

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.1.78>

아리랑 2호와 우주파편간의 충돌가능성 분석

정인식*, 최수진**, 정대원***

Statistical Conjunction Analysis between KOMPSAT-2 and Space Debris

In-Sik Jung*, Su-Jin Choi** and Dae-Won Chung***

ABSTRACT

Space debris is the collection of objects in orbit around the Earth that were created by humans but no longer serve any useful purpose. Since the beginning of spacecraft launch in 1957, the number of space debris has been increasing. According to USSTRATCOM, the number of space debris which were bigger than 10 cm is more than 15,000. Recently there were two critical events: One is that China shot down their satellite using missile and the other is that two satellite, United States's Iridium 33 and Russia's Cosmos 2251, collided with each other. Thanks to these events, Space environment in which KOMPSAT-2 operates has become severer. This paper presents the analysis of the number of space debris which are close to KOMPSAT-2 and the maximum conjunction probability via minimum range. Especially, this paper makes it possible to continuously monitor the space debris that is possible to hit KOMPSAT-2 through the identification and analysis.

초 록

우주파편이란 지구궤도에 있는 인간이 만든 물체 중 더 이상 유용한 목적으로 사용할 수 없는 물체를 말한다. 우주파편은 1957년 인류가 우주에 위성을 보내기 시작한 이후로 그 숫자가 증가하고 있으며, 현재 미 전략사령부(USSTRATCOM, United States Strategic Command)에 의하면 10cm 이상의 우주파편이 15,000개 이상이라고 알려지고 있다. 최근에는 중국이 자국의 위성을 미사일로 요격시킨 사건과 미국 Iridium 33 위성 및 러시아 Cosmos 2251 위성이 우주상공에서 서로 충돌한 사건이 발생함에 따라 아리랑 2호가 운영 중인 저궤도에서의 우주파편 환경이 나빠졌다. 본 논문에서는 우주파편이 아리랑 2호에 근접하는 회수 및 최소근접거리에 따른 최대충돌확률의 분포를 분석하였다. 특히 아리랑 2호와 충돌할 가능성이 있는 우주파편을 식별 및 분석하여 해당 우주파편을 지속적으로 감시할 수 있게 하였다.

Key Words : Space Debris(우주파편), USSTRATCOM(미국전략사령부), KOMPSAT-2(아리랑 2호), Conjunction Analysis(충돌분석), Automated Conjunction Analysis System(우주파편 충돌분석 자동화 시스템)

† 2011년 9월 26일 접수 ~ 2011년 12월 8일 심사완료

* 정회원, 과학기술연합대학원대학교

** 정회원, 한국항공우주연구원 저궤도위성관제팀

*** 정회원, 한국항공우주연구원 저궤도위성관제팀

교신저자, dwchung@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 115

1. 서 론

우주파편이란 인류에 의해 발생된 물체로 임무 관련(Mission-related) 파편, 운영 중인 위성, 로켓 몸체(Rocket bodies), 임무 종료 위성, 폭발

로 인해 발생한 잔재파편(Fragmentations) 등으로 구성된다. 미국전략사령부(USSTRATCOM, United States Strategic Command)에 의하면 10cm 이상의 크기를 갖는 우주파편이 2011년 현재 15,000개 이상으로 알려지고 있으며 그 숫자는 그림 1과 같이 시간이 갈수록 증가하고 있다 [1]. 불행하게도 2007년 중국이 미사일로 자국의 위성을 요격한 위성요격시험으로 인하여 아리랑 2호가 운영 중인 궤도에 2,500여개 이상의 우주파편이 발생했으며, 2009년 사상 첫 번째로 발생된 위성 간의 충돌로 인하여 1,500여개가 넘는 우주파편이 추가로 발생하여 아리랑 2호와 우주파편간의 충돌 위험성이 증가되고 있다.

이러한 우주파편과 운영위성과의 충돌 가능성은 위성을 운영하는데 있어서 큰 위협중의 하나로 인식되고 있다. 이에 따라 우주개발 선진국에서는 이러한 우주파편과 자국의 운영위성과의 충돌 가능성을 분석하고 필요 시 우주파편과의 충돌을 회피하기 위한 시스템을 개발할 뿐만 아니라 합리적인 절차를 마련하여 임무를 수행하고 있다. 예를 들어 미항공우주국(NASA)은 'Robotic Conjunction Assessment Process'[2], 유럽우주기구(ESA)는 'Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis Tool'[3], 프랑스국립우주연구소(CNES)는 'Contingency Operational Procedure for Collision Risk Management'[4], 일본우주항공연구개발기구(JAXA)는 'JAXA's Conjunction Assessment Procedure'[5]를 운영함으로써 자국의 위성이 우주파편과 충돌하지 않도록 업무를 수행하고 있다.

