

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(2), 156-163(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.2.156>

## 아리랑 위성들의 경향에 따른 및 3차원 충돌확률 분석

성재동\*, 김해동\*\*, 임성민\*

## An Analysis of three-dimensional collision probability according to approaching objects to the KOMPSAT series

Jae-Dong Seong\*, Hae-Dong Kim\*\* and Seong-Min Lim\*

Department of Satellite Systems and Application, University of Science and Technology\*,  
Korea Aerospace Research Institute, University of Science and Technology\*\*

## ABSTRACT

Collision probability is the most common method to measure the risk of space debris, it is widely used that two dimensional linear collision probability using the closest approach distance. This paper represents the characteristics of object that approach KOMPSAT 2, 3, 5 that have operated or will be operated by Korea. And more precise method than two dimensional linear collision probability, we analyzed the properties of three dimensional nonlinear collision probability using STK/Nonlinear Collision Probability Tool. Through this, efficiency of three dimensional nonlinear collision probability for KOMPSAT series satellites was investigated. The result represents that three dimensional nonlinear collision probability showed the precise outcome at a relative velocity of less than 350m/s. Also, KOMPSAT series satellites appeared to few low relative velocity approaches and showed low efficiency for the three dimensional nonlinear collision probability.

## 초 록

우주파편과의 위험성을 판단하는데 가장 보편적으로 사용되는 것이 충돌확률이며, 현재 널리 사용되고 있는 방법은 최근접거리를 이용한 2차원 선형 충돌확률 계산방법이다. 본 논문에서는 우리나라가 운용하거나 운용을 계획 중인 아리랑 2호, 3호, 5호 위성에 접근하는 물체의 접근 특성을 분석하고, 2차원 선형 충돌확률보다 더 정밀한 3차원 비선형 충돌확률의 특성을 STK/Nonlinear Collision Probability Tool을 이용하여 분석하였다. 이를 통해 저궤도 위성인 아리랑 위성들에 대해 3차원 비선형 충돌확률의 효율성에 대해 고찰하였다. 분석결과 3차원 비선형 충돌확률은 350m/s 이하의 상대속도 영역에서 효율성이 있음을 확인하였으며, 우리나라 위성의 경우 낮은 상대속도를 가지고 접근하는 경우가 거의 없는 것으로 나타나 실질적으로 3차원 비선형 충돌확률에 대한 효율성이 낮은 것으로 나타났다.

**Key Words** : Space Debris(우주 파편), Collision Probability(충돌 확률), Approach Trend(접근 경향)

† Received: October 5, 2012 Accepted: January 22, 2013

<http://journal.ksas.or.kr/>

\*\* Corresponding author, E-mail : haedkim@kari.re.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## I. 서 론

인공위성은 1957년 최초 발사 이후 불과 반세기만에 현대인의 생활에서 필수적인 요소로 자리매김하였다. 차량에 탑재되는 GPS 기기는 물론 날씨를 예측하는 기상위성, 장거리 통신을 원활히 가능하게 하는 통신위성, 지구관측, 우주탐사와 군사적인 목적까지 점차 인공위성의 활용도 및 의존도가 커져가고 있다.

이와 같은 활발한 우주개발의 부산물로서 현재 지구 주위 궤도에는 수많은 우주과편들이 생겨났으며 위성 발사 및 운용, 유인 우주활동에 큰 위협이 되고 있다. 지난 5월에 발사된 아리랑 3호나 차후 발사될 아리랑 5호 위성도 이와 같은 상황으로부터 예외가 될 수 없으므로 우주과편의 위협에 대비한 관련 연구들이 필요하다.

우주과편으로부터 운영 중인 인공위성을 보호함과 동시에 보다 효율적으로 운영하기 위해서는 접근하는 물체와의 충돌확률을 정밀하게 계산하는 것이 중요하다. 충돌확률은 인공위성의 회피 기동에 중요한 기준이 되는 것으로 충돌확률을 정밀하게 분석하는 것은 불필요한 기동을 줄여 위성의 수명을 연장시키는데 기여할 수 있다.

국외에서는 접근하는 물체와의 충돌확률에 대한 연구들을 지속적으로 진행하였다. 최근접거리를 이용한 충돌확률 계산방법의 경우 현재 Chan's Method, Alfano's Method, Patera's Method 등 여러 가지 방법으로 실제 현장에서 사용 중이다[1]. 또한 3차원 비선형 충돌확률의 경우 Mckinley나 Alfano 등에 의해 연구되었으며, 특히 Alfano가 제안한 'Adjoining Tube Method'와 'Parallel Pipe Method'는 현재 STK/CAT<sup>®</sup>에 포함되어 있다[2,3].

