

기고문

우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발 개연성 고찰 및 우주기동전(Space Maneuver Warfare)의 이해

최성환[†]

대한민국 공군본부 우주센터

Study on the Feasibility of Space Weapon Development Utilizing Active Debris Removal Techniques and Understanding of Space Maneuver Warfare

Seonghwan Choi[†]

R.O.K Air Force H.Q. Space Center, Gyerong 32800, Korea



Received: March 12, 2023

Revised: March 30, 2023

Accepted: April 4, 2023

[†]Corresponding author :

Seonghwan Choi

Tel : +82-42-552-6370

E-mail : kf2020@hanmail.net

Copyright © 2023 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Seonghwan Choi

<https://orcid.org/0000-0002-5674-4207>

요약

2021년 국제 우주감시학회(AMOS)에 발표된 논문에 따르면, 저궤도 우주공간의 우주물체 간 충돌가능성은 작동중인 위성이 아니라 발사체 상단, 폐위성 등 우주 쓰레기에 의한 충돌확률이 높고, 우주교통관제(space traffic management)를 통해 그 충돌 가능성을 줄일 것을 제안하고 있다. 이러한 배경에 최근 우주공간에 위성 등 우주물체의 급속한 증가로 우주 쓰레기(debris) 문제가 국제적인 주요 도전과제로 부각되고 있고, 이에 지난 2022년 9월 뉴욕에서 열린 유엔총회에 한국을 포함한 유엔 회원국들이 수직발사식 위성요격미사일(anti-satellite, ASAT) 실험을 실시하지 않도록 하는 결의안 채택을 통해 전세계 8개국(23년 6월 기준 13개국)이 ASAT 실험을 실시하지 않기로 했다. 또한, 우주 쓰레기를 줄이기 위한 방안이 민간 분야에서 활발히 연구되고 있는데, 이러한 우주 쓰레기 상용서비스는 필요시 군사적으로도 사용이 가능할 것으로 판단된다. 이에 우주 쓰레기 제거기술 현황, 우주위협 평가 및 궤도 상 랑데부 및 근접기동작전 사례에 대해 알아보고, 우주 강국의 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발 개연성에 대해 고찰하겠다. 그리고 미래 우주전장을 대비하기 위한 우주기동전(space maneuver warfare) 이해를 통해 새로운 우주추진체계의 개발 필요성에 대해 제안하고자 한다.

Abstract

According to the studies recently published through advanced maui optical and space surveillance technologies (AMOS) Conference 2021, LEO conjunction assessment revolves around not on operating satellites but space debris such as rocket bodies and non-operational satellites, hence suggesting a solution through space traffic management. Against this backdrop, the issue of active debris removal (ADR) has emerged to the surface as an international challenge throughout the globe. In step with this, the United Nations General Assembly approved a resolution calling on nations to halt tests of direct-ascent anti-satellites, to which U.S. and twelve other nations included Republic of Korea were original signatories. ADR techniques are also actively being researched in the civil sector, and these commercial services, if successfully developed, could possibly be utilized for military use as well. As such, this paper will help readers' understanding for the current status of ADR techniques, space threat assessments, on-orbit rendezvous and proximity operations by looking at previous cases, reflecting on space-faring nations' ADR

techniques and its development probability in relation to space weapons. As a conclusion, this study will propose the needs of developing space propulsion system by understanding Space Maneuver Warfare in preparation for the future space battlefield.

핵심어 : 우주 쓰레기, 우주무기, 우주기동전, 대위성무기, 우주 쓰레기(능동) 제거 기술, 우주 핵추진체계

Keywords : space debris, space weapons, anti-satellite (ASAT), active debris removal, space nuclear thermal propulsion (SNTTP)

1. 서론

1957년 구소련이 세계 최초의 위성인 스푸트니크 1호(Sputnik-1)를 발사한 이래로 2022년 11월 7일 기준으로 세계 각국은 총 14,450여 개의 위성을 우주공간으로 쏘아 올렸으며, 9,610여 개의 위성이 우주공간에 있고 이중 5,800여 개가 작동 중에 있다[1](Fig. 1). 또한 2030년 기준 대략 58,000여 개의 위성군 발사가 계획 중으로 2022년 12월 기준 미 SpaceX 사는 30,000여 개의 위성 추가발사를 미국 연방통신위원회에 요청해 이중 7,500기에 대한 허가를 받았다[2]. 이외에도 OneWeb, Amazon, Telesat와 중국의 SatNet 등은 전세계적으로 저궤도 광대역 위성군으로 90,000여 개에 달하는 위성을 우주공간에 투사할 것을 계획 중이다[3].

우주공간에는 위성 이외에도 중국, 러시아 등 정부 주도의 대위성공격(anti-satellite, ASAT) 실험에 의해 수많은 우주 쓰레기를 만들었으며, 우주발사체 상단부 로켓바디 등 수 만개의 우주 쓰레기는 여전히 우주공간에 남아 있다. 이처럼 우주 쓰레기는 ‘우주 궤도나 대기권에 재돌입하는 인간이 만든 물체’로 정의하고 있다. 영국 우주국에 따르면 현재 지구 밖에는 수명이 다한 위성과 발사체 잔해물, 우주인이 작업 중 잃어버린 최종 도구를 포함해 약 90만 개의 우주 쓰레기가 지구 주변을 맴돌고 있는데, 쓰레기의 범위를 1 mm 수준의 작은 물체까지 확대하면 그 수는 약 1억 3,000만 개가 될 것으로 과학계는 추정하고 있다. 이처럼 우주공간에

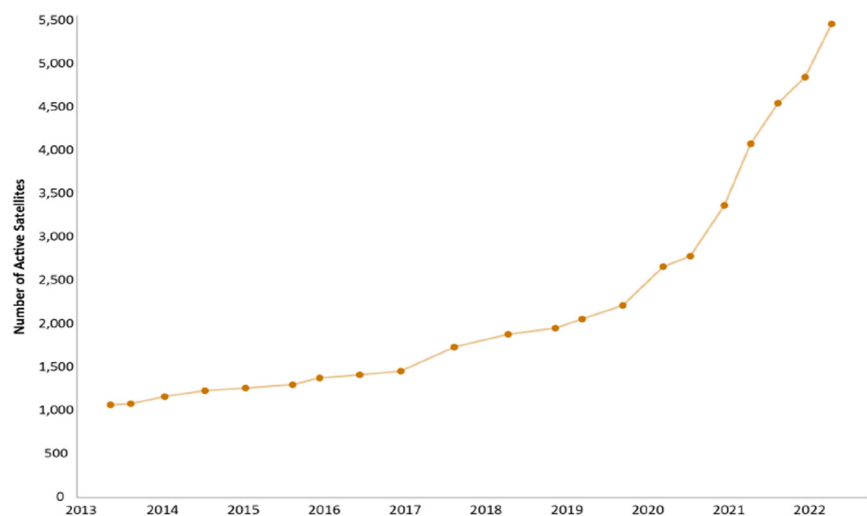


Fig. 1. Approximate number of active satellites, 2013–2022 [4].

는 폐위성 이외에 위성발사시 우주공간에 남겨진 로켓 추진체, 페어링 등 10 cm 이상 크기 3만 개가 활동 중으로 현재 운용 중인 위성에 매우 위협적인 존재이다[5](Fig. 2). 즉 고속의 우주 쓰레기는 우주공간 상 우주물체 간 충돌 가능성을 증가시키고 있는데, 우주공간 우주 쓰레기의 대부분은 2007년 중국의 대위성무기 시험 및 2009년 미국과 러시아 위성의 충돌로 발생하였으며, 1 cm급의 소형 우주 쓰레기도 위성에는 치명적인 손상을 줄 수 있다(Fig. 3). 이러한 우주 쓰레기는 현재 미 우주군이 운영 중인 우주감시네트워크(space surveillance network)에 의해 10 cm 이상 크기의 우주물체(27,000여 개)에 대해서만 추적되고 있다.

2021년 국제 우주감시학회[Advanced Maui Optical and Space(AMOS) surveillance Technologies]에 발표된 논문에 따르면, 저궤도 우주공간의 우주물체 간 충돌 가능성은 작동 중인 위성이 아니라 로켓바디, 폐위성 등 우주 쓰레기에 의한 충돌확률이 높고, 우주교통관제(space traffic management)를 통해 그 충돌 가능성을 줄일 것을 제안하고 있다[7]. 이러한 논문발표와 함께 최근 우주공간에 위성 등 우주물체의 급속한 증가로 우주 쓰레기(debris) 문제가 국제적인 주요 도전과제로 부각되고 있고, 향후 저궤도 공간에서 유인 우주관광, 달 수송 등과 같은 인간의 우주활동과 연계해 우주 쓰레기가 향후 장애 요소가 될 우려가 예상된다. 이에 지난 2022년 9월 뉴욕에서 열린 유엔총회에 유엔 회원국들이 수직발사식 위성요격

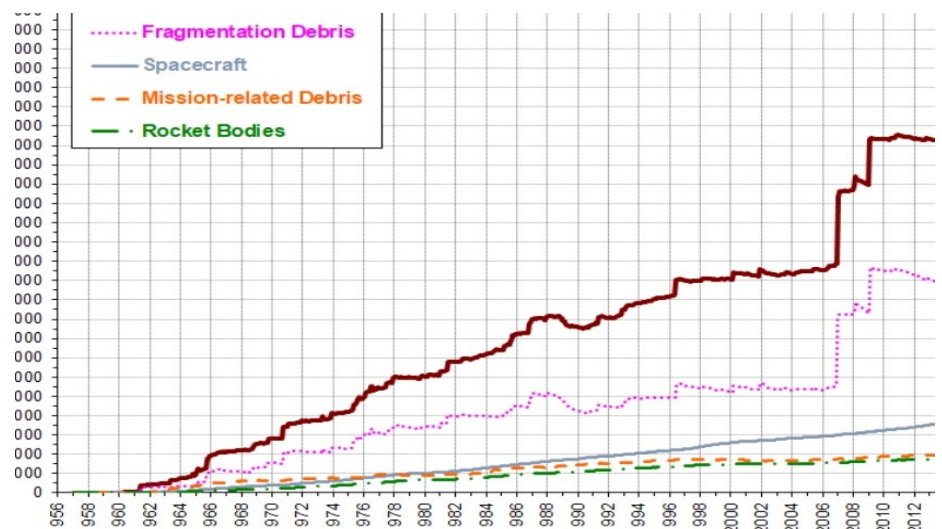


Fig. 2. Monthly number of objects in earth orbit by object type [6].

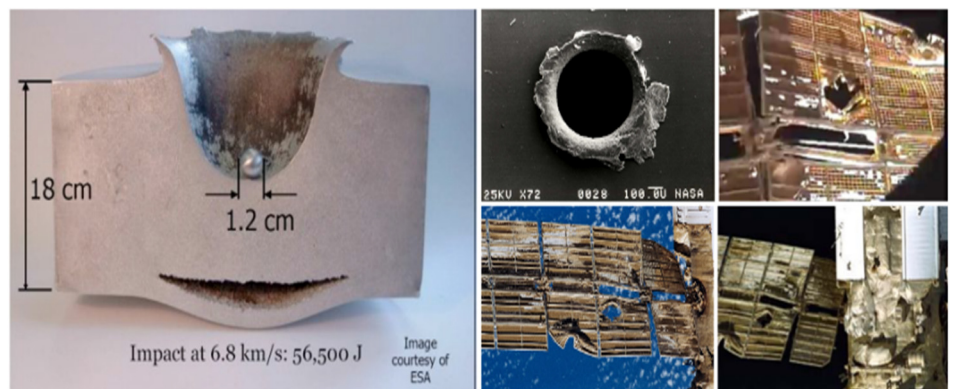


Fig. 3. Damages of satellites caused by debris (ESA). ESA, European Space Agency.

미사일(ASAT) 실험을 실시하지 않도록 하는 결의안을 채택해 전세계 8개국(23년 6월 기준 13개국)이 ASAT 실험을 실시하지 않기로 했다. 미국은 2022년 4월 수직발사식 ASAT의 파괴적인 시험을 자체 중단하기로 했는데, 캐나다(5월), 뉴질랜드(7월), 독일과 일본(9월), 한국과 영국, 스위스, 호주(10월), 그리고 12월에는 프랑스 등이 선언했다[8]. 또한, 네덜란드는 2023년 2월 스위스 제네바에서 열린 군축관련 UN 회의에서 인공위성 요격 미사일 시험을 중단한다고 최근 선언했다[9]. 이외에도 우주 쓰레기를 줄이기 위한 방안으로 유럽우주국(European Space Agency, ESA)은 '클리어스페이스-1(ClearSpace-1)'으로 명명한 프로젝트로 2025년에 우주 쓰레기 수거로봇을 로켓으로 쏘아 올린 뒤 목표한 잔해물을 추적해 수거하고, 잔해와 함께 지구를 향해 재돌입하는 것을 목표로 상용서비스를 준비하고 있다. 이러한 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 상용서비스는 필요시 군사적으로도 사용이 가능할 것으로 판단된다. 이에 우주 쓰레기 제거기술 현황, 우주위협 평가 및 궤도 상 랑데부 및 근접기동작전 사례에 대해 알아보고, 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발 개연성에 대해 고찰하겠다. 그리고 미래 우주전장을 대비하기 위한 우주기동전(space maneuver warfare) 이해를 통해 새로운 우주추진체계의 개발 필요성에 대해 제안하고자 한다.

2. 우주 쓰레기 제거기술 기술적 분류

우주 쓰레기를 처리하는 방법은 단 두 가지 뿐이다. 하나는 지구 대기권으로 재돌입시켜 완전히 연소시키는 것이고, 다른 하나는 다른 인공위성들이 전혀 사용하지 않는 궤도, 즉 운용 중인 인공위성에게 방해가 되지 않는 궤도로 옮기는 것이다. 위의 두 방법을 직접 실행하기 위한 방식에도 크게 두 가지 선택지가 있다. 첫째는 IADC Space Debris Mitigation Guidelines에 명시된 저궤도에서 위성과 로켓상단이 임무 종료 후 25년 내에 지구 대기권에서 스스로 폐기를 실행하는 임무 후 처리(post-mission disposal) 방식이다[10]. 둘째는 우주 공간으로 청소용 인공위성을 보내 우주 쓰레기를 직접 제거하는 능동적 제거(active debris removal, ADR) 방식이다[11]. 이중 우주 쓰레기를 직접 제거하는 능동적 제거(ADR) 기술 현황에 대해 알아보겠다. 능동적 제거(ADR) 기술은 크게 4가지 방법으로 항력증가 시스템(drag augmentation systems), 비접촉 방식(contactless methods), 테더(끈) 기반 방식(tether-based methods), 접촉 제거방식(contact removal methods)으로 분류한다.

2.1 항력증가 시스템(Drag Augmentation Systems)

항력증가 시스템은 우주 쓰레기의 면적을 크게 하여 대기 항력을 증가시켜 고도를 낮추고 지구 대기권으로 재돌입시켜 완전히 연소시키는 방식이다. 이 방식은 우주 쓰레기의 크기에 상관없이 제거 시도가 가능하고 도킹이나 대기권 진입을 위한 우주 쓰레기의 재진입(re-entry) 궤도 조정이 필요치 않다. 항력증가 시스템에는 폼(foam), 팽창식(inflated), 섬유기반(fiber-based), 태양/항력 돛(solar/drag sail) 방식이 있다. 폼(foam) 방식은 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 위성에 접근(랑데부)하여 폼을 위성 표면에 분사하여 구 모양으로 단위면적을 크게 만들어 항력을 증가시켜 고도를 낮추게 하는 방식이다. 팽창식(inflated) 방식은 우주 쓰레기에 풍선과 같은 큰 물체를 부착하여 항력을 증가시키는 방식으로 우주 쓰레기 제거 위성

이 목표 우주 쓰레기에 접근(랑데부 및 도킹)하여 풍선과 같은 항력을 키우는 물체를 부착하는 방식이다. 섬유기반(fiber-based) 방식은 폼(foam) 방식과 유사하며 폼 대신 섬유물질을 탑재한 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 우주 쓰레기에 접근(랑데부)하여 섬유물질을 분사하여 구 모양으로 단위면적을 크게 만들어 항력을 증가시켜 고도를 낮추고 지구 대기권으로 재돌입시켜 완전히 연소시키는 방식이다. 태양 돛(solar sail) 방식은 알루미늄 폴리아미드(aluminium-polyamide) 막의 돛 모양을 목표 해당 위성에서 자체 탑재하고 위성폐기 기동시 펼쳐 항력을 키우는 방식이다.

