

기술논문

한국항공우주연구원 우주물체 충돌위험 관리시스템 개발 및 운영현황

성재동[†], 정옥철, 정유연, 송새한

한국항공우주연구원

Development and Operation Status of Space Object Collision Risk Management System for Korea Aerospace Research Institute (KARI)

Jaedong Seong[†], Okchul Jung, Youeyun Jung, Saehan Song

Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, Korea



Received: July 8, 2023

Revised: August 1, 2023

Accepted: August 8, 2023

[†]Corresponding author :

Jaedong Seong

Tel : +82-42-870-3933

E-mail : acestars@kari.re.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

Jaedong Seong

<https://orcid.org/0000-0003-2042-2422>

Okchul Jung

<https://orcid.org/0000-0002-1310-1148>

Youeyun Jung

<https://orcid.org/0000-0002-5268-7217>

Saehan Song

<https://orcid.org/0009-0005-5791-4369>

요약

본 논문은 한국항공우주연구원에서 운영 중인 우주물체 충돌위험 관리시스템의 개발 및 운영 현황을 포함하고 있다. 현재 저궤도위성 6기, 정지궤도위성 3기에 대해 24시간 충돌위험을 모니터링하고 있으며, 필요시 충돌회피기동을 통해 충돌위험을 완화하여 안전하고 안정적으로 운영하고 있다. 2007년 중국의 자국위성 요격실험 이후 본격적으로 우주물체와 운영위성 간 충돌위험을 모니터링하고 있으며, 신속하고 효율적으로 상황에 대처하기 위해 다양한 충돌위험 관리시스템을 개발해왔다. 본 논문에서는 2007년 이후 현재까지 개발된 우주물체 충돌위험 관리시스템에 대한 소개, 현재 지구주변의 인공우주물체 현황, 현재 운영 중인 시스템에 대해 기술하였으며, 나아가 앞으로의 전망과 향후 계획에 대해 소개하였다.

Abstract

This paper includes the development and operational status of the space object collision risk management system operated by the Korea Aerospace Research Institute. Currently, it monitors 6 low-orbit satellites and 3 geostationary satellites for collision risks 24 hours, enabling prompt collision avoidance maneuvers to ensure safe and stable operations. Since Chinese anti-satellite test (ASAT) in 2007, the monitoring of collision risks between space objects and operational satellites has been taken seriously, leading to the development of various collision risk management systems to respond quickly and efficiently to such situations. This paper provides an introduction to the space object collision risk management system developed from 2007 to the present, the current status of artificial space objects around Earth, and the system currently in operation. Additionally, it outlines future prospects and plans for the system.

핵심어 : 우주파편, 우주상황인식, 충돌위험, 충돌회피기동, 위험관리시스템

Keywords : space debris, space situational awareness, collision probability, collision avoidance maneuver, risk management system

1. 서론

지난 60여 년간 인류의 활발한 우주개발로 인해 지구주위 궤도상에 수많은 인공우주물체가 존재하게 되었다. 지금까지 발사된 지름 10 cm 이상의 우주물체는 57,300여 개로 집계되며, 이 중 대기권 재진입하여 소각된 29,600여 개 물체를 제외한 27,700여 개의 물체가 여전히 지구 주변 궤도상에 존재하고 있다[1]. 특히 다목적실용위성이나 차세대중형위성 등 고도 2,000 km 이하의 저궤도 영역에 많은 우주물체가 밀집되어 있는데, 초속 7-8 km의 빠른 속도로 움직이는 물체와 충돌할 경우 부분손상이나 영구손상뿐 아니라 수많은 충돌파편을 양산하여 다른 위성들에게 심각한 위협이 될 수 있다. 2009년 미국 이리듐 33 위성과 러시아 코스모스 2251 위성이 궤도상에서 충돌하여 약 2,500여 개 파편을 양산하기도 하였으며, 2016년 유럽우주국 센티넬 1A의 경우 우주물체와의 충돌로 인해 태양전지판이 손상되는 등 우주물체와의 충돌로 심각한 피해를 받는 상황이 지속적으로 발생하고 있다[2].

향후 이와 같은 상황은 더욱 악화될 것으로 전망된다. 뉴스페이스 시대의 본격화에 따라 기존 소수의 대형위성보다는 다수의 소형위성 운영이 늘어나고, 다양한 민간기업에서도 우주개발에 참여하기 시작함에 따라 10년 전인 2003년 신규 우주물체 126개에서 2022년 3,100여 개로 23배 이상 급격히 우주물체가 증가하였다. 올해 상반기까지 등록된 신규 우주물체가 약 1,900여 개로 향후 3,000-4,000여 개 우주물체가 매년 생겨날 것으로 예상된다. 한편, 2020년부터 운영이 시작된 미우주군 스페이스팬스는 기존에 추적하지 못했던 지름 3-5 cm의 물체까지 추적이 가능해졌고, 상대적으로 크기는 작지만 위성에 주요한 손상을 야기하기에는 충분하기에 위성을 안전하게 운영해야 하는 지상국은 기존 27,700여 개 물체뿐 아니라, 100,000개에 가까운 우주물체를 고려해야 하는 상황이 되었다[3].

한국항공우주연구원에서는 저궤도위성 5기, 정지궤도위성 3기, 달탐사선 1기를 운영하고 있으며, 운영위성들에 근접하는 우주물체를 24시간 모니터링하고 주요한 물체들과의 충돌위험을 관리하고 있다[4]. 장기적 국가계획에 따라 2030년 이후 국가우주자산의 수가 80기 이상이 될 것으로 예상됨에 따라 현 시스템의 자동화 비율 상향이나 분석용량 증대, 새로운 환경에 대한 분석 기능 추가 등 지속적으로 시스템을 고도화하고 있다.

본 논문의 2장에서는 현 시점의 저궤도, 정지궤도 우주물체의 현황에 대해 분석하였고, 3장에서는 ACAS(automated conjunction analysis system), KARISMA(KARI space debris collision risk management system), CAFAST(conjunction assessment flow automation support tool), CAFAST II와 같은 한국항공우주연구원의 우주물체 충돌위험 관리시스템의 발전과정에 대해 소개하였다. 4장에서는 현재 운영 중인 CA-FAST II 주요기능들에 대해 소개하였고, 5장에서는 앞으로의 전망, 발전방향들에 대해 고찰하였다.

2. 저궤도, 정지궤도 우주물체의 현황

Fig. 1은 SATCAT(satellite catalog)에 포함된 정보를 바탕으로 궤도영역 및 기능에 따라 분류한 결과이다[5]. 지금까지 총 55,438개 물체가 발사되었으며, 이 중 28,529개의 물체는 대기권 재진입하여 소멸되었다. 재진입한 물체의 경우 저궤도상에 발사되어 임무 후 고도하강하여 재진입하거나 오랜 기간 방치된 상태에서 서서히 고도가 낮아져 재진입하는 것이 일반적인 과정이다. 현재 궤도상에 존재하는 물체는 총 26,909개이며, 저궤도에 78%, 중궤도에

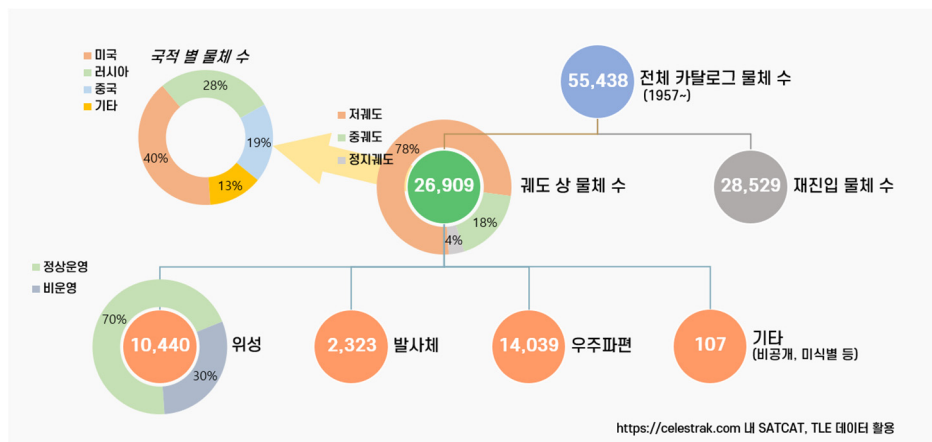


Fig. 1. SATCAT catalog data statistics. SATCAT, satellite catalog.

18%, 정지궤도에 4%의 물체가 존재하는 것으로 나타나 저궤도 영역에 우주물체들이 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 국적별 비율을 살펴보면 미국이 40%, 러시아(소련)이 28%, 중국이 19%를 차지하여 세 국가의 우주물체가 전체 87%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 실제 우주개발이 활발하기도 하지만 궤도상 충돌, 위성요격실험, 고의적 분열 등으로 많은 우주파편이 생성된 것이 주요한 원인으로 볼 수 있다.