국내에서도 지속적으로 접근하는 우주물체와의 위험성을 분석하는 연구가 진행되고 있고, 대표적으로 2차원 선형 충돌확률을 적용하여 천리안 위성과 RADUGA-1 위성의 충돌확률을 분석한 연구[4]나 아리랑 2호 위성의 위험성을 분석하는 시스템에 대한 연구[5], 통계적 방법으로 접근하는 플럭스를 이용한 충돌확률에 대한 연구[6]들이 수행되었으나 3차원 비선형 충돌확률을 국내 위성에 적용하여 위험성을 분석하는 연구는 이루어지지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 우선 국내 운영 중인 저궤도 위성인 아리랑 2호, 3호와 차후 발사할 아리랑 5호 위성에 근접하는 물체의 접근거리, 상대속도, 접근각도를 분석하였다. 또한 보다 정밀한 예측을 위해 제안된 3차원 비선형 충돌확률

의 특성을 분석하여 국내 저궤도 위성에 적용했을 때의 효용성을 고찰하였다.

## II. 본 론

### 2.1 3차원 비선형 충돌확률

본 장에서는 최근접거리를 이용한 충돌확률 계산방법에서 기존 2차원 선형 충돌확률 계산방법에 대한 내용과 3차원 비선형 충돌확률 계산방법의 차별성 및 성질을 분석하고, STK/Nonlinear Collision Probability Tool을 사용하여 아리랑 2호 위성에 적용해 기존 2차원 충돌확률 결과와 비교 분석한 내용을 기술하였다.

#### 2.1.1 최근접거리를 이용한 2차원 충돌확률

최근접거리를 이용한 충돌확률 계산방법은 플럭스(Flux)를 이용한 충돌확률 계산방법과 달리 실제 접근하는 물체의 거리를 토대로 확률을 계산하는 방법이기 때문에 신뢰도가 높고, 위험분석 프로그램에 널리 사용되는 방법이다. Fig. 1은 충돌확률 문제에서 일반적으로 사용되는 기하학 구조이다[7].

구로 가정한 관심물체(Primary)와 접근물체(Secondary)가 서로 근접하여 지나치면 Fig. 1과 같이 접근물체를 고정하여 관심물체의 상대운동으로 나타낼 수 있다. 이때 접근물체의 위치는 유지하되 접근물체의 크기와 관심물체의 크기를 합하여 관심물체의 자취에 옮겨놓을 수 있다. 이때 구의 반지름을 HBR(Combined Hard Body Radius)라 하고, 두 물체의 위치공분산을 합하여 접근물체가 중심에 오도록  $C(t)$ 를 정의할 수 있다.

이와 같은 공분산 타원체에 관심물체가 통과하면서 형성된  $V$ 에 대한 가우시안 확률밀도 함수의 삼중적분이 충돌확률이 되며, 이는 아래의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

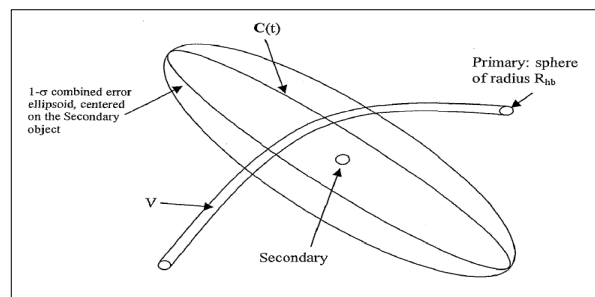


Fig. 1. Typical Encounter Geometry[7]

$$P_c = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3|C|}} \iiint_V e^{-\frac{1}{2}P^T C^{-1}P} dx dy dz \quad (1)$$

$$P = \begin{Bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{Bmatrix}$$

$C$ 는 접근물체를 중심으로 하는 관성좌표계에서 각 축에 대한 공분산 행렬을 의미하고,  $P$ 는 각 축에 대해 접근물체의 위치( $x_0, y_0, z_0$ )에서 관심물체의 위치( $x, y, z$ )까지의 상대거리를 의미한다. 식(1)을 계산하기 위해서는 시간에 대한 공분산 행렬  $C(t)$ 의 변화나 삼중적분 형태의 식을 풀어야 하기 때문에 많은 계산 시간과 절차의 복잡도가 높아진다. 따라서 위의 문제를 2차원 상의 충돌확률로 간략화 할 수 있다.

3차원 비선형 충돌확률을 2차원 선형 충돌확률로 나타내기 위해서 크게 2가지 가정이 필요하다. 첫째, 시간에 따른 위치공분산이 일정해야 하고, 둘째, 위치공분산을 관심물체가 통과하는 시간이 매우 짧아야 한다. 이는 두 물체 간 상대속도가 커야하는 것과 동일한 의미이다.

일반적으로 저궤도 위성은 약 7.5~7.8km/s의 속도로 궤도를 돌고 있고, 정지궤도 위성의 경우도 약 3km/s의 속도를 가진다. 또한 접근해오는 물체의 속도를 감안한 상대속도의 경우 위성의 속도보다 큰 속도를 가지는 경우가 많기 때문에 위의 조건을 충분히 만족할 수 있다.

Fig. 2는 위의 두 가정을 만족했을 때의 기하학 구조로써 접근물체 중심의 좌표계를  $x, y, z$ 로 나타내었고, 두 물체가 가장 근접한 시점에서 관심물체의 속도방향과 수직한 면을 자르면 Fig. 3과 같은 충돌평면 상에 두 물체를 표현할 수 있다. 이 경우 앞선 식 (1)은 식 (2)와 같이 이중적분 형태로 간략화하여 나타낼 수 있다[7].

