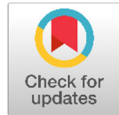


연구논문

# 누리호 탑재 위성들의 충돌위험의 예측 및 향후 상황의 대응을 위한 분석

최승환<sup>1,2,3</sup>, 유중현<sup>1,2,3</sup>, 김종원<sup>1</sup>, 김성애<sup>1</sup>, 신경우<sup>4</sup>, 김용일<sup>5</sup>, 이재진<sup>6</sup>, 최성환<sup>7</sup>, 송재욱<sup>8</sup>, 김해동<sup>9</sup>, 마미순<sup>10</sup>, 김덕수<sup>1,2,3†</sup>

- <sup>1</sup>스페이스맵 주식회사
- <sup>2</sup>한양대학교 기계공학부
- <sup>3</sup>한양대학교 Voronoi Diagram Research Center
- <sup>4</sup>카이로스페이스
- <sup>5</sup>저스텍
- <sup>6</sup>한국천문연구원
- <sup>7</sup>공군우주센터
- <sup>8</sup>한양대학교 산업공학과
- <sup>9</sup>경상국립대학교 항공우주 및 소프트웨어공학부
- <sup>10</sup>M&K Research and Development Inc.



Received: March 29, 2023  
Revised: April 19, 2023  
Accepted: April 22, 2023

†Corresponding author :

Douglas Deok-Soo Kim  
Tel : +82-2-2220-0472  
E-mail : douglas.kim@spacemap42.com,  
dskim@hanyang.ac.kr

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

- Shawn Seunghwan Choi  
<https://orcid.org/0000-0002-0799-5448>
- Peter Joonghyung Ryu  
<https://orcid.org/0000-0002-6328-8094>
- John Kim  
<https://orcid.org/0009-0000-2326-4090>
- Lowell Kim  
<https://orcid.org/0009-0002-5594-5936>
- Chris Sheen  
<https://orcid.org/0009-0002-3543-7096>
- Yongil Kim  
<https://orcid.org/0009-0005-6443-8241>
- Jaejin Lee  
<https://orcid.org/0000-0002-3367-3346>
- Sunghwan Choi  
<https://orcid.org/0000-0002-5674-4207>
- Jae Wook Song  
<https://orcid.org/0000-0001-6455-6524>

## Conjunction Assessments of the Satellites Transported by KSLV-II and Preparation of the Countermeasure for Possible Events in Timeline

Shawn Seunghwan Choi<sup>1,2,3</sup>, Peter Joonghyung Ryu<sup>1,2,3</sup>, John Kim<sup>1</sup>, Lowell Kim<sup>1</sup>, Chris Sheen<sup>4</sup>, Yongil Kim<sup>5</sup>, Jaejin Lee<sup>6</sup>, Sunghwan Choi<sup>7</sup>, Jae Wook Song<sup>8</sup>, Hae-Dong Kim<sup>9</sup>, Misoon Mah<sup>10</sup>, Douglas Deok-Soo Kim<sup>1,2,3†</sup>

- <sup>1</sup>SPACEMAP Inc., Seoul 04763, Korea
- <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea
- <sup>3</sup>Voronoi Diagram Research Center, Hanyang University, Seoul 04763, Korea
- <sup>4</sup>KAIROSPACE Co. Ltd., Seongnam 13229, Korea
- <sup>5</sup>JUSTEK Inc., Pyeongtaek 17711, Korea
- <sup>6</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea
- <sup>7</sup>Space Center, Korea Air Force, Gyeryong 32800, Korea
- <sup>8</sup>Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea
- <sup>9</sup>Department of Aerospace and Software Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea
- <sup>10</sup>M&K Research and Development Inc., Gainesville, VA 20155, USA

### 요약

우주공간은 안보공간의 역할에서 상업공간으로 역할을 급속히 넓혀가고 있다. 현실적인 제약들 때문에 늦게 출발했지만 우리나라는 최근 들어 비약적 기술발전과 함께 우주에 대한 국가적 관심이 커지고 있다. 2023년 5월 25일, 누리호는 7개의 위성을 성공적으로 550 km 고도의 태양동기궤도에 배치했다. 그런데, 이 근처 고도에는 이미 스타링크가 4,000대 이상의 위성을 배치시키고 상업적 서비스를 진행하고 있다.

Hae-Dong Kim  
<https://orcid.org/0000-0001-9772-0562>  
 Misoon Mah  
<https://orcid.org/0009-0000-3042-6879>  
 Douglas Deok-Soo Kim  
<https://orcid.org/0000-0001-7855-2604>

따라서, 누리호 위성들은 스타링크위성들과의 위험상황발생 가능성에 대해 지속적으로 예측하고 만일의 경우에 대해서는 준비를 해야 한다. 본 논문은 누리호 위성들이 임무수행을 위해 궤도비행을 하면서 발생할 수 있는 충돌위험상황에 대해 수행한 연구의 계량적 분석결과를 보고한다. 분석결과에 따르면 누리호 위성들은 하루에 3회 정도 1 km 거리 이내로 스타링크위성에 접근하는 것으로 나타났으며, 이 상황에서의 충돌확률은  $1.0E-5$  이상인 것으로 계산되었고 크기는  $1.0E-2$  이상인 경우도 발생하고 있다. 2013년에 발사된 후 성공적으로 임무를 수행하고 있는 아리랑 5호에 대한 본 연구의 비교분석은 아리랑 5호와 누리호 위성들이 위험상황의 분포에 있어 중요한 차이가 있음을 보여준다. 본 연구는 스타링크가 회피기동을 할 때의 비용에 대한 계량적인 분석결과도 보고하며, 후발주자로서 우주산업에 진입하는 우리나라가 고려해야 할 전략도 제시했다. SpaceMap사에서 개발한 AstroOne 프로그램을 분석도구로 사용했으며, Celestrak사의 Socrates Plus에서 보고한 결과와 비교검증하였다. 우주물체데이터는 TLE(two line element)를 사용했다.

### Abstract

Space is becoming more commercialized. Despite of its delayed start-up, space activities in Korea are attracting more nation-wide supports from both investors and government. May 25, 2023, KSLV II, also called Nuri, successfully transported, and inserted seven satellites to a sun-synchronous orbit of 550 km altitude. However, Starlink has over 4,000 satellites around this altitude for its commercial activities. Hence, it is necessary for us to constantly monitor the collision risks of these satellites against resident space objects including Starlink. Here we report a quantitative research output regarding the conjunctions, particularly between the Nuri satellites and Starlink. Our calculation shows that, on average, three times everyday, the Nuri satellites encounter Starlink within 1 km distance with the probability of collision higher than  $1.0E-5$ . A comparative study with KOMPSAT-5, also called Arirang-5, shows that its distance of closest approach distribution significantly differs from those of Nuri satellites. We also report a quantitative analysis of collision-avoiding maneuver cost of Starlink satellites and a strategy for Korea, being a delayed starter, to speed up to position itself in the space leading countries. We used the AstroOne program for analyses and compared its output with that of Socrates Plus of Celestrak. The two line element data was used for computation.

**핵심어** : 충돌위험평가, 충돌회피, 저궤도 위성, 소형 위성

**Keywords** : conjunction assessment, collision avoidance, low earth orbit satellite, small satellite

## 1. 서론

2023년 5월 25일은 대한민국 우주개발 역사의 큰 획을 그은 날이다. 오후 6시 24분(한국 시간), 누리3호가 고흥 발사장에서 힘차게 날아올랐다. 원래 20초 간격으로 8대를 사출하려 했으나 최종적으로 7대의 사출이 확인되었다. 이 발사를 통해서 우리나라는 우주선진국으로 가는 첫 걸음을 성공적으로 내딛었다. 관련 기관과 연구자들의 오랜 노력이 큰 성과를 만들어 냈다. 하지만 누리호를 통해 사출된 위성들은 주어진 임무를 수행하는 과정과 임무 후 대기권 재진입으로 소멸될 때까지 다른 우주물체와의 충돌위험이라는 측면에서 보다 상세히 들여다

불 필요성이 있다. 우주 조약(outer space treaty)에 따르면 모든 국가는 자국에 의해 행해지는 우주활동에 대해 승인 및 지속적인 감독을 포함한 모든 국제적 책임을 지게 되어 있다. 발사체가 타국에 손해를 주는 경우에는 발사국에 무한의 무과실책임이 있음을 명시하고 있다. 이 조약은 1967년에 만들어졌으며, 같은 해에 비준한 우리나라를 비롯해 137개국에 참여하고 있다[1]. 따라서, 만일 누리호 위성들이 기존에 활동중인 타 위성과 물리적 접촉을 하게 되는 경우 우려스러운 상황이 전개될 수 있다. 본 논문은 누리호 위성들이 근처에서 이미 활동하고 있는 다른 위성들 및 우주쓰레기들과의 충돌위험을 객관적으로 평가하고 그 대책을 준비하기 위한 논의의 첫 발을 떼고자 한다. 그리고, 상대적으로 늦게 출발한 우리나라가 New Space Age의 우주영토확보에 유리한 고지를 점하기 위한 전략을 제안한다.

본 논문은 사안의 중요성과 시급성을 고려하여 매우 신속히 작성되었음을 밝힌다. 케슬러 신드롬(Kessler Syndrome)에 따라서 우주공간에서 물체들 사이의 충돌은 연쇄적으로 파급되기 때문에 우주물체들 사이의 충돌가능성은 줄일 수 있는 한 최대한 줄여야 한다[2,3]. 이 때문에 충돌확률이  $1E-4$ 이라고 판단되면 회피기동을 고려하기 시작하는 것이 원칙으로 되어 있고[4-6], SpaceX의 스타링크는 그 기준이  $1E-5$ 이라고 알려져 있으나 실제로 그렇게 시행되는지는 확인이 필요하다[7-9]. 본 논문은 갖추어야 할 형식을 적절히 갖추되, 누구나 손쉽게 이해할 수 있도록 가능하면 쉬운 용어와 개념으로 작성되었음을 밝힌다. 본 논문에서 “누리호 위성(Nuri-SATs)”은 누리호에서 사출된 7기의 위성을 의미한다. “충돌위험(conjunction)”은 두 물체가 정해진 임계거리(threshold distance)보다 가까운 상태를 의미하며 “충돌위험평가(conjunction assessment)”는 그 위험도를 계량적으로 예측하는 것을 의미한다. 즉, 본 논문에서 “충돌”은 두 물체의 물리적인 접촉 가능성을 의미하며 마찬가지로 중요한 통신의 충돌 또는 통신간섭문제는 여기서 다루지 않는다. “경사각도(inclination angle)”는 궤도평면이 적도평면과 이루는 각도를 의미한다. “우주물체(resident space object, RSO)”는 지구주변의 궤도에서 상주하는 물체이며 인공위성, 발사체 잔존물 및 파편 등의 모든 우주쓰레기를 포함한다. DCA(distance of closest approach)는 두 물체가 위험상황에서 가장 가까이 접근할 때의 거리를 의미한다. 용어의 학술적 정의는 전문학술문헌을 참고하기 바란다[10,11]. 특별히 한국시간(KST) 기준이라는 말이 없는 경우, 모든 시간은 UTC 기준이다.

본 연구에서는 충돌위험분석을 수행할 때 미국 우주군에서 공개한 Space-Track 데이터베이스의 TLE(two line element) 데이터와 SGP4 Propagator를 사용했다[12,13]. 충돌분석을 위한 주된 계산도구는 SpaceMap사의 AstroOne의 여러 가지 시공간분석기능을 사용했다[14,15]. SpaceMap을 이용한 계산결과는 비교가 가능한 경우 Celestrak의 Socrates Plus의 계산결과와 비교하였다[16]. 가시화는 SpaceMap의 AstroOne의 그래픽 기능을 사용하였다.

본 연구는 누리호 위성 7기를 주된 분석대상으로 삼았지만 참고정보의 확보를 위해서 항공우주연구원에서 운영하고 있는 아리랑 5호도 최소한의 분석을 시도했다. 그 이유는 본 논문에서 분석하고 있는 550 km 고도의 여명황혼(dawn/dusk) 궤도에는 항공우주연구원에서 2013년 8월에 아리랑5호를 발사하였고, 이번엔 매우 유사한 궤도에 누리호 위성 7기가 발사되었기 때문이다. 스타링크는 아리랑 5호를 발사한 후에 550 km 고도에 4,000대가 넘는 위성을 배치한 것이다. 이 때문에 이 두 그룹의 충돌위험관점에서의 유사성 및 차이점은 스타링크의 군집위성의 운용전략을 이해함에 있어 중요한 의미가 제공할 수 있다.

