

지구 재진입체의 특성에 따른 재진입사례 및 생존특성 분석

Analyses for Re-entry Event and Survival characteristics according to Characters of Re-entering Space Objects

정순우*, 민찬오*, 이대우*⁰, 조겸래*

Soon-Woo Jeong*, Chan-Oh Min*, Dae-Woo Lee*⁰, Kyeum-Rae Cho*

요 약

1957년 10월 4일 인류최초의 위성 스푸트니크1호가 발사된 이래로 지구저궤도에서 대기권으로 재진입하는 물체의 양은 지속적으로 증가해왔다. 대부분의 재진입체들은 공력가열에 의해 타버려 생존하기 어렵다. 그러나 단 하나의 물체라도 지표면으로 떨어질 경우 인명 및 재산피해를 유발할 수 있다. 우주활동의 부산물로 발생하는 폐기위성, 로켓부스터, 압력탱크, 폐기우주정거장 등 지구에 재진입하는 물체는 꾸준히 늘어왔다. 대부분의 재진입체는 고도 50km~80km에서 소각되고 10%~40% 가량이 살아남아 지상으로 추락한다. 따라서 본 논문은 다양한 사례를 종합하여 재진입체의 생존특성을 분석하였다.

Abstract

The amount of object which reenter the Earth's atmosphere has been increasing after the Sputnik I launch in October 1957. Most of reentry objects were incinerated by aerodynamic heating so they hardly survive. But they may incur casualties and widespread property damages if they survive and fall to surface. The amount of reentry objects, such as Satellite, Rocket Booster, Pressure Tank, ISS shows continued growth as byproduct of space activities. Most of the re-entry objects are incinerated at between altitude of 50km~80km and 10%~40% of the objects are surviving and falling to the ground. Therefore, this paper try to piece together the reentry event and analysis the survival characteristics of re-entry object.

Key Words : Space Debris(우주 파편), Survivability Analysis (생존성 분석)

Ballistic Re-entry(탄도 재진입), Re-entering objects(지구 재진입체)

I. 서 론

우리나라는 통신위성을 비롯하여 다양한 목적으로 인공위성을 운영 중에 있다. 지구정지궤도위성으로는 통신위성인 무궁화 1, 2, 3호 위성 및 통신해양 기상위성인 천리안위성이 있다. 지구저궤도위성은

다목적실용위성인 아리랑 1, 2호 위성 및 과학기술위성 1호를 운용 중에 있다.

이와 같이 인류의 우주활동이 증가하면서 우주활동의 부산물로써 많은 우주쓰레기가 생산되었고 이에 따라 우주환경은 점점 가혹하게 바뀌어가고 있다. 우주환경을 개선하고 우주쓰레기의 양을 줄이기 위

* 부산대학교 항공우주공학과(Dept. of Aerospace Eng., Pusan National University)

· 제1저자 (First Author) : 정순우(Soon-Woo Jeong)

0 교신저자(Corresponding Author) : 이대우(Dae-Woo Lee, +82-51-510-2329, baenggi@pusan.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 1월 22일 · 심사(수정)일자 : 2013년 1월 25일 (수정일자 : 2013년 2월 21일) · 게재일자 : 2013년 2월 28일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.01.080>

해 IADC(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)에서 제안한 ‘IADC Space Debris Mitigation Guidelines’의 '25년 규정'을 적용하고 있다.[1]

IADC에서는 현재의 우주파편 증가율과 지구저궤도에 있는 우주파편의 양을 종합적으로 고려해 보았을 때 25년 이내에 지구저궤도에서 벗어나 폐기된다면 현재의 우주환경에서 더 나빠지지 않을 것으로 예상하고 있다.