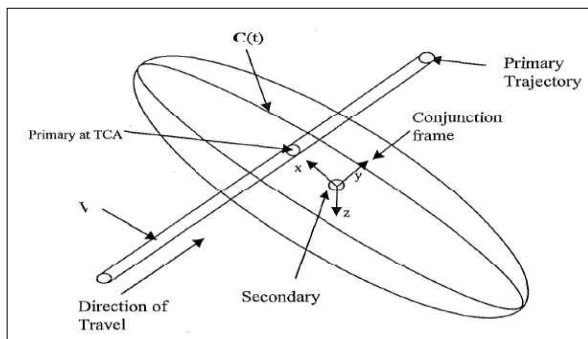


Fig. 2. Simplified to two-dimensional integral for linear cases[7]

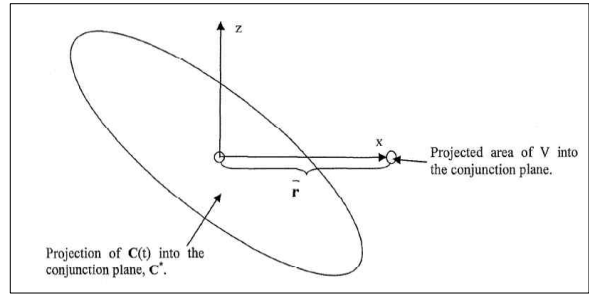


Fig. 3. Encounter plane at CPA[7]

$$P_c = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2|C|}} \iint_A e^{-\frac{1}{2}P^T C^{-1}P} dx dz \quad (2)$$

식(2)에서  $A$ 는 HBR의 면적을 의미하고, 간략화된 2차원 선형 충돌확률은 다시 지수항과 오차항이 결합된 형태의 'Alfano's method'나 1차원 리시안(Rician) 확률밀도로 나타낸 'Chan's method', 1차원 선적분 형태로 나타낸 'Patera's method', 위의 좌표계를 극좌표계로 나타내어 유도한 'Foster's method' 등 여러 형태로 다양한 충돌확률 분석 프로그램에 사용되고 있다[1].

### 2.1.2 3차원 비선형 충돌확률

3차원 비선형 충돌확률은 2차원 선형 충돌확률 문제와 달리 상대속도가 느리거나 시간에 대한 위치공분산이 변하더라도 충돌확률을 계산할 수 있는 방법으로 보다 실제 상황을 잘 반영할 수 있는 방법이다.

Fig. 4는 관심물체의 자취로 만들어진 부피  $V$ 를 매우 작은 간격의 원기둥 형태로 나누어 표현한 것으로  $v_i$ 에서의 충돌확률을 전체 구간까지 계산하여 더함으로써 3차원 비선형 충돌확률을 계산할 수 있다. 전체 구간은 특정시간이나 마할라노비스 거리로 설정할 수 있고, 2차원 선형 충돌확률 방법과 달리 전체 구간의 위치, 속도, 공분산 데이터가 있어야 계산이 가능하다.

데이터 간 시간간격은 충분히 작아야 하고,  $v_i$

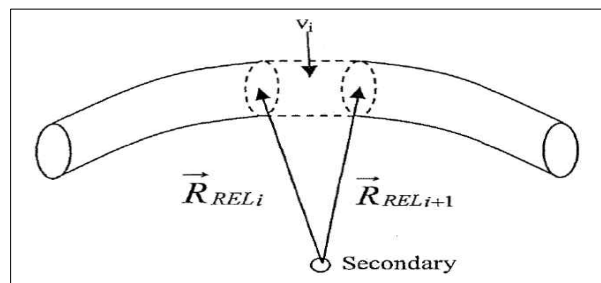


Fig. 4. Dissection of complex geometry[2]

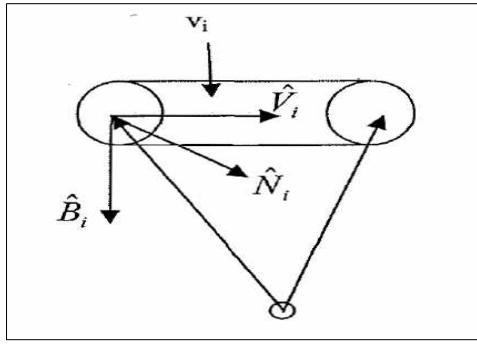


Fig. 5. local coordinate of  $v_i$  [2]

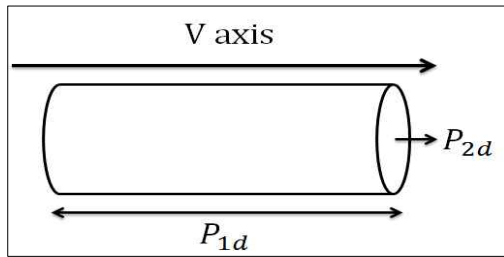


Fig. 6. Adjoining tube method

내에서의 위치공분산은 일정하다고 가정한다.

