

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(2), 158-164(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.2.158>

저궤도 위성의 대기권 재진입 시 생존성 및 피해확률 분석

정순우*, 민찬오*, 이미현*, 이대우*, 조겸래*, Peter M. Bainum**

Re-entry Survivability and On-Ground Risk Analysis of
Low Earth Orbit SatelliteSoon-woo Jeong*, Chan-oh Min*, Mi-hyun Lee*, Dae-woo Lee*, Kyeum-rae Cho*
and Peter M. Bainum**

Pusan National University*, Harward University**

ABSTRACT

LEO(Low Earth Orbit) Satellite which is discarded should be reentered to atmosphere in 25 years by '25 years rule' of IADC(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) Guidelines. If the parts of satellite are survived from severe aerothermodynamic condition, it could damage to human and property. South Korea operates KOMPSAT-2 and STSAT series as LEO satellite. It is necessary to dispose of them by reentering atmosphere. Therefore this paper analyze the trajectory, survivability, casualty area and casualty probability of a virtual LEO satellite using ESA(European Space Agency)'s DRAMA(Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis) tool. As a result, it is noted that casualty area is $15.2742m^2$ and casualty probability is $5.9614E-03$ then will be survived $198.831kg$.

초 록

IADC의 '25년 규정'에 의해 미션종료 된 저궤도 인공위성은 25년 이내에 지구로 재진입, 소각 폐기되도록 권고하고 있다. 이때 인공위성의 부품일부 또는 다수가 살아남아 지상에 충돌할 경우 인명 및 재산피해를 낼 수 있다. 우리나라의 경우 저궤도 위성으로서 아리랑 인공위성과 과학기술위성을 운용 중에 있으며 임무종료 후에는 모두 대기권 재진입을 통한 폐기처리가 필수이다. 따라서 본 논문에서는 ESA의 DRAMA내부의 SARA(Re-entry Survival and Risk Analysis)모듈을 이용하여 지상피해가 예측되는 크기인 가상위성의 추락궤적 및 생존부품을 분석하고 그에 따른 지상충돌확률, 피해확률을 분석하였다. 분석결과 $198.831kg$ 이 생존할 것으로 예상되며 추락지점이 한반도일 경우 전체 피해면적은 $15.2742m^2$, 피해확률은 $5.9614E-03(2D)$ 일 것으로 예상된다.

Key Words : Space Debris(우주 파편), Re-entering objects(지구 재진입체), On-ground Risk Assessment(지상피해분석), Survivability Analysis(생존성 분석)

1. 서 론

전 세계적으로 운용되고 있는 위성은 약 900개다. 이 중 고도 2,000km이하 저궤도 위성은 약

422개, 중궤도 위성은 약 56개, 지구정지궤도 위성은 약 371개다. 특히 저궤도 위성의 수명은 대략 5년에서 7년으로서 짧아 매년 많은 수의 위성이 새로이 저궤도로 발사되고 있다.

† Received: November 5, 2013 Accepted: January 26, 2014

* Corresponding author, E-mail : baenggi@pusan.ac.kr

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

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

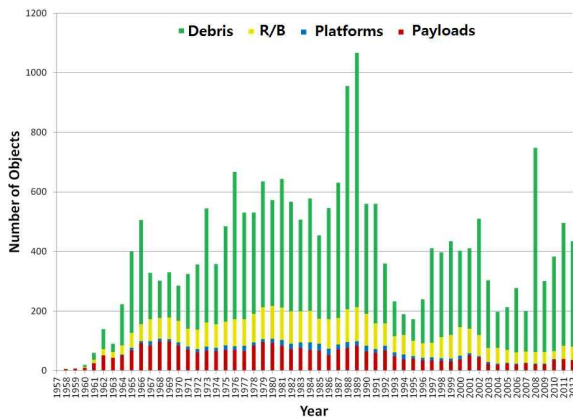


Fig. 1. Atmospheric re-entering artificial objects

ESA의 보고에 따르면 1958년 이후로 약 30,000개의 물체가 대기권으로 재진입 했으며 현재에도 지름 1m이상의 물체가 일주일에 약 1~2개씩 진입한다고 한다. 또한 우주과편경감 조건으로써 피해확률이 10^{-4} 이상일 경우 무제어 재진입은 허용되지 않으며 제어 재진입일 경우 대양에 추락을 유도하며 이때 항공기의 항로와 겹쳐서는 안 될 것을 명시하고 있다[1].