## 2. 고도에 따른 우주물체 분포 분석

Fig. 1(a)는 고도 200 km에서 2,000 km 사이의 저궤도 우주공간을 100 km 두께의 셸 (shell) 구간들로 나누고, 각 구간을 24시간 동안에 통과하는 우주물체의 숫자를 보여준다. 실험을 위해 6월 10일 0시에 Spacetrack에서 TLE 데이터를 내려 받았고, 예측실험을 한 시간 구간은 2023년 6월 10일 0시부터 6월 11일 0시까지의 24시간이다.

Y-축은 고도이고 X-축은 각 shell을 24시간 동안 지나가는 우주물체들의 숫자이다. Fig. 1(a)는 두 개의 피크를 보여준다. 가장 높은 피크는 고도 700-1,000 km 구간이다. 이 구간의 높은 밀도는 다음과 같은 세 가지 큰 사건에 기인하며 많은 우주쓰레기로 채워져 있다. 첫째, 2007년 1월에 중국은 고도 865 km의 극궤도를 돌고 있던 수명이 다한 자국의 기상위성 Fengyun FY-1C(무게 750 kg)를 미사일로 파괴하는 위성요격실험(anti-satellite test, ASAT)을 수행했고, 그 결과로 많은 위성 파편 쓰레기를 만들어냈다[17,18]. 둘째, 2009년 2월에 고도 789 km 부근에서 소련의 수명을 다한 위성인 Kosmos 2251(무게 950 kg)과 상업적 운용 중이던 미국의 Iridium 33(무게 560 kg) 위성이 충돌했고 그 결과로 많은 파편이 발생했다 [19,20]. 2009년 충돌이 있기 직전 상황에서 러시아학자들은 두 물체의 충돌확률을  $2 \times 10^{-4}$ 으로 예측했으며, 충돌 10일전에는 충돌확률을  $3 \times 10^{-5}$ 로 계산했었다[21]. 이 사실은 우주상황의 인식과 안전을 위한 판단에 있어서 매우 중요한 함의를 포함한다. 셋째, 2021년 3월 18일에 중국의 Yunhai 1-02(2019년 9월 발사, 기상위성)와 러시아의 Zenit-2 로켓(1996년 발사, 통신첩보수집용 위성발사체)의 잔해가 고도 780 km에서 충돌했고 37개의 파편이 미공군의 카타로그에 공개되었다[22]. LeoLabs의 수석과학자인 Darren McKnight는 그 잔해의 크기가 1-10 cm였을 가능성이 크다고 추정한다. Jonathan McDowell의 보고에 의하면 이 충돌 상황시점에서 두 물체는 TLE의 오차범위에 포함되는 1 km 이내의 거리까지 접근할 것으로

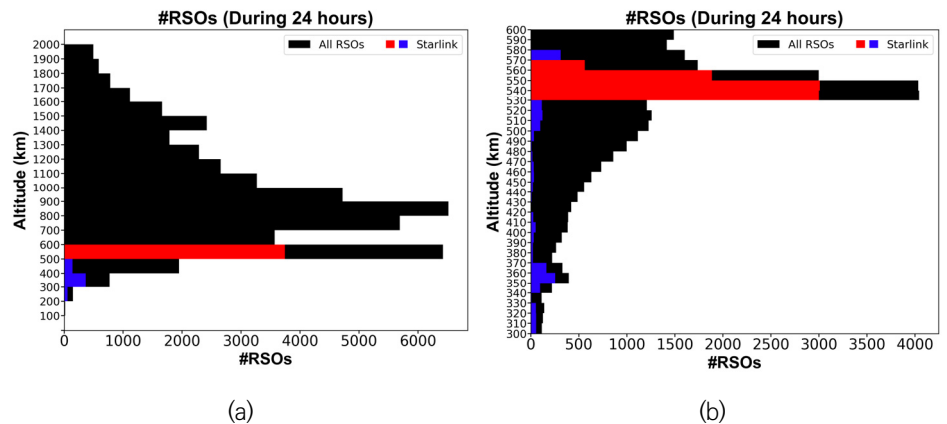


Fig. 1. The histogram of the RSOs entering each altitude shell during 24 hours. TLE data download time: June 10, 0:00 (UTC). (a) The shell thickness is 100 km. Red and blue denote Starlink. Starlink satellites count is 3,741 (58% of the 6,430 objects in the shell of 500-600 km altitude). (b) A more refined histogram with 10 km thickness. The RSOs in 530-570 km have collision possibility with the Nuri-SATs: The red denotes Starlink. RSO, resident space object; TLE, two line element.

판단되었다[23]. 두 번째로 높은 빨간색 피크구간은 고도가 500-600 km 구간으로 누리호 위성들이 임무를 수행하고 있는 고도를 포함한다. 24시간 동안 이 구간을 지나는 우주물체의 숫자는 6,430개이며, 그 중 58%인 3,741개의 물체가 SpaceX사의 스타링크 위성군이다. 이 구간은 우주 전체에서 가장 활발하게 상업적 활동이 진행되고 있는 공간이다. 단위부피당 물체 숫자로는 이 구간이 사실상 가장 높은 밀도를 보여준다. 이 사실로부터 다음의 관찰을 명시한다.

관찰 1) 500-600 km 고도구간에는 24시간 동안 3,741개의 스타링크위성이 발견된다 (6월 8일 0시 UTC 데이터).

### 3. 누리호 위성의 제원 및 궤도정보

누리호에 탑재된 8기의 위성들은 본 논문과 관련해 Table 1과 같은 제원을 갖는다.

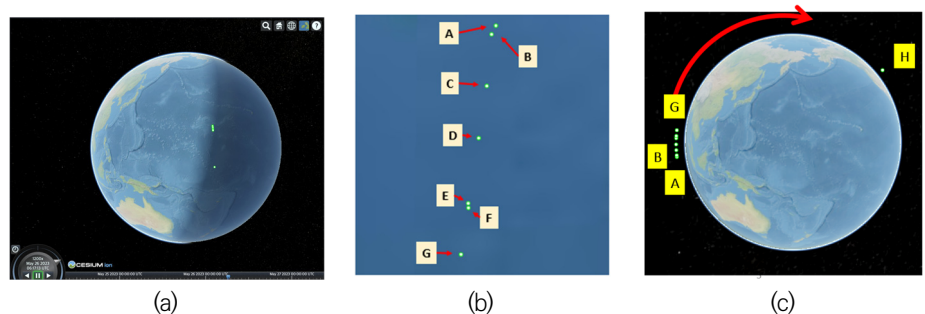
누리호의 3단은 목표 궤도에 예정대로 도착한 후 8기의 위성 중에서 7기를 성공적으로 사출하였다. 이튿날인 5월 26일 0시의 Spacetrack 데이터베이스는 누리호 위성 7기와 3단 로켓의 TLE 데이터를 공개하였다. Fig. 2(a)의 지구 내부에 있는 초록색 점들이 이 데이터를 가시화한 것이다. 이 중 위쪽에 위치한 점 군을 확대하면 Fig. 2(b)와 같다. 위에서 아래쪽으로 순서대로 A부터 G로, 그리고 맨 아래쪽에 따로 있는 물체가 H이다. 이들의 TLE 코드와 같다: 56743 (A), 56744 (B), 56745 (C), 56746 (D), 56747 (E), 56748 (F), 56749 (G), 56750 (H). 5월 26일 TLE에 나타난 A-G의 24시간 동안의 고도는 538-552 km이고, H의 고도는 509-551 km로 파악되었다. Fig. 2(c)는 5월 31일의 모습이며 이 데이터로 24시간 동안의 A-G의 고도는 537-550 km이고, H의 고도는 502-542 km로 파악되었다. 6월 6일 현 시점에서는 24시간 동안 각각 540-550 km와 515-535 km이다. 앞으로 본 논문의 분석에서 A부터 G까지의 7개의 누리호 위성에 대해서 주로 분석을 수행한다. 그 이유는 임무를 위해 궤도로 올려 보내는 위성이 이미 같은 고도에서 활동하고 있는 위성과의 충돌위험이 어느 정도인지에 대한 계량화된 척도의 개발과 예측된 충돌위험상황을 벗어나기 위해 필요한 프로토콜개발의 중요성 때문이다. 특히, 누리호 위성의 경우 그 대상이 4,000대 이상의 위성이 근처 고도에서 운용되고 있는 스타링크이며, 누리호 위성 7기 중에서 6기가 회피기동을 위한 추력이 없는 상태라는 측면에서 이런 프로토콜의 중요성이 더 커진다. 임무기간 후에도 누리호 위성들은 소멸되기 전까지 상당기간 궤도에 남아 있을 것이다. 전 세계적 관점에서 앞으로 이와 같은 상황이 반복될 수 있다. 참고로 H의 고도가 그림에서 보이듯이 유의적인 수준에서 낮아지고 있고 G와 H 사이의 거리는 매우 멀어지고 있다. 가시화는 SpaceMap의 AstroOne을 사용하였다[24].

누리호 위성 7기는 550 km 고도에서 97.6도의 경사각도로 남극과 북극 부근의 상공을 지나는 극궤도이며, 태양과 궤도면의 입사각이 일정하게 유지되는 태양동기궤도이다. 이중 궤도면이 태양과 90도를 이루어 궤도면에서 비행하는 위성이 항상 태양을 바라보면서 전력을 생산할 수 있는 궤도를 여명황혼(dawn/dusk) 궤도라고 한다. 주 탑재체인 차세대 소형위성 2호가 전기를 많이 사용해야 하는 합성개구레이더(synthetic aperture radar, SAR)를 사용하기 때문에 여명황혼궤도를 채택하였다. 참고로, 여명황혼궤도는 특정 고도에서만 가능한 것은 아니며, 다수의 고도에서, 특정 경사각을 이용하여 설정할 수 있다. 임무궤도를 설계할 때는 발사체의 능력, 운용비용, 발사비용 등 여러 가지 우주시스템 설계 요소를 고려해야 한다.

**Table 1.** The specifications of Nuri-SATs. “Min Sphere” means the smallest sphere surrounding a satellite and is used to calculate the probability of collision. The calculation assumes symmetry around geometric center

#	Obj name	Norad ID	Dimension (mm)	Diameter of min sphere (mm)	Mission duration (year)	Primary mission	추력기 보유 유무	GPS
1,	SNIFE-	56743 (A)	6U			우주날씨	편대	있음
2,	1/2/4	56744 (B)	300×200	374	1	관측	유지용	
3	(도요셋)	56745 (C)	×100					
4	KSAT3U	56746 (D)	3U 300×100 ×100	331	1	지표면 편광 측정	없음	없음
5	LUMIR-T1	56747 (E)	6U 300×200 ×100	374	0.5	우주 방사능 측정	없음	없음
6	JAC	56748 (F)	3U 300×100 ×100	331	0.5	자세제어 시스템 검증	없음	없음
7	NEXTSAT-2 (차세대 소형위성 2호)	56749 (G)	5,023×1,340 ×820 (태양전지 전개 후)	5,262	2	SAR 지구관측	있음	있음
8	3 단로켓	56750 (H)	N/A	N/A	N/A	위성수송	N/A	N/A
9	KOMPSAT5 (아리랑 5호)	39227	3,700×2,600 ×9,100	10,161	5	SAR 지구관측	있음	있음

Apogees/perigees: 550/540 km for Nuri-SATs; 548/507 km for the rocket body; 561/559 km for KOMPSAT-5. SAR, synthetic aperture radar.



**Fig. 2.** The visualization of Nuri-SATs. NORAD ID: 56743 (A), 56744 (B), 56745 (C), 56746 (D), 56747 (E), 56748 (F), 56749 (G), 56750 (H). (a) The first TLE data appeared in the Space Catalogue at 00:00 May 26 (UTC). (b) The enlargement of the RSOs. (c) 00:00 May 31 (UTC). AstroOne of SpaceMap is used for the visualization. TLE, two line element; RSO, resident space object.

### 4. 스타링크 궤도분석

고도 550 km 근처에는 4,000대 이상의 스타링크 위성들이 활발한 상업활동을 하고 있다. Table 2는 최근까지 발사한 스타링크 위성군 총 4,051대의 위성군집을 간략하게 설명한다 [25]. 1세대(Gen 1)의 그룹 1(Gr 1)은 누리호 위성과 같은 550 km 고도에서 경사각도 53도의 72개 궤도평면에, 각 궤도평면당 22개의 위성으로 총 1,584대의 위성을 가지고 있는 walker constellation이다. 그룹 4도 같은 숫자의 위성들이 비슷한 조건으로 540 km 고도에서 운용되고 있다. 위성궤도가 고도 10 km 안팎의 perturbation을 갖는다는 것을 고려하면 누리호 위성은 당분간 고도 530-570 km 궤도를 갖는 모든 물체들과 충돌가능성을 가지고 있다. 즉, Table 2에서 그룹 1, 2, 3, 4, 5, 6의 “active” 및 “decaying/deorbiting” 상태인 4,051개의 스타링크 위성들 전부와 충돌위험을 배제할 수 없으며, 이들과의 충돌위험을 지속적으로 평가하고 대비해야 한다. 특히, 누리호 위성 7대 중에서 6대는 회피기능능력이 없기 때문에 충돌 위험 상황에 노출될 빈도가 높아질 수밖에 없다. 스타링크는 2022년 12월부터 530 & 560 km 고도에 2세대(Gen II) Mini 위성을 배치하기 시작했다(Table 2).