마할라노비스 거리는 군집분석에 널리 사용되는 거리개념으로써, 각각의 케이스가 평균값들로 이루어진 중심값에 대해 갖는 거리를 의미한다.

$v_i$ 에서의 충돌확률을 계산하기 위해 아래 Fig. 5와 같이 상대속도 방향의 축 V, 속도방향과 수직이 되는 평면에서 두 축 N, B로 나타낼 수 있다.

$v_i$ 에서의 충돌확률을 계산하기 위해 Alfano가 제안한 'Adjoining Tube Method'를 사용하였다. 이 방법은 앞서 언급한 것과 같이 매우 얇은 원기둥과 같은 형태의 요소들을 전체 구간에 걸쳐 계산하여 더함으로 충돌확률을 계산하는 방법으로 하나의 요소의 충돌확률은 Fig. 6과 같이 해당 요소의 속도방향 축에 대한 1차원 충돌확률과 속도방향과 수직인 원기둥의 단면에서의 2차원 선형 충돌확률을 서로 곱하여 계산한다.

1차원 충돌확률은 아래 식(3), (4)과 같이 원기둥의 시작점과 끝점에서의 마할라노비스 거리 ( $M_i, M_f$ )와 오차함수를 이용하여 계산한다[3]. 이 때 마할라노비스 공간은 관심물체가 공분산 타원체를 통과하기 시작한 시점부터 통과한 시점까지로 정의한다.

$$P_{1d} = \left| \frac{1}{2} \left( \operatorname{erf} \left( \frac{M_f}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{M_i}{\sqrt{2}} \right) \right) \right| \quad (3)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4)$$

원기둥의 단면에서의 2차원 충돌확률은 2.1.1절에서 언급한 충돌확률 계산식을 Fig. 5의 VNB 좌표계에 적용하여 식(5)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{2d} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 |C_{Rel_i}|}} \iint_A e^{-\frac{1}{2} P^T C_{Rel_i}^{-1} P} dNdB \quad (5)$$

이때 앞서 정의된 공분산은 관성좌표계 상의 값이므로, VNB 좌표계로 변환시키는 과정이 필요하다.

시간  $i$ 에서 관심물체와 접근물체의 위치를 각각  $R_P, R_S$ 라 하고, 공분산을  $C_P, C_S$ 라 할 때 변환행렬  $M_i$ 는 아래와 같이 구할 수 있다[2].

$$R_{Rel_{i+1}} = R_{S_{i+1}} - R_{P_{i+1}} \quad (6)$$

$$R_{Rel_i} = R_{S_i} - R_{P_i} \quad (7)$$

$$V_i = \frac{(R_{Rel_{i+1}} - R_{Rel_i})}{|R_{Rel_{i+1}} - R_{Rel_i}|} \quad (8)$$

$$N_i = \frac{(R_{Rel_{i+1}} \times R_{Rel_i})}{|R_{Rel_{i+1}} \times R_{Rel_i}|} \quad (9)$$

$$B_i = V_i \times N_i \quad (10)$$

$$M_i = \begin{pmatrix} V_{xi} & V_{yi} & V_{zi} \\ N_{xi} & N_{yi} & N_{zi} \\ B_{xi} & B_{yi} & B_{zi} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$C_{Rel_i} = M_i (C_P + C_S) M_i^T \quad (12)$$

그 후 식(13)과 같이 계산한 1차원 충돌확률과 2차원 충돌확률을 서로 곱하여  $v_i$ 의 충돌확률을 계산하고, 이를 전체 구간에 걸쳐 계산하여 모두 더하면 3차원 비선형 충돌확률을 계산할 수 있다.

$$P_c = P_{1d} \times P_{2d}, \quad P_c = \sum_i P_{C_i} \quad (13)$$

### 2.1.3 3차원 비선형 충돌확률 결과

2.1.2절에서 언급한 3차원 비선형 충돌확률을 계산하기 위해서 MATLAB 상의 코드를 구현하였으나 매번 시간에 대한 두 물체의 위치, 속도, 공분산이 포함된 쿼리데이터를 생성시키기 어렵

고, 각 연산에 소요되는 시간이 30초에서 1분 사이로 비교적 많은 시간이 소요되는 문제가 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 보다 정밀하고 빠르게 3차원 비선형 충돌확률을 얻기 위해 AGI社의 'STK9 Nonlinear Probability Tool'을 통해 결과를 얻어내었고, 이를 통해 3차원 비선형 충돌확률의 특성을 분석하였다. 이때 사용한 방법은 2.1.2절에서 언급한 'Adjoining Tube Method'를 사용하였다.

STK9의 'Nonlinear Probability Tool'은 최대시간간격, 튜브 간 최대 각도 등을 제약조건으로 설정하여 프로그램 자체에서 궤도전파를 수행하기 때문에 데이터 간 시간간격에 대한 조건을 충분히 만족할 수 있다.

아리랑 2호 위성을 대상으로 분석을 수행하였으며, 분석에 사용한 궤도데이터는 아래 Table 1과 같다. 임의의 접근물체는 아리랑 2호 위성과 동일하게 설정하되 궤도경사각을 조금씩 달리 설정하여 다양한 최근접거리와 상대속도를 얻었다. 이때 두 물체의 위치공분산은 VNB방향으로 각각 1km로 설정하였다.