이에 따라 한국항공우주연구원 저궤도위성관제팀에서는 아리랑 2호와 우주파편간의 충돌분석을 수행하기 위해 '우주파편 충돌분석 자동화 시스템'을 개발하여 매일 아리랑 2호의 안정성을 모니터링하고 있다.

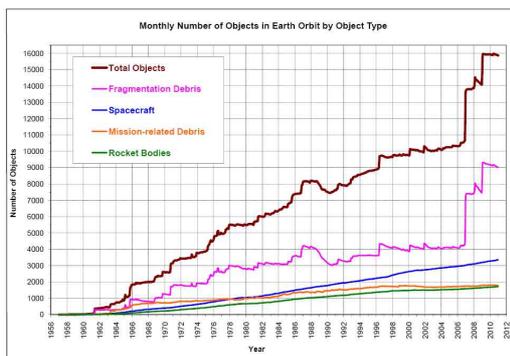


그림 1. 지구궤도에 존재하는 우주파편의 월별 개수 현황

II. 우주파편 충돌분석 자동화 시스템(ACAS)

2.1 우주파편 충돌분석 자동화 시스템 개요

우주파편 충돌분석 자동화 시스템(Automated Conjunction Analysis System, 이하 ACAS)은 아리랑 위성과 우주파편간의 충돌분석을 자동으로 수행하기위해 항우연이 개발한 응용 프로그램이다. ACAS는 매일 특정 웹사이트에 접속하여 하루에 2번씩 미전략사령부에서 제공하는 최신의 궤도정보를 획득하여 충돌분석을 자동으로 수행하며 충돌분석 수행 결과, 기준턱(Threshold)이내의 결과를 갖는 우주파편이 존재할 경우 비행역학 엔지니어에게 관련 정보를 E-mail로 전송하는 역할을 수행한다.

2.2 ACAS 구성도

ACAS는 그림 2에 나타난 바와 같이 궤도 처리 모듈(Orbit Processing Module), 접속 모듈(Connect Module), STK/CAT(Satellite Tool Kit/Conjunction Analysis Tool)[6], 보고서 관리 모듈(Report Management Module)로 구성된다.

궤도 처리 모듈은 미전략사령부에서 제공하는 궤도정보, 아리랑 2호 정밀궤도, JSPOC(Joint Space Operation Center)에서 제공하는 충돌요약 메시지(Conjunction Summary Message) 및 지상안테나 추적 데이터 등을 매일 정해진 시간에 획득하고 획득한 데이터를 STK/CAT에서 요구하는 형태로 가공하는 역할을 한다. 접속 모듈은 ACAS GUI(Graphical User Interface)를 이용하여 충돌분석 기간, 충돌분석을 수행할 시각, 근접거리 및 충돌확률의 기준치를 설정하며, 이러한 파라미터를 상용 프로그램인 STK/CAT에 전달하여 충돌분석을 수행 및 충돌분석 결과를 생성하는 역할을 한다. STK는 궤도분석을 수행하기

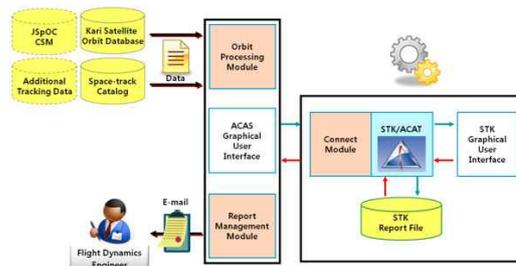


그림 2. 우주파편 충돌분석 자동화시스템 구성도

위한 상용 소프트웨어로 충돌분석을 수행하는데 사용된다. 보고서 관리 모듈은 매일 수행되는 충돌결과를 처리하여 우주파편과 위성간의 근접거리 및 확률의 경향성을 판단할 수 있도록 한다. 비행역학 엔지니어는 충돌분석 결과를 E-mail로 수신하여 우주파편이 아리랑 2호에 위협적으로 작용할 경우 주어진 절차에 의해 회피기동을 계획하며 필요시 회피기동을 수행한다.