### 5. 누리호 위성의 충돌위험

누리호 위성 7기가 스타링크 및 기타 우주물체들과 만드는 충돌위험을 분석했다(Fig. 3). 실험데이터는 Fig. 1에 사용한 것과 같다. 24시간 동안에 500-600 km 고도구간을 지나는 모든

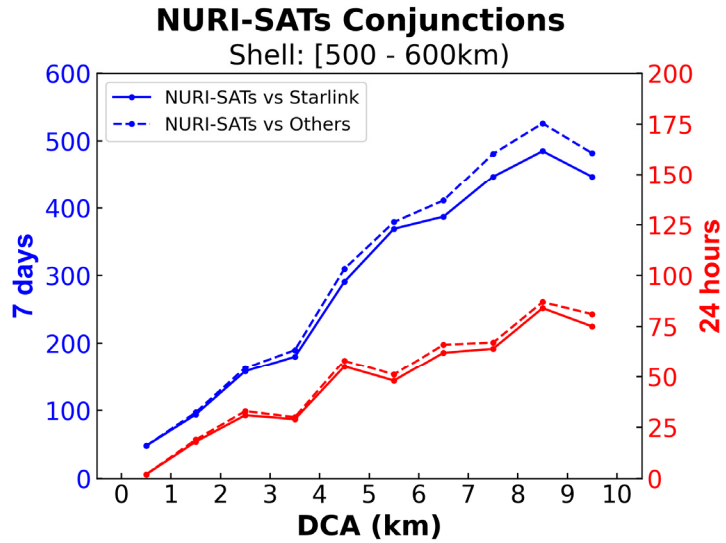
Table 2. Summary of the Starlink constellation status [5]

Gen	Gr	Orbital shells		Orbital planes			Status		
		Alt (km)	Planned sats	Inc. (deg)	Count	Sats per	Active	Decaying/deorbited	Weight (kg)
1	1*	550	1,584	53	72	22	1,458	268	260
	2*	570	720	70	36	20	250	3	260
	3*	560	348	97.6	6	58	187	10	260
	4*	540	1,584	53.2	72	22	1,567	69	306
	-	560	172	97.6	4	43	0	0	
2	5*	530					217	1	307
	6*	559	3,360	43	28	120	21	0	750
	-	525	3,360	53	28	120	0	0	
	-	535	3,360	33	28	120	0	0	
Tot			7,596				3,700	351	
			(14,488)						

The constellation is categorized by “generation” and “group” units.

\*, active satellites; -, approved by FCC but not launched yet.

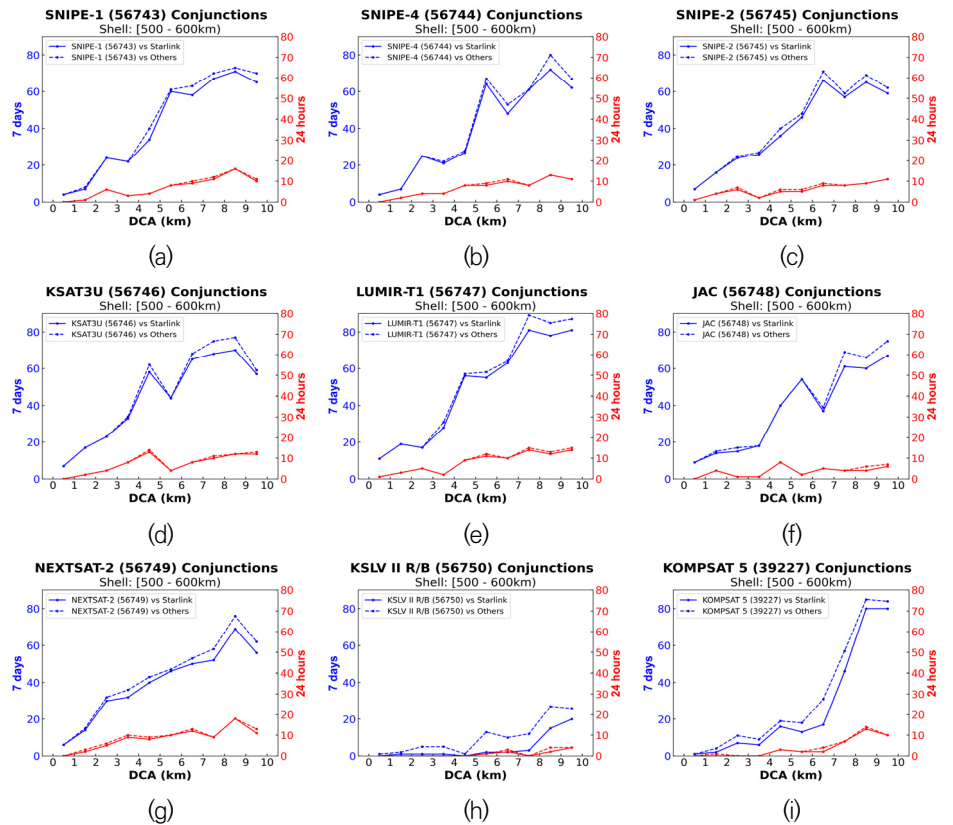
Gen, generation; Gr, group; Alt, altitude; Inc, inclination; Sats, satellites; Tot, total.



**Fig. 3.** Conjunction assessment of Nuri-SATs (500–600 km altitude). TLE data download time: June 10, 00:00 (UTC). X-axis: DCA. Y-axis: conjunction frequency. The upper blue graphs correspond to 7 days (The blue left Y-axis). Solid curve: conjunction assessment between Nuri-SATs and Starlink satellites. Dotted curve: conjunction assessment between Nuri-SATs and the other RSOs. The numbers of approaches for 7 days: 2,906 within 10 km and 48 within 1 km. Starlink takes 58% of the total RSO count passing through the 500–600 km altitude shell. The ratio of the conjunctions created between Nuri-SATs and Starlink is 94% of the total conjunctions. Bottom red graphs correspond to 24 hours: 468 conjunctions are expected to approach within 10 km and 2 conjunctions within 1 km. TLE, two line element; DCA, distance of closest approach; RSO, resident space object.

우주물체들을 분석대상물체로 사용했으며, 사용한 소프트웨어는 SpaceMap의 AstroOne 이다. 그림에서 X-축은 두 물체가 충돌위험상황(conjunction)에 접근할 때 가장 가까운 거리인 “최단접근거리 DCA”이며, Y-축은 그런 위험상황의 빈도수이다. 그림에서 위쪽 파란색 그래프는 7일간의 예측기간 동안의 누리호 위성의 위험상황의 빈도를 보여주며, 파란색 왼쪽 Y-축이 적용된다. 대체로 선형증가이다. 실선은 누리호 위성과 스타링크 위성 사이의 위험상황이고, 점선은 누리호 위성과 스타링크를 포함한 모든 우주물체와의 위험상황이다. 즉 파란색 점선과 실선의 차이는 누리호 위성과 스타링크를 제외한 모든 우주물체와의 위험상황에 해당한다. 7일 동안 10 km 이내로 접근하는 경우는 총 3,087회이고, 1 km 이내인 경우는 48회 발생했다. 500–600 km 고도 구간을 지나는 우주물체의 총 숫자에서 스타링크위성이 차지하는 비율이 58%인 것에 비해 누리 위성과의 스타링크 사이에 만들어지는 위험상황의 비율은 94%로 매우 높다. 그 이유는 누리호 위성과 스타링크는 모두 원에 가까운 궤도를 비행하지만 기타 물체들은 이심률이 상대적으로 큰 타원궤도를 따르기 때문에 누리호 위성과 만날 기회가 적기 때문으로 판단된다. 아래쪽 빨간색 그래프는 24시간 동안의 위험상황을 나타내며, 10 km 이내로 접근하는 상황이 468회, 1 km 이내로 접근하는 상황이 2회 발생할 것으로 예측된다. Fig. 4는 누리호 위성 7기 각각의 위험상황과 누리호의 3단로켓 몸체 그리고 아리랑





**Fig. 4.** Conjunction assessments of the seven Nuri-SATs. Data: TLE data download time: June 10, 00:00 (UTC). Blue and red correspond to 7 days and 24 hours, respectively. Solid line: conjunctions with Starlink. Dotted line: conjunctions with the other space objects. The altitude shell is 500–600 km. The interpretation of the graph is the same as in Fig. 3. Software used: AstroOne of SpaceMap. (a–c) SNIPE, (d) KSAT3U, (e) LUMIR–T1, (f) JAC, (g) NEXTSAT, (h) KSLV II R/B (rocket body), (i) KOMPSAT 5. TLE, two line element.

5호(KOMPSAT-5) 위성에 대해 추가적으로 분석한 것이다. 이 9개의 그래프 중 Fig. 4의 (a) 부터 (g)까지 7개를 합치면 Fig. 3의 그래프가 만들어진다. Fig. 4(i)의 KOMPSAT-5는 앞의 누리위성들과 DCA의 분포에 있어서 매우 다른 패턴을 보여주고 있다. 6–7 km까지는 매우 낮은 기울기의 선형증가를 하다가 그 후에 가파르게 증가한다. 즉, KOMPSAT-5의 경우는 스타링크와의 위험상황이 매우 잘 관리되고 있다는 것을 보여준다. 위의 실험에 기반하면 아래 3개의 관찰이 가능하다.

- 관찰 2) 누리호 위성이 스타링크와 7일 동안 10 km 이내로 접근하는 경우는 총 2,906회이고, 1 km 이내인 경우는 48회이다(6월 10일 0시에 내려받은 TLE 데이터).
- 관찰 3) 누리호 위성이 스타링크와 24시간 동안 10 km 이내로 접근하는 경우는 총 468 회이고, 1 km 이내인 경우는 2 회이다(6월 10일 0시에 내려받은 TLE 데이터).
- 관찰 4) 아리랑 5호(KOMPSAT-5)의 위험상황은 누리호 위성들과 유의적 차이를 보이면서 잘 관리되고 있다.

**Table 3.** Conjunction frequency analysis of Starlink satellites for 24 hours "All" row is the conjunctions between Starlink and all RSOs. The second line is the conjunctions between Starlink and Nuri-SATs. Starlink has on average 178 conjunctions which includes 3 caused by Nuri-SATs (1.7% of the total)

	June 4	June 5	June 6	June 7	June 8	June 9	June 10	Avg
All	191	169	188	146	189	181	182	178
Nuri-SATs	3	2	2	2	6	4	2	3 (1.7%)

Seven repetitive analyses (June 4–10).

Range threshold: 1 km.

TLE data downloaded at 00:00 (UTC).

Shell altitude range: 500–600 km.

TLE, two line element; RSO, resident space object.

DCA가 1 km 이하인 상황의 재현성을 확인하기 위해 6월 4일부터 6월 10일까지 7일 동안 매일 0시에 TLE 데이터를 내려 받고, 그 후 24시간 동안의 충돌위험에 대해 분석하였다 (Table 3). 7회 실험의 평균을 보면, 스타링크위성군은 DCA가 1 km보다 가까운 위험상황이 하루에 평균 178회 발생하며 그 중에서 누리호 위성에 의한 것이 전체의 1.7%에 해당하는 평균 3회로 나타났다. 이 사실을 다음 관찰로 정리했다.

관찰 5) 누리호 위성이 스타링크와 24시간 동안 1 km 이내로 접근하는 경우는 평균 3회이다.

