J. Astron. Space Sci. 24(2), 135–144 (2007)

우주파편에 의한 저궤도 위성의 손상확률 분석

이재은[1], 박상영[1†], 김영록[1], 최규홍[1], 김응현[2], 김규선[2]
[1]연세대학교 천문우주학과
[2]한국항공우주연구원

ANALYSIS OF DAMAGE PROBABILITY FOR COLLISION BETWEEN SPACE DEBRIS AND A SATELLITE IN LOW-EARTH ORBIT

Jae-Eun Lee[1], Sang-Young Park[1†], Young-Rok Kim[1], Kyu-Hong Choi[1], Eunghyun Kim[2], and Gyu-Sun Kim[2]
[1]Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
[2]Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea
E-mail: jelee@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received May 3, 2007; Accepted May 18, 2007)

요 약

우주파편의 개수가 증대되면서 운용 중인 인공위성이 받을 수 있는 위험이 커지고 있다. 이 연구는 2007년 1월 11일에 발생한 중국의 FengYun 위성 격추사건과 관련하여 발생한 우주파편이 다목적 실용위성 3호에 미치게 될 영향을 분석하는 것이 목적이다. 폭발 후 발생한 FengYun 위성 파편의 일부 관측자료를 바탕으로, 크기가 작아 관측이 안 되는 파편들의 질량에 대한 생성개수를 추정하였다. 이를 토대로, FengYun 위성파편에 대한 공간밀도와 플럭스를 계산하였다. 또한 FengYun 위성 파편과 다목적실용위성과의 충동확률 및 손상확률을 분석하였다. 이 논문에서 개발된 모델을 사용하여 앞으로 우리나라에서 만들어질 위성들의 우주파편에 대한 위험도를 해석할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Space environment becomes more hazardous for satellite because of increasing number of space debris. This research is to analyze collision hazards between KOMPSAT 3 in low-earth orbit and space debris generated by the explosion of FengYun satellite on the January 11, 2007. Based on the observed data of the space debris from FengYun satellite, the mass and number distribution of the debris are estimated including undetectable debris from the explosion of FengYun satellite. The spatial density and flux for the space debris can be calculated according to size. This study also brings out the analysis for the assessment of collision probability and damage probability. The algorithm developed in the current paper can be used to estimate the level of risk due to space debris for the satellites that will be launched in the future.

Keywords: space debris, collision probability, satellite damage

†corresponding author

1. 서 론

현재 우주개발 선진국인 미국과 유럽 등에서는 1957년 최초의 위성인 스푸트니크(Sputnik) 1호를 발사한 이후로 통신, 첩보, 실험 등을 목적으로 하는 다양한 위성들을 개발하고 궤도에 발사해오고 있다. 이러한 위성의 발사는 그 수가 매년 급증하고 있는데 현재 지구 궤도 내에는 9000개 이상의 위성이 지구 상공을 선회하고 있다. 그러나 이 가운데 926개(약 9.74%)만이 정상적인 운용을 하는 위성이고 나머지는 우주폐기물이다(2006년 1월)[1]. 1960년대부터 면밀히 검토되었던 우주폐기물의 위험성은 우주시대로 접어든 오늘날 중요한 관건이 되고 있고 이미 우주 개발 선진국들에서는 우주폐기물에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

우주파편의 개수가 기하급수적으로 많아지면서 인공위성이 받을 수 있는 손상에 대한 위험도가 증대되고 있다. 정교한 광학탑재체나 태양 전지판, 위성체 외부의 열 제어 장치의 표면과 같이 손상을 입기 쉬운 부분이 궤도상의 파편에 의해서 손상된다면, 위성의 기능 수행에 치명적인 문제가 생길 수 있다. 이러한 상황에서 지구 저궤도의 우주폐기물의 현황을 파악하고, 우주폐기물들과 위성의 충돌 가능성을 분석하여 위성이 받을 수 있는 손상에 대해 예측하고 연구하는 것은 위성의 효율적인 임무수행을 위해 반드시 필요하다.