III. 우주파편 충돌 분석

3.1 우주파편 충돌분석 수행 내용

- 충돌분석 수행 기간
 - 2010년 8월 ~ 2011년 7월(총 12개월)
 - 매일 해당일로부터 향후 7일간의 충돌분석 수행
- 충돌분석 수행 대상
 - 지구궤도에 존재하는 10cm 이상의 우주물체
- 궤도
 - 아리랑 2호 : 위성으로부터 수신한 GPS 항법데이터를 처리한 정밀궤도 데이터
 - 우주파편 : 미전력사령부의 궤도정보
- 우주파편 근접거리 기준치 : 5km

3.2 충돌분석결과 파라미터

충돌분석을 수행하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 최소근접시간(TCA, Time of Closest Approach)
 - 아리랑 2호와 우주파편의 궤도를 질점으로 가정했을 경우 두 물체의 거리가 최소화되는 시각을 나타낸다.
- 근접거리(Minimum Distance, D)
 - 아리랑 2호와 우주파편의 궤도를 질점으로 가정했을 경우 두 물체의 최소거리를 나타낸다.
- 충돌확률(Collision Probability, Pc)
 - 아리랑 2호와 우주파편의 궤도오차 공분산 및 각 물체의 거리에 대한 정보를 제공할 경우 두 물체사이의 최대 충돌확률을 나타낸다.
- 상대속도(Relative Velocity)
 - 아리랑 2호와 우주파편의 상대속도를 나타낸다.
- 접근각도(Approach Angle)
 - 아리랑 2호의 비행방향을 기준으로 했을 때 우주파편이 접근하는 각도를 나타낸다.

3.3 개수 분석

그림 3은 2010년 8월부터 2011년 4월까지 미

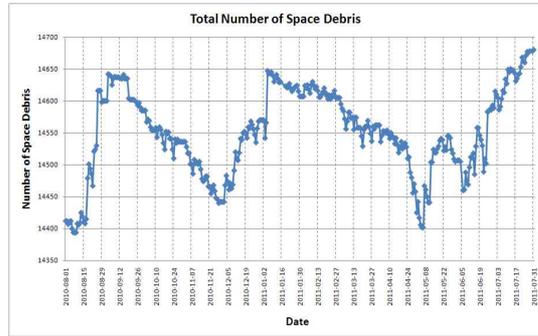


그림 3. USSTRATCOM Catalog의 날짜별 총 개수

전력사령부에서 제공하는 궤도정보에 기록된 우주파편의 총 개수를 날짜별로 보여주고 있다. 10cm 이상의 우주파편은 15,000개 이상으로 알려지고 있지만 미국의 군사위성, 행성간의 위성 및 궤도결정을 수행한지 30일 이상 지난 파편들은 제외되어 매일 평균적으로 14,500개 정도의 우주파편 궤도정보를 가지고 아리랑 2호와 충돌분석을 수행하였다.

3.4 접근 횟수 분석

그림 4에서 나타난 바와 같이 우주파편이 매일 아리랑 2호에 5km 이내로 접근하는 횟수는 적게는 약 350회이며 많게는 700회 이상이고, 월 평균 약 460회이다. 이를 하루 평균으로 환산하면 약 15회이다. 계절적 또는 월별 격차가 크고 변화량도 일정하지 않아 특별한 주기성을 발견할 수 없었다.

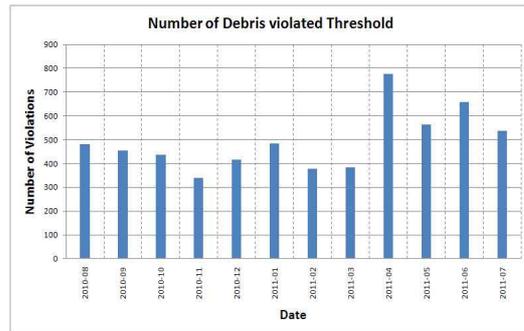


그림 4. 우주파편이 5km 이내에 접근한 월별 횟수

3.5 최대충돌확률 분포

그림 5는 5km 이내에 접근한 우주파편의 근접 거리에 따른 확률 분포를 나타낸다. STK/CAT에서 최대충돌확률 계산을 위해 Alfano's Method를 사용하며, 계산식은 다음과 같다[7].

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x\sigma_y} \int_{-OBJ}^{OBJ} \int_{-\sqrt{OBJ^2-x^2}}^{\sqrt{OBJ^2-x^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x+ym}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y+ym}{\sigma_y}\right)^2\right]\right] dy dx$$

위 계산식에서 σ_x, σ_y 는 두 물체의 결합 공분산 (Covariance), xm, ym 은 최소접근거리, OBJ는 두 물체 단면적의 결합 반지름을 의미한다.

