

## 우주환경 변화에 따른 저궤도 위성의 궤도변화 분석

정옥철<sup>1,†</sup> · 임현정<sup>1</sup> · 김화영<sup>1</sup> · 안상일<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국항공우주연구원 저궤도위성관제팀

### Analysis on the Impact of Space Environment on LEO Satellite Orbit

Okchul Jung<sup>1,†</sup>, Hyeonjeong Yim<sup>1</sup>, Hwayeong Kim<sup>1</sup>, and Sangil Ahn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LEO Satellite Mission Operations Department, Korea Aerospace Research Institute

**Abstract** : The satellite orbit is continuously changing due to space environment. Especially for low earth orbit, atmospheric drag plays an important role in the orbit altitude decay. Recently, solar activities are expected to be high, and relevant events are occurring frequently. In this paper, analysis on the impact of geomagnetic storm on LEO satellite orbit is presented. For this, real flight data of KOMPSAT-2, KOMPSAT-3, and KOMPSAT-5 are analyzed by using the daily decay rate of mean altitude is calculated from the orbit determination. In addition, the relationship between the solar flux and geomagnetic index, which are the metrics for solar activities, is statistically analyzed with respect to the altitude decay. The accuracy of orbit prediction with both the fixed drag coefficient and estimated one is examined with the precise orbit data as a reference. The main results shows that the improved accuracy can be achieved in case of using estimated drag coefficient.

**Key Words** : Space Environment, Geomagnetic Storm, Atmospheric Drag, Orbit Prediction, Orbit Determination

## 1. 서 론

위성을 운영하는데 있어 궤도예측 자료는 임무계획부터 지상교신에 이르기 까지 전 과정에서 필요한 정보이다. 특히 지구관측 위성의 경우 사용자가 원하는 지역에 대한 영상을 정확하게 확보하기 위해서는 궤도예측 정밀도가 보장되어야 한다. 궤도예측은 궤도결정을 통해 얻은 초기조건을 이용하여 궤도 운동방정식을 통해 계산된다. 따라서 궤도예측 정밀도는 초기값의 불확실성이나 운동방정식의 모델링에 따라 좌우된다고 할 수 있다. 또한, 초기 값과 운동방정식이 정

확하더라도, 궤도예측 시점에 미리 예상하지 못한 궤도 교란력 성분이 작용하게 되면 궤도예측 정밀도는 저하될 수 있다. 초기 값으로 사용되는 궤도결정 결과는 후처리를 통해 요구되는 정밀도를 갖는다고 가정할 수 있고, 운동방정식 모델링은 여러 가지 다양한 교란력 요소를 고려한다는 점을 고려하면 궤도예측 정밀도에 영향을 주는 요소는 사전에 예측이 어려운 갑작스러운 우주환경 변동에 기인한 궤도 변화라 할 수 있다. 지구관측에 주로 사용되는 저궤도 위성의 경우, 궤도에 작용하는 교란력 성분은 주로 지구비대칭 중력장, 대기항력, 태양과 달의 인력, 태양복사압을 들 수 있는데, 특히 대기항력의 경우 일시적인 태양활동 증가가 대기밀도 변화를 일으켜 위성의 고도를 변화시키는 주요 요인으로 작용한다[1]. 태양활동은 11년을 주기로 변화하게 되며, 태양 코로나 분출과 같은 현상도

Received: March 21, 2015 Revised: June 11, 2015 Accepted: June 25, 2015

† Corresponding Author

Tel: +82-42-860-2732, E-mail: ocjung@kari.re.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

지자기 폭풍을 일으켜 지구 저궤도의 우주환경을 교란시킨다. 이에 비해 태양과 달의 인력이나 태양복사압에 의한 교란력은 대기항력에 의한 요소보다 그 크기가 상대적으로 작다고 할 수 있고, 지구비대칭 중력장은 교란력 크기는 크지만 태양활동 증가와 같은 외부 환경에 따른 영향은 적다.