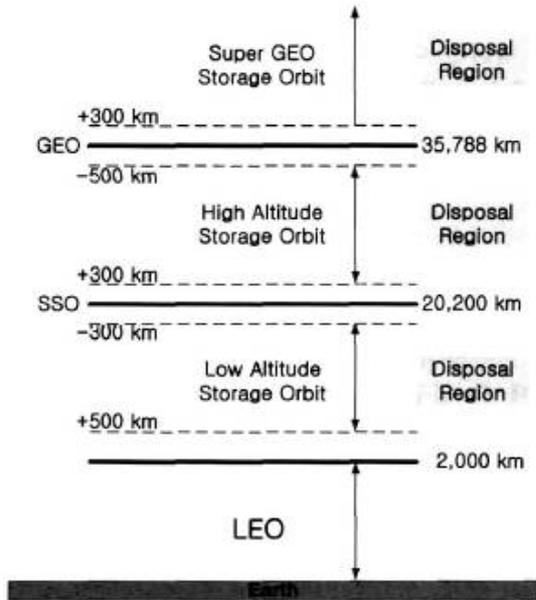


그림 1 운용고도에 따른 폐기고도
Fig 1. Disposal altitude according to the operation altitude

그림 1은 운용고도에 따른 폐기고도를 보여준다. 고도 2,000km이상 중고도위성(MEO) 및 정지궤도위성의 경우 임무종료 후 운용궤도에서 고도를 300km 또는 500km 상승시킨 후 폐기시켜야 한다. [2]

고도 2,000km이하 저궤도 위성의 경우 임무종료 후 25년 이내에 고도를 2,000km이상 상승시켜 폐기시키거나 대기권으로 진입시켜 소각시켜야 한다.

우리별 위성, 아리랑 위성, 과학기술 위성의 경우 지구 저궤도 위성이므로 운용종료 이후 25년 이내에 폐기되어야 한다.

인류의 우주개발이 시작된 이후로 지구로 재진입한 물체의 총 무게는 27,000톤 이상이다. 주로 지구저궤도 우주파편이 대기권으로 재진입하는 데 이때 완전히 소각되지 못하고 지상으로 파편이 떨어지는 경우가 있다. 다양한 재진입 사례가 보고되고 있지만

아직까지 파편추락으로 인해 직접적인 피해를 입은 사례는 없다.

II. 본 론

2-1 지구 재진입체에 의한 피해확률

표 1 사고원인에 따른 연간 치명적 부상확률
Table 1. Annual, risks of fatality due to accident causes

사고원인	위험확률
석탄 채굴	9.3×10^{-3}
암	1.8×10^{-3}
교통사고	2.2×10^{-4}
화재진압	8.0×10^{-4}
가정사고	1.2×10^{-5}
항공기사고	2.0×10^{-6}
벼락	5.0×10^{-7}
지구 재진입 물체	8.0×10^{-12}

표 1은 인간이 1년간 활동하면서 사고로 인해 치명적인 부상을 입을 확률을 보여주고 있다. 석탄채굴로 인한 사망확률이 가장 크며 그 외 암, 교통사고와 화재진압 순으로 사망할 확률을 볼 수 있다. 특히 지구 재진입 물체에 의해 인간이 치명적인 부상을 당할 확률이 가장 작는데 이는 가장 안전한 교통수단인 항공기의 사고 확률의 150만분의 1로써 지구 재진입물체에 의한 사고확률은 매우 작다고 할 수 있다. [3]

1997년 델타II로켓의 연료탱크 중 하나인 250kg의 스테인레스 스틸 탱크가 텍사스에 추락했는데 농가로부터 불과 50m정도 이격된 지점에 떨어졌다. 추락 물체에 의한 직접 피해사례는 없지만 간접사례는 있다. 1978년 1월 24일 소련의 정찰위성 COSMOS 954가 대기권에 진입하여 소각되었다. 이때 완전히 소각되지 못하고 몇몇 부품과 방사능 물질이 캐나다 북부

124,000 km^2 에 이르는 넓은 지역에 추락하였다. 이로 인해 주변 동식물 및 인간에게 간접피해를 입힌 사례가 있다. 이는 지구 재진입 물체에 의한 사고확률이 극히 작음에도 불구하고 사고가 충분히 일어날 수 있음을 말해준다.

2-2 지구 재진입을 통한 폐기사례

저궤도 위성은 운용종료 후 대기권과의 마찰열을 이용하여 소각 및 폐기처리하게 된다. 인류가 우주를 연구하고 지구궤도로 그 활동영역을 넓히는 동안 다양한 종류의 지구 저궤도 물체가 지구 재진입을 통해 폐기되었다.

표 2 지구 대기권으로 재진입한 인공물체
Table 2. The re-entry object history

위성	재진입 날짜	국적
MIR	2001.03.23	CIS
COLOMBIA STS-107	2003.02.01	USA
SKYLAB	1979.07.11	USA
COSMOS 954	1978.01.24	USSR
UARS	2011.09.24	USA
BeppoSAX	2003.04.29	Italy
		Dutch
DELTA II second stage	1997.02.22	USA
	2001.01.21	

MIR는 소비에트 연합에서 운영한 우주정거장으로써 1986년 2월 19일에 중심모듈이 최초 발사되었다. 15년간 지구저궤도에서 운용하다 기능고장으로 2001년 03월 23일 최종 폐기하였다.

