 9506475 ■ US 9336935 ■ US 9795894 ■ US 14/169397 ■ US 9494949 ■ EP 2014-811696 ■ US 9651569 ■ US 9567110 ■ US 9564838 ■ US 9533915 ■ US 9839895 ■ EP 2014-873981 ■ EP 2015-743184 ■ US 15/311616 ■ EP 2015-795768 ■ EP 2015-792427 ■ US 15/202483 ■ US 15/346962 ■ US 15/412125	■ US 9816071 ■ EP 2634579 ■ EP 2013-709042 ■ US 14/892520 ■ US 9557322 ■ US 14/450521 ■ EP 2015/197047

- 무중력/고중력 분야 세부기술은 International Space Station(ISS) 또는 우주실험 모듈, 기기 및 장치, 고성능 재료 및 신소재, 무중력/고중력 모사시설 및 인프라, 생물, 생명, 의생리학 등 생명현상 분야로 분류함
- 전체 출원 건수는 64건으로 지상기반 무중력/고중력 모사시설 및 인프라 관련기술이 28건으로 가장 많은 비율을 차지하였으며, 기기 및 장치 17건, 생명현상 7건, ISS 6건, 재료 및 신소재 6건으로 조사됨



<연도별 세부기술 동향(무중력/고중력)>

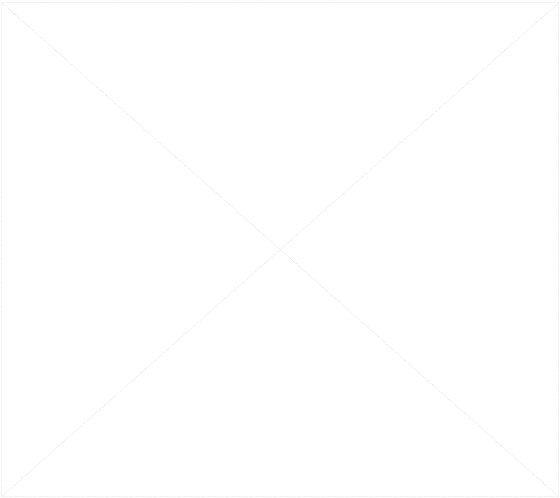
□ 분석대상 기술 현황

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
US8596794 Microgravity passive phase separator	US9517590 Device for expelling/containing liquids for a spacecraft tank	US13/986418 Space station configuration	US15/021369 MANUFACTURING IN MICROGRAVITY AND VARYING EXTERNAL FORCE ENVIRONMENTS	US9808805 Liquid reservoir for microgravity system	EP2015-792427 COMBUSTION EXPERIMENT DEVICE	
US9816071 Replication of undifferentiated cells in a weightless environment, uses thereof and a facility for such replication and the acceleration of the evolution of plants and animals			US14/555234 Metal Casting Methods in Microgravity and Other Environments			
			US9494949 Gravity control device			
			US9651569 Satellite testbed for evaluating cryogenic-liquid behavior in microgravity			
			US14/892520 APPARATUS AND METHOD OF STIMULATING CELLS USING 3D CLINOSTAT AND ULTRASONIC WAVE			
			US9557322 3D biomimetic platform			

[표 8] 분석 대상기술 목록

연번	소분류	출원번호 (출원일)	등록번호 (등록일)	발명의 명칭	출원인
1	ISS	US14/352536 (2012.10.18.)	US9517590 (2016.12.13.)	Device for expelling/containing liquids for a spacecraft tank	AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS
2		US13/986418 (2013.04.30.)	—	Space station configuration	Bigelow Development Aerospace
3	기기 및 장치	US13/112207 (2011.05.20.)	US8696794 (2014.04.15.)	Microgravity passive phase separator	Hamilton Sundstrand Space Systems International, Inc.
4		US15/021360 (2014.08.08.)	—	MANUFACTURING IN MICROGRAVITY AND VARYING EXTERNAL FORCE ENVIRONMENTS	MADE IN SPACE, INC.
5		US14/847011 (2015.09.08.)	US9808805 (2017.11.07.)	Liquid reservoir for microgravity system	SpacePharma SA
6	재료 및 신소재	US14/555234 (2014.11.26.)	—	Metal Casting Methods in Microgravity and Other Environments	MADE IN SPACE, INC.
7	모사시설 및 인프라	US14/893041 (2014.06.13.)	US9494949 (2016.11.15.)	Gravity control device	SPACE BIO-LABORATORIES CO., LTD. / IXS RESEARCH CORPORATION
8		US14/307005 (2014.06.17.)	US9651569 (2017.05.16.)	Satellite testbed for evaluating cryogenic-liquid behavior in microgravity	SIERRA LOBO, INC.
9		US15/346962 (2016.11.09.)	—	COMBUSTION EXPERIMENT DEVICE	Tohoku University / IHI Corporation
10	생명현상	US13/183004 (2011.07.14.)	US9816071 (2017.11.14.)	Replication of undifferentiated cells in a weightless environment, uses thereof and a facility for such replication and the acceleration of the evolution of plants and animals	ZERO GRAVITY SOLUTIONS, INC.
11		US14/892520 (2014.02.13.)	—	APPARATUS AND METHOD OF STIMULATING CELLS USING 3D CLINOSTAT AND ULTRASONIC WAVE	YONSEI UNIVERSITY WONJU INDUSTRY-ACADEMIC COOPERATION FOUNDATION
12		US14/316563 (2014.06.26.)	US9557322 (2017.01.31.)	3D biomimetic platform	The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration

- 분석대상 기술은 무중력/고중력 기술분야의 학문적, 산업적 주요 이슈 및 ‘컬럼버스 프로젝트(가칭)’의 극한연구 로드맵과 연관성을 가지는 핵심 기술을 선별함
- 주요 출원인은 AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS, MADE IN SPACE, INC., Bigelow Development Aerospace, SpacePharma SA, NASA 등 우주항공 분야 전문기업 및 기관이 대부분을 차지하고 있음

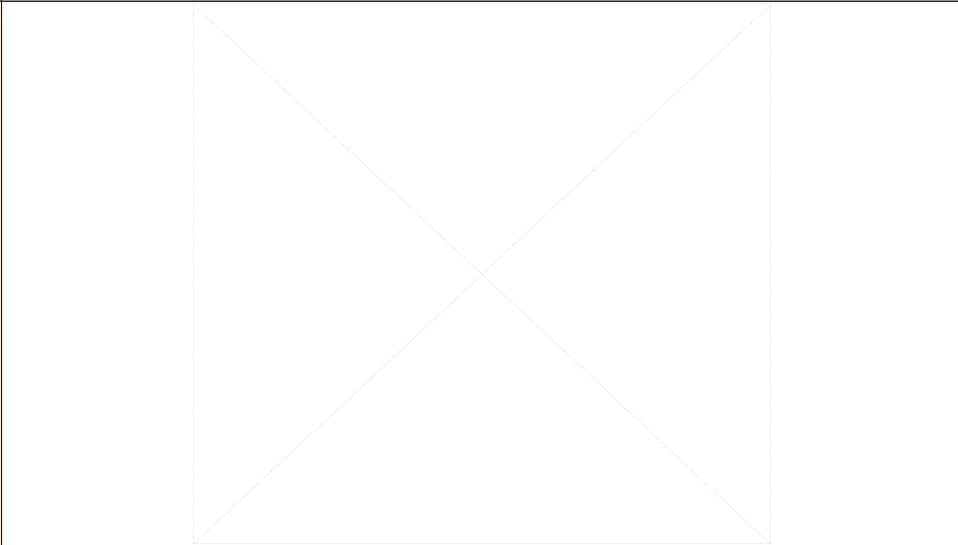
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Device for expelling/containing liquids for a spacecraft tank		
출원인	AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS	출원국가	US
특허번호	9517590	출원일	2012-10-18
기술분야	성형기술	법적상태	등록
패밀리 특허	CN 103998341, IN 03428/DELNP/2014, US 2014-0283936, EP 276831, CN 103998341, FR 2981332, WO 2013-057193		
기술요약	A device for expelling/containing a predetermined liquid. The device configured to be built into a liquid tank operable at low or zero gravity and comprising a unitary three-dimensional sponge structure. The sponge structure comprises a set of substantially wire-like elements that extend between a peripheral area of the sponge structure and an area for expelling/containing liquid. The wire-like elements are substantially oriented in the direction of flow of the fluid within the device. The wire-like elements are connected together by crosspieces and are arranged such that the capillary gradient is positive or zero in the direction of flow of the fluid from the peripheral area to the area for expelling/containing liquid.		
대표도면			
대표 청구항	1. A device for expelling/retaining a predetermined liquid and suitable for integration in a liquid tank operable at low or zero gravity, the device comprising: a peripheral zone; a liquid expulsion/retention zone; a single three-dimensional structure comprising a set of wire elements spaced apart from one another and extending between the peripheral zone and the liquid expulsion/retention zone, and a set of spacers intersecting and linking the wire elements together to form a lattice; wherein the wire elements are substantially oriented in a direction of flow of the liquid within the device, the liquid being retained between the wire elements by capillarity; wherein, for at least part of a surface orthogonal to the wire elements, intersections of the wire elements with an orthogonal surface are points determining sides of polygons forming a paving of the orthogonal surface; and wherein the wire elements are linked together by spacers comprising projections, parallel to a direction of the wire elements, on the surface orthogonal to the wire elements merged with the sides of the polygons.		