Figure 1은 매년 지구로 재진입하는 대략 농구공 크기 이상의 우주물체의 수를 보여주고 있다. 많은 수의 인공위성, 로켓동체, 플랫폼, 우주과편이 재진입하고 있다[2].

IADC에서는 안전한 지구궤도 환경을 위해서 각 고도에 따른 폐기법을 제안하고 있으며 저궤도 위성의 경우 '25년 규정'에 따라 25년 이내에 지구로 재진입시켜 소각폐기 처리하여야 한다.

저궤도의 인공위성 증가는 우주과편을 양산하고 운용중인 인공위성과의 충돌위험 증가 요인으로서 새로운 인공위성의 운용을 위해서는 임무종료된 인공위성의 폐기가 필요하다. 지구로 재진입하는 우주물체는 대부분 대기와의 마찰로 인해 소각된다. 하지만 소수가 생존하여 지상 또는 해양에 떨어진다. 지상에서 발견된 부품은 주로 구형의 탱크였으며 이로 인한 인명피해는 현재까지 없었다. 하지만 이로 인한 위협이 늘고 있는 것은 사실이다[3].

앞으로 저궤도에서 운용하는 인공위성이 많아 질수록 폐기되어야만 하는 인공위성의 수 역시 늘어날 것이며 이에 대한 대비가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 ESA의 DRAMA를 이용하여 국내 저궤도 인공위성인 가상위성의 대기권 재진입 시 생존율 및 지상에 대한 피해확률을 계산해 보았다.

II. 본 론

2.1 재진입 생존율 예측 프로그램

본 논문에서는 재진입 생존율을 예측하기 위해 ESA의 DRAMA를 사용한다. DRAMA는 NASA의 DAS(Debris Assessment Software)와 유사한 프로그램으로써 인공위성의 운용단계에서부터 종료단계까지 운용범위 내에서 우주과편에 의한 충돌확률 및 피해분석, 인공위성의 충돌회피기동, 인공위성 폐기기동, 대기권 재진입시 생존율을 해석하기 위한 총 4개의 모듈로 이루어져 있다. 지구 재진입 생존율 및 피해분석 모듈인 SARA는 SESAM(Spacecraft Entry Survival Analysis Modules)과 SERAM(Spacecraft Entry Risk Analysis Module)으로 구성되어 있다. SESAM은 재진입체의 부품에 대한 각 크기 정보와 질량, 궤도 진입조건을 입력받아 각 부품의 추락궤적 및 생존율을 계산하고 SERAM은 생존 부품에 대한 충돌확률, 피해면적, 피해확률을 계산한다.

SARA의 입력변수는 재진입 조건과 부품의 크기 및 재질정보, 세계인구밀도, 금속 물성치가 있다. 각 부품의 기하학적 모델링은 직육면체, 실린더, 구, 평판으로 나눈 단순모델을 사용하며 공력분석은 토크를 제외한 힘만을 고려한다. 또한 궤적분석에는 각 부품의 궤적운동만 분석하고 자세운동은 고려하지 않는다. 공력가열분석에서는 재진입체의 운동형태는 tumbling 또는 spinning만 있다고 가정한다. 각 부품의 형상 및 운동형태에 따른 C_D 값을 사용하고 1-D 열전달 모델이 아닌 lumped 모델을 사용한다. 또한 비열, 열전도도, 복사 방사율은 물체의 온도에 상관없이 상수값을 사용한다. 이를 통해 재진입체의 용융을 모사한다.

재진입체의 생존부품의 지상충돌 시 피해는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 사람에게 대한 추락물의 직접 피해로서 지상피해확률 계산을 통해 계산이 가능하다. 두 번째는 건물, 산업시설, 차량, 항공기 등에 대한 추락물의 피해로서 그 결과를 계산하기 어렵다. DRAMA에서는 사람에게 대한 추락물의 직접 피해확률만을 계산한다 [4][5].

