

### 재진입 인공위성의 부서짐 현상을 고려한 생존성 및 궤적 예측에 관한 연구

## A Study on the Survivability and Trajectory for Reentry Satellites with Breakup

### 1. 서론

1957년 인공위성 Sputnik 1이 소련에 의해 처음으로 발사된 이래로 우주쓰레기는 계속해서 증가해오고 있다. 특히, 2007년 1월에 발생한 중국 자국 위성 평원(Fengyun)-1C에 대한 우주 요격실험, 그리고 2009년 2월에 발생한 미국의 이리듐(Iridium) 위성과 코스모스(Cosmos 2251) 위성의 충돌로 인하여 그 수가 급격히 증가하였다. 저궤도(LEO)에 존재하는 우주쓰레기는 적어도 7 km/s 이상의 매우 빠른 속도를 가지고 있으므로 또 다른 인공위성 및 우주정거장 등과 충돌한다면, 막대한 피해뿐만 아니라 더 많은 양의 우주쓰레기 발생을 초래할 수 있다. 미전략사령부(United States Strategic Command; USSTRATCOM)의 우주감시체계(Space Surveillance Network; SSN)는 우주물체의 궤도 및 특정 매개변수 등을 결정하기 위하여 레이더와 망원경으로부터 우주물체들을 추적해 오고 있으며, epoch time에 따라 궤도 정보를 나타내는 Two Line Element(TLE) 데이터를 제공하고 있다. TLE 데이터를 활용하여 궤도상에 있는 물체의 과거나 미래의 위치 및 속도 정보들을 예측할 수 있다.

저궤도에 존재하는 우주물체들은 태양 복사압 및 대기 저항 등의 섭동력으로 인하여 궤도 수명이 끝남과 동시에 지구 대기 중으로 재진입하게 된다. 극초음속으로 재진입하는 대부분의 우주물체들은 공력 가열 현상으로 발생하는 용융(melting)이나 삭마(ablation) 등의 현상으로 다 타서 없어지지만, 살아남은 우주물체는 지상에 도달함으로써 인명, 재산 등에 막대한 피해를 줄 수 있다. Fig. 1은 우주물체에 발생하는 주요 특성들을 나타낸다. 재진입 물체로부터 발생하는 위험 범위를 보수적으로 명시하기 위하여 각국의 우주기구에서는 space debris mitigation standards 및 handbooks 등을 만들어왔다. 우주물체 또는 우주쓰레기가 이러한 standards를 준수하는지 확인하기 위하여 많은 연구 센터 및 우주기관에서는 재진입 해석 프로그램들을 개발해 왔다. 대표적인 재진입 해석 프로그램으로는 미국 NASA의 Object Reentry Survival Tool(ORSAT)과 유럽 HTG사의 Spacecraft Atmospheric Re-Entry and Aerothermal Breakup(SCARAB)이 있다. 하지만, 기존의 재진입 해석 프로그램들은 아직까지 비평형 열유속 계산, 삭마, 그리고 부서짐 과정 등 여러 가지 개선사항이 요구된다. 특히, 부서짐 과정은 재진입 궤적 및 생존성에 큰 영향을 미치기 때문에 반드시 고려되어야 한다.

이와 관련하여 재진입 물체의 부서짐 현상에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 수치해석적인 연구에 비해 실험적 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 기존의 재진입 해석 프로그램들은 실험을 기반으로 한 부서짐 현상을 고려하지 않았으며, 임의의 측면 속도를 가정하거나 단순히 탄도 계수(ballistic coefficient)에 의한 영향만을 고려하였다. 본 연구는 충격파 터널(shock tunnel)을 활용한 극초음속 유동에서의 재진입 물체의 부서짐 현상을 수행함으로써 기존의 연구에 대한 이해를 넓히고자 한다. 또한, 재진입 해석 프로그램을 개발하고 실험 데이터를 기반으로 정립된 이론을 활용하여 인공위성의 부서짐 현상을 고려한 재진입 생존성 및 궤적 예측을 수행하고자 한다.

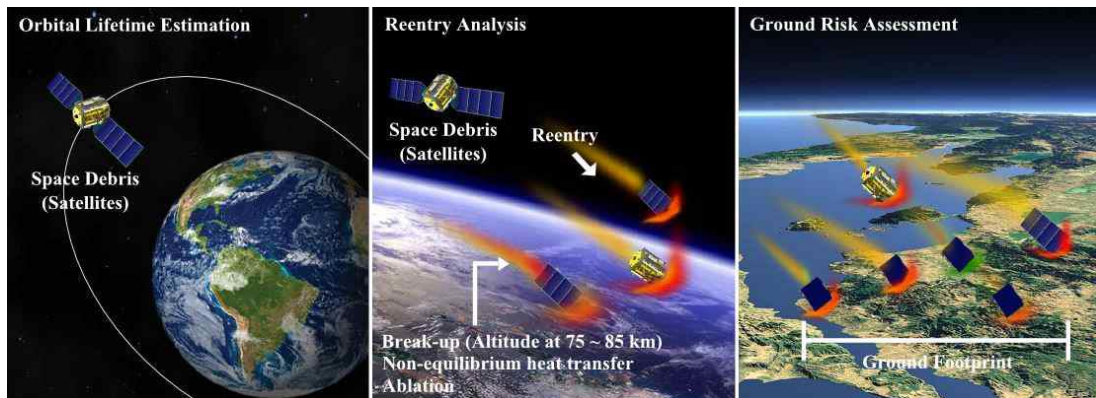


Fig. 1. Schematic of characteristics of space objects.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장비