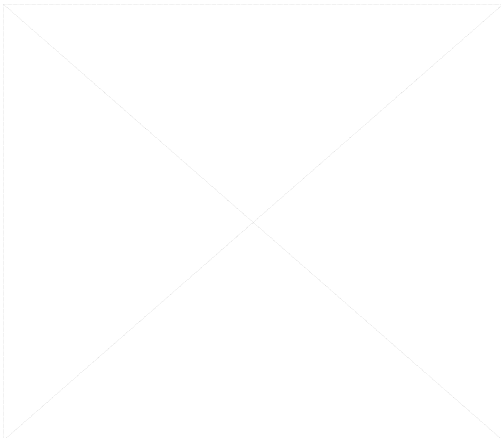
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Space station configuration		
출원인	Bigelow Development Aerospace	출원국가	US
특허번호	13/986418	출원일	2013-04-30
기술분야	우주항공체	법적상태	공개
패밀리 특허	—		
기술요약	An inflatable module space station is disclosed. The module has an avionics architecture designed for the module serving as a space station. The module also has at least one hundred and eighty cubic meters of internal habitable volume and at least one window. The module is capable of supporting at least two humans in a zero gravity environment for at least one month. There is also a propulsion bus designed for a space station and attached to the module. Furthermore, there is a docking mechanism designed for a space station and attached to the module. The module is capable of orbiting a mass like a planet or moon. The space station can be one or multiple expandable modules.		
대표도면			
대표 청구항	1. A space station configuration comprising: an expandable module; the module having an avionics architecture designed for the module serving as a space station; the module having at least one window; the module capable of supporting at least one human in a zero gravity environment for at least one month; a propulsion bus designed for a space station and attached to the module; a docking mechanism designed for a space station and attached to the module; and the module capable of orbiting a mass for an extended period of time.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Microgravity passive phase separator		
출원인	Hamilton Sundstrand Space Systems International, Inc.	출원국가	US
특허번호	8696794	출원일	2011-05-20
기술분야	가스 및 증기 확산	법적상태	등록
패밀리 특허	US 2012-0291630		
기술요약	A passive phase separator separates and traps gases that may be present in a liquid flowing through a system. The phase separator includes an inlet in fluid communication with a first separator chamber and an outlet in fluid communication with a second separator chamber that is disposed annularly about the first separator chamber. Gas introduced into the first separator chamber is pushed downstream through the first separator chamber to a gas storage chamber. Once gas is trapped within the gas storage chamber it remains there for the entire operational life of the phase separator.		
대표도면			
대표 청구항	1. A phase separator for separating phases of a two-phase mixture comprising: a housing including an inlet and an outlet; a first separator chamber within the housing, the first separator chamber including walls of porous material defining a passage from the inlet to a gas storage chamber through which a two-phase mixture of gas and liquid flows; and a second separator chamber within the housing, the second separator chamber including walls of a porous material defining a space open to the outlet and disposed about the first separator chamber through which at least some liquid flows to the outlet.		

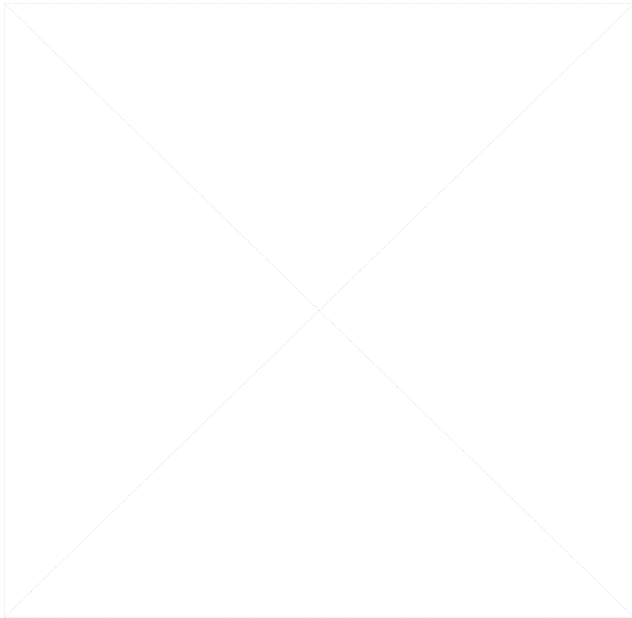
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	MANUFACTURING IN MICROGRAVITY AND VARYING EXTERNAL FORCE ENVIRONMENTS		
출원인	MADE IN SPACE, INC.	출원국가	US
특허번호	15/021360	출원일	2014-08-08
기술분야	성형기술	법적상태	공개
패밀리 특허	RU 2016116901, EP 3238916, US 9802355, JP 2017-528347, EP 3194169, US 9656426, EP 3147106, RU 0002611533, JP 2016-539833, US 2016-0333486, US 2016-0243759, EP 3027389, US 2016-0101463, US 2016-0082652, US 2016-0082664, US 2016-0082665, WO 2016-044837, CA 2962090, US 2015-0231826		
기술요약	Additive manufacturing devices operable in various external force environments are disclosed. In an aspect, an additive manufacturing device operable in microgravity is disclosed. In other aspects, devices which are operable in high-vibration environments or varying external force environments are disclosed. Additive manufacturing devices herein may produce parts from metal, polymer, or other feedstocks.		
대표도면			
대표 청구항	1. An additive manufacturing device 100 operable in a microgravity environment to create a part, the additive manufacturing device comprising: a feedstock source 106 comprising feedstock; a material bonding component 104, the material bonding component 104 configured to receive portions of the feedstock from the feedstock source 106, the material bonding component 104 positioning and bonding each of the portions of the received feedstock according to part creation instructions; a material bonding component positioning system 102 configured to position the material bonding component 104 according to the part creation instructions; and a build volume, the part being created within the build volume according to the part creation instructions.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Liquid reservoir for microgravity system		
출원인	SpacePharma SA	출원국가	US
특허번호	9808805	출원일	2015-09-08
기술분야	실험기구	법적상태	등록
패밀리 특허	WO 2017-042810, US 2017-0065975		
기술요약	A liquid reservoir for use in a microgravity environment includes a bladder for holding a liquid. The bladder includes flexible walls and an opening for extraction of the liquid from the bladder. An internal structure is shaped so as to form a channel to conduct the liquid from an end of the bladder that is distal to the opening. The internal structure is configured to prevent the walls of the bladder from blocking the channel when suction is applied to the opening.		
대표도면			
대표 청구항	1. A liquid reservoir for use in a microgravity environment, the reservoir comprising: a bladder for holding a liquid, the bladder including flexible walls and an opening for extraction of the liquid from the bladder; and a central internal tubular structure that is shaped so as to form at least one channel to conduct the liquid from an end of the bladder that is distal to the opening, wherein the central internal tubular structure is sufficiently rigid to prevent the walls of the bladder from blocking said at least one channel when suction is applied to the opening, and wherein the flexible walls of the bladder are away from the central internal tubular structure when the bladder is filled and come in contact with the central internal tubular structure when at least partially collapsed, and wherein the bladder further comprises an additional opening at an end thereof that is distal to the opening.		