2.2 지상피해확률 계산

지구 재진입체의 추락지점은 다양한 요소에 의해 큰 불확실성을 가진다. 재진입체 공력계수, 대기밀도, 초기 진입조건, 탄도계수에 주로 영향을

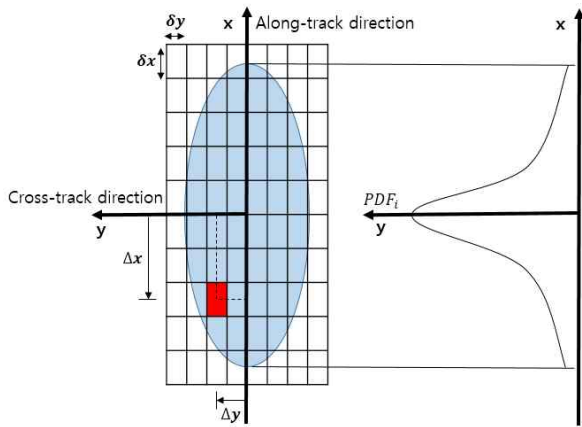


Fig. 2. Discrete Collision Probability density function

받는다. 따라서 확률밀도함수 PDF(Probability density function)를 이용한 확률적 분석으로서 충돌확률을 구하며 Fig. 2와 같다.

$$(P_i)_{n,m} = (PDF_i)_{n,m} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad (1)$$

$$P_C = \sum_n \sum_m (P_i)_{n,m} \cdot (\rho_P)_{n,m} \cdot (A_c)_{n,m} \quad (2)$$

$$A_C = (\sqrt{A_h} + \sqrt{A_i})^2 \quad (3)$$

식 (1)은 i 번째 생존부품의 충돌확률이고 본 논문에서는 DRAMA의 기본값을 사용하였다. PDF는 0.9645, Δx 와 Δy 는 10km이다.

지상에 대한 피해확률은 각 부품의 추락지점에 대한 충돌확률, 추락지점의 인구밀도, 피해면적의 곱으로 계산되며 식 (2)와 같다.

식 (2)의 A_c 는 피해면적으로써 사람의 단면적과 추락물의 단면적을 하나로 합한 원의 면적으로서 식 (3)와 같다.

NASA의 NSS(NASA Safety Standard) 1740.14 지침에 따르면 $A_h = 0.36m^2$ 이며 A_c 는 $8m^2$ 이하를 권장하고 있다. 식 (2)의 ρ_P 는 인구밀도로써 추락지점을 GPWv3 2000(Gridded Population of the World)모델에 대입하여 구한다. 인구밀도 모델에서 along-track만을 고려한 경우가 1-D이며, along-track과 cross-track을 같이 고려한 경우가 2-D가 된다[6][7][8].

2.3 가상의 위성 제원

CNUCE(Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico)의 우주과편 카테고리에 따르면 인공위성의 무게가 적어도 1,000kg 이상 일 때 지구 재진입 시 생존하여 지상에 대한 피해가 예상된다 한다. 하지만 이는 대략적인 기준이며

Table 1. Data of arirang 2nd satellite

	아리랑 2호
NORAD ID	29268
발사일	2006.07.28
폐기일	2015.07.28
원지점	685km
근지점	685km
경사각	98.21°
직경	2m
높이	2.8m
태양전지판	4.9m
임무 시작 질량	800kg
임무 종료 질량	780kg

임무장비나 포함된 부품에 따라 생존율에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 가상의 위성을 Table 1과 같이 아리랑 2호위성의 궤도제원과 크기가 같다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 아리랑 2호위성은 총 3번의 임무연장을 통해 2015년까지 운용될 예정이다. 따라서 폐기일 2015년 07월 28일로 가정한다[9].

III 분석 결과

3.1 재진입 시나리오 설정

공력가열은 고도 120km에서 시작한다고 가정한다. 그 이상의 고도에서는 대기밀도가 매우 희박하여 공력가열을 무시할 수 있다. 고도 120km에서의 인공위성 공전속도는 약 초속 7.7km, 비행 진입각은 -0.2도 가량이다.

대부분의 인공위성은 태양전지판을 이용하여 전력을 생산한다. 태양전지판은 얇고 넓은 형태를 띠고 있으며 인공위성의 표면에 장착되어있거나 붐에 연결되어있는데 본 논문에서는 붐에 연결되었다고 가정한다. 지구 재진입 궤적은 재진입체의 탄도계수, 공기밀도에 영향을 크게 받는데 인공위성의 표면적 중 태양전지판이 차지하는 면적이 매우 크다. 따라서 재진입 초기 태양전지판은 대기권 재진입이 시작된 후 곧 이어 떨어져 나가는데 이는 표면적이 넓어 동압에 영향을 크게 받으며 인공위성과의 연결부가 약하기 때문이다.