MIR는 재진입한 인공물체중 가장 큰 규모로써 무게는 135,000kg, 부피는 400 m^3 , 표면적은 385 m^2 , 공기저항계수는 2.214 \pm 0.043이다. 재진입 후 완전하게 소각되지 않고 생존한 파편에 의한 재산 및 인명사고를 막기 위해 궤도수정을 하였고 이를 통해 남태평양

에 추락시켰다. 2001년 03월 23일 05:36UTC 고도 120km, 비행각 -0.44°, 진입속도 7.567km/s으로 대기권에 진입하여, 05:53UTC 고도 59km에서 최대 열유속에 도달, 05:58UTC 남위 39.6도 동경 158.9도 남태평양에 추락하였다. MIR 재진입시 전체 무게 135톤 중 20t가량이 생존할 것으로 예측되었다. [3]

COLOMBIA STS-107은 미국 나사의 우주왕복선으로써 임무를 마치고 지구로 귀환하는 과정에서 단열재의 손상으로 인해 공중폭발 하였다. 인공위성의 지구 재진입 폐기사례는 아니지만 인공구조물의 대기권 재진입에 따른 소각과 관련한 정보를 얻을 수 있어 표에 포함시켰다. 특히 모든 파편이 지상으로 추락하여 정량적 데이터를 얻을 수 있었다. [4]

COSMOS 954는 소련에서 운용한 정찰감시위성으로서 발사 후 기능고장으로 통제력을 상실 지구 대기권으로 재진입하였다. 이로 인해 캐나다 북부 124,000 km^3 에 이르는 광활한 지역에 동력원으로 가지고 있던 우라늄 235 50kg을 흩뿌렸다. 뿐만 아니라 약 10cm길이의 베릴륨 실린더 6개와 약 2cm길이의 베릴륨 막대 41개가 지상에 충돌하였다. 특히 방사능 오염으로 인해 직·간접적 피해를 입혔다. [5]

UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)는 최근 재진입한 인공위성 중 가장 큰 규모로 NASA에서 초고층 대기권 관측을 위해 운용한 위성이다. ORSAT을 이용한 생존율 예측에서 총 532kg의 물체가 26개의 파편으로 나뉘어 지상으로 충돌할 것으로 예측되었다. UARS는 태평양에 추락하여 안전하게 폐기처리 되었다. [6]

BeppoSAX는 이탈리아와 네덜란드에서 운용하였던 인공위성으로 1996년 4월 30일 발사되었다. SCARAB을 이용한 재진입 생존율 해석에서 재진입 이후 2,029초가 지난 고도 65.9km지점에서 최대 온도 1,723K에 도달, 38초 이후 고도 57.5km지점에서 최대 열유속 774 KW/m^2 에 이르는 것으로 나타났다. 이에 따라 인공위성 무게 총 1,400kg 중 약 670kg이 생존하여 지상으로 추락할 것으로 예측 되었다. [7]

DELTA II로켓의 2단 및 3단 모터는 위성이나 탑재체를 지구 공전궤도상으로 진입시키는 역할을 수행한다. 모터는 주로 임무완료 후 지구저궤도를 공전하다가 자연적으로 지구 대기권으로 재진입하여 폐

기하게 된다. 2001년 1월 21일에는 Delta rocket 3단의 PAM-D(Payload Assist Module)이 사우디아라비아에 추락, 1997년 2월 22일에는 텍사스에 약 250kg의 스테인레스 스틸 탱크가 추락한 사례가 있다. Delta II의 Motor casing과 연료탱크가 주로 생존하여 지상에 추락하게 된다. [8]

1979년 7월 11일 Skylab이 지구로 재진입하게 된다. 추락에 따른 위험을 줄이기 위해 남아프리카 케이프타운의 서남쪽으로 추락을 유도하였다. 하지만 승무원들에게 산소를 공급하는 여섯 개의 산소탱크 중 하나가 호주에 떨어졌다. 이후 재진입체의 인간에 대한 위험을 인지한 이탈리아의 국립연구회의인 CNUCE 에서 지구 재진입체에 대한 위험도 분석을 목적으로 하는 카테고리 분류기준을 만들었다. [9]

$$M = \text{Log}_{10}(m/100) \quad (1)$$

수식 (1)은 무게에 따라 재진입체에 대한 위험도를 분류하기 만들어진 수식으로서 m은 지구 재진입 물체의 질량(kg)이다. 스케일 M은 재진입 물체의 질량에 따라 분류되며 이는 대기권 재진입을 통한 소각시 물체의 크기에 따라 생존율에 차이가 나기 때문이다.

