

우주감시체계의 개발동향 분석 및 효과적인 대응방안 연구

이재훈
국방기술진흥연구소

A Research on Development Trends in Space Surveillance System and Effective Countermeasures against Space Threats

Jae-Hun Lee
Korea Research Institute for defense Technology planning and advance

요약 전 세계적으로 우주개발이 가속화됨에 따라 지구궤도를 공전하는 인공위성의 수가 급격히 증가하는 추세이며, 한정된 궤도자원으로 인한 위성 간 충돌, 우주파편과 인공위성 간 충돌, 인공위성 및 파편의 추락 등 우주위협 발생 가능성 또한 크게 증가하였다. 따라서 세계 주요 선진국들은 우주의 상황을 인식하고 우주위협에 대한 감시 및 관리시스템을 구축하여 운영 또는 개발 중이다. 우리나라의 경우 우주산업 육성 추진에 따라 인공위성 수의 지속적인 증가가 예상되므로 충돌 또는 추락 등의 우주위협에 대해 사전에 인지하고, 선제적이고 체계적인 우주위협 대응책 마련이 필요하다. 본 논문에서는 우주위협에 선제적 대응을 위한 감시체계의 개념을 정립하고 국내 및 해외에서 운용 또는 개발 중인 레이더와 전자광학 센서 기반 우주감시체계의 현황 분석을 통해 우리나라에서 운용 중인 우주감시체계의 제한점을 도출하였으며, 효과적인 우주감시체계 구축을 위해 기반기술 확보의 필요성 및 발전방안을 제시하였다. 본 연구의 결과를 활용하여 효과적인 우주감시체계 구축을 위한 관련 기술개발에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract As space development accelerates around the world, the number of satellites in orbit is increasing rapidly, and the possibility of space threats, such as collisions between satellites due to limited orbital resources, collisions between space debris and satellites, and the fall of satellites and debris, is also increasing significantly. Therefore, developed countries know the space situation and are operating or developing monitoring and management systems for space threats. In Korea, the number of satellites is expected to increase as the space industry is promoted. Therefore, it is necessary to recognize threats in advance and prepare preemptive and systematic response measures. This paper establishes the concept of a space surveillance system, analyzes the development trends of domestic and foreign space surveillance systems, and identifies the limitations of the system in operation in Korea. The necessity of securing basic technology and development plans to establish an effective space surveillance system is presented. These results can be used as basic data for developing related technologies to build an effective space surveillance system.

Keywords : SSA, Space Surveillance, Space Debris, Radar, Phased Array

*Corresponding Author : Jae-Hun Lee(Korea Research Institute for defense Technology planning and advance)
email: 2jaehun@krit.re.kr

Received June 11, 2024

Revised July 4, 2024

Accepted July 5, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

1.1 우주위협의 정의

1.1.1 각 제목

우주위협은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 지구 주변의 우주환경에서 우주물체의 추락·충돌, 태양폭풍 등에 의해 국민의 안전과 우주자산에 피해를 줄 수 있는 위협을 의미한다.

우주물체는 자연우주물체와 인공우주물체로 구분하며, 자연우주물체는 소행성, 혜성, 유성체 등 태양계 내에서 자연적으로 생성되어 우주공간에 존재하는 물체를 의미하며, 인공우주물체는 현재 운영 중이거나 폐기된 인공위성, 인공위성 또는 발사체로부터 발생된 우주 파편(Debris) 등 인간의 우주활동으로 인해 발생된 물체를 의미한다[1].

1.2 우주위협의 현황

1.2.1 자연우주물체에 의한 위협

우주공간에서 지구로 추락하는 자연우주물체는 일일 약 100톤 이상이며 이는 유성 관측 및 운석 발견 등으로 나타난다. 2013년 러시아 첼랴빈스크 지역에 소행성이 추락하면서 약 7,200건의 건물 파손과 1,500여명의 중경상 피해가 발생하였으며 50 cm급 소행성이 추락할 경우 막대한 수준의 인명 및 재산피해가 발생할 것으로 예상된다.

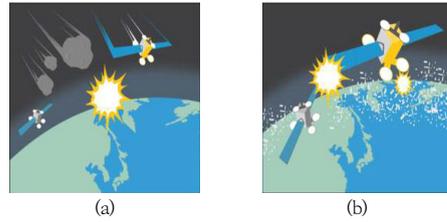


Fig. 1. Space Threat Factor
(a) Fall (b) Collision

1.2.2 인공우주물체에 의한 위협

2024년 6월 기준 운영 중인 인공위성의 개수는 약 12,000개, 우주 파편 및 목록화 되지 않은 우주물체는 약 28,000개 이상에 달하는 것으로 확인되었으며[2], 시간이 지날수록 그 수는 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다.