본 논문에서는 2013년 3월 발생한 지자기 변화가 저궤도위성의 궤도에 끼치는 영향을 아리랑 2호 및 3호, 5호 비행데이터를 이용하여 분석하였다. 이를 위해 미국 우주기상예보센터의 배포된 자료를 이용하여 태양활동 및 그에 따른 지자기 활동의 영향을 살펴보았고, 아리랑 위성들의 운영궤도결정 결과를 이용하여 하루 평균 고도를 산출한 후 일간 고도감쇄율을 확인하였다. 또한, 태양활동과 연관되는 수치인 태양플럭스지수(Radio Flux 10.7cm)와 지자기지수(Geomagnetic A-index)와의 연관성을 살펴보았다. 그리고 궤도예측 과정에서 궤도결정을 통해 추정된 항력계수를 적용했을 때와 고정된 값을 사용했을 때의 결과를 후처리를 통해 얻은 정밀궤도데이터와 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 지자기 폭풍

지자기 폭풍(Geomagnetic Storm)은 지구 자기권의 일시적인 혼란을 야기시키는데, 코로나 질량 방출, 코로나 구멍, 혹은 태양 플레어 등이 발생하고 나서 약 이틀 이후에 태양풍의 충격파가 지구 자기장을 도달하여 지자기 폭풍을 유발한다.

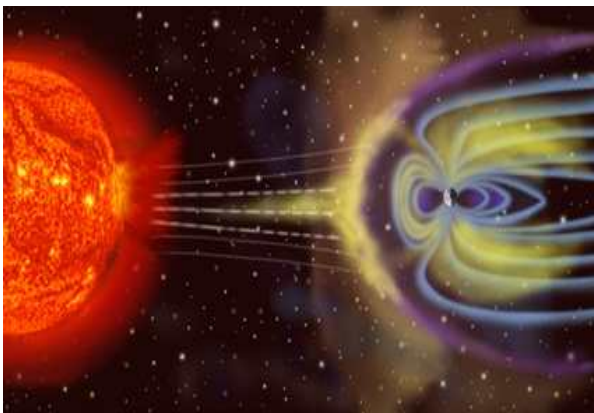


Fig. 1 Geomagnetic Strom on the Earth

태양풍의 자기권에 대한 압력은 태양의 활동에 따라 변화하며, 지자기 폭풍은 대개 하루 또는 이틀 동안 계속되지만 경우에 따라서 수일 동안 지속되기도 하는 것으로 알려져 있다. 또한, 지자기 폭풍은 지구의 상부 대기를 가열하여 팽창시킴으로써, 1,000 km 정도 고도의 대기밀도가 급격히 상승하게 된다. 이는 인공위성에 작용하는 대기항력을 증가시켜 결과적으로 위성의 고도를 감소시키는 주요 원인으로 작용하게 된다 [2].

Kp 지수는 지구 자기장의 변동 정도를 표시하는 양으로, 전 세계에 분포된 지상 관측소에서 측정된 지구자기장의 교란 정도(K 지수)를 이용하여, 미국의 우주기상예보센터(Space Weather Prediction Center, 이하 SWPC) 에서 가중치 평균을 계산하여 1-9 사이의 값으로 정량화 한 것이다. 이러한 과정은 준-실시간으로 수행되며, 매 3시간 마다 추정된 Kp 값이 배포된다. 또한, Kp 지수의 값에 따른 주의, 경고 등의 예보도 실시한다[3]. Kp 지수가 하루를 3시간씩 나누어 결정되는 반면에, A 지수는 하루에 대한 평균값으로 계산된다. 3시간 간격의 Kp 지수에 해당하는 A 지수의 값은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Relationship of Kp index and A index

Kp	0	1	2	3	4
A	0	3	7	15	27
Kp	5	6	7	8	9
A	48	80	140	240	400

미국 우주기상예보센터에서는 일반인도 지자기 활동 정도를 쉽게 알 수 있도록 각 Kp 지수에 해당하는 G 등급(Geomagnetic Storm Level)을 아래와 같이 정의하여 사용하고 있다.

Table 2 Geomagnetic Strom Level

Kp-index	G- Level	평균발생빈도
Kp=0~4	G0 (Normal)	
Kp=5	G1 (Minor)	1700 per cycle
Kp=6	G2 (Moderate)	600 per cycle
Kp=7	G3 (Strong)	200 per cycle
Kp=8	G4 (Severe)	100 per cycle
Kp=9	G5 (Extreme)	4 per cycle