결합 공분산은 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 Primary, Secondary의 공분산을 다음과 같이 정의하고,

$$C_p = \begin{bmatrix} a_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & b_p^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_p^2 \end{bmatrix}, \quad C_s = \begin{bmatrix} a_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & b_s^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_s^2 \end{bmatrix}$$

우주파편 좌표계에서 위성 좌표계로의 변환 행렬을 T_{ps} , 위성 좌표계에서 공통 좌표계로의 변환 행렬을 T 로 하면 결합 공분산 행렬은

$$C = T^T(C_p + T_{ps}^T C_s T_{ps}) T = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 & \rho_{yz}\sigma_y\sigma_z \\ \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z & \rho_{yz}\sigma_y\sigma_z & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

$$T_{ps} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 3차원 확률 밀도 함수에서 Y축에 대한 적분을 무한히 긴 직선으로 가정하면 이를 2차원 확률 밀도 함수로 간략화할 수 있다. 이때 결합 공분산을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z \\ \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

이를 계산의 편의상 좌표축을 회전하여 C' 을 얻게 된다.

$$C' = \begin{bmatrix} \sigma_x'^2 & 0 \\ 0 & \sigma_z'^2 \end{bmatrix}$$

Alfano's Method에서는 편의상 σ_x' 을 σ_x 로, σ_z' 을 σ_y 로 사용하였다.

이번 연구에서는 아리랑 2호 위성의 공분산 (x, y, z)값을 (30, 10, 10)m로, 우주파편의 공분산 (x, y, z)값을 (300, 100, 100)m로 고정하여 사용하였다. STK/CAT에 물체의 크기가 입력 되어있지 않은 물체의 반지름은 10m로 설정하였다. 위와 같은 수치는 TLE set이 내포하고 있는 궤도 불확실성을 고려하여 설정하였다. 최소접근거리 xm, ym 이 변수로 포함되어 있고 해당 항이 지수함수 안에서 (-)의 부호를 가지기 때문에 근접거리가 작아질수록 최대 충돌확률은 증가하게 된다. 통계적으로 나타난 바에 의하여도 근접거리가 가까워질수록 최대 충돌확률은 급격히 증가함을 보여준다.

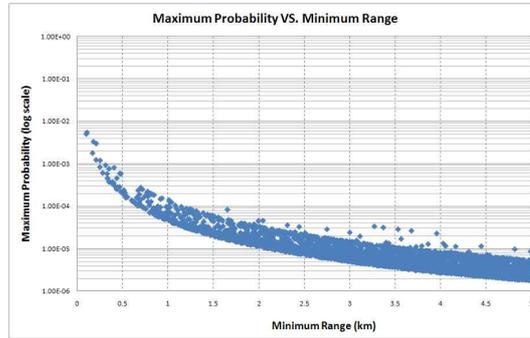


그림 5. 5km이내에 접근한 우주파편의 근접 거리에 따른 최대충돌 확률 분포

하지만 같은 근접거리임에도 불구하고 최대 확률은 최소치에서 최대치까지 약 10배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 그 이유는 잔재파편들의 경우, 반경이 1m로 일정하다고 가정하여 충돌분석을 수행하였지만, 로켓 몸체, 운영 중인 위성, 임무 종료 위성 등에 해당하는 약 3,700 여개의 우주물체는 실제 반경이 제공되므로 충돌확률 계산 시 하나의 변수 (OBJ)로 이를 반영하기 때문에 차이가 발생한다.

3.6 우주파편의 궤도 분포 분석

그림 6은 5km 이내에 접근한 우주파편의 궤도 분포를 이심률에 따른 경사각 및 원지점에 따른 근지점 고도로 분류하여 보여준다. 이심률에 따른 경사각의 경우, 경사각은 95~105°사이에서, 이심률은 거의 0.05 이내에 대부분 분포됨을 확인할 수 있었다. 원지점에 따른 근지점 고도의 경우, 근지점 고도는 700km 이하, 원지점 고도는 650km 이상인 우주파편들만 아리랑 2호에 가까이 접근함을 보여준다. 그 이유는 아리랑 2호의 근지점 및 원지점 고도가 평균적으로 685km 부근에 위치하기 때문이다. 또한 아리랑 2호의 경사각이 98°이기 때문에 같은 경사각을 갖는 우주파편들이 5km이내에 더 많이 접근함을 알 수 있었다. 종합적으로 분석해본 결과 아리랑 2호의 궤도와 유사한 궤도를 갖는 우주파편이 더 자주 아리랑 2호에 위협적이라고 판단된다.

