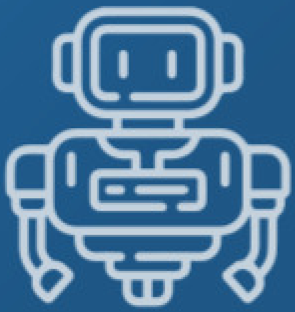
기술동향

우주 쓰레기 제거 기술

KISTEP 투자기획조정센터 문성록 · 최충현 · 한민규

KISTEP



Contents

제1장 개요 1

제2장 기술 동향 7

제3장 정책 동향 20

제4장 산업·R&D투자 동향 27

제5장 결론 33

제1장 개요

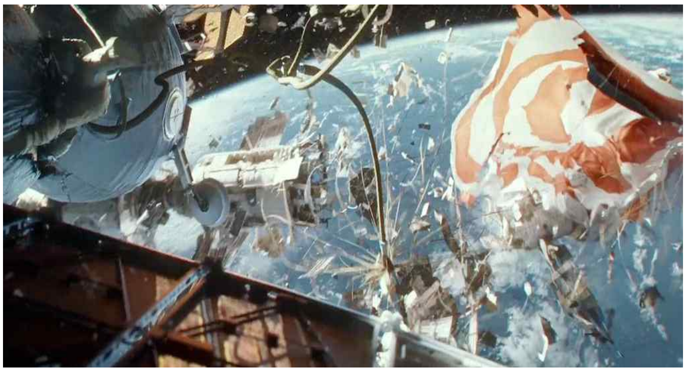
1.1. 작성 배경

- 美 NASA의 케슬러(Donald J. Kessler) 박사는 지구궤도 상의 우주 쓰레기*로 인해 인공위성이 연쇄적으로 파괴되는 '케슬러 증후군'을 주장하였고, 영화 그래비티를 통해 대중에게도 알려짐

  * 우주 쓰레기는 우주 공간 안에 잔류하고 있는 인류가 만든 인공적인 물체뿐만 아니라 인공적인 물체들의 충돌 등으로 발생되는 파편 등을 포함

  - 1978년 美 NASA의 케슬러 박사가 처음 주장한 '케슬러 증후군(Kessler Syndrome)'은 지구궤도 상의 우주 쓰레기 규모가 일정 수준에 이르게 되면 우주 쓰레기가 인공위성 등에 부딪히면서 파편이 기하급수적으로 늘어나 연쇄적 파괴가 발생한다는 개념의 이론

  - 케슬러 증후군이 현실화될 경우, 통신·관측·항법 등 인공위성을 활용한 지상 서비스가 모두 마비될 가능성이 있으며, 영화 그래비티(Gravity, 2013)에서는 러시아가 자국 인공위성을 미사일로 폭파하면서 발생한 우주 쓰레기로 인해 인공위성이 연쇄 충돌하는 상황을 묘사



[그림 1] 영화 그래비티(2013)에서 연출된 '케슬러 증후군'

- 인공위성이 우주 쓰레기와 충돌하는 사례는 현재도 발생하고 있으며, 국제우주정거장(ISS)은 우주 쓰레기와의 충돌을 피하기 위해 연평균 1회 이상 회피 기동을 실시

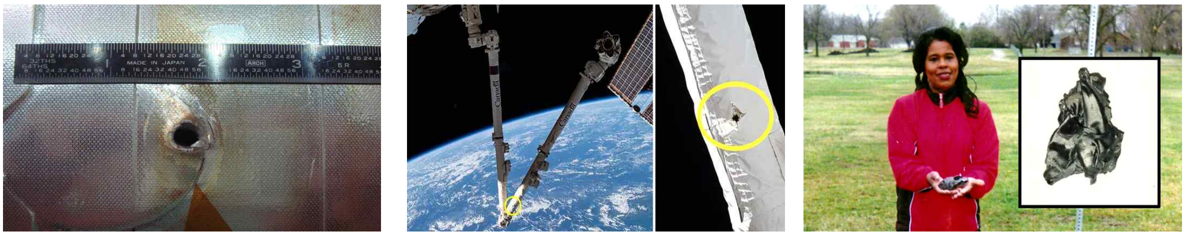
  - 아주 작은 우주 쓰레기와 인공위성 간의 충돌은 일상적으로 발생하며, 미국의 위성(이리듐 33)이 퇴역 후 궤도를 돌던 러시아의 위성(코스모스 2251)과 충돌하여 파괴된 피해 사례도 발생

- 저궤도(LEO) 상의 우주 쓰레기는 초속 7.9 ~ 11.2km로 지구 궤도를 돌고 있음에 따라 질량이 작은 우주 쓰레기도 높은 운동에너지를 갖고 있어 큰 충격량을 발생
- 추적이 가능한 우주 쓰레기는 직경 10cm 이상의 우주 쓰레기로 제한되어 있어 이보다 작은 크기의 우주 쓰레기와의 충돌은 피할 수 없으며, 원인 불명의 인공위성 고장 중 일부는 우주 쓰레기와의 충돌로 인한 것으로 추정

● 지구 궤도상의 인공위성은 우주 쓰레기와의 충돌 확률이 높아질 것이라 예측되면 회피 기동을 실시하며, 국제우주정거장(ISS)의 경우 지난 20여 년간 30차례의 회피 기동을 실시[1]하였음에도 불구하고 작은 우주 쓰레기와의 충돌로 발생한 손상이 확인됨(그림 2)

● 지구로 추락하는 우주 쓰레기에 의한 인명 피해 가능성은 극히* 낮으나, 자연적으로 추락하거나 제거를 위해 고의로 추락시키는 우주 쓰레기가 실제 인류가 있는 곳에 추락할 시 발생할 피해는 상당할 것으로 전망

* 우주 물체가 추락하여 사람이 맞을 확률은 1일 기준 1/10,000 ~ 1/270,000 수준으로서, 백 년 동안 전 세계에서 1명 정도 피해를 입을 것으로 추산[2]



'07년 우주왕복선 엔데버호의 라디에이터 패널에 발생한 직경 5.5 mm의 구멍[3]

'21년 5월 국제우주정거장 Robotic Canadarm2에 발생한 작은 구멍[4]

'97년 델타Ⅱ 로켓의 연료탱크 파편이 지상으로 낙하하여 미국 오클라호마주의 로티 윌리암스의 어깨를 타격[5]

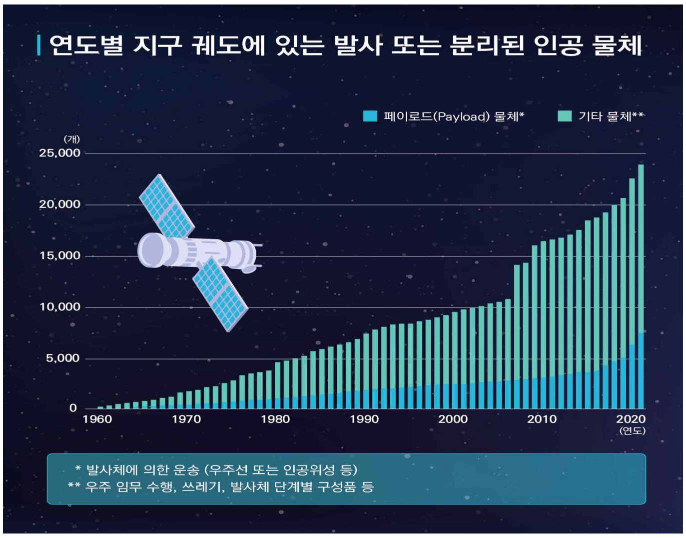
[그림 2] 우주 쓰레기와의 충돌 사례

우주 쓰레기의 수는 기하급수적으로 증가하고 있고 이에 대한 대응으로 회피 기동은 한계가 있어, 적극적인 우주 쓰레기 제거가 필요

● 로켓·인공위성의 파편으로 발생되는 우주 쓰레기는 로켓·인공위성 운용의 증가와 함께 빠르게 증가하고 있으며, 큰 충돌 한 번으로도 매우 많은 수의 우주 쓰레기가 발생(표1 참고)될 수 있어 우주 쓰레기 수의 증가는 더욱 가속화될 전망

---

1) 어린이조선일보, [오늘의 키워드] 회피 기동(2022.10.26.)
2) 우주환경감시기관, 인공위성 추락과 대응
3) 아시아경제, [과학을읽다]'최악의 시나리오' 6대 우주쓰레기는?(2023.02.20.)
4) Insider, A piece of space debris punched a tiny hole in the International Space Station, damaging a robotic arm(2021.06.02.)
5) Fox News, oman hit by space junk, lives to tell the tale(2011.10.21.)



[그림 3] 인공적인 우주 쓰레기 개수(1960~2020)

* 출처 : STATISTA 홈페이지 내 그림 재구성

〈표 1〉 대표적인 우주 쓰레기 발생 사례

연도	대표 사례	발생된 파편 개수
2021년	러시아 첩보 위성(Tselina-D) 자체 요격 실험	1,500개 이상
2019년	인도 군용관측 위성(Microsat-R) 자체 요격 실험	400개 이상
2009년	미국 통신 위성(Iridium-33)과 러시아 군사 위성(Cosmos-2251) 간 충돌	2,400개 이상
2007년	중국 기상위성(Fengyun-1C) 자체 요격 실험	3,500개 이상

※ 현재 기술로 지상에서 관측하여 궤도 추정이 가능한 지름 10cm 이상의 파편 개수이며, 이보다 작은 파편은 추적에 어려움이 있어 실질적으로 발생된 파편의 개수는 더 많을 것으로 예상

- 많은 연료를 소모시켜 위성의 수명을 단축시키는 회피 기동은 우주 쓰레기에 대한 지속 가능한 대응 방법이 아니며, 우주 쓰레기 제거 기술이 필요한 상황

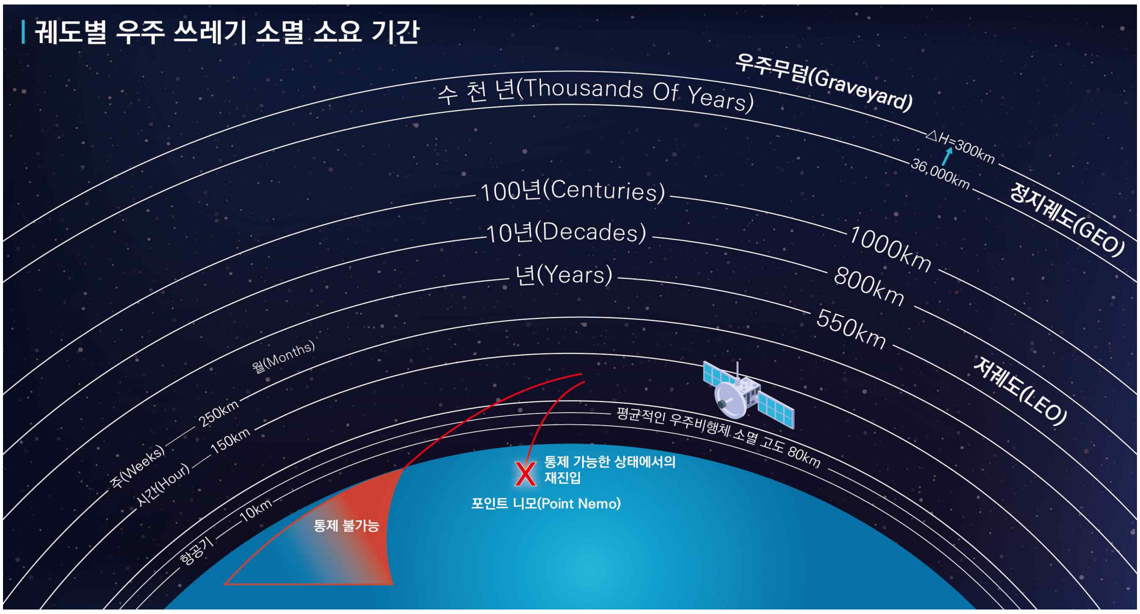
본 브리프에서는 지구 주위의 우주 쓰레기로 인한 피해를 경감하기 위해 필요한 시사점을 기술·정책 및 산업·R&D투자 동향 분석을 통하여 도출 및 제시하고자 함

- 우주 쓰레기와 관련하여 관측, 제거, 관리 등의 다양한 기술 중 본 브리프에서는 우주 쓰레기 '제거' 부문에 초점을 맞춤

1.2. 우주 쓰레기의 정의 및 제거 기술의 범위

우주 쓰레기(Space Debris)란 임무종료 또는 기능이 정지된 우주비행체와 관련된 부속품, 충돌·파열 등으로 생성되는 파편 등과 같이 지구 주위 궤도에 존재하는 버려진 모든 인공적인 우주물체를 의미[6]