ESA의 DRAMA는 고도 95km에서 태양 전지판의 분리가 일어난다고 가정하고 이를 인공위성 전체 표면적에 반영하여 준다. 공력가열로 인해 인공위성의 파괴 및 분해가 일어나는데 이는 고도 78km에서 일어난다고 가정한다. 분해고도 이후부터는 각각의 모든 부품이 분해되어 낙하한다

고 가정하여 계산을 수행한다. 따라서 고도 122km에서 95km까지는 무게 800kg, 표면적 8.72m²이며 고도 95km에서 78km까지는 무게 780kg 표면적 5.6m²이다.

재진입 지점은 가상위성이 대한민국에 떨어진다고 가정하여 대한민국의 지리학적 범위인 경도 124°~131°, 위도 33°~37°사이에 파편이 떨어질 수 있도록 임의의 지점을 정했고 필리핀해 상공에서 재진입을 시작한다. 또한 현재 운용중인 위성의 정확한 구성 부품내역을 알 수 없으므로 가상위성의 부품구성은 Table 2와 같이 DRAMA에서 제공하는 부품과 같다고 가정한다.

Table 3은 재진입하는 부품의 일부를 나타낸 것이다. 실제 계산 시에는 총 무게 780kg에 달하는 33가지 종류, 68개의 부품이 낙하하는 것으로 가정한다. 각 부품은 AA7075, A316, TiAl6V4, Inconel로 이루어져있다.

Table 2. Parts of the imaginary satellite on DRAMA

부품	형태	폭/지름	길이	높이	질량	재질
TCU	Box	0.52	0.38	0.27	33	AA7075
PCU	Box	0.23	0.18	0.16	5	AA7075
Batt	Box	0.54	0.4	0.21	50	AA7075
Decoder	Box	0.26	0.2	0.19	6	AA7075
MTR	Cylinder	0.025	0.74	0	2.2	A316
ACC	Box	0.26	0.22	0.13	6.5	AA7075
PL2	Box	0.5	0.5	0.5	160	AA7075
Tank	Sphere	0.45	0.048	0	5.5	TiAl6V4
Thrsts	Cylinder	0.032	0.13	0	0.3	Inconel
PLE3	Box	0.25	0.23	0.12	5.3	AA7075
PLE3a	Box	0.4	0.25	0.24	54.0	AA7075

Table 3. Reentry conditions for the imaginary satellite

	재진입 초기조건
고도	122km
위도	20.0°
경도	130.0°
속력	7700m/s
비행진입각	-0.2°
방위각	98.21°

3.2 생존성 및 추락궤적 분석

DRAMA프로그램 내부의 지구 재진입 생존율 및 피해분석 모듈인 SARA모듈을 이용하여 가상의 저궤도 위성에 대해 분석하였다. 가상위성은 재진입으로부터 총 무게 198.83kg, 8가지 종류, 17개의 부품이 생존하여 지상에 추락하였다. 총 무게의 25.495%가 재진입에서 생존하여 지상에 충돌했으며 총 충돌면적은 2.5163m²이다.

생존율은 최소 1.21%에서 96.46%로 다양하며 부품 TANK의 경우 형태가 Sphere이고 재질이 TiAl6V4로서 생존율이 매우 높다. 이는 해당금속의 녹는점이 1,900°C로서 매우 높고 용해열(400 J/g)과 비열(750 J/kgK)이 타 금속에 비해 크기 때문이다. 실제 사례에서도 주로 탱크부품이 많이 발견된다. Table 4는 가상위성의 생존부품을 보여준다.

Figure 3은 가상위성의 재진입 시작 지점 및 각 피해지역을 보여주고 있다. 필리핀해 상공에서 재진입을 시작하여 일본 오키나와 현 부근 고도 95km에서 태양전지판의 분리가 일어나고

Table 4. Unburned parts the imaginary satellite

부품	개수	생존무게 (kg)	생존율 (%)	충돌면적 (m ²)
TCU	1	0.40	1.21	0.1145
Batt	1	8.24	16.47	0.0819
RWL	4	1.06	17.34	0.0508
Tank	1	5.30	96.46	0.1534
PL1	2	88.60	47.13	0.5234
PL2	1	62.32	38.95	0.1951
PL3	4	21.40	23.77	1.246
PLE3a	3	11.52	21.34	0.1512