Fig. 2는 미국 NASA에서 모델링을 수행한 결과로, 2019년 1월 1일 기준 저궤도(LEO : Low Earth Orbit, 이하 LEO) 및 정지궤도(GEO : Geosynchronous Earth Orbit, 이하 GEO)에 존재하는 인공위성 및 우주 파편의 분포를 나타낸다[3].

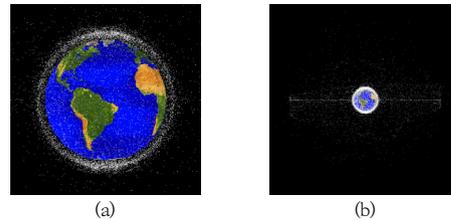


Fig. 2. Orbital Debris
(a) LEO Debris (b) GEO Debris

Table 1. Size, Amount, and Potential Risk of Orbital Debris

Size of Debris		Amount in LEO	Potential Risk
10 cm and larger		At least 26,000	Catastrophic
1 cm and larger		Over 500,000	Mission-ending threat due to penetration of thermal protective systems, critical infrastructure such as fuel tanks, and spacecraft cabins
1 mm and larger		Over 100 million	Significant impact or loss of mission due to penetration of fuel tank and other critical infrastructure; erosion of surfaces; potential to crack windows and in the case of human space flight, penetrate spacesuits

저궤도 및 정지궤도에 존재하는 우주물체의 약 95%는 수명을 다한 위성 및 우주 파편으로, 약 7~8km/s의 속도로 지구 주위를 공전하는데, 크기 1 cm(유리구슬과 유사한 크기) 이상인 파편의 경우, Table 1에서와 같이 대략 500,000 이상이 존재하는 것으로 추정된다[4].

미국, 러시아, 중국과 같은 우주 선진국들의 경우 탄도미사일을 이용한 인공위성 요격, 킬러위성 등 對 인공위성(ASAT : Anti Satellite, 이하 ASAT) 무기체계의 개발 및 시험으로 인한 우주 파편 생성 등 우주위협을 증가시키고 있다[5].

우리나라의 경우 2022년 5월 기준 정부 및 기관에서 다목적실용위성 4기(아리랑), 통신위성 5기(무궁화, 아나시스), 기상 및 환경관측 3기(천리안), 차세대 소형위성 1기, 차세대 중형위성 1기, 총 14기를 운영 중이며 이외에도 대학교의 연구 목적 및 경연대회를 통해 개발된 다수의 초소형 인공위성(큐브위성)들이 발사 및 운영 중이다.

제21회 국가우주위원회('21.11.15.) 결과에 따르면 2031년까지 총 170여기의 인공위성을 개발하고 국내 발사체를 이용하여 총 40여회 발사를 추진 예정이며, 우주산업 육성 추진에 따라 지속적으로 인공위성이 증가할 것으로 예상된다.

미국의 SpaceX社は 미 연방통신위원회(FCC : The Federation Communication Commission, 이하 FCC)로부터 11,943개의 인공위성 발사에 대한 권한을 획득하였으며 저궤도에서 초고속 무선인터넷 서비스를 제공하기 위해 현재 수천 개의 통신위성(Starlink)을 발사하여 운영 중이며 Amazon社は 저궤도에 약 3,200개의 위성을 발사하는 것을 목표로 사업을 진행 중이다.

국가별 인공위성의 발사 및 운영 대수가 급격히 증가함에 따라 타국의 인공위성, 파편 및 기타 우주물체와 충돌 가능성이 높아지고, 충돌할 경우 심각한 피해가 발생할 것으로 예상된다. 특히 저궤도에서의 인공위성 수가 급격한 속도로 증가하고 있으므로 우리나라에서 현재 운영 중인 저궤도 인공위성 및 향후 발사 예정인 저궤도 인공위성들과의 충돌위험이 증가할 것으로 예상된다.

우주물체의 지표면 추락 또한 심각한 인적·물적 피해를 발생시킬 가능성이 있다. 중국 우주정거장 '톈궁1호'는 2018년 4월 남태평양에 추락하였으며, 1978년 구 소련의 인공위성 'COSMOS 954'는 북극권 지역에 추락하였다. 다행히 두 사건 모두 인적이 없는 지역에 추락하여 인명 피해는 발생하지 않았으나, 통제불능 상태의 우주물체가 지상으로 추락할 경우 낙하를 조정하는 것은 현실적으로 불가능하며 지상에서 우주감시를 통해 추락위

험에 대비해야 할 것으로 판단된다.

