

## 우주 폐기물(쓰레기) 제거 방식에 대한 고찰

Study on Methods for Space Debris Removal

---

저자 (Authors)	최준민 Choi, Joon-Min
출처 (Source)	<a href="#">항공우주산업기술동향 14(2)</a> , 2016.12, 43-54(12 pages) <a href="#">Current Industrial and Technological Trends in Aerospace 14(2)</a> , 2016.12, 43-54(12 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국항공우주연구원</a> Korea Aerospace Research Institute
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07257561">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07257561</a>
APA Style	최준민 (2016). 우주 폐기물(쓰레기) 제거 방식에 대한 고찰. 항공우주산업기술동향, 14(2), 43-54
이용정보 (Accessed)	이화여자대학교 211.48.46.*** 2020/01/08 16:32 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

## 우주 폐기물(쓰레기) 제거 방식에 대한 고찰

최준민\*

## Study on Methods for Space Debris Removal

Choi, Joon-Min\*

### ABSTRACT

With the development of space technology, the amount of space debris continues to increase. Consequently, the collision risks between expensive satellites conducting import tasks and space debris are constantly increasing. In order to mitigate these risks, all the countries should minimize space debris complying with the "space debris mitigation guidelines" which UN approved in 2007. Further, space debris, which already exists, must be actively removed. Space developed countries have proposed various ways to remove space debris and some technologies are realized. However, overall technology maturity is still in low level. In such a time, this paper introduces various ways currently being proposed and qualitatively analyzes pros and cons of them.

### 초 록

우주기술의 발전과 더불어 지구 궤도를 선회하는 우주 폐기물(우주 쓰레기)의 양은 계속 늘어나고 있다. 따라서 매우 중요한 업무를 수행하는 고가의 위성들과 우주 폐기물이 충돌할 위험도 시간이 갈수록 커지고 있다. 이러한 위험을 줄이기 위하여 우주 폐기물의 발생이 최소화 되도록 모든 국가들이 2007년 UN이 승인 한 '우주 폐기물 경감 가이드라인'을 준수하고 더 나아가 이미 존재하는 우주 폐기물을 적극적으로 제거하는 일을 더 이상 미룰 수 없게 되었다. 우주 선진국을 중심으로 우주 폐기물을 제거하는 여러가지 방식들이 제안되어 왔고 일부는 실현되었으나 전반적으로 아직은 기술의 성숙도가 낮은 단계이다. 이러한 시기에 본 논문은 현재 제안되고 있는 우주 폐기물 제거 방식을 소개하고 이들이 가지고 있는 장점과 단점을 정성적으로 분석하고 있다.

**Key Words** : Space Debris, Space Junk(우주 폐기물, 우주 쓰레기), Space Debris Removal(우주 쓰레기 제거), Space Debris Mitigation(우주 쓰레기 경감), Post Mission Disposal, PMD(임무종료시 폐기), Active Debris Removal, ADR(적극적인 우주 쓰레기 제거), Space Debris Removal Satellite(청소위성), Collision(충돌), Contact-less(비접촉식)

\* 최준민, 한국항공우주연구원, 위성연구본부 우주시험실  
jmchoi@kari.re.kr

## 1. 서론

우주 폐기물(Space Debris) 또는 우주 쓰레기는 우리 인간에 의해 만들어져 우주를 이동하는 모든 활용되지 않는 물체를 의미한다. 예로서는 고장난 위성, 로켓 상단, 충돌 및 폭발에 의한 잔해물, 부식이나 노후화에 의한 파편, 우주인이 떨어뜨린 공구 등이 있다. 우주 쓰레기의 위험성과 관련하여 NASA 과학자 Donald J. Kessler는 지구 저궤도에서 물체의 밀도가 어느 수준을 넘으면 물체간의 충돌은 도미노 효과를 일으켜 더 이상 인공위성을 발사할 수 없을 지경을 초래할 수 있다는 Kessler Syndrome를 제시하였다. 우주 쓰레기가 운영 중인 인공위성과 충돌한 대표적인 사례는 2009년 2월에 발생한 고장난 러시아 통신위성 코스모스 2251호와 미국 통신위성 이리듐 33호과의 충돌로서 <표 1>에서 보듯이 이 충돌로 10cm 이상 크기의 우주 쓰레기 1,420개와 4백만개에 가까운 1mm 이상 크기의 우주쓰레기가 양산되었다[1].

표 1. 충돌에 의해 생성된 우주 쓰레기 개수

	등록된 파편	예측 >10cm	예측 >1cm	예측 >1mm
Cosmos 2251	1,142	840	43,220	2.22 $\times 10^6$
Iridium 33	490	580	30,100	1.54 $\times 10^6$
합계	1,632	1,420	73,320	3.76 $\times 10^6$

2007년 ‘유엔 외기권의 평화적 이용을 위한 위원회’(United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, UN COPOUS)는 ‘우주청 간 우주 폐기물 조정위원회’(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC)가 마련한 가이드라인을 토대로 ‘우주폐기물 경감 가이드라인’을 승인하였다. 이 가이드라인은 비록 법적 구속력은 없지만 우주 쓰레기의 심각성에 대하여 UN 회원국들이 공동으로 인정하게 되는 계기가 되었다.

<그림 1>은 저궤도에서 위성과 로켓 상단이 임

무 종료 후 25년 내에 지구 대기권에서 폐기(Post-Mission Disposal, PMD) 되어야 하는 우주폐기물 경감 가이드라인을 전혀 지키지 않을 때(0% PMD), 그리고 10%, 50%, 75%, 95% 지켰을 때 저궤도에 존재하는 크기 10cm가 넘는 우주물체의 개수를 연도별로 시뮬레이션 한 것이다[2]. 위성 및 로켓 소유주가 가이드라인을 95% 지킬 경우 저궤도에서 우주물체 개수의 증가율이 많이 완화됨을 보이고 있다. 현재의 경우 로켓 상단이 가이드라인을 지키는 비율은 80%이고 위성의 경우는 60%라고 예측하고 있다[3].