2.2 비접촉 방식(Contactless Methods)

비접촉 방식은 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 우주 쓰레기에 접촉없이 우주 쓰레기를 제거하는 방식으로 위성 간 충돌위험이 없기에 추가적인 우주 쓰레기가 발생하지 않으나, 접촉방식에 비해 상대적으로 우주 쓰레기 제거에 소요되는 시간이 길다. 비접촉 방식에는 인공 대기 영향(artificial atmospheric influence), 레이저 기반(laser-based), 이온 빔(ion beam shepherd), 정전기 트랙터(electrostatic tractor) 방식이 있다. 인공 대기영향(artificial atmospheric influence)은 목표 위성 고도의 궤도에 인공 가솔린(gasoline)을 방사하여 항력을 증가시켜 목표 쓰레기의 궤도 속도를 늦추어 대기로 추락시키는 원리이다. 이 방식은 다수의 우주 쓰레기가 모여 있을 경우 제거에 용이하다. 레이저 기반(laser-based) 방식은 크기가 1-10 cm인 우주 쓰레기에 대해 레이저를 조사하여 목표 우주 쓰레기의 궤도 속도를 늦추어 대기에서 소멸시키는 방식으로 지상 기반과 우주 기반 방식이 있다. 이온 빔(ion beam shepherd)은 목표 위성에 근접(10-20 m)하여 이온 빔을 조사하여 목표 우주 쓰레기의 궤도 속도를 늦추어 대기에서 소멸시키는 방식이다. 정전기 트랙터(electrostatic tractor) 방식은 정지궤도 상의 폐위성이나 로켓 등의 우주 쓰레기 제거에 유용하며, 쿨롱의 법칙(Coulomb's law: 두 전하 사이의 힘은 전하의 크기의 곱에 비례하고 거리의 제곱에 반비례 한다.)을 적용해 양전자의 견인(tug)기가 전자 빔을 목표 우주 쓰레기에 방사하여 양전하로 바뀌게 하고, 견인기와 우주 쓰레기의 전하를 같게 만들어 서로 밀어내게 하여, 우주 쓰레기를 무덤 궤도(graveyard orbit)로 보내는 방식으로 2-4개월이 소요된다.

2.3 테더(끈) 기반 방식(Tether-Based Methods)

테더(끈) 기반 방식은 우주 쓰레기 제거 위성이 다양한 테더(끈) 형태의 방법으로 목표 우주 쓰레기를 끌어서 제거하는 방식으로 전도성 끈(electrodynamic tether), 그물 포획(net capturing), 작살(harpoon) 방식이 있다. 전도성 끈(electro-dynamic tether, EDT) 방식은 우주 쓰레기에 전도성 끈을 달아 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해 발생한 항력을 발생하게 하여 우주 쓰레기 궤도 속도를 늦추어 궤도를 이탈(de-orbit)시키는 방식이다. 로렌츠 힘(Lorentz force)은 자기장에 의해 전류가 흐르는 도선 또는 전하를 가지고 운동하는 입자에 작용하는 힘으로 움직이는 속도 방향과 자기장의 방향에 모두 수직인 방향으로 힘을 받는다. 그물포획 방식은 간단하고 융통성이 있으며, 저궤도 및 정지궤도에서 우주 쓰레기를 제거하기에 가성비가 좋다. 또한, 우주 쓰레기의 부피나 관성 등 물리적 변수를 적게 고려하여 상대

적으로 쉽게 우주 쓰레기 제거가 가능하다. 작살 방식은 우주 쓰레기 제거 위성을 작살로 목표 우주 쓰레기를 맞추어 제거하는 방식으로 작살을 이용해 우주 쓰레기를 수거하고 대기권에서 태우는 방식이다.

2.4 접촉 제거방식(Contact Removal Methods)

접촉 제거방식은 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 우주 쓰레기에 접촉해 우주 쓰레기를 제거하는 방식으로 새총(slingshot), 접착제(adhesive), 촉수포획(tentacle capturing), 단일 로봇팔(single robotic arm), 다중 로봇팔(multiple robotic arms) 방식이 있다. 새총방식은 한번 발사에 여러 개의 우주 쓰레기를 제거할 수 있는 방식으로 우주 쓰레기 제거 위성은 우주 쓰레기를 포획하여 지상으로 날려(spin-up & ejection)보낸다. 그리고 다음 우주 쓰레기를 포획한다. 접착제 방식은 우주 쓰레기 제거 위성이 추진체가 있는 쓰레기 제거 키트(kit) 여러 개를 탑재해 여러 개의 우주 쓰레기에 각각 접착제 방식의 쓰레기 제거 키트를 발사하여 목표 우주 쓰레기에 부착시켜 대기권으로 유도하여 소멸시키는 방식이다. 촉수(집게 팔) 포획은 우주 쓰레기를 촉수와 같이 생긴 로봇팔이 우주 쓰레기를 잡고 대기권으로 유도하여 소멸시키는 방식이다. 단일 로봇팔 포획과 다중 로봇팔 포획은 좀 더 정밀하게 우주 쓰레기를 포획하여 대기권으로 유도하여 소멸시키는 방식으로 미세 중력 및 우주 방사선 환경에서 동작이 가능하게 기술 개발이 필요하다[12](Fig. 4).














우주 쓰레기 제거 방법		형상	궤도	크기(m)
항력증가 시스템(drag augmentation systems)	① 폼(Foam)		LEO	>0.1
	② 팽창식(Inflated)		LEO	>0.1
	③ 섬유기반(Fiber-based)		LEO	>0.1
	④ 태양 돛(Solar sail)		LEO/GEO	>0.1
비접촉 방식(contactless methods)	⑤ 인공 대기영향(artificial atmospheric influence)		LEO	>0.1
	레이저 기반(⑥ 지상 laser-based) ⑦ 우주		LEO/GEO	<0.02
			LEO/GEO	<0.02
	⑧ 이온 빔(ion beam shepherd)		LEO/GEO	>0.1
⑨ 정전기 트랙터(electrostatic tractor)		GEO	<0.01	
테드(끈) 기반 방식(tether-based methods)	⑩ 전도성 끈(Electrodynamic tether)		LEO	>0.01
	⑩ 그물 포획(Net capturing)		LEO/GEO	0.1-1
	⑪ 작살(harpoon)		LEO/GEO	0.1-1
	⑫ 새총(slingshot)		LEO	>0.1
접촉 제거방식(contact removal methods)	⑬ 접착제(adhesive)		LEO	>0.1
	⑭ 촉수포획(tentacle capturing)		LEO/GEO	0.1-1
	⑮ 단일 로봇팔(single robotic arm)		LEO/GEO	0.1-1
	⑯ 다중 로봇팔(multiple robotic arms)		LEO/GEO	0.1-1

Fig. 4. Comparisons of different ADR methods. ADR, active debris removal.

3. 우주위협 평가 및 궤도 상 근접기동작전 사례

3.1 우주위협 평가

우주위협 평가로 2018년 8월 미국 부통령(Mike Pence)은 미국의 우주자산에 대해 중국, 러시아의 위협이 증가되고 있다고 평가했고, 2023년 3월 미 우주군총장(Chance Saltzman)은 중국이 우주분야에서 가장 큰 위협이라고 강조하며 중국이 우주기술을 무기화 하는 노력을 지속적으로 하고 있다고 밝혔다[13]. 러시아의 경우 미국의 위성을 무력화할 수 있는 공중 레이저와 대위성 미사일을 개발 중이며, 중국과 러시아의 위성이 미국 위성에 근접 접근하는 등 전례 없이 우주위협이 되고 있다고 분석했다[14](Fig. 5).

2022년 미국 국제전략연구소(Center for Strategic & International Studies, CSIS)에서 발간한 ‘우주위협평가(space threat assessment) 2022’에 의하면 중국은 2021년에 가장 많은 위성을 궤도상에 올린 나라이고, 중국의 대우주능력(counterspace capabilities)은 위성 간 동일궤도에서 랑데부(co-orbital rendezvous) 능력과 저궤도 포함 정지궤도 위성에 대한 물리적 파괴 및 비물리적 공격(지향성 에너지, 전자전 등) 능력을 보유할 것으로 분석하고 있으며, 러시아의 경우 직접 타격 대위성공격(ASAT) 실험과 우크라이나에 대한 GPS 재밍, 위성 간 근접기동작전작전(rendezvous and proximity operations, RPO) 등과 같은 대우주능력을 지속적으로 발전시키고 있다[15].

3.2 궤도 상 근접기동작전 사례

궤도 상 근접기동작전 대표적인 사례로 2020년 1월에 러시아 군사위성이 미국 정찰위성에 대해 160 km까지 추적(RPO)한 사례와 중국 위성(TJS-3)이 2022년 10월 미국 정찰위성(USA 233)에 대해 6.2 km까지 접근하였다(Fig. 6; Table 1).

중국은 지난 12년간 저궤도 위성 궤도에서 위성간 근접기동작전(RPO) 등과 같은 다양한 우주기술을 시험해 왔다. 중국의 저궤도 위성인 SJ-12는 2010년 중국의 노후화된 위성인 SJ-06F 주변을 비행하는 근접기동을 몇 차례 수행했는데, 이 기동은 저속으로 규칙적이었으며, 2010년 여름 몇 주에 걸쳐 의도적으로 이루어졌다. 당시 SJ-12는 SJ-06F와 물리적으로 접촉하기도 했지만, 파편을 만들거나 양측 위성에 중대한 손상을 입힌 것으로 보이지는 않았다. 이 물리적인 접촉은 2011년 있었던 선저우 우주캡슐과 톈궁-1 우주정거장의 도킹을 위한 사전 실험으로도 추정되지만, SJ-12의 기동은 강력한 우주무기로도 사용될 수 있는 수준이었다.

러시아					중국				
	RPO	시험 중	운영 중	분쟁 시 사용		RPO	시험 중	운영 중	분쟁 시 사용
저궤도 위성 대위성무기(LEO Direct Ascent)	상당량	상당량	불확실	없음	저궤도 위성 대위성무기(LEO Direct Ascent)	상당량	상당량	상당량	없음
중궤도/정지궤도 대위성무기(MEO/GEO Direct Ascent)	다소	정보없음	정보없음	없음	중궤도/정지궤도 대위성무기(MEO/GEO Direct Ascent)	다소	다소	정보없음	없음
저궤도 위성 궤도상 위협(LEO Co-Orbital)	상당량	상당량	정보없음	없음	저궤도 위성 궤도상 위협(LEO Co-Orbital)	다소	불확실	정보없음	없음
중궤도/정지궤도 궤도상 위협(MEO/GEO Co-Orbital)	다소	정보없음	정보없음	없음	중궤도/정지궤도 궤도상 위협(MEO/GEO Co-Orbital)	다소	정보없음	정보없음	없음
지향성 에너지(Direct Energy)	상당량	다소	불확실	없음	지향성 에너지(Direct Energy)	상당량	다소	정보없음	없음
전자전(Electronic Warfare)	상당량	상당량	상당량	상당량	전자전(Electronic Warfare)	상당량	상당량	상당량	불확실
우주영역인식(Space Domain Awareness)	상당량	상당량	상당량	불확실	우주영역인식(Space Domain Awareness)	상당량	상당량	상당량	불확실

Fig. 5. Space threat assessment of Russia & China.

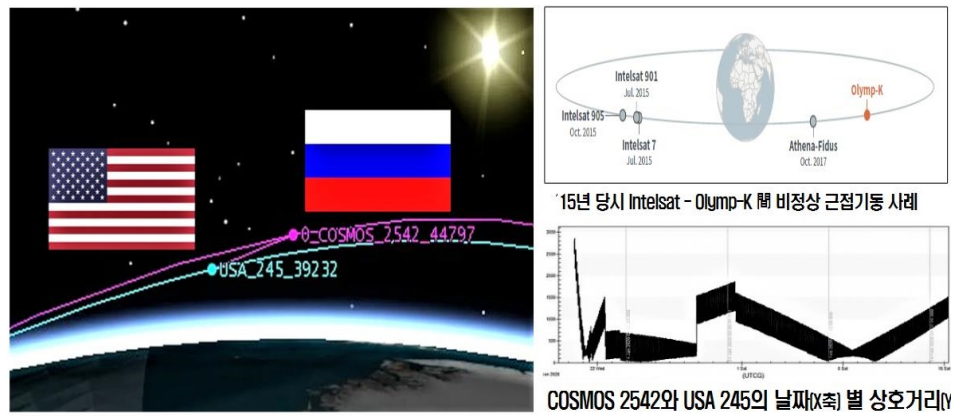


Fig. 6. RPO activities of Russia's olymp satellite against USA satellite. RPO, Rendezvous and Proximity Operations.

Table 1. Recent Russian rendezvous and proximity operations

Date(s)	System(s)	Orbital parameters	비 고
Jun. 2014– Mar. 2016	Cosmos 2499, Briz-KM R/B	1,501 × 1,480 km; 82.4°	위성 간 기동
Apr. 2015– Apr. 2017	Cosmos 2504, Briz-KM R/B	1,507 × 1,172 km; 82.5°	위성 간 랑데부
Mar.– Apr. 2017	Cosmos 2504, FY-1C Debris	1,507 × 848 km; 82.6°	위성-우주 쓰레기 간 접근
Oct. 2014– Feb. 2020	Luch, multiple	35,600 km; 0°	정지궤도에서 타 위성 접근
Aug.– Oct. 2017	Cosmos 2521, Cosmos 2519, Cosmos 2523	670 × 650 km 97.9°	위성 도킹 및 RPO
Mar.– Apr. 2018	Cosmos 2521, Cosmos 2519		위성 간 접근
Aug.– Dec. 2019	Cosmos 2535, Cosmos 2536	623 × 621 km; 97.88°	위성 간 접근 및 RPO
Dec. 2019– Mar. 2020	Cosmos 2542/2543, USA 245	859 × 590 km; 97.9°	위성 간 RPO
Jun.– Oct. 2020	Cosmos 2543, Cosmos 2535		위성 간 접근 및 RPO

RPO, Rendezvous and Proximity Operations.

중국 위성의 타국 정지궤도 위성 랑데부 및 근접기동작전과 저궤도 위성 궤도상 랑데부 사례로 중국의 정지궤도 인공위성인 SJ-17은 2017년과 2018년 인도네시아의 통신위성인 텔کم 35와 가까운 위치에서 랑데부 및 근접기동작전(RPO)을 실시했다(Fig. 7).

2015년 출판된 중국의 연구논문에 따르면, 과학자들은 '정지궤도에서 작은 위성이 큰 위성에 접근해 고화질 사진을 찍고, 빠르게 후퇴해 탐지 가능성을 최소화할 수 있었다.'고 발표했다[16,17](Table 2).

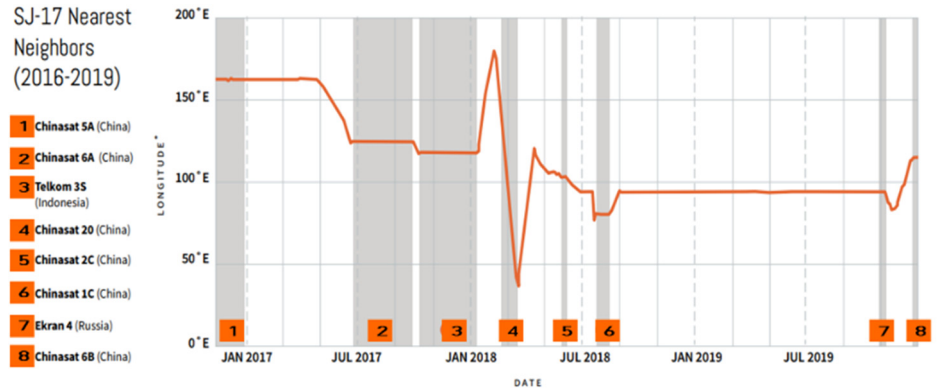


Fig. 7. RPO activities of China satellite against Indonesia satellite. RPO, Rendezvous and Proximity Operations.