각국의 우주기관들은 현재와 미래의 우주폐기물 환경에 대한 특성과 위험도를 기술하기 위한 모델을 개발한 후 지속적으로 발전시키고 있다. ORDEM(Orbital Debris Engineering Models)[2]과 MASTER(Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model)[3]은 대표적 엔지니어링 모델로서 위성들이 우주폐기물과의 충돌위험을 판단하는데 사용될 수 있다. 이러한 모델들을 바탕으로 우리나라에서도 지구 저궤도의 우주폐기물 현황을 파악하여 우주폐기물과 위성간의 충돌가능성을 분석하고 손상정도를 예측하는 모델을 개발하였다(박상영 외 2006, 2007). 이 모델은 위성의 정보와 환경정보를 입력받아 그러한 정보에 해당하는 우주폐기물의 공간밀도와 플럭스를 구하여 최종적으로 충돌확률과 손상정도를 예측한다.

FengYun 1C 위성은 중국에 의해 1999년 발사되어 고도 805 ~ 864km에서 활동하다가 수명을 다했다. 중국은 2007년 1월 11일 쓰촨(四川)성 시창(西昌) 우주센터에서 위성 공격용 탄도미사일을 발사하여 FengYun 1C 위성을 파괴시키는 실험에 성공하였다. 저궤도에서 운용되고 있는 위성들에게는 이러한 폭발에 의한 영향력을 무시할 수 없는 상황이다. 이 연구에서는 개발된 모델(박상영 외 2006, 2007)을 사용하여 이번 폭발로 인해 발생한 위성파편의 현황을 파악하고 이러한 파편들과 다목적 실용위성의 충돌 가능성을 분석하여 위성이 받을 수 있는 손상에 대해 예측하고자 한다. FengYun 위성이 폭발 후 발생한 위성파편의 현황을 Satellite Tool Kit(STK) 홈페이지를 통해 얻은 북미우주방어사령부(NORAD: North American Aerospace Defence Command)의 관측자료로 파악하고, 관측될 수 없는 크기가 작은 파편들에 대해서는 Rossi(2005)의 식을 이용하여 파편들의 질량에 대한 생성개수를 추정하였다. 위성파편과 다목적실용위성과의 충돌확률과 위성의 주요부위에 우주폐기물이 충돌했을 때의 손상정도는 운동하는 기체이론 및 포아송(Poisson) 확률분포와 손상방정식을 이용하여 분석하였다.

---

[1] http://www.satellit.yonsei.ac.kr/YSSDB

[2] http://www.orbitaldebris.jsc.nasa

[3] http://www.esa.int/SPECIALS/ESOC

표 1. 직경 10cm 이상되는 우주물체의 개수.

고도(km)	FengYun 위성 파편개수 (2007년 2월 7일 자료)	우주물체 개수 (2006년 자료)
200-250	2	15
250-300	1	23
300-350	7	29
350-400	3	67
400-450	16	76
450-500	17	141
500-550	15	297
550-600	19	286
600-650	33	304
650-700	37	366
700-750	52	376
750-800	69	491
800-850	138	598
850-900	107	408
950-950	0	453
950-1000	0	538
1000 이상	1	
	517	4468
궤도정보 없음	131	

2. FengYun 위성 폭발 후 궤도파편 현황

2.1 관측결과 분석

FengYun의 폭발이후 발생한 위성파편의 현황을 파악하기 위해 STK 홈페이지에서 NORAD의 관측 자료를 얻었다. NORAD에서는 전 세계적으로 5개의 관측소로 이루어진 위성광학 추적 및 감시망을 구축하여 전 세계의 위성과 지구궤도 내의 모든 물체를 추적하고 감시하여 우주발사물체의 위험을 예보하고 있다. 그러나 위성추적시스템의 한계로 레이더망을 이용하는 경우 저궤도는 약 10cm, 정지궤도는 1m 이상의 물체만을 추적할 수 있다. FengYun 위성의 폭발 이후 2007년 2월 7일에 업데이트 된 자료를 사용하여 관측결과를 분석해 보았다. 폭발 이전에 관측된 물체의 개수는 4468개(고도 200 ~ 1000km 사이 2006년 자료)이고 폭발 이후 관측된 FengYun 위성파편은 직경 10cm 이상되는 파편이 517개(고도 200 ~ 1000km 사이 516개 그 이상 1개), 그 외 궤도정보를 알 수 없는 파편이 131개이다. 표 1은 고도 200 ~ 1000km 사이에 있는 직경 10cm 이상되는 FengYun 위성파편 수와 2006년까지 집계된 우주물체의 자료이고, 표 2는 FengYun의 폭발전과 후의 공간밀도를 직경 10cm 이상 우주물체만 고려하여 비교한 것이다.