1.3 우주감시의 정의

우주감시란 소행성, 인공위성 및 우주잔해물 등 자연 및 인공우주물체의 탐지, 궤도결정 및 추적, 식별 및 이를 목록화하는 일련의 활동을 말한다. 최종 단계에

서는 우주물체 감시부터 획득된 자료의 분석을 통해 우주물체의 지상 추락 예측, 운용 중인 인공위성과의 충돌 예측, 위험도를 평가하여 우주물체로 인한 위험을 최소화할 수 있게 하는 기초자료를 생성한다[6].

1.4 우주감시 임무형태

우주감시 임무형태는 사용자의 요구사항에 따라 구분되며, 주요 임무는 Table 2에서 보는 바와 같이 크게 3가지로 요약할 수 있다[7].

Table 2. Space-Surveillance Mission Type

Type	Details
Catalogue	Space surveillance and detection of objects, cold start of a catalogue with defined coverage requirements, maintenance of a catalogue with given accuracy constraints
Collision Avoidance	Conjunction analysis, refinement of the analysis and screening of user provided ephemerides
Re-entry Prediction	Identification of risk objects that are close to a natural uncontrolled re-entry, prediction of re-entry location and epoch(with uncertainty information), refinement of the analysis in order to achieve the required prediction accuracy

우주감시 임무는 인공위성 등 우주자산에 영향을 미치는 우주 파편까지 탐지할 수 있어야 하며, 탐지된 정보를 지속적으로 갱신함으로써 위험 요소를 사전에 식별해야 한다.

2. 국내·외 우주감시체계 개발동향

2.1 우주감시체계의 기술적 특성 및 운용개념

우주감시는 레이더, 전자광학, 레이저 센서를 이용하며 각 기반기술에 따른 특성 및 장·단점은 Table 3과 같다. 본 논문에서는 레이더 및 광학 기반 우주감시체계를 위주로 다룬다.

Table 3. Space-Surveillance Mission Type

Sensor Type	Characteristics	Merits	Demerits
Radar	- Using RF to detect object	- Simultaneous detecting - Wide detecting range - Regardless of weather condition	- High price - Short detecting range - Low accuracy
Optic	- Using telescope to detect object	- Unrestricted detecting range - Possible to image - High resolution - Relatively low price	- Narrow range - Influenced by weather condition
Laser	- Using laser to detect object	- High Accuracy - Low time limitation(Day/Night) - Relatively high detecting range - Relatively low price	- Reflector needed - Influenced by weather condition

2.2 국내 우주감시체계 개발동향

2.2.1 레이더 감시체계

한국항공우주연구원에서 우주발사체의 궤도 정밀추적을 위해 2007년부터 Fig. 3에서 보는 바와 같이 2대의 레이더를 운영 중이며, 나로우주센터(고흥)에서 운용되는 레이더의 주요 성능은 Table 4와 같다[8]. 파라볼라 레이더로 구동장치가 필요하므로 다수의 물체 동시 탐지 및 추적이 제한되며 미국 연합우주작전본부(CSPoC : Combined Space Operations Center)로부터 TLE(Two Line Element)나 CSM(Conjunction Summary Message)과 같은 외부 정보를 받아야 추적이 가능하다.

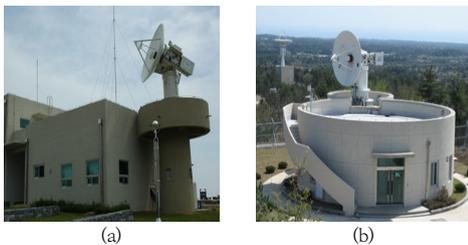


Fig. 3. Tracking Radar Operated by Korea Aerospace Research Institute
(a) Radar in Gohung (b) Radar in Jeju

Table 4. Radar Specification in Gohung

Specification	Details
Frequency	5.3GHz~5.8GHz
Power	250kW
Range	Azimuth : 360°
	Elevation : -5°~85°
Antenna Gain	43dBi

2.2.2 전자광학감시시스템

제1차 우주위협대비 기본계획(2014~2023) 실행에 따라 2016년 전자광학감시시스템(OWL-Net : Optical Wide Field Patrol Network) 구축을 완료하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 국내·외 총 5개(대한민국, 몽골, 모로코, 이스라엘, 미국)의 관측네트워크로 구성되어 있으며, 50 cm급 광시야 전자광학망원경을 활용하여 우주물체(특히 국적위성)에 대한 광학감시를 위해 한국천문연구원에서 운용하는 체계이다.