표 3 CNUCE 비제어 재진입 스케일

Table 3. CNUCE Uncontrolled Reentry Scale

Category		Risk Descriptor
Mass[kg]	Scale[M]	
100	0	Negligible
1,000	1	Small
10,000	2	Minor
100,000	3	Moderate
1,000,000	4	Substantial

표 3에 따르면 무게가 100kg이하인 위성의 경우 대기권에서 대부분 소각되어 지상에 위험을 거의 주지 않는 수준으로 볼 수 있다. [9]

표 4 CNUCE 재진입 이벤트 분류

Table 4. CNUCE Reentry Event Classes

Reentry Event Description	Class
Possible nuclear, biological or chemical contamination	C
Complete object disintegration in the high atmosphere	D
Fall of large fragments($\geq 10\text{cm}$) on the ground	F
Object able to maintain its structural integrity during the reentry	S

표 4는 재진입하는 위성체의 위험 종류에 따른 분석으로서 방사능, 생물학적 또는 화학적으로 오염을 일으킬 가능성이 있는 경우는 C, 고고도에서 완전한 분해가 일어나는 경우는 D, 지름이 10cm 이상의 파편이 지상에 추락할 위험이 있는 경우는 F이며 대기권 재진입에도 불구하고 형태를 유지한 채 지상으로 구조물이 도달 할 경우는 S로 나타낼 수 있다.

표 5 우리나라 위성의 재진입 스케일

Table 5. Reentry SCALE of ROK's Satellite

인공위성	무게(kg)	SCALE	Class
우리별 1호	42	0	D
우리별 2호	48	0	D
우리별 3호	100	0	D
과학기술위성 1호	106	0.02	D/F
아리랑 1호	470	0.67	F
아리랑 2호	766	0.88	F
아리랑 3호	980	0.99	F

표 5는 우리나라가 운용하였거나 운용중인 저궤도 위성의 스케일을 나타내고 있다. 저궤도 위성의 경우 대부분 무게가 1000kg 이하로서 그 스케일이 1미만임을 알 수 있다. 따라서 재진입 이후 지상충돌에 대

한 위험도는 무시할 만한 수준이거나 작은 수준이다.

카테고리 유형에 따르면 MIR(controlled)는 3.1F, 원자로를 탑재한 Cosmos 954는 1.8CF로 분류할 수 있다. 우리나라 저궤도 위성의 경우 대부분이 Class D또는 F에 해당할 것으로 예상된다.

2-3 재진입 생존을 분석프로그램 비교

항공우주 선진국에서는 이미 재진입 생존을 분석 프로그램을 개발하여 사용하고 있다. 이는 인공위성 또는 우주발사체의 발사빈도가 높을수록 지구로 재진입하는 물체가 많고 이로부터 자국민의 재산과 생명을 보호하고 안전한 우주활동을 보장 받을 수 있기 때문이다.

인공위성의 재진입시 소각율을 예측하고 추락지점을 예상하는 것은 매우 어려운 일이다. 현재 사용되고 있는 지구 재진입 물체에 대한 생존을 분석프로그램으로는 NASA의 ORSAT(Object reentry survival Analysis Tool)과 DAS(Debris Assessment Software), ESA의 SCARAB (Space craft Atmospheric Reentry and Aerothermal Break- up) 그리고 NASA의 ORSAT을 기반으로 만들어진 JAXA의 ORSAT-J, 한국항공우주연구원의 SAPAR(Survivability Analysis Program for Atmospheric Reentry)가 있다.