2.2 폭발(Explosion)에 의한 FengYun 위성의 파편 생성 예측

STK에서 얻은 자료는 10cm 이상의 크기에 대한 물체만을 다루고 있기 때문에 FengYun 위성의 폭발로 인해 발생한 작은 크기의 파편들에 대한 분석은 현재 NASA의 우주파편 진화모델에 사용되고 있는 Rossi(2005)의 식을 사용하였다. 우주에서의 폭발은 저강도 폭발(low-intensity explosion)과 고강도 폭발(high-intensity explosion)의 두 가지로 나눌 수 있다. 두 가지 경우 모두에서 질량 분포는 질량이 작은 쪽에서 지수함수를 따르며 고강도 폭발은 작은 질량을 가진 파편이 많은 개수로 생성된다. FengYun 위성의 경우 미사일에 의해 폭발되었으므로 고강도 폭발을 했다고 가정하고 다음

표 2. 직경 10cm 이상되는 우주물체의 개수.

고도(km)	공간밀도(#/km^3) (FengYun 위성파편 없을 때)	공간밀도(#/km^3) (FengYun 위성파편 포함할 때)	공간밀도의 차이
200-250	5.4755E-10	6.2056E-10	7.3010E-11
250-300	8.2701E-10	8.6297E-10	3.5960E-11
300-350	1.0273E-09	1.2752E-09	2.4790E-10
350-400	2.3383E-09	2.4430E-09	1.0470E-10
400-450	2.6136E-09	3.1638E-09	5.5020E-10
450-500	4.7783E-09	5.3544E-09	5.7610E-10
500-550	9.9197E-09	1.0421E-08	5.0130E-10
550-600	9.4154E-09	1.0041E-08	6.2560E-10
600-650	9.8656E-09	1.0937E-08	1.0714E-09
650-700	1.1710E-08	1.2894E-08	1.1840E-09
700-750	1.1861E-08	1.3501E-08	1.6400E-09
750-800	1.5273E-08	1.7419E-08	2.1460E-09
800-850	1.8344E-08	2.2577E-08	4.2330E-09
850-900	1.2344E-08	1.5581E-08	3.2370E-00
900-950	1.3518E-08	1.3518E-08	0.0000E+00
950-1000	1.5837E-08	1.5837E-08	0.0000E+00

표 3. 고강도 폭발에 의한 FengYun 위성파편의 누적생성 개수.

질량(kg)	누적개수
0.001	37,458
0.01	6,661
0.1	1,185
1	21
1.683	0

의 식을 사용하였다(Rossi 2005).

$$N(m) = \begin{cases} 8.3264 M_t e^{-0.4\sqrt{m}} & for \quad m \geq 626.344g \\ 8.3264 M_t (0.001/m)^{0.75} & for \quad m < 626.344g \end{cases} \tag{1}$$

여기서 $N(m)$은 질량 m(g)보다 큰 질량을 가진 파편의 개수이고, M_t는 폭발하는 물체의 질량(g)이다. 질량 M_t를 가진 물체가 고강도 폭발에 의해 파편이 생성되었을 때 위 식을 이용하여 생성된 파편의 질량이 m보다 큰 것의 개수를 구할 수 있다. FengYun 위성의 경우 무게를 800kg으로 놓고 0.001kg 이상의 파편질량에 대해 각각 생성 개수를 예측하였고, 이를 표 3에 나타내었다. 무게 0.001kg 이상인 파편은 37,458개가 발생할 것이라 추정되고 1.683kg 이상의 파편은 발생하지 않는 것으로 예측할 수 있다.