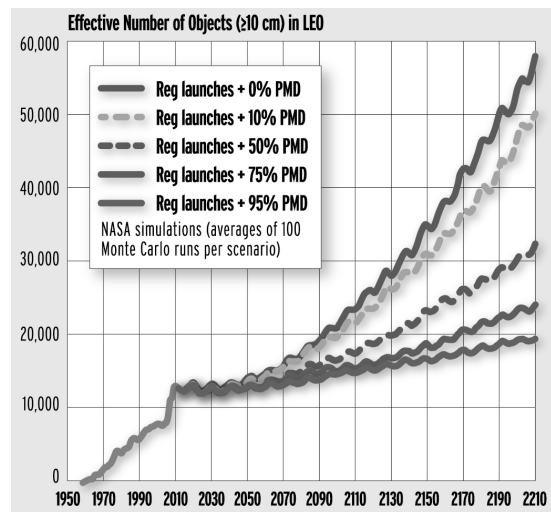


그림 1. 가이드라인(PMD) 준수율에 따른 저궤도에서 10cm 이상되는 우주 폐기물 개수의 증가

향후 우주폐기물 경감 가이드라인을 우리 모두가 지킨다 할지라도 임무 종료시 스스로 폐기(PMD)하는 설계나 장치 없이 이미 올라간 위성이나 로켓 상단 그리고 운영 중에 파생된 우주 쓰레기는 계속 위험요소로 남게 된다. 우주 쓰레기의 속도는 7.9-11.2km/초이고 정면 충돌시 상대속도는 최고 2배까지 가능하다. 현재 지구 주위의 우주쓰레기의 무게는 6,300톤이라고 보고 있으며 이외에도 우주에서 날아오는 유성체(Meteoroid)는 일년에 37,000-78,000톤씩 지구로 떨어지고 있다고 예측한다. <표 2>는 우주 쓰레기의 크기에 따른 그 운동

에너지를 TNT의 양과 우리가 실감할 수 있는 에너지로 표현하였다. 이러한 충돌 위험 때문에 국제 우주정거장 ISS의 미국 모듈은 여러 층의 방어막으로 되어 있는 Whipple shield을 이용하여 약 1.4cm 크기의 우주 쓰레기로부터 보호를 받고 있다[4]. 그럼에도 불구하고 ISS의 창문 80개가 이미 교체된 상태라고 알려져 있다[5]. 현재 미국 전략사령부(USSTRATCOM, US Strategic Command) 산하 합동우주운영센터(JSPOC, Joint Space Operations Center)는 지름이 10cm 이상이 되는 약 18,000개의 우주물체(위성 1,419대 포함, 실재운용 중인 위성은 900대 추정)를 파악하고 있다. 거리 오차는 40-50m정도 이다.

표 2. 우주 쓰레기의 운동에너지

크기 (mm)	알루미늄 구의 무게(g)	운동에너지(J)	TNT (kg)	비교 에너지
1	0.0014	71	0.0003	야구 피칭
3	0.038	1,910	0.008	총알
10	1.41	70,700	0.3	72kg 물체 100m 높이 에서 추락
50	176.7	8,840,000	37	버스와 충돌
100	1,413.7	70,700,000	300	대형 폭탄

2007년 1월에 고도 800여 km 상공에 떠 있는 자국의 기상위성 평원(풍운) 1C를 미사일로 요격하여 10cm 이상 되는 2800여개의 우주 쓰레기를 양산하고 우주 무기 경쟁을 촉발한 것에 대하여 국제사회로부터 비난을 받은 바 있는 중국은 2016년 6월 24일 중국의 차세대 로켓 창정(장정) 7호를 이용하여 총 7개 탑재체를 우주로 올려 보냈다. 이 탑재체 중에는 중국최초의 청소위성 아오룽(오룡, 遨龍, '노는 용'이란 뜻)1호가 포함되었다. 아오룽 1호는 쓸모없는 위성 또는 대형 잔해물을 로봇팔로 붙잡고 이후 대기권으로 진입하여 마찰열에 의

하여 연소될 계획이다. 지구고도 200Km까지는 공기밀도가 무시할 수 없을 정도이어서 우주 쓰레기를 이 정도 고도까지 내려 보내면 우주 쓰레기는 공기와의 마찰열로 소멸 되거나 생존 기간이 극적으로 줄어들게 된다. 만약 생존할 가능성이 있는 우주 쓰레기는 궤도 계산을 통하여 잔존 물체를 바다 쪽으로 떨어지게 할 수도 있을 것이다.

## 2. 우주 폐기물 제거 방식의 분류

우주 폐기물 제거 하는데 있어서 관점에 따라서 몇 가지로 분류하는 것이 향후 환경과 목적에 따라 적합한 제거 방식을 선택하는데 도움을 줄 것이다. 첫째, 제거하는 주체에 따라 우주물체가 수명이나 용도가 다 되었을 때 스스로 폐기하는 PMD(Post-Mission Disposal) 방식과 다른 주체가 우주 폐기물을 제거하는 ADR(Active Debris Removal) 방식이 있다. 둘째, 제거 대상이 되는 개체 수에 따라서 하나의 청소위성이 하나의 우주 폐기물을 제거하는 One to One 방식과 여러 개의 우주 폐기물을 제거할 수 있는 One to Many 방식이 있다. 셋째, 최종 처리 장소에 따라서는 대기권에서 마찰열에 의하여 소각 시키는 Deorbit 방식과 우주 폐기물을 인공위성이 사용하지 않는 궤도로 보내는 Graveyard 방식이 있다. 넷째, 우주 폐기물의 크기에 따라서 대형 우주 폐기물(Large Scale)에 적합한 방식과 소형 및 미세한 우주 폐기물(Small Scale)에 적합한 방식이 있다. 다섯째 우주 폐기물을 제거할 때 우주 폐기물과 직접적인 접촉이 있는 접촉식(Contact) 방식과 접촉이 없는 비접촉식(Contact-less) 방식이 있다. 마지막으로 동일한 접촉식 방식이라도 우주 폐기물을 포획한 후 밀어서 궤도를 이탈 시키는 Push형과 당겨서 궤도를 이탈 시키는 Pull형이 있다.

### 3. Post Mission Disposal용 기술

가장 간단한 PMD 방식은 임무종료 시점에 우주물체가 연료를 남겨서 자신이 가지고 있는 추력기를 이용하여 대기권으로 Deorbit 하거나 Graveyard로 이동하는 것이다. 이것이 여의치 않을 때 아래에 소개한 PMD용 방식을 사용하여 스스로 폐기하게 된다. 소개된 방식은 현재는 PMD 용에 적합하지만 우주 쓰레기에 부착하는 기술의 발전에 따라서는 향후 ADR용 기술로도 사용될 수 있을 것이다.