- 일반적으로 우주 쓰레기는 중력으로 인해 지구 대기권으로 재진입하여 연소되지만, 궤도 별로 연소 과정까지 도달하기 위해 걸리는 시간은 수십 년에서 수십 세기에 이를 수 있음
  - UN에서 제시한 가이드라인에 따르면 고도 600km 이내의 우주 쓰레기는 장시간에 걸친 대기저항으로 인하여 자연적으로 대기권에서 폐기가 가능
  - 정지궤도(GEO)를 포함하여 고고도에 있는 우주 쓰레기는 장시간 동안 제거 되지 않고 궤도 내에서 유영하며 우주 활동에 피해를 주거나 추가적인 우주 쓰레기를 생성할 가능성이 존재



[그림 4] 궤도별 우주 쓰레기 제거에 걸리는 기간

* 출처 : United Launch Alliance 홈페이지 내 그림 재구성

- 이렇게 만들어진 우주 쓰레기는 인류의 지속적인 우주 진출과 지구 대기권 추락 및 우주공간 활동 시의 피해 등 다양한 위협이 존재하기 때문에 이를 경감하기 위한 제거 기술을 여러 국가에서 연구개발 중

---

6) 과학기술정보통신부, 우주쓰레기 경감을 위한 우주비행체 개발 및 운영 권고(2020)

현재 우주 쓰레기 제거 방식은 크게 임무 종료 후 자체적으로 폐기 기능을 수행하는 '임무 후 처리(PMD*)' 방식과 다양한 기술을 통해 우주 쓰레기를 직접 제거하는 '능동적 제거(ADR*)' 방식으로 분류

* Post-Mission Disposal(PMD) / Active Debris Removal(ADR)

- (임무 후 처리(PMD)) 일정 궤도 내에서 임무를 수행하고 있는 우주물체가 임무 종료 후 남은 연료나 기타 방법 등을 활용하여 사용 중인 궤도를 자체적으로 벗어나(Deorbit) 지구 대기권 내로 재진입(Re-Entry)하거나 우주무덤(Graveyard)으로 운반되는 방식
  - (궤도이탈(Deorbit)) 약 2,000km 미만의 저궤도(LEO)에 있는 우주물체가 임무 종료 후 남은 연료를 활용하거나 추진기관 활용 등으로 지구 대기권 내로 재진입(Re-Entry)하여 스스로 폐기(연소)되는 방법
  - (우주무덤(Graveyard)내 처리) 기존에 운영 중인 정지궤도(GEO) 대비 약 200 ~ 300km 정도를 높인 고도로 이동시켜 폐기하는 방법
  - (지구 내 처리) 우주선, 우주정거장, 인공위성 등 1톤 이상의 대형 우주 쓰레기는 남은 추력을 활용하여 사람이 없거나 접근하기 어려운 지역에 떨어뜨려 제거하는 방법
- (능동적 제거(ADR)) 임무 후 처리(PMD)가 되지 않았거나 추가적인 발사 또는 우주물체 간의 충돌, 자체적인 폭발 등으로 발생하게 된 우주 쓰레기를 직접 처리하기 위한 방식
  - (접근 기술) 우주 쓰레기와의 결합 여부에 따라, 우주 쓰레기와 결합하지 않고 인접한 위치까지 다가가는 랑데부(Rendezvous) 기술과 우주 쓰레기와 직접 결합하는 도킹(Docking) 기술로 분류
  - (제거 기술) 다양한 형태의 제거 아이디어를 기반으로 우주 쓰레기에 접촉(Contact) 또는 비접촉(Contact-less)하여 지구 대기권으로 재진입(Re-Entry)시키거나 우주무덤(Graveyard)로 운반하여 제거하는 방법

〈표 2〉 우주 쓰레기 제거 방식 및 기술 분류

방식명	제거 기술		
2.2 임무 후 처리(PMD)	2.2.1 궤도이탈(Deorbit)		
	2.2.2 우주무덤(Graveyard) 내 처리		
	2.2.3 지구 내 처리		
2.3 능동적 제거(ADR)	2.3.1 접근 기술		랑데부/도킹(Rendezvous/Docking)
	2.3.2 제거 기술	접촉식	그물(Net)
			작살(Harpoon)
			로봇 팔(Robot Arm)
			팔매질(Sling)
			자석(Magnetic)
			폐기용 부스터(Booster)
		비접촉식	레이저 빔(Laser Beam)
			거품(Foam)

제2장 기술 동향

2.1. 개요

추진기관을 이용해 궤도를 이탈하는 PMD 방식이 가장 보편적으로 활용되며, 항력증대나 밧줄활용 기술의 PMD도 시도되고 있고 외부에서 쓰레기를 제거하는 ADR 방식도 시도되고 있으나 아직까지 실증된 사례는 소수에 그침

- 우주 쓰레기를 경감하기 위해 국제 규약에 따라 PMD 방식을 위성에 탑재하도록 권고하고 있어 효율적인 PMD 방식을 개발하기 위한 연구가 진행
- 이미 발생된 우주 쓰레기의 제거를 위한 ADR 방식은 제거 방법에 따라 접촉식, 비접촉식으로 구분되며, 아직까지 주도권을 확보한 기술이 없고 다양한 ADR 방식의 연구가 진행 중

2.2. 임무 후 처리(PMD, Post-Mission Disposal)

〈표 3〉 임무 후 처리(PMD, Post-Mission Disposal) 기술 개요 및 특징

기술명		기술 개요 및 특징
궤도이탈 (Deorbit)	추진기관 활용 기술	• (개요) 임무가 종료 된 위성 등의 잔여 추진제를 활용하여 대기권 내로 고도를 낮추어 대기권의 마찰열에 의해 소각되도록 하는 기술 • (특징) 비교적 여유로운 추진제를 보유한 대형위성에서 활용하기 용이
	항력증대 기술	• (개요) 각종 기술을 활용하여 대기저항을 증가시켜 대기권에서 마찰열에 의해 소각되도록 하는 기술 - (돛) 펼쳐진 돛을 활용하여 물체의 대기저항을 증가 - (풍선) 풍선처럼 팽창하여 물체의 대기저항을 증가 - (체적 증대) 용수철처럼 길게 늘어난 후 인공위성의 체적을 증대 • (특징) 발생되는 항력이 추진기관의 힘보다 작기 때문에 대형위성보다는 소형 위성을 중심으로 활용
	밧줄 활용 기술	• (개요) 전도성 밧줄을 내려 지구 주변의 플라즈마 전자를 흐르게 한 후 물체의 진행 방향에 항력을 발생시켜 고도가 하강하면서 대기권의 마찰열에 의해 소각되는 기술 • (특징) 발생되는 항력이 추진기관의 힘보다 작기 때문에 대형위성보다는 소형 위성을 중심으로 활용
우주무덤(Graveyard) 내 처리		• (개요) 약 36,000km에서 운영되는 정지궤도(GEO) 위성을 폐기하기 위해 자체적으로 남은 연료를 활용하여 이동시키는 기술 • (특징) 지구 대기권까지 진입하기 어려운 정지궤도의 위성을 폐기하기 위한 유일한 선택지
지구 내 처리		• (개요) 대기권을 지나 지상·해상으로 추락시켜 처리하는 기술 • (특징) 완벽하게 소각이 어려운 1톤 이상의 중/대형 인공위성을 처리하는 기술로, 우주 쓰레기로 인한 피해를 최소화하기 위해 사막, 해양 등 인구가 적거나 없는 곳을 활용

2.2.1 궤도이탈(Deorbit)

- (추진기관 활용 기술) 최근 소형/초소형 인공위성에서도 추진기관 활용 기술의 PMD 방식을 적용하기 위해 시도 중
  - (UZURO, 대한민국) 초소형 인공위성에 화학 추진기관을 부착하여 위성의 고도를 조절함으로써 임무 종료 후 지구 대기권으로 진입시키는 궤도이탈 기술의 PMD 방식을 개발

- (항력증대 기술) 추진기관 활용 기술을 적용하기 어려운 소형위성에 활용하기 위해 많이 연구되고 있는 기술로, 우주 내에서도 여러 차례 실증 완료

※ 항력이란, 물체가 움직이는 방향과 반대 방향으로 작용하여 물체의 운동을 방해하는 힘으로써, 우주에서 대기 저항이 증대되면 물체의 고도가 낮아짐

- (돛(Sail)) 중국과 미국이 우주 내에서 전개에 성공하였으며, 중국에서 개발한 돛은 정상적으로 작동할 시 추후 대기권에서의 소각 과정까지 진행될 예정
  - (NASA, 미국) '10년에 NASA는 무게 4.5kg의 위성에 9.3m² 의 돛 'Nano Sail-D'를 부착하고 임무 종료 시 태양 돛을 전개하여 궤도를 이탈하는 기능을 우주에서 실증하여 성공적으로 전개[7]
  - (Surrey 대학, 유럽) '13년에 유럽우주기구(ESA*)는 Surrey 대학을 통하여 25m² 로 전개되고 700kg 위성까지 궤도이탈이 가능한 돛 'Gossamer Deorbit Sail'을 개발[8]

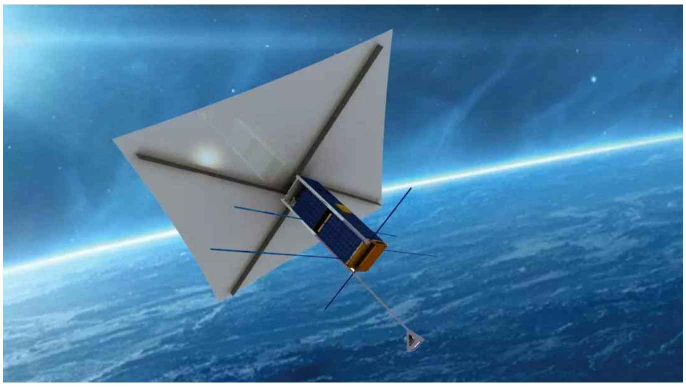
    * European Space Agency
  - (SAST*, 중국) '22년 6월에 2.25m² 의 돛(Sail)을 달아 제거하는 실험을 테스트하기 위해 Long March-2D Y64 운송 발사체의 캡슐에 장착하여 성공적으로 전개[9]

    ※ 제거 시스템이 정상적으로 운영될 시 300kg의 캡슐은 향후 25년 이내에 지구 대기권으로 재진입하여 제거될 예정

    * Shanghai Academy of Spacecraft Technology

---

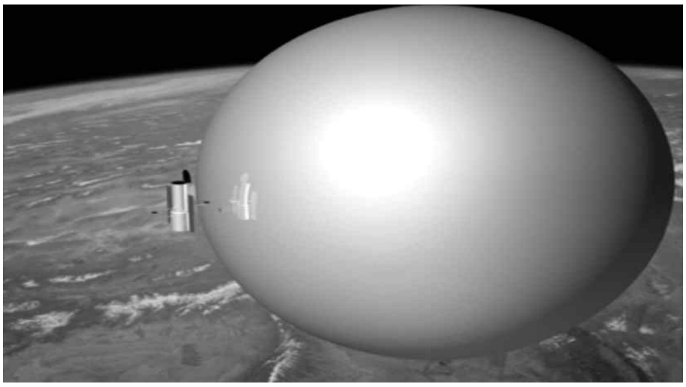
7) https://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html
8) Parabolic Arc, ESA Developing Solar Sail to Safely Deorbit Satellites(2013.12.26.)
9) Curiosmos, Chinese Spacecraft Unfolds Deorbit Sail(2022.07.06.)



[그림 5] 돛(Sail) 기술 개념도

* 출처 : Shanghai Academy of Spaceflight Technology 홈페이지

- (풍선(Balloon)) 미국에서 특허 출원한 기술이지만 실제 우주 내에서의 검증은 이루어지지 못한 기술
  - (Global Aerospace Corporation, 미국) ’01년 저궤도(LEO)에서 안전하고 효율적으로 우주 쓰레기를 제거하기 위해 풍선 기술을 이용한 PMD 방식의 GOSSAMER Orbit Lowering Device(GOLD)를 개발하여 특허 출원[10]하였으나 실제 우주 임무를 통한 검증은 미실시



[그림 6] 풍선(Balloon) 기술 개념도

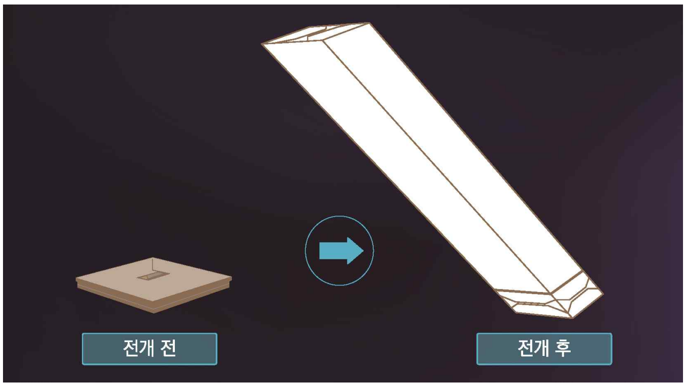
* 출처 : 최준민(2016), 우주 폐기물(쓰레기) 제거 방식에 대한 고찰

- (체적 증대(Volume Up)) 최근 국내 스타트업인 카이로스페이스社에서 시도하고 있는 기술로서, 우주 내에서의 실증을 위해 누리호 3차 발사 때 함께 실려 올라간 후 정상적으로 작동 중
  - (카이로스페이스, 대한민국) ’23년 5월 누리호 3차 발사에 ‘KSAT3U’를 탑재 후 성공적으로 분리하여 양방향 교신과 자세 제어 등 초기 운용 단계에 해당하며 향후 임무 후 처리(PMD) 방식을 시험할 예정[11]

---

10) United States Patent(No. US 6,830,222 B1), Balloon Device For Lowering Space Object Orbits (2004.12.14.)

