

우주물체 궤도수명 분석

성재동*, 김해동**

Orbital Lifetime Analysis of Space Objects

Jae-Dong Seong*, Hae-Dong Kim**

Abstract

In this paper, the lifetime of the artificial space objects in the LEO is analysed by using TLE data, which is provided by JSpOC. We observed the change of the number of space objects from 1957 and determined the reason of space debris generation. And then, we performed the analysis about present condition of space debris environment. The lifetime analysis includes a total of 11,792 artificial space objects and performed until the year 2050 by orbit propagation. We analyze the annual reentry frequency for the high RCS objects such as nonoperational satellites and rocket bodies, which have the possibility of earth ground impact through STK/Lifetime Tool for accurate and effective calculation. The results show that 9 payloads or rocket bodies will be decayed annually and 2 or 3 objects of total value have the possibility of ground impact. In addition, it is also shown that the 40% of a total analysed objects have the lifetime over 200 years.

초 록

본 논문에서는 JSpOC에서 제공하는 TLE 데이터를 이용하여 지구 저궤도 상에 존재하는 인공적인 우주물체의 궤도수명을 예측하였다. 이를 위해 1957년부터 현재까지 우주파편 개체수의 변화를 관찰하여 우주파편 생성의 요인과 현재 남아있는 물체들의 현황을 파악하였으며, 현재 지구 저궤도 상에 존재하는 총 11,792개의 물체에 대해 2050년까지 궤도전파를 수행하여 궤도수명을 분석하였다. 효율적인 계산을 위해 STK/Lifetime Tool을 사용하였으며, 재진입 시 지상에 낙하할 가능성이 있는 폐위성이나 로켓동체와 같이 질량 대비 단면적이 큰 물체에 대해 연간 재진입 빈도를 분석하였다. 분석 결과 2050년까지 매해 위성과 로켓동체는 약 9개가 재진입하며, 지상에 피해를 줄 수 있는 규모는 약 2-3개로 나타났다, 전체 분석 대상의 약 40%이상은 200년 이상의 궤도수명을 가지는 것으로 나타났다.

키워드 : 우주파편(space debris), 궤도 수명(orbital lifetime), 재진입(re-entry), 우주물체(space object)

접수일(2014년 5월 2일), 수정일(1차 : 6월 16일), 게재 확정일(2014년 7월 1일)

* 과학기술연합대학원대학교/skyiover77@naver.com

** IT융합기술팀 /haedkim@kari.re.kr

1. 서 론

1957년 스푸트니크 발사 이후 2013년까지 총 6,803개의 인공위성이 궤도상에 올라갔으며, 이중 2,957개는 지구 대기로 재진입하여 소각되거나 폐기궤도로 이동하였고 나머지 3,846개의 인공위성 중 현재 1,260개의 인공위성이 임무를 수행하고 있다.

한편, 인공위성을 궤도에 위치시키기 위한 로켓, 임무 수행 중 발생하는 물체, 오작동으로 인해 폭발하거나 충돌로 인해 발생한 인공적인 물체들을 통칭하는 우주파편은 지금까지 총 32,693개가 발생하였고, 현재 13,051개가 궤도상에 여전히 존재하고 있다[1].

우주파편은 지구 주위 궤도의 공간밀도를 증가시켜 추후 새로운 우주 임무에 부담을 가중시키고 있으며, 현재 임무를 수행중인 위성들을 위협하고 있다. 뿐만 아니라 노후 위성이나 대형 발사체 등 크기가 무겁거나 무게가 큰 우주물체의 경우 지구 대기로 재진입하는 과정에서 티타늄 탱크와 같이 내열성이 매우 강하며, 무게가 무거운 물체들의 일부 잔해가 지상으로 떨어지는 문제도 발생하고 있다. 다행히 지금까지 지상으로 낙하한 대부분의 물체들은 해상이나 극지방, 인구밀도가 매우 낮은 지역으로 떨어졌으나 만약 인구밀도가 높은 대도시에 떨어질 경우 많은 사상 피해를 낼 가능성이 크다. 특히 궤도 경사각이 30도 이상인 물체들의 경우 미약하지만 한반도에 떨어질 가능성도 엄연히 존재하기 때문에 우주물체에 대한 궤도수명을 예측하고, 나아가 낙하지점을 예측하는 연구들이 필요하다.