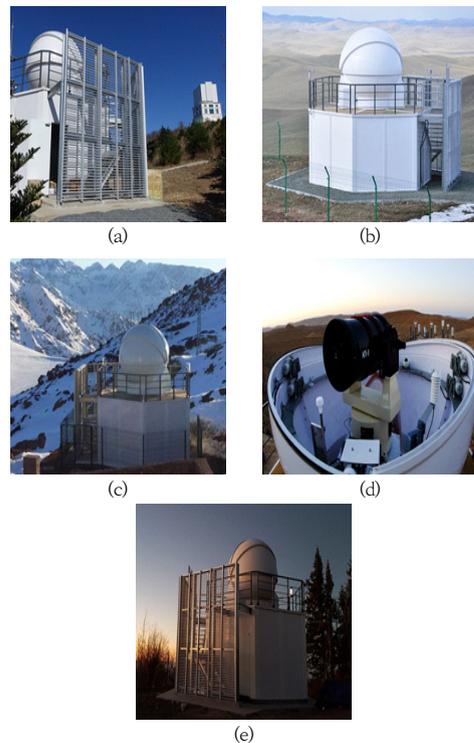


Fig. 4. OWL-Net Observatory
(a) Korea (b) Mongol (c) Morocco (d) Israel (e) U.S.

2.2.3 전자광학위성감시체계

우리나라 공군에서 운용하는 광학 기반 우주감시체계로(EOSS : Electro Optical Space-surveillance System, 이하 EOSS), 한반도 상공을 지나는 우주 미확인 물체 등의 독자적 감시를 위해 2015년 개발에 착수, 2022년 전력화하였으며, 서울 기준 반경 2000 km, 고도 700 km 이하의 우주물체에 대한 감시 임무를 수행한다[9].

크게 3개의 하위 시스템으로 구성되며, 궤도정보가 확인된 우주물체의 관측정보 갱신과 미확인 우주물체에 대한 정보 획득 업무를 수행하는 탐색 시스템, 탐색시스템에서 추적한 우주물체의 영상과 특성을 분석해 통제시스템에 전달하는 식별 시스템, 식별된 우주물체에 대한 분석정보를 목록화해 저장하고 관측 계획을 보완하는 통제 시스템으로 구분된다.

2.3 해외 우주감시체계 개발동향

Table 5에서 보는 바와 같이 주요 우주기술 선진국들은 레이더 및 광학 센서를 이용한 우주감시체계를 개발 및 운용 중에 있다.

미국은 1969년 위상배열레이더를 최초로 개발(AN/FPS-85)하여 SLBM(Submarine Launched Ballistic Missile) 조기경보 임무를 수행하였으나, AN/FPS-115를 개발함에 따라 우주감시를 위한 전용 레이더로 운용되었다. 특히 AN/FSY-3는 기존에 운용 중이던 파라볼라 레이더 형태의 AN/FPS-133을 대체하기 위해 개발된 위상배열레이더 기반의 우주감시체계로, 저궤도(LEO) 우주물체에 대한 탐지·추적·목록화 임무를 주로 수행하며, 중궤도(MEO : Middle Earth Orbit, 이하 MEO) 및 정지궤도(GEO)의 우주물체에 대해서도 추적이 가능하고, 디지털 빔포빙 기술을 적용하여 특정 우주물체에 대한 정밀추적 및 다중 우주물체에 대해 동시 탐지가 가능하다. 게다가 우주물체를 추적하기 위해 MSSS, GEODSS와 같은 전자광학 센서 기반의 감시체계를 별도로 운용 중이다.

독일 프라운호퍼 연구소에서 개발한 GESTRA는 고도 3,000 km 이하의 우주물체 감시를 위해 개발되었으나, 낮은 출력과 적은 송·수신모듈 개수(각 256개)로 미루어 상시 감시 목적이 아닌 연구 목적으로 운용되는 것으로 예상된다.