#### 3.1 태양 돛(Solar Sail)

태양 돛(Solar Sail)은 최소 부피로 접은 상태로 인공위성이나 로켓상단에 부착시킨 다음 임무 종료시 펼치게 된다. 이로서 많은 항력이 유발되어 우주 쓰레기의 속도가 감소되고 더불어 궤도도 점차 낮아지게 되어 최종적으로 대기권에서 마찰열에 의해서 소각되어 진다(PMD). 태양 돛은 발사하기 전에 우주물체에 부착하는 것이 효과적이다. 그렇지 않고 궤도에서 우주 쓰레기에 태양 돛을 부착하려면(ADR) 또 다른 기술적인 도전이 필요하다. 2010년 NASA는 무게 4.5kg 위성에 태양빛을 흡수하는 면적 9.3m<sup>2</sup>의 Nano Sail-D를 부착하고 임무 종료시 태양 돛을 펼치어 Deorbit 기능을 검증하는 시험을 하였다. ESA도 Surrey 대학을 통하여 장착시 15×15×25cm 크기에 무게 2kg 그리고

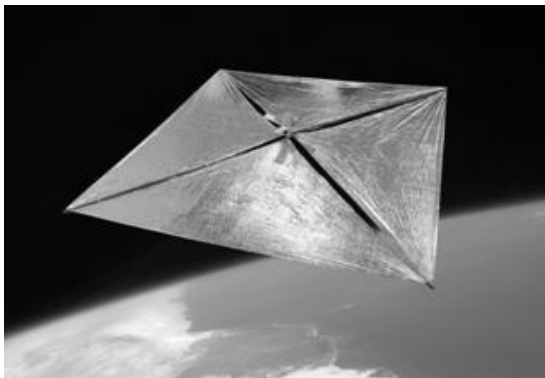


그림 2. Nano Sail-D

팽창시 5×5m로 확장되는 Gossamer Deorbit Sail 개발하였다. 이 태양 돛은 700kg 위성까지 Deorbit 시킬 수 있다[6].

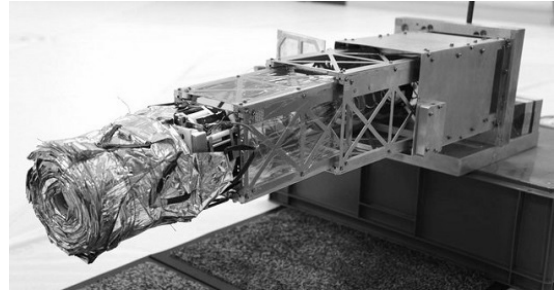


그림 3. 전개 초기 Gossamer 태양 돛

#### 3.2 풍선(Balloon)

Global Aerospace Corporation사는 저궤도에서 PMD용으로 GOLD (Gossamer Orbit Lowering Device)라는 이름으로 거대한 풍선과 보조장치를 개발하고 있다<그림 4>. 이 풍선은 얇게 접고 펼 수 있으며, 팽창시 수백 배의 공기 저항을 유발시킨다. 풍선의 재질이 얇아 진공인 우주환경에서 작은 양의 가스로도 팽창이 가능하며 미세한 유성체에 의하여 구멍이 생겨도 기체 공급장치로 쉽게 형태를 다시 유지한다. 최악의 경우 커다란 우주 쓰레기와 충돌해도 새로운 파편 조각을 생성하지 않는다[7]. 비교적 간단한 장치인 이 장치는 작은 상자에 담겨 위성이나 로켓상단에 장착된다. 로켓이 궤도를 이탈할 즈음에 풍선의 지름은 100m 정도로 커진다. <그림 5>는 풍선을 이용하여 공기 저항을 증가 시켜서 고도 950km를 선회하는 러시아 로켓 SL-8의 2단에 100m 크기의 풍선을 부착시킬 경우 질량 대 면적비가 0.015m<sup>2</sup>/kg에서 5.5m<sup>2</sup>/kg으로 늘게 되어 아무런 조치를 취하지 않을 경우 지구 대기권에 200년 후에 진입하게 되는 것을 2년으로 획기적으로 주는 것을 보여 주고 있다[4]. 태양 돛을 사용할 경우에도 <그림 5>에서 예측한 것과 비슷한 효과를 볼 수 있을 것이다. 이 방식을 궤도에서 선회하는 우주 쓰레기에 부착하려면(ADR) 로봇팔을 이용하는 등의 다른 기술적

인 도전이 필요하다.

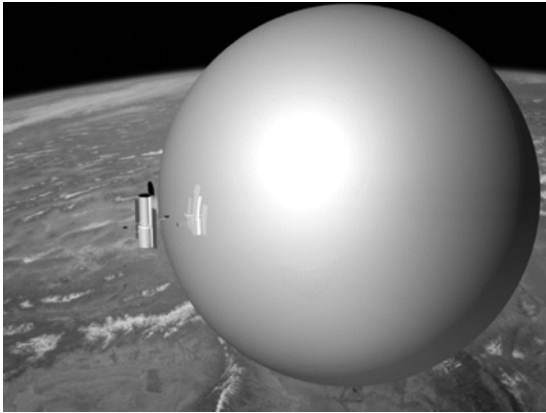


그림 4. 우주천문위성과 Gossamer Orbit Lowering Device(GOLD)