물체의 종류별 분류의 경우, 위성이 39%, 발사체가 9%, 우주파편이 52%를 차지하였고, 위성의 경우 전체 10,440개 중 70%가 정상운영 중인 위성으로 높은 비중을 차지하고 있는데, 이는 스타링크 초대형 군집위성군의 영향으로 볼 수 있고, 뉴스페이스 영향에 따라 향후 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

Fig. 2는 SATCAT 데이터에 포함된 임무고도 정보를 이용하여 고도별 우주물체의 집중도를 확인한 결과로 동시에 현재 운영 중이거나, 운영 예정인 국가위성의 임무고도를 함께 표기하여 상대적인 위험도를 확인해보고자 하였다. 운영위성 중 스타링크 초대형군집 위성군과 동일한 고도에서 임무를 수행하고 있는 다목적실용위성 5호의 고도영역에서 압도적으로 높은 집중도를 보여주었다. 이는 실제 충돌위험 관리업무를 수행하면서 발견되었던 근접빈도의 폭발적 증가추세와도 일맥상통한 결과이다. 고도 550 km 이상의 구역에서는 고도가 높아질수

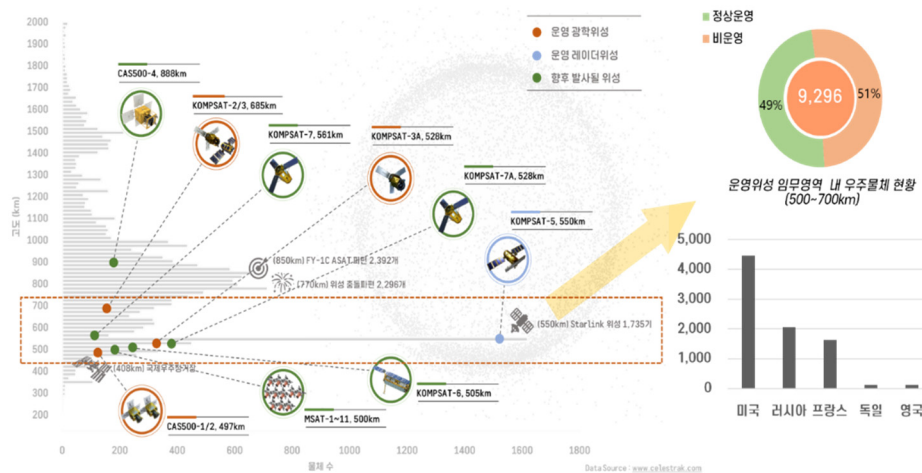


Fig. 2. Space environment analysis for the low orbit operational satellite.

록 물체의 집중도가 높아지는데 이는 고도 770 km에서 발생한 미-러 위성충돌과 고도 850 km에서 발생한 중국의 자국위성요격실험의 영향으로 볼 수 있다[6,7]. 향후 발사될 차세대중형위성 4호의 경우, 고도 888 km에 위치할 것으로 예상되기에 발사 후 언급한 2건의 분열과편파 근접상황이 자주 발생할 것으로 예상할 수 있다. 한편, 고도 500 km 이하의 영역에서는 대기항력으로 인해 궤도수명이 짧아 물체의 집중도가 낮게 나타난다. 대부분의 국가위성이 고도 500-700 km 범위 내 위치하거나 할 예정이기에 해당 영역에 대한 현황을 살펴보면, 9,296개 물체 가운데 절반이 운영 중인 미국, 러시아, 프랑스 위성들인 것으로 나타났다. 이를 통해 우주교통관제의 측면에서 위성운영국이나 중앙관리기관과의 데이터 공유체계를 마련하고 상호 간 소통할 수 있는 정책적, 기술적 방안 마련이 시급함을 알 수 있다.

정지궤도의 경우, 국제전기연합(ITU, International Telecommunication Union)의 승인을 받아 주파수와 기준경도 범위를 발사전에 할당받는다. Fig. 3은 한국항공우주연구원에서 운영 중인 3기 정지궤도위성과 주변 위성들을 나타낸다. 천리안 위성의 경우, 경도 128.15도를 기준으로 0.1도 범위 내에서 운영 중이며, 정지궤도복합위성 2A, 2B는 128.25도를 기준으로 0.1도 범위 내에서 운영하고 있다. 특히 정지궤도복합위성의 경우, 동일한 궤도유지박스(station keeping box)에 머무르면서 서로 충돌하지 않도록 동시운영(co-location) 전략을 사용하고 있다. 인근에 위치한 위성들로는 러시아, 일본, 라오스 위성이 있으며, 장기 경도변화를 관찰해보면 천리안 위성들을 포함하여 일본과 라오스의 경우, 주어진 운영범위 내에서 잘 유지되고 있었다. 이를 위해 천리안 위성들의 경우, 각각 매주 2회씩 좌우 영역유지, 상하 영역유지를 위한 궤도조정을 실시하고 있다. 정지궤도영역의 경우, 정상적으로 운영 중인 위성의 비율이 높은 편이기에 대부분 주어진 영역을 잘 유지하고 있으나, 갑작스러운 고장이나 폐기임무 실패 등으로 정지궤도 영역에 머무르는 경우, 다른 정지궤도위성의 운영영역으로 표류하는 경우가 발생하고, 이는 많은 위성의 심각한 영향을 미칠 수 있다. Fig. 4에서는 RADUGA 1-7이나 EUTE 25C가 대표적인 예시로 볼 수 있다.

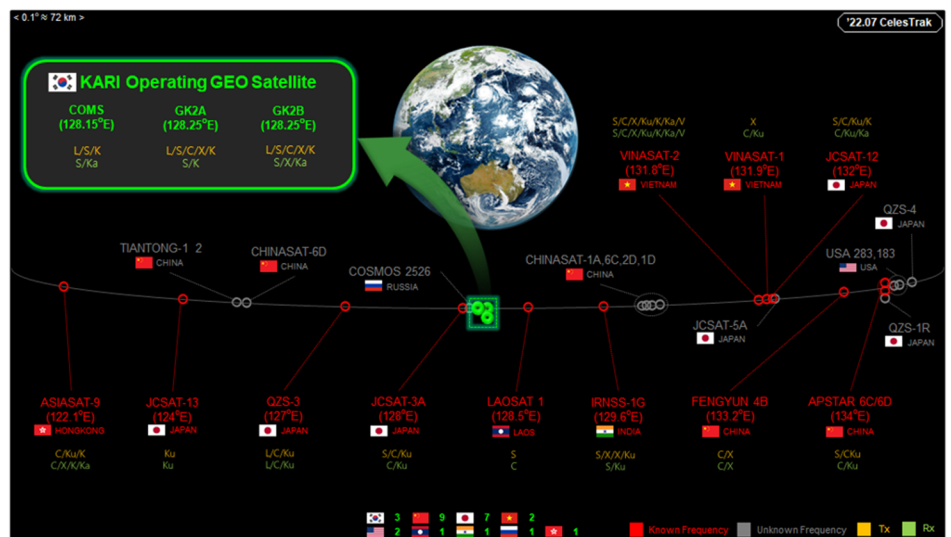


Fig. 3. Space environment analysis for the geostationary orbit operational satellite. KARI, Korea Aerospace Research Institute.

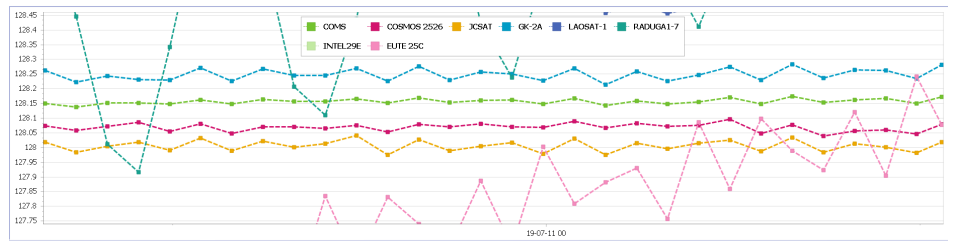


Fig. 4. Longitude trend for geostationary orbit satellites.

3. 한국항공우주연구원 우주물체 충돌위험 관리시스템 발전과정

한국항공우주연구원에서 본격적으로 운영위성과 근접우주물체 간 충돌위험 분석 및 관리를 수행한 시점은 중국의 자국위성 요격실험이 수행된 2007년부터였다. Fig. 5는 FENGYUN 1C 위성요격실험 결과 발생한 파편들의 고도분포를 나타낸다. 880 km 고도에서 충돌 및 폭발이 발생하였지만 Fig. 5와 같이 200 km에서 1,500 km까지 분열파편이 넓은 고도영역에 분포하여 저궤도 대다수 운영위성에 영향을 주었다.