2013년 3월 15일 태양에서 코로나 물질이 분출되는 당시 현상을 SOHO(Solar Heliospheric Observatory) 위성사진(Fig. 2)을 통해 확인 가능하다. CME(Corona Mass Ejection)이라고 알려진 이와 같은 현상이 발생하면, 많은 양의 태양입자가 우주공간 상에 발생되며, 약 3일 후에는 지구에까지 도달하게 된다. CME는 지자기 폭풍과 같은 우주환경에 변화를 일으켜, 궤도운동을 하는 위성에도 영향을 끼친다. 2013년 들어 가장 큰 태양 흑점 폭발이 있었던 3월 16일, 지구 자기장 교란을 알리는 경보까지 발령되었다. 그림 4는 한국천문연구원 태양우주환경 연구그룹에서 일반인을 상대로 제공하고 있는 Kp 지수의 변화량을 나타내는 그래프다[4]. 그림에서 알 수 있듯이 Kp 지수는 0~9사이의 범위에 있는데, 평상시에는 0~3 수준을 나타내지만 2013년 3월 17일의 경우에는 5~6의 값을 나타내고 있다.

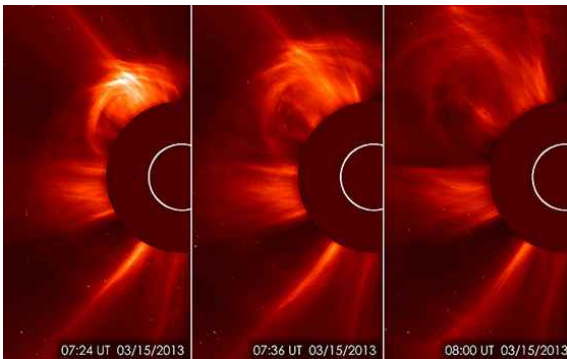


Fig. 2 Cross Mass Ejection (Image from SOHO)

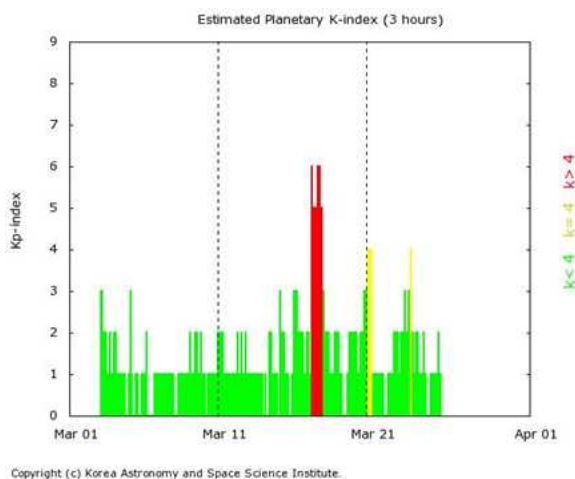


Fig. 3 Kp Index Change (Mar. 2013)

## 2.2 저궤도위성의 궤도변화

위성의 궤도는 지구 비대칭 중력장에 의한 교란력, 대기항력에 의한 교란력, 태양과 달에 의한 인력에 의한 교란력, 태양 복사압에 의한 교란력, 추력 성분에 의한 교란력 등에 의해 영향을 받는다. 특히, 고도 1,000km 이내 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성의 경우에는 대기에 의한 항력(Atmospheric Drag)이 궤도변화를 일으키는 주요 요소 중의 하나이다. 위성에 작용하는 대기항력은 대기의 물리적 특성을 정확하게 알아내기 어려울 뿐만 아니라, 위성 자세기동에 따른 유효 단면적 변화 등으로 정확한 모델링이 어렵다고 알려져 있다[5]. 이러한 대기항력은 위성의 궤도상 진행 방향과 반대방향으로 작용하여 위성을 감속시키게 되므로 고도감소가 발생하게 된다. 위성에 작용하는 대기항력에 의한 가속도는 대기밀도, 단면적, 항력계수, 그리고 위성의 속도에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 태양활동이 활발할 경우에는 대기가 가열되어 대기밀도가 증가하게 되므로 대기항력의 크기가 증가하게 된다. 예를 들면, 아리랑 1호의 경우 2002년 태양활동 극대기 시점 당시 하루 고도감쇄율이 최대 20미터까지 발생한 반면, 태양활동 저조기였던 2006년에는 하루 고도감쇄율은 1미터 수준이었다. 또한, 2006년에 발사된 아리랑 2호도 초기운영(LEOP, Launch and Early Operations Phase) 이후 3년간 자연 교란력에 의해 고도가 약 760미터 감소하는데 그쳤다. 이는 태양활동이 저조했기 때문이며, 하루 고도감쇄율은 1미터 미만이었다[6]. 대기항력에 직접적인 영향을 주는 태양활동은 태양 플럭스(Radio Flux 10.7cm)와 지자기 활동으로 나타나므로, 본 절에서는 고도 약 685km에서 운영하고 있는 아리랑 위성 2호 및 3호의 실제 비행데이터를 이용하여 2013년 3월 17일 전후의 궤도변화를 살펴보고, 고도 약 550km에서 운영하고 있는 아리랑 5호의 고도변화도 분석하였다. 궤도변화를 확인하기 위해 운영궤도결정과 정밀궤도결정으로 산출된 궤도를 기준 값으로 사용하였다. 운영궤도결정(Operational Orbit Determination)은 위성GPS 수신기의 항법해(Navigation Solution)를 관측자료(24시간 분량)로 이용하여, 지상국에서 일괄처리방식으로 궤도를 추정하는 것을 의미한다. 정밀궤도결정(Precise Orbit Determination)은 위성 GPS 수신기에서 수집된