또한 분석결과를 통해 우주파편의 Satellite Number 및 명칭을 알 수 있기에 어떤 우주파편이 어떠한 궤도요소를 가지고 아리랑 2호 위성에 위협을 주는 지 판단할 수 있으며, 해당 우주파편을 지속적으로 감시할 수 있다.

3.7 접근각도 분포

접근각도는 그림 7에 나타난 바와 같이 아리랑 2호의 비행방향과 우주파편의 비행방향 사이의 각도

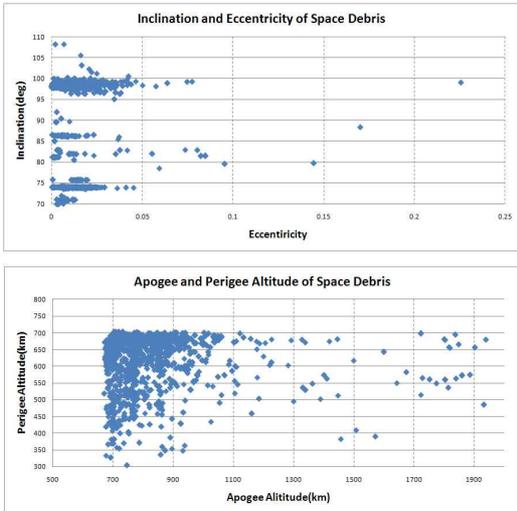


그림 6. 5km 이내에 근접한 우주파편의 궤도 분포

를 의미하며 그 범위는 0~180°이다. 두 물체의 속도 벡터에 대한 내적을 통하여 접근각도를 계산하게 된다. 계산된 접근각도가 0°이면 두 물체는 서로 나란히 비행함을 의미하고 해당 고도에서는 두 물체의 비행속도가 거의 비슷하기 때문에 상대속도가 0에 가깝다. 반대로 접근각도가 180°이면 두 물체는 마주 보며 다가오기 때문에 상대속도는 두 물체의 비행속도의 합이 된다.

그림 8은 아리랑 2호로 접근하는 우주파편의 접근각도 분포를 나타낸다. 분석된 결과에 따르면 접근각도가 140°이상인 우주파편이 차지하는 비율이 매우 높음을 알 수 있다. 아리랑 2호의 비행 속도는 약 7.5km/s이고 접근각도가 140° 이상이면 상대속도는 14km/s 이상이므로 아리랑 2호로 접근하는 우주파편 중 상당수는 14km 이상의 상대속도를 가지고 접근한다. 상대속도가 크면 충돌 시 작은 우주파편이라도 위성에 심각한 파손을 야기할 수 있기 때문에 아리랑 2호 위성은 항상 우주파편과의 충돌 가

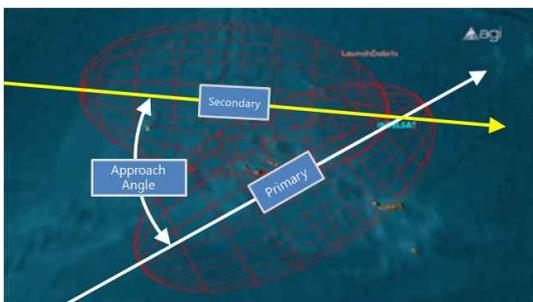


그림 7. 아리랑 2호와 우주파편간의 접근 각도 개념

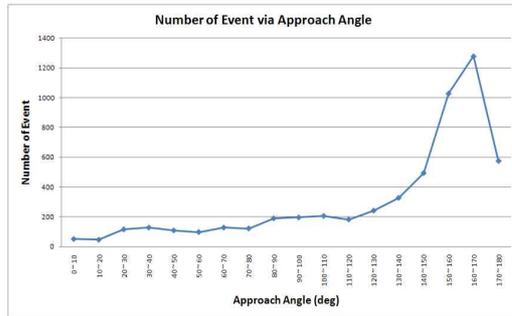


그림 8. 5km 이내에 근접한 우주파편의 접근 각도에 따른 분포

능성을 보다 주의 깊게 감시하여야 한다.

3.8 TCA시 아리랑 2호의 위치

그림 9는 아리랑 2호와 각각의 우주파편이 가장 가까이 접근하는 지점의 시간인, TCA(Time of Closest Approach)에서 아리랑 2호의 위치를 위도 별로 분류한 결과이다.