Rossi(2005)의 식은 파편의 질량에 대한 생성개수를 예측할 수 있지만 고도에 따른 생성개수를 예측하기에 어려움이 있다. 따라서 관측된 자료를 바탕으로 고도에 따른 생성개수를 추정해보았다. 표 1에서 FengYun 위성의 파편 중 관측 가능한 직경 10cm 이상되는 파편은 총 649개로 이 중에서 궤도정보가 알려진 파편은 517개이다. 200에서 1000km사이의 고도에서 분포하고 있는 파편은 516개이다. Rossi의 식을 이용하여 예측한 표 3에 있는 질량에 따른 파편의 누적수는 고도에 따른 분포를 주지 않는다. 따라서 FengYun 위성의 전체파편들의 고도에 따른 분포를 추정하기 위하여, FengYun 위성의 파편중 직경 10cm 이상되는 파편의 고도에 따른 개수분포(표 1)의 비율(%)과 FengYun 위성의 전체 파편들의 고도에 따른 개수분포의 비율과 같다고 가정을 하였고, 이를 표 4에 나타내었다. 표 5는 관측된 자료(표 4의 비율)를 이용하여 고도에 따른 FengYun 위성의 전체파편 생성개수를 추

표 4. FengYun 위성 파편의 고도에 따른 분포비율.

고도(km)	FengYun 위성 파편갯수 (2007년 2월 7일 자료)	비율 및 %	
200-250	2	2/517	0.39
250-300	1	1/517	0.19
300-350	7	7/517	1.35
350-400	3	3/517	0.58
400-450	16	16/517	3.09
450-500	17	17/517	3.29
500-550	15	15/517	2.90
550-600	19	19/517	3.68
600-650	33	33/517	6.38
650-700	37	37/517	7.16
700-750	52	52/517	10.06
750-800	69	69/517	13.35
800-850	138	138/517	26.69
850-900	107	107/517	20.70
900-950	0	0/517	0.00
950-1000	0	0/517	0.00
1000 이상	1	1/517	0.19
	517		

표 5. 고도와 누적질량별 FengYun 위성의 전체파편 생성 개수 추정.

고도(km)	비율	0.001kg 이상 누적개수(개)	0.01kg 이상 누적개수(개)	0.1kg 이상 누적개수(개)	1kg 이상 누적개수(개)
200-250	0.39	145	26	5	0
250-300	0.19	72	13	2	0
300-350	1.35	507	90	16	0
350-400	0.58	217	39	7	0
400-450	3.09	1,159	206	37	1
450-500	3.29	1,232	219	39	1
500-550	2.90	1,087	193	34	1
550-600	3.68	1,377	245	44	1
600-650	6.38	2,391	425	76	1
650-700	7.16	2,681	477	85	2
700-750	10.06	3,768	670	119	2
750-800	13.35	4,999	889	158	3
800-850	26.69	9,998	1,778	316	6
850-900	20.70	7,752	1,379	245	4
900-950	0.00	0	0	0	0
950-1000	0.00	0	0	0	0
1000 이상	0.19	72	13	2	0

정한 것이다. FengYun 위성의 파편이 0.001kg 이상인 것들의 개수와 0.01, 0.1, 1kg 이상인 것들에 대한 개수를 각각 비교하였다. 표 6과 7은 예측된 FengYun 위성 파편들의 200에서 1000km 사이의 공간밀도와 플럭스를 각각 비교한 것이다. 플럭스는 운용중인 위성과 우주파편과의 상대속도(평균 15km/sec)와 공간밀도의 곱으로 정의된다. 따라서 플럭스는 단위시간동안 단위면적에 운영중인 위성과 우주파편이 충돌하는 횟수(충돌횟수/단위면적/단위시간)를 나타낸다.

3. FengYun 위성의 폭발이 다목적실용위성에 미치는 영향분석

3.1 충돌확률 분석

지구 저궤도에서 위성체가 우주폐기물과 충돌할 확률은 운동하는 기체이론 및 포아송(Poisson) 확률분포를 이용하여 구할 수 있다. 운동하는 기체 이론의 법칙에 따르면 공간밀도 SPD인 곳에서

표 6. 고도에 따른 FengYun 위성 전체파편의 누적질량별 공간밀도(spatial density).