## 6. AstroOne과 Socrates의 계산결과 비교

AstroOne 계산결과를 우주물체의 충돌예측에서 많이 사용되는 Celestrak 사의 Socrates 서버의 계산결과와 비교하였다. Fig. 5은 두 프로그램이 통계적으로 볼 때 위험상황에 대해 동일한 결과를 생산한다는 것을 명시적으로 보여준다. Fig. 5(a)는 두 프로그램이 계산한 DCA의 상관계수가 선형회귀모델에서 0.9997이며, Fig. 5(b)는 DCA가 발생했을 때의 시간인 TCA (time of closest approach)인데 역시 0.9997의 상관계수를 가진다는 것을 보여준다. 즉, 통계학적으로 볼 때 두 프로그램은 완벽하게 동일한 답을 생산한다고 볼 수 있다. 하지만, 두 프로그램은 TLE 데이터를 기본정보로 사용하기 때문에 데이터를 내려받는 시점에 따라서 산출물의 값이 달라진다는 것을 유의해야 한다. 즉 TLE 데이터를 내려받는 시점이 달라지면 두 프로그램의 상관관계가 낮아질 수 있다. 현재 SpaceMap의 AstroOne은 TLE 데이터를 한국 시간 매일 밤 12시에 내려받아 전 처리(preprocessing)을 한 후 저장한 전 처리 데이터베이스를 이용해서 DCA를 구한다. 이에 반해 Socrates는 데이터를 UTC 기준으로 0, 8, 16시 등 하루에 3회 업데이트한다. 따라서 Socrates가 어느 시점에 데이터를 내려 받는가에 따라 두 프로그램의 상관관계가 달라질 수 있다. 단, 본 실험을 위해서 AstroOne이 TLE를 내려받은 시간은 UTC 기준 0시로 했다.

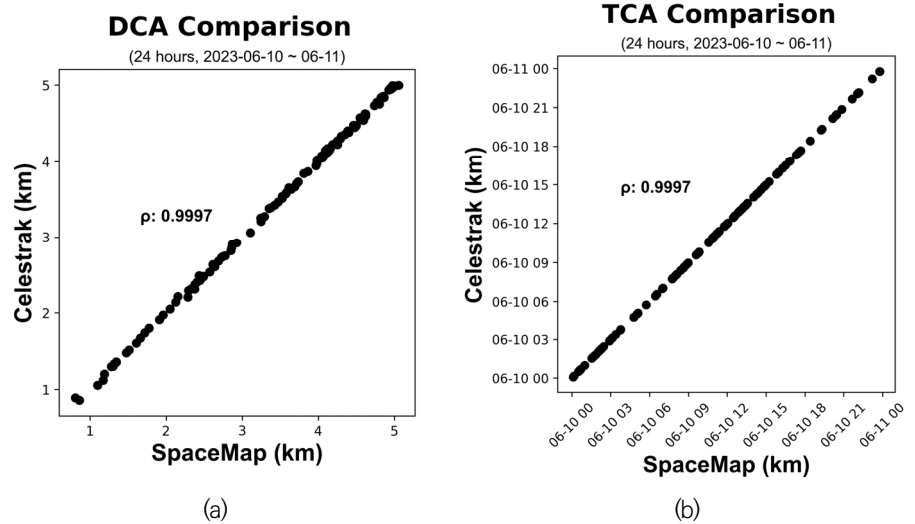


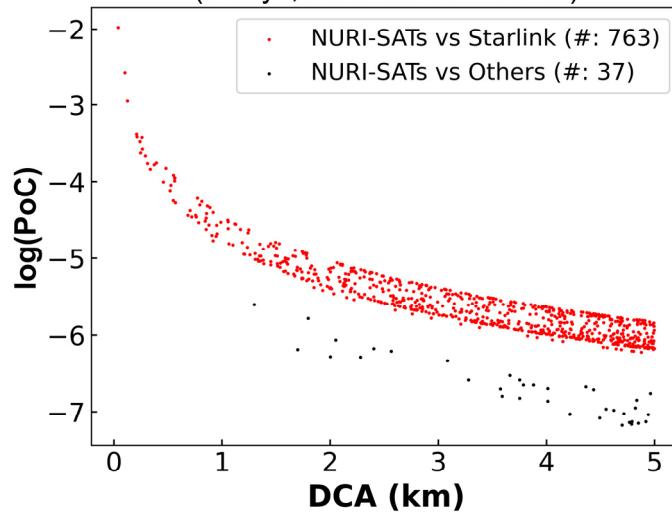
Fig. 5. Correlation between the outputs of AstroOne and Celestrak's Socrates. Target primary satellites: Nuri-SATs. TLE data downloaded: June 10, 00:00 (UTC). Prediction time window: 24 hours (00:00-24:00). (a) Correlation coefficient of DCA = 0.9997. (b) Correlation coefficient of time of close approach (TCA) = 0.9997. DCA, distance of closest approach; TLE, two line element.

Fig. 6은 누리물체들의 위험상황에서 DCA와 충돌확률(probability of collision, PoC)의 관계를 분석한 것이다. 이 데이터는 Socrates에 보고된 것으로 총 800건이다. 여기서 사용한 확률은 covariance의 크기와 DCA의 비로 정의되는 곡선의 최대값에 해당하는 최대충돌확률이다[26,27]. 이하 본 논문에서 확률은 최대충돌확률을 의미한다. Y-축은 확률값의 log 스케일이다. 2023년 6월 10일 5시에 Socrates에서 데이터를 내려 받았고, 10일부터 16일까지 7일간에 대한 분석이다. 임계거리는 Socrates에서 사용하는 5.0 km이다. 분석결과는 데이터가 명확하게 두 개의 그룹으로 분리된 것을 보여준다. 상단에 위치한 빨간색 그룹은 누리호 위성들이 스타링크 위성들과 만드는 763건의 위험상황이고 하단의 검정색 그룹은 누리물체들이 기타 물체들과 만드는 37건의 위험상황이다. 스타링크와 관련된 위험상황들은 DCA와 충돌확률 사이에 다음과 같이 매우 명확한 패턴을 보이고 있다.

- 첫째, DCA 값이 작아질수록 충돌확률은 빨리 커진다.
- 둘째, DCA 값이 작아질수록 충돌확률의 변동폭은 작아진다.
- 셋째, 전체 패턴은 역함수모양을 따르고 있다.

따라서, DCA 값이 작아진다면 충돌확률은 매우 빠른 속도로 커진다는 것을 확정적으로 알 수 있다. 즉, DCA 값 하나를 이용하여 빠르게 누리호 위성들과 스타링크와의 충돌위험에 대한 평가를 수행할 수 있다는 뜻이다. 다만, 최종 정밀한 충돌위험 분석을 위해서는 3차원공간에서의 radial, cross, along track 상호 간의 거리 모두를 고려해야 한다. 즉, Figs. 5와 6을 같이 해석하면 SpaceMap의 AstroOne의 거리계산결과만으로도 누리호 위성 7기가 스타링크와 만들 수 있는 충돌위험에 대한 신속한 사전 평가에 유용한 지표가 될 수 있다는 것을 의미한다. 특정 7일 구간에서 예측한 위험상황이 이런 패턴을 보인다면 1년의 구간에서는 충돌위험이

### DCA & PoC of NURI-SATs by Celestrak (7 days, 2023-06-10 ~ 06-16)



**Fig. 6.** The probability of collision (PoC) and DCA reported by Socrates. X-axis: DCA. Y-axis: PoC in the log-scale. 800 conjunctions in total. Red: conjunctions between Nuri-SATs and Starlink (763 cases). Black: conjunctions between Nuri-SATs and the other RSOs (37 cases). Data: downloaded from Socrates: June 10, 05:00. Prediction window: 7 days (June 10, 00:00-June 16, 00:00). Socrates reports conjunctions within 5 km. DCA, distance of closest approach; RSO, resident space object.

매우 큰 상황이 여러 번 발생할 수 있다는 것은 상식적인 것이다. 참고로 Fig. 6에서 몇 개의 유의적인 확률구간에 있는 충돌위험발생 건수는 다음과 같다:  $1E-2 \leq PoC < 1E-1$  : 1회;  $1E-3 \leq PoC < 1E-2$  : 2회;  $1E-4 \leq PoC < 1E-3$  : 16회;  $1E-5 \leq PoC < 1E-4$  : 66회.

Fig. 6에서 빨간색 점군에 대해 로그함수 기반 최소제곱법을 적용하면  $\log(PoC)$ 와 DCA의 관계를 설명하는 회귀식이 다음과 같이 도출된다.

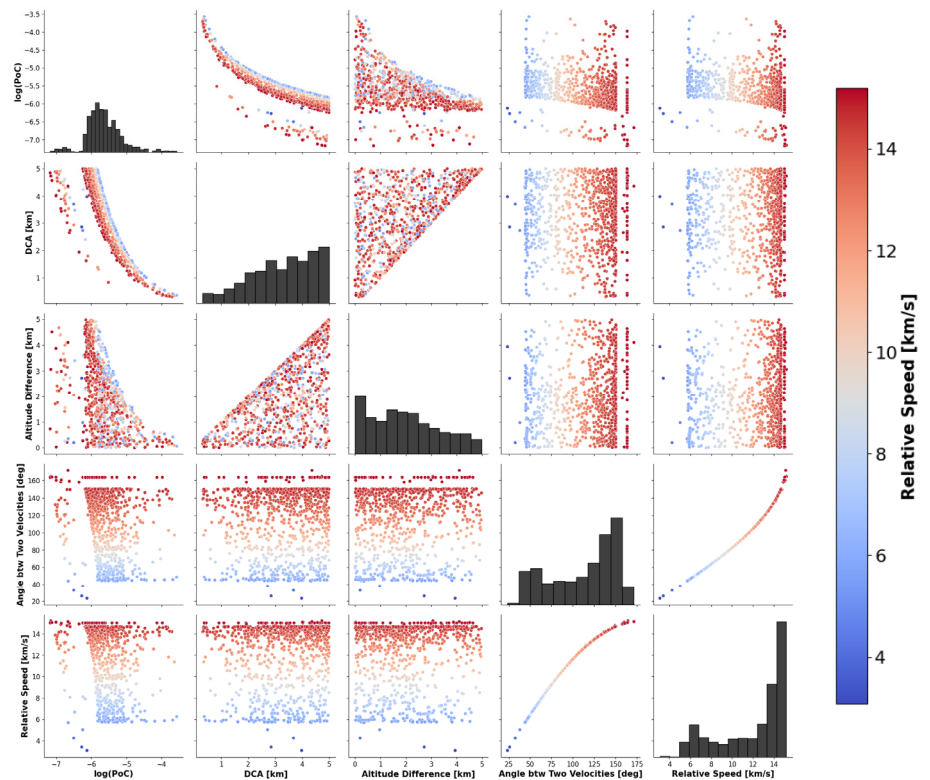
$$\log (PoC)=-0.86 \times \ln (DCA)-4.6457+\epsilon_{DCA}$$

여기서 잔차  $\epsilon_{DCA}$ 는 정규성을 띄지 않으나 모든 DCA에 대해 약 0.22의 상/하한의 값이 유지되는 것을 확인하였다. 임계거리 5 km 이내에서 존재하는 현상들이 5-10 km까지 연장된다고 가정하면 누리호 위성과의 스타링크가 만드는 대부분의 충돌위험상황에서 충돌확률을 계산하는데, 이 식을 이용해서 임계거리 10 km까지 외삽(extrapolation)할 수 있다. 더구나, AstroOne과 Socrates의 DCA 예측 상관계수가 1에 가깝기 때문에 이 식을 이용해서 누리호 위성과 스타링크의 충돌확률을 AstroOne의 DCA 계산값으로부터 직접 구해서 사용할 수 있다.

Socrates에서 6월 8일에 내려받은 890건의 충돌위험상황을 PoC (가), DCA (나), 두 물체의 고도차이 (다), 두 물체의 속도벡터가 이루는 각도 (라), 그리고 상대속도 (마) 등 다섯 가지 변수들의 조합으로 상세하게 분석해 보았다(Fig. 7). 다섯 가지 변수들 중 두 개씩의 조합으로 된 25개의 그래프들 중 좌하단을 Fig. 7(1,1), 우상단을 Fig. 7(5,5)와 같이 표기했다. 각 점은 상대속도가 낮으면 파란색으로, 높으면 빨간색으로 표기했다. Fig. 7의 25개 그래프들은 Fig.

7(1,5)부터 Fig. 7(5,1)까지의 대각선을 중심으로 그 위쪽과 아래쪽은 대칭관계이다. 이 대각선은 “가”부터 “마”까지 다섯 가지 변수들의 히스토그램이다. Fig. 7(1,5)는 PoC의 히스토그램이고, Fig. 7(5,1)은 DCA 상태에서 두 물체의 상대속도의 히스토그램이다. 이 그림은 각 변수들 사이의 관계를 잘 보여준다. 이 분석은 AstroOne의 분석기능을 이용했다.