Table 2. Recent Chinese rendezvous and proximity operations

Date(s)	System(s)	Orbital parameters	비 고
Jun.– Aug. 2010	SJ-O6F, SJ-12	570–600 km; 97.6°	위성 간 랑데부
Jul. 2013– May 2016	SY-7, CX-3, SJ-15	Approx. 670 km; 98°	SY-7: 로봇팔 / CX-3: 우주감시(광학), SJ-15: 궤도 천이
Nov. 2016– Feb. 2018	SJ-17, YZ-2 upper stage	35,600 km; 0°	SJ-17: Chinasat 5A 랑데부 YZ-2: 정지궤도 → graveyard orbit
Jan.– Apr. 2019	TJS-3, TJS-3 AKM	35,600 km; 0°	위성 간 RPO
Dec. 2021– Jan. 2022	SJ-21, Compass G2, TJS-3	35,876 km; 8°	위성 도킹 및 궤도천이 / TJS-3 위성 간 RPO(미우주군 USA 233 6.2 km 접근)

RPO, Rendezvous and Proximity Operations.

4. 우주 강국의 우주 쓰레기 제거기술 개발 현황

최근 우주 쓰레기가 국제정치 무대의 주요 화두로 떠올랐다. 2021년 6월 영국 콘월에서 열린 주요 7개국(G7) 정상회의에서 이 문제가 주요 안건으로 논의됐기 때문이다. 이번 회의에 참석한 각국 정상들은 공동선언문을 통해 우주 쓰레기 문제 해결을 위해서 “모든 나라들이 함께 움직여야 한다”고 말했고, “지속적인 우주 사용을 위협하는 문제들의 근본적인 해결을 위해 새 국제규범이 필요하다.”고 주장했다[18].

4.1 미국

우주 강국의 우주 쓰레기 제거기술 개발 현황으로 미국은 우주비행체의 수명연장 서비스를 위해 우주비행체(위성 포함)가 중력의 힘으로 궤도가 점점 낮아지는 것을 막고 기존 궤도유지를 위해 연료를 재보급 하거나, 냉각제와 같은 소모품을 재보충하고 고장난 우주부품 교체 등 우주비행체의 수명을 연장하기 위한 궤도상서비스(on-orbit servicing, OOS) 기술을 통해 우주 쓰레기 제거 기술을 개발 중이다. 즉, 궤도상서비스(OOS)은 우주공간에서 우주물체(위성, 우주발사체 상단로켓, 우주정거장 등)를 대상으로 상태 점검(inspection), 자세 유지, 궤도 견인·이동(tug, relocation) 또는 유지(maintenance), 우주 재급유(refueling), 수리(repair), 우주 쓰레기 제거(debris mitigation), 부품 교체(replacement) 및 업그레이드 서비스를 제공하는 것을 포함한다. 궤도상서비스에 필요한 기술은 목표 위성과 동일한 궤도면에 재 진입하여 수천 km-수백 km에서부터 접근하는 랑데부(rendezvous) 기술과 수백 미터-수 미터 내 근접거리를 일정 시간 유지하는 근접기동작전(proximity operation) 기술, 최종적으로 목표물체 몸체(일부 영역)에 닿는 도킹(docking) 기술 등이 있다. 궤도상서비스의 대표적인 개발 사례로 미국 노스롭그루만(northrop grumman)의 자회사 SpaceLogistics는 2020년 2월 세계 최초로 MEV(Mission Extension Vehicle)-1호를 정지궤도상의 Intelsat IS-901에 성공적으로 도킹하여 위성의 수명을 5년간 연장시키는 임무를 수행 중이고, MEV-2는 2020년 8월 발사되어 21년 4월 Intelsat IS-1002와 도킹하여 임무를 수행 중이다. 두 임무의 차이는 MEV-1은 연료가 거의 소진되어 우주무덤으로 폐기된 정지위성에 대해 도킹한 후 정지궤도로 다시 이동시킨 후 자체 추력과 자세제어 제공을 통해 서비스를 재가동시킨 것이며, MEV-2는 운영 중인 정지궤도 상의 위성에 도킹한 점이다. 이들 위성이 제공하는 수명연장 서비스는 연료를 직접 재급유 하거나 부품을 수리하는 것뿐만 아니라, 대상 위성에 도킹하여 자체 추력으로 궤도와 자세를 유지시킴으로써 서비스를 지속할 수 있도록 하는 것으로 2024년에는 Mission Robotic Vehicle를 발사해 MEV-2의 기능에 추가하여 우주 쓰레기를 제거하는 기능도 구현할 예정이다[19,20]. 이러한 수명 연장용 궤도상서비스는 우주 쓰레기 능동적 제거(ADR) 방식 중 접촉 제거(contact removal methods) 방식인 단일 로봇팔 또는 다중 로봇팔 포획으로 정밀하게 우주 쓰레기를 포획하여 대기권으로 유도하여 소멸시킬 수 있다(Fig. 8).

4.2 중국

중국은 우주 쓰레기 제거를 위한 기술 개발에 4가지 방식으로 연구 중이다. 첫째로 접촉 우주 쓰레기 제거(contact removal methods) 방식인 단일 로봇팔 방식으로 미국 CSIS의 ‘우주

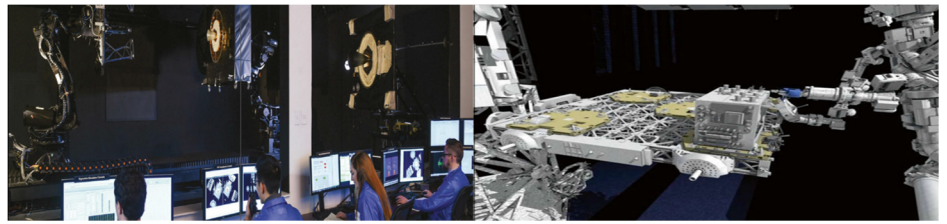


Fig. 8. Mission Extension Vehicle (MEV-1) Lab Test and Robotic Arm.

위협평가(space threat assessment) 2021'에 의하면, 2013년 중국은 세 개의 새로운 위성이 '우주 정비기술에 대한 과학적 실험을 진행하고 있다.'고 밝혔다. 그러나 미국 정부는 하나의 위성이 로봇팔을 가지고 있다고 밝혔으며, 이는 다른 위성을 붙잡을 수 있는 능력을 가지고 있는 것으로 분석했다. 3년 뒤인 2016년, 중국은 아오룽-1을 발사했는데, 아오룽-1은 로봇팔과 소형 위성을 탑재하고 있으며, 이 소형 위성을 임무 과정에서 배치하거나 다시 복귀시킬 수 있었다. 공식적인 발표에 따르면, 아오룽-1은 우주 쓰레기를 모으고 제거하는 기술을 시험하기 위해 만들어졌다고 한다[21]. 둘째로 테더(끈) 기반(tether-based methods) 방식의 그물 포획으로 중국 선양 과학기술대학에서 연구 중이며, ESA가 2002년 제안한 쓰레기 제거 기술 연구 개념과도 유사하게 그물을 활용해 우주 쓰레기를 수거해 대기권에서 태우는 방식이다 [22](Fig. 9). 이러한 우주 쓰레기를 저궤도에서 그물로 향력을 주어 제거하는 방법은 우주 쓰레기의 크기가 로켓바디처럼 큰 경우에는 적용하기 어렵다. 현재 8,000 kg 무게와 태양열판 정도의 크기(36 m)에 대해 그물을 활용한 우주 쓰레기 제거 방식이 연구 중이다.

세 번째, 중국 레이저 추진 기술대학에서 연구 중인 비접촉(contactless methods) 우주 쓰레기 제거방식인 우주 레이저 기반(laser-based) 방식은 레이저를 장착한 우주 쓰레기 제거 위성에서 우주 쓰레기에 레이저를 조사하여 우주 쓰레기의 궤도 속도를 늦추어 점차 고도를 낮추고, 최종적으로 대기권으로 추락을 유도해 대기권에서 소멸시키는 방식으로 국제 우주정거장(international space station, ISS)이나 ORION 우주비행체에 1 cm 정도의 우주 쓰레기(debris)와 충돌을 방지하기 위해 현재 적용되고 있는 방식이다[21,23](Fig. 10).

네 번째 방식은 항력증가 시스템(drag augmentation systems)으로 2022년 7월 중국 상하이 우주비행기술연구원은 로켓 잔해를 제거하는 태양/항력 돛(solar/drag sail)을 선보였다. 우주 쓰레기가 된 우주 발사체 상단로켓이나 위성 잔해에 태양/항력 돛을 붙여 우주 쓰레기



Fig. 9. ROBOTIC ARM DEMONSTRATOR SY-7 & ESA ADR Project CONOPS using Space Net. ESA, European Space Agency; ADR, active debris removal.

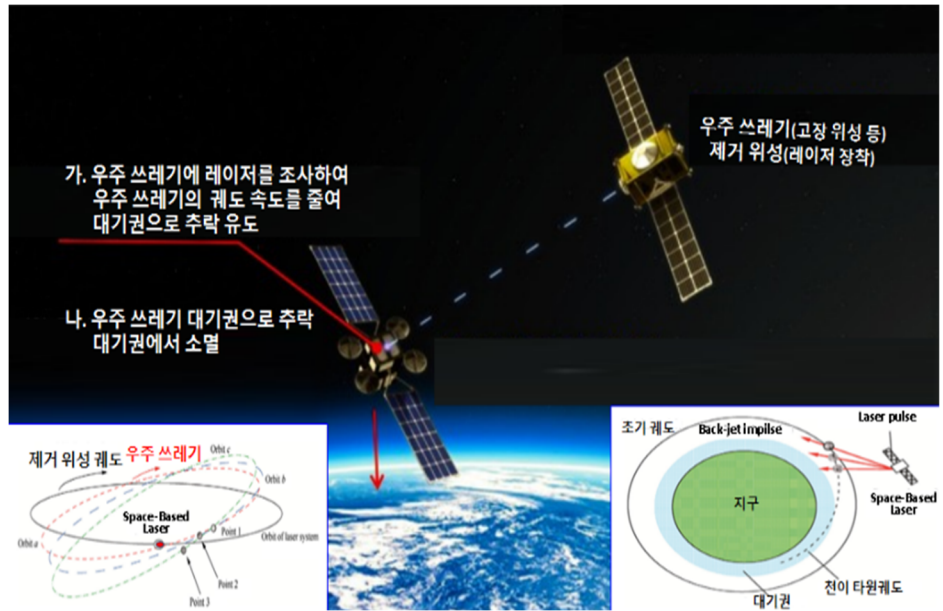


Fig. 10. Illustration of China ADR Project CONOPS using Space Laser. ADR, active debris

의 면적을 크게 하여 대기 항력을 증가시키고 궤도 속도를 늦추어 지구 대기권으로 재진입시켜 완전히 연소시키는 방식이다.

4.3 일본

일본은 현재 전 세계적으로 우주 쓰레기 제거 산업에 가장 앞선 나라로 우주 쓰레기 제거를 위한 기술 개발에 3가지 방식에 대해 연구 중이다. 첫째는 접촉 제거방식으로 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 우주 쓰레기에 접촉해 우주 쓰레기를 제거하는 방식이다. 일본의 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)는 도쿄에 본사를 둔 아스토크스 케일(Astroscale)사와 협력해 2021년 3월 우주 잔해 수거 위성 ELSA-d(180 kg)를 러시아의 소유즈 로켓에 탑재해 지구 저궤도(550 km)에 올려 보냈으며, 2024년 서비스 상용화를 목표로 하고 있다. 이 실험이 성공하면 민간 기업 가운데 우주 쓰레기 제거에 성공한 첫 사례가 된다. ELSA-d(End-of-Life Service by Astroscale)는 일종의 모션인 서비스 위성과 강한 자성을 가진 클라이언트 위성을 발사해 금속 성분의 우주 쓰레기를 수거해 대기권에서 태우는 우주 쓰레기 청소위성이다[24](Fig. 11).

이번 실험은 실제 궤도에 있는 우주 쓰레기를 목표로 하는 것은 아니고, 영국 서리대학교에서 설립한 위성전문업체 Surrey Satellite Technology의 위성(20 kg)을 목표로 하는 추적 실험이다. 실제 궤도에 있는 우주 쓰레기를 청소하기 위해서는 먼저 그 우주 쓰레기의 소유국과 협의가 되어야 하고, 그 우주 쓰레기가 정확히 어디에 있는지도 예측하여 그 궤도로 접근해야 한다. 목표로 하는 궤도에 정확히 도착해 목표 위성에 랑데부와 근접 기동작전을 할 수 있어야만 제거를 위한 여러 기술을 쓸 수 있다. ELSA-d는 목표 위성과 함께 발사되어 궤도에서 분리과정을 거친 다음에 다시 쫓아가 잡아서 대기권으로 재돌입시키는 기동 기술을 시도한다[11]. 우주 쓰레기 제거 위성이 우주 쓰레기에 효율적으로 접근하는 방법에 대한 연구사례로 100 km 근방에서 우주 쓰레기에 대해 탑재된 광학 카메라를 활용해 각도만으로 접근하고,

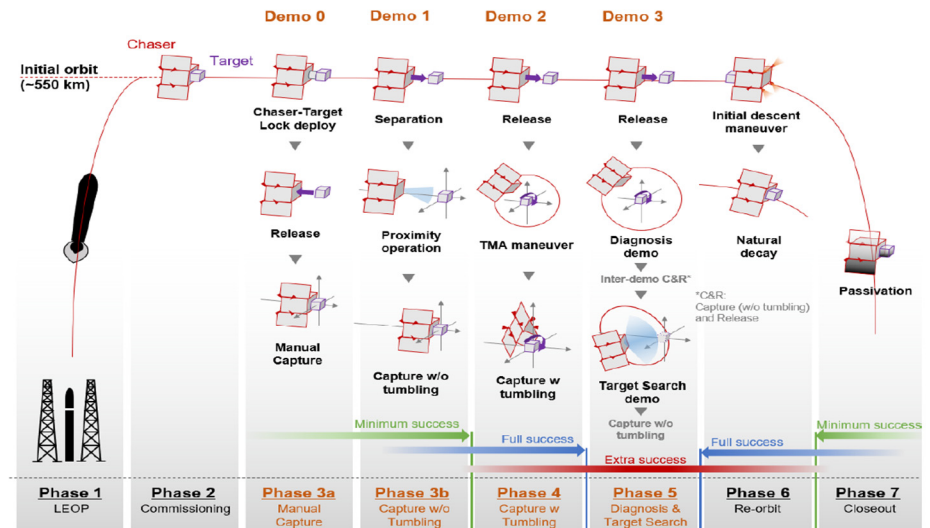


Fig. 11. Illustration of ELSA-d CONOPS. ELSA-d, end-of-life service by astroscale.

20 km에서 4 km까지는 적외선 카메라를 활용해 접근 후 최종단계(1 km)에서는 속도로 접근하는 단계별 접근 방법을 보여준다[25](Fig. 12).

둘째로 비접촉(contactless methods) 우주 쓰레기 제거방식인 레이저 기반(laser-based) 방식으로 일본 위성통신 회사인 ‘스카이 퍼펙트 JSAT’은 2026년 실용화를 목표로 레이저를 이용해 우주 쓰레기를 청소하는 위성을 개발하고 있다. 수십 m 이상 떨어진 곳에서 레이저를 쏘아 우주 쓰레기 표면을 기화시켜 항력을 만들고, 이로 인해 궤도 속도를 늦추게 하여 대기권에서 소멸시키는 방식이다[26]. 셋째는 테더(끈) 기반 방식으로 일본 스타트업 ‘에일’은 일본 우주항공연구개발기구(JAXA)와 손잡고 2025년에 상용화를 목표로 전도성 끈을 이용한 청소 기법을 개발 중으로 운영개념[27]은 지구 자기장 간섭 현상을 이용하는 원리로 수십 km 길이의 전도성 끈(EDT)을 우주 쓰레기에 달아 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해 발생한 항력이 발생하여 궤도 속도를 늦추어 궤도 이탈(de-orbit) 시키는 방식으로 지구 자자기 변화, 중력 변화 등의 우주기상 변화로 저궤도(1,200 km까지)까지만 적용 가능하며, 5-10 km 전도성 끈(EDT)을 적용 시 1년 이내 우주 쓰레기 제거가 가능하다고 한다[28,29]. 로렌츠 힘(Lorentz force)은 자기장에 의해 전류가 흐르는 도선 또는 전하를 가지고 운동하는 입자에 작용하는 힘으로 움직이는 속도 방향과 자기 마당의 방향에 모두 수직인 방향으로 힘을 받는다[30](Fig. 13).