Table 5. Overview of Global Space Surveillance System

Sensor Type	Name(Country)	Details	Remarks
Radar	AN/FPS-85(U.S.)	- Frequency : 442 MHz - Power : 32 MW	- Phased Array Radar
	AN/FPS-108(U.S.)	- Frequency : 1.175 ~ 1.375 GHz(Wide)/ 1.215 ~ 1.250 GHz(Narrow) - Power : 15.4 MW - Range : 46,000 km	- Phased Array Radar
	AN/FPS-115(U.S.)	- Frequency : 420 ~ 440 MHz - Power : 600 kW - Range : 4,800 km	- Phased Array Radar
	AN/FPS-133(U.S.)	- Frequency : 216.98 MHz - Power : 600 kW - Range : 4,800 km	- Parabolic Radar
	AN/FSY-3(U.S.)	- Frequency : S Band - Power : 2.69 MW - Range : 5,202 km	- Phased Array Radar
	GESTRA(Germany)	- Frequency : 1.28 ~ 1.40 GHz - Power : 256 kW - Range : 3,000 km	- Phased Array Radar
	GRAVES(France)	- Frequency : 143.05 MHz - Power : over MW - Range : 1,000 km	- Phased Array Radar
Optic	KAMISAIBARA(Japan)	- Frequency : 3.265 GHz - Power : 94 kW - Range : 600 km	- Phased Array Radar
	MSSS(U.S.)	- 3.7 m / 1.6 m / 1.2 m telescope - FOV : 0.025° ~ 3.0°	
	GEODSS(U.S.)	- 1 m / 0.38 m telescope - FOV : 2° ~ 6°	

프랑스, 일본에서도 고도 1,000 km 이하에서의 우주 물체 및 파편에 대한 궤도결정 및 지구재진입 예측 등의 임무를 수행하기 위해 위상배열레이더 기반의 감시체계를 개발 및 운용 중이다.

2.4 국내 우주감시체계의 제한사항

한국천문연구원 및 공군에서 운용 중인 광학감시체계는 레이더에 비해 상대적으로 낮은 비용, 높은 해상도, 영상(image) 획득 등의 장점이 있으나, 좁은 탐지범위와 기상학에 많은 영향을 받는 단점이 있다. 한국항공우주연구원의 파라볼라레이더는 우주발사체의 궤도에 대한 추적을 위해 운용 중이며, 사전에 식별된 우주물체에 대한 감시에는 효과적이나 넓은 범위에서의 다수 우주물체 감시에는 적합하지 않다.

해외에서는 이러한 문제를 극복하고 기상 변화에 상관 없이 넓은 범위에 대한 다중 감시를 위해 위상배열레이더 기반의 감시체계를 다수 운용 중이다. 특히 미국의 경우, 위상배열레이더를 이용하여 미식별 우주물체에 대한 탐지하여 궤도정보를 획득한 후, 전자광학감시체계를 이용하여 식별된 우주물체에 대한 궤도정보 갱신, 궤도 재진입 및 추락을 예측하는 복합 감시체계를 운용하므로 우리나라도 이에 위상배열레이더 기반 감시체계 구축 및 광학 기반감시체계와 연동한 복합 감시체계 구축이 필요하다.

3. 우주감시체계 기술발전방안

3.1 우주감시체계 기반기술

위상배열레이더는 여러 개의 안테나 소자를 배열로 구성한 형태로, 각 소자는 독립적으로 신호의 송·수신 및 신호의 위상 조절을 통한 전자적 빔 조향이 가능하여 파라볼라레이더에 비해 광역 감시와 빠른 속도로 움직이는 미식별 우주물체 감시에 효과적이다. 특히 지구 대기권 밖의 초장거리 우주감시를 위해서는 초대형 위상배열레이더 개발을 위한 관련기술 확보가 필수적이다.

감시센서와 같은 하드웨어적인 기술 외에도 효과적인 우주감시를 위해서는 탐지된 우주물체에 대한 정확한 궤도결정 및 궤도정보 유지 등의 오차 보정과 관련된 최적의 알고리즘이 필요할 것으로 예상된다.

3.2 초대형 위상배열레이더 설계 및 방열기술

국내에서 현재 개발이 완료되어 운용 중인 위상배열레

이더는 탐지거리가 수십 ~ 수백 km에 불과하고[10], 탐지 고도는 거리에 비해 더 낮을 것으로 예상되며, 우주감시를 위해 바로 적용하기에는 제한된다. 2020년부터 운용 중인 미국의 AN/FSY-3의 경우, 탐지거리는 약 5,000 km, 출력은 2.5 MW 이상의 출력을 가지는 것으로 확인된다. 따라서 우주감시를 위해서는 수천 km 이상의 탐지거리와 MW 급 이상의 출력을 가지는 초대형 위상배열레이더를 설계하고, 고출력으로 인해 발생하는 막대한 열을 냉각하는 기술이 필요할 것으로 예상된다.