그림 1. 지상으로 낙하한 우주물체

본 연구에서는 이와 같은 상황에서 선행연구

차원으로 현재 JSpOC(Joint Space Operation Center)에서 제공하는 TLE(Two Line Element) 데이터에 포함된 저궤도 상의 모든 물체의 궤도수명을 SGP4(Simplified General Perturbation) 궤도전파기를 이용하여 예측하고, 근 시일 내에 재진입이 예상되는 물체의 수, 종류 등을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 배경 및 선행연구

지구 주위 궤도를 돌고 있는 물체들 중 본 연구에서 고려되는 범위는 지구 저궤도에 존재하는 물체들로서 고도가 2,000km 이하이거나 주기가 약 128분 이내인 인공적인 우주물체만을 포함하였다. 저궤도 이상의 고도에 존재하는 물체들은 자연적으로 대기에 재진입하여 소각되는 시간이 매우 길기 때문에 현실적으로 사용빈도가 낮은 궤도로 천이하여 방치함으로써 폐기하는 것이 일반적이다.

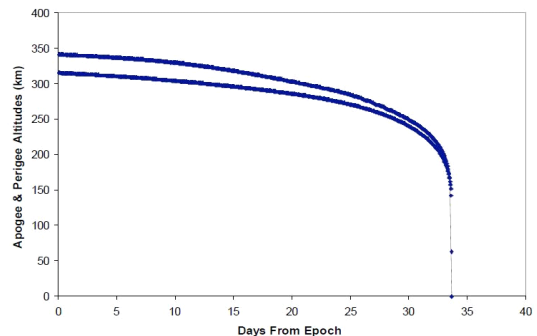


그림 2. 시간에 따른 원지점과 근지점의 고도

지구 저궤도에 존재하는 물체가 지구 대기로 재진입하는 가장 큰 이유는 대기저항으로 인한 영향이다. 일반적으로 고도가 상승함에 따라 대기밀도는 굉장히 희박해진다. 단적인 예로 아리랑 2호 위성의 임무 고도인 685km에서의 대기밀도는 약 $1.57E-14 kg/m^3$ 으로 굉장히 낮음을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 대기저항에 의해

궤도수명이 영향을 받는 이유는 궤도운동을 하는 물체의 속도가 상당히 높기 때문이다. 저궤도 상의 물체는 초속 7.5~7.8km/s의 매우 빠른 속도로 궤도를 돌고 있기 때문에 지속적으로 대기저항을 받게 될 경우 서서히 고도가 낮아지며, 고도가 낮아질수록 이전 고도에 비해 상대적으로 더 많은 대기가 존재하기 때문에 고도의 하강률은 그림 2처럼 대기저항에 노출되는 시간이 길어짐에 따라 점점 더 커진다.

이와 같은 대기저항에 영향을 주는 요소는 식(1)과 같이 크게 단면적과 질량, 물체의 속도, 대기밀도로 나눌 수 있다. A 는 물체의 속도 방향에 대한 단면적, ρ 는 물체의 현재 고도에 대한 대기밀도, v 는 물체의 운동 속도, m 은 물체의 무게를 의미한다.

$$a_D \sim \rho \frac{A}{m} v^2 \quad (1)$$

지금까지 인공위성의 궤도수명을 예측하기 위해 많은 연구들이 이루어져왔다[2, 3, 4, 5]. 궤도수명을 예측하기 위해서는 설정한 고도 이하가 될 때까지 궤도전파를 수행하여 결과를 얻어내는 방법이 가장 널리 사용되어 왔으며, 이를 위해 정밀한 섭동모델에 대한 연구들이 수행되었다. 또한 자국의 인공위성의 경우 위에서 언급한 단면적과 질량, 물체의 속도에 대한 정보를 비교적 정밀하게 얻을 수 있기 때문에 주로 대기밀도에 대한 연구에 치중되어 왔다.

대기밀도는 태양의 활동과 지구자기장에 큰 영향을 받기 때문에 태양으로부터 나오는 F10.7 cm의 파장과 일별 지구자기장 계수를 측정하여 이를 대기모델에 적용하는 연구들이 선행되었다. 이와 더불어 Jacchia 1970, 1971, MSIS 1986, NRL MSISE 2000 등 다양한 대기모델을 적용하여 궤도수명의 차이를 분석하는 연구들이 수행된 바 있다.

반면 우주파편의 궤도수명을 예측하는 연구는 활발히 이루어지지 않았다. 이는 최근에서야 우주파편의 재진입으로 인한 피해를 본격적으로 고려하기 시작한 영향도 있으며, 앞서 대기저항 계

산에 필요한 크기나 질량에 대한 정밀한 데이터가 부재하여 예측에 어려움이 있기 때문으로 판단된다.