11) 연합뉴스, 누리호 타고 간 위성들, 우주 초기 운용 '순항중'(2023.06.06.)



[그림 7] 체적 증가(Volume Up) 기술 개념도

* 출처 : 동아일보 사진 재구성

(밧줄 활용 기술) 탑재 장치가 소형이고 가벼워, 나노위성 및 초소형 위성 제거 기술로 활용하기 위한 개발을 진행 중

- 수백 m ~ 수십 km의 길이로 내려야하기 때문에 유영 중인 다른 우주 쓰레기에 의해 끊어질 가능성이 있어 아직까지 해결해야 할 부분 또한 존재
  - (Tether Unlimited, Inc., 미국) '20년 11월에 Dragracer 임무의 일환으로 Alchemy 위성에 밧줄을 이용한 PMD 방식을 우주 환경 내에서 실증에 성공했을 뿐만 아니라 해당 위성이 8개월 후인 '21년 7월에 대기권 재진입에도 성공[12)]
  - (ALE Co., JAXA, 일본) '21년에 JAXA는 ALE社와 공동으로 전기 역학적 방식의 밧줄(Tether)을 이용한 우주 쓰레기 제거 기술을 개발하기 위해 J-SPARC* 프로젝트를 진행[13)]

    * JAXA Space Innovation through Partnership and Co-creation
  - (Sener, 유럽) 유럽혁신위원회(EIC*)가 지원하며 향후 발사되는 위성에 밧줄 기술의 PMD 방식을 개발하기 위한 E.T.PACK-Fly 프로젝트를 '22년부터 수행 중이며 '25년에 실증 모델을 발사할 계획[14)]

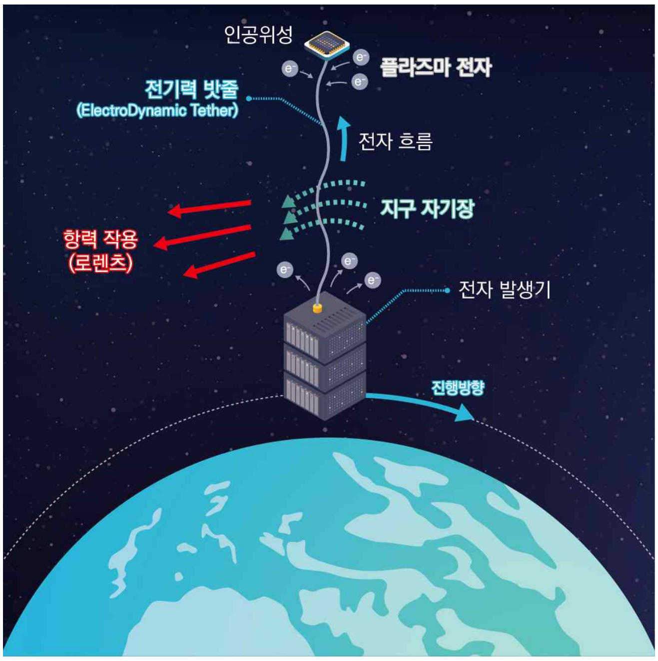
    * The European Innovation Council

---

12) Aviation Week Network, Dragracer Proves Tether De-Orbiting Capability(2021.08.23.)

13) JAXA, Joint Demonstration Of J-SPARC Initiated By ALE and JAXA, Aimed At The Commercialization Of Space Debris Prevention Device(2020.06.05.)

14) European Scientist, European Consortium Develops Way To Remove Space Debris(2022.05.17.)



[그림 8] 전자기 밧줄(Tether) 기술 개념도

* 출처 : JAXA 홈페이지 그림 재구성

2.2.2 우주무덤(Graveyard) 내 처리

우주무덤에 진입시키기 위해서는 위성이 작동 가능해야 하고 잔여 연료도 필요* 하나, 임무 종료 전에 고장 나는 경우가 잦아 실제로 우주무덤 진입에 성공**하는 위성은 소수에 불과하여 이를 보완하기 위한 기술이 개발 중[15]

* 우주무덤으로의 이동은 평균적으로 정지궤도(GEO)에서 3개월 간 운영할 분량이 소모됨

** 정지궤도(GEO)에서 우주무덤으로 폐기되는 성공률은 30% 수준

- 우주무덤으로 이동하지 못하고 고장 난 위성 등 정지궤도 내 우주 쓰레기를 우주무덤까지 이동시키는 방식의 ADR 위성의 개발이 진행 중
  - (중국) '21년 12월 우주 쓰레기 제거 실험을 위해 발사한 Shijian-21 위성을 이용하여 정지궤도(GEO)에 있지만 고장으로 사용이 불가능한 자체 위성항법시스템인 BeiDou를 우주무덤(Graveyard)로 이동시키는데 성공[16]
  - (Roscosmos, 러시아) 자체적으로 우주 쓰레기 제거를 위한 기술을 개발 중에 있으며, 핵 추진 예인선(Tug)을 개발하여 정지궤도(GEO)에 있는 우주 쓰레기를 '30년까지 제거하는 것을 목표로 설정[17]

15) ESA, Mitigation scenarios: Graveyard orbit 300 km above GEO(2008.04.10.)
16) 아시아경제, 中 '우주 쓰레기 청소' 성공에 美가 화들짝 놀란 이유[과학을 읽다](2022.02.18.)

2.2.3 지구 내 처리

포인트 니모*(Point Nemo)라고 불리는 남태평양을 주로 활용하며, 해당 지점은 인류와 생물이 적거나 없는 곳인 만큼 발생될 수 있는 피해에 대해 최소화 가능

* 포인트 니모는 '아무도 없다'라는 라틴어이자 정식명칭은 '해양도달불능점'으로서, 뉴질랜드에서 동쪽으로 약 3,000km 떨어진 남태평양에 위치

- '71년 이후 미국, 러시아, 일본, 기타 유럽 국가의 우주 쓰레기(263개 이상)가 포인트 니모 부근에 가라앉아 있으며[18], '31년에 퇴역하는 국제우주정거장(ISS) 또한 해당 지점에 추락시킬 예정이라고 발표[19]

[그림 9] 포인트 니모(Point Nemo)의 대략적인 위치

2.3. 능동적 제거(ADR, Active Debris Removal)

PMD 방식보다 기술적인 난이도가 높고 비용 측면에서 불리하나, PMD 방식의 기술이 장착 되어 있지 않거나 충돌 등으로 발생한 우주 쓰레기를 인위적으로 경감시킬 수 있는 유일한 방식

2.3.1 접근 기술

우주 내의 물체에 접근 또는 결합하는 기술로, 우주 쓰레기뿐만 아니라 우주정거장 등에 접근하는 데도 활용 가능

17) Spaceradar, 러시아, "우주쓰레기 처리용 핵 추진 예인선 개발 고려 중"(2023.04.16.)
18) 9News, NASA's hidden graveyard lurking at the bottom of the Pacific Ocean(2022.10.23.)
19) NASA, International Space Station Transition Report(2022.01)

- 무인 비행체간의 랑데부/도킹 기술은 매우 고난이도의 우주 핵심기술 중 하나로써 기술 개발이 진행되고는 있으나 아직까지 일부 국가에서만 성공한 상태

〈표 4〉 우주 쓰레기 접근 기술 개요

기술명		기술 개요
접근 기술	랑데부 (Rendez-vous)	• 대상 물체(Target Object)와의 거리가 100m ~ 수백 km 미만인 상태에서 우주공간 내에 두 물체가 접근하여 상대속도를 0으로 만드는 과정까지의 기술
	도킹(Docking)	• 대상 물체(Target Object)와 랑데부 상태에서 서서히 거리를 좁힌 후 우주 물체에 물리적으로 결합하여 연결되는 기술

- (NASDA, 일본) '97년 ETS(Engineering Test Satellite)-VII 프로젝트를 통해 우주에서 로봇 팔을 이용하여 가상의 물체와 실험용 인공위성 간에 무인 랑데부/도킹을 성공[20]
- (DARPA, 미국) '07년 Orbital Express 임무를 통해 단거리 및 장거리 랑데부/도킹을 포함한 궤도상 서비스와 관련된 기술 시연에 성공[21]

2.3.2 제거 기술

- 우주 쓰레기에 접촉(Contact) 또는 비접촉(Contact-less)하여 지구 대기권으로 재진입(Re-Entry)시키거나 우주무덤(Graveyard)로 운반하여 제거하는 기술로써 다양한 아이디어를 기반으로 기술 개발이 진행 중

〈표 5〉 ADR 방식 중 우주 쓰레기 제거 기술 및 특징

제거 방법	기술 명칭	개요 및 특징
접촉식	그물 (Net)	• (개요) 그물을 던져 포획한 후 지구 대기권에서 직접 소각되거나 우주무덤으로 보내는 기술 • (특징) - 여러 개의 그물로 1 대 多 방식 가능 - 물체의 형태, 자세, 회전율에 상관없이 복잡하지 않은 도킹 과정 - 견인 시 그물과 밧줄이 추력기의 열에 강한 물질을 사용할 필요
	작살 (Harpoon)	• (개요) 관통 능력을 이용하여 우주 쓰레기를 포획한 후 지구 대기권에서 소각되는 기술 • (특징) - 1 대 1 뿐만 아니라 1 대 多 방식으로도 확장 가능 - 물체의 형태, 자세, 회전율에 상관없이 복잡하지 않은 도킹 과정 - 견인 시 작살 또는 밧줄이 추력기의 열에 견딜 수 있는 물질을 사용할 필요 - 연료통이나 액체 탱크를 관통할 시 연료 누설에 따른 오염, 발화, 파편 등 발생 가능
	로봇 팔 (Robot Arm)	• (개요) 로봇 팔이나 갈고리 모양의 구조물을 이용하여 직접 우주 쓰레기를 포획한 후 지구 대기권에서 함께 소각되거나 포획한 우주 쓰레기를 대기권 또는 우주무덤으로 보내는 기술 • (특징) - 다수의 국가에서 연구개발 중에 있는 기술 - 높은 각속도로 회전하고 있는 물체의 경우 수거가 어려움

20) M. Oda 외, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite", proceedings of IEEE ingernational Conference on Robotics and Automation(1996)

21) R.B.Fiend, "Orbital Express program summary and mission overview", Proceedings of Sensors and Systems for Space Applications(2008)

제거 방법	기술 명칭	개요 및 특징
	팔매질 (Sling)	• (개요) 길게 확장되는 양팔에 바구니를 대칭으로 달고 한 쪽 바구니에 우주 쓰레기가 포획되면 회전(Swing)하면서 우주 쓰레기를 지구 대기권으로 보내 소각시키는 기술 • (특징) 이전에 포획한 물체의 운동에너지를 이용하여 다음 장소로 이동이 가능
	자석 (Magnetic)	• (개요) 청소위성에 강한 자성을 띄는 거대한 자석을 부착하여 우주 쓰레기를 수거 후 지구 대기권으로 보내거나 함께 소각하는 기술 • (특징) 비금속 형태의 페인트 조각 등을 제외한 대부분의 우주 쓰레기 성분이 금속인 만큼 기술 활용도가 높을 것으로 전망
	폐기용 부스터 (Booster)	• (개요) 자체 추력기가 없거나 고장으로 인해 사용이 불가능한 물체에 별도의 부스터를 외부에서 접근하여 부착 시킨 후 대기권에서 소각되는 기술 • (특징) 중/대형의 우주 쓰레기 제거 가능
비접촉식	**레이저 빔 (Laser Beam)**	• (개요) 높은 출력의 레이저를 우주 쓰레기에 조사하여 표면을 증발 시키면 그 반발력으로 인해 고도가 점차 감소하여 지구 대기권에서 소각시키는 기술 • (특징) - 미세한 우주 쓰레기도 제거(기화) 가능 - 고출력의 레이저를 사용하는 만큼 비용적인 측면에서 불리
	거품 (Foam)	• (개요) 폴리머(Polymetric) 타입의 거품을 거미줄 같이 분사하여 달라붙은 거품이 대기 저항 면적을 증가시켜 지구 대기권에서 소각되는 기술 • (특징) - 1 대 多 방식 가능 - 미세한 우주 쓰레기도 제거 가능
공통적인 단점		• 정확하게 포획하지 못할 경우 추가적인 우주 쓰레기 발생 가능 • 추후 우주 무기로도 전환하여 활용이 가능