표 6 운용기관에서 쓰는 재진입 분석 프로그램
Table 6. Reentry Analysis Tools using at national organization

운용기관	프로그램명
NASA	DAS 2.0
	ORSAT
ESA	SCARAB
JAXA	ORSAT-J
KARI	SAPAR

NASA에서 사용하고 있는 DAS2.0(Debris Assessment Software)은 우주파편의 생산을 억제하기 위해 미리 설계된 우주 임무가 진행되었을 때 각 요

소와 관련된 항목을 준수하는 지를 신속하게 파악하기 위해 만들어졌다. 환경모델은 ORDEM 2000을 사용하고 있으며 재진입 분석 툴은 ORSAT 6.0을 사용한다. 하지만 ORSAT과 같이 각 파편의 재진입 궤적에 관한 데이터까지는 제공해주지 않는다. 단순히 파편의 생존율과 충돌운동에너지, 피해면적, 피해확률만을 제공해준다. [10]

표 7 ORSAT과 SCARAB 상호비교
Table 7. A comparison of ORSAT and SCARAB Reentry Analysis Tools

	ORSAT	SCARAB
Modeling	Object-oriented	Spacecraft-oriented
DOF	3	6
Aerodynamic, Aerothermodynamic	Knudsen number	local panel methods
Thermal analysis	1-D heat conduction	2-D heat conduction
Break-up	78km	Stress, structure analysis

NASA의 또 다른 프로그램인 ORSAT(Object reentry survival Analysis Tool)은 재진입 해석을 위한 전용 프로그램으로서 해석대상의 각 부품형태를 실린더, 직육면체, 구, 평판으로 모델링하여 분석한다. DAS와는 다르게 재진입시 Break-up 고도를 78km로 가정하여 파편의 비산범위 및 각 부품별 탄도궤적을 보여준다. 이를 통해 DAS2.0보다는 좀 더 정확한 분석이 가능하다. 따라서 DAS2.0을 이용하여 먼저 재진입 분석을 시행하여 지상에 피해가 예상될 경우 ORSAT을 이용하여 재분석을 한다.

SCARAB(Spacecraft Atmospheric Reentry and Aerothermal Breakup)은 ESA(European Space Agency)에서 사용하는 프로그램으로서 ORSAT과는 재진입 해석방법에서 차이를 보인다. ORSAT은 각 부품의 형태를 4가지 단순한 형태로 단순화하여 분석을 시행하지만 SCARAB은 직접 모델링을 통하여 위성 전

체의 형상을 최대한 실제와 가깝게 모사하여 분석한다. 이때 표면을 triangular panelized하여 유한요소 해석을 사용한다. 따라서 재진입체의 구조와 그에 가해지는 스트레스를 계산하여 보다 정확한 break-up 고도 예측이 가능할 것으로 보인다.

표 8 지름 0.5m 티타늄 구 분석결과 비교

Table 8. A comparison of result : Titanium, diameter 0.5(m), Sphere

	Surviving mass	DCA	Downrange
ORSAT	10	1.088	678
SCARAB	9.958	1.088	744.53
DAS 20	-	1.09	-

표 8은 티타늄으로 만들어진 지름 0.5m인 구에 대한 해석 결과로서 ORSAT과 SCARAB 결과는 참조자료[11]에서 인용하였고 DAS2.0의 결과는 시뮬레이션 결과이다. 고도 122km에서 초속 7.41km, 비행각 -0.1°로 대기권에 진입하였다. 대기모델은 U.S. Standard 1976 atmosphere 모델을 사용하였다. [11] 생존금속의 질량오차는 0.042kg이고 DCA (Debris Casualty Area)는 재진입체가 지상에 충돌했을 때 피해면적을 나타낸 것이고 재진입시 소멸되었다면 '0'이다. DCA 결과는 ORSAT, SCARAB, DAS가 동일한 결과를 보여주고 있다. Downrange에서 66.53km로서 상대적으로 큰 오차를 보여주고 있다. DAS 2.0은 생존무게와 비행거리에 관한 계산결과를 제공하지 않는다.

2-4 무게, 재질, 부품에 따른 생존율분석

지구 재진입체의 생존율을 분석하는 것은 어려운 일로써 많은 변수를 고려해야만 한다. 기본적인 운동방정식 외에도 공력가열모델에 따라서도 그 결과가 크게 차이가 날 수 있다. 따라서 어떤 요소가 크게 영향을 미치는 지 알아보기 위해 무게, 재질, 부품에 따라 생존율 분석을 해보았다. 일반적으로 지구저궤도로부터 대기권으로 재진입하는 물체의 생존율은 대략 10%에서 40%로 예측한다. 일반적으로 물체가 고도 120km

에 이르면 재진입이 시작되었다고 하고 통상 이때의 속도는 7.7km/s, 비행각은 -0.1°이다. 이후 고도 70Km 부근에서 최대 공력가열이 일어나게 된다.