Pseudo-range 및 Carrier phase와 세계 각지에 분포된 IGS(International GNSS Service) 데이터를 이용하여, 이중차분에 의해 궤도를 추정하는 것을 의미한다. 참고로, 아리랑 3호의 경우, 초기운영을 통해 정밀 궤도결정은 약 1-2미터, 운영궤도결정은 약 5미터 수준으로 알려져 있다[7].

Figure 4는 2013년 2월 25일부터 3월 25일까지 한 달 동안의 태양활동을 나타내는 태양 플럭스(Radio Flux 10.7cm)와 지자기 활동을 나타내는 A 지수, 그리고, 운영궤도결정의 값을 통해 산출한 하루 동안의 고도감소량 및 평균 고도의 변화 추이를 아리랑 2호/3호에 대해 각각 나타낸 것이다. 그림을 통해 위성의 고도 감소는 태양 플럭스와 지자기 활동의 영향을 동시에 받는 것으로 추정할 수 있다. 또한, 태양 플럭스와 지자기 A 지수가 가장 높았던 3월 17일에 궤도변화가 가장 크게 나타났음을 확인할 수 있다. 3월 초에 A 지수는 수치상 큰 값을 가졌으나, Kp 지수가 5 이하(G1 등급)이고 태양 플럭스가 상대적으로 낮아 대기 항력에는 크게 영향을 끼치지 않은 것으로 판단된다.

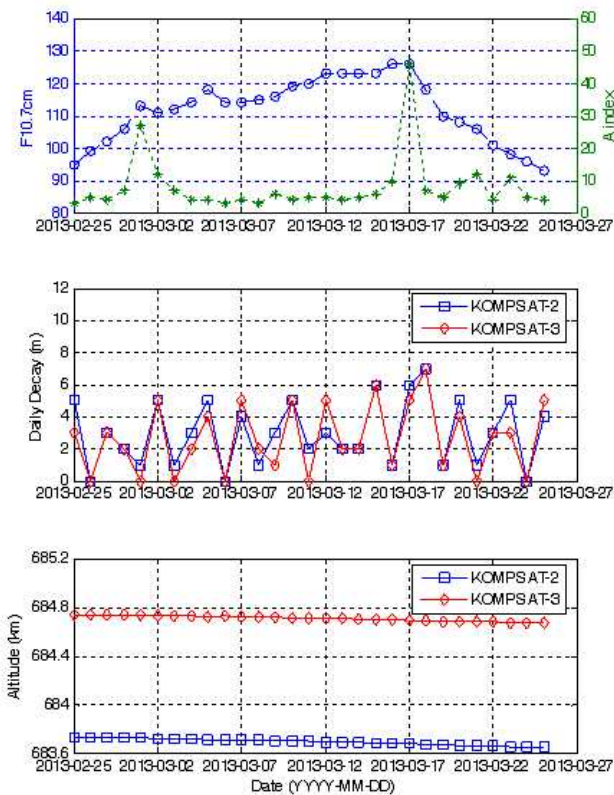


Fig. 4 Solar Activities and Altitude Change (K2/K3)