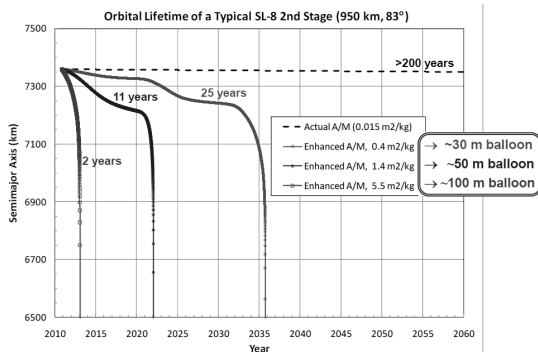


그림 5. 공기저항을 이용한 우주폐기물 가속 효과

### 3.3 밧줄(Tether)

전기력 밧줄(Electrodynamic Tether)은 미국 Tethers Unlimited가 개발하고[8] JAXA도 개발 중에 있다. 임무 종료시 위성이나 발사체 상단에서 전도성 밧줄(Tether)이 내려오게 하고 지구 주변 Plasma내의 전자를 Tether내에 흐르게 하면 지구 자기장에 의하여 힘을 발생(로렌츠 힘)하게 된다. 이 힘은 우주 쓰레기 진행에 항력으로 작용하여 우주 쓰레기의 속도가 저하되어 고도가 낮아져 최종적으로 대기권에서 마찰열로 소각 된다. 그런데 이 방식은 위성이나 로켓상단에 미리 전기력 밧줄을 부착하지 않으면 사용할 수 없어 기존 우주 쓰

레기를 처리 하는 데는 적합하지 않다. 단점으로는 원하는 힘을 얻기 위하여서는 Tether의 길이가 수백 m(Tether를 꼬아 놓을 경우)에서 수십 km 되어야 한다. 이렇게 긴 Tether는 우주 쓰레기에 의하여 끊어 질 수 있다. 이는 고장을 야기하는 것뿐만 아니라 오히려 우주 쓰레기를 양산할 수 있다. 또한 긴 Tether를 풀어주는 기계장치도 구현하기 쉽지 않다. 한편으로 우주 쓰레기가 지구 자기장이 형성하는 면과 평행하게 진행하게 되면 진행 방향에 수직인 힘이 발생하여 진행방향이 바뀌게 된다.

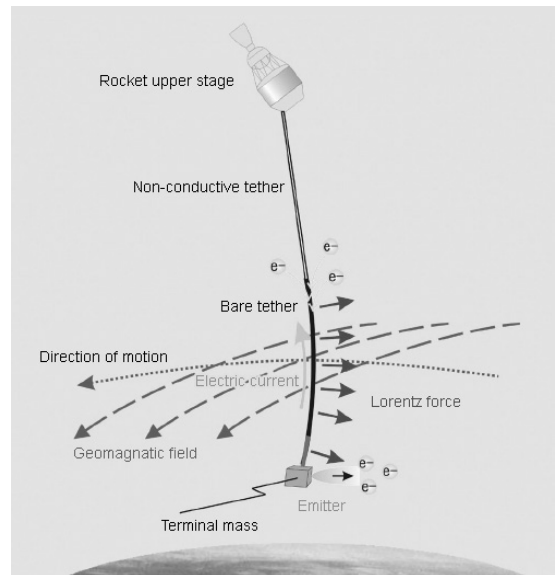


그림 6. 전기력 밧줄의 항력 생성 원리

## 4. Active Debris Removal용 기술

ADR 방식은 PMD 방식 보다 기술적 난이도나 비용면에서 불리하다. 특히 ADR 방식은 많은 경우 청소위성이 우주 쓰레기에 근접 가능한 상태가 되도록 위치, 속도, 각속도를 조정하는 랑데부(Rendezvous) 기술이 기본으로 필요하다. 특히 접촉식(Contact) 방식을 채택할 경우에는 우주 쓰레기의 자세와 비정상적인 회전(Tumbling)까지 고려하여 포획하여야 한다. 만일 비우호적으로 운동하

는 우주 쓰레기를 정확하게 포획하지 못할 경우 충돌에 의하여 오히려 우주 쓰레기를 양산하게 된다. 일반적으로 접촉식(Contact) 방식은 우주 쓰레기를 지구 대기권으로 진입(Deorbit)시키거나 원하는 장소(Graveyard Orbit)로 옮기는데 있어서 비접촉식(Contact-less) 방식보다 조정 능력이 우수하다.

우주 쓰레기를 제거하는 개수에 있어서는 가능하다면 One to Many를 선호하겠지만 대형 우주 쓰레기를 제거 하는 데에는 One to One 방식도 불리하지 않을 것이다. One to Many 경우도 임의의 고도와 위치에 있는 여러 개의 우주 쓰레기를 찾아가고 제거하기 위하여서 많은 양의 연료가 필요하게 된다.

우주쓰레기를 제거하는 우선순위로는 대형 크기로서 충돌시 우주환경에 가장 큰 영향력을 가진 것, 충돌 가능성이 큰 물체(우주쓰레기 밀집지역, 주로 고도 800-1,200km의 극궤도에 존재하는 물체), 높은 고도에 위치하여 오랜 기간 남아 있을 것을 선택하여야 한다. ESA는 안정적인 환경을 위하여 일년에 적어도 5-10개의 물체를 인위적으로 제거하는(ADR) 것을 제안하고 있다[9]. 다른 연구에서도 새로이 올라간 우주물체의 90%가 임무 종료 후 스스로 폐기(PMD)하면서 매년 5개의 우주 쓰레기를 인위적으로 제거(ADR)하면 200년간 안정적인 궤도환경을 유지할 수 있다고 보고 있다[4].

#### 4.1 그물(Net)

ESA에서 좋은 평가를 받고 있는 방식으로 비우호적으로 회전(Tumbling)하는 중대형 우주 쓰레기를 포획하는데 효과적으로 보인다. ESA에서는 지구정지궤도에서 선회하고 있는 쓸모없는 위성을 제거하기 위하여 RObotic GEostationary orbit Restorer(ROGER) 연구를 수행하고 있다. ROGER는 대형 우주쓰레기에 접근하여 그물(Net)을 던지든지 붐(Boom), 촉수(Tentacle) 등으로 우주쓰레기를 포획하여 우주무덤(Graveyard orbit)으로 견인(Pull)하는 개념이다[10]. 청소위성이 우주 쓰레기

를 견인(Pull)하게 됨으로써 추력기의 화염이 그물과 밧줄(Tether)로 향하기 때문에 열에 강한 물질을 사용하여야 한다. 그물을 던져 포획하는 순간에 그물 끝에 달린 Corner Mass와 우주 쓰레기가 충돌할 경우에는 파편이 발생할 가능성이 존재한다. 포획 개수 관점에 청소위성이 큰 규모일 경우 여러 개의 그물을 싣고 하나의 우주 쓰레기를 포획한 후 원하는 장소로 견인(Pull)한 후에 밧줄(Tether)을 끊게 되면 One to Many 방식으로 이용할 수 있다.