표 9 DAS 2.0을 이용한 재진입체 소멸고도
Table 9. The results of demise altitude using DAS 2.0

생존부품	재료	소멸고도(km)
Side Panels	G/E	77.6
Top Panel	G/E	77.4
Bottom Panel	G/E	76.5
Antenna Attachment	Aluminum	76.0
Separation Ring	Aluminum	75.0
Transponder	Aluminum	69.6
Service Valves	Steel AISI 304	59.6
Electronics Bx	Aluminum	58.8
Computer assy	Silver Element	57.7

표 9는 DAS2.0이 기본적으로 제공하는 인공위성의 자료를 이용하여 시뮬레이션을 해본 결과이다. 여기서 완전히 소각되는 물체들의 소멸고도가 80km에서 55km사이임을 알 수 있다. 이 고도에서 살아남은 물체들은 모두 땅으로 떨어져 지표면과 충돌하게 된다.

표 10은 재진입체의 생존율을 계산한 자료로써 Cosmos 945, Skylab, Delta II자료는 실제 지상에 추락한 파편데이터를 얻은 것이고 INDIGO 67은 DAS2.0을 이용한 계산결과이고 나머지는 재진입 생존율 분석프로그램 ORSAT, SCARAB으로부터 얻은 자료이다.[4][10][14]

BeppoSAX의 경우 무게는 1,341kg에 불과하지만 생존파편 무게는 656kg으로서 생존율은 48.92%에 이른다. 반면 UARS의 경우 BeppoSAX보다 무게는 약 4배 무거운 5,668kg이지만 생존파편 무게는 오히려 작은 532kg으로 생존율은 9.38%에 불과하다.

표 10 무게에 따른 재진입체 생존율 분석
Table 10. Analysis of survivability according to the re-entry object's weight

종류	재진입체	무게(kg)	생존무게	생존율	M
인공위성	UARS	5,668	532	9.38%	1.75
	Cosmos 954	3,800	65	1.71%	1.58
	BeppoSAX	1,341	656	48.92%	1.13
	INDIGO 67	604	29	4.84%	0.78
	Satellite	1,076	450	41.82%	1.03
우주정거장	MIR	135,000	20,000	14.81%	3.13
	Skylab	77,088	7620	9.88%	2.89
사체	DELTA II	920	322	35%	0.96

따라서 SCALE과 생존율 간에는 유의미한 관계가 없음을 알 수 있다. 즉, SCALE 만을 이용해서는 생존율 추정에 한계가 있다는 점을 말해준다. 하지만 SCALE이 2를 넘을 경우 즉, 재진입체의 무게가 10톤 이상일 경우 생존율과 상관없이 생존과편의 무게가 크므로 대기권 재진입이 예상될 시 지상에 대한 피해를 예방하고 줄이기 위해 파편의 생존율 및 추락지점에 대한 정확한 예측이 필요하다.

지구 재진입체의 생존율에 큰 영향을 미치는 것은 각 부품의 재질로써 단순히 무게가 무겁다고 생존율이 높은 것은 아니다.

재진입체를 구성하고 있는 부품들의 재질이 타기 어려울수록 생존율이 높으므로 재진입체의 무게보다는 부품들의 재질이 생존성에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 다음은 재진입에서 생존한 금속들에 관한 자료이다.

표 11 ORSAT을 이용한 UARS 생존금속 분석자료
Table 11. Survival material of UARS using ORSAT

부품명	재질	형태	질량(kg)
HGA gimbal & reten	Titanium	실린더	98.81
Fwd bulkhead fitting	Titanium	박스	24.91
SSPP gimbal	Titanium	실린더	60.65
SSPP structure	Al 2024-T8	박스	158.30
MMS fuel tanks	Titanium	구	5.17
MMS MPS batteries	Stainless Steel 304L	박스	45.78
Reaction wheel rims	Stainless Steel 304L	실린더	2.04
FSS housing	Beryllium	박스	3.13
FHST bracket	Beryllium	박스	1.09
G.G. abutment plate	Titanium	평판	2.30
base plate	Titanium	평판	5.51
extension	Titanium	실린더	3.39

표 11은 참조자료 [6]에서 인용한 자료로 2011년 9월 24일 대기권으로 재진입하여 폐기된 UARS의 생존과편 자료이다. 티타늄, 베릴륨, 스테인리스 스틸과 같이 열에 잘 견디는 금속이 많이 생존해서 지상에 추락하였다. 인공위성에는 금속뿐만 아니라 복합재료도 많이 사용되는데 복합재료의 녹는점이 낮고 밀도가 낮아 재진입 시 대부분 완전 소각되어 지상에 대한 피해위험이 매우 작다.