이에 따르면 아리랑 2호와 우주파편이 접근하는 위치는 각 위도 구간별로 평균 180회 정도로 고르게 분포 되어 있지만, 특이하게도 위도 ±70~80°구간에서만 다른 구간보다 2배정도 많이 접근함을 알 수 있다. 이러한 결과는 아리랑 2호에 접근하는 우주파편의 상당수가 아리랑 2호의 궤도특성(이심률이 작고 경사각이 98°인 극궤도)과 유사하여, 두 궤도가 교차하는 부분이 극지방이기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

3.9 우주파편의 종류별 비율

그림 10에서는 5km 이내로 아리랑 2호에 접근한 우주파편이 차지하는 종류별 비율을 보여준다. 예상했던 바와 같이 중국의 위성 요격실험으로 발생한 파편군 및 COSMOS 2251의 파편군이 아리랑 2호에 가장 많이 접근함을 알 수 있었고, 그 뒤로 CZ-4 파

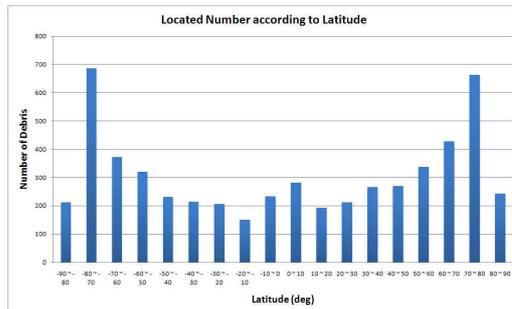


그림 9. 위도별 근접 횟수

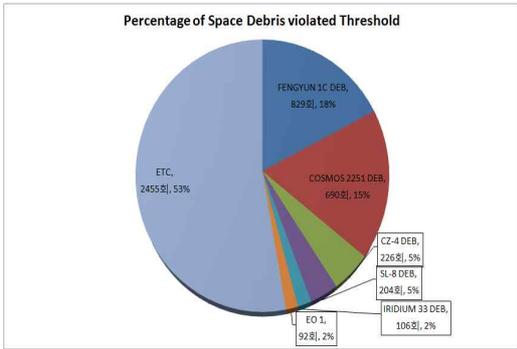


그림 10. 5km이내에 접근한 우주파편의 종류별 비율

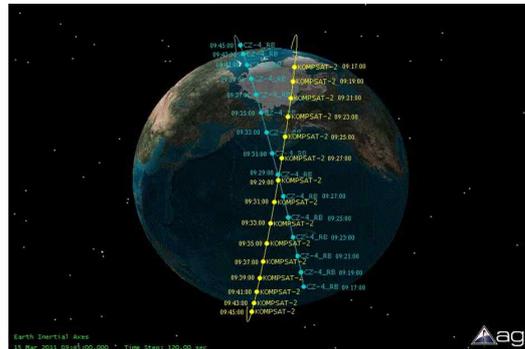


그림 11. 아리랑2호와 CZ-4의 시간에 따른 궤적

편군, SL-8 파편군, IRIDIUM 33 파편군 순으로 접근 횟수가 많았다.

특이한 점은 EO-1 위성은 파편군이 아닌 단일 위성으로는 아리랑 2호와 근접한 횟수가 상당히 많았는데, 그 이유는 EO-1의 궤도요소가 아리랑 2호와 상당히 유사하기 때문인 것으로 확인되었다. 하지만 이는 단기간에 나타난 현상으로 궤도요소가 유사하다고 하여 항상 위협적이라고 볼 수는 없다고 판단된다.

IV. 우주파편이 위성에 근접한 사례

다음은 충돌분석을 수행하는 도중 우주파편이 아리랑 2호에 근접한 사례를 기술하도록 하겠다. 2011년 3월 8일에 5km 이내로 접근한 우주파편이 관측되었다. 이 우주파편의 명칭은 CZ-4 R/B로 아리랑 2호와 상당히 유사한 궤도요소를 가지고 있었다. 보통 5km 이내에 접근하는 우주파편들이라도 충돌 확률이 상당히 낮기 때문에 시간을 두고 새로 갱신된 궤도데이터를 이용하여 근접거리 및 충돌 확률의 경향성을 관측한다. 아리랑 2호에 근접하는 우주파편들의 근접거리를 관측하던 도중 2011년 3월 10일에는 해당 우주파편이 아리랑 2호에 300 m 이내로 접근하는 것을 확인하였다. ACAS의 분석결과로 충돌 확률은 $8.36e-4$ 이었고, 충돌 회피기동 기준에 근접한 수준이었다.