Figure 5는 아리랑 5호의 일간 고도 감소와 태양플럭스의 값을 나타낸 것이고, Fig. 6은 하루 동안의 고도 감소와 지자기지수의 변화를 나타낸 것이다. 두 그림을 통해 알 수 있듯이, 위성의 고도 감소는 태양플럭스 및 지자기지수 변화와 상관관계가 있음을 알 수 있다. 서로 다른 두 변수의 상관 정도를 측정하기 위해 보편적으로 많이 사용되는 피어슨(Pearson) 상관계수[8]를 확인한 결과, 태양복사압과 고도 감소의 상관계수는 0.51이었고, 지자기지수와 고도 감소의 상관계수는 0.26으로 계산되었다. 일반적으로 상관계수가 0.3보다 클 경우, 뚜렷한 선형관계가 있다고 알려져 있어 앞에서 기술한 태양활동과 고도 감소는 상호 연관관계는 어느 정도 수치를 통해 확인된다고 볼 수 있다. 또한, 아리랑 2호/3호보다 약 135km 낮은 고도에서 운영되는 아리랑 5호는 태양활동에 의한 고도 감소의 변화폭이 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있다.

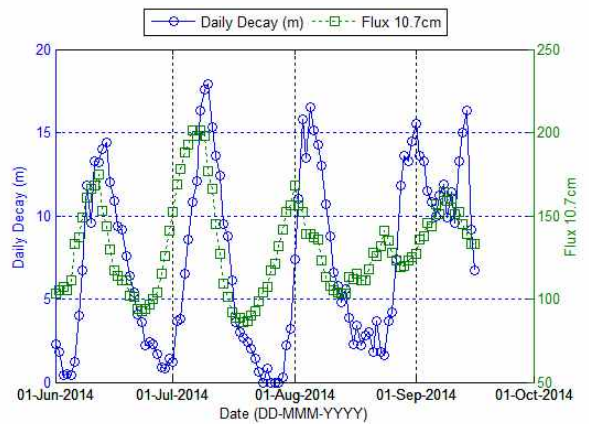


Fig. 5 KOMPSAT-5 Daily Decay with Solar Flux

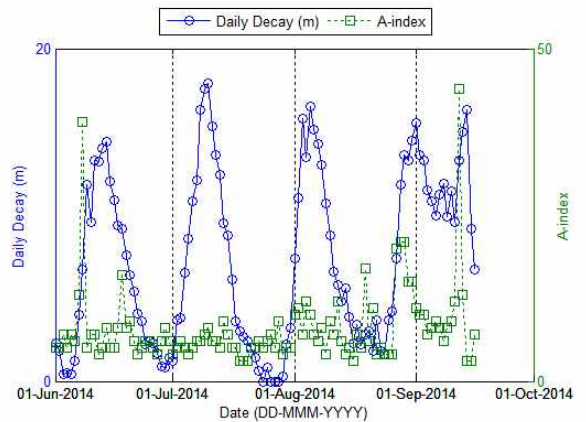


Fig. 6 KOMPSAT-5 Daily Decay with A index

태양활동이 정밀궤도결정에 끼치는 영향을 살펴보기 위해, 매일 구간 중첩을 통해 확인하고 있는 궤도 차이를 아리랑 3호의 비행 데이터를 이용하여 분석하였다. 중첩 방식(Overlapping Method)은 정밀궤도결정 시 일부 구간(6시간)이 중첩되는 두 개의 독립된 그리고 연속된 시점의 데이터를 앞/뒤 1시간씩의 데이터를 제외하고 중간 4시간에 대한 궤도 차이를 통해 비교 평가하는 방식이다. Fig. 7에 2013년 2월 25일부터 한 달 동안의 각 날짜에 대한 중첩구간에서의 궤도 차이를 위성의 반경(Radial) 방향, 진행(In-track)방향, 수직(Cross-track)방향, 3차원 거리(Range) 방향으로 나타내었다. 그림에서 태양플럭스와 지자기 활동이 높았던 3월 17일에 궤도차이가 많이 크게 나타났는데, 특히 증가한 대기항력의 영향으로 위성 진행방향(In-track)의 오차가 가장 두드러진다. 또한, 궤도차이가 요구정밀도인 8미터(3-sigma)보다 크게 나타났기 때문에, 정밀궤도결정에 사용되는 지자기 파라미터와 태양활동 파라미터를 업데이트하여 3월 16일-18일 구간을 다시 처리하여 궤도 차이를 8미터 이내로 줄일 수 있었다.