- ① Fig. 7(2,5): Fig. 6에 해당한다. 스타링크 위성과 누리물체의 위험상황이 예측되었을 시, 비슷한 DCA일 때, 두 물체의 상대속도가 작을수록 충돌확률이 더 높게 나타난다.
- ② Fig. 7(3,5): 두 물체의 고도차이가 크면 충돌확률은 매우 낮아진다. 만일 고도차이가 1 km 이상이면 충돌확률은 1E-4보다 작아진다.
- ③ Fig. 7(4,5), Fig. 7(5,5): 다른 변수를 고려하지 않는다면 충돌확률과 상대속도 또는 속도벡터 사이의 각도는 특별한 관계가 없다.
- ④ Fig. 7(3,4): DCA가 두 물체 간의 고도차이보다 작을 수는 없다는 평범한 사실을 보여준다.
- ⑤ Fig. 7(4,4), Fig. 7(5,4): 다른 변수를 고려하지 않는다면 DCA와 상대속도 또는 속도벡터 사이의 각도는 특별한 관계가 없다.
- ⑥ Fig. 7(4,3), Fig. 7(5,3): 다른 변수를 고려하지 않는다면 고도차이와 상대속도 또는 속도벡터 사이의 각도는 특별한 관계가 없다.



**Fig. 7.** Analysis of the pairwise combinations of five variables: (i) PoC, (ii) DCA, (iii) altitude difference, (iv) angle, and (v) relative speed. An analysis of the 890 collisions downloaded on June 8, 05:00 from Socrates. Analysis using AstroOne. PoC, probability of collision. DCA; distance of closest approach.

- ⑦ Fig. 7(5,2)는 상대속도가 두 속도벡터가 이루는 각도의 비선형적인 단조증가함수임을 명확하게 보여준다. 이 때문에 Fig. 7(4,5)와 Fig. 7(5,5), Fig. 7(4,4)와 Fig. 7(5,4), 그리고 Fig. 7(4,3)와 Fig. 7(5,3)이 비슷하게 나타난다.

## 7. 스타링크의 충돌위험상황 제어방식에 대한 분석

스타링크는 이미 4,000대가 넘는 위성을 고도 550 km 부근에 쏘아 올렸고 앞으로 여러 궤도에 최대 42,000대까지 계획하고 있다. 따라서 스타링크위성들 사이에서 발생할 수 있는 충돌위험의 적절한 제어는 자신의 위성과 우주쓰레기와 만들어지는 충돌위험과 더불어 매우 중요한 문제일 것이다.

### 7.1 스타링크 자체의 충돌위험상황분포

Fig. 8은 스타링크 위성들의 위험상황에 대한 AstroOne의 매우 재미있고 중요한 분석결과이다. 파란색은 스타링크 위성과 스타링크 위성이 만드는 위험상황이고 노란색은 스타링크 위성이 스타링크 이외의 물체들과 만드는 위험상황이다. Fig. 8(a)와 8(b)는 24시간에 대한 예측이고 Fig. 8(c)와 8(d)는 7일간에 대한 예측이다. 사용한 임계거리는 10 km이다. 이 그림은 스타링크가 자신의 constellation을 얼마나 정밀하게 설계했고 잘 제어하고 있는지 보여준다. Fig. 8(a)를 보면 X-축의 DCA가 0부터 7 정도까지 매우 낮은 선형증가를 하고 있으며 그 후 급하게 증가한다. 즉, DCA가 작은 값을 가지는 상황이 자주 일어나지 않도록 constellation 전체를 잘 제어하고 있다는 것을 보여준다. Fig. 8(c)의 7일간 예측도 유사한 형태를 보여준다. Fig. 8(a)와 8(c)는 Fig. 4(i)의 아리랑5호와 유사한 DCA 분포를 보여준다.

DCA가 0-2 km인 구간을 확대한 Fig. 8(b)를 보면 스타링크의 뛰어난 constellation 설계 및 제어기술을 엿볼 수 있다. 24시간 동안 1 km 이내로 접근하는 위험상황은 총 184회이다. 그런데 Fig. 8(d)의 7일간 그래프의 1 km 이내의 위험상황은 총 7,323회로 24시간 상황의 약 40배에 해당한다. 이 관찰은 다음과 같은 매우 중요한 사실을 의미한다. 스타링크 위성들 사이에서도 그냥 놔두면 1 km 내로 접근할 위험상황이 매우 자주 일어날 수 있지만 스타링크는 이렇게 가깝게 접근하는 상황들이 24시간 내에는 매우 적게 발생하도록 각 위성을 적절히 제어한다. 여기서 “적절히”라는 뜻은 전체적으로 충돌위험 가능성은 충분히 낮추되 추진제의 사용량을 최소화한다는 뜻이 된다. 이 그림은 Starlink가 10 km라는 임계거리를 중요한 파라미터로 보고 있다는 것도 보여준다. 다음 관찰을 명시한다.

관찰 6) 스타링크는 충돌위험상황을 매우 잘 제어하고 있다.

### 7.2 스타링크와 누리호 위성의 위험성 분석

일반적으로 충돌위험의 확률 PoC가  $O(1E-4)$  이상으로 예측되면 위성의 회피기동을 고려하기 시작한다[4-6]. 스타링크의 경우, 그 확률이  $O(1E-5)$ 만 되어도 회피기동을 위한 절차를 시작하며, 현재 하루에 약 75회 회피기동을 하면서 위성들 사이의 적절한 간격을 유지하는 것으로 알려져 있다[7-9]. Fig. 6에서 관찰한 바에 따르면 누리호 위성과 스타링크 위성의

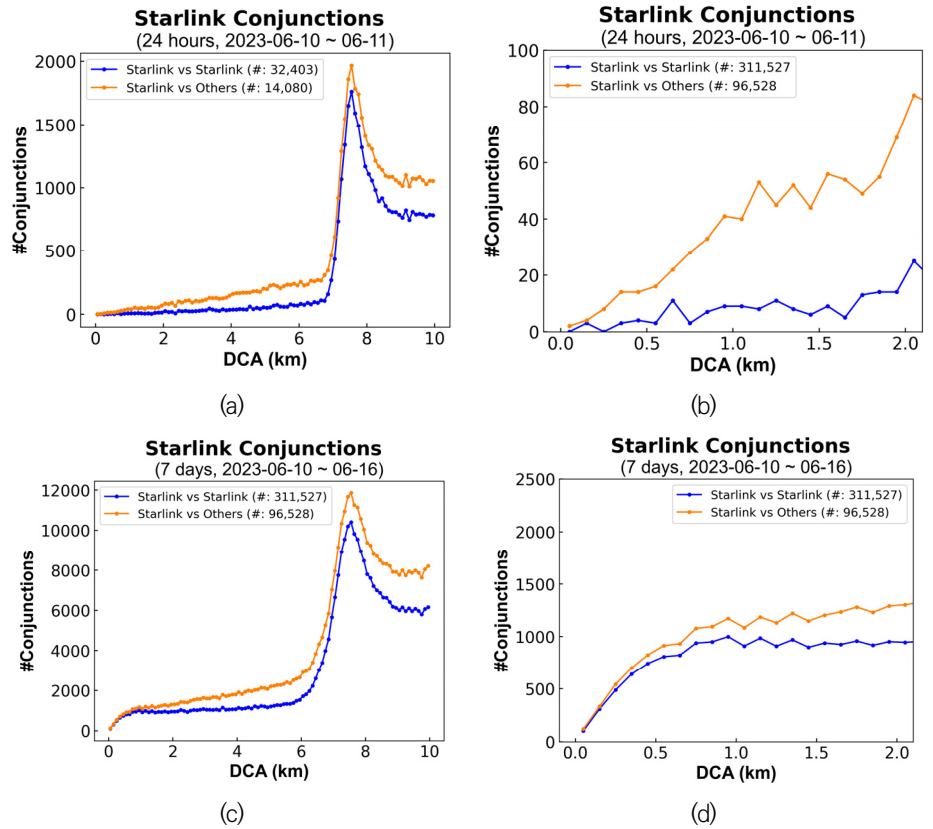


Fig. 8. Starlink conjunctions. Blue: conjunctions between Starlink satellites. Red: conjunctions between Starlink satellites and the other RSOs. (a, b) 24 hours. (c, d) 7 days. DCA, distance of closest approach; RSO, resident space object.

DCA가 대략 1 km가 되면 충돌 확률이  $O(1E-5)$ 가 된다. 즉, DCA가 1 km로 예측되면 스타링크는 충돌을 회피하기 위한 기동을 할 것으로 볼 수 있다. 단, 어느 시점에 회피기동을 실시하는가 라는 실시전략은 현재의 데이터로는 알 수 없으며 추가적인 연구가 필요하다.

Table 3에 보고된 스타링크와 누리호 위성 사이의 평균 3회의 DCA < 1 km인 상황을 회피하는 것은 어느 정도 비용이 드는 일인가? “스타링크는 하루 평균 75회 회피기동을 한다”는 사실을 DCA < 1 km인 상황에 적용한다면, 총 178건 중에서 42.1%를 회피기동한다고 볼 수 있다. 이 기준을 누리호 위성에 적용시키면, 스타링크가 누리호 위성과 하루에 만드는 1 km 이내의 위험상황 3건을 회피하기 위해서 스타링크의 위성이 회피기동을 한다면 이것은 매일 평균 1.3회에 해당된다. 이것은 스타링크가 연간 평균 474.5회의 회피기동을 하는 것에 해당된다.

관찰 7) 누리호 위성으로 인한 스타링크의 총 회피기동은 연간 평균 475회로 예측된다.

누리호 위성들은 차세대소형위성을 제외하면 자체적으로 회피기동이 불가하다. 충돌위험의 상황이 예측되었을 때 그 상황의 회피방법은 스타링크가 피하는 것뿐이다. 회피기동에는 비용이 발생하겠지만 각 스타링크 위성은 350회의 회피기동을 하도록 설계되었기 때문에 누리호 위성들이 스타링크에 발생시키게 될 총 비용은 스타링크 위성 2대의 가격보다 작다.

관찰 8) 누리호 위성으로 인한 스타링크의 연간 평균 총 비용은 스타링크 위성 2대의 제작 및 수송비용보다 작을 것으로 예측된다.

따라서, 누리호 위성과의 충돌위험 증가때문에 스타링크가 수행하게 될 회피기동 빈도수 증가에 따른 비용 관점에서 문제를 제기하는 상황을 가정하면 이러한 분석 결과가 어느 정도 근거가 될 수도 있을 것이다. 스타링크는 자체적으로 실시간 위험분석을 할 것이며 필요한 경우 회피기동이 어렵지 않을 것이다.

## 8. 누리호 위성의 충돌위험예측 및 분석을 위한 SpaceMap 서비스

### 8.1 SpaceMap 개요

SpaceMap은 우주자산의 안전하고 효율적인 운용을 위한 모든 의사결정문제를 실시간으로 해결하는 인터넷 플랫폼의 개발을 목표로 한 스타트업이다. 핵심기술은 창의적연구진흥사업, 국가지정연구실, 리더연구 등 한국연구재단의 개인연구자 최상위지원사업들을 통해서 오랜 기간 개발된 Voronoi diagram 기술에 기반하고 있다. 이 기술은 다양한 응용분야에서 도전적인 문제들을 효율적으로 해결하고 있는데 우주자산의 안전하고 효율적인 운용에도 마찬가지로 유용하다는 것과 New Space Age 상황에서 우리나라의 우주산업이 글로벌 리더십을 갖기 위해 Voronoi diagram 기술이 중요하게 사용될 수 있다는 확신에 기반해서 SpaceMap을 설립하게 되었다. AstroOne은 충돌위험상황을 예측하고 예측된 위험상황을 최적으로 회피하는 것을 실시간으로 제공하는 기능이다(conjunction assessment and collision avoidance). 그 외에도 통신간섭예측 및 회피방안(radio frequency interference and avoidance), 발사체의 최적발사시간예측(launch optimization), WatcherCatcher, 군집위성 최적전개전략 도출(constellation optimization) 등을 포함한 다양한 의사결정문제를 해결하는 기능을 가지고 있다[14,15,24].