그림 3은 동일한 환경에서 질량 대비 단면적의 수치만을 변경했을 경우 궤도수명의 변화를 보여준다. 이는 태양활동이나 지구 자기장 예측에 대한 대략적인 오차 10~15% 수준이나 대기모델 선택에 따른 잠재적인 오차 5~10%보다 훨씬 큰 차이로써 단면적이나 질량에 대한 정보의 중요성을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 지구 주위 궤도에 존재하는 우주물체들의 단면적과 질량 정보를 얻기 위해 TLE데이터를 이용하였으며, SGP4 궤도전파기를 사용하여 궤도 수명을 계산하였다. TLE 데이터 역시 직접적인 단면적 및 질량에 대한 정보를 제공하지 않지만 TLE에 포함된 B* Drag Term을 이용하여 단면적 대비 질량비를 얻어낼 수 있고, 식(1)에 적용함으로써 적절한 결과를 얻을 수 있다.

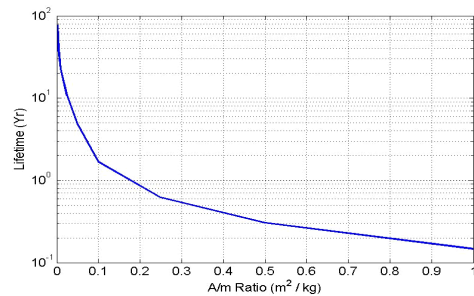


그림 3. 질량 대비 단면적에 따른 궤도수명

2.2 우주물체 증가 추이 분석

본격적으로 우주물체의 궤도수명을 분석하기 전에 1957년 이후 지금까지 우주물체의 증가추이를 분석하였다. 이를 위해 Celestrak.com에서 'Bulk SATCAT Raw data'를 획득하였으며, 이 데이터는 1957년부터 현재까지 카탈로그 된 39,497개 물체의 발사시기, 발사국가, 발사장소, 개략적인 궤도, NORAD ID 등을 포함하고 있다. 이를 기반으로 시간에 따른 물체들의 증가추이를

그림 4와 같이 나타내었다.

그림 4에서 파란색 선은 지구 주위 궤도로 발사되어 NORAD(North American Aerospace Defense Command) 카탈로그에 포함된 물체를 의미하고, 이들 중에서 지구 대기 중으로 재진입하여 소각되거나 지상으로 떨어진 물체는 붉은 선으로 표시되어 있다. 이 두 수치의 차이가 바로 현재 궤도상에 존재하는 물체의 수로 초록색 선과 같다.

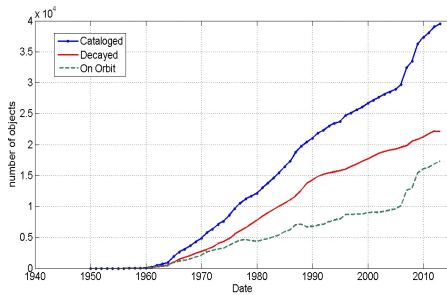


그림 4. 시간에 따른 우주물체의 증가추이

그림 4를 보면 우주개발이 시작된 지 얼마 되지 않은 시점에도 카탈로그 된 물체의 수가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 초기단계의 우주개발 과정에서 발생한 임무 실패에 기인한 것으로 표 1은 1960년대부터 2009년까지 100개 이상의 우주파편을 생성한 주요 폭발 이벤트를 나타낸다.

표 1에서 볼 수 있듯이 우주개발 초창기에는 성공적으로 위성을 궤도상에 안착시켰으나 보수적인 임무설계로 인해 발사체의 잔여연료가 생기고, 이에 외부의 충격이나 자체적인 결함으로 인해 폭발하는 이벤트가 다수 존재하였다. 현재 IADC(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)는 우주파편 생성 억제를 위해 임무가 끝난 모든 우주 물체의 연료나 전력 등 에너지원을 모두 방출하거나 소진해야 한다는 규정을 만들어 이를 준수하도록 권장하고 있다.