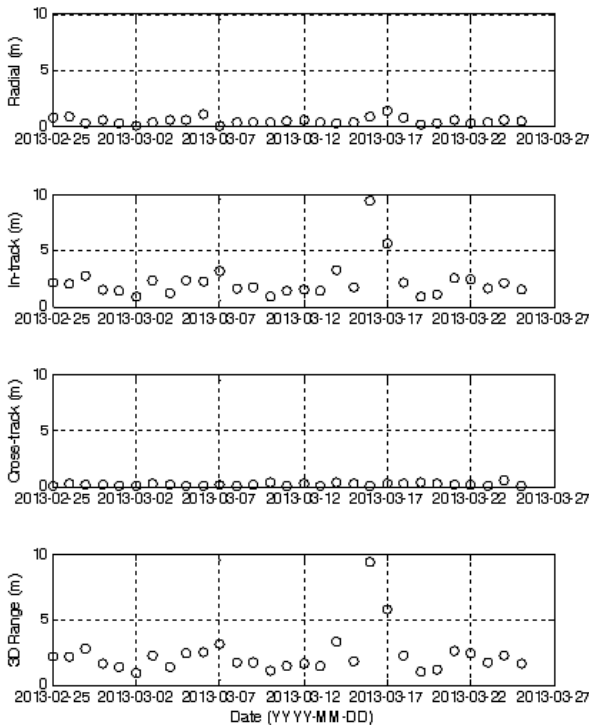


Fig. 7 Orbit Difference by using Overlapping Method

이는 궤도 계산 시 우주환경 파라미터 업데이트가 매우 중요함을 의미한다. 업데이트 전/후의 궤도데이터 차이는 Table 3과 4에 정리하였다. 궤도운영에 있어 태양활동(태양 플럭스 및 지자기 활동)은 위성의 궤도에 직접적인 영향을 끼친다. 따라서 궤도운영 측면에서는 사전에 예측 가능한 태양활동에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해서는 미국 우주기상예보센터에서 제공하는 다양한 정보를 조합하여 사용해야 할 것이다.

Table 3 Orbit Difference before Parameter Update

Date	Before Update			
	R(m)	I(m)	C(m)	Range(m)
2013-03-16	0.9	9.4	0.1	9.4
2013-03-17	1.4	5.6	0.3	5.8
2013-03-18	0.8	2.1	0.3	2.3

Table 4 Orbit Difference after Parameter Update

Date	After Update			
	R(m)	I(m)	C(m)	Range(m)
2013-03-16	0.4	4.3	0.4	4.3
2013-03-17	0.5	3.9	3.3	3.9
2013-03-18	0.6	2.1	2.4	2.2

### 2.3 궤도예측 정밀도

본 절에서는 궤도결정을 통해 추정된 항력계수를 궤도예측에 적용했을 때와 고정된 값(2.2)을 사용했을 때의 결과를 산출하여 후처리를 통해 얻은 정밀도 수미터 수준의 기준 궤도데이터와 각각 비교하였다. 궤도결정은 하루 동안의 관측자료를 이용하였고, 궤도예측에 사용하는 기산일은 관측자료의 끝 시점으로 설정하였다. 또한, 궤도예측 구간은 기산일로부터 1일 및 2일을 각각 고려하였다. Fig. 8은 궤도예측 시 대기항력 모델링에서 항력계수를 2.2로 고정된 값을 사용했을 때, 하루 및 이틀 동안의 궤도예측 정밀도를 3차원 거리 방향으로 나타내었다. Fig. 9는 궤도예측 시 항력계수를 궤도결정 단계에서 추정된 값을 매일 변화시켜가며 사용했을 때의 궤도예측 정밀도를 나타낸다. Fig. 9의 궤도예측 정밀도가 높은 이유는 궤도예측 단계에서 일자별로 변하는 태양활동 성분이 항력계수를 통해 반영되어 보다 실제 우주환경에 가까운 교란력 모델링



이 되었기 때문이다. Table 5는 가장 오차가 크게 나타나는 날짜에 대한 궤도예측 정밀도 비교를 각 방향으로 나타낸 것이다.