일반적으로 알려진 3차원 비선형 충돌확률의 특징은 매우 낮은 상대속도 영역에서 보다 높은 정밀도를 가진다고 알려져 있다. 따라서 이를 검증하고 효율성을 가지는 상대속도의 임계치를 도출하고자 하였다. 분석 범위는 10km 이내에 접근하는 경우만을 고려하여 총 8,877개의 결과를 얻었고, 이를 커브 피팅(Curve Fitting)을 통해 아래 Fig. 7과 같이 상대속도에 대한 2차원 충돌확률과 3차원 비선형 충돌확률 간 상대오차의 형태로 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 두 물체의 상대속도가 약 350m/s 이상일 경우 2차원 선형 충돌확률과의 차이가 거의 없거나 오히려 3차원 비선형 충돌확률이 작은 결과를 보여주었다. 반대로 350m/s 이하의 상대속도 영역에서는 2차원 선형 충돌확률에 비해 최대 78% 큰 충돌확률 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 관심물체가 공분산 타원체를 통과하는 시간이 길어질수록 충돌확률 계산에 포함되는 부피가 커지기 때문이다.

공분산 타원체를 통과하는 시간은 공분산의 크기를 증가시킴으로써 늘릴 수 있다. 아래 Fig. 8은 상대속도를 42.3m/s로 고정했을 때 공분산과 최근접거리가 변함에 따른 두 충돌확률 간 상대오차를 나타내는 것으로 공분산이 커질수록 두 충돌확률 간 상대오차는 작아지는 경향을 나타내었고, 이는 최근접거리가 변함에도 유사하게 나

Table 1. Orbit properties of KOMPSAT-2 [8]

Satellite	KOMPSAT-2
Semi-major axis (km)	7063.276
Eccentricity	0.001191
Inclination (deg)	98.323
RAAN (deg)	77.519
Arg. of perigee (deg)	344.131
Mean Anomaly (deg)	153.263

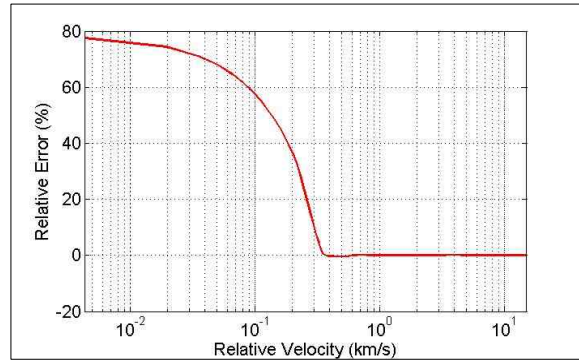


Fig. 7. Comparison of 2D and 3D method with various relative velocities

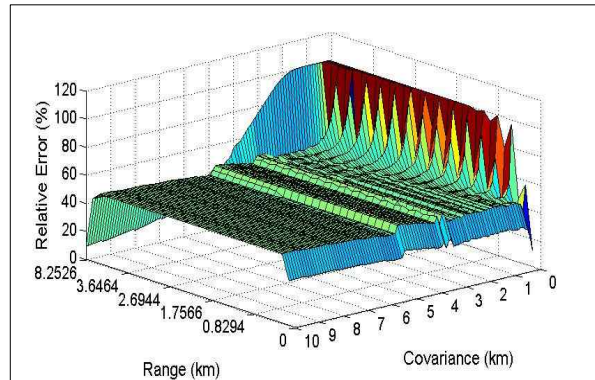


Fig. 8. Comparison of 2D and 3D method with various range and covariance (relative velocity : 42.3m/s)

타났다. 이러한 결과는 'Adjoining Tube Method'가 잘게 나눈 요소들의 충돌확률을 삼중적분으로 구하는 것이 아니라 마할라노비스 거리를 기반으로 한 1차원 충돌확률과 충돌평면의 2차원 선형 충돌확률의 곱으로 정의되기 때문에 최근접거리만으로 계산되는 2차원 선형 충돌확률에 비해 공분산이 커질수록 계산되는 요소의 충돌확률이 더 작아지는 것으로 판단된다.

## 2.2 저궤도 근접 물체의 경향 분석

본 장에서는 아리랑 2호, 3호, 5호 위성에 일정거

리 이내 접근하는 물체들을 분류하여 최소근접거리, 상대속도, 근접 방위각 및 고각을 분석하였다.

### 2.2.1 경향 분석 방법

분석기간은 2011년 7월 4일부터 2012년 6월 6일이며, NORAD에서 제공하는 224개의 TLE 카탈로그 데이터를 사용하였다. 아리랑 2호 위성은 위 분석기간에 해당하는 TLE 데이터가 존재하지만 아리랑 3호와 5호 위성은 해당 분석기간의 TLE 데이터가 없기 때문에 아래 Table 2의 궤도제원을 사용하여 가상의 위성을 생성하였다.