충돌위험상황을 예측하는 기능을 구현하는 기존의 기술은 1984년에 Felix Hoots가 보고한 “세 필터 알고리즘(three-filter algorithm)”으로 계산의 가속을 위한 몇 가지 변형들을 만들면서 대부분의 상용 및 연구용 소프트웨어에 채택되었고 최근에 개발되는 소프트웨어들도 이 알고리즘을 사용한다[28]. 그 기본 개념은 모든 두 개씩의 물체 쌍 중에서 명확하게 충돌위험이 없는 쌍들을 제거하고 남은 쌍들만 상세한 계산을 한다는 것이다. 그 상세한 계산을 위해 시간 축을 여러 개의 짧은 시간구간으로 나누어 따로따로 계산을 하되, 그 계산은 각 쌍들 사이의 인접관계를 찾는 것이다. 이 알고리즘은 아이디어가 매우 직관적이고 상대적으로 초보적인 계산수리이론만 있으면 누구나 쉽게 프로토타입 프로그램의 개발이 가능하기 때문에 대부분의 엔지니어들이 구현을 시도하게 된다. 하지만, 이 알고리즘은 (1) 해의 정확도와 계산 시간이 trade-off 관계가 있고, (2) 두 개의 물체 사이의 거리문제만을 다루고, (3) 좌표시스템 의존적인 해법 등의 세 가지 근본적인 한계를 가지고 있다. 이 단점 때문에 이 알고리즘은 (A) 우주물체카타로그의 숫자가 매우 커지고 있고, (B) 움직이는 여러 물체 사이에서 최적해를 구하는 문제와 같이 답을 얻고 싶은 문제의 난이도가 매우 높아지고 있고, (C) 문제를 실시간에 준하는 빠른 속도로 풀어야 할 필요성이 커지는 등의 새로운 우주환경에서 더 이상 적절한



알고리즘이 아니다. 더구나, 이 알고리즘은 좋은 해를 신속하게 구하려 하면 많은 파라미터들을 상황에 따라 조절해야 한다.

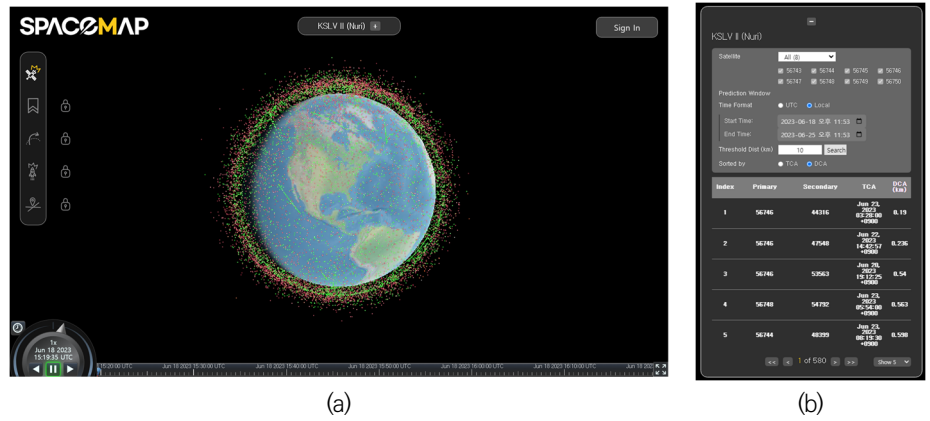
SpaceMap의 알고리즘은 이 모든 문제를 한꺼번에 해결한 접근법으로 New Space Age에서 사용될 알고리즘이 갖추어야 할 모든 특성을 다 갖춘 것이다. SpaceMap의 알고리즘은 “시공간문제(spatiotemporal problem)”을 4차원의 “시공간 알고리즘(spatiotemporal algorithm)”으로 직접 푼다. SpaceMap의 알고리즘은 (1\*) 해의 질이 잘게 쪼갠 시간단위에 의존적이지 않고, (2\*) 여러 개의 공간문제를 동시에 풀기 위한 것이며, (3\*) 좌표시스템 비 의존적이다. 그래서 위의 (A), (B), (C) 등 세 가지 특성을 갖는 New Space Age에서의 글로벌 우주산업의 모든 의사결정문제를 위한 엔진으로 사용될 것이다. SpaceMap은 AstroOne을 포함하여 우주자산의 안전과 효율에 관한 여러 가지 유용한 기능들을 AstroLibrary라는 편리한 라이브러리의 형태로 제공하고 있으며, Python 프로그램만 작성할 수 있는 프로그래머는 우주자산의 시공간추론에 관한 응용프로그램을 쉽게 개발할 수 있다. 예를 들면, AstroLibrary의 RESTful API를 불러서 관심있는 위성의 충돌위험상황을 예측하는 Python 응용프로그램을 누구나 한 두 시간이면 개발할 수 있다[29].

## 8.2 누리호 위성의 충돌위험상황예측을 위한 SpaceMap의 AstroOne 서비스

SpaceMap은 본 논문에서 설명한 누리호 위성의 스타링크 및 우주쓰레기와의 충돌위험에 대한 모든 정보를 AstroOne(KSLV-II) 메뉴에서 무료로 공개하고 있다(<https://platform.spacemap42.com>). SpaceMap은 한국시간 매일 밤 12시에 Space Track에서 TLE를 다운로드 받아 모든 우주물체들에 대해서 미래의 충돌위험을 분석한다(예측기간 및 우주물체집합의 구분은 웹서버를 참고: 저궤도 7일, 정지궤도 10일이 일반적인 기준임). SpaceMap 서버를 들어가면 Fig. 9(a)와 같은 화면이 나온다. 중앙 상단의 KSLV-III 버튼을 활성화하면 누리호 위성들의 충돌위험상황예측 정보를 보여주는 Fig. 9(b)의 화면이 나온다. 패널의 필터들을 조절하면 원하는 누리호 위성을 지정할 수 있고, 예측 시간구간을 정할 수도 있고, 원하는 임계 거리를 지정할 수도 있다. 만일 AstroOne에서 우주자산과 관련해서 풀기 힘든 중요한 시공간구조해석 문제가 있다면 SpaceMap에 요청하면 도움을 얻을 수 있을 것이다. 적절한 절차를 거쳐 원하는 포맷의 파일로 email을 통해 정기적으로 보고받을 수도 있다. Fig. 10은 예측된 위험상황 2건을 AstroOne에서 가시화한 것이다. 누구나 SpaceMap 플랫폼 홈페이지에서 “Favorite” 기능을 이용하면 무료로 운영되고 있는 구독서비스를 통해 원하는 위성의 충돌위험예측보고서를 매일 이메일로 받을 수 있다(Fig. 10).

## 9. 토론

누리호는 주 탑재체가 차세대소형위성 2호이고, 전력소모가 큰 SAR 위성이기 때문에 여명황혼궤도를 선택하게 되었다. 여명황혼궤도가 가능한 고도와 경사면 각도의 여러 가지 조합 중에서 550 km 고도를 선택하기 위해서는 많은 변수를 고려하였을 것으로 믿는다. 하지만 누리호 위성들의 궤도가 이미 스타링크가 대규모로 위성을 전개하여 운용하고 있는 곳이기 때문에 누리호 위성과 스타링크와의 충돌위험은 지속적으로 예측, 분석, 대비할 필요가 있다.



**Fig. 9.** SpaceMap's website. (a) The landing page with five services. Log in from the top right. Bottom bar is for animation progress in timeline. (b) The Nuri-SATs conjunction assessment panel developed. Daily e-mail conjunction data message A-CDM from AstroOne is freely available for any space objects including Nuri-SATs. Requests can be prescribed using the “Favorite” function of the SpaceMap website (<https://platform.spacemap42.com>). A-CDM, Astro-CDM.



**Fig. 10.** Visualization of two conjunctions using AstroOne. (a) The Norad ID 56748 satellite is close to the Starlink-2398 satellite having a distance 2 km. (b) The Norad ID 56746 satellite is close to the Starlink-1230 satellite having a distance 0.333 km.

누리호 위성이 스타링크 위성과의 실제 충돌할 경우 우주쓰레기를 양산하게 되고 우리나라 정부와 SpaceX사의 입장이 부딪칠 수 있다는 점에서 본 논문의 관찰과 논의는 이 상황에 대한 출발점으로써 국내의 첫 연구보고로 중요한 의미를 가진다. 우려할 상황의 발생을 예측하였을 때 스타링크는 그 상황에 대해 자신들의 위성들에 대한 정보를 공유하지 않을 가능성이 크다. 이런 측면들을 고려할 때, 만일 우리가 충분한 준비를 해 두지 않은 상황에서 누리호 위성과 스타링크사이에서 충돌이 발생한다면 책임소재를 따지는 SpaceX와의 논쟁에서 상황이 불리하게 전개될 가능성이 높을 것으로 사료된다. 여기서 아리랑5호의 충돌위험상황은 잘 관리되고 있으며, 누리호 위성들과 매우 다른 패턴을 보이고 있다는 것을 유의해서 볼 필요가 있다.

이번에 올라간 누리호 위성 7기 중에 주 탑재체인 차세대소형위성 2호와 부 탑재체 중 도요셋 3기가 추력기를 가지고 있다. 하지만, 주 탑재체만 회피기동을 위한 추진제를 보유하고 있다. 도요셋은 처음에 사출된 후 자연스럽게 만들어진 일렬중대의 대형으로 임무를 수행하다가 일정기간이 지난 후 횡대의 대형으로 변환하기 위해 필요한 추진제만 가지고 있기 때문

에 충돌위험이 예측되더라도 회피기동을 하는 것이 난감한 상황이다. 카이로스페이스, 저스텍, 누미르 등 3개 기업의 위성들은 아예 추력기가 없기 때문에 회피기동의 능력자체가 없는 상태에서 누리호에 탑재되었다. 즉, 주 탑재체인 차세대소형위성 하나를 제외한 부 탑재체 전체가 충돌상황 대처능력이 없는 상태에서 우주전체 공간에서 가장 위험이 큰 궤도에 올려 보낸 것이다. 그 중에는 GPS도 없는 위성도 있다. 이런 상황에서는 그 궤도에서의 충돌위험에 대한 적절한 평가가 사전에 이루어지고, 그 위험에 대한 정보가 미리 탑재 위성의 소유주들에게 적절히 공유되어야 할 것이다.

충돌이 예상되었을 때 부 탑재체 6기가 충돌을 회피할 수 있는 방법은 단 하나 뿐이다. 스타링크 위성이 회피기동을 하는 것이다. 다행인 것은 Fig. 8에서 보듯이 스타링크는 자체적으로 회피기동을 매우 잘 하고 있고 그 비용은 관찰 7에서 보듯이 그다지 크지 않다는 것이다. 따라서 누리호 위성이 스타링크와 위험상황을 만들게 될 때는 스타링크의 회피기동을 기대할 수 있을 것이다. 운명을 스타링크의 선의에 기대야 하는 수동적인 입장이 되기는 하지만, 누리호 위성이 최악의 상황을 피할 방안은 있는 것이다. 하지만 이 기대에 대해 좀 더 상세하고 구체적인 분석이 필요하다.

위험상황에서 스타링크가 과연 회피기동을 해 줄 것인가? 다음 예를 보자. 원웹은 2022년 3월 25일 러시아 Vostochny Cosmodrome에서 발사한 Soyuz 로켓으로 36개 위성을 1,200 km 고도로 보냈다. 당연히 550 km 고도 근처의 스타링크를 지나가야 했는데, 4월 3일 OneWeb-0178 위성과 550 km 고도에서 Starlink-1456과 근접할 것으로 예상되었다. 미 우주군의 18th Space Defense Squadron(SDS)의 당시 예측에 의하면, 두 위성은 약 60 m까지 접근하며 충돌확률 PoC는 1.3%라는 매우 큰 값으로 계산되었기에 회피기동이 필요한 것으로 판단했다. 이에 따라 원웹은 스타링크에게 회피기동과 관련한 논의를 요청했으나 스타링크는 회피기동이 불필요하다는 판단으로 원웹의 요청을 무시했고 결국 OneWeb-0178이 회피기동을 수행하였다. 이에 따른 실제 DCA는 최종적으로 1,120 m였던 것으로 추후 발표되었다. 심지어 스타링크는 이 상황에서 충돌에 관련된 위성에 장착된 인공지능기반의 자동 충돌방지 시스템을 켜고 알려져 있다. 현재 충돌이 예측되었을 때 누가 어떤 행동을 취할 것인가에 대한 국제규정은 없다[30,31].

누리호 위성 부 탑재체인 큐브위성과 스타링크의 충돌위험을 스타링크가 예측했다고 하자. 누리호 위성이 기동력이 없기 때문에 상식적인 수준에서는 스타링크가 회피기동을 해야 한다. 스타링크는 일상적으로 회피기동을 하고 있으며, 추진제 등 회피기동에 대한 비용이 충분히 위성의 설계에서 고려되어 있다. 본 연구에 의하면 그 비용도 비교적 크지 않은 수준으로 분석된다. 그러나, “과연 스타링크가 회피기동을 해 줄 것인가?”는 매우 중요한 질문이다. 스타링크는 앞으로 지구궤도에 42,000대까지 위성을 보내겠다는 목표를 가지고 있다. 현재까지는 스타링크가 능동적으로 적절한 회피기동을 수행하고 있어 누리호 위성들이 스타링크와 민감할 수 있는 상황까지는 아직 가지 않은 것으로 보인다. 하지만, 다수 위성을 지속적으로 유사 궤도에 발사, 운용할 계획을 가진 스타링크 입장에서 누리호 위성들이 임무 종료 후에도 장기간 유사 궤도에 머물게 된다면 추가 발사 시 충돌위험성 증가에 따른 문제 제기를 할 수도 있을 것이다.