또한 표 1에는 비록 2건 밖에 없지만 표 1에 포함되지 않은 이벤트의 상당수는 자폭으로 인한 것으로 나타났다[6]. 이는 우주개발 경쟁으로 인

해 당시 최신 기술이 반영되거나 군사용 위성의 경우 궤도상에서 오작동을 일으켜 운영이 더 이상 불가능할 때 기술을 타 국가에 노출시키지 않기 위해 스스로 폭발하는 경우로써 특히 COSMOS 위성의 경우 스스로 폭발하여 우주파편을 생성하는 이벤트가 많았다. 이처럼 스스로 폭발하여 우주파편을 양산하는 것에 대해 IADC에서는 최대한 고도를 낮추어 폭발파편의 궤도수명이 25년 이내가 되게 하도록 권고하고 있다.

표 1. 주요 폭발 이벤트

Name	Date	Debris	Assessed
TRANSIT4A R/B	1961.0	296	Propulsion
OV2-1/LCS2 R/B	1965.10	473	Propulsion
OPS 7613 R/B	1969.10	261	Unknown
NIMBUS 4 R/B	1970.10	373	Unknown
LANDSAT1 R/B	1975.05	226	Propulsion
LANDSAT2 R/B	1976.02	207	Propulsion
COSMOS 844	1976.07	248	Self-Destruct
LANDSAT3 R/B	1981.01	210	Propulsion
COSMOS 1275	1981.07	310	Battery
P-78 (SOLWIND)	1985.09	285	Propulsion
SPOT1 / VIKING R/B	1986.11	489	Propulsion
NIMBUS 6 R/B	1991.05	268	Propulsion
COSMOS 2227 R/B	1992.12	226	Propulsion
STEP II R/B	1996.07	713	Propulsion
CBERS-1/SACI-1 R/B	2000.05	345	Propulsion
TES R/B	2001.11	346	Propulsion
FENGYUN 1-3	2007.01	2087	Self-Destruct
Iridium 33/ Cosmos 2251	2009.03	2192	Collision

2000년대 후반에서도 우주물체의 개체수가 가파르게 증가함을 볼 수 있는데, 이는 2007년 중국의 ASAT(Anti-Satellite weapon)로 인해 발생한 Fengyun 1-C의 폭발파편과 2009년 미국의 Iridium 33 위성과 러시아의 COSMOS 2251 위성의 충돌로 생긴 파편 때문이다. 이는 그림 5에서도 확인할 수 있다. 그림 5는 해마다 발생하는 우주물체, 폐기물체를 나타내며, 200개 이상의 폭

발 이벤트(Major Breakup Event)와 400개 이상의 폭발 이벤트(Extremely Serious Event)를 보여 준다. 이를 통해 폭발 이벤트가 우주물체의 증가에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

1990년대까지의 폭발 이벤트는 주로 발사체나 위성에서 발생하지만 상대적으로 임무고도가 낮았기 때문에 폭발로 인해 우주파편이 생성되더라도 비교적 빠른 시일 내에 대부분의 물체가 지구 대기로 재진입하여 소각되었으나 2000년대 이후 발생한 2건의 폭발 이벤트는 임무고도가 700~800km 이기 때문에 대부분의 폭발 잔해가 여전히 궤도상에 머무르고 있는 것을 확인할 수 있다.

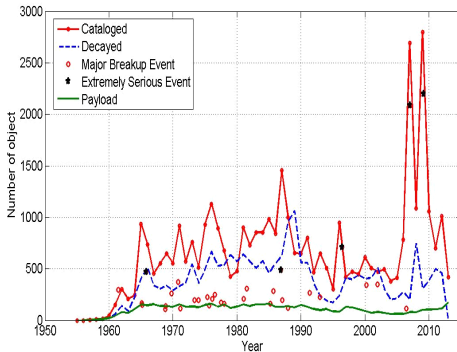


그림 5. 연도별 우주물체 생성 및 폐기 추이와 주요한 폭발 이벤트

2.3 저궤도 우주물체의 궤도수명 분석

본 연구에서는 저궤도 상에 존재하는 우주물체에 대한 궤도수명 예측을 위해 TLE 데이터를 이용하였다. TLE 데이터는 지구 주위 궤도를 돌고 있는 10cm 이상의 물체의 궤도를 파악할 수 있는 가장 범용적인 데이터이며, B* Drag Term을 통해 물체의 단면적 대비 질량 정보를 파악할 수 있다. TLE 데이터를 이용하여 우주물체의 궤도수명을 분석하기 위해 SGP4 궤도전파기를 사용하였으며, 물체의 질량 대비 단면적의 정보는 TLE 데이터에 포함된 B* Drag Term을 적용하였다.