● (그물(Net)) 유럽과 중국은 기술적으로 개발 및 실증까지 완료된 상황이며, 특히 중국은 최근 해당 기술로 정지궤도(GEO)에 있는 물체를 우주무덤(Graveyard)으로 이동시키는데 성공

- (Airbus, Thales Alenia Space, 유럽) '18년 RemoveDEBRIS* 임무를 통해 우주 쓰레기를 포획하기 위한 그물과 작살, 대기저항 및 근접센터인 4가지의 ADR 방식의 기술을 우주 시연에 성공[22)]

  * 우주 쓰레기 제거를 목표로 한 ADR 방식의 기술을 개발하기 위한 프로젝트

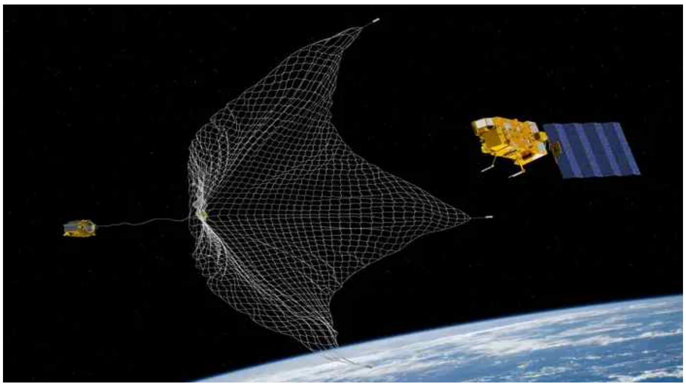
- (중국) '21년 12월 우주 쓰레기 제거 실험을 위해 발사한 Shijian-21 위성을 이용하여 정지궤도(GEO)에 있지만 고장으로 사용이 불가능한 자체 위성항법시스템(BeiDou)을 그물 기술로 포획 후 우주무덤(Graveyard)으로 이동시키는데 성공[23)]

- (한국과학기술원(KAIST), 과학기술정보통신부, 대한민국) 과학기술정보통신부는 한국과학기술원(KAIST) 인공위성연구소와 함께 우리별 1호를 찾아내 포획하기 위한 그물, 로봇 팔 등을 '27년까지 개발할 계획[24)]

  ※ 발사 일정은 '27년에 예정되어 있는 누리호 6차에 탑재할 계획

---

22) https://www.airbus.com/en/space/in-space-infrastructure/removedebris
23) 아시아경제, 中 '우주쓰레기 청소' 성공에 美가 화들짝 놀란 이유[과학을읽다](2022.02.18.)
24) 아시아경제, [단독]한국도 우주전쟁 무기 만든다(2023.01.06.)



[그림 10] 그물(Net) 기술 개념도

* 출처 : ESA 홈페이지

- (작살(Harpoon)) 유럽에서 우주 관련 연구기관으로 이루어진 컨소시엄을 통해 개발이 진행되었으며 우주 내에서 실증 또한 성공적으로 수행
  - (Airbus, Thales Alenia Space, 유럽) '18년 RemoveDEBRIS* 임무를 통해 우주 쓰레기를 포획하기 위한 작살과 그물, 대기저항 및 근접센터인 4가지의 ADR 기술을 우주 시연에 성공[25)]

[그림 11] 작살(Harpoon) 기술 개념도

* 출처 : ESA 홈페이지

- (로봇 팔(Robot Arm)) 국내외에서 활발하게 연구개발 중인 제거 기술로서 유럽(스위스)과 우리나라는 해당 기술을 통해 우주 쓰레기 제거를 시도할 계획

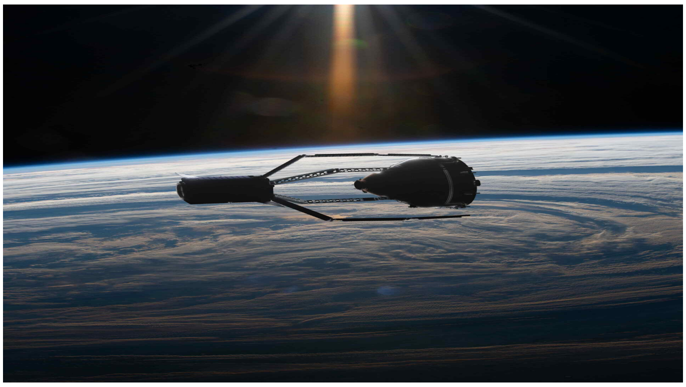
  ※ 우리나라는 '27년에 예정되어 있는 우리별 1호 포획을 위한 기술에 로봇 팔을 포함 (ADR 기술 중 그물(Net) 참고)

  - (Harbin Institute of Tech., 중국) '16년 중국 하얼빈 공대가 로봇 팔을 이용한 우주 쓰레기 제거 기술을 실증하기 위해 데모용 Aolong-1 위성을 발사[26)]
  - (항공우주연구원(KARI), 대한민국) '16년 로봇 팔 형태의 지상시험모델(KARICAT)를 개발하여 지상 환경에서의 모의 우주 쓰레기를 추적 후 포획하는 시험을 성공

25) https://www.airbus.com/en/space/in-space-infrastructure/removedebris
26) Spaceflight101, China's New Orbital Debris Clean-Up Satellite Raises Space Militarization Concerns(2016.06.29.)

- (ClaerSpace, 스위스) ESA와 계약하여 '25년까지 ClearSpace-1 위성을 발사한 후 664 ~ 801km 상공의 궤도를 돌고 있는 VESPA* 위성의 상단 로켓을 AI가 탑재된 카메라로 탐지하여 로봇 팔로 제거하는 임무를 수행할 예정27)

  * Vega Secondary Payload Adapter

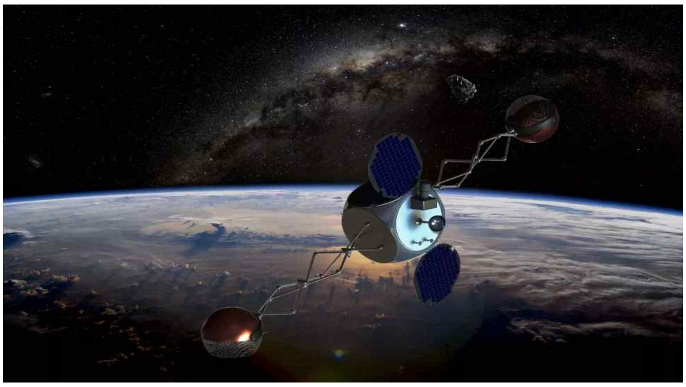


[그림 12] 로봇 팔(Robot Arm) 기술 개념도

* 출처 : ESA 홈페이지

● (팔매질(Sling)) 미국의 Texas A&M 대학교에서 관련 기술을 제안하고 연구를 진행하였으나 개발 성공여부는 확인이 어려움

- (Texas A&M 대학교, 미국) '13년에 우주 쓰레기 제거를 위한 ADR 방식 중 팔매질(Sling) 기술을 제안 및 연구28)



[그림 13] 팔매질(Sling) 기술 개념도

* 출처 : SPCACE.com 홈페이지

● (자석(Magnetic)) 일본에서 시도하고 있는 제거 기술로서, 최근에는 우주에서 가상의 우주 물체를 두고 랑데부 미션까지 성공

- (Astroscale, 일본) '13년에 세계 최초로 우주 쓰레기 청소를 전문으로 수행하기 위해 설립된

27) 이창한, 우주쓰레기 위협에 대한 문제 인식과 우리의 대처(2021), 한국항공우주연구원

28) Missel, Jonathan William, Active Space Debris Removal Using Capture And Ejection(2013), Texas A&M University

다국적 벤처기업으로서, 자석(Magnetic)을 이용한 ADR 방식의 기술을 개발 중29)

※ '21년 3월에 ELSA-d* 위성을 발사하였고 '22년에는 임의로 놓은 가상의 우주 물체에 랑데부 미션을 성공적으로 수행

* End-Of-Life Service-Demonstrate

[그림 14] 자석(Magnetic) 개념도

* 출처 : Astroscale 홈페이지

- (폐기용 부스터(Booster)) 제거 기술에 대한 개념은 제시되었지만 실질적인 연구는 아직 진행되지 않는 것으로 보임

[그림 15] 폐기용 부스터(Booster) 기술 개념도

* 출처 : ESA 홈페이지

- (레이저 빔(Laser Beam)) 지상에 배치된 레이저 시스템 또는 우주 공간에서 레이저를 발사하기 위한 위성을 배치하여 우주 쓰레기를 제거할 수 있는 기술
  - (NASA, 미국) '90년대부터 지상에서 레이저를 저궤도(LEO)에 있는 1 ~ 10cm 크기의 우주 쓰레기에 조사하여 물체의 궤도를 변경 시킨 후 대기권에서 소각시키기 위한 ORION 프로젝트가 진행 중30)
  - (JAXA*, 일본) 고출력의 레이저를 우주 쓰레기에 조사하여 궤도를 변경 시킨 후 제거하는 기술을 연구 중에 있으며 '23년에는 우주에서 수행하기 위한 실증 시나리오를 발표31)

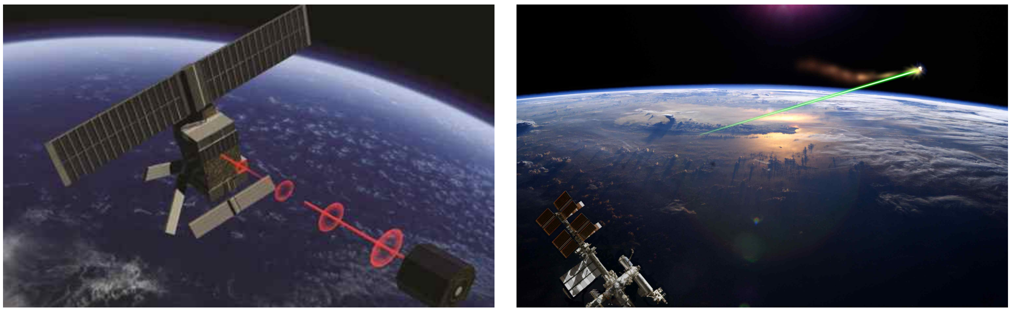
---

29) Astroscale, Astroscale's ELSA-d Mission Successfully Completes Complex Rendezvous Operation(2022.05.04.)
30) NASA, Project ORION : Orbital Debris Removal Using Ground-Based Sensors and Lasers(1996.10.)

* Japan Aerospace Exploration Agency(일본우주항공연구개발기구)

- (ESA, 유럽) 800km 부근의 궤도에 레이저 시스템 위성을 배치하여 고출력의 레이저를 발사하여 우주 쓰레기의 속도를 감속시키고 수명을 단축시키는 연구가 진행 중[32]

- (Roscosmos, 러시아) 지구 저궤도(LEO)에 있는 우주 쓰레기를 지상에서 고출력의 레이저 대포(Laser Cannon)로 제거하기 위한 기술을 개발 중[33]



[그림 16] 레이저 빔(Laser Beam) 기술 개념도

* 출처 : ESA 및 위키디피아 홈페이지

- (거품(Foam)) 화학 물질을 이용하여 우주 쓰레기를 제거할 수 있는 기술
  - (StartRocket, 러시아) 폴리머 폼(Polymetric Foam)을 이용해 우주 쓰레기를 제거하는 기술을 개발하는 스타트업으로써, '폼디브리캐쳐(Foam Debris Catcher)' 위성을 '23년에 발사할 예정[34]

[그림 17] 거품(Foam) 기술 개념도

* 출처 : StartRocket 홈페이지

31) JAXA, [Laser Debris Removal] Thrust Measurement Experiment For Space Debris Nudging(2023.03.24.)
32) Liam Pieters, Ron Noomen, Space-based Laser Ablation For Space Debris Removal(2021), Delft University of Technology
33) New York Post, Russia Reportedly Built A Laser Cannon To Blast Space Debris(2018.06.13.)
34) Forbes, We'll Clean-Up Space Junk Using Sticky Foam 'Spiderwebs' In Orbit, Says Russian Space Startup(2020.06.16.)