누리호 위성과 스타링크의 충돌위험에 대한 논의에서 고려할 사항이 하나 더 있다. 현재 스타링크는 글로벌마케팅을 적극적으로 하고 있으며, 2023년 3월 8일 국내에도 법인을 설립했

다. 우리나라는 인터넷을 위한 광케이블 인프라가 세계에서 제일 잘 되어 있는 국가 중 하나로서 전 국민 대부분이 큰 어려움 없이 인터넷을 항상 사용할 수 있다. 즉, 특수한 상황들 제외하면 스타링크가 시장에 진입하기가 쉽지 않은 곳이다. 만일 스타링크가 우리나라 시장에 잘 진입하고 뿌리를 내리면 글로벌마케팅에서 매우 유리한 입장이 될 수 있을 것이다. 따라서, Elon Musk는 지금의 누리호 위성과 스타링크의 충돌위험이라는 상황을 스타링크의 국내시장 진입을 위한 좋은 지렛대로 삼으려 할 수 있다. 정부와 관련 기관에서는 이런 가능성을 충분히 고려해서 앞으로 대응 전략을 마련해야 할 것이다.

## 10. 정부에 대한 제안

경쟁적으로 펼쳐질 향후의 글로벌 우주활동을 예상할 때 누리호에 탑재되어 올라간 7기의 위성에 의한 충돌위험상황과 비슷한 상황들이 반복될 것이다. 그 때마다 해당 궤도를 선점한 위성소유/운영자들과 뒤에 진입한 위성소유/운영자들과의 견해차이 및 의견충돌은 발생할 것이며 이 문제는 국제법/정치 및 외교/군사적으로 매우 복잡하고 민감한 문제들을 제기할 수 있다. 따라서, 우주에서의 충돌위험에 관한 예측, 분석, 대처기술을 확보하는 것은 우주산업 진입의 후발주자입장에서는 누리호와 같은 훌륭한 발사체를 만드는 것만큼이나 중요한 기술일 수 있다. 여기서 다음 세 가지 측면을 강조하고자 한다.

첫째, 충돌위험에 대한 기술개발은 발사체나 인공위성을 만드는 등의 타 우주산업분야에 비해 적은 투자와 짧은 리드타임으로 글로벌 경쟁력을 갖춘 수준으로 발전할 수 있다. 둘째, 충돌위험과 관련한 기술을 필요로 하는 시장은 매우 빠른 속도로 성장하고 있다. NASA에서 관심을 가지고 있는 ISAM(in-orbit servicing, assembly, and manufacturing) 분야는 새로운 블루오션인데 충돌위험 예측 및 위험의 회피기동과 관련한 기술이 그 기반 중 하나가 된다. 셋째, 충돌위험과 관련한 기술은 전자, 통신, 소프트웨어, 빅데이터, 최적화, 통계 등 우리나라가 이미 세계적인 리더십을 가진 기술들의 조합이거나 이 기술들이 차지하는 비중이 크다. 따라서, 정부가 이 분야에 조금만 관심을 기울이면 우리나라가 짧은 시간 내에 세계를 리드하면서 큰 수익을 낼 수 있는 산업으로 키울 수 있을 것이다.

우주에서 충돌위험을 줄이기 위해서는 (i) 우주에 있는 물체들의 위치 및 운동특성을 관측한 후 수학적 모델로 변환하고, (ii) 이 정보들을 기반으로 미래의 위험상황에 대해 계량적으로 예측하고 예측된 위험상황을 회피하기 위한 최적의 의사결정을 하고, (iii) 그 의사결정에 따른 회피기동을 구체적으로 실행하는 것 등 세 가지로 구성된다. 첫째는 좋은 우주상황정보(space situational awareness, SSA) 데이터베이스를 구축하는 것을 의미한다. 이것은 물체의 위치와 속도 등 각 우주물체의 특성정보를 측정하고 수리모델로 정리하고 보관하는 것이다. 좋은 의사결정을 하기 위해서는 좋은 데이터가 필수적인 선행조건이다. 미국방성(DoD)의 특성이 반영되기는 했지만 TLE 데이터는 세계적으로 가장 보편적으로 사용되고 있다[12]. LeoLabs나 Slingshot 등 여러 회사들이 상업적인 SSA 데이터를 제공하고 있다. 이 회사들은 지상에 기반을 둔(ground-based) 측정기술을 사용한다. 즉, 지상에 설치된 광학망원경 또는 레이더 등으로 우주물체의 상태를 측정한다. Safran의 경우에는 인공위성이 발신하는 전파를 지상의 안테나에서 잡아서 위성의 상태정보를 측정하는 방법을 사용한다. 반면에, 최근에는 Digantara, Northstar, Vyoma, Privateer, Arca Dynamics 등의 회사들은 인공위성에 광학망

원경 또는 레이더를 장착해서 SSA 데이터를 얻는 등 우주에 기반을 둔(space-based) 측정기술을 사용하는 발전된 기술을 채택하고 있다. 그리고, 센서기술의 발전으로 점점 크기가 작은 물체도 인식할 수 있고 측정의 정밀도는 높아지고 있기 때문에 우주물체카타로그(space catalogue)의 크기는 점점 커지고 있다. 이런 SSA 데이터는 앞으로 매우 큰 시장을 형성할 것이다. 현재 우리나라도 앞으로 이 분야에 대한 지원과 투자가 많이 늘어나야 할 것이다.

둘째, 주어진 SSA 데이터를 사용해서 충돌위험을 신속하고 정확하게 예측하고, 예측된 위험은 최적으로 회피하는 전략을 제시할 수 있는 의사결정기술을 육성해야 한다. 충돌위험에 대한 예측 및 예측된 충돌의 회피기동에 대한 연구는 오래전부터 많이 있었는데 생각보다 도전적인 문제이다. 중요한 이론 중 하나는 1984년에 Felix Hoots가 발표한 three-filter 알고리즘이다[28]. 이 알고리즘은 직관적이며 이해하기 쉽고 효과적이기 때문에 많이 사용되고 있다. 현존하는 많은 충돌위험예측 소프트웨어들은 모두 이 알고리즘을 구현한 것으로 파악되고 있다. 하지만 이 알고리즘은 여러 가지 명확한 한계를 가지고 있어서 우주물체카타로그의 크기가 급속히 커지는 미래의 상황에 대응하기는 어려울 것으로 판단된다. 더구나 three-filter 알고리즘은 두 개씩의 물체의 기하학적 거리문제를 풀기 위한 알고리즘이기 때문에 여러 개의 물체 사이에 정의되는 최적화문제를 해결하기 어렵다. 이와 같은 한계를 한꺼번에 해결하기 위해 SpaceMap은 voronoi diagram 기술에 기반한 알고리즘을 개발했으며, 충돌위험 및 constellation 운용의 최적화 등 우주에서의 모든 의사결정문제를 실시간 또는 실시간에 가까운 빠른 속도로 해결하고자 한다. 앞으로 적절한 검증이 되면 이 프로그램의 라이브러리인 AstroLibrary가 많은 소프트웨어를 쉽게 개발하는데 사용될 것이다. SpaceMap은 AstroLibrary를 활용해서 우주분야 소프트웨어산업의 생태계를 리드하는 것을 목표로 연구개발을 진행하고 있다. 특히 AstroLibrary와 AI의 ChatGPT와 같은 transformer 기술의 융합에 의미있는 진척이 있기 때문에 글로벌 시장에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 적절한 정책과 지원이 따른다면 글로벌 최고 수준의 IT 기술과 AstroLibrary를 가진 우리나라에서 우주 소프트웨어분야도 글로벌수준으로 신속히 올라갈 수 있을 것이다.

셋째, 예측된 충돌위험은 적절한 방법으로 회피해야 한다. 이는 두 가지 측면을 고려해야 하는 또 다른 도전이다. 먼저, 회피기동을 하기 위해서는 위성이 추력을 보유하고 있어야 하며 필요한 시기에 추력을 점화해서 추력을 만들어야 한다. 최근 들어 국제전시회를 가 보면 위성의 추력을 개발하고 판매하는 기업이 매우 많이 생기고 있다. 하지만 국내에는 관련 기업이 매우 적다. 추력의 용도는 충돌위험의 회피기동을 위해서도 필요하지만 다양한 in-orbit 서비스를 위해 위성을 정교하게 미세 조정하는데 필수적인 장치이기 때문에 앞으로 수요가 폭발적으로 증가할 것이다. 정부에서는 이 분야에 적극적으로 선도적인 투자를 해야 한다.

또 다른 측면을 보자. 추력을 만들기 위해서는 추진제를 사용하게 되는데, 위성은 발사될 때 일정량의 추진제를 가지고 발사되고 보유한 추진제를 다 사용하면 위성이 더 이상 회피기동을 할 수 없기 때문에 추진제를 최대한 절약해야 한다. 만일, 예측된 위험을 피하기 위해서 추력을 통해 위성의 궤도를 수정하면 기존에 발생했던 위험은 피하게 되더라도 변화한 궤도가 또 다른 우주물체와 새로운 충돌위험상황을 만들 수도 있다. 여기서 “또 다른 우주물체”라 함은 원래 궤도의 주변에 있는 모든 우주물체가 될 수 있기 때문에 이렇게 새로운 충돌위험예측을 해야 하는 경우의 수가 지수적으로 증가하게 된다. 따라서, 좋은 회피기동을 하기 위해서는 “언제부터 시작해서 어느 정도 오랫동안 추력을 가동해야 가능한 적은 추진제를

사용하면서도 새롭게 발생할 충돌위험은 최소로 줄일 수 있는가?”라는 최적의사결정문제를 풀어야 한다. 즉, 위에서 “둘째”로 언급한 최적의사결정문제를 신속히 풀어야 한다. 여기서 고려해야 할 주변의 물체는 이미 매우 많고 앞으로 급속도로 많아질 것이며, 모든 물체가 다양한 방향과 속도로 움직이기 때문에 그 계산량은 매우 크다. NASA의 보고에 따르면 이 최적화 문제는 매우 풀기 어렵다고 한다[32].

## 11. 결론

2023년 5월 25일, 대한민국은 누리호를 성공적으로 발사해서 7개의 위성을 550 km 고도의 태양동기궤도에 안전하게 배치했다. 항공우주연구원을 중심으로 만든 우리나라 우주역사의 큰 쾌거이다. 앞으로 누리호 위성들이 각자의 임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 임무 기간을 포함한 전 생애 주기 동안 안전하게 궤도를 비행해야 할 것이다. 하지만, 고도 550 km 근처는 스타링크가 이미 4,000대 이상의 위성을 배치시키고 상업적 서비스를 진행하고 있는 곳이다. 따라서, 누리호 위성들의 충돌위험에 대해 지속적으로 예측하고 만일의 경우에 대해서는 준비를 할 필요가 있다.

본 논문은 SpaceMap사에서 개발한 AstroOne 프로그램을 사용하여 계산한 데이터를 통해 누리호 위성들이 스타링크 위성들과 충돌할 위험성에 대해 분석하였다. 그리고, 최악의 상황을 회피하기 위한 계획을 미리 마련할 수 있도록 몇 가지 의미 있는 계량적인 분석을 수행하였다. 스타링크위성의 회피기동에 수반될 수도 있는 비용모델을 만들기 위해 필요한 분석 데이터도 제시하였다. 누리호 위성과 관련된 당사자들 및 관련 기관에서는 이 분석결과에 기반하여 예상되는 최악의 시나리오에 대비할 때 도움이 될 것이다. 아리랑 5호가 스타링크 위성들과 이루는 DCA의 분포패턴이 누리호 위성들의 경우와 상당히 다르고 오히려 스타링크 위성들끼리의 패턴과 유사한 점은 주의깊게 살펴볼 필요가 있다. 앞으로 우리나라가 보유하고 운영하고 있는 모든 위성들에 대해서 이와 같은 분석을 지속할 필요가 있다고 사료된다.

또한, 본 논문은 후발주자로서 우주에 진입하는 우리나라가 고려해야 할 전략을 제시하였다. 기업 및 정부에서는 이 기회를 우주환경 보호와 관련한 기술의 선도적인 개발을 위한 출발점으로 삼고 이와 관련한 전략 및 필수적인 기반 기술 개발을 위한 기회로 삼아야 할 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 리더연구지원(2017R1A3B1023591) 및 미국공군(AFRL)의 연구지원(No. FA2386-22-1-4067)으로 수행되었습니다.