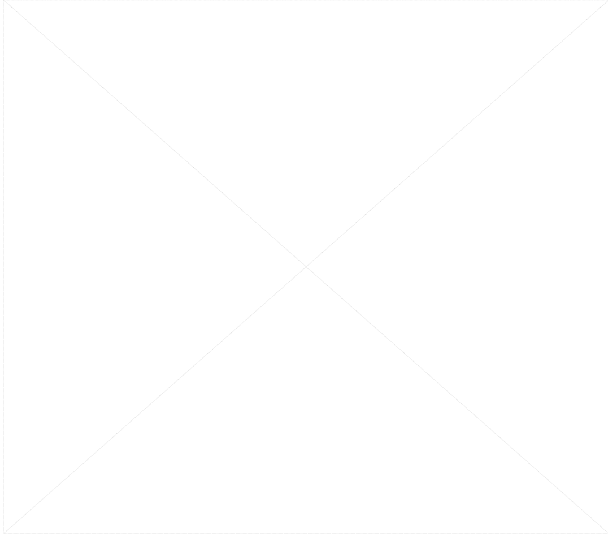
서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Metal Casting Methods in Microgravity and Other Environments		
출원인	MADE IN SPACE, INC.	출원국가	US
특허번호	14/555234	출원일	2014-11-26
기술분야	특수주조	법적상태	공개
패밀리 특허	RU 2016116901, EP 3238916, US 9802355, JP 2017-528347, EP 3194169, US 9656426, EP 3147106, RU 0002611533, JP 2016-539833, US 2016-0333486, US 2016-0243759, EP 3027389, US 2016-0101463, US 2016-0082652, US 2016-0082664, US 2016-0082665, WO 2016-044837, CA 2962090, US 2015-0231826		
기술요약	Apparatus and methods for creating cast metal objects in space and other environments. Molds are created using additive manufacturing and are injected with a castable metal having a melting point lower than a mold melting point. In some aspects, the additive manufacturing device and the metal casting unit are contained in the same unit.		
대표도면			
대표 청구항	1. A casting apparatus operable in a microgravity environment, configured to cast objects using a mold created by an additive manufacturing device, the casting apparatus comprising: an additive manufacturing device comprising an additive manufacturing device feedstock source providing feedstock to the additive manufacturing device for making the mold; and a casting formation unit comprising: an enclosure; an injector configured to inject a castable material into the mold; a castable material source supplying the castable material to the injector; and a mold retaining device configured to retain the mold and position the mold in fluidic contact with the injector; wherein the enclosure is configured to prevent contamination of an outside environment by the castable material and the feedstock.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Gravity control device		
출원인	SPACE BIO-LABORATORIES CO., LTD. / IXS RESEARCH CORPORATION	출원국가	US
특허번호	9494949	출원일	2014-06-13
기술분야	자이로스코프	법적상태	등록
패밀리 특허	EP 3009499, JP 6230097, US 9494949, EP 3009499, US 2016-0103454, CN 105283537, JP 2015-000008, CA 2912843, WO 2014-200084		
기술요약	The gravity control apparatus (1) comprises: a first rotating body (10) that rotates along a first shaft (11a) as a result of being driven by a first driving device; a second rotating body (20) that rotates along a second shaft that is orthogonal to the first shaft (11a) within the region of rotation of the first rotating body (10) as a result of being driven by a second driving device; an accelerometer (40) that is set at any position on the second rotating body (20) and detects acceleration; and a control device (50) that controls driving by the first driving device and the second driving device. The control device (50) controls driving by the first driving device and the second driving device on the basis of acceleration data detected by the accelerometer (40).		
대표도면			
대표 청구항	1. A gravity control apparatus, comprising: a first rotating body that rotates along a first axis as a result of being driven by a first driving device; a second rotating body that rotates along a second axis orthogonal to the first axis, within an inside region of the first rotating body, as a result of being driven by a second driving device; an accelerometer that is positioned at any position on the second rotating body and detects acceleration; and a control device that controls driving of the first driving device and the second driving device; wherein the control device calculates an acceleration vector from Equation 1 below and controls driving of the first driving device and the second driving device on the basis of acceleration data detected by the accelerometer so that the integral of the acceleration vector over a prescribed time becomes a prescribed value:[Equation 1] $A = g + r\omega^2 \text{ (Equation 1)}$ where A, g, r, and ω respectively represent an acceleration vector at an arbitrary point P in the second rotating body, a gravitational acceleration vector at the point P, a distance vector from a point of intersection of the first axis and the second axis to the point P, and an angular velocity vector at the point P.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Satellite testbed for evaluating cryogenic-liquid behavior in microgravity		
출원인	SIERRA LOBO, INC.	출원국가	US
특허번호	9651569	출원일	2014-06-17
기술분야	분석기기	법적상태	등록
패밀리 특허	-		
기술요약	Provided is a testbed for conducting an experiment on a substance in a cryogenic liquid state in a microgravity environment. The testbed includes a frame with rectangular nominal dimensions, and a source section including a supply of the substance to be evaluated in the cryogenic liquid state. An experiment section includes an experiment vessel in fluid communication with the storage section to receive the substance from the storage section and condense the substance into the cryogenic liquid state. A sensor is adapted to sense a property of the substance in the cryogenic liquid state in the experiment vessel as part of the experiment. A bus section includes a controller configured to control delivery of the substance from the storage section to the experiment vessel, and receive property data indicative of the property sensed by the sensor for subsequent evaluation on Earth.		
대표도면			
대표 청구항	1. A testbed for conducting an experiment in a microgravity environment on a substance in a cryogenic liquid state, the testbed comprising: a frame having a rectangular shape and comprising a source section, an experiment section and a bus section; the source section comprising a supply of the substance to be evaluated in the cryogenic liquid state; the experiment section comprising an experiment vessel in fluid communication with the source section to receive the substance from the source section and condense the substance into the cryogenic liquid state; a sensor adapted to sense a property of the substance in the cryogenic liquid state in the experiment vessel as part of the experiment; and the bus section comprising a controller configured to control delivery of the substance from the storage section to the experiment vessel, and to receive property data indicative of the property sensed by the sensor for subsequent evaluation on Earth.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	COMBUSTION EXPERIMENT DEVICE		
출원인	Tohoku University / IHI Corporation	출원국가	US
특허번호	15/346962	출원일	2016-11-09
기술분야	재료 조사 및 분석	법적상태	공개
패밀리 특허	JP 6288844, KR 10-1827958, EP 3144667, US 2017-0052134, KR 10-2016-0116347, JP 2015-215315, WO 2015-174459		
기술요약	Provided is a combustion experiment device, which includes a reaction tube into which a sample fluid flows and to which a temperature gradient in which a temperature rises toward a downstream side is imparted, and a burner part that is configured to flow a combustible gas along and around the reaction tube from the downstream side to an upstream side of the reaction tube and to maintain a flame surrounding the reaction tube from the outside in a radial direction of the reaction tube.		
대표도면			
대표 청구항	1. A combustion experiment device comprising: a reaction tube into which a sample fluid flows and to which a temperature gradient in which a temperature rises toward a downstream side is imparted; and a burner part configured to flow a combustible gas along and around the reaction tube from the downstream side to an upstream side of the reaction tube and to maintain a flame surrounding the reaction tube from an outside of the reaction tube in a radial direction.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Replication of undifferentiated cells in a weightless environment, uses thereof and a facility for such replication and the acceleration of the evolution of plants and animals		
출원인	ZERO GRAVITY SOLUTIONS, INC.	출원국가	US
특허번호	9816071	출원일	2011-07-14
기술분야	유전자 공학	법적상태	등록
패밀리 특허	US 2018-0094237, US 2009-0328242, WO 2009-137135		
기술요약	The present invention provides manufacturing processes for biological replication of undifferentiated plant and animal cells and tissue in a weightless condition, including those systems used in current stem cell research and development and use of undifferentiated parenchyma in plants. The present invention further provides methods for adapting plants and animals to survive outside their native environments. In particular, undifferentiated cells from plants or animals are replicated under weightless conditions in which cell replication or proliferation is accelerated and sustained. Under such conditions, the undifferentiated cells can be “forced” to express sets of genes useful for survival in particular environmental conditions. In this manner, cells surviving prolonged exposure to specific environmental conditions can be selected for and cultivated to produce an organism adapted to that particular environment in an accelerated manner. Methods of identifying specific genes associated with adaptation of a plant or animal to a specific environment are also disclosed.		
대표도면			
대표 청구항	1. A method of adapting a citrus plant to grow in a cold environment, the method comprising: providing replicating citrus parenchyma cells to produce a cell suspension culture comprising a plurality of undifferentiated citrus parenchyma cells; culturing the cell suspension culture comprising the plurality of undifferentiated citrus parenchyma cells while simultaneously exposing the cell culture to both a microgravity condition and a cold environment to which the citrus plant is to be adapted; harvesting citrus cells that replicate during the step of culturing, wherein the culturing simultaneously exposes the cell suspension culture to both the microgravity condition and the cold environment, to cause the plurality of undifferentiated citrus parenchyma cells to express genes that enable the harvested cells to adapt to the cold environment; and sequentially removing the harvested citrus cells from the microgravity condition, and cultivating the harvested cells to produce a mature citrus plant; wherein the cold environment is a temperature of about 25° F. or less.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	APPARATUS AND METHOD OF STIMULATING CELLS USING 3D CLINOSTAT AND ULTRASONIC WAVE		
출원인	YONSEI UNIVERSITY WONJU INDUSTRY-ACADEMIC COOPERATION FOUNDATION	출원국가	US
특허번호	14/892520	출원일	2014-02-13
기술분야	미생물 및 효소처리	법적상태	공개
패밀리 특허	CN 105339504, US 2016-0115437, KR 10-1470159, WO 2014-189196		
기술요약	Provided is an apparatus for stimulating cells using a 3D clinostat and ultrasonic waves in experiment equipment for studying adverse influences on a human body under microgravity and taking a countermeasure against the influences. Further, provided is a method of stimulating cells using a 3D clinostat and ultrasonic waves to study adverse influences on a human body under microgravity and to take a countermeasure against the influences.		
대표도면			
대표 청구항	1. An apparatus for stimulating cells using a 3D clinostat and ultrasonic waves in experiment equipment for studying adverse influences on a human body under microgravity and taking a countermeasure against the influences, the apparatus comprising: a base plate; supports each having a first end coupled to a side on the top of the base plate; an outer frame formed by four members coupled in a rectangle and rotating about an axis between the two supports spaced at a predetermined distance from each other; an inner frame formed by four members coupled in a rectangle, disposed inside the outer frame, and rotating about an axis perpendicular to the rotational direction of the outer frame; a cultivating plate fixed inside the inner frame to cultivate cells; a first motor unit disposed on the base plate or one of the supports and connected to the outer frame to transmit torque; a second motor unit disposed on the outer side of the outer frame and connected to the inner frame to transmit torque; a controller electrically connected to the first motor unit and the second motor unit to control the first motor unit and the second motor unit; an output unit fixing member fixed to the inner frame at a predetermined distance from the top of the cultivating plate and having a longitudinally oblong fixing hole; an ultrasonic wave output unit disposed at a side in the oblong fixing hole of the output unit fixing member; and an ultrasonic device connected to the ultrasonic wave output unit and stimulating cells on the cultivating plate.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	3D biomimetic platform		
출원인	The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration	출원국가	US
특허번호	9557322	출원일	2014-06-26
기술분야	유전자 공학	법적상태	등록
패밀리 특허	-		
기술요약	An apparatus and method that utilizes a radiation source and a simulated microgravity to provide combined stressors. The response of cells/bacteria/viruses and/or other living matter to the combined stressors can be evaluated to predict the effects of extended space missions. The apparatus and method can also be utilized to study diseases and to develop new treatments and vaccinations.		
대표도면			
대표 청구항	1. An assembly for identifying combined effects of microgravity and radiation, the assembly comprising: a bioreactor comprising a rotating wall vessel configured to simulate reduced gravity in a test space therein; and a gamma radiation source configured to provide steady gamma radiation, wherein a specimen disposed in the test space is exposed to the gamma radiation, the specimen including at least one of: cells, bacteria and viruses.		