고도(km)	0.001kg 이상 공간밀도 (#/km^3)	0.01kg 이상 공간밀도 (#/km^3)	0.1kg 이상 공간밀도 (#/km^3)	1kg 이상 공간밀도 (#/km^3)
200-250	5.29E-09	9.49E-10	1.83E-10	0
250-300	2.59E-09	4.67E-10	7.19E-11	0
300-350	1.80E-08	3.19E-09	5.67E-10	0
350-400	7.57E-09	1.36E-09	2.44E-10	0
400-450	3.99E-08	7.08E-09	1.27E-09	3.44E-11
450-500	4.18E-08	7.42E-09	1.32E-09	3.39E-11
500-550	3.63E-08	6.45E-09	1.14E-09	3.34E-11
550-600	4.53E-08	8.07E-09	1.45E-09	3.29E-11
600-650	7.76E-08	1.38E-08	2.47E-09	3.25E-11
650-700	8.58E-08	1.53E-08	2.72E-09	6.40E-11
700-750	1.19E-07	2.11E-08	3.75E-09	6.31E-11
750-800	1.56E-07	2.77E-08	4.91E-09	9.33E-11
800-850	3.07E-07	5.45E-08	9.69E-09	1.84E-10
850-900	2.35E-07	4.17E-08	7.41E-09	1.21E-10
900-950	0	0	0	0
950-1000	0	0	0	0

표 7. 고도에 따른 FengYun 위성 전체파편의 누적질량별 플럭스(flux).

고도(km)	0.001kg 이상 플럭스 (#/m^2/year)	0.01kg 이상 플럭스 (#/m^2/year)	0.1kg 이상 플럭스 (#/m^2/year)	1kg 이상 플럭스 (#/m^2/year)
200-250	2.50E-06	4.49E-07	8.63E-08	0
250-300	1.22E-06	2.21E-07	3.40E-08	0
300-350	8.50E-06	1.51E-06	2.68E-07	0
350-400	3.58E-06	6.44E-07	1.16E-07	0
400-450	1.89E-05	3.35E-06	6.02E-07	1.63E-08
450-500	1.98E-05	3.51E-06	6.25E-07	1.60E-08
500-550	1.72E-05	3.05E-06	5.37E-07	1.58E-08
550-600	2.14E-05	3.82E-06	6.85E-07	1.56E-08
600-650	3.67E-05	6.52E-06	1.17E-06	1.54E-08
650-700	4.06E-05	7.22E-06	1.29E-06	3.03E-08
700-750	5.62E-05	1.00E-05	1.78E-06	2.98E-08
750-800	7.36E-05	1.31E-05	2.32E-06	4.41E-08
800-850	1.45E-04	2.58E-05	4.59E-06	8.71E-08
850-900	1.11E-04	1.97E-05	3.51E-06	5.72E-08
900-950	0	0	0	0
950-1000	0	0	0	0

입자가 상대속도 VR로 움직이는 경우 어떠한 물체의 충돌 단면적이 A_C일 때인 경우 시간 T동안 충돌하게 되는 횟수 c는 식 (2)와 같다(McKnight & Anz-Meador 1993).

$$c = VR \times SPD \times A_C \times T \tag{2}$$

포아송 확률분포는 이산형 확률분포에서 많이 사용되는 분포 중 하나로 단위시간, 단위구간 또는 단위면적에서 발생하는 사건 발생수의 분석에 주로 활용 가능하다. 즉 임의의 시간동안 우주폐기물의 충돌이 일어날 확률을 구하기 위해 사용할 수 있는데 그 과정은 다음과 같다. 먼저 n번의 충돌이 일어날 확률은 식 (3)과 같다(McKnight & Anz-Meador 1993).

$$P_{i=n} = \frac{c^n}{n!} \exp(-c) \tag{3}$$

표 8. FengYun 위성 파편(알루미늄)과 다목적실용위성 3호와의 충돌확률.

직경(cm)	누적개수	650 ~ 700km 누적개수	공간밀도 (#/km^3)	플럭스 (#/m^2/yr)	충돌횟수	충돌확률
0.001	1.62E+11	1.16E+10	0.37098	175.49	4,071.4	1
0.01	9.11E+08	6.52E+07	2.09E-03	0.98685	22.895	1
0.1	5.12E+06	3.67E+05	1.17E-05	5.55E-03	0.12875	0.1208
1	28,811	2062	6.60E-08	3.12E-05	7.24E-04	7.24E-04
5	771	55.178	1.77E-09	8.35E-07	1.94E-05	1.94E-05
10	2	0.14313	4.58E-12	2.17E-09	5.03E-08	5.03E-08

식 (3)에서 충돌이 한 번도 일어나지 않는 경우($n = 0$)는 식 (4)와 같다.

$$P_{i=0} = \exp(-c) \tag{4}$$

충돌이 일어날 확률은 완벽하게 일어날 확률 1에서 한 번도 발생하지 않을 확률 식 (4)를 빼줌으로 구할 수 있다.