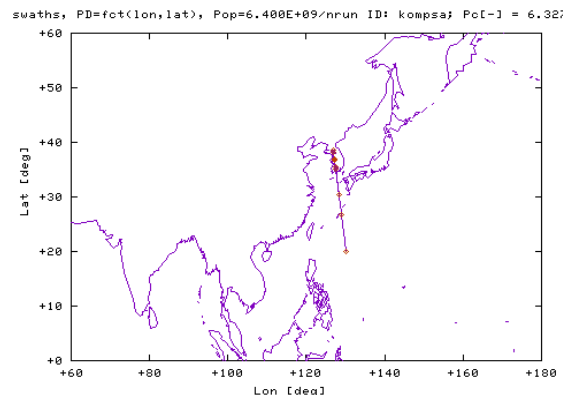


Fig. 3. Flight trajectory of the imaginary satellite

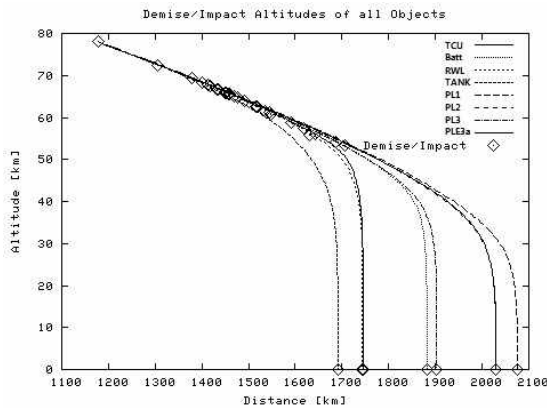


Fig. 4. Burned altitudes and flight range for the parts

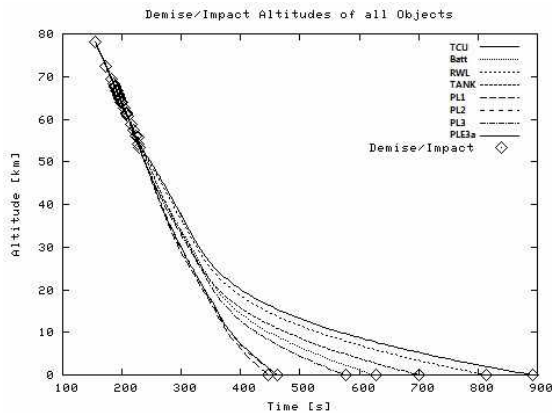


Fig. 5. Elapsed time of ground impact for the each part

가고시마 시 부근 고도 78km에서 break-up이 일어난 후 각 생존부품이 대한민국에 떨어짐을 알 수 있다.

Figure 4는 break-up이 일어난 고도 78km 이후부터 각 부품의 추락궤적을 보여준다. 대부분의 부품이 고도 78km ~ 55km 사이에서 소멸한다. 파편의 최소비행거리는 1690.73km, 최대비행거리는 2075.57km로서 피해범위구역은 along-track 방향으로 384.84km 이다.

Figure 5는 break-up 이후 각 파편이 지상에 도달하는데 까지 걸린 시간을 나타낸다. 지상충돌까지 걸리는 시간은 최소 446.28초, 최대 892.94초가 걸린다.

3.3 지상피해확률 분석

NASA의 NSS(NASA Safety Standard) 1740.14 지침에 따르면 생존부품의 피해면적은 $8m^2$ 이하, 피해확률은 1만분의 1이상이 되도록 권고하고 있다.

Table 5. Crash position and damage area by the Unburned parts

부품	추락경도	추락 위도	인구 밀도 (2D)	피해면적 (m^2)	피해 확률 (2D)	충돌 에너지 (KJ)
TCU	127.75	35.5	280.36	0.8338	2.4234 E-04	0.11
Batt	127.25	37	248.19	0.7664	1.9715 E-04	7.78
RWL	127.75	35.5	278.32	1.9724	5.6908 E-04	0.41
Tank	128.00	35.25	256.62	0.9623	2.5601 E-04	3.21
PL1	126.50	38.5	147.66	2.4238	3.7106 E-04	545.20
PL2	127.00	38	394.45	1.0628	4.3466 E-04	291.34
PL3	127.25	37	589.82	5.2664	3.2204 E-03	28.66
PLE3a	127.00	38	325.58	1.9863	6.7074 E-04	52.76

Table 5에서 생존부품의 피해범위구역은 대한민국의 전체로 설정할 수 있다. PL3의 경우 충돌지점이 대한민국 경기도 안성시로서 인구밀도가 가장 높고 파편의 피해면적 역시 가장 커 생존부품 중 피해확률이 가장 큰 $3.2204E-03$ 이다. 인구밀도가 가장 낮은 곳인 PL1 추락지점의 경우 황해북도 신계 부근이며 피해확률은 $1.8553E-04$ 이다. Batt의 경우 PL1보다 인구밀도는 높으나 피해면적이 작아 피해확률이 $1.4227E-04$ 로 가장 작다.