궤도 분석 틀을 이용하여 두 물체의 궤적을 확인 해본 결과 그림 11과 같이 CZ-4 R/B는 푸른색으로 표시된 하향(descending) 패스이며, 아리랑 2호는 노란색으로 표시된 상향(ascending) 패스이다. 두 물체는 태평양 상공 북위 45° 부근에서 가장 가까이 접근함을 알 수 있었다.

표 1에 아리랑 2호 및 CZ-4 R/B의 궤도정보를 정리하였다. 두 물체는 궤도요소 중 이심률, 장반경 및

표 1. 아리랑2호 및 CZ-4R/B의 궤도정보

항목	궤도정보	
Conjunction epoch (UTC)	2011-Mar-15 9:28:45	
SSC ID	32063 (CZ-4 R/B)	29268 (KOMPSAT-2)
Semi-major axis [km]	7106.78	7066.96
Eccentricity	0.0057293	0.0015123
Inclination [deg]	98.2923	98.3192
RAAN [deg]	154.5828	318.9755
Argument of perigee [deg]	2.6155	340.5964
Mean anomaly [deg]	357.5326	19.4655

경사각 등이 거의 일치하며, 승교점 적경이 160° 이상 차이가 났다.

아리랑 2호와 CZ-4 R/B의 최소근접거리가 5km 이내로 접근한다는 충돌분석결과는 2011년 3월 8일에 최초로 확인 되었고, 최소근접거리의 시점은 2011년 3월 15일 09시 28분 45초였다. 향후 매일 갱신되는 궤도 데이터를 이용하여 두 물체 간 근접거리 및 충돌확률의 경향성을 모니터링 하였다.

그림 12에 분석날짜에 따른 근접거리 및 충돌확률의 경향성을 정리하였다. 2011년 3월 10일의 분석 결과, 최소근접거리가 300m 이내로 가장 작게 나왔다. 그리고 분석시점이 TCA인 2011년 3월 15일에 가까워질수록 근접거리는 점차 멀어져서 하루 전인 2011년 3월 14일에는 2.5km 이상으로 분석되었다. 최종적으로 근접거리 및 충돌확률의 결과 값이 회피기동을 수행하기 위한 기준치 이내에 들지 않으므로 회피기동은 수행하지 않았다.

충돌분석 정확도에 영향을 미치는 요소는 궤도전파기 오차, 충돌분석 확률 계산식의 부정확성에 의한 오차, 관측시의 오차, 그리고 지구중력, 태양활동 공기저항 모델링에 의한 오차 등이 있다[8]. 위 사례의 경우에는 아리랑 위성의 궤도요소는 매일 최신의

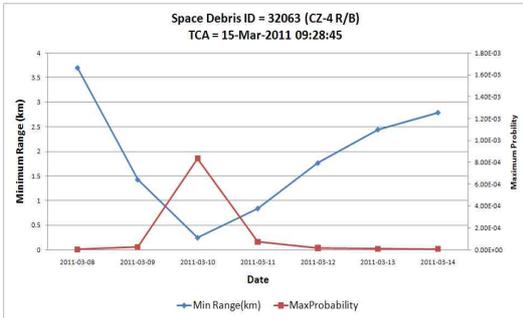


그림 12. 아리랑2호와 CZ-4의 근접거리 및 확률경향분석결과

것으로 업데이트 되는 오차가 수m 정도 되는 정밀한 데이터를 사용하였고, 우주파편인 CZ-4 R/B의 궤도요소는 업데이트 되지 않는 경우도 있고 1 km 정도의 오차를 가진 데이터를 사용하였다. 사용하는 궤도데이터가 매일 다른 오차를 포함하기 때문에 매일의 충돌분석 결과가 다르다. 충돌분석을 수행함에 있어서 초기에 높은 정확도를 가진 우주파편의 궤도 데이터를 얻는 것이 중요함을 확인할 수 있다.

V. 결론 향후과제

향우연에서는 운영 중인 아리랑 2호와 우주파편 간의 충돌 가능성을 분석하기 위해 충돌분석 자동화 시스템을 개발하여 매일 충돌분석을 수행하고 있다. 이 시스템은 사람이 매일 수행해야 하는 일련의 과정을 자동화하여 운영자의 실수를 방지하고 충돌분석결과와 신뢰성을 증진하는데 기여하고 있다.