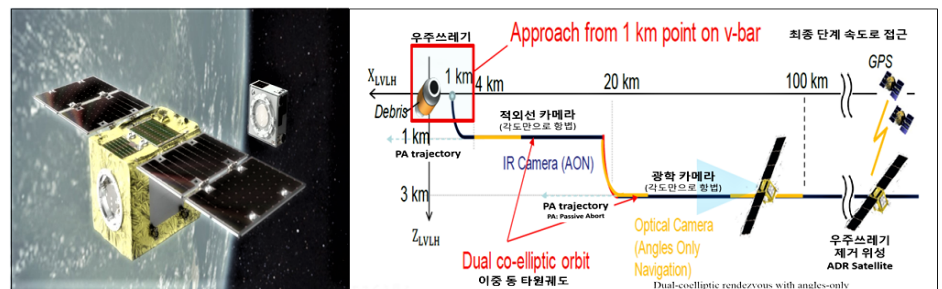


Fig. 12. Illustration of ELSA-d specific CONOPS of ADR. ELSA-d, end-of-life service by astroscale; ADR, active debris removal.

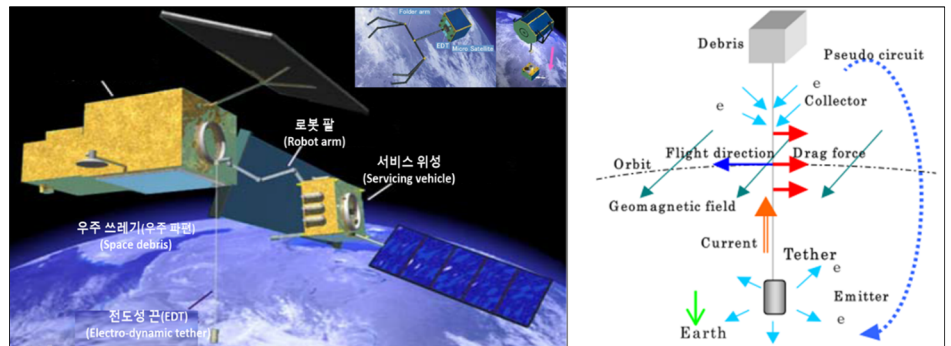


Fig. 13. Illustration of active debris removal (ADR) project using EDT & Lorentz force. EDT, electro-dynamic tether.

4.4 유럽우주국(European Space Agency, ESA)

유럽우주국(ESA)은 우주 쓰레기 제거를 위한 기술 개발에 3가지 방식에 대해 연구 중이다. 첫째 접촉 제거방식 중 촉수포획(tentacle capturing, 집게 팔)으로 2020년부터 우주 쓰레기 제거 프로젝트(클리어스페이스-1)를 개발시험 중이다(Fig. 14).

유럽우주국(ESA)의 ‘클리어스페이스(-1)’은 저궤도 우주 쓰레기 제거를 위한 기술 개발 검증 계획으로 2025년경 로봇팔 4개가 달린 청소 위성을 우주로 올려보내 베스파를 직접 붙잡아 제거할 계획이다. 베스파(Vespa)라고 불리는 물체는 인공위성을 쏘아 올리는 로켓에서 위성파 로켓을 연결하는 부품으로 지난 2013년에 대기권으로 떨어지지 않고 계속 우주 궤도에 남아 있다. ‘베스파’는 무게 112 kg의 베가 로켓 상단의 위성 어댑터로 현재 근지점 고도 679 km, 원지점 고도 790 km 부근에 있지만, 2025년에는 이보다 궤도가 낮아질 것이라 예상된다. 주목할 만한 점은 ‘클리어스페이스-1’은 실제로 우주에 떠다니는 우주 쓰레기를 대상으로 직접 추적해서 수거한다는 것이다.[11](Fig. 15).

둘째로 테더(끈) 기반(tether-based methods) 방식의 그물포획 및 작살방식으로 유럽우주국(ESA)이 제안한 또 다른 우주 쓰레기 제거 프로젝트 개념은 그물을 펼쳐 지구 궤도를 도는

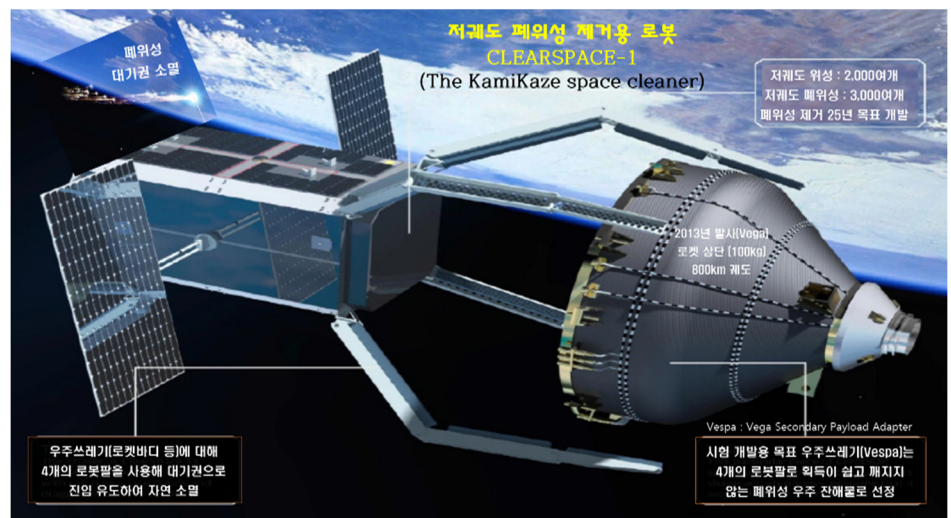


Fig. 14. Illustration of ClearSpace-1 Detail Shape.

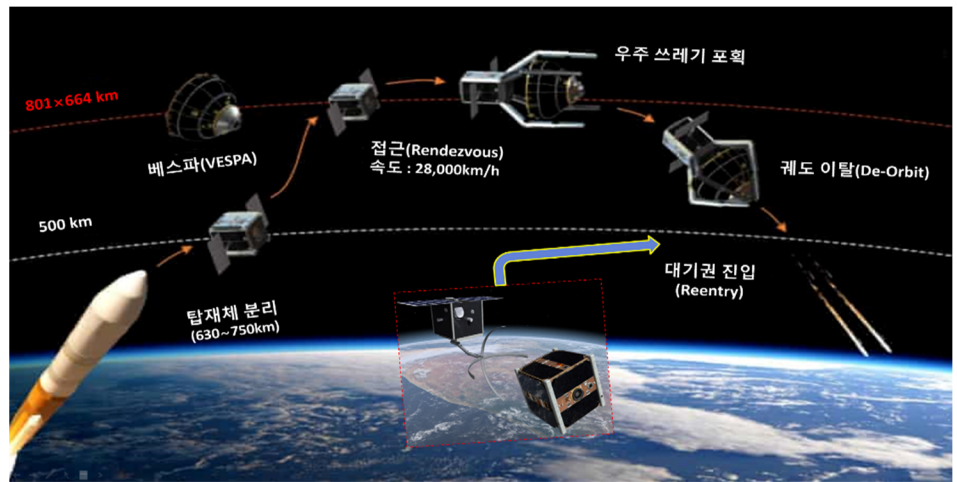


Fig. 15. Illustration of ClearSpace-1 Project CONOPS.

우주 쓰레기를 수거하는 방법이다. 이러한 기술을 검증하기 위해 영국의 에어버스는 리무브 데브리스(RemoveDebris)를 2018년 10월 발사했다. 리무브데브리스는 그물로 포획하는 실험과 카메라와 라이더(light detection and ranging)를 이용해 파편을 추적 관찰하는 실험 그리고 작살(초속 20 m 속력)을 던져 파편에 명중시키는 실험(2D 카메라와 3D 라이다로 우주 쓰레기의 움직임을 감지하고 동선을 추적해 탐색하는 실험)이었다. 개발시험을 위해 우주 쓰레기 역할을 할 큐브위성 DS-1을 본체 위성과 함께 발사됐다. 리무브데브리스는 랑데부, 근접기동작전 & 도킹(rendevous proximity operation & docking) 기술보다는 인공위성에서 로봇팔이나 작살을 안정적으로 동작시키는 데 초점을 두었다고 할 수 있다. 우주 쓰레기를 포획하기 위한 그물을 안정적으로 펼치는 것이나, 작살이 목표에 정확히 고정되는지 그리고 줄로 연결된 작살이 우주 쓰레기에 부착되었을 때 그 충격이 모체 위성에 영향을 주는지 등 여러 상황을 확인할 수 있었고, 직경 2m, 질량 2톤의 물체를 포획할 수 있는 그물로 잔해를 포착해 대기권에 진입시키는 실험까지 성공적으로 완료했다. 세부적으로 설명하면, 먼저 DS-1을 리무브데브리스와 7 m 떨어진 거리에 두고 그물로 포획하고 이후 로봇팔을 이용해 10 m 떨어진 곳에 큐브위성을 두고 줄이 연결된 작살을 발사해 맞추는 방식으로 진행되었다(Fig. 16). 셋째로 항력증가 시스템(drag augmentation systems)으로 2022년 3월 마지막 실험을 위해 공기저항을 극대화하는 10 m² 크기의 항력 돛(drag sail)을 펼쳤다. 이 돛이 에어 브레이크 역할을 하여 지구 궤도에 존재하는 희박한 대기에 대한 항력을 증가시킨다. 그렇게 별도의 연료를 사용하지 않고도 대기권으로 빠르게 진입(재돌입)시킬 수 있다. 현재 리무브데브리스는 고도 360 km에 있으며, 2022년 12월 3.5 m² 크기의 돛으로 우주 궤도에 성공적으로 배치되었다[31]. 참고로 항력 돛(drag sail)을 사용하지 않는 1U 큐브셋의 경우 우주 공간에 머무는 시간은 2,500일이나, 항력 돛(drag sail)을 사용하는 방법은 우주 궤도상 우주 쓰레기를 50-250일 안에 대기권으로 재돌입시킬 수 있다.

4.5 호주

호주는 우주 쓰레기이나 기능 정지된 폐 위성을 제거하기 위해 비접촉(contactless methods) 우주 쓰레기 제거방식의 형태인 지상 레이저 기반(laser-based) 방식에 대한 연구

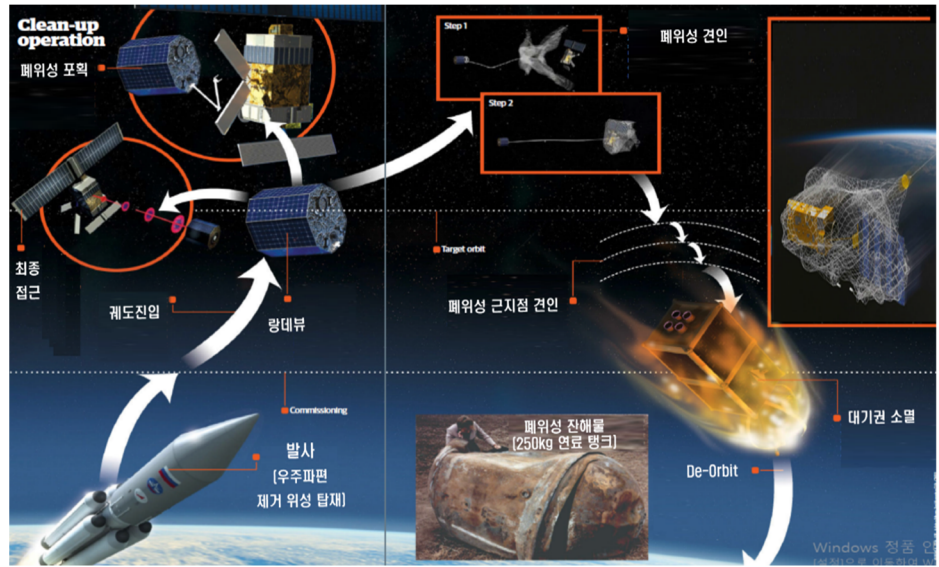


Fig. 16. Illustration of RemoveDebris Project CONOPS.

가 진행되고 있다[11]. 고출력 레이저를 우주 쓰레기나 폐 위성에 조사하여 플라즈마 제트 기류를 발생시켜 대기항력을 키워 궤도 유지속도를 잃게 되고 중력에 의해 대기권 소멸이나 바다 위 추락을 유도하여 제거하는 개념이다(Fig. 17).

이 방법의 장점은 첫째, 우주 쓰레기의 크기에 제한을 받지 않는다는 점이다[32]. 즉, 크기가 큰 우주 쓰레기에 대해서도 제거가 가능하다. 둘째, 회전하는(tumbling) 우주 쓰레기에 대해서는 로봇팔과 같은 방법으로 제거가 어렵지만, 레이저로 제거 시 상대적으로 용이하다. 이 외에도 우주 쓰레기에 의한 위성 충돌에 대비해 레이저로 우주 쓰레기의 궤도를 변경하거나 우주 쓰레기의 지상 추락 지점을 유도 가능한 점이 있다. 단점으로는 우주 쓰레기가 지상 레이저 상공으로 지나가는 시간(16초 이내)만 우주 쓰레기에 대해 레이저를 발사할 수 있는데,

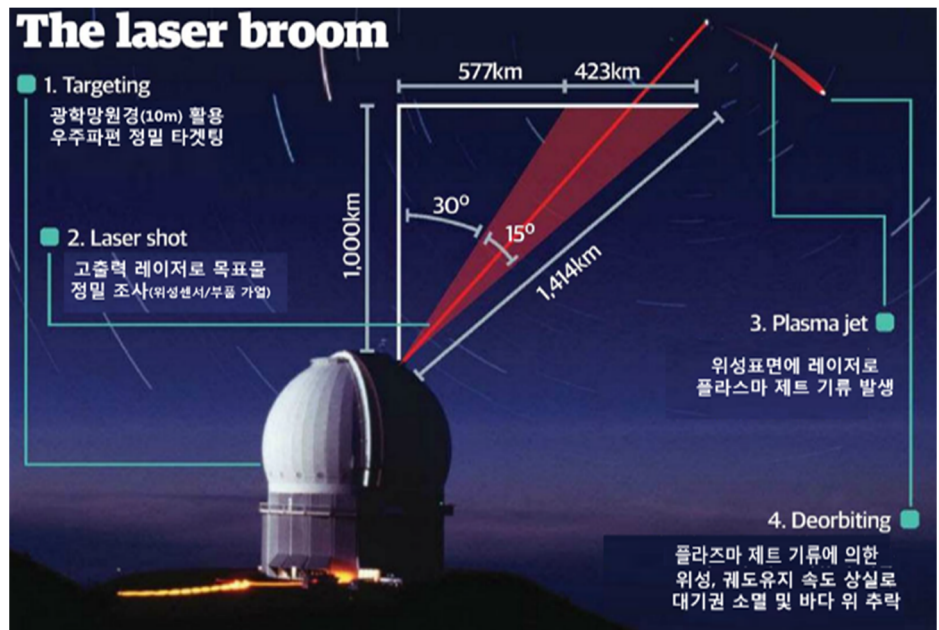


Fig. 17. Illustration of active debris removal (ADR) project CONOPS using ground laser.

우주 궤도 200 km까지 우주 쓰레기를 추락하기 시키기까지 수백 번의 레이저 발사를 해야 한다는 점이다. 이처럼 지상에서 우주 쓰레기를 제거하는 방법은 지상에 구축하여 가장 효율적인 방안이나, 우주무기라는 정치적인 우려로 국제적인 상호 이해가 필요하다[33].