금속의 생존율은 녹는 점 및 용해열이 높을수록 좋다. 녹는점이 높을수록 용해가 늦게 일어나며 용해열이 높으면 단위질량을 용해시키는데 많은 에너지가 필요하기 때문이다.

위성설계단계부터 생존율이 높은 금속의 사용을 자제하거나 용해가 쉬운 금속으로 대체하여 제작한다면 파편 생존율을 줄이는 데 도움이 될 것이다.

표 12 생존금속의 물성

Table 12. Properties of the survival metal

Metal	Density (kg/m^3)	C_p (J/kgK)	T_m (k)	Q_m (J/g)
Titanium	4420	750	1900	400
Al	2800	751.1	870	385
Ssteel	8030	611.5	1650	274
Beryllium	1850	1925	1546	1133
Inconel	8190	417.1	1570	309
Copper	8960	434.1	1356	243
Silver	10524	234	1234	105
Tungsten	19350	134.4	3643	184.2

표 12는 ORSAT과 DAS의 시뮬레이션 결과로부터 나온 생존금속의 물성치를 보여주고 있다. C_p 는 금속의 비열, T_m 은 녹는 점, Q_m 은 용해열을 나타낸다. 녹는점이 높은 티타늄이나 내열합금인 인코넬과 같은 금속이 생존했다.

표 13 DAS2.0을 이용한 INDIGO 67 생존금속 분석자료
Table 13. Survival material of INDIGO 67 using DAS 2.0

부품명	재질	형태	질량(kg)
Prop Tanks	Inconel 718	구	5.45
Pressurant Tank	Inconel 718	구	1.4445
Thrusters	Stainless Steel 304L	실린더	0.22
Batteries	Stainless Steel 304L	박스	0.07
Harness	Copper Alloy	실린더	0.15
Computer assy	Silver Element	박스	0.1
Aux Power	Tungsten	박스	0.05
Antenna	Aluminum 7075-T6	평판	0.2

표 13은 DAS2.0을 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 저궤도 위성 INDIGO 67위성의 생존금속을 보여주고 있고 ORSAT과 DAS2.0의 시뮬레이션 결과를

종합해 보면 고압을 견뎌야 하는 산소탱크와 같은 각종 탱크와 배터리, 반작용 휠과 같은 특정부품의 생존율이 높다. 이는 역시 특정 부품의 재료 금속이 대부분 생존율이 높은 금속이기 때문인 것으로 판단된다. 형태에 따른 생존율의 차이에서는 유의미한 결과를 얻을 수 없었다.

III. 결 론

지구로 재진입 하는 물체의 생존율을 계산하고 추락지점을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. NASA의 UARS 재진입 예측에 따르면 재진입 2시간 전 재진입 예측시간 오차는 ± 25 분이고 이는 지상추락지점의 오차가 $\pm 12,000$ km에 이른다는 뜻이다. 따라서 재진입이 예상될 때에는 재진입 직전까지 궤도 정보 및 대기밀도 데이터를 업데이트하여 예측의 정확도를 높인다.

결국 지상의 피해를 줄이기 위해서는 태평양과 같은 넓은 대양으로 추락을 유도하여 지상에 대한 피해가 아예 없도록 하고 있다.

이러한 이유로 지구 재진입 사례는 꾸준히 있지만 실제 소각물과 파편의 종류 및 형태에 대한 정보가 부족한 것이 사실이다. 본 논문에서 인용한 대부분의 자료 역시 시뮬레이션 결과를 바탕으로 작성한 것이다.

우리나라도 아리랑 5호 위성의 발사를 앞두고 있으며 다른 저궤도 위성의 폐기 역시 예정되어 있다. 지구궤도의 우주환경 개선을 목적으로 하는 ‘25년 규정’을 만족하기 위해서라도 저궤도 위성은 재진입을 통해 소각되어야 한다.

우리별 위성과 과학기술위성의 경우 무게가 약 100kg 또는 그 이하이므로 재진입으로부터 생존하여 지상에 떨어지는 파편이 없거나 매우 적을 것으로 예상된다. 하지만 아리랑 위성의 경우 무게가 작게는 약 500kg에서 약 1000kg에 이르러 지상에 대한 피해가 예상된다. 즉, 우리별 위성과 같은 스케일이 0에 해당하는 경우 큰 피해가 우려되지 않지만 아리랑 위성과 같이 무게가 1톤에 가까울수록 통상적인 추측에 따라 최대 400kg에서 최소 100kg의 파편이 지상에

로 충돌 할 것으로 예상된다. 이는 인구밀집지역에 추락할 경우 인명 및 재산피해를 유발할 수 있다.