2010년 8월부터 2011년 7월까지 충돌분석 시스템을 이용하여 충돌분석을 수행한 결과 우주파편이 아리랑 2호에 5km 이내로 접근한 횟수가 총 5,500여회로 하루에 15여개의 우주파편이 아리랑 2호에 근접함을 알 수 있었다. 충돌분석결과 근접거리가 가까울수록 충돌확률은 높아지지만 우주파편의 반경에 따라 같은 근접거리를 갖는다 하여도 충돌확률은 차이가 있었다. 아리랑 2호에 근접하는 우주파편의 궤도요소를 분석한 결과 아리랑 2호와 경사각 및 이심률이 비슷한 궤도요소를 갖는 우주파편이 더 많이 근접함을 알 수 있었고, 특징적으로 근지점 고도가 700km이하, 원지점 고도 650km 이상인 우주파편들만이 아리랑 2호에 접근함을 확인하였다. TCA에서 아리랑 2호는 위도 $\pm 70\sim 80^\circ$ 사이인 극지방에 상대적으로 많이 위치함을 확인하였으며, 이는 아리랑 2호에 접근하는 우주파편의 상당수가 아리랑 2호의 궤도특성과 비슷하기 때문이었다. 접근각도에 따른 분포에 의하면, 2/3 이상의 우주파편이 140° 이상의

접근각도를 가짐을 확인하였다. 우주파편의 접근각도가 크기 때문에 높은 속도로 아리랑 2호 위성을 위협하고 있어 충돌 시 많은 피해를 줄 것이라 판단된다. 위성에 근접한 우주파편의 종류별 비율로 봤을 경우 Fengyun-1C 및 Cosmos 2251 우주파편군이 30% 이상 차지하였으며, CZ-4, SL-8 및 Iridium 33의 파편군 순으로 접근횟수가 많아 주로 잔재파편들이 아리랑 2호 위성을 위협하고 있었다.

2011년 3월 15일에 아리랑 2호와 CZ-4 R/B가 300m 이내로 접근하는 것으로 5일전에 예측되었으나, 분석시점이 TCA에 가까워지면서 새로이 갱신된 궤도를 이용하여 분석한 결과 두 물체의 근접거리는 점차 멀어지고, 충돌확률도 점차 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이는 우주파편에 대해 추가적으로 정밀한 궤도결정을 할 수 있는 수단의 필요성을 보여주고 있다.

향후에는 충돌분석을 수행하는데 있어서 우주파편의 정밀궤도를 획득하는 것이 아주 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 JSpOC(Joint Space Operations Center)에서 제공하는 충돌요약메시지(Conjunction Summary Message)의 궤도정보를 활용할 뿐만 아니라 국제협력을 통하여 지상의 관측시설로 관심 있는 우주파편의 정밀한 궤도정보를 획득함으로써 충돌분석의 신뢰도를 증진시켜야 한다. 또한 충돌분석 정확도에 영향을 미치는 요소인 궤도전파기 오차, 충돌분석 확률 계산식의 부정확성에 의한 오차, 관측시의 오차, 그리고 지구중력, 태양활동 공기저항 모델링에 의한 오차 등의 영향성을 개별 분석하고 오차를 감소시키는 연구가 필요하다.

참고문헌

- 1) "Orbital Debris Quarterly News, 2011. Issue 1", www.space-track.org
- 2) L.K Newman, "The NASA robotic conjunction assessment process : overview and operational experiences", 59th International Astronautical Congress, Scotland, United Kingdom, 2008.
- 3) T. Flohrer, H. Krag, H. Klinkrad, "ESA's process for the identification and assessment of high-risk conjunction events", Advanced In Space Research, 2009.
- 4) T. Laporte, E. Sasot, "Operational management of collision risks for LEO satellites at CNES", SpaceOps 2008 Conference, Heidelberg, Germany, 2008.

- 5) Ikumi Matsuda, Chikako Hirose, Nobuo Kudo, "The JAXA Conjunction Assessment Process", SpaceOps 2010 Conference, Alabama, U.S., 2010.
- 6) www.agin.com/products/by-product-type/applications/stk/add-on-modules/stk-conjunction-analysis-tools/default.aspx
- 7) S. Alfano, "Relating Position Uncertainty to Maximum Conjunction Probability", The Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 53, No.2, April-June 2005, pp.193-205.
- 8) Chan, F. Kenneth, "Spacecraft Collision Probability", The Aerospace Press, 2008, pp.1~12.
- 9) Heiner Klinkrad, "Space Debris Models and Risk Analysis", Praxis Publishing Ltd, 2006
- 10) Choi, S. J., Jung, O. C., Park, S. J., Chung, D. W., Chun, Y. S., Kim, H. J., "Automated Conjunction Analysis System and Basic Concept of Contingency Operation for KOMPSAT-2", 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, 2009.