가상위성 생존부품의 2-D분석의 경우 총 피해면적은 $15.2742m^2$ 이고 총 피해확률은 $5.9614E-04$ 이다. 피해면적과 피해확률이 NASA의 권고수준을 초과한다. 1-D분석의 경우 총 피해확률이 $6.1023E-04$ 로서 NASA의 권고수준을 만족한다. 지상 충돌 시 운동에너지가 15J이상일 경우 인체에 상해를 가할 수 있다고 판단하는데 가상위성 생존부품 모두 인명피해를 야기하기 충분한 에너지를 가지고 있다.

Figure 6은 생존부품 중 하나인 Batt의 충돌확률을 보여준다.

Figure 7과 8은 생존부품 중 하나인 Batt에 대한 1-D와 2-D 피해확률을 보여준다.

DRAMA의 경우 생존부품의 추락지점에 대한 불확실성을 보정하기 위해 표준 대기밀도를 기준으로 $-20\% \sim +20\%$ 까지 편차 2%씩 주어 총 21 케이스에 대해 추락지점을 구하고 이를 통해 COIC(Center of Impact Corridor)를 설정한다. 여기서 COIC는 편차를 반영한 추락지점들의 중

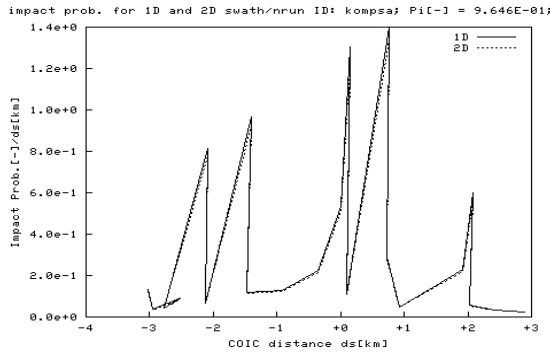


Fig. 6. Collision probability for the Batt

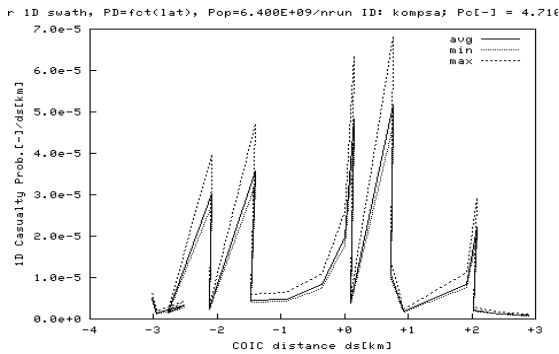


Fig. 7. 1-D damage probability for the Batt

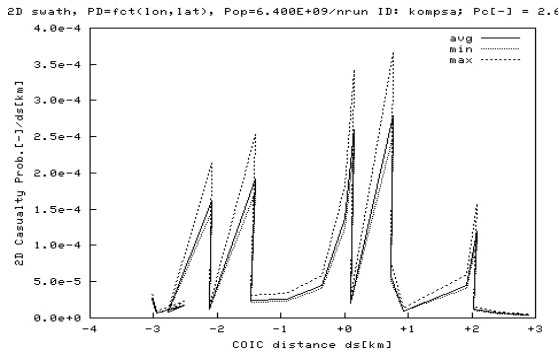


Fig. 8. 2-D damage probability for the Batt

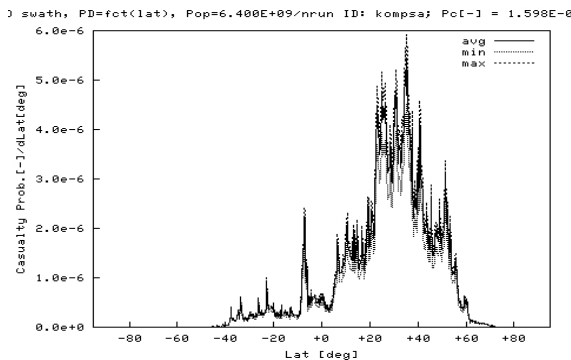


Fig. 9. Damage probability w.r.t. latitude

심을 말한다.