4.6 기타 국가

우주 쓰레기를 제거하기 위한 기타 방법으로 싱가포르의 접촉 제거방식 중 촉수포획(tentacle capturing, 집게 팔) 방식을 연구 중인데, 우주 쓰레기 제거 위성에 로봇팔로 금속 성분의 우주 쓰레기(크기 5 cm 미만)를 잡아 금속 수집 캔에 모아 금속 수집 캔(가득 찬)을 전자기 코일 건 장치(coil gun mechanism)를 이용해 대기권으로 발사하여 소멸시키거나, 비금속 성분의 우주 쓰레기(크기 5 cm 초과)는 로봇팔로 직접 잡아 대기권으로 이동해 우주 쓰레기를 고열(1,500°C)에 소멸시키는 방법이다[34]. 로봇팔에는 우주 쓰레기를 감지하기 위한 카메라와 센서가 장착되어 우주 쓰레기의 성분, 크기, 속도 등을 감지한다. 이외에 스위스와 국내에서는 접촉 제거방식 중 새총(slingshot) 방식과 유사하게 큐브위성에 총알(0.1 kg) 5발을 장착한 총을 탑재해 우주 쓰레기(직경 0.2-1 inch)에 총알을 맞추어 궤도 속도를 늦추게 하고 대기권에서 소멸시키는 방법이 연구되고 있다[35].

이 방법은 일정한 거리에서 우주 쓰레기를 제거하기 때문에 다소 안전하다. 또한, 2016년부터 국내 대학에서 큐브위성의 태양 돛 개발 연구를 진행 중이다. 러시아의 경우 우주 스타트업 '스타로켓'은 '폼 브레이크 캐처(foam breaks catcher)'라는 기술을 이용해 우주 쓰레기를 수거하는 위성을 개발 중이다. 항력증가 시스템인 폼(foam) 방식으로 우주 쓰레기 제거 위성이 목표 위성에 접근(랑데부)하여 폼을 위성 표면에 분사하여 구 모양으로 단위면적을 크게 하여 항력을 증가시켜 고도를 낮추게 하는 방식이다. 빠르면 2023년 발사를 목표로 하고 원통형 위성은 중량 50 kg으로 우주 쓰레기들이 모여 있는 공간에 끈적끈적한 폴리머 거품을 방출해 우주 쓰레기들이 붙게 한 후 궤도 속도를 늦추게 하여 지구 대기권으로 떨어뜨려 소멸시키는 방식이다[36](Fig. 18). 이외에도 영국의 '서리 새틀라이트 테크놀로지'는 그물을 던져 우주 쓰레기(최대 10 cm)를 잡는데 성공한 바 있다[37].

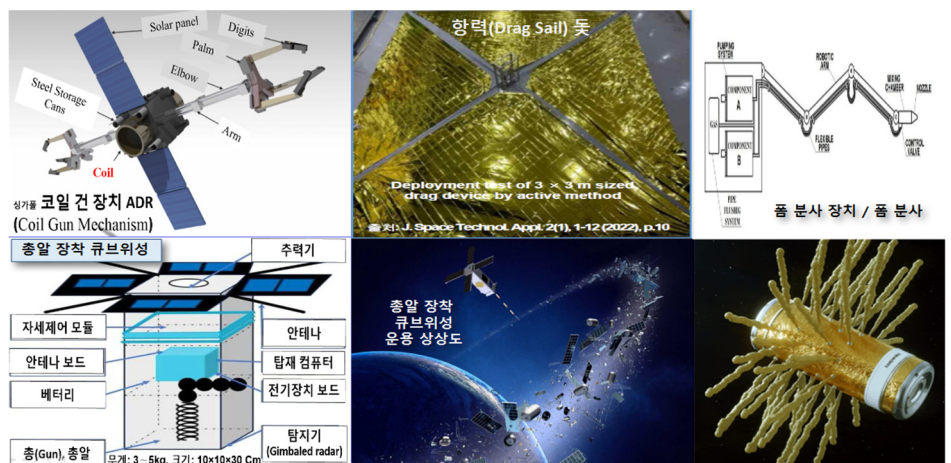


Fig. 18. Illustration of ADR project CONOPS using gun bullet, drag sail, foam. ADR, active debris removal.

5. 우주 쓰레기 제거기술 활용, 우주무기 개발 개연성 고찰

우주 궤도상 우주자산을 일시적 혹은 영구히 무력화하는 방법에는 적성국의 킬러위성이 아닌 위성의 동일 궤도상에 위치한 후 근접기동하여 라디오 주파수 재머, 고출력 마이크로웨이브, 운동성 공격무기, 레이저, 로봇팔, 화학 스프레이 등을 활용하는 방법이 있으며, 상대적 거리에 따라 다양한 공격방법이 우주 선진국에서 연구되고 있다(Fig. 19). 러시아(구소련)는 냉전 시절부터 위성을 활용한 우주자산 공격 기술 개발에 중점을 두었고, 미국은 2010년부터 X-37B 재진입 무인 우주비행체를 통해 위성을 활용한 우주자산 공격 기술 시험을 수행하였다. 또한 중국은 2016년에 킬러위성 기술 시험을 위해 로봇팔을 장착한 위성을 발사하였다.

5.1 우주 쓰레기 제거기술에 대한 기술성숙도[TRL(Technology Readiness Level)] 현황

우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발 개연성을 고려해 보면, 우주 쓰레기 제거 방식은 우주 쓰레기의 궤도(고도) 위치, 크기에 따라 적용하는 방식이 다양하고 방식마다 장·단점이 있다. 또한, 각각의 우주 쓰레기 제거기술에 대한 기술성숙도(technology readiness level, TRL), 제거 소요기간, 구축비용이 다양해 우주 강국들은 목표 대상에 따라 다양한 방식의 우주 쓰레기 제거 기술을 개발 중이다[21]. 예를 들면 우주 쓰레기와 일정한 거리에서 그물 또는 작살을 이용하거나, 팽창하는 폼(foam)을 발사하여 우주 쓰레기의 항력을 높여 우주 궤도 속도를 낮추어 대기권에서 소멸시키는 우주 쓰레기를 제거하는 방식은 우주 쓰레기에 직접 접근해서 제거하는 방법보다는 안전하지만, 지구 대기권에 재돌입시(re-entry) 소멸하지 않은 일부 우주 쓰레기로 인해 지상에 피해를 줄 가능성이 있다. 우주 쓰레기 제거기술에 대한 현재 기술성숙도(TRL) 현황으로 작살을 이용한 우주 쓰레기 제거 방법은 작살에 항법장비(광학 카메라)와 추진체(제트 추진)를 탑재하여 우주 쓰레기로 접근해 우주 쓰레기와 함께 대기권으로 유도 소멸시키는 방법으로 기술성숙도(TRL 5)가 높은 편이고, 팽창하는 폼(foam)을 우주 쓰레기에 발사하는 방법은 진공상태에서 폼을 우주 쓰레기에 부착시키고 팽창시키는 기술로 기술성숙도(TRL 3)가 낮은 편이다[38]. 또한, 로봇팔 등을 이용해 우주 공간에서 우주 쓰레기에 접근하여 우주 쓰레기를 직접 제거(capturing removal)하는 방법은 비용이 상대적으로 낮아 우주강국 대부분의 나라에서 개발 중이며, 기술성숙도(TRL 4)가 연구개발 진입에 가능한 수준이다. 그리고 레이저 등을 우주 쓰레기에 발사하여 궤도 속도를 낮추어 대기권에 소멸시키는 추진력 이용 궤도이탈(propulsion deorbit) 방식은 기술성숙도(TRL 3)는 연구개발

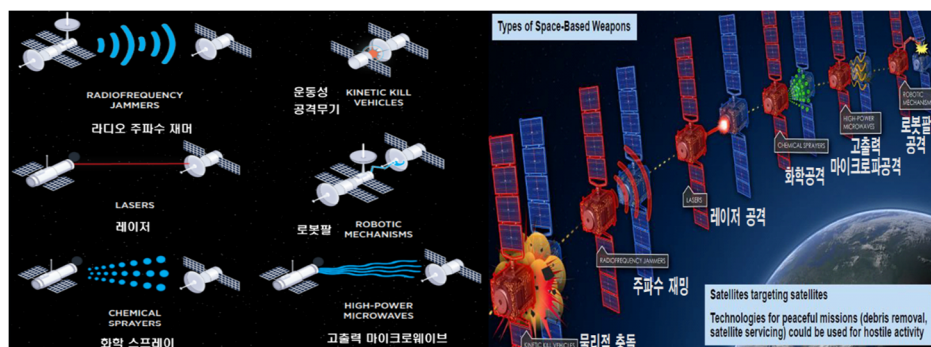


Fig. 19. Types of space-based weapons.

이 가능한 수준이나, 우주무기로 직접 이용될 수 있다는 우려로 국제적인 상호이해가 필요하다. 또한, 태양/항력 돛(solar/drag sail) 등을 이용하는 항력 발생(drag augmentation) 방식은 저궤도 우주 쓰레기 제거에만 적용이 가능한 방식이다[39](Fig. 20).

종합하면 국방 획득분야에서 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주 강국의 우주무기 개발 방향은 단기적으로는 탐색개발에서 체계개발이 가능한 기술성숙도(TRL) 6 이상인 태양/항력 돛(solar/drag sail) 방식이 개발 가능성이 높으며, 우주 쓰레기 제거 기술 중 기술성숙도(TRL) 3 이상인 촉수, 전도성 끈, 레이저, 폼, 로봇팔, 작살, 그물, 이온 빔, 팽창 방식 등에 대한 연구개발 진입이 가능하다. 특히, 우주강국들은 비용과 제거 소요기간을 고려할시 작살(TRL 5)과 로봇팔(TRL 4), 그물(TRL 4), 촉수(TRL 3) 방식 기술을 적용한 우주 쓰레기 기술 개발에 집중할 것으로 판단된다. 장기적으로는 군사적 활용이 용이한 이온 빔(TRL 4), 레이저(TRL 3) 방식 개발도 병행할 것으로 예상된다.

5.2 중국 우주무기 개발 개연성

2021년 미국 국제전략연구소(CSIS)에서 발간한 우주위협 평가 보고서에 의하면, 2016년 6월 중국은 하이안다오에서 창정 7호 로켓에 위성 스펙 17호(아오룽-1)를 탑재해 발사했고 문어발처럼 생긴 로봇팔로 우주 쓰레기를 제거할 수 있다고 한다[40]. 2020년 스펙 17호(아오룽-1)가 중국의 정지궤도 위성을 대상으로 랑데부 및 근접기동작전을 수행한 건과 관련해 중국 국가항천국(China National Space Administration)은 “스펙 17호(아오룽-1)를 이용해 수명이 다한 위성을 바다로 안전하게 추락시킬 수 있다”고 밝혔다. 이러한 우주 쓰레기 제거용 위성은 필요시 군사적 용도로 다른 국가 위성의 궤도를 바꾸거나 물리적 충격을 가해 기능 장애를 일으킬 수 있을 것으로 판단된다. 이외에도 중국은 2016년 스펙 17호(아오룽-1)와 같은 임무를 가지고 있는 텐위안-1을 배치했는데, 중국 언론에 따르면 텐위안-1은 궤도상에서 다른 인공위성에 연료를 주입하는 데 성공했다고 발표했고, 미국 언론은 이것이 위성 공격 무기로도 사용될 가능성이 있다고 보도했다[41]. 또한, 2022년 1월 발사된 시지엔-21은 위성폐기

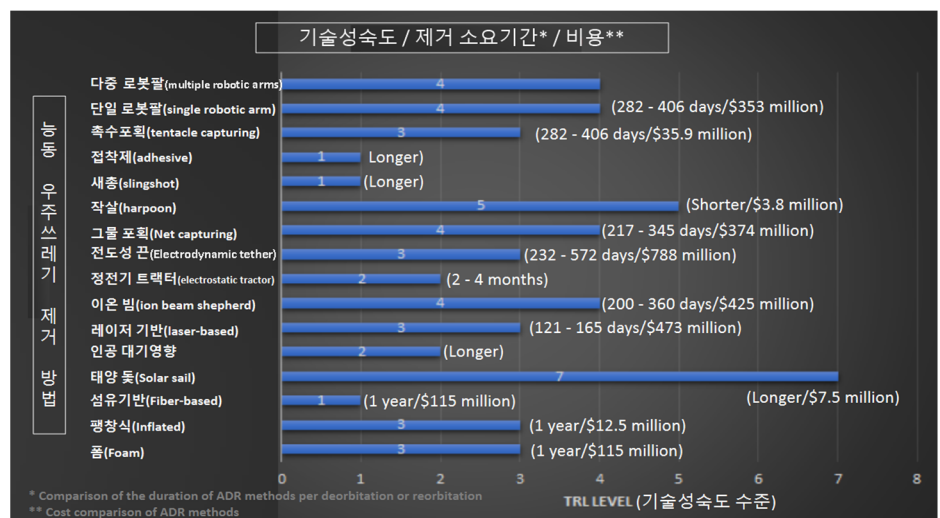


Fig. 20. Comparisons of different ADR methods by TRL, duration, cost. ADR, active debris removal; TRL, technology readiness level.

방식의 일종으로 BeiDou GPS 위성에 접근하여 고장난 위성을 위성궤도 밖으로 끌고 나가는 위성운용 능력을 보여주었다(Fig. 21).

5.3 프랑스, 일본 우주무기 개발 개연성

2019년 9월 공군 예하 우주사령부를 창설한 프랑스는 2019년 12월 '위성 방어용 레이저 무기를 개발할 것'이라고 발표했다[42]. 이 당시 프랑스 국방장관(플로랑스 파를리) 은 리옹 몽베르팅 공군기지에서 기자회견을 열고 "우리의 위성이 위협받는다면 적들의 위성을 일시적으로 눈멀게 할 것"이라며, 적의 위성에 반격할 레이저를 장착한 방어위성 혹은 레이저를 장착한 감시 나노위성을 2025년에 초기 배치(2030년에 완성 목표)한다고 발표했다[43]. 방어위성이 나노위성의 크기로 개발될 것을 고려시 저출력의 레이저 생성만 가능할 것으로 예상되며, 접근하는 목표위성에 대해 저 출력의 레이저로 목표위성의 광학장비에 대한 dazzle 혹은 blind만이 가능할 것으로 판단된다[44]. 프랑스의 위성 방어무기 개발 구상은 2017년에 러시아의 첩보 위성이 프랑스와 이탈리아가 공동으로 운용하는 군사위성 아테나-피두스에 매우 가까이 접근해 감청을 시도한 이후부터 구체화하기 시작했다(Fig. 22).

또한, 일본도 우주 이용에 대한 우위 확보를 위한 능력 강화의 일환으로 우주공간에서 다른 위성을 무력화하는 방해위성을 2020년대 중반에 띄우는 방안을 검토했다[45]. 이러한 임무를 수행할 첫 우주 전문부대인 우주작전대가 도쿄도 소재 후추기지에서 20여 명 규모로 2020년 5월 18일 창설되었다[46]. 이외에도 일본 방위성은 우주 공간의 경계·감시나 인공위성의 수리·보급을 담당하는 '우주 순회선'의 건조를 검토 중이라고 발표했다. 우주 순회선은 일본 방위성이 목표로 하는 우주상황인식(space situational awareness, SSA) 능력 향상의 일환으

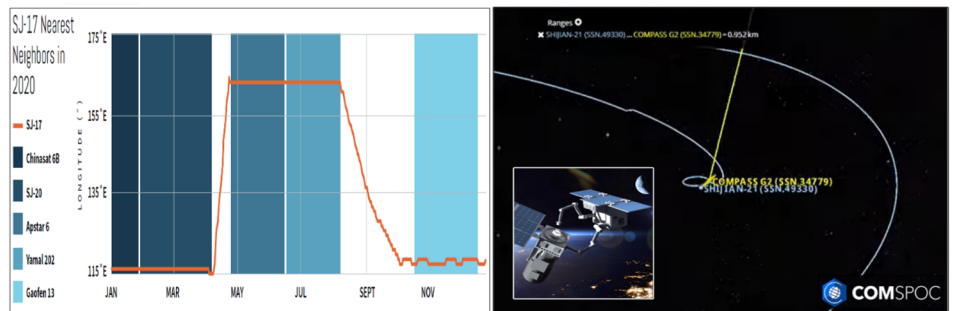


Fig. 21. RPO activities of CJ-17 satellite & docking of Shijian-21 to Beidou. RPO, Rendezvous and Proximity Operations.



Fig. 22. Sets Up of France Space Command & CONOP of Defense Satellite using laser.