□ 결론 및 시사점

[표 9] 무중력/고중력 기술동향 시사점

ISS	기기 및 장치	재료 및 신소재	모사시설 및 인프라	생명현상
■ 우주정거장의 모듈 구성 및 도킹 메카니즘 ■ 우주실험 모듈 및 기타 부속 장치 기술	■ 무중력 챔버, 다양한 중력 환경에서의 부속 장치 ■ 무중력/고중력 환경에서의 제조공정	■ 금속 주조기술	■ 중력 제어장치 ■ 자유낙하탑, 연소실험 장치 등	■ 무중력 환경에서의 세포 분화, 세포 자극 등 ■ 무중력, 방사선 환경에 대한 생물체 변화
✕ ■ 우주정거장 선도 국가 및 기업이 원천기술 보유 (실증 용이)	✕ ■ 우주 환경 접근 기기의 성능 개선 집중	✕ ■ 중력 환경에서 소재 제조를 통해 기존 공정 문제 해소	✕ ■ 종합적인 모사환경 구현 제한적(적용범위가 제한된 장치에 국한됨)	✕ ■ 무중력 환경 및 기타 복합 환경에 대한 변수 시험 ■ 응용분야가 특정되지 않은 기초연구 단계
→ 우주정거장 설계 및 제조분야 선행기술 다수 존재	→ 선행 기술이 다수 존재하는 분야임	→ 신물질 생성원리 연구 파급효과 높음	→ 중력환경 기술 선도를 위한 선결 연구과제	→ 의생물학적 관점 접근 필요성 높음

- ISS 및 우주실험 모듈과 관련된 기기 및 장치 관련 기술은 기존 우주 기술 선도국가 및 기업들의 선행기술이 다수 존재하고 있음
- 재료 및 신소재 기술의 경우 무중력환경의 특성 상 물질 구조 변화, 연소 특성 등 생성원리 규명을 통한 신물질 개발 기술 출현이 예상됨
- 지상기반 모사시설 및 인프라의 경우 중력 제어장치 및 levitator, clinostat 기술이 주류를 이루고 있으며, 중력 환경 기술 선도를 위한 선결 연구 분야인 것으로 판단됨
- 무중력 환경 응용 연구분야로는 생명현상 규명이 가장 활발히 이루어지고 있으며, 다양한 생체 변화 특성을 의생물학적 관점에서 접근하는 연구가 출현하고 있음

다. 극저온

☐ 출원동향

극저온			
이미징 및 분광 (1건)	초전도 및 자기장 (10건)	모사 및 실험장치 (5건)	기타 기기 및 장치 (4건)
■ US 8487623	■ US 8937255 ■ US 8626253 ■ EP 2699925 ■ US 8639305 ■ US 9144393 ■ EP 2014-805668 ■ US 15/503214 ■ US 15/508945 ■ US 9543066 ■ US 15/178083	■ US 8558485 ■ US 13/824915 ■ EP 2619901 ■ US 8433380 ■ EP 2014-740168	■ US 9091463 ■ US 9568223 ■ US 15/448284 ■ US 15/592889

- 극저온 분야 세부기술은 이미징 및 분광, 초전도 및 자기장, 모사 및 실험장치, 기타 기기 및 장치 분야로 분류함
- 전체 출원 건수는 20건으로 이미징 및 분광 1건, 초전도 및 자기장 10건, 모사 및 실험장치 5건, 기타 기기 및 장치 4건으로 조사됨



<연도별 세부기술 동향(극저온)>

- 초전도 현상 및 자성체와 관련된 기술의 출원이 가장 활발한 것으로 나타났으며, 극저온 환경을 구현하는 모사장치 또는 실험장치 기술도 출원 비중이 높은 것으로 나타남

□ 분석대상 기술 현황

- 분석대상 기술은 극저온 환경 및 관련 응용기술 중 연구기관 및 기업의 주요 연구주제에 해당하는 핵심기술을 선별함
- 주요 출원인은 California Institute of Technology, Callisto France, Ionetix Corporation, Secretary of the Air Force, Siemens PLC., University of Maryland, College Park 등이 있음

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
US8487623 Low field squid MRI devices, components and methods	EP2699925 SUPERCONDUCTING MAGNETS WITH THERMAL RADIATION SHIELDS				US9543066 Superconducting magnets with thermal radiation shields	US15/448284 LOW-NOISE, ULTRA-LOW TEMPERATURE DISSIPATIVE DEVICES
US8558485 Compact, cold, superconducting isochronous cyclotron						
EP2619901 CRYOGENIC LOW NOISE AMPLIFIER						
US9091463 Pulse tube refrigerator with tunable inertance tube						

[표 11] 분석 대상기술 목록

연번	소분류	출원번호 (출원일)	등록번호 (등록일)	발명의 명칭	출원인
1	이미징 및 분광	US13/090931 (2011.04.20.)	US8487623 (2013.07.16.)	Low field squid MRI devices, components and methods	California Institute of Technology
2	초전도 및 자기장	EP2012-71222 8 (2012.03.08.)	EP2699925 (2015.10.14.)	SUPERCONDUCTING MAGNETS WITH THERMAL RADIATION SHIELDS	Siemens PLC.
3		US15/042750 (2016.02.12.)	US9543066 (2017.01.10.)	Superconducting magnets with thermal radiation shields	Siemens PLC.
4	모사 및 실험장치	US13/178421 (2011.07.07.)	US8558485 (2013.10.15.)	Compact, cold, superconducting isochronous cyclotron	Ionetix Corporation
5		EP2011-76133 6 (2011.09.20.)	EP2619901 (2015.01.07.)	CRYOGENIC LOW NOISE AMPLIFIER	Callisto France
6	기타 기기 및 장치	US13/293100 (2011.11.09.)	US9091463 (2015.07.28.)	Pulse tube refrigerator with tunable inertance tube	Secretary of the Air Force
7		US15/448284 (2017.03.02.)	-	LOW-NOISE, ULTRA-LOW TEMPERATURE DISSIPATIVE DEVICES	University of Maryland, College Park