제3장 정책 동향

3.1. 국제기구

국제적으로 우주 쓰레기를 경감하기 위한 노력이 '의무'가 아닌 '권고' 사항으로 제시되고 있으며, 국제기구에서 제시하는 가이드라인을 바탕으로 국가별 기준을 수립

- 「IADC* 가이드라인(2002)」 : UN 가이드라인 대비 구체적인 수치와 방법이 포함되어 있어 국가 또는 우주기관에서 자체 가이드라인을 제정하는데 실질적인 참고가 될 수 있는 표준안

  * 우주 쓰레기 조정 위원회(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)

〈표 6〉 IADC 가이드라인 내 주요 내용(4개)

구분	주요 내용
1	• 정상 운용 중 우주 쓰레기 배출 제한
2	• 파열 가능 확률 10^{-3} 이하 등 궤도 상 파열 가능성 최소화
3	• 폐기율 90% 이상, 지구 재진입 시 인명 사상률 10^{-4} 등 임무 종료 후 폐기
4	• 궤도 상 충돌 방지

- 「우주 쓰레기 경감 가이드라인(2007)」 : UN COPUOS*에서 인류를 위해 안전한 우주 활동이 이루어 질 수 있도록 관련 지침을 제시하였으나, 선언적인 내용으로 구성되어 있고 국제법상 법적 구속력이 없음을 명시[35]

  * 우주 공간의 평화적 이용 위원회(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)

〈표 7〉 우주 쓰레기 경감 가이드라인 내 주요 내용(7개)

구분	주요 내용
1	• 정상 운용 중 배출되는 쓰레기 제한
2	• 운용 단계 중 파열 가능성 최소화
3	• 궤도에서의 충돌 확률 제한
4	• 고의적인 파괴 및 유해 활동 회피
5	• 임무 종료 후 잔존 에너지로 인한 파열 가능성 최소화
6	• 저궤도(LEO)에서 임무 종료 후 위성 및 발사체의 장기간 체류 제한
7	• 정지궤도(GEO)에서 임무 종료 후 위성 및 발사체의 장기간 체류 제한

35) IADC, Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space(2007)

- 「ISO* 표준 24113(2011)」: 우주 시스템 분야에서 우주 쓰레기 경감을 위한 기술적인 요구 조건을 추가하여 명시[36)]

* 국제표준화기구(International Organization Standardization)

〈표 8〉 ISO 표준 24113 주요 내용(7개)

구분	주요 내용
1	• 저궤도와 정지궤도에서 25년 이상 머물지 않으면서도 정상운용 중 우주 쓰레기 배출 방지
2	• 발사 및 파이로(Pyrot) 점화 과정에서 1mm 이상의 우주 쓰레기 발생 방지
3	• 고의적인 파괴 금지 및 우발적인 파열 확률 10^{-3} 이하
4	• 폐기 성공률 최소 0.9 이상
5	• 정지궤도(GEO) 보호영역 이외로 폐기
6	• 저궤도(LEO) 보호영역 내에서 임무 종료 후 25년 이내 잔존 금지
7	• 지구 재진입 시 사상률은 각 기관의 정해진 기준 준수 할 것

- 「우주 산업 쓰레기 경감 권고(2023)」: 세계경제포럼(WEF*)은 ESA와 공동으로 우주 쓰레기 제거와 관련된 기술, 재정, 환경 등에 대해 새로운 가이드라인을 발표하였으며, 우주와 관련된 27개 기업이 해당 내용을 지지하며 준수하겠다고 서명[37)]

* 세계경제포럼(World Economic Forum)

※ 저궤도(LEO)에서 운영하는 인공위성을 PMD 방법으로 95 ~ 99%의 제거 성공률을 달성하고 임무 후 5년 이내에 폐기 등을 제시

〈표 9〉 WEF 우주 쓰레기 경감 권고에 서명한 기업(27개)

기업명	• AIRBUS • Akash Systems • Astra • Astranis • Astroscale • Axiom Space • ClearSpace	• D-Orbit • EchoStar • Exolaunch • GHGSat • GMV • Honeywell • Hydrosat	• OneWeb • OHB • Planet • SatSure • SES • Spire Global • Voyager Space	• Avanti Communications • NorthStar Earth & Space • Slingshot Aerospace • Thales Alenia Space • The Aerospace Corporation • The Exploration Company

- 이 외에도 우주 쓰레기 경감을 위한 가이드라인은 아니지만 정지궤도(GEO) 영역의 우주 환경 보호를 위해 권고사항을 제시한 「ITU*-R S.1003.2(2010)」도 존재

* 국제전기통신연합(International Telecommunication Union)

36) ISO, ISO 24113:2019(Space systems — Space debris mitigation requirements)(2019)
37) WEF, Space Industry Debris Mitigation Recommendations(2023)

3.2. 미국

세계 최초로 우주 쓰레기 관련 정책을 수립(1993)한 후, 우주 쓰레기 경감을 위한 실행력 있는 정책과 지침을 지속 발표하고 있으며, 타 국가의 동참 역시 적극 요청

- ’22년 4월에 위성 요격 미사일(ASAT*)로 자국의 위성을 요격하여 파편을 발생시킬 수 있는 시험을 앞으로 실시하지 않겠다는 백악관 성명서를 발표했으며, 이러한 규제를 국제적 규범으로 확립하기 위해 협력할 것을 촉구[38]

※ 위성 요격 미사일(ASAT)을 보유하고 테스트한 국가(시험 횟수)는 ’22년 기준으로 미국(34회), 러시아(34회), 중국(10회), 인도(2회)[39]

* Direct-Ascent Anti-Satellite

- 「5년 규칙*(2022)」: 美 연방통신위원회는 저궤도(LEO)에서 운영 중인 위성이 임무 완료 후 폐기되기까지 저궤도에 머물 수 있는 기간을 25년에서 5년으로 단축할 것을 발표[40]

* 5-Year Rule

- 「국가 궤도 잔해물 시행 계획*(2022)」: 우주 쓰레기로 인한 위험을 해결하기 위해 우주 쓰레기 모니터링 및 제거 등의 임무를 수행 시 美 정부 부처 및 기관의 공동 노력이 필요하며, 국제적으로도 협력을 요청[41]

* National Orbital Debris Implementation Plan

- 「궤도지속가능성법*(2023)」: 해당 법안은 美 항공우주국(NASA)이 다른 정부기관 및 민간 기업과 협조하여 우주 쓰레기 제거를 위한 프로그램을 추진하고 관련된 지침을 신규 수립 및 개정할 것을 촉구[42] (’23.7.28 美 상원 통과, 하원 계류)

* Orbital Sustainability Act(ORBITS)

- 그러나 「우주정책지침-3*」에서는 국제 규범 발전이 우선되어야 한다고 주장하는 등 기술 성숙도가 낮은 ADR 방식은 아직까지는 효율적이지 않아 장기적으로 접근해야한다고 보고 있어 PMD 방식에 의한 우주 쓰레기 경감과 지상에서의 우주 쓰레기를 추적하는데 집중

* Space Policy Directive-3

---

38) THE WHITE HOUSE, FACT SHEET: Vice President Harris Advances National Security Norms in Space(2022)
39) Brian Weeden, History of Anti-Satellite Tests in Space
40) Federal Communications Commission(FCC), Space Innovation IB Docket No. 22-271 Mitigation of Orbital Debris in the New Space Age IB Docket No. 18-313
41) The Office of Science and Technology Policy, National Orbital Debris Implementation Plan(2022)
42) S.447-118th Congress (2023-2024), 「Orbital Sustainability Act of 2023」 or 「the ORBITS Act of 2023」

3.3. 유럽

ESA는 우주 쓰레기 경감을 위한 연구 개발이 가장 활발한 기구 중 하나로써, 자체적인 가이드라인 수립과 더불어 유럽 내 기업과 다양한 우주 쓰레기 경감 프로젝트를 진행 중

- 「우주 파편을 경감하기 위한 유럽 행동 코드*(2004)」 : ESA에서 IADC 가이드라인과 유사하면서도 기술적인 내용이 구체적으로 설명되어 있으며 자발적인 실행을 권고한 가이드라인

  * European Code of Conduct for Space Debris Mitigation

- 「Clean Space Initiative」 : 우주 쓰레기의 양이 증가하고 우주 산업의 자재, 프로세스와 기술 등이 우주 환경에 미치는 부정적인 영향을 고려하여 이를 완화하면서도 해당 분야에 대한 모범을 보이고자 '12년부터 시작된 프로젝트43)

- 「REDSHIFT Project」 : EU가 자금을 지원하여 새로운 우주 쓰레기 완화 지침 수립과 추락하는 우주 물체로부터 사람들을 보호하기 위한 웹(Web) 기반의 도구를 개발하는 프로젝트44)
  - 3D 프린팅을 활용하여 미래 우주선을 설계 시 혁신적이고 저렴한 비용으로 우주 쓰레기를 저감할 수 있는 방안을 마련하는 것이 목표

ESA 외에도 유럽 국가와 기업이 자체적으로 우주 쓰레기 경감을 위한 가이드라인을 수립하기 위해 노력

※ 프랑스, 벨기에, 영국, 핀란드 등의 유럽 국가에서는 국내법으로 지정하여 의무 준수를 요구

〈표 10〉 유럽의 우주 쓰레기 경감 관련 국내 정책·법

국가	정책·법 내용
프랑스	• 「프랑스 우주운용법(2008)」 : 제5조(우주물체 발사의 허가 요건)에서 "사람과 재산의 안전, 공중보건과 환경 보호, 특히 우주 쓰레기 관련 위험의 경감"을 규정 • 「기술표준명령(2011)」 : 제21조(우주 쓰레기 제한)에서 우주 쓰레기 경감을 위한 상세 요건을 규정
독일	• 「DLR 우주 프로젝트를 위한 제품 품질보장과 안전요건(2012)」 : 독일항공우주센터(DLR)의 모든 프로젝트에 선포하여 의무적으로 적용되는 문서로서, UN COPUOS 및 IADC 가이드라인과 동일한 내용을 규정
벨기에	• 「우주 물체의 발사, 비행 운영 또는 유도활동(2005)」 : 우주 쓰레기 완화와 관련한 국제 규정을 준수하여 수립 - 해당 장관이 관련법에 부합하도록 우주 운영자에게 강제할 수 있도록 하였으며, 벨기에 영토 안에서 활동하는 자국민뿐만 아니라 외국 국적 운영자도 준수하도록 요구
Airbus (社)	• 자체적인 가이드라인에 대한 검토를 2013년부터 시작하였으며 프랑스 CNES, ESA와 2014년부터 본격적으로 논의를 시작

* 출처 : 정영진(KARI), 우주 쓰레기 경감을 위한 규범적·경제적 고찰(2021.8) 재구성

43) https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space_Projects_and_Core_Activities
44) https://cordis.europa.eu/project/id/687500

3.4. 일본

우주 쓰레기 경감의 중요성과 기술 개발의 필요성을 명시한 정책 수립과 더불어 국제 사회의 관심도를 제고하기 위해 적극적으로 노력

- 「JMR-003A 가이드라인(2003)」: 우주 쓰레기를 경감하기 위해 지상 시스템에서부터 운용 및 임무 완료 시 폐기까지 전주기에 적용하고, '안전 및 임무 보증*' 부서에 경감 계획을 제출 후 승인까지 필요

  * 위성 또는 발사체 개발 등에 참여하는 하위 계약자들 또한 적용

- '19년 6월 G20 오사카 정상 회담에서는 아베 총리가 기후변화·환경·에너지 주제의 세션에서 우주 쓰레기 증가의 문제점을 언급하며 국제사회의 협력 촉구와 더불어 일본이 대형 우주 쓰레기 제거 프로젝트를 시작하고 있음을 표명[45]

- '20년 12월 우주 쓰레기와 관련하여 글로벌 인식 강화, 지침 수립을 위한 협력 등의 사안을 함께 노력하겠다고 유엔 우주 사무국(UNOOSA*)과 공동으로 성명

  * United Nations Office for Outer Space Affairs

- 「우주 기본계획(2023)」: 우주 공간의 활용이 가속되는 만큼 안전한 안보 환경을 확보하기 위한 노력이 필요하며 그 중 우주교통관리 및 우주 쓰레기를 저감하기 위한 대책 마련이 해당한다고 발표[46]

  - 민간 사업자와 협력하여 파편 제거 기술의 실증(CRD2*)을 진행하면서 운영 종료 위성의 궤도 이탈 등 우주 쓰레기 경감에 기여할 수 있는 기술 개발 또한 지원

    * Commercial Removal of Debris Demonstration

3.5. 러시아, 중국, 인도

중국과 인도는 우주 쓰레기 경감과 관련된 지침 등이 대외적으로 공개되지는 않았으나 IADC 가입 및 활동, 관련 기술 개발 등을 통해 국제적인 노력에 동참 중

- 「러시아 연방 국가 표준 GOST R 52925-2008*(2008)」: 우주 시스템의 충돌 및 파괴 방지 등 지구와 근접해 있는 우주 쓰레기를 경감할 수 있는 일반적인 요구사항을 기술한 가이드라인

  * NATIONAL STANDARD of the Russian Federation GOST R 52925-2008

45) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, スペースデブリに関する動向(令和元年９月５日)
46) 宇宙開発戦略本部, 宇宙基本計画(令和元年 5年 6月 13日)