당시 한국항공우주연구원에서는 다목적실용위성 1호, 2호를 운영하고 있었고, 매일 운영위성의 궤도와 FENGYUN 1C 파편 간 충돌위험 분석을 운영자가 수동으로 분석하였다. 북미항공우주방위사령부(NORAD, North American Aerospace Defence Command)에서 배포하는

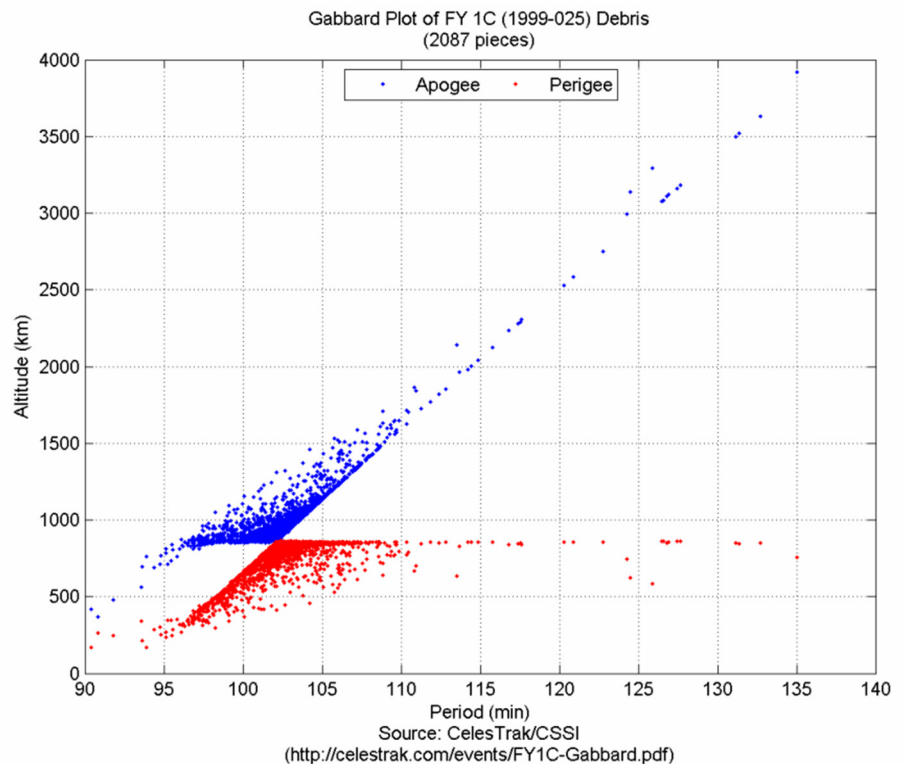


Fig. 5. Gabbard Plot of FENGYUN 1C Debris. Plot shows the apogee and perigee of each piece plotted against its orbital period [7].

중국 FY-1C 파편 감시 및 분석 결과

○ **7월 1일자** NORAD에서 공개한 FY-1C 파편들의 궤도데이터 개수는 총 **2,069개입**.

* 1월 30일 최초로 NORAD에서 공개 시 517개 (10cm이상)

** NORAD에서 FY-1C 파편 궤도데이터를 추가적으로 추적하여 갱신하는 주기는 3-5일로 불규칙함.

○ **7월 1일자** FY-1C 파편 NORAD 궤도 분석 결과

(향후 1개월, 7/1 ~ 7/31)

위성/근접범위	<반경 5km	<반경 1km	비고
아리랑 2호	4	0	-

* 반경 내 접근 개수는 아리랑 2호, FY-1C 궤도데이터의 갱신에 따라 변경되어질 수 있음.

** 5km 근접 시 충돌 확률 = 1/100,000,000 (1.0E-8)

1km 근접 시 충돌 확률 = 1/1,000,000 (1.0E-6)

Fig. 6. Example daily report for conjunction analysis of FENGYUN 1C DEB.

TLE(two line element) 데이터를 이용하여 향후 7일 혹은 30일 동안 운영위성과 분열파편의 근접상황과 충돌위험을 예측하였고, Fig. 6과 같은 보고서를 작성하여 유관기관에 전파하였다. 초기에는 FENGYUN 1C 파편에 대한 분석을 주로 수행하였으나, 점차 다른 궤도상 분열상황으로 발생한 파편까지 분석의 범주에 포함하여 분석의 범위를 확장하였다. 동시에 데이터 일관성 분석, 충돌위험 상세분석, 충돌회피기동에 대한 개념수립, 절차 및 업무의 명세화와 같이 위성의 운영과 충돌위험 관리업무에 대한 개념이 정립되기 시작하였다.

2009년 미국과 러시아 위성의 궤도상 충돌로 2,000개 이상 파편이 다시 발생하였고, 기존 대비 많은 충돌위험이 발생하였기에 자동화 개념이 포함된 충돌위험 관리업무의 체계가 Fig. 7과 같이 마련되었다. 1단계(자동예측)에서는 NORAD 데이터를 자동으로 획득하고 향후 7일간 근접상황을 모니터링하며, 그 결과 근접거리가 1 km 이내인 물체가 있을 경우 2단계로 전

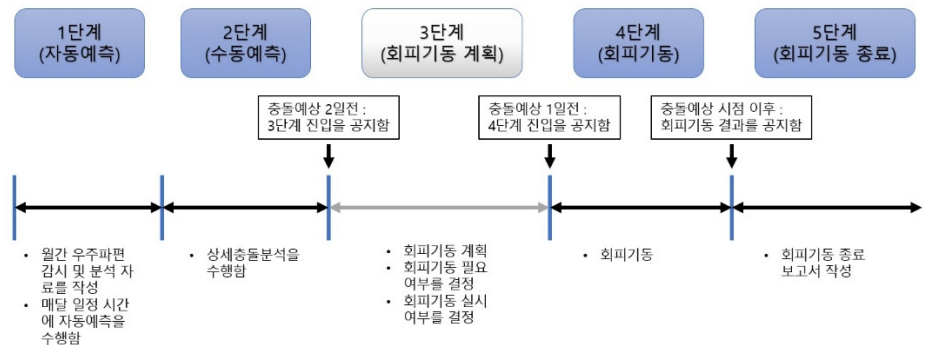


Fig. 7. Workflow diagram over time [8].

환된다. 2단계(수동예측)은 수시로 갱신되는 운영위성과 근접물체의 궤도정보를 이용하여 반복적으로 충돌위험을 분석하며, 그 결과 근접거리 100 m 이내이거나 충돌확률이 1/1,000 이상인 경우 다음 단계로 진입한다. 3단계(회피기동 계획단계)는 반복적인 수동예측을 수행하여 충돌회피기동 여부를 결정하고, 위성의 촬영임무나 운영 상 제한사항을 고려하여 충돌회피기동 계획을 수립한다. 4단계(회피기동 수행)에서는 수립된 충돌회피기동 계획을 위성명령으로 변환하여 위성에 업로드하고 위성기동 전반의 과정을 관리한다. 마지막 5단계(회피기동 종료)에서는 기동 후 궤도정보를 이용하여 충돌회피기동 평가를 수행하며, 유관기관에 결과를 공지한다.

지속적인 우주개발과 궤도상 분열상황이 발생함에 따라 우주물체의 수가 증가하였고, 이로 인해 우주물체 충돌위험 관리업무의 부담 또한 계속 증가하였다. 이에 Fig. 8과 같이 2010년 우주파편 충돌분석 자동화시스템(ACAS)를 개발하여 운영에 활용하기 시작하였다. 매일 2번씩 NORAD의 데이터를 자동으로 획득하고 상용 S/W인 STK(satellite tool kit)과 연동하여 충돌위험분석을 수행하고 특정 기준을 만족하는 상황 발생시 담당자에게 이메일을 전송하는 기능이 구현되었다. 또한 기존 TLE 데이터 기반의 분석뿐 아니라 충돌분석에 특화된 CSM(conjunction summary message) 데이터도 처리할 수 있도록 개발되어 운영에 활용되기 시작하였다.

2010년 정지궤도위성인 천리안위성과 2012년 다목적실용위성 3호 위성이 성공적으로 발사됨에 따라 늘어난 위성들의 임무운영 안정성에 관심이 커져갔다. 이에 한국항공 우주연구원은 2010년부터 국가현안문제해결형(NAP, national agenda project) 협동연구과제인 “우주 파편 충돌위험 종합관리시스템 개발 및 우주파편 제거시스템 연구”를 수행하여 2013년 KARISMA 개발을 완료하였고, 2014년부터 정상운영하기 시작하였다[9]. KARISMA는 충돌위험을 분석하는 기본적 기능에 궤도결정 기능이나 충돌회피기동 수립계획을 추가하여 충돌위험 관리를 위한 업무들을 하나의 시스템에서 모두 수행할 수 있도록 개발되었다. 또한 Fig. 9와 같이 근접상황에 대한 이해를 증진시키는 시각화 기능도 강조하였다.