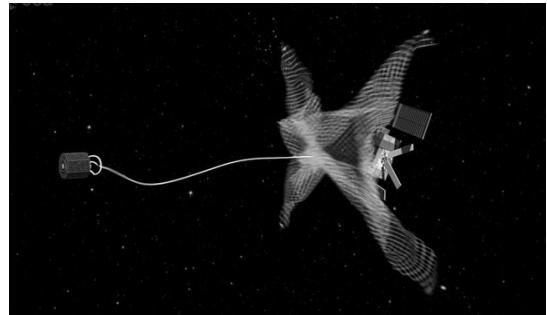


그림 7. 그물을 이용한 포획 장면

#### 4.2 작살(Harpoon)

ESA에서 선호하는 방식으로 그물과 같이 우주 쓰레기가 어떠한 형태, 자세, 회전을 가지든지 작살이 Docking 하는데 복잡하지 않다. 작살의 관통 능력, 관통이후 Anchor의 강도가 중요하다. 그물과 같이 견인(Pull)하는 방식으로 추력기의 화염이 밧줄(Tether)로 향하기 때문에 열에 강한 물질을 사용하여야 한다. 작살이 연료통이나 액체 탱크를 관통하게 되면 누설 따른 오염, 발화, 파편 발생 등의 문제가 있다. 포획 개수 관점에도 그물과 같은 개념으로 One to One 뿐만 아니라 One to Many 방식으로 확장할 수 있다

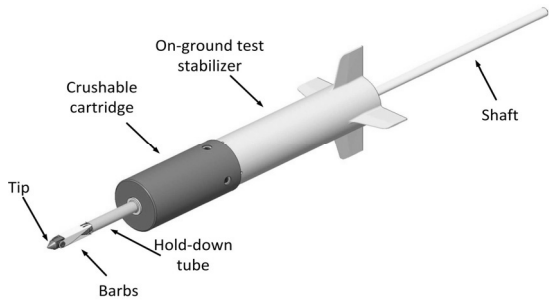


그림 8. 작살(Harpoon)의 개념도[11]

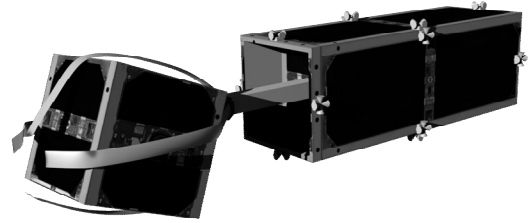


그림 9. Clean Space One 프로젝트의 구속장치

### 4.3 구속장치(Clamping Mechanism)

인간이 손으로 물건을 직접 잡는 것과 같은 가장 상식적으로 생각할 수 있는 개념이나 청소위성이 우주 쓰레기를 포획하는 순간에는 매우 정교한 기술이 필요하다. 즉, 청소위성과 우주 쓰레기간의 상대 위치 및 속도를 측정하는 정밀한 센서와 위성의 자세를 정교하게 조절하는 구동기가 필요하다. 이러한 난이도에도 불구하고 비교적 많은 연구가 여러 국가에서 이루어지고 있다. 예로서 Swiss Federal Institute for Technology(EPFL)에서 Clean Space One이라는 프로젝트<그림 9>를 수행 중인데 Cubesat 크기의 우주 쓰레기를 제거 하는데 초점을 맞추고 있다[12]. 구속장치 방식은 비우호적으로 움직이거나(Tumbling) 여러 개의 부속물이 달려 있는 우주 쓰레기를 포획하는데 어려움이 있다. 또한 구속장치는 우주 쓰레기에 과도한 힘을 가하거나 얹으면서도 우주 쓰레기가 빠져나가지 않도록 정교한 기술을 요한다. 포획에 실패할 경우 오히려 우주 쓰레기를 양산할 수 있다. 구속장치 형태는 우주 쓰레기의 형태에 따라 달라질 수 있고 포획되는 우주 쓰레기는 구속장치보다 작아야 한다. 우주 쓰레기 포획 이후에는 밀어서(Push) 우주 쓰레기를 Deorbiting 하거나 쓰지 않는 궤도(Graveyard Orbit)로 보내게 되는데 이는 Pull 방식보다 수월한 면이 있다.

### 4.4 팔매질(Sling)

미국 Texas A&M 대학교에서 제안한 Sling-Sat Space Sweeper 또는 줄여서 4S라고 명명된 방식으로 청소위성에 길게 확장될 수 있는 양팔을 대칭되게 달고 양팔 끝에는 우주 쓰레기를 포획하는 바구니를 부착한다. 우주 쓰레기가 한쪽 바구니에 포획되면 팔이 회전하게 되고 적당한 위치에서 우주 쓰레기를 대기권으로 던져서 마찰열로 소각시킨다[13]. 보통의 경우 One to Many로 우주 쓰레기를 제거하는 청소위성은 하나의 우주 쓰레기를 제거한 후 다음 목표물을 찾으러 가는데 많은 연료를 소비하게 된다. 반면 이 방식을 이용하면 이전에 포획한 우주 쓰레기의 운동에너지를 이용하여 다른 장소로 옮겨 갈 수 있기 때문에 연료 소비 면에서 유리하다고 말하고 있다. 문제점으로는 우주 쓰레기가 초속 7.9-11.2 km이므로 청소위성도 우주 쓰레기의 접선 방향에 비슷한 각도와 속도로 움직이면서 정확하게 우주 쓰레기를 바구니에 포획하여야 한다. 실패시에는 바구니 파손과 우주 쓰레기를 양산하게 된다. 또한 물리적으로 바구니 보다 큰 우주 쓰레기를 처리할 수 없다.