로 우주공간을 자유롭게 항행하는 무인선을 상정하고, 발사 시기는 2026년으로 2022년도 예산 요구에 조사·연구비 1억 엔을 반영했다. '우주 순회선'은 정지궤도 고도에서 광학 탑재체를 통해 일본 위성에 접근하는 킬러위성을 감시하는 임무를 부여할 예정이다. 향후, 우주 순회선이 개발되어 운영되면 위성의 수리·보급이 가능하고 위성의 고장이나 연료 고갈 등의 대처를 통해 일본위성의 사용기간 연장이 가능하며, 위성 운용에 관한 비용 감소가 예상된다 [47](Fig. 23). 이처럼 프랑스와 일본은 향후 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 방어위성 운영을 통해 자국위성을 보호할 것으로 예상된다.

5.4 민·군 이중용도가 가능한 우주 쓰레기 제거기술

지금까지 우주 주요강국의 우주 쓰레기 제거기술 개발 현황을 알아보고 우주 쓰레기 제거 기술을 활용한 우주무기 개발 개연성에 대해 고찰해 보았다. UN에서는 우주 공간에 핵무기나 기타 대량파괴 무기를 시험하고 배치하는 것을 금지하고 있다. 하지만 상대국의 위성을 파괴하고 전파를 방해하는 등 우주위협에 대응하기 위한 시스템을 개발하는 것에 대한 적극적인 규제는 없는 것이 현실이다. 우주의 평화적 이용을 위해서 그리고 우주를 보호하기 위해서 우주위협에 대응하기 위한 우주안보 능력을 확보하겠다는 것이 주요 국가들의 전략인 것이다. 즉, 우주자산인 인공위성을 보호하고 정보에 우위를 점하면서 우주공간의 상업적 이용을 위한 기술을 선점하려는 것이다[11]. 2020년 9월 발표된 미국의 국가우주정책에 의하면 '현재와 미래에 미국의 효율적으로 억제와 방어가 가능한 우주임무에 위협을 식별하고 특정한다. 주요 국가안보 우주임무를 보장하기 위해 필요한 계획, 절차, 기술을 개발하고 적용 및 연습한다.'고 천명하였다[48]. 이는 우주 쓰레기 제거기술을 활용해 우주무기를 개발함을 암시하는 것이다. 본 글을 작성하면서 본인은 미국, 중국, 러시아 등 우주 강국이 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발을 비공개로 수행하고 있음을 확인했고, 이러한 우주 쓰레기 제거용 위성은 필요시 군사적 용도로 다른 국가위성의 궤도를 바꾸거나 물리적 충격을 가해 기능 장애를 일으킬 수 있을 개연성이 충분히 있다고 판단되었다. 특히, 로봇팔 기술은 평시에 우주 쓰레기 제거와 같이 평화적으로 사용될 계획이지만, 전시상황에서는 다량의 킬러위성을 활용하여 동시 다발적으로 아군의 주요 우주자산 무력화를 위해 공격무기로 활용될 수 있다는 점에 주목해야 한다. 2021년 2월 개최된 제36회 우주개발진흥실무위원회에서 '정부는 우주 쓰레기 제거기술 개발을 위한 중장기 로드맵을 마련한다.'고 발표했다. 이 계획에는 우주 쓰레기 제거기술을 활용해 최종적으로는 정지궤도 위성의 수명을 연장하는 궤도상서비스 기술 개

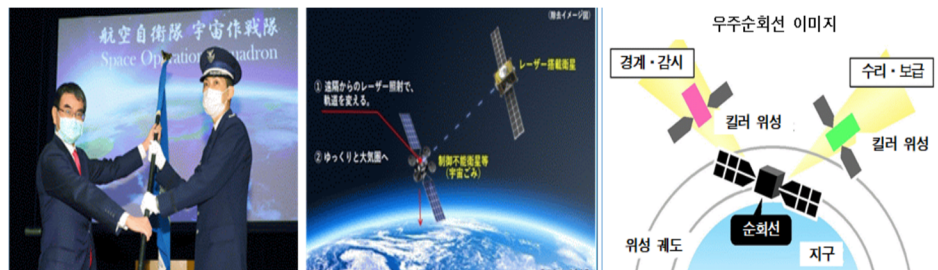


Fig. 23. Sets Up of Japan Space Operations Squadron & Surveillance Satellite Mission Concept.

발이 목표라고 한다. 이러한 궤도상서비스 기술은 적성위성이 자국위성에 대해 공격을 시도 하는 것으로 부터 아 위성을 보호하거나, 필요시 군사용으로 전환할 수 있는 기술이다. 월드 뉴클리어뉴스(wnn) 2022년 12월 6일자 기사에 의하면, “영국 원자력청(United Kingdom Atomic Energy Authority, UKAEA)은 핵융합에너지 연구용 첨단 원격처리·로봇 기술을 이용해 지구궤도 위성의 유지·보수에 어떻게 사용될 수 있는지 연구하고 있다.”고 보도했는데, 이러한 로봇팔 기술은 위성의 운영 수명을 연장할 수 있으며, 능동적인 우주 쓰레기 제거 임 무에도 사용될 수 있다[49]. 이와 관련 우리나라도 우주 쓰레기 제거기술(ADR) 및 궤도상서 비싱(OOS) 기술을 개발할 예정으로 민과 군에 공통적용이 가능한 민·군 이중용도 우주기술 은 민·군 협업으로 개발할 것을 제안한다(Fig. 24).

6. 우주기동전(Space Maneuver Warfare)의 이해와 발전방향

중국과 러시아는 우주전쟁에서 결정적 전투력 확보를 위해 우주기동전 수행능력 향상에 주 력하고 있다. 중국은 우주에서 기동력 향상을 위해 우주핵추진체계를 이용하여 지구궤도 우 주선과 달 왕복선을 개발하고, 2040년까지 핵추진체계가 탑재된 위성군을 구성하여 우주기동 전에서 미국의 위성군 능력을 초월할 것으로 예상되며, 빠르면 2030년까지 우주핵추진체계 (space nuclear thermal propulsion, SNTP)를 실전 배치할 것으로 예상된다(Fig. 25). 이러한

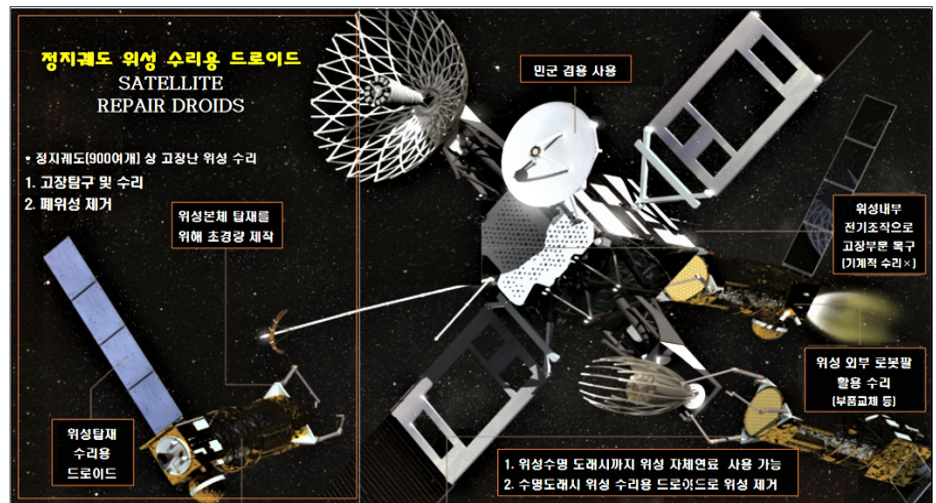


Fig. 24. On orbit servicing for extension of satellite life cycle.

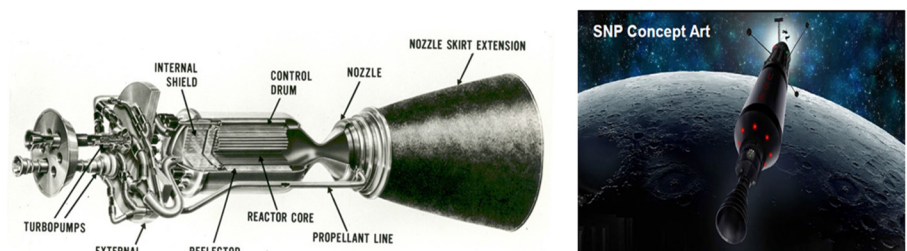


Fig. 25. Nuclear thermal propulsion engine & Chinese SNTP concept. SNTP, space nuclear thermal propulsion.

움직임에 미국은 우주영역에서 공격과 방어작전을 수행하기 위해 현 위성과 우주비행체들이 화학추진제를 사용하여 궤도예측이 가능하고, 위성과 우주비행체의 수명인 탑재연료의 한계로 궤도 간 기동이 제한적인 점을 고려해 미래 우주기동전 수행능력을 구축 중에 있다. 현재 미 우주군이 구상하는 위성군 아키텍처는 제한적인 기동성과 적 공격에 방어가 제한적인 것으로 평가되고 있다[50]. 또한, 미래 궤도전(orbital warfare)에 대비하기 위해 미 우주군과 연합우주군이 계속해서 합동군에게 능력을 제공할 수 있도록 보장하며, 적국에 대한 동일한 이점을 부인하기 위한 준비를 하고 있다. 이러한 상황에 중국과 러시아는 새로운 대위성무기(ASAT) 개발과 연료효율이 좋은 우주 핵 추진기관(SNTP) 기술 개발에 박차를 가하고 있는 게 현실이다. 이에 미 우주군의 미래 작전개념인 우주기동전을 이해하고 발전방향에 대해 알아보려고 한다.

6.1 우주기동전의 개념

우주기동전은 우주영역에서 적보다 빠른 기동력을 바탕으로 적의 강점을 회피하고 적의 물리적, 심리적 중심을 타격하는 작전으로 적의 중심은 가장 취약한 부분으로 정의한다. 성공적인 우주기동전은 적의 취약한 부분에 대해 강력하고, 신속하며 지속적으로 타격하는 것으로 정의하는데, 적 공격을 억제하고 적 공격 방책을 무력화시키는 능력 보유가 필수적이다. 이처럼 우주기동전의 목적은 적의 약점을 최대한 이용하고 아군의 강점을 극대화하는 것에 중점을 두는 것이다[51].

우주쓰레기 제거기술의 핵심은 랑데부/도킹이며, 실제 가장 연구가 활발하게 이루어지는 부분이기도 하다. 랑데부/도킹은 타겟에 접근하여 여러 작업을 수행하는 것으로 서로 다른 궤도에서 점차 접근하는 것이 중요하며 이는 우주기동전과도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 위성은 지구주위를 Fig. 26과 같이 고속으로 궤도 비행하여 궤도예측이 가능하다. 저궤도 위성이 상대적으로 중궤도 위성보다 속도가 보다 빠르며, 궤도 간의 천이를 위해서는 위성의 속도를 조절함으로써 궤도 간 이동이 가능하다. 이처럼 위성은 항공역학이 적용받지 않고 지구의 중력과 위성의 원심력에 의한 궤도역학으로 비행한다. 따라서 위성은 궤도비행 간 방향을 바꾸고자 할 경우 우주기동(maneuver)이 필요하다. 이때 방향은 원형 혹은 타원형이어야 하며, 지구 중심을 향하게 된다. 만일 위성이 기동하지 않는다면 위성의 속도는 고도와 직접 관련이 있어 고도를 올리거나 낮출 수는 있지만 주기적으로 동일한 지역을 재방문하게 된다. 이러한 위성의 고도, 속도, 궤도 모양은 위성의 궤도를 예측할 수 있고, 이는 곧 우주기동

	Altitude	Speed	Period
Low Earth Orbit (LEO)	160-2,000 km (100-1,250 mi.)	7-8 km/s (15,000-18,000 mph)	1.5-2 hours
Medium Earth Orbit (MEO)	2,000-35,000 km (1,250-22,000 mi.)	3-7 km/s (6,700-15,000 mph)	2-23.5 hours
Geosynchronous Earth Orbit (GEO)	35,786 km (22,236 mi.)	3 km/s (6,700 mph)	24 hours
Highly Elliptical Earth Orbit (HEO)	Varies (noncircular)	1.5-10 km/s (3,300-22,000 mph)	12-24 hours

Fig. 26. Characteristics of common orbit regimes.

전의 태생적 개념이 된다. 우주기동전을 구체적으로 접근하기 위해서는 랑데부 & 근접기동 작전(RPO)에 대한 개념 이해가 필요하다. 랑데부 & 근접기동작전은 우주기동전의 기반이 되는 기술로서 목표 위성에 접근하기 위한 필수 과정이다. 랑데부 & 근접기동작전(RPO)은 위성의 궤도 수정과 궤도면 수정을 통해 이루어 지는데, 위성의 궤도 수정은 지상의 기차와 같이 $\Delta V(\Delta v)$ 와 시간이 필수적이다. ΔV 는 우주임무에서 총 속도 변화량을 수치화한 것으로 주로 우주기동간 화학추진체를 태우거나 추진기관에서 가속화된 가스를 사용시 유용하게 계산하여 적용되고 있다. 큐브위성의 경우 위성의 크기가 작아 ΔV 값(budgets)이 작으나 중량이 큰 위성으로 갈수록 큰 ΔV 값을 가져야 궤도 수정이 가능하다. 특히, 행성 간 우주비행에는 아주 큰 ΔV 값이 필요하여 추가적인 보조추진체 부착이 필요하다(Fig. 27).

위성의 궤도면 수정은 지상의 기차가 교차로에서 트랙을 바꾸는 것과 같이 원하는 궤도면으로 기동하기 위해서는 특정한 지점, 시간에 궤도천이가 이루어져야 하며, 궤도천이를 위한 기동을 위해 정확한 시간을 기다려야 한다. 통상 저궤도 위성의 경우 최대 1시간, 정지궤도 위성의 경우 최대 12시간이 필요하다. 또한, 궤도면 사이 이동각(change planes)은 소형위성일수록 이동각 각도가 적다(Fig. 28).

이처럼 위성의 랑데부 & 근접기동작전을 위해서는 위성 간 궤도면의 일치가 중요하다. 먼저 랑데부는 위성간 고도, 궤도면을 일치시키기 위해 궤도천이가 필요하고 궤도면 일치 이후에는 우주기동(burn)을 통해 접근한다(Fig. 29).

미국의 랑데부의 첫 번째 임무는 1965년 제미니 6호와 7호에 의해 0.3 미터까지 이루어졌고, 첫 번째 도킹은 1966년 제미니 8호가 목표 비행체에 대해 수행되었다. 그리고 첫 번째 랑데부와 도킹은 1967년 코스모스 186과 코스모스 188 간에 이루어졌다. 이후 2007년에는 위성 2개를 순차적으로 발사후 위성모체와 접근위성 간 접근 및 랑데부 임무를 수개월에 거

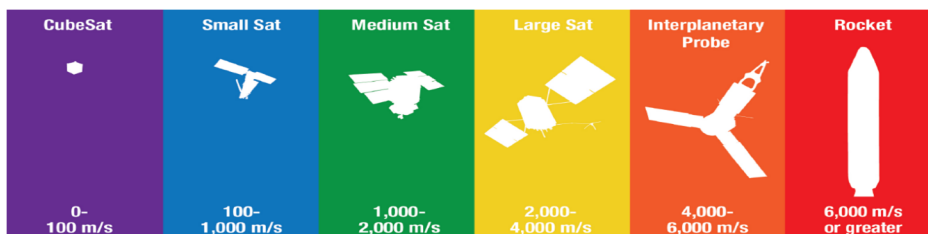


Fig. 27. Conceptualizing ΔV budgets.

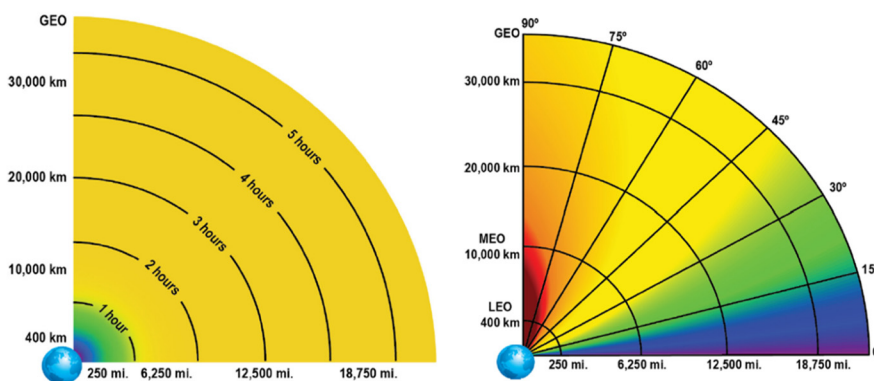


Fig. 28. Altitude ΔV and time budget & plane change ΔV budget.