3.3 다중 탐지를 위한 자원관리 기술

레이더에서 사용하는 주파수 자원은 한정되어 있다. 수백~수천 개에 달하는 우주물체에 대한 다중 탐지 및 추적을 위해서는 한정된 주파수 자원에 대한 최적화된 자원 배분 기술, 최적의 빔 스케줄링 기술을 바탕으로 우선순위 기반의 자원관리 알고리즘 설계기술이 필요하다.

3.4 궤도결정을 위한 알고리즘 설계기술

우주환경에서는 전파의 굴절 및 전리층 영향에 따른 탐지 정보(거리, 방위, 고도각)에 대한 오차가 발생하므로 이를 보정하고, 산출하는 기술이 요구된다. 게다가 우주물체의 궤도는 1회의 탐지로 결정되는 것이 아닌 지속적인 감시를 통한 궤도정보 및 결정이 이루어지는데, 특히 미상 우주물체 식별 후 초기 궤도결정을 위해서는 높은 정확도가 요구되며, 궤도결정 이후 지속적인 감시를 통한 정보 갱신 및 신뢰성 있는 궤도정보 유지를 위해서는 이와 관련된 편차 및 오차 보정 알고리즘 설계기술이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 우주감시에 대한 기본 개념을 정립하고, 국내·외 개발동향을 분석함으로써 우리나라 우주감시체계의 제한사항을 도출하였으며, 이를 극복하기 위한 발전방안을 제시하였다.

우리나라에서 운용 중인 파라볼라레이더 기반 우주감시체계는 추적 목적으로 운용 중이며, 광학우주감시체계는 레이더보다 정밀한 추적 및 영상 획득 목적으로 운용 중이다. 궤도정보를 알 수 없는 미식별 우주물체에 대한 광역 및 동시 탐지, 궤도정보 획득을 위해서는 위상배열

레이더 기반 우주감시체계 운용이 반드시 필요하다. 그리고 위상배열레이더(탐지)-파라볼라레이더(추적)-광학장비(정밀추적 및 영상 획득)로 이어지는 다중 감시체계를 구축하여, 증가하는 미래 우주위협에 효과적으로 대응할 수 있어야 할 것이다. 특히, 본 연구를 통해 위상배열레이더 기반의 우주감시체계 개발에 대한 중요성을 인식하고, 관련 기술개발이 신속하게 이루어질 수 있도록 기대한다.

References

- [1] 1st Basic Plan against Space Threat(2014~2023), Policy Report, Ministry of Science, ICT and Future Planning, Korea, pp.2.
- [2] <https://www.space-track.org/#boxscore> (accessed June. 6, 2024)
- [3] NASA Orbital Debris Program Office Debris Modeling, <https://www.orbitaldebris.isc.nasa.gov/modeling> (accessed June. 1, 2024)
- [4] NASA's Efforts to Mitigate the Risks Posed by Orbital Debris, Audit Report, NASA, U.S., pp.3.
- [5] B. Weeden, V. Samson, Global Counterspace Capabilities, Secure World Foundation, U.S., pp.15-01-15-05.
- [6] S.K.Cho, "Using Radar for Surveillance of Space Threat and The Status of Development", *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.28, No.2, pp. 12-19, Mar. 2017.
- [7] H. Krag, H. Klinkrad, T. Flohrer, E. Fletcher, "The European Surveillance and Tracking System-Service and Design Drivers", *Proc. SpaceOPS 2010 Conference*, Huntsville, U.S., April 2010. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-1927>
- [8] H.S.Shin, J.H.Choi, D.O.Kim, T.H.Kim, D.G.Kim, O.Ch.Jung, D.W.Jung, "The Analysis for the ISS Tracking Test of Tracking Radar in NARO Space Center", *The Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp.1,303-1,306, Nov. 2014.
- [9] D.J.Oh, 'Electro Optical Satellite-surveillance System' Launched, Independently Monitor Space Over the Korean Peninsula, Gukbangnews [cited 2022 Jan 5] <https://www.gukbangnews.com/news/articleView.html?idxno=3222> (accessed June. 8, 2024)
- [10] <https://www.hanwhasystems.com> (accessed July. 2, 2024)

이 재 훈(Jae-Hun Lee)

[정회원]



- 2014년 2월 : 경북대학교 전자공학부 (공학석사)
- 2022년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

국방, 감시정찰, 레이더