$$P_{i\geq 1} = 1 - \exp(-c) \tag{5}$$

고도를 685km에 있을 다목적실용위성 3호의 면적을 2.9m×2.0m로 예상하고 임무수행기간을 4년으로 하여 FengYun 위성의 폭발에 의한 영향을 분석해 보았다. FengYun 위성의 경우 고도가 805 ~ 864km이므로 표 6에서 보듯이 주로 이 고도범위에서 관측된 FengYun 위성파편의 개수가 가장 많음을 확인할 수 있다. 그러나 폭발의 영향으로 685km에도 파편이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 분석하기 위해 식 (1)을 이용하여 폭발에 의해 생성된 FengYun 위성 파편의 종류가 각각 알루미늄과 철인 경우로 나누어 직경이 0.001cm인 경우부터 10cm인 경우까지 구분하였다. 식 (1)에서 사용되는 요소는 질량이므로 이를 직경으로 바꾸기 위해 각 물질의 밀도를 이용하였다. 생성된 파편의 모양이 알루미늄 구형이라 가정했을 때 밀도는 2.71g/cm^{3}이므로 직경 0.001cm의 경우 질량이 약 1.419×10^{-9}g임을 계산할 수 있다. 또한 생성된 파편의 모양이 철 구형이라 가정했을 때 밀도는 7.86g/cm^{3}이므로 직경 0.001cm의 경우 질량이 약 4.1155×10^{-9}g임을 계산할 수 있다. 이렇게 구한 질량 값을 식 (1)에 대입하여 임의의 직경 이상의 크기를 갖는 파편의 개수를 예측하였다. 앞에서 설명했듯이 FengYun 위성의 전체파편의 각 고도별 분포는 FengYun 위성의 직경 10cm 파편의 관측된 결과와 같을 것이라 가정하여 650 ~ 700km 사이에서 FengYun의 파편개수와 공간밀도 및 플럭스, FengYun과의 충돌횟수 및 충돌확률 등을 각각 구하였다. 충돌횟수는 다목적실용위성 3호의 고도 685km, 면적 2.9m×2.0m와 임무수행기간을 4년의 자료와 FengYun 위성파편의 플럭스 값을 이용하여 구할 수 있다. 충돌확률은 식 (5)를 사용한다. 표 8은 알루미늄의 경우에 대하여 직경에 대한 전체 누적개수, 직경에 대한 고도 650 ~ 700km 사이의 누적개수, 공간밀도, 플럭스, 충돌횟수, 충돌확률에 대한 결과이다. 직경 5cm 이상되는 파편의 개수가 771개로 예측 되었는데 이는 실제로 NORAD에서 얻은 관측 자료 649개(표 1)와 비슷한 것을 확인할 수 있다.

3.2 손상확률

우주파편과 충돌하였을 때 관통하는 최소한의 충돌입자 임계직경 $d_{p,lim}$은 충돌하는 입자의 특성과 타겟의 특성, 충돌 속도와 입자의 충돌각도와 관계가 있으며, 식 (6)을 이용해 구할 수 있

표 9. 다목적실용위성의 구조벽 두께에 따른 임계직경 및 FengYun 위성파편(알루미늄)에 의해 관통될 확률.

구조벽 두께(cm)	$d_{p,lim}$(cm)	$Flux(d \geq d_{p,lim})$ (#/m^2/yr)	관통될 확률
0.1	0.018017	0.26239	0.99773
0.2	0.034734	0.059917	0.75095
0.3	0.050993	0.025256	0.44341
0.4	0.066961	0.013682	0.27198
0.5	0.082716	0.008505	0.17907
0.6	0.098305	0.005767	0.12523
0.7	0.11375	0.004153	0.091845
0.8	0.12909	0.003124	0.06992
0.9	0.14432	0.002431	0.054836
1	0.15946	0.001942	0.044057
2	0.30741	0.000443	0.010236
3	0.45131	0.000187	0.004327
4	0.59264	0.000101	0.002347
5	0.73208	6.29E-05	0.001459
6	0.87005	4.27E-05	0.00099
7	1.0068	3.07E-05	0.000713
8	1.1425	2.31E-05	0.000536
9	1.2773	1.80E-05	0.000417
10	1.4113	1.44E-05	0.000334