TLE 데이터를 이용하여 궤도전파를 수행하기 위해 SGP4 궤도전파기를 사용해야 한다. SGP4

궤도전파기는 지구중력장, 태양 복사압, 태양과 달의 인력, 대기저항에 대한 모델을 포함하고 있다. 지구 중력장에 대한 섭동력은 식 (2)~(4)와 같다. Ω 는 승교점 경도, n 은 평균운동(mean motion), i 는 궤도경사각, w 는 근지점 인수, R 은 지구반지름, e 는 이심률, J_2 는 zonal harmonics, a 는 장반경을 각각 의미한다.

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2} \frac{J_2 R^2}{p^2} \bar{n} \cos i \quad (2)$$

$$\dot{w} = \frac{3}{2} \frac{J_2 R^2}{p^2} \bar{n} \left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i \right) \quad (3)$$

$$\bar{n} = \sqrt{\frac{\mu}{a_0^3}} \left[1 + \frac{3}{2} \frac{J_2 R^2}{p^2} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

태양 복사압에 대한 모델은 식 (5)~(8)과 같다. W 는 복사 플럭스, S_p 는 태양 복사압 계수를 의미한다.

$$\dot{e} = \frac{3\sqrt{1-e^2}}{2na} T_p \quad (5)$$

$$\dot{i} = -\frac{3W e \cos w}{2na\sqrt{1-e^2}} \quad (6)$$

$$\dot{\Omega} = -\frac{3W e \sin w}{2na\sqrt{1-e^2} \sin i} \quad (7)$$

$$\dot{w} = -\frac{3\sqrt{1-e^2}}{2nae} S_p - \dot{\Omega} \cos i \quad (8)$$

달과 태양의 인력에 대한 모델은 식 (9), (10)과 같다. i_3 는 달 혹은 태양의 경사각, n_3 는 평균운동을 의미한다.

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{8} \frac{n_3^2 (1+1.5e^2)}{n \sqrt{1-e^2}} \cos i (3\cos^2 i_3 - 1) \quad (9)$$

$$\dot{w} = \frac{3}{4} \frac{n_3^2 (1-1.5\sin^2 i_3)}{n \sqrt{1-e^2}} \left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i + \frac{e^2}{2} \right) \quad (10)$$

마지막으로 대기저항에 대한 모델은 식 (11)과

같다. C_D 는 항력계수, m 은 질량, A 는 단면적, ρ 는 대기밀도를 각각 의미한다.

$$\dot{a} = -na^2\rho C_D \frac{A}{m} \quad (11)$$

본 연구에서는 우주물체의 궤도수명을 분석하기 위해 2013년 12월 23일 기준으로 SATCAT (SATellite CAtalog) 데이터를 이용하여 저궤도 상에 존재하는 물체 중에서 운용 중인 물체를 제외한 11,792개를 분류하였으며, 분류된 물체들의 가장 최신 TLE 데이터를 Space-track.org 홈페이지로부터 획득하였다.

획득한 TLE 데이터를 AGI社 STK/Lifetime 툴에 적용하여 물체들의 궤도수명을 계산하였고, 시간적 효율성을 위해 MATLAB과 STK의 Active X 인터페이스를 이용하여 분석을 수행하였다.

그림 6과 같이 분석이 시작되면 MATLAB과 STK의 연동이 우선적으로 수행되며, 지정된 STK의 시나리오를 MATLAB에서 읽어온다. 이후 11,792개 물체의 정보가 포함된 데이터베이스에서 분석하려는 특정 물체의 정보를 획득하고, 이를 STK/ Lifetime Engine에 적용하여 결과를 얻어낸다. 이 과정을 총 11,792회 반복하여 물체들의 궤도수명 결과를 획득하였다.

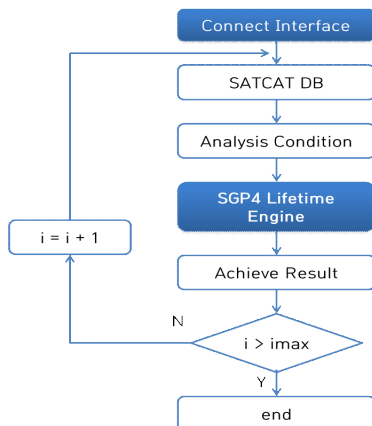


그림 6. 궤도수명 분석을 위한 MATLAB-STK 연동

결과 고찰에 앞서 본 연구에서 사용한 궤도수명 계산방법에 대한 방법론적 검증을 수행하였다. 현재 JSpOC(Joint Space Operation Center)에서는 현재 시점을 기준으로 약 3개월 이내에 지구 대기에 재진입하는 물체들 예측하여 예상되는 자연 폐기 시점에 대한 정보를 제공하고 있다. 이를 이용하여 JSpOC에서 제시한 164건의 예측 결과와 동일한 물체에 대한 STK/Lifetime의 결과를 비교하였다.