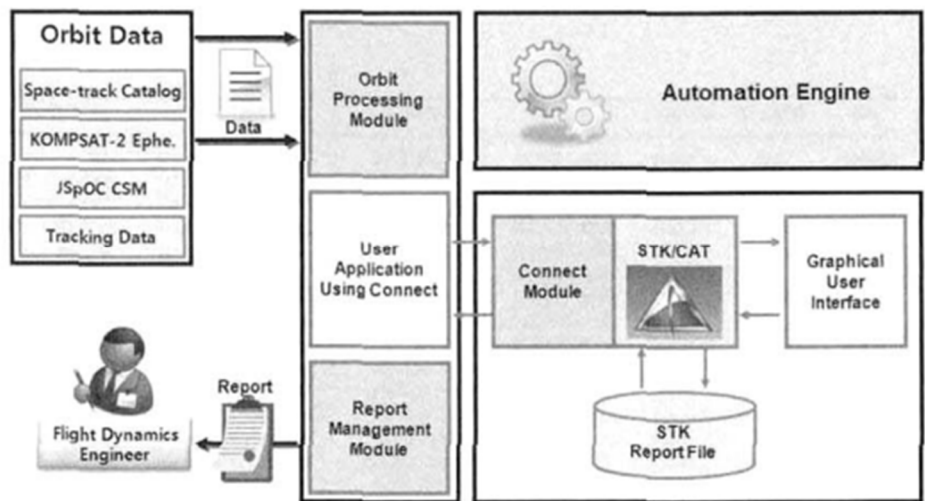


Fig. 8. ACAS system architecture [8]. ACAS, automated conjunction analysis system.

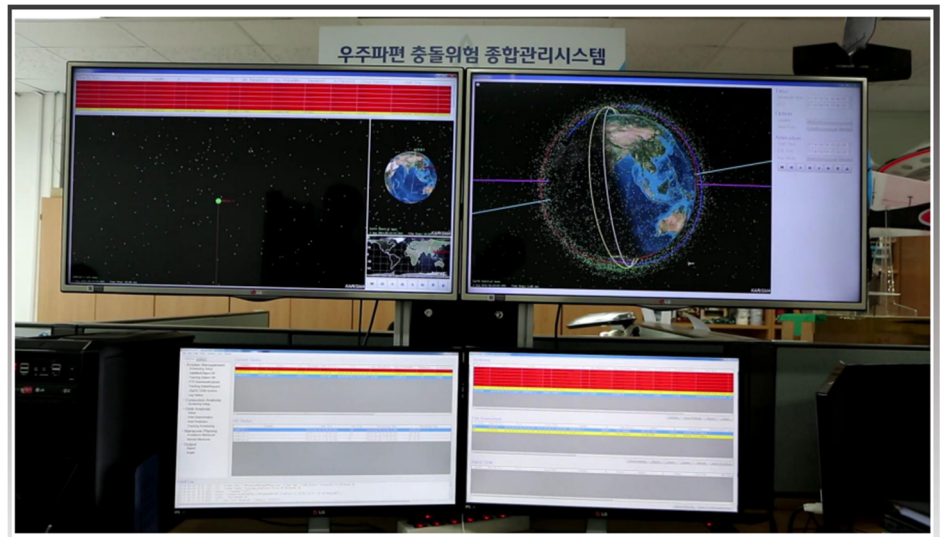


Fig. 9. KARISMA System in KARI. KARISMA, KARI space debris collision risk management system.

Fig. 10은 KARISMA 주요 모듈과 데이터 인터페이스를 나타낸다. SMM(system management module)은 외부기관과 데이터를 송수신하고, 각 모듈의 결과물들을 저장 및 관리하는 기능을 담당한다. CAM(conjunction assessment module)은 연합우주작전센터(CSpOC, Combined Space Operation Center, 과거명칭 JSpOC)로부터 획득한 TLE, CSM 데이터를 이용하여 운영위성과 충돌위험을 분석하고 결과를 나타내는 역할을 담당한다. 다수의 근접상황을 표 형태로 요약하여 수치적 정보를 나타내고, 사용자가 지정한 상황에 대한 3차원 근접상황 디스플레이 기능도 제공한다. 우주물체 추적이 가능한 레이더나 망원경이 가능한 경우, 획득한 추적데이터로부터 우주물체의 정밀한 궤도를 결정하는 ODM(orbit determination module)은 광학추적데이터, 레이더추적데이터, 위성 GPS 수신기 항행해 등의 관측데이터를 처리할 수 있으며, 처리된 궤도데이터는 CAM에 전달되어 상세분석에 활용된다. AMM(avoidance maneuver module)은 충돌회피기동 계획을 수립하는 기능으로 일반적으로 많이 사용하는 기동전략을 적용하거나 연료나 기동주기를 최적화하는 전략을 적용하여 충돌회피기동 계획을 수립할 수 있으며, 초기궤도 및 추력기 사용시 발생하는 오차를 고려한 몬테칼로 시뮬레이션 기능도 구현되었다[10].

Fig. 11의 CA-FAST은 KARISMA 개발경험을 바탕으로 업무의 자동화 비율 향상을 목표로 2016년 개발되었다[11]. KARISMA의 경우, 충돌위험 관리 전반에 대한 내용을 포괄하는 한편, CA-FAST의 경우 충돌위험 관리 실무담당자의 업무 흐름에 맞도록 개발되었다. 정의된 시간마다 CSpOC 데이터를 획득하여 데이터베이스에 저장하고 결과를 전시하는 주요 기능은 KARISMA와 유사하며, 정해진 기준을 만족할 경우 문자메시지를 운영자에게 발송하여 상황을 전파하는 기능과 근접상황 발생하거나 운영위성의 기동을 수행한 경우, 사전에 CSpOC에 공유하여 갱신된 충돌위험분석 결과를 제공받는 기능, 통계기능의 보완, 정지궤도 위성에 대한 모니터링 강화 등의 개선되었다. 뿐만 아니라 매일 작성하는 상세분석 보고서를 자동으로 작성해주는 기능도 추가되어 운영자의 업무 부담을 경감시켜주었다. CA-FAST는 이후 우주상황인식 및 위성운영 유관기관에도 전달되어 관련 업무에 활용되기도 하였다.

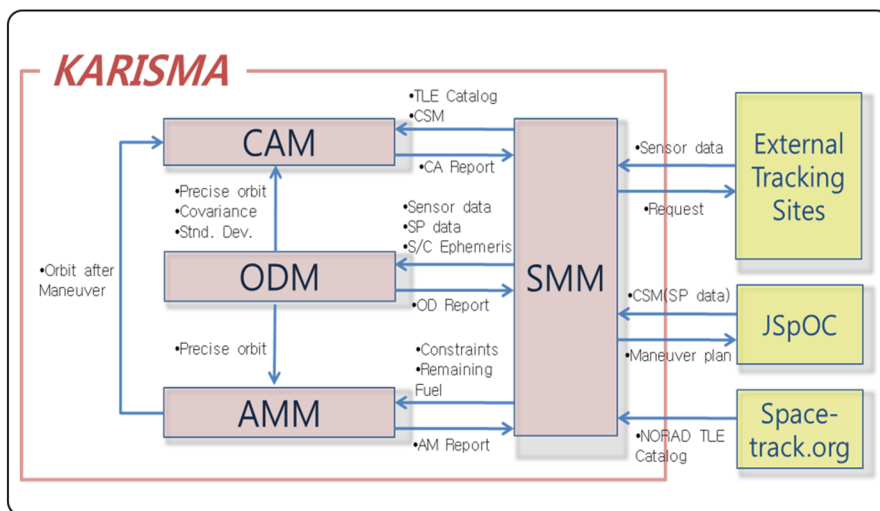


Fig. 10. KARISMA system architecture. CAM, conjunction assessment module; ODM, orbit determination module; AMM, avoidance maneuver module; SMM, system management module; TLE, two line element; CSM, command/service module; KARISMA, KARI space debris collision risk management system.