Figure 9는 재진입 인공위성의 지구 위도에 대한 피해확률을 보여준다. 가상위성의 경우 inclination이 98.21°로서 위도 상 대부분이 피해를 입을 수 있다. 피해확률은 위도 35° 부근에서 최대이고 5.9453E-03에 달한다. 이는 위도 35° 부근에서의 인구밀도가 가장 높기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 최근 재진입하는 우주물체가 증가함에 따라 현재 운용중인 아리랑 2호 위성과 궤적과 제원이 비슷한 가상위성을 가정하고, 재진입 시나리오를 설정하여 추락궤적 및 생존율, 피해확률을 분석하였다.

세계 각국이 운용하는 재진입 생존성 분석프로그램들은 동일한 위성체에 대한 결과값의 차이가 많이 나는데 이는 각각의 프로그램이 사용하는 열전달 모델 및 공력모델이 다르며 생존율에 영향을 미치는 다양한 요소를 모두 고려하지 못하기 때문이다. 재진입체의 생존성을 분석하는 것은 매우 어려운 일이지만 추락지역과 생존율 추정을 통해 지상피해가 없도록 미리 대처할 수 있다.

가상위성이 DRAMA프로그램에서 제공하는 위성의 내부부품이 동일하며 추락지역이 대한민국이라 가정하였을 경우, 총 무게 780kg 중 198.83kg이 살아남고 총 피해면적은 15.2742m²이며 총 피해확률은 5.9614E-03에 달할 것으로 분석되었다. 또한 각각의 생존부품이 가지는 운동에너지가 110J이상으로서 인명피해를 야기할 수 있다. 따라서 NSS 1740.14의 피해면적 8m², 피해확률 1만분의 1, 운동에너지 15J 미만 요구 조건을 충족시키지 못한다.

우리나라의 저궤도 인공위성은 다목적 실용위성인 아리랑 위성과 과학기술위성이 있다. 과학기술위성의 경우 그 무게가 약 100kg으로서 재진입에 의한 폐기의 경우 그 생존성이 매우 떨어질 것으로 예상되며 이에 대한 지상피해확률도 매우 낮을 것으로 예상된다. 하지만 다목적 위성의 경우 그 무게가 1,000kg에 근접하거나 그 이상으로써 지구 재진입에 의한 폐기 시 생존성이 10% ~ 40%에 달할 것으로 예상된다. 이때 지상피해확률은 NSS(NASA Safety Standard) 1740.14를 준수하지 못할 것으로 보인다. 따라서 다목적 실용위성에 대하여 '25년 규정'을 만족하는 궤도 설정과 잔여연료를 고려하여 지상에 대한 피해가

없도록 적정할 추락지역 설정이 필요하다[10].

후 기

본 논문은 한국연구사업재단의 우주핵심기술개발사업의 수행 결과 일부로써 지원에 감사드립니다. (NRF-2013M1A3A3A02042540)

References

- 1) Holger Krag, "Re-entry Analysis, space debris lecture", ESA/ESOC, July10th/11th, 2013
- 2) <http://www.aerospace.org/cords/reentry-data-2/annual-reentry-data/>
- 3) <http://www.aerospace.org/cords/spacecraft-reentry/fmf>
- 4) C.Martin, C. Brandmueller, "A Debris Risk Assessment Tool Supporting Mitigation

Guidelines", ESA SP-587, 2005

5) Tobias Lips, Bent Fritsche, "A comparison of commonly used re-entry analysis tools", Acta Astronautica, Volume 57, 2005, Issue 2-8, p. 312-323

6) Heiner Klinkrad, "Assessment Of The On-Ground Risk During Re-entries", ESA/ESOC, D-64293 Darmstadt, Germany

7) Heiner Klinkrad, "Space Debris-Models and Risk Analysis," Praxis Publishing, Chichester Uk, pp.266-271, 2006

8) Anon. "NASA Safety Standard: Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris", NSS 1740.14, NASA, Washington DC, August 1995a.

9) <http://celestrak.com/>

10) William Ailor, "Analysis of Reentered Debris And implications For Survivability Modeling", ESA SP-587, Germany, August 2005.