3.6. 대한민국

우주 비행체 개발·운용 시 우주 쓰레기 배출을 줄이기 위한 기술적 조치를 권고하고 있고, 주요 정책에서 우주 쓰레기 제거 기술 개발 계획을 제시

- 「우주 쓰레기 경감을 위한 우주비행체 개발 및 운용 권고(안)(2020)」 : 국내 우주비행체 개발·운용 기관이 발사방법부터 폐기절차까지 전주기에 해당 되는 우주 쓰레기 생성을 최소화하기 위한 노력을 강조

※ UN COPUOS에서 채택된 『우주 쓰레기 경감 가이드라인(2007)』을 준용

- 「제4차 우주개발 진흥 기본계획('23~'27)」 : 이전 기본 계획 대비 우주 감시를 포함한 우주 쓰레기 제거 및 우주위협의 대응역량을 강화하기 위한 기술 확보와 더불어 미래에는 우주 물체 간 충돌방지를 위한 우주 교통관제 체계 구축을 목표로 설정[47]

〈표 11〉 '우주산업 창출' 및 '우주안보 확립'을 위한 핵심 임무 요소

궤도상 서비스(우주산업 창출)	우주시스템 보호(우주안보 확립)
☐ **정의** • 위성 주유·수리 등 유지보수, 우주 쓰레기 제거 등 새로운 궤도상 서비스 시장 ☐ **현재수준** • 관련 역량 없음 ☐ **확보전략** • (단기) 로봇 팔, 랑데부 등 핵심기술 개발 • (중기) 우주 기술 검증 프로젝트 추진 • (장기) 민간으로 기술을 이전하여 새로운 서비스 시장 창출	☐ **정의** • 우주 쓰레기 및 기타 우주위협에 대한 대응 역량 ☐ **현재수준** • 기초 기술 확보 ☐ **확보전략** • (단기) 우주 쓰레기 제거 기술 개발 • (중기) 우주 쓰레기 제거 위성 확보/운용 • (장기) 국제적 공조를 통한 우주 쓰레기 감소 활동 추진 우주-항공-지상-해양 초연결 사이버 안보 체계 확립

* 출처 : 제4차 우주개발 진흥 기본계획('23~'27) 재구성

- 「제1차 우주위험대비 기본계획('14~'23)」 : 인공우주물체 감시 및 충돌 예측, 대응 기술 확보 등 우리나라가 우주 위험에 대응한 주요 실적을 홍보하고 우주 쓰레기와 관련된 추진일정을 계획[48]

〈표 12〉 제1차 우주위험대비 기본계획('14~'23) 중 우주 쓰레기 제거와 관련된 분야별 추진일정

	주요 기술	'18	'19	'20	'21	'22	'23
제거 기술 관련	**폐기기술 개발**	아리랑 2호 폐기기동 전략 연구		천리안1호 폐기기동 전략 연구		저궤도 위성 폐기기동 전략 연구	
	우주물체 직접 제거 기술	우주 쓰레기 제거 및 궤도 상 서비스 핵심기술 선행연구 (랑데부/도킹 검증 위성)				우주쓰레기 능동제거 기술 개발 및 청소위성 개발	
	우주파편 경감 가이드라인	항공우주연구원 우주파편 경감 가이드라인 제정					

* 출처 : 제1차 우주위험대비 기본계획('14~'23) 2021년도 시행계획(안) 재구성

---

47) 과학기술정보통신부, 제4차 우주개발진흥기본계획('23~'27)

48) 관계부처 합동, 제1차 우주위험대비 기본계획('14~'23) 2021년도 시행계획(안)(2021.01)

제4장 산업·R&D투자 동향

4.1. 개요

- 사업성이 높은 ADR 방식의 상용화가 이루어진 바 없고 정부와 민간의 투자로 기술 개발 및 실증이 진행되고 있으나 관련 산업 규모는 아직까지 미미
  - ‘뉴 스페이스’ 기조와 함께 정부도 적극적으로 기술개발을 지원하고 있고, 민간에 의한 투자도 활발하여 다수의 스타트업이 다양한 아이디어를 바탕으로 ADR 방식의 기술 개발을 진행 중
    - 위성시스템에 기본적으로 탑재되는 PMD 방식보다는 의뢰에 의한 우주 쓰레기 제거에 활용되는 ADR 방식의 기술이 더 높은 사업성이 기대됨
  - 그러나 ADR 방식의 기술은 대부분 개발 초기 단계이며, 일부 우주 실증에 성공한 기술도 상용화에 이르지 못한 상황으로 서비스 산업이 형성되기 위해서는 다소 시간이 필요

4.2. 산업동향

4.2.1 글로벌 산업 동향

- Market Business Insights(2022)에서는 우주 쓰레기 제거 방법 중 ADR과 관련한 글로벌 시장이 26.5억 달러(2021)에서 23.9%의 연평균 성장률로 성장하여 452.7억 달러(2030)의 규모에 달할 것으로 추정[49]
  - 수명을 다한 위성은 대체 위성이 투입되기 위한 공간을 내어주어야 하므로 자체적인 제거(PMD) 방식 또는 능동적 제거(ADR) 방식이 활용되어야 하는 만큼 우주 쓰레기 제거와 관련된 산업이 성장할 것으로 전망

- 스타트업 중심으로 우주 쓰레기 제거 기술을 개발하고 있으며, 정부·민간의 투자를 유치하여 기술 개발 및 실증을 진행

49) Linkedin, Active Space Debris Removal Market Size- Industry Trends, Share, Growth, Opportunity, and Forecast 2023-2030(2023.04.10.)

〈표 13〉 기업별 산업 동향 및 투자 유치 사례(글로벌)

〈미국〉 ☐ Starfish Space社는 '23년 3월에 벤처 캐피털로부터 1,400만 달러(한화 185억 원) 규모의 투자를 유치하여 저궤도(LEO)에 있는 우주 쓰레기를 제거하기 위한 기술 개발을 목표 ☐ Altius Space Machines社는 자기 또는 접착제 형태의 장치인 DogTag를 작동하지 않는 위성에 부착하여 궤도 이탈시키는 기술을 개발 중 ☐ KAll Morris Inc(KMI)社는 우주 쓰레기 제거 방식 중 ADR에 중점을 둔 우주 쓰레기 연구 및 기술 개발 회사로서 ADR 방식의 기술을 적용한 제품을 개발하여 상업적으로 활용하기 위해 노력 중 **〈유럽〉** ☐ D-ORBIT社는 ESA와 추진기관 활용 기술을 이용하여 자체적으로 폐기되는 기술인 'Deorbit Kit' 개발 및 궤도 내 검증을 위한 프로젝트 수행을 위해 2년간 약 22억 유로(한화 3.1조 원)의 계약을 체결[50] ☐ 유럽혁신위원회(EIC)는 PMD 방식 중 밧줄(Tether) 활용 기술을 개발하는 E.T.PACK-Fly 프로젝트를 수행하는 Sener社에 2.5억 유로(한화 3,580억 원)를 투자[51] ☐ Clearspace社는 ADR 방식 중 로봇 팔(Robot Arm)을 개발하는 유럽 벤처기업으로서, 우주 쓰레기 제거 임무를 위해 유럽 내 다수의 국가와 계약을 체결하였으며, 투자 유치 또한 성공 - ESA와 '26년 Vega-C 발사체 잔해 수거를 목표로 약 86억 유로(한화 12조 원) 규모의 계약을 체결 - '23년에는 28.9억 달러(한화 4.1조 원) 규모의 시리즈 A 단계*의 투자 유치를 성공[52] * 시리즈(Series) A 단계는 '시장 진입 직전의 서비스 출시 이전 단계'로서, 벤처케피탈(VC), 기관 투자자 등이 참여 **〈일본〉** ☐ Astroscale社는 일본을 중심으로 하여 영국 등이 참여한 다국적 벤처기업으로서, ADR 방식 중 자석(Magnetic)을 이용한 기술을 개발하기 위해 FEL Corporation, Mitsubishi Corporation 등 47개의 투자자로부터 '23년 2월까지 총 191억 달러(한화 5,173억 원)의 투자를 유치 - '22년에는 ESA와 ELSA-M* 임무 수행을 목표로 16억 달러 규모의 계약을 체결 * End of Life Services by Astroscale-Multiple **〈러시아〉** ☐ Roscosmos社는 '20년 12월에 핵 추진 예인선(Tug) 예비 설계를 위해 계약금 41.7억 루블(한화 566억 원) 규모의 계약을 산하기관인 Arsenal Design Bureau와 체결하여 '24년까지 예비설계를 완료할 계획[53] ☐ StartRocket社는 폴리머 폼(Polymetric Foam)을 이용해 우주 쓰레기 기술을 개발 중인 스타트업으로써, '21년부터 자금을 모으기 위한 크라우드소싱(CrowdSourcing) 펀드를 계획

4.2.2 국내 산업 동향

국내 산업 역시 태동기이나, 위성의 수명(25년*)이 종료된 후 폐기 기동 수행을 권고하고 있으므로 향후 위성 폐기 등 우주 쓰레기 경감을 위한 산업이 증가될 것으로 전망

* 「우주 쓰레기 경감을 위한 우주비행체 개발 및 운용 권고(안)」상에 제시된 궤도수명

50) Spacewatch.global, D-Orbit signs €2,2 million space debris removal contract with ESA(2021.09.09.)
51) European Scientist, European consortium develops way to remove space debris(2022.05.17.)
52) Payload, ClearSpace Closes €26.7 million Series A(2023.01.20.)
53) Spaceradar, 러시아, "우주쓰레기 처리용 핵 추진 예인선 개발 고려 중"(2023.04.16.)

- ’92년에 발사된 최초의 인공위성인 ‘우리별 1호’는 ’04년부터 운영이 중단되어 저궤도(LEO) 상에 머물고 있는 상태로서 이를 포획 후 제거하기 위한 기술을 개발 중

- 임무가 종료된 인공위성 등에 자체적으로 폐기될 수 있는 제거 기술을 탑재하여 권고된 궤도수명을 이행하기 위한 조치가 필요한 만큼 관련 기술을 개발하기 위한 산업이 증가 될 것으로 기대

일부 스타트업에서 PMD 방식의 기술을 개발하고 실증을 준비 중

〈표 14〉 기업별 투자 유치 사례(국내)

□ 카이로스페이스社는 ’20~’22년에 우주 쓰레기 제거와 관련된 기술을 개발하고 실증하기 위해 중소벤처기업부로부터 총 4.8억 원 가량의 투자 유치[54] □ UZURO社는 화학 추진기관을 이용한 우주 쓰레기 제거 기술을 개발하여 추후 초소형 인공위성에 도입할 예정

4.3. R&D 투자 동향

4.3.1 글로벌 R&D 투자 동향

(미국) 현재까지는 우주 쓰레기 관련 연구에 대한 투자가 미미하나, 관련 정책·법안에 따라 향후 투자는 크게 증가할 것으로 예상

- 美 회계감사원(US Government Accountability office)에 따르면 국방부(DOD)는 ’15년부터 ’20년까지 우주 상황 인식에 연평균 약 10억 달러를 투자하고 있지만 ADR 방식의 기술 개발에는 상대적으로 적게 투자[55]

- NASA는 우주 쓰레기 관련 기초 연구를 지속 지원하고 있지만 여러 프로그램에 파편화되어 있고 소규모로 투자하고 있어 우주 쓰레기에 해당되는 예산은 수백만 달러 수준으로 추정[56]

- 「국가 궤도 잔해물 시행 계획」에서는 NASA, DoD 등 관련 부처의 임무를 명확히 명시하였고, 현재 계류 중인 「궤도지속가능성법」에서는 NASA에 우주 쓰레기 제거 프로그램을 신설하도록 하고 있어 이 법안까지 통과가 완료되면 우주 쓰레기에 대한 투자는 확대 예상

---

54) 국가연구개발사업 조사·분석 통계(NTIS)

55) U.S. Government Accountability Office(GAO)(2015), Space Situational Awareness: Status of Efforts and Planned Budgets

56) Brian Weeden(2017), US space policy, organizational incentives, and orbital debris removal, The Space Review

(유럽) EU와 ESA는 우주 쓰레기 제거를 위하여 기초 및 실증 단계의 다양한 기술에 투자를 지속

- EU는 「Horizon Europe」을 통해 기초연구인 우주 감시 및 추적 분야에 1.1억 유로('21~'24년)를 투자하고 있으며, ESA도 우주 쓰레기 제거 기술을 개발하는 기업에 투자를 진행하여 '30년까지 'Zero Debris Approach' 목표를 실천하고자 노력 중
  - EIC는 PMD 방식 중 밧줄(Sener社)을 이용하는 우주 쓰레기 제거 기술을 개발 중인 기업에 2.5억 유로를 투자
  - 「Horizon Europe」을 통해 5.2천만 유로[57]('22년)와 5.7천만 유로[58]('24년)를 모두 우주 감시 및 추적 분야에 지원하고 있으며 이를 통해 우주 쓰레기가 경감될 수 있도록 기여하는 것을 목표
  - ESA는 추진기관 활용 기술(D-ORBIT社)과 로봇 팔(Clearspace社)을 이용해 우주 쓰레기를 제거할 수 있는 기술을 개발하는 기업에 각각 22억 유로와 86억 유로를 투자