다(Klinkrad 2006). 여기서 K_1과 λ, β, γ, ξ, κ는 실험을 통해 측정된 상수값이다.

$$d_p \leq d_{p,lim} = \left[\frac{t_t}{K_1 \rho_p^{\beta} \rho_t^{\kappa} v_p^{\gamma} (\cos \alpha_p)^{\xi}} \right]^{\frac{1}{\lambda}} \tag{6}$$

우주폐기물과 위성체가 충돌하였을 때 충돌에 의해 위성체가 관통될 확률은 앞에서 구한 충돌확률을 구하는 방법과 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 우선 임계직경 $d_{p,lim}$ 이상되는 파편의 플럭스를 상대속도(15km/sec 가정)와 공간밀도의 곱으로 계산하였다. 임계직경에 대한 플럭스를 대입할 경우 관통되지 않을 확률(PNP)를 구할 수 있게 된다. 관통되지 않을 확률은 포아송 확률분포를 사용해 구하였다. 이것을 식으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$P_{PNP} = \exp(-F(d \geq d_{p,lim}) A_C \times T) \tag{7}$$

식 (7)은 관통이 되지 않을 확률이므로 관통될 확률은 1에서 관통이 되지 않을 확률을 빼줌으로 구할 수 있다.

$$P_{n \geq 1} = 1 - P_{PNP} \tag{8}$$

다목적실용위성 3호는 두께 4mm의 알루미늄 단일벽으로 이루어졌다고 가정하였다. 표 9는 다목적 실용위성이 알루미늄 단일벽의 구조로 이루어졌다고 가정하였을 때 구조벽 두께에 따른 임계직경을 구하고 알루미늄구조의 FengYun 위성파편에 충돌하였을 때 관통될 확률을 구한 것이다. 표 10은 마찬가지로 다목적 실용위성이 알루미늄 단일벽의 구조로 이루어졌다고 가정하였을 때 구조벽 두께에 따른 임계직경을 구하고 철 구조의 FengYun 위성파편에 충돌하였을 때 관통될 확률을 구한 것이다. 측정상수 값은 Naumann 등 (Klinkrad 2006)의 상수들을 이용하였다($K_1 = 0.65$, $\lambda = 1.056$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.875$, $\xi = 0.875$, $\kappa = -0.5$). 표 11은 다목적실용위성 3호가 4mm의 알루미늄 구조벽과 알루미늄 구조로 방어막이 있는 경우에 구조벽과 방어막 사이에 5cm 정도의 거리가 있다고 가정하고 방어막의 두께가 0, 0.5, 1mm인 경우에 대해 각각 계산해 보았다. 이때 FengYun 위성파편은 알루미

표 10. 다목적실용위성의 구조벽 두께에 따른 임계직경 및 FengYun 위성파편(철)에 의해 관통될 확률.

구조벽 두께(cm)	$d_{p,lim}$(cm)	$Flux(d \geq d_{p,lim})$ (#/m^2/yr)	관통될 확률
0.1	0.010882	0.81587	1
0.2	0.020979	0.1863	0.98673
0.3	0.030799	0.078529	0.83828
0.4	0.040444	0.042543	0.6273
0.5	0.049961	0.026445	0.45856
0.6	0.059376	0.017932	0.34034
0.7	0.068708	0.012912	0.25885
0.8	0.077969	0.009715	0.20179
0.9	0.087169	0.007559	0.16084
1	0.096315	0.006039	0.13073
2	0.18568	0.001379	0.031485
3	0.27259	0.000581	0.013394
4	0.35795	0.000315	0.007278
5	0.44218	0.000196	0.004531
6	0.52551	0.000133	0.003075
7	0.6081	9.56E-05	0.002215
8	0.69007	7.19E-05	0.001667
9	0.77149	5.59E-05	0.001297
10	0.85244	4.47E-05	0.001036

표 11. 알루미늄 구조벽의 경우 알루미늄 방어막의 두께에 따른 임계직경 및 관통될 확률(구조벽과 방어막 사이거리 5cm).