접근 물체의 경향을 분석하기 위해 STK/CAT® 툴을 사용하여 최근접거리, 상대속도, 접근각을 획득하였다. 분석을 위한 절차는 아래 Fig. 9와 같다.

하나의 TLE 데이터를 이용할 경우 분석은 가능하지만 TLE 데이터의 위치 및 속도 불확실성은 시간이 흐름에 따라 증가하는 성질을 가지기 때문에 최대한 많은 데이터를 이용하여 분석기간을 분할하여 분석하였다. 또한 3개의 위성과 224개의 TLE 카탈로그 데이터를 일일이 분석하기에 많은 시간과 노력이 소요되므로, MATLAB-STK 간 Active X Connect를 이용한 별도의 분석 프로그램을 제작하였다. 아래 Fig. 10은 위 과정을

Table 2. Orbit properties of KOMPSAT 3, 5

Satellite	KOMPSAT-3	KOMPSAT-5
Semi-major axis (km)	7064.157	6928.114
Eccentricity	0.001011	0.001069
Inclination (deg)	98.168	97.597
RAAN (deg)	142.231	339.735
Arg. of perigee (deg)	114.117	90.0
Mean Anomaly (deg)	62.472	270.0

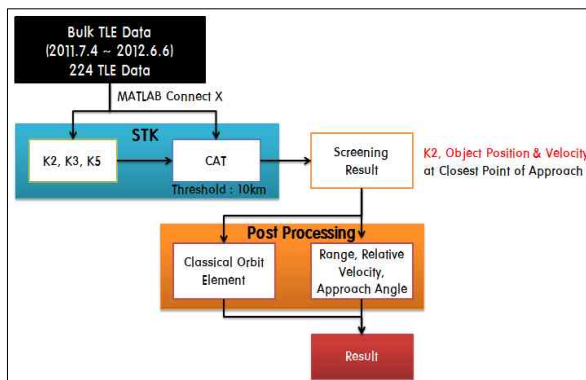


Fig. 9. Analysis procedure

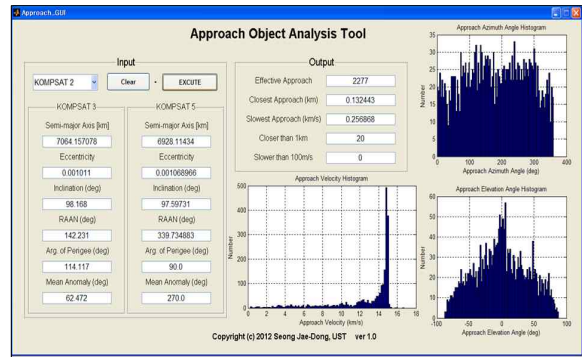


Fig. 10. Risk object trend analysis tool

적용하여 제작한 근접 물체 경향 분석 프로그램의 GUI이다.

아리랑 3호, 5호의 궤도제원을 입력하고 실행했을 경우 우측의 결과창에 유효접근 수, 최근접거리, 가장 느리게 접근한 경우의 상대속도, 1km 이내 접근한 빈도, 일정속도보다 느리게 접근한 빈도를 출력하고, 이를 히스토그램으로 나타내는 기능을 가진다.

### 2.2.2 경향 분석 결과

아리랑 2호, 3호, 5호 위성에 대해 11개월간 접근한 물체들의 접근빈도, 가장 근접한 경우, 가장 느리게 접근한 경우, 일정 속도 이하로 접근한 경우의 결과를 Table 3과 같이 나타내었다.

10km 이내에 접근하는 물체의 접근 빈도는 아리랑 2호, 3호 위성이 아리랑 5호 위성에 비해 약 2배 높은 것으로 나타났다. 접근 속도의 경우 앞서 도출한 3차원 비선형 충돌확률 효용성의 임계치인 350m/s 이하인 경우가 아리랑 3호 위성을 제외하고 거의 나타나지 않았으며, 아리랑 3호 위성의 경우 또한 전체 유효접근의 0.44%에 불과한 것으로 나타났다.

그 외에 Fig. 11, 12, 13, 14는 3개의 위성에 대해 각각 최근접거리, 상대속도, 접근 방위각, 접근 고각에 대한 히스토그램을 나타낸다.

Table 3. Approach trend analysis result

Satellite	KOMP SAT-2	KOMP SAT-3	KOMP SAT-5
Effective Approach	2187	2041	1053
Closest Approach (km)	0.132	0.152	0.436
Slowest Approach (km/s)	0.257	0.021	0.257
Closer than 1km	19	27	6
Slower than 350m/s	1	9	1

세 위성 모두 최근접거리, 상대속도, 접근각에서 유사한 경향을 나타내었다. 최근접거리의 경우 5km 이상이 전체 60% 이상을 차지하였고, 상대속도는 14~15km/s가 두드러지게 많은 것으