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Low field squid MRI devices, components and methods		
출원인	California Institute of Technology	출원국가	US
특허번호	8487623	출원일	2011-04-20
기술분야	자기적 탐광	법적상태	등록
패밀리 특허	US 8698498, US 8008914, JP 2010-530611, JP 2010-525892, US 7671587, EP 2145197, EP 2142090, US 2009-0322324, US 2009-0072828, WO 2009-023303, WO 2008-137485		
기술요약	Low field SQUID MRI devices, components and methods are disclosed. They include a portable low field (SQUID)-based MRI instrument and a portable low field SQUID-based MRI system to be operated under a bed where a subject is adapted to be located. Also disclosed is a method of distributing wires on an image encoding coil system adapted to be used with an NMR or MRI device for analyzing a sample or subject and a second order superconducting gradiometer adapted to be used with a low field SQUID-based MRI device as a sensing component for an MRI signal related to a subject or sample.		
대표도면			
대표 청구항	1. A portable low field superconducting quantum interference device (SQUID)-based magnetic resonance imaging (MRI) instrument, comprising: a sensing coil assembly to sense an MRI signal from a subject or sample; a SQUID to receive the MRI signal from the sensing coil assembly; a cryogenic cooler associated with the SQUID and a superconducting magnetic shield; an enclosure enclosing the sensing coil assembly, the SQUID, the superconducting magnetic shield and the cryogenic cooler; and a portable frame containing the enclosure and adapted to contain main field coils and field compensation coils.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	SUPERCONDUCTING MAGNETS WITH THERMAL RADIATION SHIELDS		
출원인	Siemens PLC.	출원국가	EP
특허번호	2699925	출원일	2012-03-08
기술분야	영구자석	법적상태	등록
패밀리 특허	KR 10-1812030, US 9543066, CN 103620436, US 9293253, JP 5855228, GB 002490189, GB 002490478, WO 2012-143172		
기술요약	A cylindrical superconducting magnet comprising a plurality of axially-aligned annular coils (10) of superconducting wire, arranged for cooling by thermal conduction through a cooled surface (15) in mechanical contact with the coils. The coils are provided with a thermal radiation shield (24) between their radially inner surface and their axis. The thermal radiation shield comprises a metal layer in thermal contact with the cooled surface.		
대표도면			
대표 청구항	A cylindrical superconducting magnet structure comprising a plurality of resin-impregnated axially-aligned annular coils of superconducting wire (10) and a tubular support structure (15) of greater diameter than the coils, the axially-aligned annular coils being bonded by their radially outer surfaces (12) to said tubular support structure (15) of greater diameter than the coils, and further comprising means for cooling to a cryogenic temperature connected to the tubular support structure, the coils being provided with a thermal radiation shield between their radially inner surface and their axis, characterised in that the thermal radiation shield comprises a cylinder of metal (24), mechanically joined to the tubular support structure at axial and circumferential intervals, and thermally linked (26; 32; 28) to the tubular support structure by structures having a low thermal resistance such that a thermal resistance between the cylinder of metal (24) and the tubular support structure (15) is less than each respective thermal resistance between each of the coils and the tubular support structure.		

서지사항	기술요지
------	------

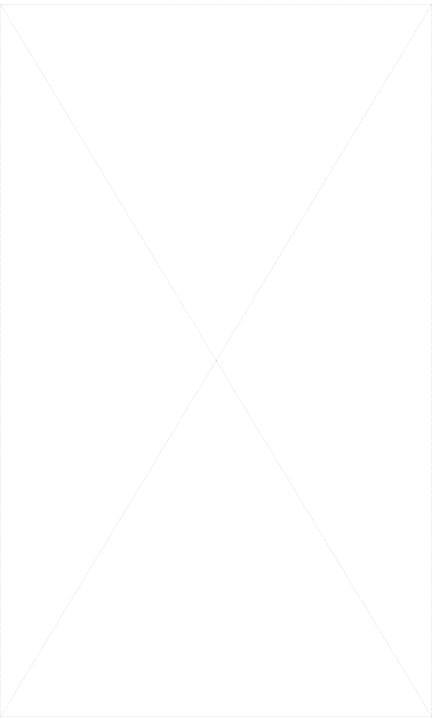
발명의 명칭	Superconducting magnets with thermal radiation shields		
출원인	Siemens PLC.	출원국가	US
특허번호	9543066	출원일	2016-02-12
기술분야	초전도 자석	법적상태	등록
패밀리 특허	KR 10-1812030, CN 103620436, US 9293253, JP 5855228, GB 002490189, GB 002490478		
기술요약	A cylindrical superconducting magnet has a number of axially-aligned annular coils of superconducting wire, arranged for cooling by thermal conduction through a cooled surface in mechanical contact with the coils. The coils are provided with a cryogenic radiation shield located between respective radially inner surfaces of the coils and respective axes of the coils. The cryogenic radiation shield is formed of a metal layer in thermal contact with the cooled surface.		
대표도면			
대표 청구항	1. A cylindrical superconducting magnet structure, comprising: a plurality of resin-impregnated, axially aligned annular coils of superconducting wire, each coil having an axis around which the coil is wound, and a radially outer surface and a radially inner surface; a tubular support structure at least partially surrounding the respective radially outer surfaces of said annular coils and having a larger diameter than said radially outer surfaces, each of said annular coils exhibiting a thermal resistance between the respective annular coil and the tubular support structure; a cooling arrangement in thermal communication with said tubular support structure that cools at least said tubular support structure to a cryogenic temperature; and a cryogenic radiation shield between the respective radially inner surfaces of the annular coil and the respective axes of the annular coils, said cryogenic radiation shield comprising a conformal layer of metal foil applied over the radially inner surface of each of said annular coils, and an electrically and thermally insulating layer interposed between each of said annular coils and said metal foil layer, and wherein said conformal layer of metal foil is also applied over axially facing surfaces of each of said annular coils, with said electrically and thermally insulating layer also interposed between each annular facing surface of each coil and said metal foil layer, with a thermal resistance between each metal foil layer and said tubular support structure being less than the thermal resistance between the respective annular coils and the tubular support structure.		

서지사항	기술요지
------	------

발명의 명칭	Compact, cold, superconducting isochronous cyclotron		
출원인	Ionetix Corporation	출원국가	US
특허번호	8558485	출원일	2011-07-07
기술분야	자기공진형 가속기	법적상태	등록
패밀리 특허	CA 2840080, TW I559822, CN 103766006, JP 6021232, EP 2730152, IN 00247/KOLNP/2014, WO 2013-006182		
기술요약	A compact, cold, superconducting isochronous cyclotron can include at least two superconducting coils on opposite sides of a median acceleration plane. A magnetic yoke surrounds the coils and a portion of a beam chamber in which ions are accelerated. A cryogenic refrigerator is thermally coupled both with the superconducting coils and with the magnetic yoke. The superconducting isochronous cyclotron also includes sector pole tips that provide strong focusing; the sector pole tips can have a spiral configuration and can be formed of a rare earth magnet. The sector pole tips can also be separated from the rest of the yoke by a non-magnetic material. In other embodiments, the sector pole tips can include a superconducting material. The spiral pole tips can also include cut-outs on a back side of the sector pole tips remote from the median acceleration plane.		
대표도면			
대표 청구항	1. A compact, cold, superconducting isochronous cyclotron comprising: at least two superconducting coils that are substantially symmetric about a central axis, wherein the coils are on opposite sides of a median acceleration plane, and wherein the coils have (a) outer surfaces remote from the central axis and (b) opposed median-acceleration-plane-facing surfaces; a magnetic yoke having an outer radius measured from the central axis no greater than 36 cm surrounding the coils and in physical contact with the coils across the outer surface of each coil and across the median-acceleration-plane-facing surface of each coil to substantially reduce or eliminate strain on the coils due to decentering forces and without an intervening cryostat between the magnetic yoke and the coils, wherein the magnetic yoke contains at least a portion of a beam chamber, wherein the median acceleration plane extends through the beam chamber, wherein the magnetic yoke includes a plurality of sector pole tips that form hills on each side of the median acceleration plane and valleys between the hills, where the hills		

	and valleys are positioned with a constant sector periodicity that produces an azimuthal variation in the magnetic field generated in the median acceleration plane, wherein the hills are radially separated across the median acceleration plane by a gap that is narrower than a gap that separates the valleys across the median acceleration plane, wherein the superconducting coils and the physically coupled magnetic yoke are configured to generate a radially increasing magnetic field that is at least 6 Tesla at an inner radius for ion introduction and that is at least 7 Tesla at an outer radius for ion extraction in the median acceleration plane when the superconducting coils and the magnetic yoke are cooled to a temperature no greater than 50K and when electric current is passed through the superconducting coils at the coils' critical current capacity, and wherein the azimuthal variation in the magnetic field produced by the hills and valleys provides a restoring force orthogonal to the median acceleration plane to counter an inherent instability of an ion accelerated by the radially increasing magnetic field; a cryogenic refrigerator physically and thermally coupled with the superconducting coils and with the magnetic yoke; and a cryostat mounted outside the magnetic yoke and containing the coils and the magnetic yoke inside a thermally insulated volume in which the coils and the magnetic yoke can be maintained at cryogenic temperatures by the cryogenic refrigerator.
--	---