(일본) 문부과학성이 주관하고 JAXA가 운영하는 우주 쓰레기 관련 전용 사업을 통해 연간 수십억 엔 규모로 투자[59]

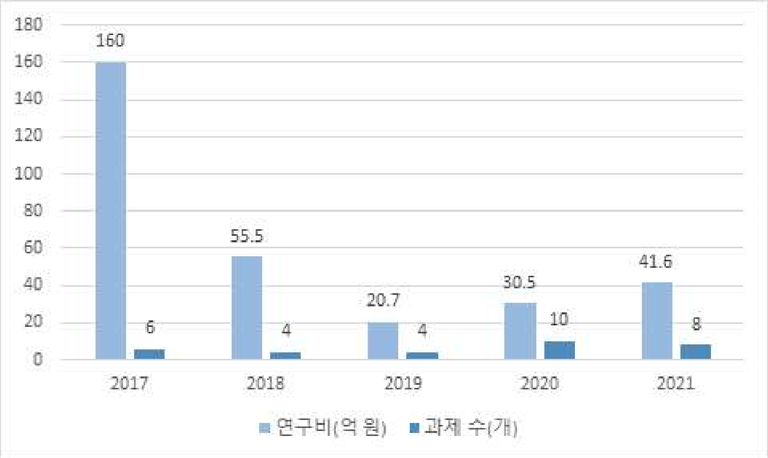
- 여러 사업을 통해 소규모 R&D 과제를 지원하는 다른 나라와 달리, 일본은 우주 쓰레기 기술 개발을 위한 전용 사업을 운영하고 있으며, 일본의 우주기술 개발을 이끄는 JAXA가 사업을 운영
  - 「우주 쓰레기 대책 기술 연구」 사업은 2008년 착수하여 연간 수억 엔(2020년 2억 엔)을 투자하여 우주 쓰레기 관측·제거와 관련된 핵심기술을 개발
    ※ 사업종료기간이 정해지지 않은 사업이나, 2020년 이후 예산은 공개되지 않음
  - 「우주 쓰레기 제거 기술 실증」 사업은 2019년부터 2025년까지 총 145억 엔을 투자(2023년 12억 엔)하여 민간 기업이 보유한 우주 쓰레기 제거 기술의 실증 및 사업화를 지원하면서 세계 최초로 대형 우주 쓰레기 회수를 추진
  - 「우주상황파악(SSA*) 시스템」 사업은 2015년부터 2023년까지 총사업비 101억 엔(2023년 9억 엔)을 투자하여 우주 쓰레기 추적을 위한 시스템을 구축
    * Space Situational Awareness

57) Horizon Europe Work Programme 2021-2022, 7. Digital, Industry and Space
58) Horizon Europe Work Programme 2023-2024, 7. Digital, Industry and Space
59) 일본 내각부(内閣府) 홈페이지 중 우주관계 예산 관련 내용을 종합(https://www8.cao.go.jp/space/budget/yosan.html)

4.3.2 국내 R&D 투자 동향

(투자규모[60]) 최근 5년간('17~'21) 우주 쓰레기 분야에 투자된 정부 예산은 연평균 61.5억 원 수준으로 투자 규모가 유지되고 있으나, 제거 기술로 한정할 시 연평균 2.8억 원으로 작은 투자 규모가 유지 중

- 우주 쓰레기와 관련된 기술이 개발은 되고 있으나 전반적으로 다른 분야 대비 아직까지는 미비한 상황이며, 대부분 우주 쓰레기 탐지, 궤도 예측, 충돌위험 분석 등의 분야에 주로 투자
  - 우주 쓰레기 제거 기술은 PMD 방식의 추진 시스템과 ADR 방식의 돛(Sail) 등의 연구개발이 해당



[그림 18] 최근 5년간('17~'21) 우주 쓰레기 분야 정부R&D 투자 현황

〈표 15〉 최근 5년간('17~'21) 우주 쓰레기 제거 기술 정부 R&D 투자 현황

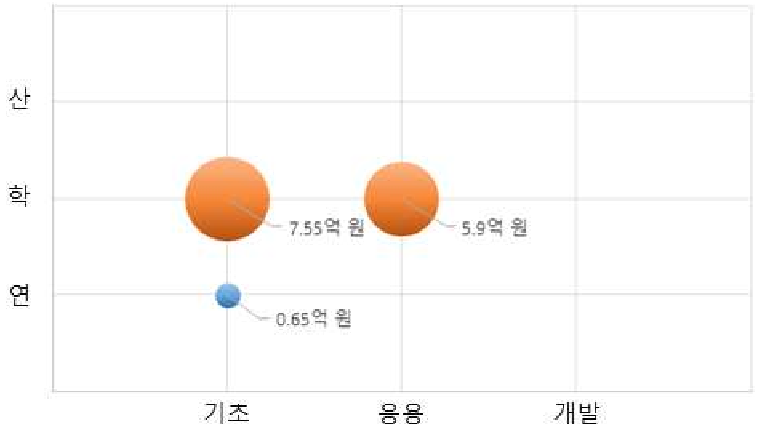
(단위 : 원)

연도	기관(대학)명	금액	기술
2017	한국항공대학교	9천만	돛(Sail)
2020	한국항공우주연구원	5백만	돛(Sail)
2020	아주대학교	5억	돛(Sail)
2021	한국항공우주연구원	6천	임무 후 폐기(PMD)
2021	한국과학기술원	9.5천만	포획(기반기술)
2021	아주대학교	5억	돛(Sail)
2021	한양대학교(ERICA)	1.66억	밧줄(기반기술)

(수행주체 및 연구개발단계) 최근 5년간('17~'21) 대학과 출연연을 중심으로 한 우주 쓰레기 제거 기술의 기초 및 응용 연구가 진행되었으나, 개발 단계의 투자는 없는 상황

60) 최근 5년간('17~'21)의 국가연구개발사업 조사·분석 통계(NTIS) 데이터를 이용하여 정부 지원 연구과제 중 우주 쓰레기 제거와 관련된 과제를 분석 * 과제 검색 키워드 : 우주 쓰레기, 파편, Space Debris, 파편, 잔해물, 제거

- 5년간의 투자액은 약 14.1억 원 중 아주대학교, 한국항공대학교 등 대학과 한국항공우주연구원(출연연구소)이 수행한 기초 단계의 연구에 8.2억 원(58%)이 투자되었으며, 나머지 5.9억 원(42%)은 응용 단계의 연구에 투자



[그림 19] 최근 5년간('17~'21) 수행주체 및 연구개발 단계별 투자액

제5장 결론

5.1. 요약 및 정리

지상으로의 추락 또는 우주에서의 충돌 등 우주 쓰레기에 의한 위협은 항상 존재하기 때문에 이를 해결하기 위한 대응 방안을 마련하기 위해 노력 중

- 발사 이후에 발생될 수 있는 우주 쓰레기를 제거하기 위해 자체적인 제거(PMD) 방식이나 능동적 제거(ADR) 방식의 기술을 개발 중인 상황
- 다양한 아이디어를 기반으로 한 우주 쓰레기 제거 기술이 연구는 되고 있으나 아직까지 우주에서의 실제 실증 횟수는 적은 상황
- 그럼에도 불구하고 미국, 유럽, 일본 등 우주 쓰레기 분야의 주요 선진국을 중심으로 제거 기술이 개발되고 있으며 이를 통해 수행할 구체적인 미션과 일정을 담은 계획을 발표

우주 쓰레기와 관련된 국제기구에서는 우주 쓰레기를 경감하기 위한 가이드라인을 권고 사항으로 제시하고 있으며 주요국에서는 자발적으로 안전한 우주 환경을 조성하기 위해 동참

- 국제기구에서는 주로 사용하고 있는 지구 궤도의 우주 쓰레기를 경감할 수 있는 권고사항을 제시하면서도 국가 또는 우주기관에서 자체적인 가이드라인을 제정하는데 실질적인 참고가 될 수 있도록 노력
- 우주 진출에 있어 선도적인 국가들은 우주 쓰레기의 위협에 대해 일찍이 인식하고 있는 만큼 우주 쓰레기를 경감 할 수 있는 방안을 모색하고 국제적인 동참 또한 요청

아직까지 우주 쓰레기 제거 산업 규모는 매우 작은 상황이지만, 민간에서 적극적으로 기술을 개발하고 있고 정부·민간에서도 이를 지원하고 있어 중장기적으로 우주 쓰레기와 관련된 시장은 성장할 전망

- ADR 방식의 기술은 대부분 개발 초기 단계이며, 일부 우주 실증에 성공한 기술도 상용화에 이르지 못한 상황이므로 서비스 산업이 형성되기 위해서는 다소 시간이 필요할 것으로 예상
- 우리나라는 아직까지 우주 쓰레기 제거와 관련하여 기술 개발이나 투입되는 예산이 상대적으로 많이 부족한 상황이지만 관련된 정책이 수립되는 등 정부 관심도가 높아지는 상황

5.2. 시사점

- 아직까지 세계적으로 우주 쓰레기 제거 기술이 충분히 성숙되지 않아 우리나라가 추격·주도할 여지가 많고, 우주 쓰레기 제거 기술이 향후 중요성이 커질 ISAM* 관련 기술의 시작점임을 고려할 때 해당 기술의 조기 확보는 우주산업을 위하여 필수

  * In-space Service, Assembly and Manufacturing, 우주 내 서비스·조립·제조

- 우주 쓰레기 제거 연구가 세계적으로 초기 단계임을 고려하여 산·학·연이 다양한 아이디어를 제시하고 연구할 수 있도록 지속 지원과 우주 실증 기회의 확대 필요

  - 우주 쓰레기 제거 기술은 필요성에도 불구하고 실증을 완료하였거나 경제적·기술적으로 우위를 확보한 기술이 아직 없고 산업이 형성되어 있지 않아 기술 개발을 정부 투자에 의존하고 있으며, 관련 스타트업 또한 소수에 머물고 있음

  - 따라서 산업계가 투자 부담을 덜고 다양한 우주 쓰레기 제거 기술을 개발할 수 있도록 기업이 대학·출연연의 기초연구에 참여할 수 있도록 지원하고, 정부와 벤처 캐피털을 매칭하여 R&D를 지원하는 투자형 R&D 확대, 투자 인센티브 제공 등의 지속 지원 필요

    - 해외에서는 우주와 관련된 기관에서 연구개발을 진행하면서도 민간 기업에도 적극적인 투자를 통해 함께 성장

  - 또한, 우주에서의 검증 여부(일명 Space Heritage)를 중시하는 우주 산업의 특성을 고려할 때 지상에서의 검증에는 한계가 있으므로, 우주에서 관련 기술을 직접 실증할 수 있는 기회를 마련하여야 함

    - 단기적으로는 우주에서의 실증 기회를 늘리기 위해 비용이 저렴한 외국 발사체를 이용하되, 중장기적으로는 국내 발사체의 트랙 레코드 축적 및 활용성 제고를 위해 국내 발사체를 활용한 실증 기회 제공 추진

  - 초기 단계의 기술 분야이므로 세계를 선도할 수 있는 새로운·다양한 아이디어를 제안하고 실패에 대한 두려움 없이 연구할 수 있는 제도적·문화적 환경 조성 역시 필요

- 우주 분야에서 우리나라의 위상을 제고하기 위해 우주 쓰레기 관련 국제 규범·표준 수립에 적극적인 참여가 필요

- 우주 쓰레기는 모든 국가에 영향을 줄 수 있어 국제적 관심도가 높은 분야이므로, 우주 쓰레기 관련 국제 규범·표준 수립에 우리나라가 적극적으로 참여할 경우 우리나라 위상 제고에 기여할 수 있으며, 향후 관련 산업이 확대될 때 유리한 고지를 점할 수 있음

- 이를 위해서는 우주 쓰레기 관련 국내 규제를 선제적으로 정비·강화할 필요가 있으며, 국내의 유관 부처를 중재하고 국제협력을 주도할 수 있는 주체를 명시할 필요
  - 美 국가과학기술위원회(NSTC)는 우주 쓰레기를 경감하기 위한 설계, 감시 및 추적, 제거 분야에 대해 NASA를 포함하여 부처 간의 임무를 명시