그림 7은 JSpOC의 결과와 STK/Lifetime의 결과를 비교하여 나타난 오차를 보여주며, 대부분 10일 이내의 오차를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 STK의 SGP4 Lifetime Tool은 비교적 간단한 모델만을 포함하고 있으며, 특히 대기모델의 경우 태양의 활동이나 지구 지자기의 영향을 고려하지 않은 간단한 모델을 사용하기 때문에 일부 경우에 대해 다소 오차가 발생하는 것으로 판단되나 자연폐기 추세를 예측하고 분석하는데 큰 어려움은 없을 것으로 판단된다.

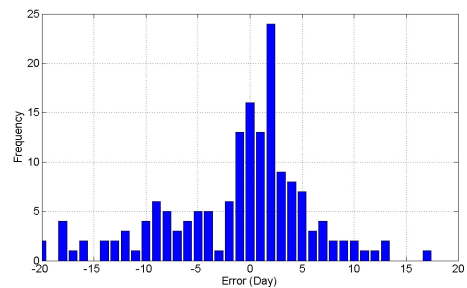


그림 7. JSpOC의 자연 폐기시점과 STK/Lifetime 결과의 오차

그림 8은 11,792개의 궤도수명을 분석한 결과로 2050년까지의 결과이다. 2050년 이내에 지구 대기로 재진입하는 물체는 총 5,097개이며, 2014년 이후 점차 재진입하는 물체의 수가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 미래의 발사계획을 반영하지 않았기 때문으로 앞으로 지속적인 우주개발이 이루어질 경우 해마다 약 500여개의 물체가 대기로 재진입할 것으로 예상된다.

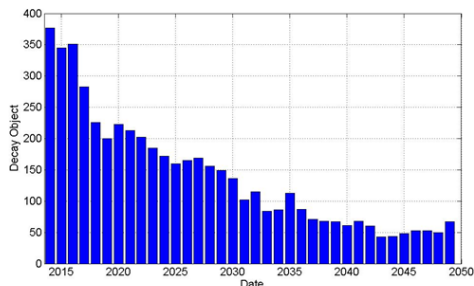


그림 8. 우주물체 궤도수명 예측 결과

그림 9는 그림 8에서 나타난 우주물체 중 위성이나 발사체와 같이 질량이나 부피가 커 지상으로 낙하할 가능성이 있는 물체들의 궤도수명 분포를 나타낸다.

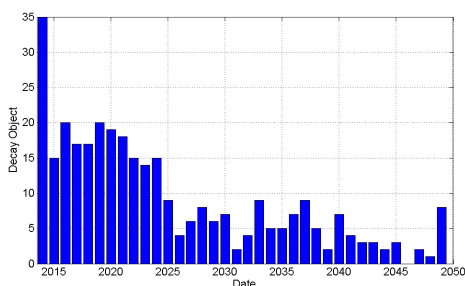


그림 9. 위성 및 발사체의 궤도수명 분포

2025년까지 해마다 평균 20개의 위성이나 발사체가 지구대기로 재진입하는 것을 볼 수 있고, 추후 우주임무를 수행함에 따라 이 수치는 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 지상에 낙하하여 피해를 줄 가능성이 있을 경우 적절한 폐기기동에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

2013년을 기준으로 그림 5의 궤도수명 결과와 그림 8의 궤도수명 예측치를 결합하면 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 2000년대 이전 자연 폐기된 물체들은 주로 로켓동체나 낮은 고도에서 발생한 물체들이기 때문에 폐기빈도가 상대적으로 높게 나타나지만 2000년대 후반에는 임무고도 자체가 평균적으로 높기 때문에 임무 수행 직후에 바로 자연 폐기되는 것이 아니라 70년대 혹은 80

년대에 발사한 물체들이 지속적으로 폐기되는 결과를 나타내었다.