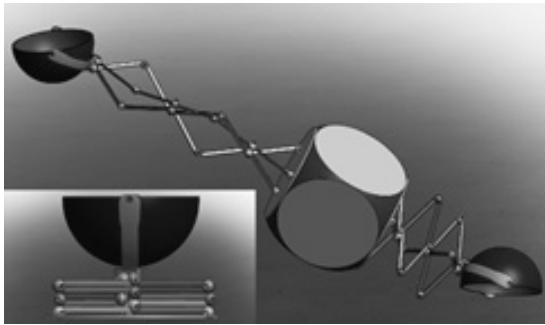


그림 10. Sling-Sat의 모식도

#### 4.5 레이저(Laser)

우주 쓰레기의 형태나 비우호적인 운동에 관계없이 효과적으로 적용할 수 있는 대표적인 비접촉식(Contract-less) 방식으로 High Power LASER를 우주 쓰레기에 조사하여 표면을 증발시킴으로써 로켓의 Flume과 같은 효과를 발생하여 우주 쓰레기의 속도를 감속시키는 원리이다. High Power Laser에 대하여서는 우주 무기 개발 관점에서 미국과 러시아가 오랜 기간 연구한 바 있다. 최근 들어서 일본 RIKEN (Rikagaku Kenkyusho) 과학자들은 Coherent Amplification Network(CAN) 레이저를 연구 중에 있다. 초당 10,000 펄스(각 펄스는 100억분의 1초 진행)로 발사하는 100,000watt 자외선 CAM 레이저를 이용하여 100km 떨어진 우주 쓰레기를 제거하는 구상하고 있다[14]. RIKEN은 초당 50,000펄스로 발사하는 자외선 CAM 레이저를 사용하게 되면 5분에 한 개의 우주 쓰레기를 제거할 것으로 보고 고도 1000km에서부터 500km까지 한달에 10km 씩 내려오면서 우주 쓰레기를 제거 하면 50개월 이후에는 대부분의 문제를 일으킬만한 우주 쓰레기를 제거할 수 있다고 예상하고 있다.

항공기나 우주에서 발사 되는 레이저는 아직은 매우 고가이다. 지상에서 발사 되는 레이저는 먼 거리에 의한 초점의 퍼짐 현상과 대기권에 의한 흡수로 인하여 레이저 빔이 약화되는 약점이 있다. 이 방식은 대형 보다 상대적으로 작은 우주 쓰레기를 Deorbit 시키는데 매우 효과적일 것으로 보인다. High Power Laser는 비접촉식이 가지고 있

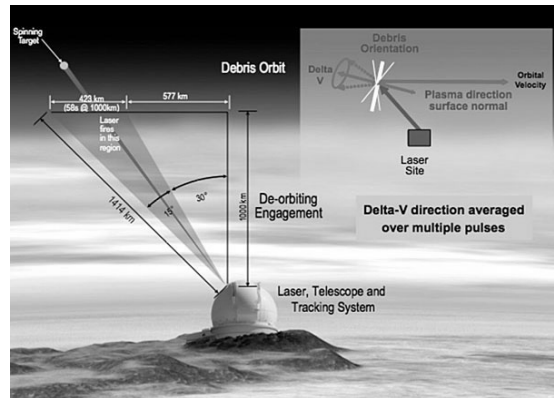


그림 11. 레이저를 이용한 우주 쓰레기 제거 모식도

는 많은 장점에도 불구하고, 운영 중인 대형위성의 중요 센서들을 흔적 없이 공격하는 ASAT (Anti-Satellite) 무기로 전용될 수 있으므로 정치적인 문제를 야기할 수 있는 방식이다. 비접촉식이므로 접촉식보다는 우주 쓰레기를 원하는 장소로 Deorbit 하는데 조정 능력이 떨어진다.

#### 4.6 지구자기력(Electromagnetic Deflection)

비접촉식 방식으로 소형이나 중형 크기의 우주 쓰레기 제거에 적합한 방법으로 작동원리는 우주 쓰레기에 전자빔을 쏘여 충전시키면 지구자기장 속을 전하가 운동하는 셈이 되어 로렌츠 힘이 발생한다. 자기장의 방향과 전하(우주 쓰레기)의 방향이 <그림 12>와 같게 되면 로렌츠 힘이 지구 쪽으로 생겨 비록 합성된 속도는 증가하게 되나 근 지점(Perigee)이 낮아서 우주 쓰레기의 궤도 수명이 줄어들게 된다. 이 방식은 새로운 기술개발이 필요 없고 High Power 레이저 보다 훨씬 저렴한 장점을 가지고 있지만 우주 쓰레기가 <그림 12>에서 표현된 방향과 반대 방향으로 돌면 오히려 고도를 높이는 결과를 초래한다. 또한 지구자기장 방향과 같은 평면으로 우주 쓰레기가 돌게 되면 로렌츠 힘이 거의 발생하지 않게 된다. 즉 지구 자기장이 남쪽에서 북쪽으로 향하므로 우주 쓰레기가 가장 밀집된 극궤도에서 효과적이지 않다. 기술적으로는 전자빔도 지구자기장에 의하여 방향을 바

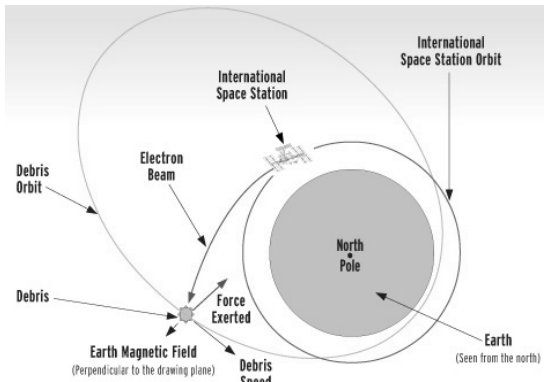


그림 12. 지구자기력 방식의 모식도

쿼트로 목표물을 정확하게 맞추기가 어렵고 우주 쓰레기가 전자빔에 의하여 충전이 되어야 적용할 수 있다. 또한 이온화된 입자들을 가지고 있는 태양풍을 맞게 되면 우주 쓰레기는 충전된 전하를 잃게 될 수 있다[15]. 스페인 Madrid 대학교에서는 <그림 13>과 같이 전기추력기를 사용하여 우주 쓰레기를 충전시키는 Ion Beam Shepherd라는 이름으로 이 방식을 제안하였다[16].