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	CRYOGENIC LOW NOISE AMPLIFIER		
출원인	Callisto France	출원국가	EP
특허번호	2619901	출원일	2011-09-20
기술분야	증폭소자	법적상태	등록
패밀리 특허	AU 2011304354, EP 2619901, ZA 201302086, US 2013-0249628, FR 2965129, WO 2012-038400		
기술요약	A radiofrequency amplifier comprises a low noise amplifier (25) held in a hermetic enclosure (11) of a cryostat cooled by a cold head (30) and in which a mild vacuum is maintained. The low noise amplifier receives the signals from an input coupler (23) and transmits the signals through an output coupler (26). The input coupler (23) and output coupler (26) are embodied in respect of a structural part with a material of thermal conductivity equal to or lower than 50W/m.K and in respect of an electrically conducting part by a plating on at least one of the faces of said structural part of a material of electrical conductivity greater than 10E7 Siemens/m. The cold head (30) comprises at least two stages (302, 303) whose cold terminations (304, 305) are at different cryogenic temperatures, a terminal stage (305) operating at a temperature close to the temperature at which the low noise amplifier (25) must operate and at least one intermediate stage operating at an intermediate temperature.		

대표도면	
대표 청구항	Radiofrequency amplifier (10) for low power radiofrequency signal reception device including a low noise amplifier (25) maintained in a hermetically sealed space delimited by an envelope (11) of a cryostat in which space a reduced interior pressure is maintained compared to the external atmospheric pressure, said low noise amplifier receiving signals to be amplified from an input coupler (23) crossing the envelope (11) in a sealed manner, and transmitting the amplified signal through an output coupler (26) crossing the envelope (11) in a sealed manner, said space being cooled by a heat pumping cold head (30) inside the structure characterised in that in the radiofrequency amplifier (10): – The input (23) and output (26) couplers are made, for a structural part, from a material with thermal conductivity equal or less than to 50W/m.K, and for an electrically conductive part by a plating on said structural part made of a material with electrically conductivity higher than 10E7 Siemens/m.– The internal pressure in the envelope (11) of the cryostat, before its temperature is reduced, corresponds to a low grade or primary vacuum pressure of between atmospheric pressure and 10Pa.– The hermetic space delimited by the envelope (11) is filled with a silicon based nano-structured thermal insulation in the form of an aerogel.– The cold head (30) includes at least two stages (302, 303) whose cold terminations (304, 305) are at different cryogenic temperatures, a base stage (303) operating at a temperature close to the temperature at which the low noise amplifier (25) must operate and at least one intermediate stage (302) operating at a temperature between that of the base stage and ambient temperature, a cold termination (305 of the base stage (303) being thermally linked (315, 316) to the low noise amplifier (25) in order to implement heat pumping of said low noise amplifier and an intermediate cold termination (304) of the at least one intermediate stage (302) being thermally linked (314) to support structures (27) or to internal elements of the amplifiers (10) in order to achieve distributed heat pumping inside the envelope (11).

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Pulse tube refrigerator with tunable inertance tube		
출원인	The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force	출원국가	US
특허번호	9091463	출원일	2011-11-09
기술분야	압축식 기계장치	법적상태	등록
패밀리 특허	US 9784480		
기술요약	An inertance tube for a pulse tube refrigerator which can be tuned to optimize performance. Apertures in the inertance tube fluidly communicate the inertance tube with a fluid reservoir. The effective length of the inertance tube is changed by alternatively closing or opening the apertures. Changing the effective length of the inertance tube causes a phase shift between the mass flow and pressure waves in the working gas which, in turn, changes the acoustic power. Controlling the phase angle improves Carnot efficiency. The cooling load capacity of the pulse tube refrigerator is a function of the acoustic power.		
대표도면			
대표 청구항	1. A tunable pulse tube refrigerator for cryogenic cooling, comprising: a pulse tube having a cold end and a hot end, for containing a working fluid; a cold heat exchanger for accepting heat from an external heat source, being in fluid communication with the cold end; a hot heat exchanger for rejecting heat from the pulse tube refrigerator, being in fluid communication with the hot end; a pressure wave generator for generating pressure waves in the working fluid; an inertance tube and a fluid reservoir for causing a phase shift between pressure waves and mass flow in the working fluid, with the inertance tube having a proximal end for fluidly communicating with the hot heat exchanger and including an aperture being in a state comprised of either a closed state or an open state, with the open state being for fluidly communicating the inertance tube with the fluid reservoir; the inertance tube being coiled in a spiral around an axis; and a bypass mechanism comprised of a plurality of elongated curved tubes, which are also wound around the axis and are rotatable about the axis, for sliding over different sections of the inertance tube, respectively, when the curved tubes are rotated about the axis relative to the inertance tube, for changing the state of the aperture, whereby the inertance tube has an effective length which can be changed, to thereby change an inertance value which is a function of the effective length.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	LOW-NOISE, ULTRA-LOW TEMPERATURE DISSIPATIVE DEVICES		
출원인	University of Maryland, College Park / The United States of America as represented by the Director, National Security Agency	출원국가	US
특허번호	15/448284	출원일	2017-03-02
기술분야	회로망 부품	법적상태	공개
패밀리 특허	—		
기술요약	A dissipative device has a planar configuration with one or more resistor elements formed on an insulating substrate. Conductors are formed on the insulating substrate and are coupled to the resistor element(s) to transmit signals to/from the resistor element(s). The geometry of and materials for the dissipative device allow the conductors to act as heat sinks, which conduct heat generated in the resistor element(s) to the substrate (and on to a coupled housing) and cool hot electrons generated by the resistor element(s) via electron-phonon coupling. The dissipative device can be used in cooling a signal to a qubit, a cavity system of a quantum superconducting qubit, or any other cryogenic device sensitive to thermal noise.		
대표도면			
대표 청구항	1. A dissipative device comprising: a substrate; at least one resistor element in contact with the substrate, each resistor element having first and second ends in plan view and comprising a first material having a first electrical conductivity value; and at least two heat sinks in contact with the substrate, one of the heat sinks being coupled to the first end in plan view, another of the heat sinks being coupled to the second end in plan view, each heat sink comprising a second material having a second electrical conductivity value higher than the first electrical conductivity value, wherein the at least two heat sinks are constructed to conduct heat generated in the at least one resistor element to the substrate and to cool hot electrons generated by the at least one resistor element via electron-phonon coupling.		

□ 결론 및 시사점

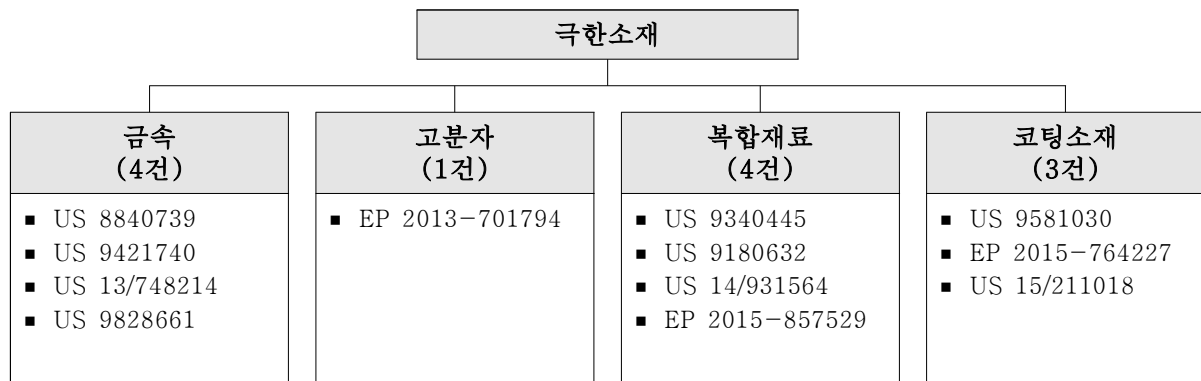
[표 12] 극저온 기술동향 시사점

이미징 및 분광	초전도 및 자기장	모사 및 실험장치	기타 기기 및 장치
■ 저자장 초전도 양자 간섭 소자 기반 MRI	■ 초전도 선재 구조 설계 ■ 초전도 자석의 열 복사 차단판	■ 초전도용 회전 가속기 ■ 밀폐공간의 극저온 저잡음 증폭기	■ 극저온 냉각 조정 장치 ■ 열전자를 냉각시키기 위한 소산성 장치
 ■ 초전도체 기반 영상 이미징 장치 기술이 출현하고 있음	 ■ 초전도체 설계 및 자기장 형성 구조에 관련된 기술	 ■ 극저온 연구 및 실험을 위한 인프라 기기 관련 기술	 ■ 극저온 환경을 구현하는 장치의 부속기기 관련 기술이 다수를 차지함
→ 산업분야 직접 활용이 용이한 응용분야	→ 초전도체 직접 연관 기술은 기술성숙도가 높음	→ 모사장치 또는 실험장치 성능 개선에 대한 요구도는 높음	→ 부속기기들에 대한 특히 포트폴리오가 강화되고 있음