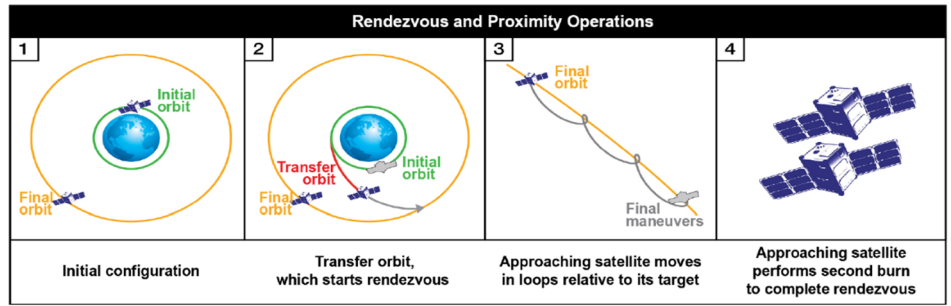


Fig. 29. Concept of Rendezvous and proximity operations.

처 수행하는 접근 및 랑데부 기술 개발실험(orbital express mission plan, Fig. 30)을 실시했다. 당시 수행된 'Orbital Express'는 우주 공간에서 두 우주비행체가 궤도상서비스에 필요한 기술을 검증하는 임무로, 궤도상 서비스 제공위성(Autonomous Space Transport Robotic Operations, ASTRO)과 수리가 필요한 고객 위성(Next Generation Serviceable Satellite, NEXTsat)이 각각 서비스 위성 및 고객 위성의 역할을 하며 궤도상에서 자율 랑데부/도킹, 연료보급, 부품 교체 등의 임무를 완수하였다[52](Fig. 30).

6.2 미국의 우주핵추진체계 개발현황

오늘날 로켓이나 우주선의 재래식 추진체계는 추진제(산화제 연료)를 통해 추진력을 얻는다. 매우 정교한 화학적 폭발을 이용해 추진력을 발생하기 때문에 시스템이 복잡하지만, 핵추진체계는 시스템 구조를 단순화 할 수 있기 때문에 시스템 안정성이 상대적으로 높다. 핵추진체계는 기존 화학 연료 로켓보다 최소 3배 이상 효율적으로 핵분열(fusion) 원자로에서 생성된 열을 액체 추진체로 전달하고, 액체 추진체는 노즐을 통해 팽창·배출돼 우주선을 추진해 화학 연료보다 더 높은 전력을 통해 우주선의 추진력을 낼 수 있다. 재래식추진체계와 핵추진체계의 가장 큰 차이는 핵추진체계 내 연료실이 불필요하다는 점이다. 미국은 1940년대말 이후, 고농축 우라늄 추진체계 연구개발로 미 국방부 우주핵추진체계연구소(Space Nuclear Pro-

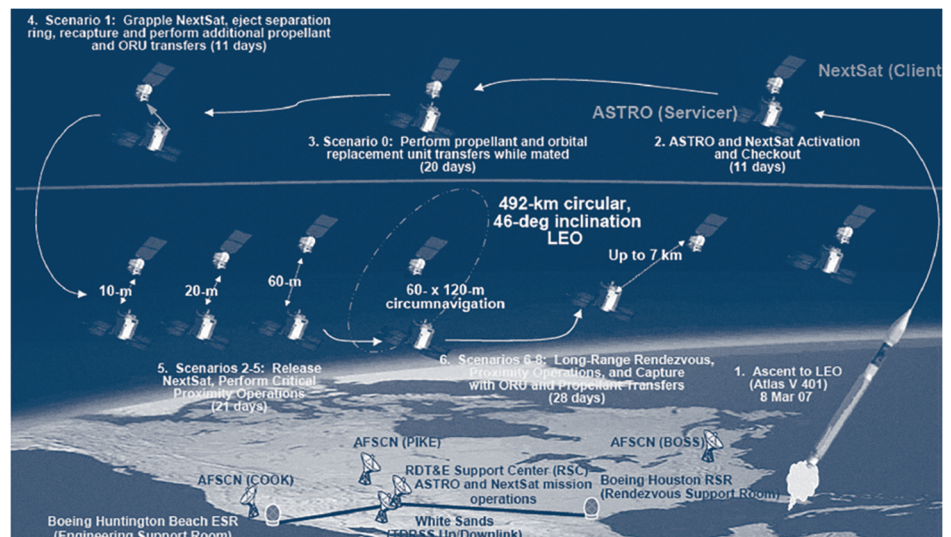


Fig. 30. Orbitalexpress mission plan (Boeing, 2007) [53].

pulsion Office, NERVA)에서 최초로 핵추진체계 연구 및 비행시험을 승인받았으나, 1970년 초에 핵추진체계 비행승인이 취소되었다. 이후 1980년대 미 전략방어구상(strategic defense initiative)으로 핵추진체계 개발을 추진하였으나, 1990년 초 구소련이 붕괴되면서 개발이 취소되었다. 현재는 '유성충돌방지 프로젝트(demonstration rocket for agile cislunar operations, DRACO)'에 따라 미국 국방고등연구사업단(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)에서는 핵추진체계를 개발 중이다(Fig. 31).

우주핵추진체계의 장점은 적은 양의 핵연료로 장기간 임무수행이 가능하여 에너지효율이 매우 높아 10만 뉴턴 이상의 추진력 발생이 가능한데, 이는 기존 재래식 추진체계에 비해 4백만 배 높은 추진력 발생이 가능함을 의미한다. 우주공간은 차가운 냉각상태이기 때문에 핵추진체계를 운용하는데 최적화된 공간으로 안정적 관리가 가능하고 방사능 누출로 인한 탑승 인원의 위험을 초래할 가능성이 거의 없다. 하지만, 우주핵추진체계는 원자력을 이용한 에너지원의 사용으로 치명적인 사고의 위험성이 상시 존재한다는 단점이 있다. 우주핵추진체계의 종류에는 열핵추진(nuclear thermal propulsion, NTP)과 핵-전기추진(nuclear electric propulsion, NEP)이 있다. 열핵추진(NTP)은 원자로의 열 에너지를 로켓 추진체의 온도를 높이는데 사용하는데, 추진체를 적절한 온도(약 2,700K)까지 가열시키고, 액체 수소를 장기간 보관하는 것이 기술적 한계이나, 고 추력의 연료효율, 빠른 반응속도로 우주공간에서 다양한 임무에 적용하기에 용이하다. 반면, 핵-전기추진(NEP)은 원자로의 열에너지를 최소 1 전기출력 메가와트(MEw)의 전기에너지로 전환시켜 전기 추진체나 이온 추진기를 작동하는 방식이며, 상대적으로 낮은 반응속도로 우주 레이저와 같은 고효율의 추진기관에 사용한다. 우주핵추진체계의 향후 개발 계획으로 미국 항공우주국(NASA)은 2023년 1월 미군과의 기술 협력을 통해 늦어도 2027년까지 핵추진 우주선 기술 개발을 완료하겠다고 발표했는데, 빌 넬슨

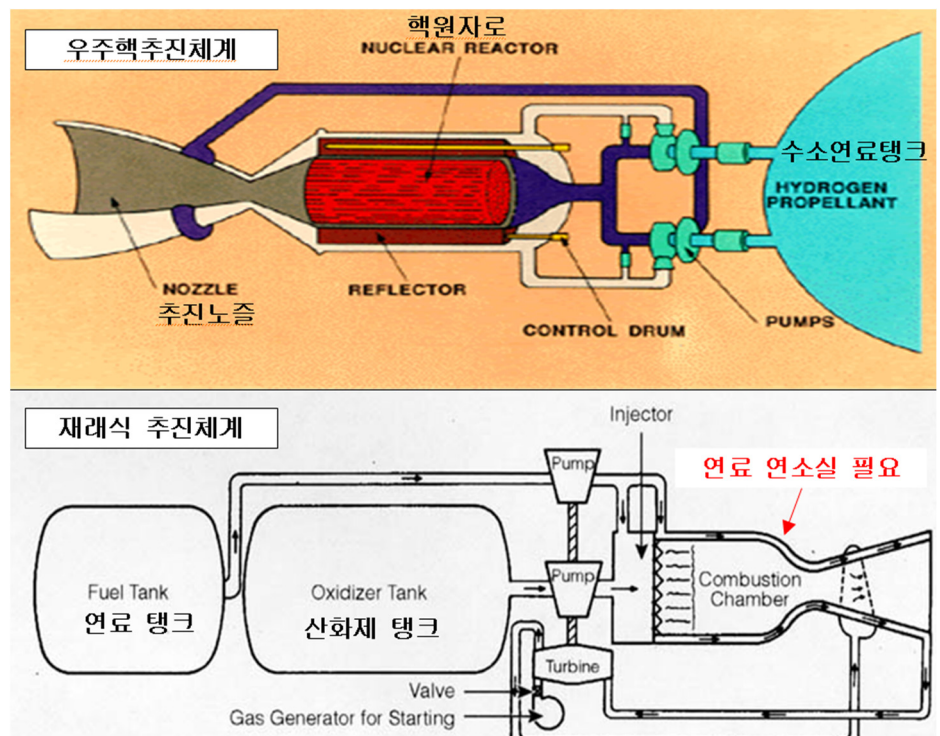


Fig. 31. Nuclear engine & chemical engine concept.

나사 국장은 성명에서 2027년까지 미 국방고등연구계획국(DARPA)과 협력해 첨단 핵추진 로켓 기술을 개발한 뒤 이를 시연하겠다고 밝혔다[54].

6.3 우주기동전 발전방향

최근 국내·외에서는 우주 탐사선과 위성에 탑재되는 연료를 줄이고 임무 수명을 늘리기 위해 '전기 추진 시스템'을 개발하고 있다. 과거보다 우주 비행이 복잡하고 어려워지면서 기존보다 효율성이 높은 추진 시스템에 대한 수요가 높아졌기 때문이다. 현재 위성을 포함한 대부분의 우주 비행체들은 연료와 산화제를 연소시켜 만들어진 고온의 가스를 분출시키는 화학적 방식으로 추진력을 얻고 있으나, 전기 추진 시스템은 태양 에너지를 이용해 추진제를 초고온 상태의 '플라즈마'로 만들고, 이를 전자기장으로 가속·추진시키는 방식으로 우주 탐사선에 적용이 적합하다. 이러한 상황에 최근 한국원자력연구원 핵물리응용연구부에서 연구 중인 '고전력 전기추력기'는 핵분열 에너지를 전기 에너지로 바꾼 뒤 전기추력기를 통해 추력을 얻는 기술로 국제기술 이전 및 국외 부품 구매 제한이 예상되는 상황에서 관련 국내 기술 연구는 매우 의미 있다고 판단된다. 향후 관련 기술이 개발되면 군사위성의 장기간 궤도 유지와 상업목적의 우주 쓰레기 제거, 과학적 심우주 탐사, 안보 목적의 우주 비행체 개발 시 적용이 가능하겠다[55]. 이러한 전기 추진 시스템과는 별개로 미래 우주기동전을 대비하여 새로운 우주추진체계의 개발 필요성도 이야기하고자 한다. 가까운 미래 우리나라의 저궤도 우주선 또는 위성은 중국과 러시아의 대위성 무기체계에 위협받을 수 있는 개연성을 고려하여, 이에 대응하기 위한 신속 회피기동능력 확보가 필요하다. 기존의 추진체계로 기동 시에는 탑재 연료의 한계로 수명에 영향을 받을 수 있고, 전기 추진 시스템은 상대적으로 낮은 기동성을 고려해 '우주핵추진체계'라는 우주 신기술을 확보해 우주위협을 적극적으로 억제하고 무력화시킬 수 있는 기술 개발의 필요성을 제언한다. 또한, 수명연장용 우주 비행체를 핵심 위성군에 위치시켜 해당 위성에 연료를 보충하는 접근도 우주기동력을 보강할 수 있는 조치라는 생각이 든다. 결론적으로 '우주핵추진체계'는 공격과 방어작전에서 신속한 우주기동력의 보장과 우주력 강화에 필수요소로 발전될 것으로 예상된다(Fig. 32).

7. 결론

유럽우주국(ESA)은 '우주 쓰레기 배출제로 정책'을 계획 중으로 2023년 1월 19일 스위스 다보스 세계경제포럼에서 유럽우주국 국장(Josef Aschbacher)은 '수년 내 유럽 위성이 배출



Fig. 32. Space Nuclear Thermal Propulsion (SNT) & anti-satellite (ASAT) laser concept.

하는 우주 쓰레기를 제로로 만드는 제도를 시행할 예정'이라고 발표하였다. 구체적 해결책으로 위성의 임무가 끝난 후 즉시 대기권에 재진입하는 것을 의무화하는 방법을 구상 중으로, 현재 관련된 국제지침은 위성이 임무가 끝난 지 25년 안에 대기권에 재진입시켜 폐기하는 것이다[56]. 또한, 미 국방부는 안전하고 책임 있는 우주작전을 위한 지침을 2023년 3월 3일 발표했다. 5개의 원칙 중 두 번째로 “우주에 오래 잔류할 수 있는 잔해를 줄인다.”라고 명시하고 '우주에서 사용하는 물체를 설계, 작동관리할 때 잔류기간이 긴 잔해의 생성을 제한하는 방식을 우선한다.'고 설명하고 있다[57]. 따라서 전세계적으로 우주 쓰레기 제거기술 개발이 활성화 될 것으로 예상된다. 지금까지 살펴본 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주무기 개발 개연성을 종합하면, 우주 강국은 우주 쓰레기 제거기술을 활용해 필요시 군사적 용도로 다른 국가 위성의 궤도를 바꾸거나 물리적 충격을 가해 기능 장애를 일으킬 수 있을 개연성이 충분히 있다고 판단된다. 그리고 국방 획득분야에서 우주 쓰레기 제거기술을 활용한 우주 강국의 우주무기 개발 방향은 단기적으로는 탐색개발에서 체계개발이 가능한 기술성숙도(TRL) 6 이상인 태양/항력 돛(solar/drag sail) 개발 가능성이 높으며, 우주 쓰레기 제거기술 중 기술성숙도(TRL) 3 이상인 촉수, 전도성 끈, 레이저, 폼, 로봇팔, 작살, 그물, 이온 빔, 팽창 방식이 연구 개발 진입이 가능하다. 특히, 비용과 제거 소요기간을 고려할시 작살(TRL 5)과 로봇팔(TRL 4), 그물(TRL 4), 촉수(TRL 3) 방식 기술을 적용한 우주 쓰레기 기술 개발에 집중할 것으로 판단된다. 장기적으로는 군사적 활용이 용이한 이온 빔(TRL 4), 레이저(TRL 3) 방식 개발도 병행할 것으로 예상된다. 이와 관련 2023년 3월 호주 방위군 우주사령부는 파편생성에 대한 걱정 없이 상대를 억제하거나 방어할 수 있는 전자전 능력을 키우는 것을 강조하며, 적의 위성을 제거하는 '소프트 킬' 능력을 확보하는 계획을 진행 중이라고 밝혔다[58]. 현재 미 통신위원회(Federal Communication Commission, FCC)는 수명을 다한 위성의 “궤도 이탈” 시한을 25년에서 5년으로 줄이는 법안을 준비 중이고, 우리나라 역시 우주 쓰레기로 떠도는 위성을 지구로 데려오는 ‘포집위성 1호’도 개발할 계획[59]으로 1993년 9월 발사돼 수명을 다하고도 지구 상공 800 km 궤도를 돌고 있는 ‘우리별 2호’를 2027년 포집해 지구로 귀환하는 ‘우리별 귀환 프로젝트’로 2027년까지 약 500억 원을 들여 ‘포집위성 1호’를 개발해 발사할 계획이라고 밝혔다[60]. 이와 관련 협동로봇 국내 제조기업 뉴로메카가 정부의 민·군겸용기술 개발사업 과제로 ‘우주 잔해물 포획을 위한 전개형 및 로봇팔형 탑재체 기술개발’〈그림 30〉을 추진한다고 밝혔는데, 임무 수명이 종료된 위성체, 우주 파편 등 우주 잔해물 제거를 위한 위성 탑재될 로봇팔을 개발하고 지상 시험을 통해 기능과 성능을 검증할 계획이다[61](Fig. 33).