따라서 아리랑 위성을 이루고 있는 부품들의 재질, 무게에 따른 생존특성을 분석하여 적절한 재진입 속도, 재진입각 등을 계산하여 안전하고 효율적인 폐기 궤도를 생성하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국항공우주연구원 “우주과편 충돌위험종합관리 시스템 개발 및 우주과편 제거시스템 연구” 과제의 위탁과제 수행 결과의 일부로서 지원에 감사드립니다.

Reference

- [1] Walker. R., Martin. C., Stokes. H., Wilkinson. J., Sdunnus. H, Hauptmann. S, Beltrami. P., Klinkrad. H, "Update of the ESA Space Debris Mitigation Handbook", *Executive summary*, 2002.
- [2] S.C. Lee, B.K. Park, B.Y. Kim, T.S. Ahn, "A Study on the Final Orbit Raising of GEO Satellite," vol. 29, no. 4, pp. 86-92, June 2001.
- [3] Heiner Klinkrad, "Space Debris-Models and Risk Analysis," *Praxis Publishing, Chichester Uk*, pp. 241-288, 2006,
- [4] Lydon B. Johnson Space Center, *NASA, Columbia Crew Survival Investigation Report, NASA/SP-2008-565*
- [5] Russell P. Patera, William H.Ailor, "The Realities of Reentry Disposal", *Advances in Astronautical Sciences*, Vol. 99, pp. 1059-1071, 1998
- [6] Lyndon B. Johnson Space Center, *NASA Orbital Debris Program Office, Re-entry and Risk Assessment for the NASA Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)*
- [7] C. Portelli, L. Salotti, L. Anselmo, T. Lips, A. Tramutola, "BeppoSAX equatorial uncontrolled re-entry," *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, pp. 1029-1037, 2003
- [8] Rochelle, Wm. C.; Kinsey, Robin E.; Reid, Ethan A.; Reynolds, Robert C.; Johnson, Nicholas L., "Spacecraft Orbital Debris Reentry: Aerothermal Analysis," *Proceedings of the Eighth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop: Spacecraft Analysis and Design*; 10.1-10.14; (NASA-CP -3359), 1997
- [9] Anselmo, Luciano; Pardini, Carmen, "The management of the MIR reentry in Italy", "In: Proceedings of the international workshop "MIR deorbit," pp. 83 - 90, 2002
- [10] Tobias Lips, Bent Fritsche, "A comparison of commonly used re-entry analysis tools," *Acta Astronautica*, Volume 57, 2005, Issue 2-8, pp. 312-323
- [11] R. L. Kelley (Jacobs ESCG), N. M. Hill (MEI Technologies ESCG), W. C. Rochelle (Jacobs ESCG), N. L. Johnson (NASA JSC), T. Lips (HTG), COMPARISON of ORSAT and SCARAB Reentry Analysis Tools for a Generic Satellite Test Case, *PEDASI-0021-10, 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen Germany, July 18-25, 2010*

정 순 우 (Soon-Woo Jeong)



2012년 2월 : 부산대학교

항공우주공학과 학사

2012년 3월 ~ 현재 : 부산대학교

항공우주공학과 석사과정

관심분야 : 우주재진입체 소각율

및 지상추락에 따른 피해확률 연구

민 찬 오 (Chan-Oh Min)



2010년 2월 : 부산대학교
항공우주공학과 석사
2010년 3월 ~ 현재 : 부산대학교
항공우주공학과 박사과정
관심분야 : 재진입 비행체의 최적
경로 생성 및 유도 제어 알고리즘
연구

이 대 우 (Dae-Woo Lee)



2001년 : 부산대학교
항공우주공학과 박사
2003년 3월 ~ 현재 : 부산대학교
항공우주공학과 교수
관심분야 : 우주/비행역학 및 유도
항법제어, 무인항공기 시스템 및
영상

조 겸 래 (Kyeum-Rae Cho)



1986년 : 텍사스 주립대학(오스틴)
항공우주공학과 박사
1988년 4월 ~ 현재 : 부산대학교
항공우주공학과 교수
관심분야 : 비행유도제어 , 궤도해
석