참고문헌

문헌자료

- 최준민(2016), 우주 폐기물(쓰레기) 제거 방식에 대한 고찰, 항공우주산업기술동향 14권 2호, pp. 43~54
- 이창한(2021), 우주쓰레기 위협에 대한 문제 인식과 우리의 대처, 항공우주 매거진 제15권 3호, pp. 37~44
- 정영진(2021), 우주쓰레기 경감을 위한 규범적·경제적 고찰, 항공우주 매거진 제15권 제3호, pp. 45~56
- 김해동(2021), 항우연 우주쓰레기 관련 기술 연구개발 현황, 항공우주 매거진 제15권 제3호, pp. 57~68
- 김해동(2020), 우주쓰레기 경감 가이드라인 동향 및 향후 전망, 한국항공우주학회지, pp. 311~321
- 김해동(2019), 우주 쓰레기 가이드라인 국제 동향, 한국항공우주학회, pp. 333~334
- 김해동 외(2015), 우주파편 능동제거 기술 연구개발 동향 분석, 한국항공우주학회지, pp. 845~857
- 김해동 외(2020), 우주환경보호 기술 개발 로드맵 수립을 위한 정책 연구, 한국항공우주학회, pp. 723~724
- 정미리 외(2019), 초소형위성을 이용한 랑데부-도킹 기술 최신 동향, 한국항공우주학회, pp. 411~412
- 신상우(2022), OECD 우주경제(Space Economy) 보고서의 주요 내용과 시사점, 국가우주정책연구센터(SPREC) Insight
- 한국과학창의재단(2022), 우주 쓰레기 경감 가이드라인-국가 우주자산의 안전한 운용과 우주 활동 지속을 위하여
- 한국항공우주연구원(2021), 뉴스페이스 스타트업 생태계 현황과 스케일업 지원방안
- 과학기술정보통신부(2020), 「우주쓰레기 경감을 위한 우주비행체 개발 및 운용 권고(안)」
- 과학기술정보통신부(2021), 「제1차 우주위험대비 기본계획('14~'23) 2021년도 시행계획(안)」
- 과학기술정보통신부(2018), 「제3차 우주개발진흥 기본계획('18~'22)」
- 과학기술정보통신부(2022), 「제4차 우주개발진흥 기본계획('23~'27)」
- Organization for Economic Cooperation and Development(OECD)(2020), SPACE SUSTAINABILITY – THE ECONOMICS OF SPACE DEBRIS IN PERSPECTIVE, OECD SCIENCE, TECHNOLOGY AND INDUSTRY POLICY PAPERS No. 87
- The European Space Agency(ESA) Space Debris Office, ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT
- IADC(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)(2023), 「IADC Report On The Status Of The Space Debris Environment」
- WEF(World Economic Forum)(2023), 「Space Industry Debris Mitigation Recommendations – Future of Space Network – Sustainable Space Initiative, Centre for the Fourth Industrial Revolution」

- The National Science and Technology Council(NSTC)(2021), 「NATIONAL ORBITAL DEBRIS RESEARCH AND DEVELOPMENT PLAN」
- The National Science and Technology Council(NSTC)(2022), 「NATIONAL ORBITAL DEBRIS IMPLEMENTATION PLAN」
- The United States Government(USG)(2019), 「Orbital Debris Mitigation Standard Practices (ODMSP)」
- National Aeronautics and Space Administration(NASA)(1995), 「Nasa Safety Standard-Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris」
- National Aeronautics and Space Administration(NASA)(2022), 「International Space Station Transition Report」 pursuant to Section 303(c)(2) of the NASA Transition Authorization Act of 2017 (P.L. 115-10)
- National Aeronautics and Space Administration(NASA)(2023), 「Cost and Benefit Analysis of Orbital Debris Remediation」
- Jack Bacon(2019), NASA & US Government Orbital Debris Mitigation Policies, 8th Range Safety Conference Tel Aviv Israel
- European Commission(EC)(2021), 「Horizon Europe Work Programme 2021-2022」 7. Digital, Industry and Space
- European Commission(EC), 「Horizon Europe Work Programme 2023-2024」 7. Digital, Industry and Space
- European Innovation Council(EIC), 「European Innovation Council (EIC) Work Programme 2023」
- Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)(2020), 「SPACE DEBRIS MITIGATION STANDARD」
- 宇宙開発戦略本部(令和５年), 「宇宙基本計画工程表」

보도자료

- 동아일보(2022.12.16.), “고성능 카메라로 정보수집, 우주쓰레기도 해결…‘꼬마위성’들의 꿈”
- 뉴스인사이트(2021.03.26.) “처음으로 민간 회사가 우주청소부 발사...혹시 일본의 킬러위성?”
- 미래&과학(2019.12.12.) “2025년 첫 우주쓰레기 수거해온다”
- 대한민국 정책브리핑(2023.03.31.) “제46회 우주개발진흥실무위원회 개최 관련 브리핑”
- 어린이동아(2023.01.17.) “성큼 위협으로 다가온 우주쓰레기, 대안은?”
- 이투데이(2022.11.19.) “우주쓰레기 제거, 우주 사업 블루오션 될까”
- 동아일보(2023.01.11.) “우주 쓰레기, 내 머리 위로 떨어질라”
- 사이언스조선(2023.01.12.) “작년에만 발사체 180개 우주로 갔다... 한국도 첫 발사체 성공”
- 경향신문(2023.01.15.) “하늘서 쏟아진 위성의 역습...머리 위가 불안하다”

• 산경투데이(2023.06.11.), "'우주쓰레기' 사냥꾼 아스트로스케일, 클리어스페이스"
• SPACERADAR(2023.04.30.), "일본, 우주쓰레기 처리회사 '아스트로스케일' 60억 엔 은행대출"
• 이코리아(2022.11.22.), "우주 쓰레기 청소에 일본이 열 올리는 까닭"
• The White House(2018.06.18.), "Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy"
• The White House(2022.04.18.), "FACT SHEET: Vice President Harris Advances National Security Norms in Space"
• FC NEWS(2022.09.29.), "FCC ADOPTS NEW '5-YEAR RULE' FOR DEORBITING SATELLITES TO ADDRESS GROWING RISK OF ORBITAL DEBRIS"

웹사이트

• 한국항공우주연구원(KARI) 홈페이지, https://www.kari.re.kr/kor.do
• The White House 홈페이지(트럼프), https://trumpwhitehouse.archives.gov/
• ESA 홈페이지, https://www.esa.int/
• EC 홈페이지, https://commission.europa.eu/index_en
• NASA 홈페이지, https://www.nasa.gov/
• World Economic Forum 홈페이지, https://www.weforum.org/

|저자소개|

문 성 록

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 연구원

Tel: 043-750-2759 E-mail: anstjdfhr@kistep.re.kr

최 충 현

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 부연구위원

Tel: 043-750-2609 E-mail: chchoi@kistep.re.kr

한 민 규

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 연구위원

Tel: 043-750-2388 E-mail: mkhan@kistep.re.kr

|편집위원소개|

전 승 수 연구위원

이 재 민 연구위원

정 지 훈 연구위원

김 승 균 연구위원

황 덕 규 부연구위원

한국과학기술기획평가원 사업조정본부

Tel: 043-750-2444 E-mail: skkim@kistep.re.kr

※ 본 KISTEP 기술동향브리프의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.

[KISTEP 브리프 발간 현황]

발간호 (발행일)	제목	저자 및 소속	비고
57 (23.01.06.)	MZ세대를 위한 미래 기술	지수영·안지현 (KISTEP)	미래예측
- (23.01.20.)	KISTEP Think 2023, 10대 과학기술혁신정책 아젠다	강현규·최대승 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제341호)
58 (23.02.02.)	세계경제포럼(WEF) Global Risks 2023 주요내용 및 시사점	김다은·김유신 (KISTEP)	혁신정책
59 (23.02.07.)	미국의 「오픈사이언스의 해」 선포와 정책적 시사점	이민정 (KISTEP)	혁신정책
- (23.02.21.)	'데이터 보안' 시대의 10대 미래유망기술	박창현·임현 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제342호)
60 (23.03.06.)	연구자산 보호 관련 주요국 정책 동향 및 시사점	유지은·김보경 (KISTEP)	혁신정책
61 (23.03.20.)	美, 「과학적 진실성 정책 및 실행을 위한 프레임워크」의 주요 내용 및 시사점	정동덕 (KISTEP)	혁신정책
- (23.03.29.)	우리나라 바이오헬스 산업의 주력산업화를 위한 정부 역할 및 지원방안	홍미영·김주원 안지현·김종란 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제343호)
62 (23.03.30.)	2021년 한국의 과학기술논문 발표 및 피인용 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
63 (23.03.30.)	2021년 신약개발 정부 R&D 투자 포트폴리오 분석	강유진·김종란 (KISTEP)	통계분석
- (23.04.03.)	국방연구개발 예산 체계 진단과 제언	임승혁·안광수 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제344호)
64 (23.04.06.)	2023년 중국 양회의 주요 내용 및 과학기술외교 시사점	강진원·장지원 (KISTEP)	혁신정책
65 (23.04.10.)	2023 인공지능 반도체	채명식·이호윤 (KISTEP)	기술동향
66 (23.04.13.)	생성형 AI 관련 주요 이슈 및 정책적 시사점	고윤미·심정민 (KISTEP)	혁신정책

- (23.04.17.)	STI 인텔리전스 기능 강화 방안 -12대 과학기술혁신 정책 이슈를 중심으로-	변순천 외 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제345호)
67 (23.04.17.)	「OECD Science, Technology, Innovation Outlook 2023」의 주요 내용 및 시사점	홍세호·심정민 (KISTEP)	혁신정책
- (23.04.19.)	임무지향형 사회문제해결 R&D 프로세스 설계 및 제언	박노언·기지훈·김현오 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제346호)
68 (23.05.02.)	전기차 배터리 핵심광물	이승필·여준석·조유진 (KISTEP)	기술동향
- (23.05.03.)	기업 혁신활동 제고를 위한 R&D 조세 지원 정책 연구 : 국가전략기술 연구개발 기업을 중심으로	구본진 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제347호)
69 (23.05.04.)	허위·조작정보 대응을 위한 OECD 원칙 및 과학기술 시사점	배용국·정미나 (KISTEP)	혁신정책
70 (23.06.08.)	OECD MSTI 2023-March의 주요 결과	정유진 (KISTEP)	통계분석
71 (23.06.09.)	2022년 지역 과학기술혁신 역량평가	한혁·안지혜 (KISTEP)	통계분석
72 (23.06.23.)	일본, 『사이언스 맵 2020』의 주요내용 및 정책적 시사점	이미화·심정민 (KISTEP)	혁신정책
- (23.06.27.)	국가연구개발 성과정보 관리체계 개선 제언	김행미 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제348호)
- (23.06.28.)	신입과학기술인 직무역량에 대한 직장상사-신입간 인식 비교 분석	박수빈 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제349호)
73 (23.06.30.)	2021년도 국가연구개발사업 내 여성과학기술인력 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
74 (23.07.03.)	2022년 국가 과학기술혁신역량 분석	김선경·한혁 (KISTEP)	통계분석
- (23.07.05.)	기술패권경쟁시대 한국 과학기술외교 대응 방향	강진원·김진하 (KISTEP), 이정태(KIST)	이슈페이퍼 (제350호)
- (23.07.06.)	학문분야별 기초연구 지원체계에 대한 중장기 정책제언 (국내외 지원현황의 심층분석을 기반으로)	안지현·윤성용·함선영 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제351호)
75 (23.07.14.)	美 2023 국방과학기술전략서(NDSTS)의 주요 내용 및 시사점	유나리·최충현·임승혁 · 한민규(KISTEP)	혁신정책

76 (23.07.27.)	2023년 IMD 세계경쟁력 분석	한혁 (KISTEP)	통계분석
77 (23.07.27.)	2021년 미국 박사학위 취득자 현황 분석	한혁 (KISTEP)	통계분석
78 (23.07.26.)	제 5차 과학기술기본계획과 과학기술분야 중장기계획 간 연계현황 및 시사점	홍정석·심정민 (KISTEP)	혁신정책
79 (23.08.01.)	일본 통합혁신전략 2023 의 주요 내용 및 시사점	양은진·심정민 (KISTEP)	혁신정책
80 (23.08.21.)	일본 2023 우주기본계획 의 주요 내용 및 시사점	최충현·문태석·이재민 ·강현규(KISTEP)	혁신정책
81 (23.08.29.)	미국의 R&D와 혁신 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
82 (23.08.30.)	2023년 유럽혁신지수 분석과 시사점	한웅용 (KISTEP)	통계분석
83 (23.09.01.)	희토류 회수 및 재활용 기술	박정원·문윤실·이현경 (KISTEP)	기술동향
84 (23.09.20.)	화합물 전력반도체	유형정·김기봉 (KISTEP)	기술주권
85 (23.09.21)	『OECD Artificial Intelligence in Science: Challenges, Opportunities and the Future of Research』의 주요 내용 및 시사점	정하선·심정민 (KISTEP)	혁신정책
86 (23.09.22.)	우주 쓰레기 제거 기술	문성록, 최충현, 한민규 (KISTEP)	기술동향