또한, 과학기술정보통신부 스페이스챌린지(space challenge) 사업으로 우주 쓰레기를 500 km 폐기궤도 또는 정지궤도 고도 보다 300 km 높은 무덤궤도로 그물을 이용해 이동하는 기술 개발을 위해 ‘우주 그물 기반 ADR’ 기술개발도 착수하였다[62](Fig. 34). 이처럼 국내에서도 우주 쓰레기제거를 위한 기술 개발이 시작된 만큼, 이 글이 차후 우주 쓰레기 제거기술 연구 수행 간 ‘민군 이중용도로 개발되어야 하는’ 필요성 논리 개발에 참고가 되었으면 한다. 끝으로 본 글의 후반부에 미래 우주전장을 대비하기 위한 우주기동전(space maneuver warfare)에 대해 설명하였고, 가까운 미래 우리나라의 위성 또는 우주비행체가 중국과 러시아의 우주무기에 위협받을 개연성을 고려하여 우주핵추진체계 등 우주 신기술을 확보할 것을 제안한다.



Fig. 33. Illustration of active debris removal (ADR) project using robot arm.

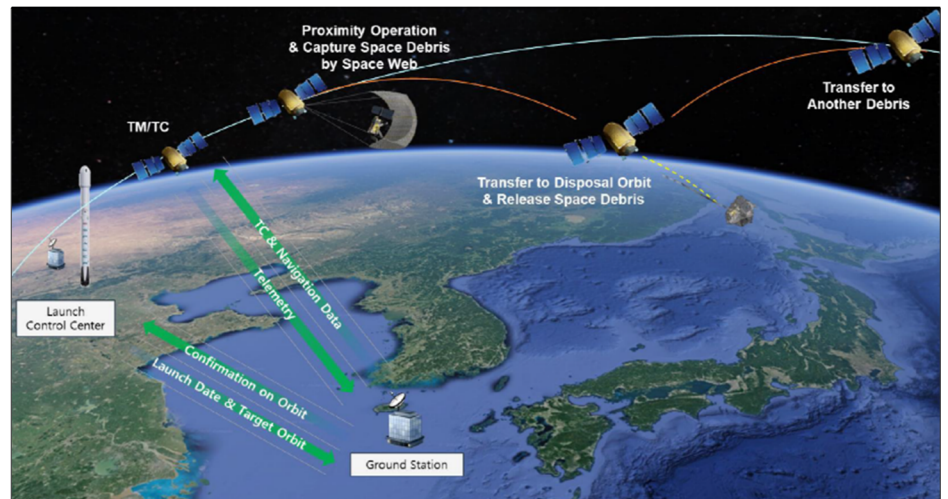


Fig. 34. Illustration of active debris removal (ADR) project using net.

감사의 글

본 글은 우주산업 분야 민·군 협력 체제 강화의 필요성에 대한 공감대를 형성하기 위해 작성하였으며, 공군 우주전력 소요를 구상하거나 우주전력 소요제안서 작성 간 활용이 되고 있는 '우주기술과 응용' 저널지 발간에 감사드립니다.

References

1. Young M, Thadani A, Low orbit, high stakes: all-in on the LEO broadband competition (2022) [Internet], viewed 2023 Feb 17, available from: <https://aerospace.csis.org/low-orbit-high-stakes-all-in-on-the-leo-broadband-competition/>
2. Belton P, Musk eyes 30,000 LEO sats – but how many are too many? (2022) [Internet], viewed 2022 Feb 16, available from: <https://www.lightreading.com/satellite/musk-eyes-30000-leo-sats---but-how-many-are-too-many/d/did/775286>

3. Foust J, SpaceX and OneWeb spar over satellite close approach (2021) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://spacenews.com/spacex-and-oneweb-spar-over-satellite-close-approach/>
4. U.S. Government Accountability Office [GAO], Large constellations of satellites: mitigating environmental and other effects (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://www.gao.gov/products/gao-22-105166>
5. Garcia M, Space debris and human spaceflight (2021) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html
6. National Aeronautics and Space Administration [NASA], LEGEND: 3D/OD evolutionary model (n.d.) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/modeling/legend.html>
7. Stevenson M, McKnight D, Lewis H, Kunstadter C, Rachit bhatia identifying the statistically-most-concerning conjunctions in LEO (2021) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/Poster/Stevenson.pdf>
8. Voakorea [VOA], U.S. House of representatives proposes resolution banning anti-satellite missile tests... call for “peaceful uses of space” (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://www.voakorea.com/a/6878500.html>
9. Park S, Netherlands announces suspension of anti-satellite missile tests (2023) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <http://www.spaceradar.co.kr/news/articleView.html?idxno=982>
10. National Aeronautics and Space Administration [NASA], IADC space debris mitigation guidelines (2007) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines Revision1.pdf
11. Choi E, Space Junk is Coming (Galmaenam, Goyang, Korea, 2021).
12. Matija BM, Active technology for space debris removal, Master Thesis, Czech Technical University in Prague (2021).
13. Jo SH, U.S. Space Force commander develops laser weapon to attack Chinese satellites (2021) [Internet], viewed 2023 Mar 19, available from: <https://www.dongascience.com/news.php?idx=50700>
14. Johnson K, Harrison T, Young M, Wood N, Goessler A, Space threat assessment (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://aerospace.csis.org/space-threat-assessment-2022/>
15. Weeden B, A secure world foundation executive summary global counterspace capabilities report (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: https://swfound.org/media/207346/swf_global_counterspace_capabilities_es_2022_en.pdf
16. Harrison T, Johnson K, Roberts TG, Young M, Space threat assessment (2020) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://www.csis.org/analysis/space-threat-assessment-2020>

17. Weeden B, Samson V, Global counter space capabilities: an open source assessment (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: https://swfound.org/media/206957/swf_global_counterspace_april2020_es.pdf
18. Park SS, Companies in the business of cleaning up space debris (2021) [Internet], viewed 2022 Dec 26, available from: <https://www.dongascience.com/news.php?idx=47358>
19. Kim HD, Recent status and future prospects on on-orbit servicing, *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.* 50, 559-560 (2022). <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.8.559>
20. Pelton JN, *New Solutions for the Space Debris Problem* (Springer, Cham, Switzerland, 2015).
21. Zhao PY, Liu JG, Wu CC, Survey on research and development of on-orbit active debris removal methods, *Sci. China Technol. Sci.* 63, 2188-2210 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1661-7>
22. Roth KLL, Analysis of an experimental space debris removal mission (2017) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2703&context=etd>
23. Shuangyan S, Xing J, Hao C, Cleaning space debris with a space-based laser system (2014) [Internet], viewed 2023 Mar 20, available from: https://www.researchgate.net/publication/263318915_Cleaning_space_debris_with_a_space-based_laser_system/download
24. L3harris, Advanced maui optical and space surveillance technologies conference (AMOS) (2021) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://www.l3harris.com/events/trade-show/advanced-maui-optical-and-space-surveillance-technologies-conference-amos-2021>
25. Etherington D, Astroscale launches its ELSA-d orbital debris removal satellite (2021) [Internet], viewed 2023 Mar 20, available from: <https://techcrunch.com/2021/03/22/astro-scale-launches-its-elsa-d-orbital-debris-removal-satellite/>
26. Yamamoto T, Nakajima Y, Sasaki T, Okada N, Haruki M, et al., GNC strategy to capture, stabilize and remove large space debris (2019) [Internet], viewed 2023 Mar 24, available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019LPICo2109.6109Y/abstract>
27. Nishida SI, Kawamoto S, Okawa Y, Terui F, Kitamura S, Space debris removal system using a small satellite, *Acta Astronaut.* 65, 95-102 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.01.041>
28. Kawamoto S, Ohkawa Y, kitamura S, Nishida S, Strategy for active debris removal electrodynamic tether (2009) [Internet], viewed 2023 Apr 2, available from: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_Pr_2_7/_article
29. Pulliam W, Catcher's Mitt final report (2011) [Internet], viewed 2023 Jan 22, available from: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1016641.pdf>
30. Mark CP, Kamath S, Review of active space debris removal methods, *Space Policy* 47, 194-206. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.12.005>

31. Warwick G, Cleaning up (2020) [Internet], viewed 2023 Mar 26, available from: https://aviationweek.com/sites/default/files/2020-03/AWST_200309.pdf
32. Phipps CR, Baker KL, Bradford B, George EV, Libby SB, et al., Removing orbital debris with lasers, *Adv Space Res.* 49, 1283-1300 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.02.003>
33. Phipps CR, A laser-optical system to re-enter or low earth orbit space debris, *Acta Astronaut.* 93, 418-429 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.031>
34. Sadasivam L, Sriram A, Subendran RV, Active space debris removal by using coil gun mechanism, in *International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014)*, Singapore, 29-30 Mar 2014.
35. Baudet L, Ruffiot M, Active debris removal: from the main barriers to the definition of a business model (2016) [Internet], viewed 2023 Jan 6, available from: <https://chaire-sirius.eu/documents/dac7ab-ruffiot-baudet-2016-active-debris-removal-from-the-main-barriers-to-the-definition-of-a-business-model.pdf>
36. Bhattarai S, Shang JR, Space debris removal mechanism using cubesat with gun shot facilities (2018) [Internet], viewed 2023 Apr 7, available from: <https://thescipub.com/pdf/ajassp.2018.456.463.pdf>
37. Yoo JH, Shoot lasers, cast nets, or use magnets... Developing space cleaning technology (2023) [Internet], viewed 2023 Apr 27, available from: <https://www.chosun.com/economy/science/2023/01/10/YO4AZT6EZBCCFKLWYVOCGP7G3I/>
38. Pelton J, Carroll J, Levin EM, EDDE spacecraft development for active LEO debris removal (2014) [Internet], viewed 2023 Jan 27, available from: https://dam-oclc.bac-lac.gc.ca/download?is_thesis=1&oclc_number=1198400897&id=779d3c66-811d-4e11-87bc-ce26e44dee12&fileName=fj236682x.pdf
39. Matija M, Active technology for space debris removal (2021) [Internet], viewed 2023 Mar 27, available from: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97078/F3-DP-2021-Matija-MichalActive%20technology%20for%20space%20debris%20removal.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
40. Harrison T, Johnson K, Young M, Moye J, Space threat assessment 2021 (2021) [Internet], viewed 2023 Mar 26, available from: <https://www.csis.org/analysis/space-threat-assessment-2021>
41. Lee JH, Chinese satellite 'robot arm' has the ability to shoot down US spacecraft (2021) [Internet], viewed 2023 Feb 26, available from: <https://weekly.donga.com/List/3/all/11/2756776/1>
42. Kim YR, France "Will develop laser weapons for satellite defense" (2019) [Internet], viewed 2023 Apr 26, available from: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20190725186000081>
43. Werner D, Protecting the off-planet economy (2020) [Internet], viewed 2023 Feb 26, available from: <https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/publications/aerospace-america-april-2020.pdf>

44. Weeden B, Samson V, Global counterspace capabilities: an open source assessment (2021) [Internet], viewed 2023 Feb 25, available from: https://swfound.org/media/206957/swf_global_counterspace_april2020_es.pdf
45. Lee SH, Japan, which is creating the Space Self-Defense Force, launches satellites to kill Chinese and Russian satellites (2019) [Internet], viewed 2023 Feb 25, available from: <https://www.joongang.co.kr/article/23555573#home>
46. Kim HJ, Establishment of Japan's 'Space Operations Squadron... Development of satellite communication jamming technology in other countries (2020) [Internet], viewed 2023 Feb 2, available from: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200518154000073>
47. Lee JJ, Promoting the construction of Japan's outer space surveillance and satellite repair 'space circuit' (2021) [Internet], viewed 2023 Feb 2, available from: https://mobile.newsis.com/view.html?ar_id=NISX20211010_0001608788#_enliple
48. National Space Policy of the United States of America (2020) [Internet], viewed 2023 Feb 27, available from: <https://history.nasa.gov/NationalSpacePolicy12-9-20.pdf>
49. Lee SW, UK Atomic Energy Agency and SAC collaborate on orbital satellite maintenance with robots (2022) [Internet], viewed 2023 Apr 27, available from: <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=30280>
50. Stone C, Maneuver warfare in space: the strategic mandate for nuclear propulsion (2022) [Internet], viewed 2023 Mar 7, available from: https://mitchellaerospacepower.org/wp-content/uploads/2022/01/Maneuver_Warfare_in_Space_Policy_Paper_33.pdf
51. Reesman R, Wilson JR, The physics of space war: how orbital dynamics constrain space-to-space engagements (2020) [Internet], viewed 2023 Jan 7, available from: https://aerospace.org/sites/default/files/2020-10/Reesman_PhysicsWarSpace_20201001.pdf
52. Clark S, In-space satellite servicing tests come to an end (2007) [Internet], viewed 2023 Feb 17, available from: <https://spaceflightnow.com/news/n0707/04orbitalexpress/>
53. Defense Industry Daily, Orbital express: testing on-orbit servicing (2007) [Internet], viewed 2023 Apr 1, available from: <https://www.defenseindustrydaily.com/orbital-express-is-that-a-new-battery-or-are-you-just-glad-to-see-me-03220/>
54. Kim SS, NASA to develop nuclear-powered spacecraft by 2027 (2023) [Internet], viewed 2023 Apr 1, available from: <https://www.news1.kr/articles/4933134>
55. Kim HL, Current status and trends of research and development on electric thruster, Part I: overseas (2019) [Internet], viewed 2023 Jun 2, available from: <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002534291>
56. Foust J, ESA seeks global adoption of "zero debris" policy (2023) [Internet], viewed 2023 Apr 14, available from: <https://spacenews.com/esa-seeks-global-adoption-of-zero-debris-policy/>

57. Park SS, US department of defense announces five principles for responsible space operations (2023) [Internet], viewed 2023 Apr 24, available from: <https://www.spaceradar.co.kr/news/articleView.html?idxno=971>
58. Park SS, Australian military "Developing technology to electronically take out enemy satellites" (2023) [Internet], viewed 2023 Apr 2, available from: <https://www.spaceradar.co.kr/news/articleView.html?idxno=97>
59. Kang YJ, Competition between Japan and China to clean up space debris in low orbit (2022) [Internet], viewed 2023 Apr 24, available from: https://mobile.newsis.com/view.html?ar_id=NISX20221121_0002093925#_enliple
60. Kim BS, 中 Why the U.S. was surprised by the success of the 'Space Trash Cleanup' [Read Science] (2023) [Internet], viewed 2023 Mar 24, available from: <https://www.asiae.co.kr/article/2022021808311316759>
61. Choi SK, Neuromeka participates in the development of a robot arm for space debris removal (2023) [Internet], viewed 2023 Mar 4, available from: <https://www.inews24.com/view/1555002>
62. Park J, 2023 Future Defense Technology & Strategy Forum Keynote Speech (2023) [Internet], viewed 2023 Jun 2, available from: <https://news.nate.com/view/20230202n34877>

Author Information

최 성 환 Kf2020@hanmail.net



공군사관학교에서 1994년도에 외국어학 학사학위와 2005년도에 충북대학교에서 행정학 석사학위를 취득하였으며, 2015-2017년 동안 합참 전력기획부에서 근무하면서 군정찰위성 사업을 담당하였다. 2017-2021년 공군본부 우주센터에서 우주전력발전과장으로서 초소형위성체계, 한국형위성항법체계(KPS), 조기경보위성체계, 레이더우주감시체계 등 우주전력 수요를 제안하였고, 우주정보상황실장으로서 중국 텐궁 1호 추락, 중국 창정5B 로켓 추락과 같은 우주위험 상황에 대응하였다. 2021년부터 현재까지 우주센터장직을 수행하며, 국제 우주상황조치 연합연습(global sentinel) 참가, 한국항공우주학회 내 우주안보 OS 구성 등 국내외 우주협력을 통해 공군 우주력 발전을 위해 노력 중이다.