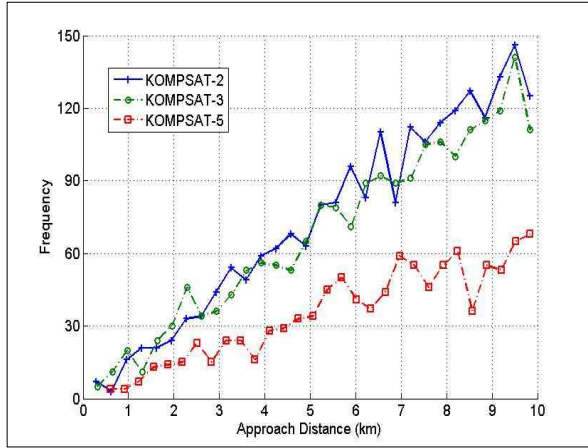


Fig. 11. Distribution of approach distance

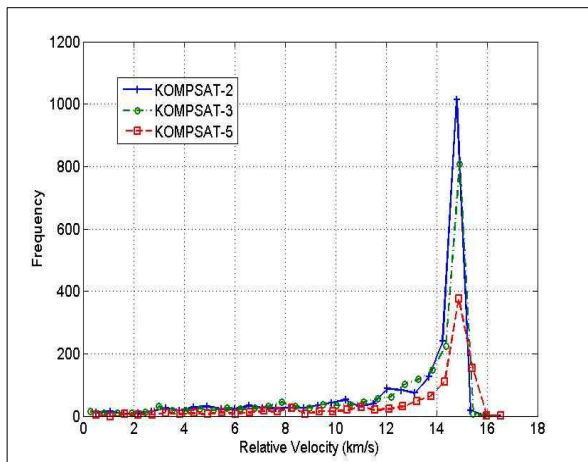


Fig. 12. Distribution of relative velocity

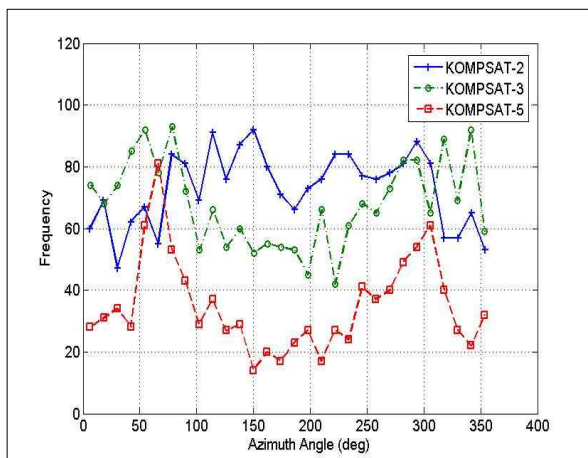


Fig. 13. Distribution of azimuth angle

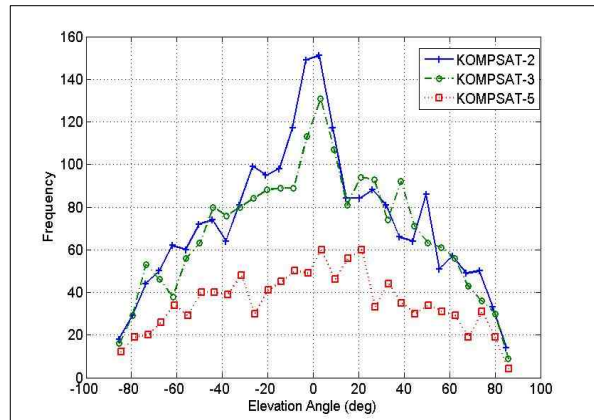


Fig. 14. Distribution of elevation angle

로 나타났다. 접근 방위각은 70도, 310도 부근에서 상대적으로 높은 빈도를 보였고, 접근 고각의 경우 0~30도 사이의 접근 빈도가 상대적으로 많았다.

이는 상대속도가 10km/s 이상이 대부분인 것과 관련하여 상대 물체가 수평선상에서 정면 혹은 측면으로 접근하는 빈도가 높음을 유추할 수 있다.

각 위성별 접근빈도 차이의 원인은 ESA의 우주과편 환경모델인 MASTER 2009를 이용하여 분석할 수 있다. Fig. 15는 고도에 따른 공간밀도를 나타내는 것으로 'Expl'은 폭발로 인해 생성된 물체, 'Coll'은 충돌로 인해 생성된 물체, 'LMRO'는 우주임무수행을 위해 생성된 물체를 의미한다. Fig. 15에서 아리랑 2호, 3호 위성의 임무고도에 비해 아리랑 5호 위성의 고도에서 약 30% 낮은 공간밀도를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 저궤도상의 대기밀도가 고도가 낮아짐에 따라 증가하고, 이는 대기저항의 증가로 연결된다.