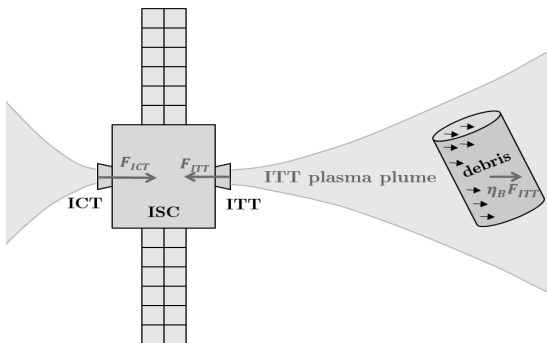


그림 13. Ion Beam Shepherd 작동 모식도

#### 4.7 거품(Foam)

Polymer 계열의 거품을 우주 쓰레기에 분사하고 거품이 팽창하여 구형 형태가 형성되도록 하는 방식이다. 이로서 무게 대 면적비가 커지게 되고 과도한 항력을 유발시킴으로써 우주 쓰레기를

Deorbit 시키는 방식이다. PMD용 방식에서 언급한 태양 돛이나 풍선 방식과 같은 원리이다. 비접촉식 방식으로 우주 쓰레기 제거 개수에 있어서 One to Many가 가능한 방식이다. 거품은 일상생활에서 배관 단열재로 쓰이는 우레탄 폼(Poly-Urethane Foam)처럼 팽창하여 구형의 고체로 굳어지게 된다. 장점으로는 <그림 14>와 같이 로봇팔을 이용하여 적정한 거리에서 거품을 발사하게 되면 우주 쓰레기에 충격을 가하지 않아 파손되는 일은 없을 것이다. 사용되는 거품은 처음 부피에 1000배까지 팽창이 가능하다고 보고하고 있다[17]. 단점으로는 우주 쓰레기를 감싸는 구형의 거품을 만드는 것이 쉬운 작업은 아니다. 또한 거품이 불완전하게 우주 쓰레기에 접착되어 있을 수 있고, 진공상태에서 거품이 완벽하게 팽창하지 않는 경우도 고려하여야 한다. <그림 15>는 우주 쓰레기 질량 대 최적의 거품 반지름을 계산한 결과이지만 현실적으로 이 방식은 1,000kg 또는 더 작은 대상에게 효과적이다[5].

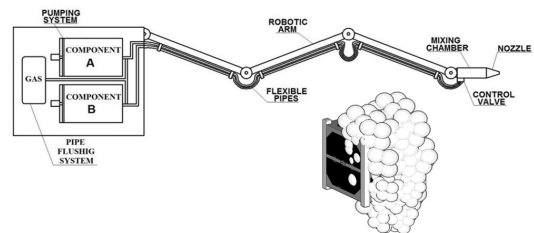


그림 14. 로봇팔에 달린 Foam 방출 노즐과 Space Debris에 형성 중인 Foam[5]

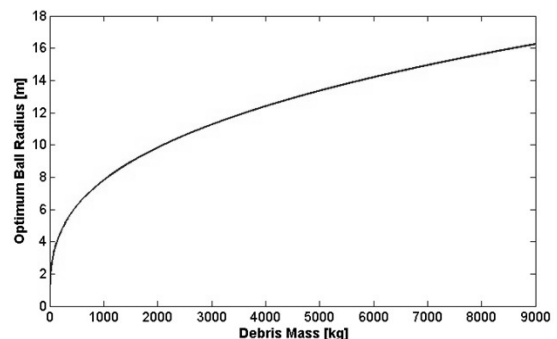


그림 15. 우주 쓰레기 질량 대 최적 거품 반지름

#### 4.8 인공대기(Artificial Atmosphere)

비접촉 방식으로 성층권에서 기체를 폭발시키거나 Vortex generator를 사용하여 우주 쓰레기가 지나가는 지역에 인공 대기(Artificial Atmosphere)를 만들어 우주 쓰레기의 속도를 낮추어 최종적으로 대기권에서 마찰열로 소각 시키는 방식이다[18, 19]. 규모가 큰 우주 쓰레기 보다 규모가 작은 우주 쓰레기 제거에 효과적으로 보인다. 단점으로 우주 쓰레기가 가장 문제가 되는 고도 500-1000km까지 인공 대기가 도달 하더라도 오랜 기간 담아 둘 수 없다. 또한 우주 쓰레기의 속도가 초속 11km이상의 속도로 비행하기 때문에 적어도 직경 수백 Km 이상의 인공대기가 만들어져야 우주 쓰레기 속도를 낮추는데 영향을 미칠 것으로 보인다.

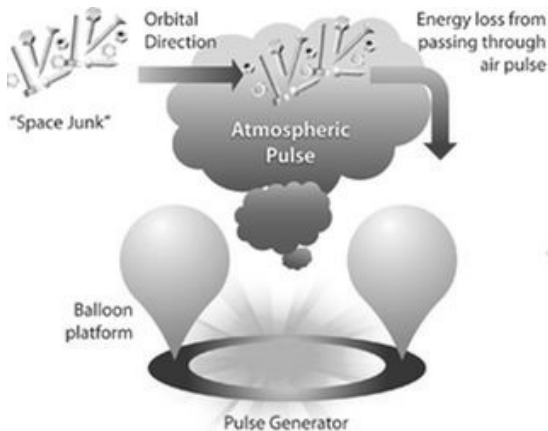


그림 16. 인공대기를 이용한 ADR 모식도

#### 4.9 기타 방식

본 논문에서 언급한 방식 이외에도 여러 가지 방식이 현재 개발되고 제안되고 있다. 한 예로 2018년 발사를 목표로 싱가포르 소재의 창업기업 Astroscale은 자체 개발한 끈끈이(Flypaper)를 부착하여 우주에서 시험할 무게 120kg의 위성을 개발하고 있다[20]. JAXA는 자기장을 생성하는 그물을 만들어 작은 크기의 우주 쓰레기를 끌어 들이고 충분히 쌓이게 되면 서서히 대기권으로 내려와 소

각되는 방식을 2019년 발사를 목표로 개발 중이다 [21].