- 극저온 분야 중 이미징 및 분광 기술은 뇌 자기신호 측정, MRI 등 의 료영상진단 산업분야에 직접적인 기술혁신을 주도할 수 있는 기술 출 현이 예상됨
- 초전도 및 자기장 분야는 초전도체 연관 장치의 설계 또는 모듈 구성 기술의 경우 이미 기술적 성숙도가 높은 수준에 이른 것으로 판단되 며, 이를 응용한 기술들의 출원이 다수를 차지함
- 모사장치 또는 실험장치 관련 기술은 연구분야의 확장에 따라 지속적 인 수요가 예상됨

라. 극한소재

☐ 출원동향



- 극한소재 분야 세부기술은 초고온, 초저온, 초고압, 초내식, 초고진공 등의 극한의 환경하에서 합성이 가능하거나 극한의 환경에 적용할 수 있는 금속, 세라믹, 고분자 복합재료 및 코팅 소재 분야로 분류함
- 전체 출원 건수는 12건으로 금속 4건, 고분자 1건, 복합재료 4건, 코팅 소재 4건으로 조사됨



<연도별 세부기술 동향(극한소재)>

- 합금 등 금속소재 관련 기술의 출원이 가장 활발한 것으로 나타났으며, 향후 복합재료 관련 기술 비중이 증가할 것으로 예상됨

□ 분석대상 기술 현황

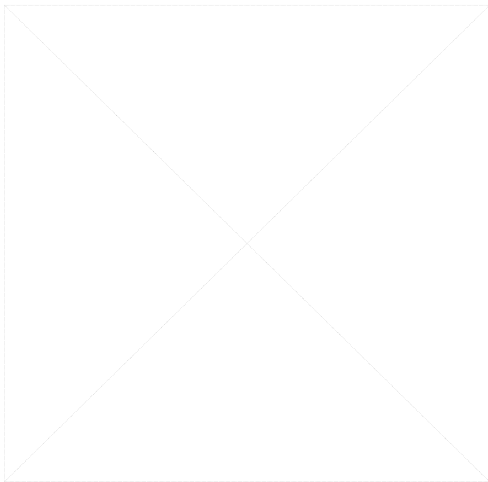
- 분석대상 기술은 극한소재 원료물질의 물성 개선 또는 제조방법 기술 중 ‘컬럼버스 프로젝트(가칭)’의 극한연구 로드맵과 연관성을 가지는 핵심 기술을 선별함
- 주요 출원인은 GM Global Technology Operations LLC, Korea Atomic Energy Research Institute, Cornerstone Research Group, Inc., Lockheed Martin Corporation 등이 있음

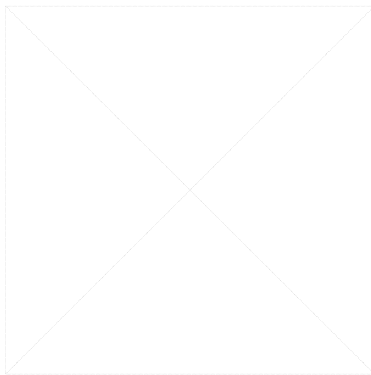
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
US8840739 Corrosion resistance of magnesium alloy article surfaces	US9421740 Zirconium alloy for improving resistance to oxidation at very high temperature and fabrication method thereof		US9180632 Composite self-healing system		US15/211018 Ultra High Temperature Environmental Protection Coating	

[표 14] 분석 대상기술 목록

연번	소분류	출원번호 (출원일)	등록번호 (등록일)	발명의 명칭	출원인
1	금속	US13/093028 (2011.04.25.)	US8840739 (2014.09.23.)	Corrosion resistance of magnesium alloy article surfaces	GM Global Technology Operations LLC
2		US13/670515 (2012.11.07.)	US9421740 (2016.08.23.)	Zirconium alloy for improving resistance to oxidation at very high temperature and fabrication method thereof	Korea Atomic Energy Research Institute / Korea Hydro and Nuclear Power Co., LTD.
3	복합재료	US14/198091 (2014.03.05.)	US9180632 (2015.11.10.)	Composite self-healing system	Cornerstone Research Group, Inc.
4	코팅소재	US15/211018 (2016.07.15.)	—	Ultra High Temperature Environmental Protection Coating	Lockheed Martin Corporation

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Corrosion resistance of magnesium alloy article surfaces		
출원인	GM Global Technology Operations LLC	출원국가	US
특허번호	8840739	출원일	2011-04-25
기술분야	비철금속 및 비철합금의 물리적구조	법적상태	등록
패밀리 특허	DE 10-2011-113228, CN 102400070		
기술요약	Surfaces of magnesium-base alloy workpieces may be mechanically worked and deformed to increase their resistance to corrosion, especially corrosion occurring in the presence of water or water and salt or other corrosive media. Workpiece surfaces that are to be thus protected are engaged in squeezing, sliding, and frictional contact with a suitable burnishing or other working tool that traverses the surface to compress and deform it and to refine the metallurgical grain structure. For example, the grain size is reduced in a surface layer that may extend to a depth of up to a few millimeters. And grain orientation is altered within that depth. The tool is not employed to intentionally remove material from the surface of the workpiece. The initial dimensioning of the workpiece may take into consideration the alteration of surfaces by the mechanical working process.		
대표도면			
대표 청구항	1. A method of producing a magnesium-based alloy surface layer on a surface of a magnesium alloy article to improve the resistance of the magnesium alloy surface to corrosion from contact with water, the method comprising: traversing the surface of the article to be protected with a surface of a tool, by movement of the tool or of the article, and applying cooling liquid at cryogenic temperature to the article surface as the article surface is being traversed by the tool, the tool surface being pressed against the cryogenically-cooled surface of the article in sliding frictional contact to compress and deform the surface layer, without cutting material from the surface layer, to a predetermined depth to change the metallurgical grain structure of the surface layer, the tool repeatedly traversing the cryogenically-cooled surface while progressively advancing into continued engagement with the cryogenically-cooled surface, the changed surface layer having greater resistance to corrosion than an untreated region of the magnesium-based alloy article.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Zirconium alloy for improving resistance to oxidation at very high temperature and fabrication method thereof		
출원인	Korea Atomic Energy Research Institute / Korea Hydro and Nuclear Power Co., LTD.	출원국가	US
특허번호	9421740	출원일	2012-11-07
기술분야	피복재료	법적상태	등록
패밀리 특허	FR 2990442, KR 10-1393327		
기술요약	A zirconium alloy for use in nuclear fuel assemblies is provided, which provides increased resistance against oxidation and corrosion and also improved bonding with parent material, because pure metallic material such as silicon (Si) or chromium (Cr) is evenly coated on the surface of the parent material by plasma spraying. Because the plasma spray coating used to coat the pure metallic material on the zirconium alloy does not require vacuum equipment and also is not limited due to the shape of the coated product, this is particularly useful when evenly treating the surface of the component such as 4 m-long tube or spacer grip arrangement which is very complicated in shape. Furthermore, because the coated zirconium alloy confers excellent resistance to oxidation and corrosion under emergency such as accident as well as normal service condition, both the economic and safety aspects of nuclear fuel are improved.		
대표도면			
대표 청구항	1. A method for fabricating a coated zirconium alloy article, the method comprising steps of: pre-treating a surface of a zirconium alloy parent material (step 1); providing a pure metallic material of silicon (Si) or chromium (Cr) in powder form (step 2); maintaining a distance between a plasma gun and the parent material at 10 cm and plasma spraying only the pure metallic material of Si or Cr on the surface of the pre-treated parent material of step 1 with the plasma gun (step 3) to form a coating layer on the pre-treated parent material; and thermally treating the coated parent material coated in step 3 in an inert atmosphere (step 4) to create a diffusion layer comprising zirconium and the pure metallic material of Si or Cr between the parent material and the coating layer, wherein the pure metallic material of Si or Cr is coated on the parent material to a thickness ranging between 20 μm and 500 μm to form the coating layer, and the thermal treatment of step 4 is performed at 350° C. for 4 hours.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Composite self-healing system		
출원인	Cornerstone Research Group, Inc.	출원국가	US
특허번호	9180632	출원일	2014-03-05
기술분야	성형품	법적상태	등록
패밀리 특허	EP 2148618, US 8062220, WO 2009-002586		
기술요약	An advanced reflexive structure system is disclosed. The reflexive system mimics the pain withdrawal reflex on which the human body relies. The reflexive system incorporates a continuous health and performance monitoring system via an embedded dielectric film, an adaptive composite structure based on shape memory composite material, and an intelligence system which will be interfaced with both the health/performance sensors and the adaptive structure. When activated shape memory polymer will recover its structural integrity via shape recovery and a reptation healing process. These features enable the use of SMP as an adaptive structure in the proposed reflexive system. The development of a reflexive system for structures will enable increased safety and security and demonstrate a better understanding of integrated performance systems. This reflexive technology could find immediate implementation on all current and future systems and future implementation on platforms such as the International Space Station, Lunar, and Martian habitats.		
대표도면			
대표 청구항	1. A self-healing system comprising: at least one composite panel formed from a cured product of stacked plies, the stacked plies comprising: a first ply of an adaptive structure comprising a shape memory polymer chosen from thermoset shape memory polymers and thermoplastic shape memory polymers;a second ply comprising an array of heater sections formed from a matrix of discrete heating elements, wherein each discrete heating element is configured to heat a region corresponding to a single heater section; anda third ply comprising a sensor grid array;a damage detecting system that sends a waveform to the sensor grid array and receives a response from the sensor grid array to produce a data set;a control system that analyzes the data set to determine at least one damage location of damage to the at least one composite panel, determines a target healing area based on the damage location, and selectively activates and deactivates individual heating elements of the matrix of discrete heating elements to cause localized heating in the target healing area that activates a combination of self-healing mechanisms in the adaptive structure, the combination of self-healing mechanisms comprising shape memory effect and reptation.		