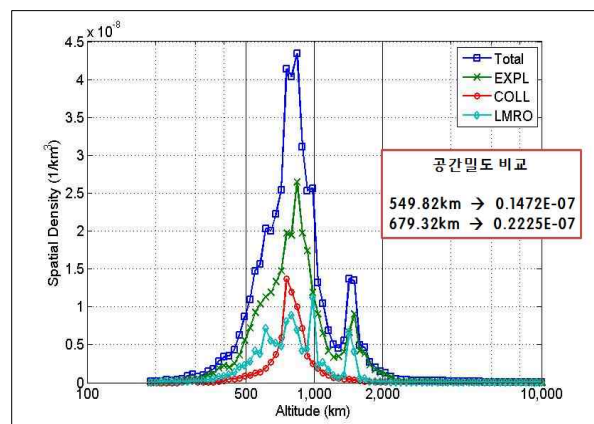


Fig. 15. Spatial density with various altitude using MASTER2009

즉 고도가 낮을수록 물체가 받는 대기저항이 증가하고 자연궤도수명은 낮아진다. 일반적으로 저궤도에서 자연궤도수명이 다할 경우 대기로 재진입하여 소각되기 때문에 아리랑 5호 위성 주위에 존재하는 개체수가 작고, 이는 Table 3과 같이 다른 위성에 비해 작은 유효 접근빈도를 나타낸다고 사료된다.

마지막으로 상대속도의 분포를 통해 앞서 분석한 3차원 비선형 충돌확률의 효용성이 매우 낮음을 알 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 지난 11개월 간 아리랑 2호, 3호, 5호에 접근하는 우주물체들의 최근접거리, 상대속도, 접근각을 분석하였으며, 상대속도가 낮은 경우 정밀도가 높다고 평가되는 3차원 비선형 충돌확률의 특성을 분석하여 우리나라 위성에 적용했을 때 충분한 효용성을 가지는지를 고찰하였다.

저궤도 위성에 근접하는 경향을 분석해 본 결과 아리랑 5호 위성에 비해 아리랑 2호와 3호 위성의 유효접근 빈도가 약 2배 높게 나타났다. 상대속도의 경향에서는 아리랑 2호, 3호, 5호 위성 모두 14~15km/s의 영역에서 가장 많이 접근함을 알 수 있었고, 접근 고각의 분포와 함께 고려했을 때 수평선상에서 정면 혹은 측면으로 접근하는 경우가 가장 많았음을 추측할 수 있었다.

3차원 비선형 충돌확률의 특성을 분석한 결과 최대 350m/s 이하의 속도영역에서 2차원 선형 충돌확률에 비해 높은 결과를 나타내었고, 위치공분산의 크기가 작을수록 이 차이는 커지는 것으로 나타났다. 이에 반해 접근거리에 따른 3차원 비선형 충돌확률의 특이점은 나타나지 않았다. 아리랑 2호, 3호, 5호의 350m/s 이하의 속도로 접근하는 경우의 빈도는 없거나 최대 0.44%에 불과하였다. 따라서 3차원 비선형 충돌확률을 구현하기 위한 절차의 복잡성과 상대적으로 높은 계산시간을 고려할 때 3차원 비선형 충돌확률 계산방법은 아리랑 2호, 3호, 5호 위성에 대해 효용성이 낮다고 판단된다. 만일 상대속도가 낮은 경우가 발생했을 때 미리 분석된 적절한 가중치를 더하거나 곱하여 3차원 비선형 충돌확률을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 정지궤도 위성의 경우 저궤도 위성에 비해 낮은 궤도 속도를 가지며 이로 인해 저궤도 위성보다 다른 접근형태가 다수 발생할 것으로 판단되기 때문에 향후 천리안 위성과 같은 정지궤도 위성에 대한 효용성 분석이 필요하다고 사료된다.

### 후 기

본 논문은 기초기술연구회 'NAP 우주물체 전자광학 감시체계 기술개발'의 협동연구과제(우주파편 충돌위험 종합관리시스템 개발 및 우주파편 제거시스템 연구)의 일부로 수행되었으며, 이에 기초기술연구회와 한국항공우주연구원의 지원에 감사드립니다.

### References

- 1) Alfano. S., "Review of Conjunction Probability Methods for Short-term Encounters," AAS Paper No. 07-148, AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Sedona, Arizona, 2007.
- 2) McKinley. D. P, "Development of a Nonlinear Probability of Collision Tool for the Earth Observing System", AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Monterey, CA, 2002.
- 3) Alfano. S, "Addressing Nonlinear Relative Motion For Spacecraft Collision Probability," AIAA Paper No. 2006-6760, 15th AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, Colorado, 2006.
- 4) Seong. J. D, Lee. D. W, Cho. K. R, Kim. H. D and Kim. H. J, "Analysis of the Collision Probability and Mission Environment for GEO", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol.39(7), pp.674-681, 2011.
- 5) Jung. I. S, Choi. S. J, Chung. D. W, "Statistical Conjunction Analysis between KOMPSAT-2 and Space Debris" , Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol.40(1), pp.78-85, 2012.
- 6) Kim. E. H, Kim. H. D, Kim. E. K, Kim. H. J, "Analysis of Collision Avoidance Maneuver Frequency for the KOMPSAT-2 and the KOMPSAT-5", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol.39(11), pp.1033-1041, 2011.
- 7) Alfriend. K. T., Akeela. M. R., Lee. D., Frisbee. J., Foster. J. L, "Probability of Collision Error Analysis ", Kluwer Academic Publishers, Vol. 1, No. 1, pp. 21-35, 1999.
- 8) www.celestrak.com