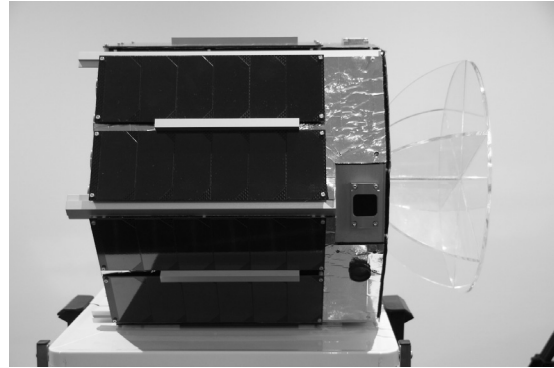


그림 17. 끈끈이가 부착된 위성

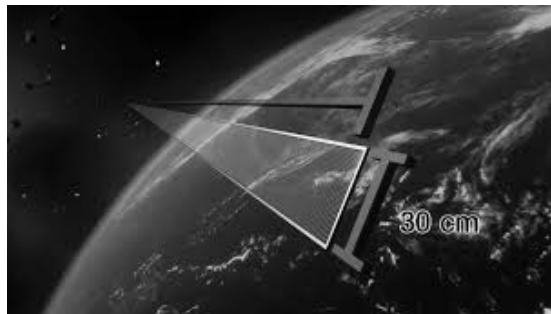


그림 18. JAXA의 시험용 자기장 그물

### 5. 맺 음

우주 폐기물의 심각성을 인지하면서 이것을 제거하는 방식에 대하여 고찰하였다. 국내에서도 이와 관련된 연구가 수년 전부터 시작되었다[22, 23, 24, 25]. 선행연구에서 다루었던 주제에 대하여, 본 논문은 우주폐기물에 대한 일반 관심자 부터 정책 결정권자가 우주 폐기물을 제거하는데 있어서 향후 환경과 목적에 따라 적합한 제거 방식을 선택하는데 도움을 주기 위하여 우주 폐기물 제거 방식을 다음과 같이 분류하여 논하였다. 우주 폐기물을 제거하는 주제에 따라서 PMD용과 ADR용 방식으로, 제거 대상의 개체 수에 따라서 One to One과 One to Many 방식으로, 처리 장소에 따라

서 Deorbit과 Graveyard 방식으로, 우주 폐기물의 크기에 따라서 대형과 소형으로, 포획 방법에 따라 접촉식과 비접촉식으로, 진행 방향에 따라 Push형과 Pull형으로 분류를 하면서 현재까지 제안되고 있는 우주 폐기물 처리 방식의 장단점을 정성적으로 소개하였다. 우주 폐기물을 제거하는 기술은 근본적으로 우주에서의 평화적인 활동을 위하여 개발되고 사용될 것이지만 경우에 따라서는 상대국의 위성을 파괴하는 ASAT(Anti-Satellite)으로도 변형될 수 있는 양면성을 가진 기술이다. 따라서 이에 대한 준비도 필요할 것으로 보여진다. 끝으로 지면 관계상 본 논문에서 언급하지 못한 여러 가지 방식의 우주 폐기물 제거 방식이 아직 많이 있을 것으로 예상되나 이들이 본 논문에서 언급하였던 방식에서 획기적으로 벗어나지 않거나 아직은 개념 단계일 것이라고 생각이 된다.

## 참고문헌

1. T. Wang, "Analysis of Debris from the Collision of the Cosmos 2251 and the Iridium 33 Satellites", Science & Global Security, 2010
2. J. C. Liou, "Effectiveness of Satellite Post-mission Disposal to Limit Orbital Debris Growth in Low Earth Orbit", NASA Technical Report 20150003819, 2014
3. <http://spacenews.com/35073orbital-debris-experts-call-for-space-junk-removal-missions/>
4. J. C. Liou, "Options and Challenges for Orbital Debris Environment Remediation", NASA Document ID 20120003282, 2012
5. M. Andrenucci, P. Pergola, and A. Ruggiero, "Active Removal of Space Debris, Expanding Foam Application for Active Debris Removal", ESA Final Report, Contract No. 4000101449/10/NL/CBi, 2011
6. <http://www.parabolicarc.com/2013/12/26/esa-solar-sail-deorbiter/>
7. <http://gaerospace.com/projects/GOLD/index.html>
8. R. Hoyt, "RUSTER: Architecture and Technologies for Low-Cost Remediation of the LEO Large Debris Population", International Orbital Debris Removal Conference, 2009
9. B. B. Virgili and H. Krag, "Analyzing the Criteria for a Stable Environment", Proceedings of Advances in the Astronautical Sciences, August 2011
10. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Automation\\_and\\_Robotics/RObotic\\_GEostationary\\_orbit\\_Restorer\\_ROGER](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Automation_and_Robotics/RObotic_GEostationary_orbit_Restorer_ROGER)
11. J. Reed, J. Busuets, and C. White, "Grappling System for Capturing Heavy Space Debris", Proceedings of the 2nd European Workshop on Active Debris Removal, 2012
12. <http://swisscube.epfl.ch/>
13. J. W. Missel, "Active Space Debris Removal Using Capture and Ejection", Dissertation, Texas A&M University, 2013
14. <http://www.space.com/29271-space-station-laser-cannon-orbital-debris.htm>
15. <http://spacenews.com/42511space-debris-mitigation-a-new-hope-for-a-realistic-solution/>
16. R. L. Estergaard Jacobsen, "Ion Beam Shepherd: Analysis of the Plasma Bridge Interaction", Bachelor Thesis, University Carlos III Madrid, 2015
17. Fire Fighting and Fire Protection Systems Standards, Engineering Standard for Foam Generating and Proportioning Systems, IPS-E-SF-140

18. D. A. Gregory et al., "Space Debris Removal Using Artificial Atmospheres", Patent No. US 8919702 B2, U.S.A., 2014
19. D. A. Gregory et al., "Space Debris Removal Using Upper Atmosphere and Vortex Generator", Patent No. US 8657235 B2, U.S.A., 2014
20. <http://motherboard.vice.com/read/this-satellite-uses-special-glue-to-stick-to-space-debris-like-flypaper>
21. <http://www.geek.com/news/japan-will-deploy-a-space-net-to-capture-orbiting-debris-1582324/>
22. 김해동, "우주파편 연구동향", 항공우주산업기술동향지, 9권 2호, pp. 52-64, 2011
23. 김해동, 임성민, "우주로봇 및 위성 서비스 개발 기술", 항공우주산업기술동향지, 10권 1호, pp. 171-178, 2012
24. 임성민, 성재동, 김해동, "초소형위성을 이용한 우주파편 제거 연구 동향", 항공우주학회 춘계학술대회, pp. 781-785, 2013
25. 김해동, 김민기, "우주파편 능동제거 기술 연구개발 동향 분석", 한국항공우주학회지, 43(9), pp. 845-857, 2015