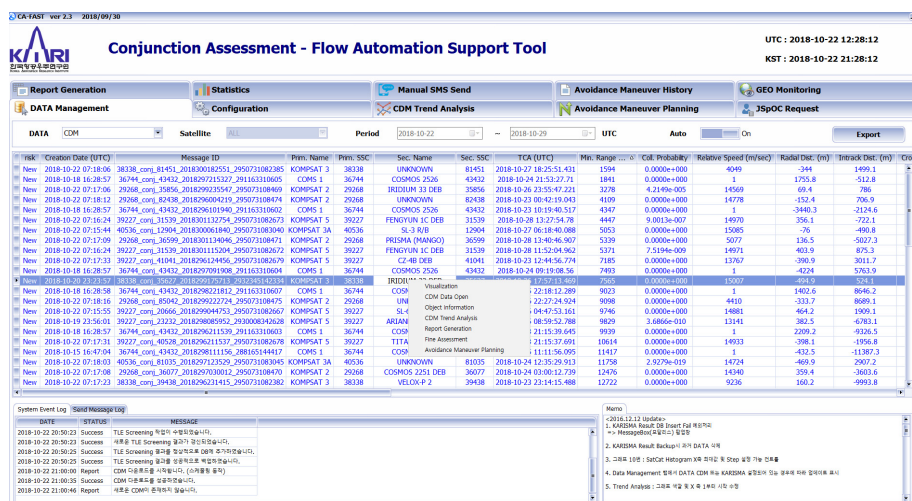


Fig. 11. CA-FAST main window. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.

우주교통관제의 중요성이 대두됨에 따라 여러 우주운영기관과의 인터페이스 보완의 필요성, 우주물체 및 운영위성의 급증에 따른 분석용량 확장의 필요성, 우주물체 분열과 같은 돌발적 우주상황에 대응하기 위한 목적으로 2022년 CA-FAST의 고도화 버전인 CA-FAST II가 Fig. 12와 같이 개발되어 지금까지 운영에 활용되고 있다(Fig. 13). CA-FAST II에 대한 추가 내용은 4장에서 소개하였다.

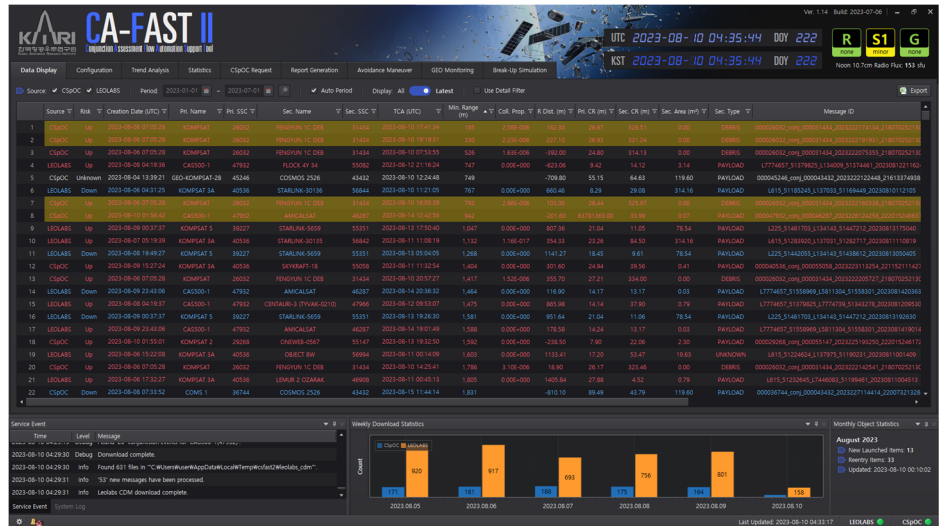


Fig. 12. CA-FAST II main window. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.

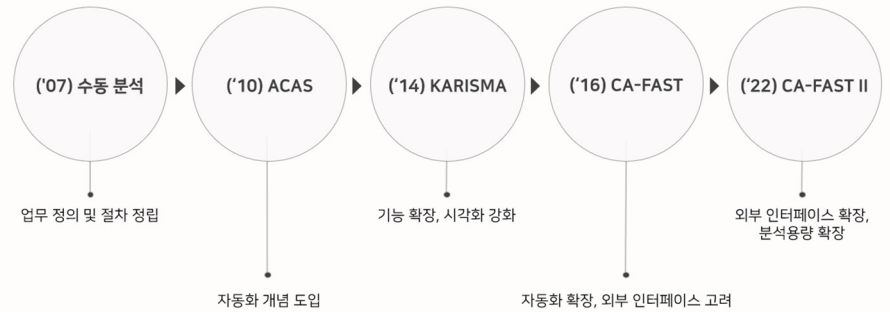


Fig. 13. Development history of conjunction assessment tool for KARI. ACAS, automated conjunction analysis system; KARISMA, KARI space debris collision risk management system; CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool; KARI, Korea Aerospace Research Institute.

4. 근접 우주물체 대응업무 자동화 지원 툴(CA-FAST II, Conjunction Assessment Flow Automation Support Tool-II)

한국항공우주연구원에서는 Fig. 14와 같이 운영위성에 근접하는 물체와 충돌위험을 관리하고 있다. CSpOC이나 LEOLABS로부터 CDM(근접데이터메시지, conjunction data message)를 수신하여 기준에 따라 관심단계, 주의단계, 경계 및 심각단계로 대응하고 있으며, 충돌회피 기동에 해당하는 주의단계는 지금까지 11회 있었고, 운영위성이 모두 기동능력이 있기 때문에 경계 혹은 심각단계 진입은 없었다.

CA-FAST II는 이상의 절차를 신속하고 효율적으로 수행하는데 초점을 맞추어 개발되었다. 2022년 1차 개발이 완료되어 운영을 시작하였으며, 2023년 신규기능 개발을 지속적으로

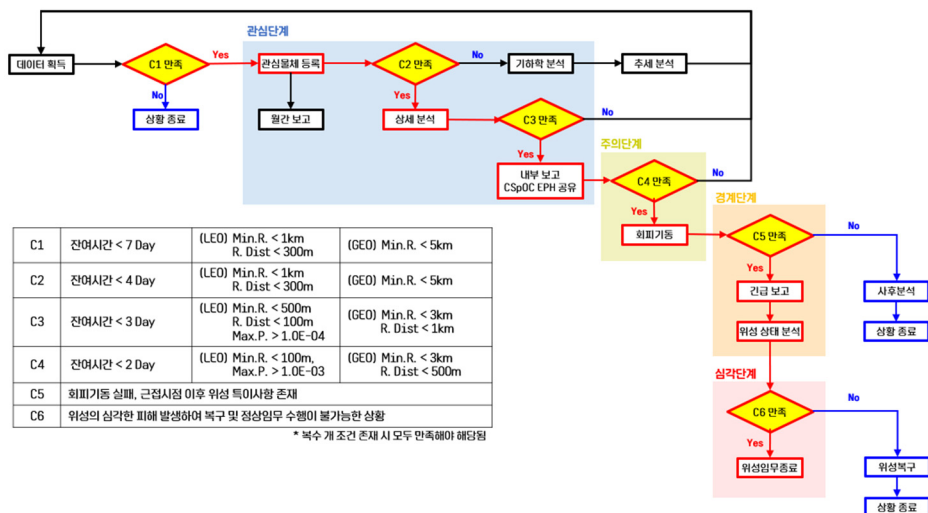


Fig. 14. KARI collision risk management process. KARI, Korea Aerospace Research Institute.

진행하고 있다. 시스템의 주요 기능은 아래와 같다.

- 우주상황인식 데이터 획득 및 관리 기능
- 충돌위험 시각화 및 상세분석 기능
- 외부기관 인터페이스 기능
- 통계분석 기능
- 충돌회피기동 계획 기능
- 우주물체분열 분석 기능

4.1 우주상황인식 데이터 획득 및 관리 기능

우주상황인식 데이터에는 우주기상정보, CSpOC에서 제공하는 TLE 데이터, CDM 데이터, LEOLABS에서 제공해주는 CDM 데이터가 있으며, 정해진 시간 간격에 따라 자동으로 데이터를 획득하고 SQL 데이터베이스에 저장하게 된다. 한 주간 수신한 데이터의 간단한 통계를 확인할 수 있도록 구현하였으며, Fig. 15와 같이 표 형태로 근접상황을 표시하여 각 필드의 조건을 적용하여 원하는 근접상황들만 확인할 수 있다. 2022년 1년 동안 획득한 CSpOC CDM과 LEOLABS CDM의 수는 약 10만 건 이상이며, 향후 운영위성 증가에 따라 2030년 이후에는 연간 100만 건 이상의 정보들이 획득되어 활용될 것으로 예측된다.

획득한 정보 중 Fig. 14의 “C1”의 조건을 만족하는 경우, Fig. 16과 같이 텔레그램 메시지를 관계자에서 전달하도록 구현되어 있으며, 메시지를 수신한 그룹에서는 즉각적으로 상황에 대해 논의하여 대응할 수 있다. 근접물체의 이름, 근접시점, 거리, 반경방향의 거리, 충돌확률, 반경방향에 대한 궤도불확실성에 대한 정보를 포함하며, 동일한 근접상황에 대해 여러 건의 CDM 데이터가 수신되기 때문에 근접거리에 대한 변화를 나타내도록 구현하였다. 이를 통해 24시간 모니터링 및 대응 체계를 유지할 수 있다.