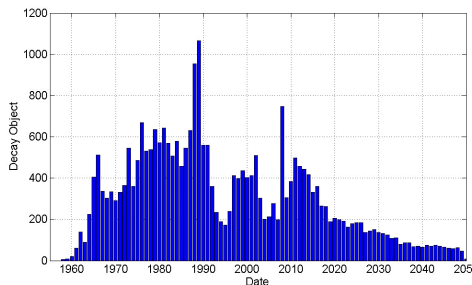


그림 10. 우주물체의 자연폐기 빈도

표 2는 2050년까지 지구대기로 자연 폐기되는 물체들의 수를 나타낸다. 위성과 발사체는 2050년까지 매해 평균 9개가 자연 폐기되는 것으로 나타났으며, 발사체보다 위성의 비중이 더 높음을 알 수 있다. 일반적으로 위성의 경우 발사체에 비해 구조가 복잡하며, 질량 대비 단면적이 작기 때문에 소각되지 않은 잔해가 지상으로 낙하할 가능성이 높다. 따라서 지상에서 제어가 가능하다면 항력을 최대한 발생시킬 수 있도록 궤도를 유도하여 지상 낙하에 대한 위험을 줄이는 전략들이 필요하다.

표 2. 2014년~2050년에 자연 폐기되는 물체의 수

	Satellite Only	R/B Only	Satellite + R/B	All
per Year	5	3.71	8.71	134.13
Total	190	141	331	5097

※ R/B : Rocket Body (발사체 동체)

표 3은 2014년에 자연 폐기가 예상되는 위성을 나타낸다. 특히 COSMOS 위성은 RCS(Radar Cross Section)를 미루어보아 규모가 상당히 큰 위성이며 발사시기로부터 30년 이상 지났기 때문에 지상에서 적절한 폐기기동을 수행하기 어려울 것으로 판단된다. 또한 궤도 경사각이 38도 이상

으로 한반도에 추락할 가능성이 존재하기 때문에 폐기 경로를 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다. COSMOS 위성 이외의 물체들은 큐브셋 규모의 위성으로 대기로 재진입하면 잔해가 거의 남지 않을 것으로 판단된다.

표 3. 2014년 자연 폐기가 예상되는 위성

Name	Launch	H_p (km)	H_a (km)
	i (deg)	RCS (m^2)	Predicted Decay Date
COSMOS 1220	1980-11-04	355	399
	64.95	10.37	2014-02-14
PW SAT	2012-02-13	293	1007
	69.47	0.04	2014-05-02
TIROS 2	1960-11-23	373	392
	48.51	0.89	2014-05-19
GOLIAT	2012-02-13	295	1051
	69.47	0.02	2014-06-04
COSMOS 1242	1981-01-27	380	383
	81.15	8.38	2014-06-10
ROBUSTA	2012-02-13	293	1066
	69.47	0.04	2014-06-17
UNICUBE SAT	2012-02-13	294	1077
	69.48	0.02	2014-06-24
COSMOS 1151	1980-01-23	393	401
	82.48	8.80	2014-07-24
COSMOS 1400	1982-08-05	403	407
	81.12	7.83	2014-07-25
COSMOS 1441	1983-02-16	413	416
	81.07	8.56	2014-09-19
COSMOS 1939	1988-04-20	414	422
	97.26	5.81	2014-10-09
CHBIS-M	2011-12-21	444	459
	51.64	0.41	2014-10-29

한편 2050년 이내에 자연 폐기되는 5,097개를 제외한 나머지 물체들의 궤도수명은 그림 11과 같고, 2200년 이후까지 계속 생존하는 우주물체는 4,356개로 나타났다. 이와 같이 궤도수명이 긴 물체들은 주로 저궤도 영역에서도 높은 고도에 위치하기 때문에 대기저항으로 인한 항력을 적게

받는다. 단적인 예로 1959년 2월에 발사된 Vanguard 2 위성의 경우 근지점의 고도가 554km, 원지점의 고도가 2953km이기 때문에 궤도수명이 앞으로 200년 이상 남는 결과를 가져왔다.