## References

1. UNITED NATIONS Office for Outer Space Affairs, Treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies (1967) [Internet], viewed 2023 Jun 14, available from: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>

2. Kessler DJ, Cour-Palais BG, Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 83, 2637-2646 (1978). <https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637>
3. Kessler DJ, Johnson NL, Liou JC, Matney M, The Kessler syndrome: implications to future space operations, *Adv. Astronaut. Sci.* 137, 8 (2010).
4. Kim S, Lee J, Choi EJ, Cho S, Ahn J, Dual-mode framework for space object collision risk assessment, *J. Space Technol. Appl.* 2, 13-29 (2022). <https://doi.org/10.52912/jsta.2022.2.1.13>
5. Uriot T, Izzo D, Simões LF, Abay R, Einecke N, et al., Spacecraft collision avoidance challenge: design and results of a machine learning competition, *Astrodynamics* 6, 121-140 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42064-021-0101-5>
6. Krage FJ, NASA spacecraft conjunction assessment and collision avoidance best practices handbook, NASA/SP-20205011318 (2020).
7. Dortch MH, Space exploration holdings, LLC, Request for modification of the authorization for the SpaceX NGSO satellite system, FCC Commission Documents, FCC 21-48 (2021).
8. Space Exploration Holdings, LLC, Request for orbital deployment and operating authority for the SpaceX Gen2 NGSO satellite system, FCC Commission Documents, FCC 22-91 (2022).
9. Goldman D, SPACEX (2022) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://www.scribd.com/document/581265457/SpaceX-Semi-Annual-R-1>
10. Vallado DA, Fundamentals of Astrodynamics and Applications (Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2001).
11. Kopacz JR, Herschitz R, Roney J, Small satellites an overview and assessment, *Acta Astronaut.* 170, 93-105 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.034>
12. Space-Track, Space-track (2023) [Internet], viewed 2023 Jun 14, available from: <https://www.space-track.org/>
13. Vallado D, Crawford P, Hujsak R, Kelso T, Revisiting spacetrack report \#3, in AIAA Astrodynamics Specialists Conference and Exhibit, Keystone, CO, 21-24 Aug 2006.
14. Choi SS, Ryu P, Song C, Ji M, Seong J, et al., SPACEMAP: real-time web server for safer, more sustainable and efficient space, in 23rd Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, 27-30 Sep 2022.
15. Choi SS, Ryu PJ, Bae B, Kim H, Jang J, et al., Real-time conjunction assessment and maneuver planning in SPACEMAP, in 73rd International Astronautical Congress, Paris, France, 18-22 Sep 2022.
16. Kelso TS, Alfano S, Satellite orbital conjunction reports assessing threatening encounters in space (SOCRATES), in 4th European Conference on Space Debris, 737, Darmstadt, Germany, 18-20 Apr 2005.
17. Kelso TS, Analysis of the 2007 Chinese ASAT test and the impact of its debris on the space environment, in 8th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 12-15 Sep 2007.

18. Mineiro MC, FY-1C and USA-193 ASAT intercepts: an assessment of legal obligations under article IX of the outer space treaty, *J. Space L.* 34, 321 (2008).
19. Kelso TS, Analysis of the Iridium 33-Cosmos 2251 collision, *Adv. Astronaut. Sci.* 135, 1099-1112 (2009).
20. Wang T, Analysis of debris from the collision of the Cosmos 2251 and the Iridium 33 satellites, *Sci. Glob. Secur.* 18, 87-118 (2010). <https://doi.org/10.1080/08929882.2010.493078>
21. Fateev V, Sukhanov S, Khutorovsky Z, Collision prediction for LEO satellites. Analysis of characteristics, in 10th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 1-4 Sep 2009.
22. Spacenews, Breakup of China's Yunhai-1 (02) satellite linked to space debris collision (2022) [Internet], viewed 2023 Jul 19, available from: <https://spacenews.com/breakup-of-chinas-yunhai-1-02-satellite-linked-to-space-debris-collision/>
23. Jonathan McDowell on Twitter (2021) [Internet], viewed 2023 Jul 19, available from: <https://twitter.com/planet4589/status/1426773077220855808>
24. Ryu P, Choi S, Song C, Kim H, Jang J, et al., Real-time conjunction assessment with collision probability and miss distance using AstroFingertip of SPACEMAP, in 2023 Spring Conference of the Korean Society for Space Science, Changwon, Korea, 26-28 Apr 2023.
25. Wikipedia, The free encyclopedia, Starlink (2023) [Internet], viewed 2023 Jun 15, available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>
26. Alfano S, Relating position uncertainty to maximum conjunction probability, *J. Astronaut. Sci.* 53, 193-205 (2005). <https://doi.org/10.1007/BF03546350>
27. Center GSF, CARA SD: two-dimension probability of collision (Pc) calculations (2019). [Internet], viewed 2023 Jun 14, available from: <https://software.nasa.gov/software/GSC-18016-1>
28. Hoots FR, Crawford LL, Roehrich RL, An analytic method to determine future close approaches between satellites, *Celest. Mech.* 33, 143-158 (1984). <https://doi.org/10.1007/BF01234152>
29. Choi S, Ryu J, Song C, Kim H, Jang J, et al., AstroLibrary: RESTfulAPI for real-time spatio-temporal analysis of satellites, in 2023 Spring Conference of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Jeju, Korea, 19-21 Apr 2023.
30. OneWeb, SpaceX satellites dodged a potential collision in orbit (2021) [Internet], viewed 2023 Jun 14, available from: <https://www.theverge.com/2021/4/9/22374262/oneweb-spacex-satellites-dodged-potential-collision-orbit-space-force>
31. Spacenews, SpaceX and OneWeb spar over satellite close approach (2021) [Internet], viewed 2023 Jun 14, available from: <https://spacenews.com/spacex-and-oneweb-spar-over-satellite-close-approach/>
32. Nag S, Murakami DD, Marker NA, Lifson MT, Kopardekar PH, Prototyping operational autonomy for space traffic management, *Acta Astronaut.* 180, 489-506 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.056>



## Author Information

**최승환** shawn.choi@spacemap42.com



한양대 기계공학부에서 2018년 학사학위 취득 후, 동학교에서 융합기계공학과로 박사과정 수료 및 재학 중이다. 2017년부터 한양대 보로노이연구단에서 계산기하학을 바탕으로 드론, 3D 프린팅 그리고 인공위성 등 다양한 응용분야 연구 수행중이다. 2021년부터 스페이스맵(주)에서 소프트웨어 개발 및 연구개발업무를 담당 중이다.

**김성애** lowell.kim@spacemap42.com



한양대학교 컴퓨터소프트웨어학부에서 2023년 학사학위를 취득했고, 2022년 한양대학교 Voronoi 연구단에서 인턴으로 근무했으며, 2023년부터 스페이스맵(주)에서 소프트웨어 엔지니어로 재직중이다.

**유중현** peter.ryu@spacemap42.com/jhryu@hanyang.ac.kr



한양대 산업공학과에서 2002년 박사학위 취득 후 2004까지 삼성SDS에서 CAD/PLM 관련 시스템 설계/개발을 수행했다. 2004년부터 한양대 보로노이연구단에서 계산기하학/최적화 및 응용연구 수행 중이며, 2021년부터 스페이스맵(주)에서 인공위성의 안전하고 효율적인 운용을 위한 소프트웨어 엔진/라이브러리의 설계/개발업무를 담당한다.

**신경우** chris.sheen@kairo.space



(주) 카이로스페이스는 기상기후관측, 산불예보, 저궤도위성데이터통신시스템과 같이 실생활과 밀접한 저궤도 큐브셋위성군 기반 글로벌데이터서비스시스템을 개발하고 있으며, 우주과학연구 목적의 심우주탐사선 등을 개발하고 있다. 스페이스 스타트업 (주) 카이로스페이스의 창업자/대표이사이다.

**김종원** john.kim@spacemap42.com



한양대학교 컴퓨터소프트웨어학부에서 2023년 학사학위를 취득했고, 2022년 한양대학교 Voronoi 연구단에서 인턴으로 근무했으며, 2023년부터 스페이스맵(주)에서 소프트웨어 엔지니어로 재직중이다.

**김용일** yykim@justek.com

서울대학교 기계공학과에서 1982년 학사학위 취득 후, 동학교에서 1984년 석사학위를 받았다. 미국 카네기멜론 대학교 기계공학과에서 1989년 박사학위를 받았다. 1989년부터 1990년 미국 IBM에서 근무하였고 1990년부터 1999년까지 한국과학기술연구원에서 근무하였다. 1999년부터 현재까지 (주)저스텍에서 근무중이다.

**이재진** jjlee@kasi.re.kr



KAIST 물리학과에서 2002년 박사학위를 취득했고, 현재 한국천문연구원에서 우주과학본부장을 맡고 있다. 주로 우주날씨를 관측하는 관측기 개발과 데이터 분석 연구를 수행하고 있으며, 도요넷 (SNIPE) 개발 연구 책임자를 맡고 있다.

**송재욱** jwsong@hanyang.ac.kr



Georgia Institute of Technology에서 산업공학 학사, 서울대학교에서 산업공학 박사 학위 취득 후, 현재 한양대학교 산업공학과 조교수로 재직중이다. 주요 연구 분야는 복잡계, 확률모형, 시계열, 머신/딥러닝을 활용한 금융 및 비즈니스 혁신이며, 특히 위험/불확실성 하에서의 의사결정 및 위험관리에 큰 관심을 가지고 있다.

## Author Information

**최성환** kf2020@hanmail.net



공군사관학교에서 1994년도에 외국어학 학사 학위와 2005년도에 충북대학교에서 행정학 석사학위를 취득하였으며, 2015-2017년 동안 합참 전력기획부에서 근무하면서 군정찰위성 사업을 담당하였다. 2017-2021년 공군본부 우주센터에서 우주전력발전과장으로서 초소

형위성체계, 한국형위성항법체계(KPS), 조기경보위성체계, 레이더우주감시체계, 고출력 레이저 위성추적체계, 대위성재밍체계 등 우주 전력 소요를 제안하였고, 우주정보상황실장으로서 중국 텐궁 1호 추락, 중국 창정5B 로켓 추락과 같은 우주위험 상황에 대응하였다. 2021년부터 현재까지 우주센터장직을 수행하며, 국제 우주상황조치 연합연습(global sentinel) 참가, 미 우주군과 우주정책협의회 개최, 한국항공우주학회 내 우주안보 OS 구성 등 국내외 우주협력을 통해 국방 우주력 발전을 위해 노력 중이다.

**마미순** mah.misoon@gmail.com



미국공군연구소에서 37년간 연구원으로서, program manager로 근무하면서 반도체, 나노테크, 전자통신분야, 우주항공분야등 다양한 분야에 R&D와 국제협력분야에 기여했다. 현재는 M&K Research and Development CEO로서 활약하고 스페이스맵 주식회사와

MOU를 체결하고 국제협력을 하고 있다.

**김해동** haedkim@gnu.ac.kr



2009년 KAIST에서 항공우주공학 박사학위를 받았다. 1996년부터 2000년까지 (주)현대우주항공에서 아리랑위성 관제시스템 개발을 시작하였으며, 2000년에 한국항공우주연구원으로 이직하여 2022년 8월까지 22년 동안 아리랑

위성 1,2,3,3A,5호 및 천리안 관제시스템 개발, 아리랑 1호,2호 실무운영 책임자, 이외 초소형위성 개발, 우주쓰레기 충돌위험 분석 및 제거 기술 개발, 궤도상서비스 기술 개발을 위한 연구책임자를 역임하였다. 2022년 9월부터 경상국립대학교 정교수로 부임하여 군집위성 임무/궤도 설계와 해석, 초소형위성을 이용한 궤도상서비스 및 지구 재진입, 위성폐기 기술들을 연구하고 있다.

**김덕수** douglas.kim@spacemap42.com



한양대학교 산업공학과 학사(1982), New Jersey Institute of Technology 산업공학과 석사 (1985), University of Michigan의 Industrial and Operations Engineering 박사 (1990) 취득하였다. 1989년부터 1991년까지 미국 미시간의 Schlumberger CAD/CAM

Co.에서 Senior Software Engineer로, 1991년부터 1995년까지 삼성종합기술원에서 선임연구원으로 근무하면서 CAD/CAM 분야의 이론 및 알고리즘을 개발하였다. 전문분야는 계산기하학 및 기하모텔링의 이론개발, 소프트웨어 구현, 응용문제해결. 1995년부터 한양대학교 교수로 재직중이다. 2021년 9월 스페이스맵주식회를 설립하고 CEO로 근무하고 있다.