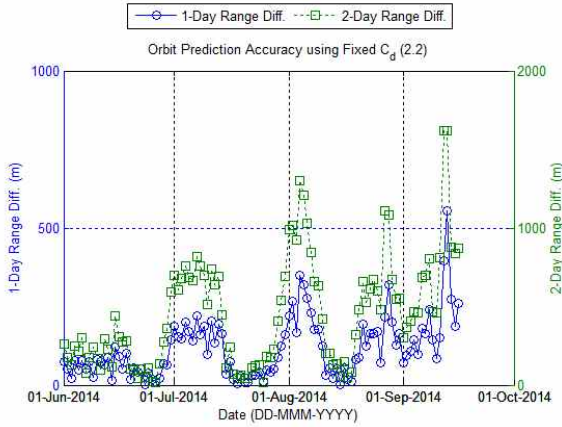


Fig. 8 Prediction Accuracy with Fixed Cd

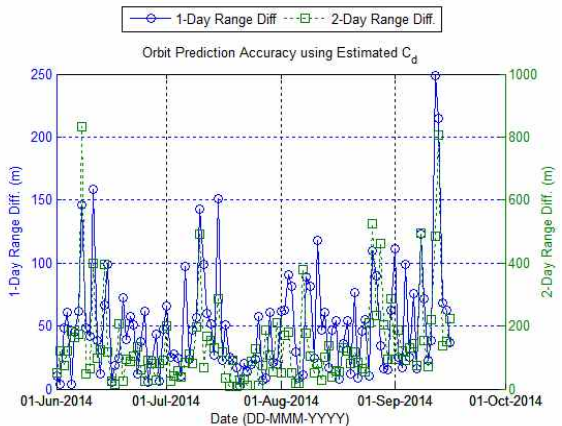


Fig. 9 Prediction Accuracy with Estimated Cd

Table 5 Summary of Orbit Prediction Accuracy

구분(Cd)	예측 구간	반경 (m)	진행 (m)	수직 (m)	거리 (m)
고정 값	1일	8.7	554.3	1.1	554.4
	2일	18.3	1621.1	1.4	1621.1
추정 값	1일	5.0	248.8	0.5	248.8
	2일	7.9	834.0	1.5	834.0

### 3. 결 론

본 논문에서는 우주환경 변화에 따른 저궤도위성의 궤도변화 특성을 살펴보기 위해 2013년 3월 발생한

지자기 폭풍에 따른 아리랑 위성 2호 및 3호의 궤도변화를 분석하였다. 또한, 고도 550km에서 운영되고 있는 아리랑 위성 5호의 2014년 비행데이터도 확인하였다. 우주환경을 예보하는 미국 우주기상예보센터의 자료를 기반으로 태양활동 및 지자기활동을 나타내는 인자를 소개하였고, 배포된 데이터에 대한 분석을 수행하였다. 위성의 궤도변화는 궤도결정을 통해 확인될 수 있는데, 하루 단위의 운영궤도결정을 통해 얻은 고도 감소 정도와 정밀궤도결정을 통해 확인 가능한 각 방향 성분별 궤도변화를 확인할 수 있었다. 또한, 태양활동과 연관되는 수치인 태양플럭스지수 및 지자기지수는 위성의 고도변화와 뚜렷한 상관관계가 있음을 확인하였다. 끝으로 궤도예측 과정에서 궤도결정을 통해 추정된 항력계수를 적용했을 때와 고정된 값을 사용했을 때의 결과를 후처리를 통해 얻은 정밀궤도데이터와 비교한 결과, 추정된 항력계수를 이용할 경우에 궤도예측 오차를 절반 수준으로 줄일 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김해동, 정옥철, 김은규, “아리랑 2호 초기운용 및 임무기간 중 궤도 분석”, 한국항공우주학회지, 38 권 9호, pp.914-924, 2010.
- [2] 박진영, 문용재, 김관혁, 조정석, 김해동, 김연환, 박영득, 이유, “강한 태양 및 지자기 활동 기간 중에 아리랑 위성 1호의 궤도변화”, Journal of Astronomical Space Science Vol. 24, No. 2, 2007.
- [3] NOAA Space Weather Scales
- [4] 한국천문연구원 태양우주환경 연구그룹
- [5] Oliver Montenbruck, and Eberhard Gill, Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications, Springer, 2001.
- [6] 김해동, 최해진, 김은규, 아리랑 1호 임무기간 3년 동안의 궤도변화 분석, 한국항공우주학회지, 제 31 권, 10호, 2003.
- [7] 정옥철, 임현정, 정대원, 김은규, 김학정, “다목적실용위성 3호 발사 후 초기 궤도 운영결과 분석”, 한국항공우주학회지 제 41권 제 4호, 2013.
- [9] 우용길, 김인수, 유철중, 장옥배, 통계의 이해, 학문사, 2000.