구조벽 두께(cm)	방어막의 두께(mm)	$d_{p,\mathrm{lim}}$(cm)	$Flux(d \geq d_{p,\mathrm{lim}})$	관통될 확률
0.4	0.0	0.066961	0.013682	0.271980
	0.5	0.29835	0.000474	0.010945
	1	0.30474	0.000452	0.010438
0.6	0.0	0.098305	0.005767	0.12523
	0.5	0.33879	0.000356	0.008234
	1	0.39108	0.000258	0.005968
0.8	0.0	0.12909	0.003124	0.06992
	0.5	0.33955	0.000355	0.008193
	1	0.48338	0.00016	0.003709

늄으로 가정하였다. 방어막의 두께가 0mm인 경우는 표 9에서 단일벽에 대해서 구한 결과 값과 같다. 방어막이 있는 경우 방어막이 없는 경우보다 관통될 확률이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 또한 같은 두께의 방어막을 갖는 경우 구조벽의 두께가 두꺼워질수록 관통될 확률이 줄어듬을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 최근 이슈가 되고 있는 FengYun의 폭발에 의해 다목적실용위성 3호가 받게 될 영향을 예측해보았다. 표 8을 보면, 4년동안 다목적 실용위성은 FengYun 위성파편이 알루미늄이라 가정했을 경우 직경 0.001cm(=1.42E-9 g) 이상인 파편과 4,071번 정도 충돌하고, 0.01cm(=1.42E-6 g) 이상인 파편과 23번 정도 충돌할 수 있다. 현재 운용되고 있는 우주정거장의 경우 1년에 0.5% 이내의 관통확률을 가지고 설계된다고 볼 때(Klinkrad 2006) 다목적실용위성의 경우 4년의 임무수행기간 동안 2% 이내의 관통확률을 갖는 것이 안전하다고 볼 수 있다. 표 9와 10에서 볼 수 있듯이 다목적 실용위성이 알루미늄 단일벽으로 가정했을 경우 알루미늄 파편과 충돌했을 경우는 구조벽의 두께가 2cm 이상정도, 철 파편과 충돌했을 경우는 구조벽의 두께가 3cm 이상이어야 안전하다고 판단할 수 있다. 따라서 구조벽이 2cm보다 얇은 경우 FengYun 위성파편이 다목적 실용위성에 위협이 될

확률은 무시할 수 없다. 하지만 파편이 위성내부에 침투하더라도 위성내부에 있는 장비의 벽을 뚫어야 위성에 근본적인 위협이 되므로 위협의 확률은 훨씬 낮다고 할 수 있다. 또한 표 11에서 보듯이 방어막이 있는 경우 방어막이 없는 경우보다 관통확률이 적어지는 것을 알 수 있다. 구조벽이 0.4cm라고 가정했을 때 방어막이 0.5mm 이상인 경우 2% 이내의 관통확률을 갖게 되므로 안전하다고 볼 수 있다. 또한 구조벽의 두께가 이보다 더 두꺼운 경우 2% 이내의 관통확률을 갖게 하는 방어막의 두께는 0.5mm 이하임을 확인할 수 있다. 앞으로 FengYun 위성같은 인위적인 위성폭발이 더 많이 있을 수 있으므로, 현재 제작되고 있는 다목적실용위성에 방어막을 설치하는 것이 필요하다. 이 논문에서 제시된 방법은 앞으로 다목적실용위성 3호뿐만 아니라 계속 개발되고 있는 위성들의 우주파편에 대한 위험도 해석 및 예측에 상용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 연구는 한국항공우주연구원 다목적실용위성 3호 시스템 종합 개발사업의 지원으로 수행되었으며(과제번호: M104DA010001-06D0101-00113), 지원에 감사드립니다.

참고문헌

박상영, 김영록, 이재은, 배금숙, 신민, 노경민, 송영주, 박재익, 오종현, 정택서, 박한얼 2006, 저궤도 관측위성의 운석/궤도파편에 의한 손상확률 분석 연구 보고서 (서울: 과학기술부)

박상영, 이재은, 신민, 김영록, 박재익, 박한얼, 이운섭 2007, 저궤도 관측위성의 운석/궤도파편에 의한 손상확률 분석 연구 II 보고서 (대전: 한국항공우주연구원)

Klinkrad, H. 2006, Space Debris - Models and Risk Analysis (London: Springer), p.208

McKnight, D. S. & Anz-Meador, P. D. 1993, J. Spacecraft and Rockets, 30, 120

Rossi, A. 2005, SerAJ, 170, 1