서지사항	기술요지		
발명의 명칭	Ultra High Temperature Environmental Protection Coating		
출원인	Lockheed Martin Corporation	출원국가	US
특허번호	15/211018	출원일	2016-07-15
기술분야	방화 페인트	법적상태	공개
패밀리 특허	US 9581030		
기술요약	An environmental protective coating (“EPC”) for protecting a surface subjected to high temperature environments of more than 3000 degree F. The coating includes a dense platelet lamellar microstructure with a self-sealing, compliant binder material for holding the platelets together. The platelets may be formed from materials that are resistant to high temperatures and impermeable, such as ceramics. The lamellar microstructure creates a tortuous path for oxygen to reach the surface. The binder material includes engineered free internal volume, which increases the elastic strain of the EPC. The binder is softer than the platelets, which in combination with its free volume increases pliability of the EPC. The binder may have sufficient glass content and glass-forming content for initial and long-term sealing purposes.		
대표도면			
대표 청구항	1. A coating for protecting a surface comprising: heat resistant platelets arranged in layers on the surface;a compliant binder between the platelets and the surface; andelongate voids in the binder having a generally rectangular cross section so that the binder material is formed into axially spaced apart elongate layers connected by axial web members.		

□ 결론 및 시사점

[표 15] 극한소재 기술동향 시사점

금속	고분자	복합재료	코팅소재
■ 마그네슘 합금 제조 및 물성 개선 ■ 지르코늄, 니켈계 초내열성 합금 제조 및 혼합물 등	■ 우주 발사체 적용을 위한 수지 및 보강재	■ 광섬유 제조 환경 통제 ■ 우주정거장 등의 자가복구 소재	■ 초고온 환경 보호 필름 ■ 고체 윤활 코팅 조성물 등
✕ ■ 극한환경에서의 합금 제조, 극한환경에 적용을 위한 합금 제조 분야로 구분됨	✕	✕ ■ 다양한 극한 환경에 대한 소재 최적화 연구	✕ ■ 극한 환경에서의 소재 보호 및 방호를 위한 코팅 기술 연구 주도
→ 항공, 무기 관련 응용범위 확장	→ 극초음속 응용분야의 핵심 소재	→ 소재 혁신 가능성이 높음	→ 기존 소재에 응용 가능성이 높음

- 극한소재 분야 중 금속, 세라믹, 초저온용 고분자 소재의 경우 사회적 요구도가 높으며, 실용화 단계로 연계가 용이하다고 할 수 있음
- 이에 따라 마그네슘, 지르코늄, 니켈 등 합금 분야의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있음
- 특히 고분자 및 세라믹 소재의 경우 극초음속 응용분야의 핵심 소재로 원천기술 확보의 필요성이 높는데 비해 아직 핵심 특허들이 도출되지 않은 상태로 이 분야의 핵심특허를 도출할 경우 세계적으로 경쟁력있는 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 기대됨
- 초고온 세라믹스 코팅과 같이 초고온 세라믹스 기지상에 적용하여 극초음속 체계에서의 내구성을 향상시키는 연구의 확장 가능성이 높을 것으로 판단되며, 현재까지 경쟁이 예상되는 선행기술은 출현하지 않은 것으로 분석됨
- 복합소재는 다양한 극한 환경에서 요구되는 소재 특성을 최적화하기 위한 연구가 주류를 이루고 있으며, 자가복구 소재와 같은 기술 혁신 가능성이 높음
- 코팅 소재의 경우 기존 소재에 적용 등 활용 가능성이 높으며, 상대적으로 진입장벽이 낮은 것으로 판단됨

Ⅲ. 결론 및 시사점

1. 결론 및 시사점

- 본 특허분석에서는 극한 연구분야를 초고온/초고압, 무중력/고중력, 극저온, 극한소재 분야로 구분하고 2011년 이후의 극한분야 특허 검색 및 분석을 진행하였음. 그 결과 관련 분야의 특허는 지속적으로 출원되고 있으나, 급격한 변화나 증가는 나타나고 있지 않음
- 세부기술 분야별 핵심특허 검토 결과, 극한 환경에서의 새로운 현상과 물질 발견과 같은 혁신적인 기술의 출현이 미미한 수준이며, 극한환경모사와 같은 기반 연구시설 및 장치기술이 출현하고 있는 단계임
 - 세부 연구가 활발히 진행되어 상용화에 근접한 기술수준에 도달한 분야에서는 특허출원·등록 및 제품화가 진행되고 있음
 - 그러나 새로운 발견이나 발명 단계에 진입은 아주 미미한 수준으로 원천연구 기반의 미비로 인해 관련 연구의 활성화가 제약되고 있는 것으로 판단됨
 - 또한 기술분야별 주요 출원인이 NASA, 미국 에너지부, 공군 등 국가기관 및 Lockheed Martin Corporation, AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS, Hamilton Sundstrand Space Systems International, Inc. 등 우주 항공 분야 글로벌 전문기업군에 한정되어 있다는 점에서 연구 확산 단계에 진입하지 않은 것으로 분석됨
- 따라서 극한연구 기술분야별 공통적으로 기초 원천연구를 추진할 수 있는 시설, 장비, 인프라와 관련된 기술의 우선적인 확보가 필요할 것으로 판단되며, 이러한 기반시설 구축 이후 관련 응용기술의 급격한 증가가 예상됨
- 최근 관심이 집중되고 있는 극한연구 분야를 중심으로 기초 원천기술 확보에 주력하는 한편, 국내 기술선점 가능성이 높고, 관련 연구 전문성을 확보하고 있는 전략 육성 기술분야를 선별하고 조기에 기술주도권을 확보할 필요성이 있을 것으로 판단됨

- 초고온/초고압 분야의 경우에는 극한 임계점 돌파, 무중력/고중력 분야는 생명현상 연구, 극저온 분야는 의생리학적 연구, 극한소재 분야는 신조성 발견과 같이 특정 출원인 및 국가에 의해 독점되지 않은 분야를 선점하기 위한 특허 전략 및 원천기술 확보가 필요함
 - 초고온/초고압 분야의 경우 기존의 극한환경 수준을 상회하는 환경 구현 기술 및 이를 통한 소재 물성 또는 구조 변화와 관련된 기술이 개발이 필요할 것으로 판단됨
 - 무중력/고중력 분야의 경우 ISS와 관련된 설계 및 부속기기는 이미 기술성숙도가 높으므로, 모사시설 구축과 생명현상 연구 분야의 기술 선점 가능성이 높을 것으로 판단됨
 - 극저온 기술분야는 이미지 및 분과학과 같은 초전도체 응용 기술분야의 연구가 향후 활발해 질것으로 예상됨
 - 극한소재는 극초음속 체계에 적용을 위한 신조성 고품위 세라믹 및 코팅계 신소재 개발을 위한 경쟁이 가속화될 것으로 판단됨
- 과학기술의 혁신이 산업계의 변혁에 미치는 영향을 고려할 때 극한 연구분야 기술 선점을 위한 선제적이고 집중적인 권리확보의 필요성이 있음