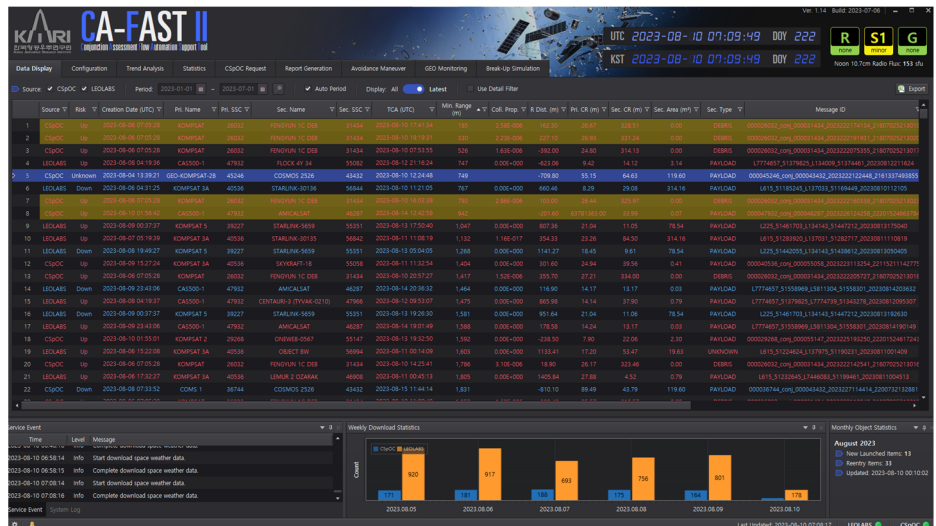


Fig. 15. CA-FAST II data display window. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.



Fig. 16. CA-FAST II event alarm function. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.

4.2 충돌위험 시각화 및 상세분석 기능

특정 이벤트에 대한 정보 확인을 위해 Fig. 17과 같이 2차원, 3차원 그래픽 디스플레이를 확인할 수 있다. CDM 데이터 내 포함된 운영위성과 근접물체의 궤도정보, 궤도정보에 대한 공분산 정보를 이용하여 궤도 및 궤도불확실성을 모사하였다.

그림에서 운영위성과 근접물체 주변에 녹색 및 적색으로 표현된 타원체가 궤도의 불확실성을 의미하는 것으로 타원체가 큰 경우 그만큼 궤도의 불확실성이 크다는 것을 의미한다. 이는 두 물체 간 충돌확률과도 연관된 수치이며, 직관적으로 불확실성에 대해 파악할 수 있다는 장

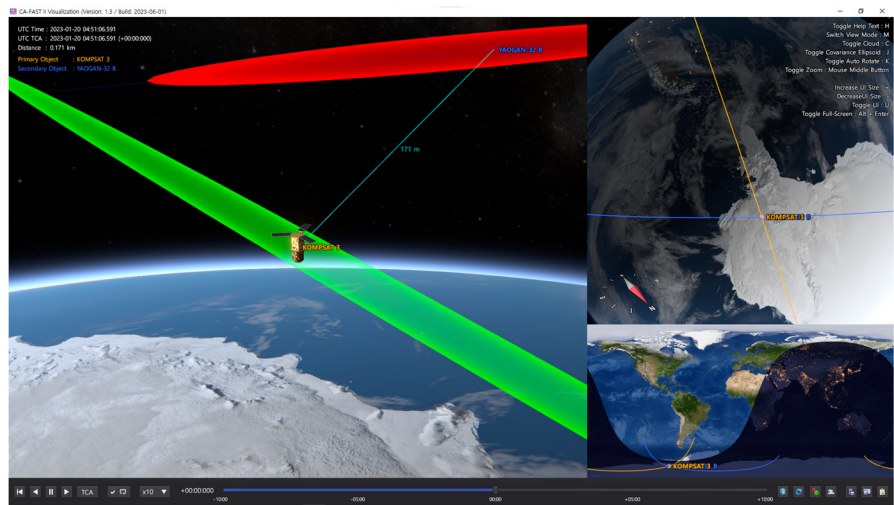


Fig. 17. CA-FAST II visualization window. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.

점이 있다. 시간에 따른 상대위치의 변화를 동영상 및 사진으로 저장할 수 있는 기능이 있고, 운영위성 중심으로 관점을 자유롭게 변경할 수 있도록 구현하였다. 해당 기능은 유니티 그래픽엔진을 이용하여 개발되었고, 현재 지속적으로 고도화 중이다.

CDM 데이터는 미래시점의 근접상황에 대한 정보를 포함하기에 궤도예측 과정이 필요하며, 궤도예측 기간이 길어질수록 그 오차는 커지는 특징이 있기 때문에 특정 근접상황에 대해 최초 CDM 배포 후 업데이트되는 관측데이터를 처리하여 CDM 데이터를 갱신하여 배포한다. 따라서 동일한 근접상황에 대한 CDM에 대한 추이를 살펴보면 데이터의 일관성과 신뢰성을 확인할 수 있다. Fig. 18은 추세분석 예시를 나타내는 것으로 다목적실용위성 5호와 PSLB DEB와의 근접상황에 대해 총 14개의 CDM 데이터가 생성되었으며, 갱신에 따른 근접거리, 반경방향거리, 충돌확률의 변화 추이를 확인할 수 있다. 데이터 갱신에 따라 해당 값들의 변화폭이 크다면 데이터의 일관성을 의심해볼 수 있다. Fig. 18의 경우, 1-6번 데이터에서 일관적인 경향을 볼 수 있고, 7-14번 데이터에서 일관적인 경향을 확인할 수 있다. 이 경우는 다목적실용위성 5호의 궤도조정이 7/11에 수행된 영향으로 데이터의 일관성 측면에서 양호하다고 할 수 있다.

시각화 기능과 추세분석을 통해 근접상황과 데이터 일관성에 대해 파악한 이후에는 운영위성의 정밀궤도정보를 이용하여 상세분석을 수행할 수 있다. CDM 데이터에 포함된 운영위성과 근접물체의 궤도정보 중 운영위성의 궤도정보의 경우, 위성을 직접 운영하는 운영국이 보유한 정보가 더 정밀하기 때문에 이로 대체하여 분석을 수행할 수 있다. 상세분석에는 근접물체에 대한 상세정보, CDM 갱신에 따른 근접거리, 반경방향거리, 충돌확률에 대한 추세 분석, CDM에 포함된 두 물체의 위치불확실성의 변화 추세 분석, 운영위성의 궤도를 운영국이 보유한 정밀궤도정보로 대체했을 때 충돌위험분석 등이 포함된다.

Fig. 19는 CA-FAST II를 이용하여 자동으로 생성된 상세분석보고서의 예시로 내부 관계자들에게 전달되어 충돌회피기동 수행여부에 대한 결정 등 상황전파 및 의사결정의 주요자료로 활용된다.

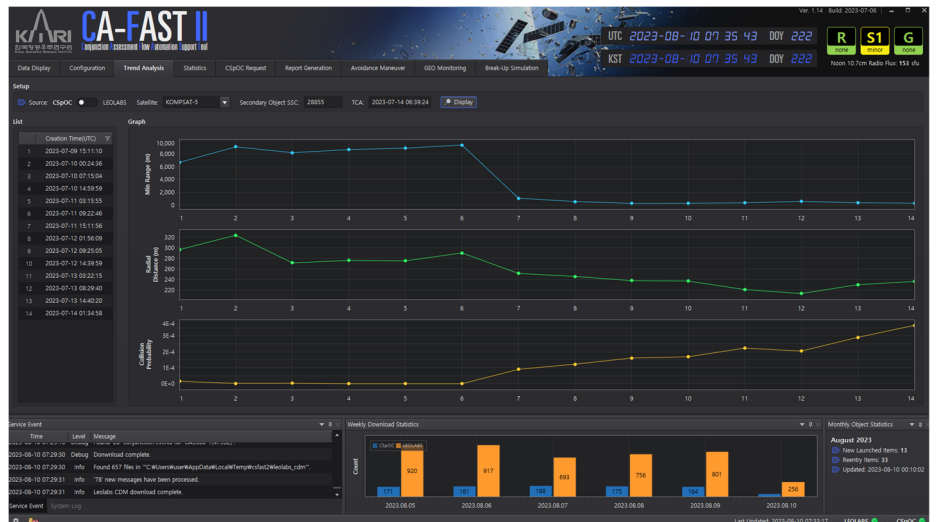


Fig. 18. CA-FAST II trend analysis window. CA-FAST, conjunction assessment flow automation support tool.