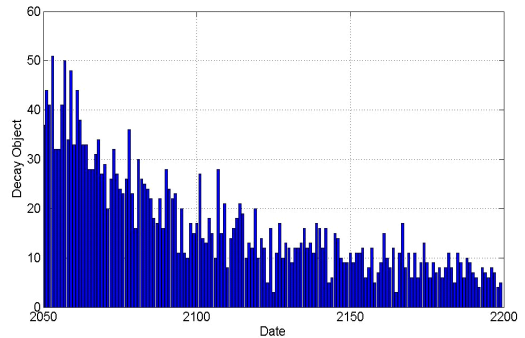


그림 11. 2050년부터 2200년에 자연 폐기가 예측되는 우주물체의 수

그림 12는 본 연구에서 사용된 모든 우주물체의 근지점과 원지점에 대한 분포를 나타낸다. 붉은 색에 가까울수록 많은 우주물체가 분포하고 있음을 의미하며, 근지점과 원지점의 고도가 800km인 지점에 많은 우주물체가 분포하고 있으며, 근지점의 고도가 1,400km, 원지점의 고도가 1,600km인 지점에도 일부 물체가 분포하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 물체들은 대기저항을 거의 받지 않기 때문에 궤도수명이 매우 길며, 근 시일 내에 자연 폐기되는 물체의 수가 예상보다 작게 나타난 이유이다.

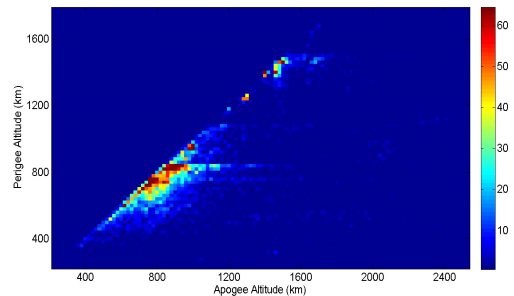


그림 12. 우주물체의 근지점과 원지점에 따른 분포

3. 결 론

본 연구에서는 현재 저궤도 상에 존재하며, 임무수행이 중단된 모든 물체의 궤도수명을 분석하였다. 분석을 위해 저궤도 영역에 존재하고 운영 중인 위성을 제외한 11,792개의 물체에 대한 최신 TLE 데이터를 획득하였으며, 이를 STK/Lifetime tool을 이용하여 각각에 대한 궤도수명을 분석하였다.

분석결과 과거의 폐기 추세에 비해 다소 작은 경향을 보였으나 이는 미래의 발사임무를 고려하지 않았고, 최근 사용하는 임무 고도 자체가 1980년대 이전에 사용하는 임무 고도에 비해 높기 때문에 평균적으로 궤도수명이 늘어난 결과로도 볼 수 있다.

2050년까지 매해 위성이나 발사체는 약 9개 정도로써 지상에 피해를 줄 수 있을 정도의 규모는 2~3개 정도로 분석된다. 특히 발사일로부터 수십 년이 지난 노후 대형위성의 경우 지상에서 제거가 불가능하기 때문에 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

반면 분석 대상 물체의 40% 이상은 최소 200년 이상의 궤도수명을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 저궤도 영역 중에서도 매우 높은 고도에 존재하는 물체가 많고 단면적이 작아 대기저항을 적게 받는 폭발파편과 같은 물체들이 다수 존재하기 때문이다.

본 연구에서는 우주물체에 대한 단면적이나 무게에 대한 정보를 TLE에 포함된 Drag Term을 이용하여 궤도수명을 분석하였고, 따라서 정밀한 대기모델이 포함된 궤도전파를 수행하지 못한 한계가 있다. TLE 데이터를 이용하기 위해 SGP4 궤도전파기를 사용해야만 하고, 이 경우 태양활동에 대한 대기밀도의 변화나 지구지자기에 따른 영향 또한 고려하지 못하였기 때문에 잠재적 오차가 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구를 통해 근시일내에 지구대기로 재진입하는 물체들의 종류, 비율, 횡수와 같은 추세에 대한 분석결과를 이용하여 우주물체의 폐기상황을 파악할 수 있는데 의미가 있다고 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. <http://www.space-track.org>
2. B. J. Naasz., K. Berry., K. Schatten, "Orbit Decay Prediction Sensitivity to Solar Flux Variations", AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, pp. 223-241, Mackinac, 2008.
3. J. Lafontaine., S. C. Garg, "A Review of Satellite Lifetime and Orbit Decay Prediction", UTIAS Review, No. 43, 1980.
4. L. N. Rowell, "Satellite Lifetimes in Nearly Circular Orbits for Various Earth-Atmosphere Model", Technical Memorandum, 1963.
5. J. Woodburn., S. Lynch, "A Numerical Study of Orbit Lifetime", AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 2005.
6. D. O. Whitlock, "History of On-Orbit Satellite Fragmentations 13th Edition", NASA Orbital Debris Program Office, 2004.