작성시간 : 2021-02-09 06:17:50 (UTC)

한국항공우주연구원 SSA연구소

우주물체 충돌예측 상세분석 결과

○ 개요

- 우주물체가 아리랑위성 3A호 (S/C ID : 40536)에 가까이 접근함
- 물체 종류 : OBJECT BY (Catalog ID : 47483)

소유국	TBD	발사일	2021-01-24
궤도 장반경 (km)	6907	원지점 고도 (km)	543.4
궤도경사각 (deg)	97.5	근지점 고도 (km)	529.5
궤도 주기 (min)	95.2	RCS (m)	Unknown

표 1 근접물체 정보

TCA (UTC)	2021-02-10 02:16:43	CDM Prop.	0
Time to TCA (Hr)	20.0	Max Prop.	7.9456e-05
Min. Range (m)	241	Chan's Prop.	2.766e-80
Radial Dist. (m)	234.5	Alfano's Prop.	4.2299e-80
In-track Dist. (m)	-30.9	Patera's Prop.	1.9413e-20
Cross-track Dist. (m)	-50.4	Non-linear Prop.	2.7347e-21
Relative Vel. (m/s)	13078		

표 2 충돌위험 분석 결과 (CDM Epoch: 2021-02-08 23:43:21)

Fig. 19. Fine assessment example for KOMPSAT-3A.

4.3 외부기관 인터페이스 기능

한국항공우주연구원에서는 운영위성들의 궤도정보를 CSpOC에 매일 정기적으로 업로드하고 있다. CSpOC은 전세계에 위치한 지상관측 인프라를 이용하여 우주물체를 식별하고 추적하고 있지만 사전에 예고되지 않은 궤도기동의 경우, 이를 식별하여 업데이트하는데 상대적

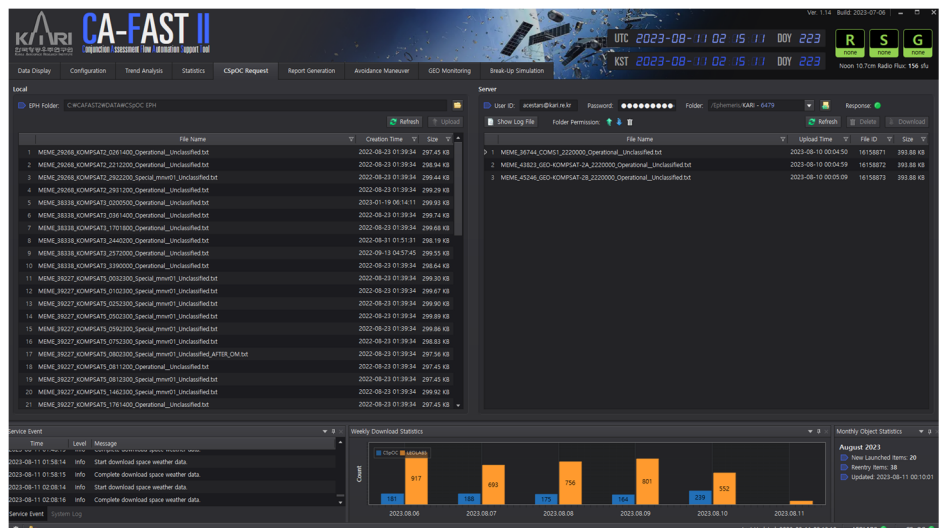


Fig. 20. CSpOC request window. CSpOC, Combined Space Operation Center.

으로 오랜 시간이 걸리는 문제가 있다. 위성을 운영하는 기관의 입장에서라도 기동 이후 달라지는 궤도에서 새로운 근접상황이 발생할 가능성이 존재하기에 궤도기동을 계획하는 경우, CSpOC에 기동에 대한 정보나 기동 후 예상궤도를 전달하여 운영의 안정성과 효율성을 추구하고 있다. 이미 CNES, ESA, IRIDIUM, OneWeb, SpaceX, Telesatm Planet 등의 운영기관에서는 매일 운영위성들의 궤도를 CSpOC에 업로드하고 있다.

Fig. 20은 CSpOC에 궤도데이터를 업로드하거나 다운로드할 수 있는 기능을 나타낸다. 왼쪽의 로컬 드라이브의 정보를 오른쪽 CSpOC 서버에 업로드하거나 반대로 CSpOC 서버에 공개된 다른 위성들의 정밀궤도데이터를 다운받아 분석에 활용할 수 있다. 그림에서 한국항공우주연구원이 운영하는 정지궤도 3기의 정밀궤도데이터가 업로드되어 있는 모습을 볼 수 있는데, 정지궤도위성의 경우 운영범위 내에 머무르기 위해 빈번하게 궤도기동을 수행하기 때문에 매일 CSpOC에 정밀궤도데이터를 자동으로 업로드하고 있다.

한편, CSpOC이나 LEOLABS처럼 운영위성에 근접하는 물체에 대한 정보를 획득하고 싶다면 독자적인 정밀추적인프라를 구축해야 한다. 국내에서 우주상황인식 용도로 운영되는 레이더시스템은 없지만 일부 기관에서 우주물체 추적용 광학망원경을 운영하고 있어, 현재 한국항공우주연구원에서는 관심단계의 우주물체가 식별되면 추적기관에 추적을 요청하고 있다. 추적된 우주물체의 궤도정보를 이용하여 상세분석에 활용할 수 있기 때문에 식별 즉시 추적 요청을 할 수 있도록 자동화 기능을 구현하여 운영 중이다. Fig. 21은 추적요청기능에 대한 사항으로 관심우주물체가 식별되면 표에 기록되며, 사전 협의된 요청양식으로 문서가 자동 생성되어 유관기관 담당자에게 메일을 통해 전달된다. 추적가능여부, 추적데이터가 있는 경우 이력 관리를 위해 결과를 해당 화면에서 기록하고 있다.

이는 향후 개발되어 운영될 국가 차원의 우주상황인식 인프라와의 인터페이스로도 연결될 수 있다. 추가적으로 추적이 실패한 경우에 대한 원인 분석 등 각종 통계 분석에 활용될 수 있다.

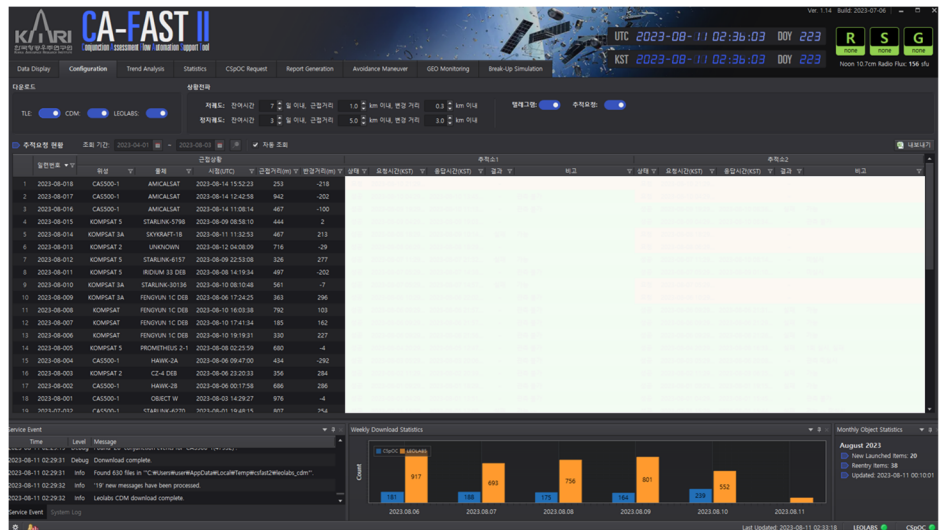


Fig. 21. Tracking request window.

4.4 통계분석 기능

특정 근접상황에 대한 상세분석뿐 아니라 장기적으로 축적된 충돌위험상황들의 정보를 이용하여 충돌위험상황의 추이를 이해할 수 있으며, 상승적으로 근접하는 물체를 식별하거나 충돌위험상황의 빈도가 높은 위성임무궤도를 파악하여 향후 위성개발에 활용하는 등 다양한 형태로 통계분석 결과를 이용할 수 있다. CA-FAST가 처음 운영되기 시작한 2016년부터 현재까지 약 7년간의 정보가 데이터베이스에 저장되어 있으며, 신규 콘텐츠에 대한 업데이트 및 마이그레이션을 지속적으로 수행하고 있다.

Fig. 22는 2023년 1월부터 8월까지 운영위성 별 근접상황 발생빈도를 나타내며, Fig. 23은 동일 기간 모든 운영위성에 대한 근접상황에서 상대 접근물체의 종류에 대한 비율을 나타낸다. 스타링크 대규모위성군의 영향에 따라 유사고도인 다목적실용위성 5호, 3A호와 차세대중형위성 1호의 근접상황 발생빈도가 두드러지게 높고, 스타링크나 원웹 등 운영 중인 군집위



Fig. 22. Statistics window – number of conjunction event w.r.t satellite.



Fig. 23. Statistics window – conjunction event ratio w.r.t operation status.

성공과의 근접빈도가 높기에 위성체를 의미하는 Payload의 비율이 70% 이상으로 나타나고 있다.

통계분석 기능에서는 근접거리에 대한 히스토그램, 연도별 위성별 근접이벤트 수, 근접물체 종류 별 근접이벤트 비율, 소유국에 대한 비율, 운영상태에 대한 비율, 고도별 우주물체 공간 밀도 분석 등을 분석할 수 있으며, 새로운 지표 분석 필요성에 따라 지속적으로 기능을 확장하고 있다.

4.5 충돌회피기동 계획 기능

특정 근접상황에 대해 상세분석 결과를 검토하여 근접시점으로부터 약 48시간 전에 충돌 회피기동 수행여부를 결정하고 있다. 충돌회피기동 수행이 결정되면 기동계획을 수립해야 하는데 충돌회피기동의 핵심요소는 언제, 어떤 방향으로 얼마만큼 추력을 사용할 것인지 결정하는 것이다. 충돌회피기동의 목표는 근접거리나 충돌확률 등의 충돌위험지표를 안전한 상태로 판단되는 수준까지 경감하는 것이다. 시간, 방향, 크기 조합에 따라 무수히 많은 충돌회피 기동 계획 수립이 가능하기에 한눈에 빠르게 충돌회피기동 계획을 결정하도록 기능이 구현되어야 한다.

Fig. 24는 충돌회피기동 시간과 추력기 사용시간, 방향에 따른 근접거리의 변화를 히트맵 형태로 구현한 결과이다. 특정 시간, 특정 방향으로 기동하는 경우 어두운 영역으로 표시되는 경우도 있고, 반대로 밝은 영역으로 표시되는 경우도 있다. 색깔이 어두울수록 두 물체 간 근접거리가 가까워지며, 이는 충돌위험이 높아짐을 의미하기에 충돌회피기동 목표기준을 만족할 수 있는 영역을 탐색하여 충돌회피기동 계획을 수립할 수 있다. 기동 수행 후 운영위성의 궤도를 모사할 수 있어야 하기에 위성의 물성치, 추력기 성능 등이 종합적으로 반영되어야 정상적인 충돌회피기동 계획을 수립할 수 있다. 해당 분석 결과를 CSpOC에 전달하고, 피드백 결과를 확인하여 최종적으로 위성명령 생성 및 업로드하여 기동을 수행하게 된다.

운영위성은 충돌회피기동 이후 계속 정상임무를 수행해야 하기 때문에 정상임무에 되도록 영향을 주지 않으면서 동시에 충돌회피기동 목표를 달성하는 최적의 계획수립이 중요하며,

5. 정리 및 향후계획

본 논문에서는 한국항공우주연구원의 우주물체 충돌위험 관리시스템 개발 및 운영현황에 대해 소개하였다. Table 1은 2020년부터 현재까지 한국항공우주연구원 운영위성에 대한 근접분석데이터 수, 근접이벤트 수, 관심단계 및 주의단계 진입 빈도를 나타내는 것으로 시간에 따라 수집되는 데이터의 수와 이벤트 숫자가 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다.

민간주도 우주개발 및 대규모 근접위성 운영 등의 요인으로 향후 우주물체의 개체수는 빠르게 증가할 것으로 예상되며, 우주물체를 추적하는 지상관측 인프라 기술발달에 따라 지금 보다 더 작은, 하지만 여전히 위협적인 우주물체 관측이 가능하여 앞으로 운영위성을 위협하는 식별가능한 우주물체의 수는 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다.

한국항공우주연구원은 2007년부터 본격적으로 운영위성을 안전하게 운영하기 위한 충돌위험 관리업무를 수행하였으며, 우주환경의 변화, 운영위성의 증가, 충돌위험 관리절차의 고도화에 따라 지속적으로 분석시스템을 고도화하고 있다.

향후 우주상황인식의 일부분으로써 충돌위험 관리 개념으로부터 우주자산의 안전하고 효율적인 운영을 보장하는 정책, 규정, 기술을 포괄하는 우주교통관제(STM, space traffic management) 차원의 활동으로 확장되어야 하며, 이를 위해 여러 위성운영국과의 데이터 공유 및 조정, 분석용량 확장, 자동화 기능의 확장, 상황전파체계 개선 등의 고도화가 지속적으로 수행될 예정이다.

Table 1. Recent statistics on conjunction assessments

	2020	2021	2022	2023. 07
Number of data	50,630	25,744	96,064	145,269
Number of events	8,300	4,585	12,877	22,153
Fine assessment	57	118	279	290
Collision avoidance	2	2	1	0

CSpOC data
distribution criteria
changed

Note - (information distribution only in high-risk situations)

LEOLABS information received

CSpOC, Combined Space Operation Center.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 위성임무관계사업(FR23H00)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Celestrak, SATCAT boxscore (2009) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://celestrak.com/satcat/boxscore.php>
2. Anz-Meador P, Opiela J, Liou JC, History of on-orbit satellite fragmentations, NASA Langley Research Center, NASA/TP-20220019160 (2023).
3. Haimerl JA, Fonder GP, Space fence system overview, Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technology Conference, Maui, HI, 15-18 Sep 2015.
4. Jung OCM, Trends in space situational awareness and space traffic control technology, *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 16, 45-55 (2022).
5. Celestrak, Title (2023) [Internet], viewed 2023 Jan 20, available from: <https://celestrak.org/pub/satcat.txt>
6. Kelso TS, Analysis of the iridium 33-cosmos 2251 collision, *Adv. Astronaut. Sci.* 135, 1099-1112 (2009).
7. Kelso TS, Analysis of the 2007 Chinese ASAT test and the impact of its debris on the space environment, Proceedings of the 8th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 12-15 Sep 2007.
8. Choi SJ, Jung IS, Chung DW, Current status of space debris and introduction of the KARI conjunction assessment process, *Current Ind. Technol. Trends Aerosp.* 9, 55-63 (2011).
9. Kim HD, Lee SC, Cho DH, Seong JD, Development of the KARI space debris collision risk management system (KARISMA), *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 19, 478-495 (2018). <https://doi.org/10.1007/s42405-018-0018-2>
10. Seong JD, Kim HD, Collision avoidance maneuvers for multiple threatening objects using heuristic algorithms, *Proc. Inst. Mech. Eng. G. J. Aerosp. Eng.* 229, 256-268 (2015). <https://doi.org/10.1177/0954410014530678>
11. Seong J, Jung O, Chung D, KARI recent activities on SSA & STM, Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 17-20 Sep 2019.

Author Information

성재등 acestars@kari.re.kr



과학기술연합대학원대학교에서 2016년 박사 학위를 취득한 후, 2016년부터 한국항공우주 연구원에서 위성운영 및 우주상황인식 업무를 수행하였으며, 현재는 국가위성정보활용지원 센터에서 우주비행역학, 우주상황인식, 국가 위성 통합운영시스템 등에 관련한 연구를 수

행하고 있다.

정유연 yejung@kari.re.kr



한국과학기술원에서 2016년 박사학위를 취득한 후, 2016년부터 한국과학기술원 박사후연구원으로 우주물체유도 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, 2017년부터 독일항공우주센터에서 박사후연구원으로 동 연구를 수행하였다. 2018년 한국과학기술원에서 연구교수로서 업무를 수행하였으며, 이후 2018년부터 현재까지 한국항공우주연구원 국가위성정보활용지원센터에서 우주비행역학, 우주상황인식 및 우주교통관제 등에 관한 연구를 수행하고 있다.

정옥철 ocjung@kari.re.kr



전북대학교 항공우주공학과에서 2005년 석사 학위를 취득한 후 한국전자통신연구원 위성관제기술연구팀에서 근무하였다. 2006년부터 현재까지 한국항공우주연구원 국가위성정보활용지원센터에서 우주상황인식 및 우주교통관제, 우주비행역학, 위성임무운영분석 등에 관

한 연구를 수행하고 있다.

송새한 songsaehan@kari.re.kr



한국과학기술원에서 2019년 석사학위를 취득한 후, 2019년부터 현재까지 한국항공우주연구원 국가위성정보활용지원센터에서 우주상황인식 및 우주교통관제, 영상처리 등에 관한 연구를 수행하고 있다.