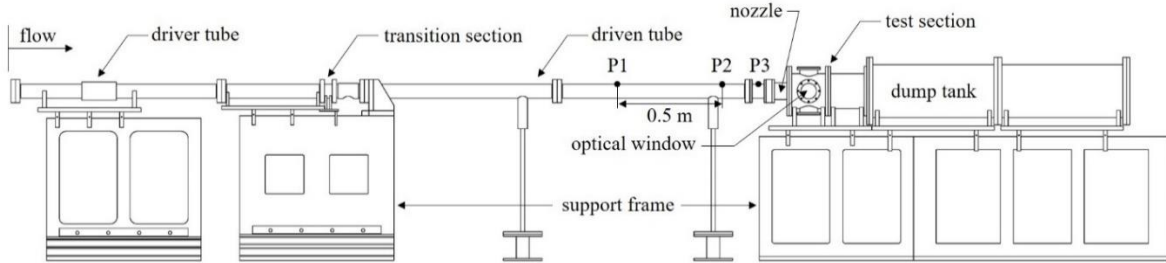


Fig. 2. Schematic of a shock tunnel (P1, P2, and P3: PCB sensors are mounted).

충격파 터널은 충격파 튜브(shock tube), 마하 6 노즐, 시험부(test section), 그리고 덤프 탱크(dump tank)로 구성되어있다. 총 3가지 유동 조건과 함께 충격파 터널을 활용한 실험이 수행되었으며, Fig. 2는 충격파 터널의 개략도를 나타낸다.

### 2.2 시험 모델 및 모델 장착 기법

본 연구에서는 직경 2.38 ~ 6 mm를 가진 철 또는 아세탈로 만들어진 구슬을 시험 모델로 사용하였다. 시험부내의 장착된 모델이 유동에 의한 약한 충격에도 잘 떨어져나가지게 하기 위하여 여러가지 방법들이 시도되었으며, 최종적으로 줄 기법(string method)과 전자석 기법(electromagnetic method)이 만들어졌다 Fig. 3은 두 가지 모델 장착 기법을 나타낸다.

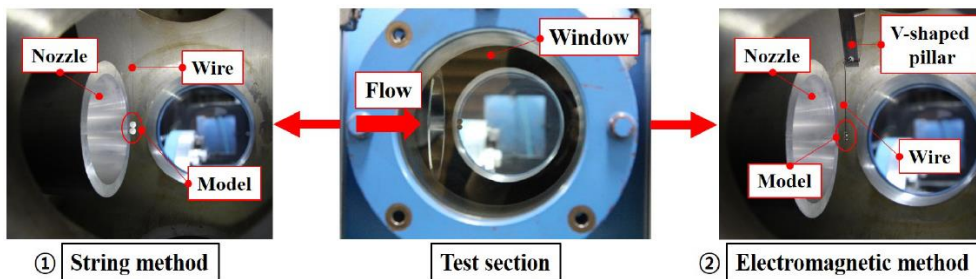


Fig. 3. Two mounting methods.

### 2.3 모델 추적 기법

시험 모델의 변위, 속도, 가속도는 시간에 따라 얻어진 이미지로부터 계산될 수 있다. 각각의 이미지에 나타나있는 모델의 위치를 파악하기 위하여 circle Hough transform 기법과 local adaptive thresholding 기법을 사용하였다. Fig. 4는 circle Hough transform 기법을 적용하여 모델의 위치를 찾은 것이다. Fig. 4(a) 에서는 모델을 찾지 못하지만, local adaptive thresholding 기법을 적용한 Fig. 4(b) 에서는 모델을 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

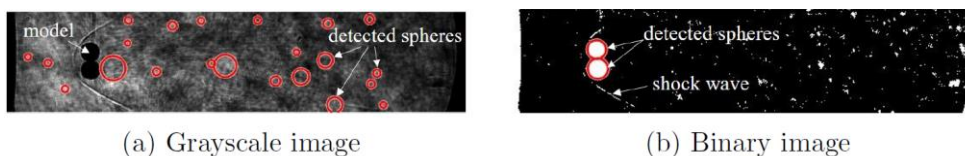


Fig. 4. Detected spheres by the tracking technique (red circles represent the detected spheres).

### 3. 부서짐 과정 모델링 및 실험 결과

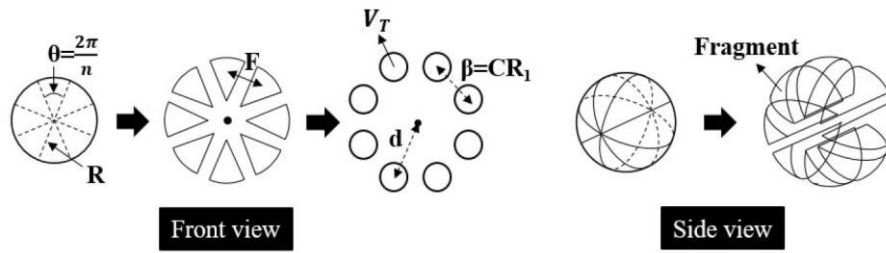


Fig. 5. Schematic of the separation modeling.

에너지와 일의 보존 법칙을 기반으로 재진입 물체의 부서짐 과정을 모사하기 위한 이론을 제시하였다. Fig. 5는 부서짐 과정 모델링에 대한 개략도를 나타낸다. 제시한 이론과 실험 데이터와의 비교를 통하여 본 연구진이 제시한 이론의 타당성을 입증하였다. Fig. 6은 시간에 따른 다중 객체의 거동을 나타낸다. 모델들이 대칭적으로 분산되며 가장 위쪽의 모델로부터 측면 속도를 계산할 수 있다.

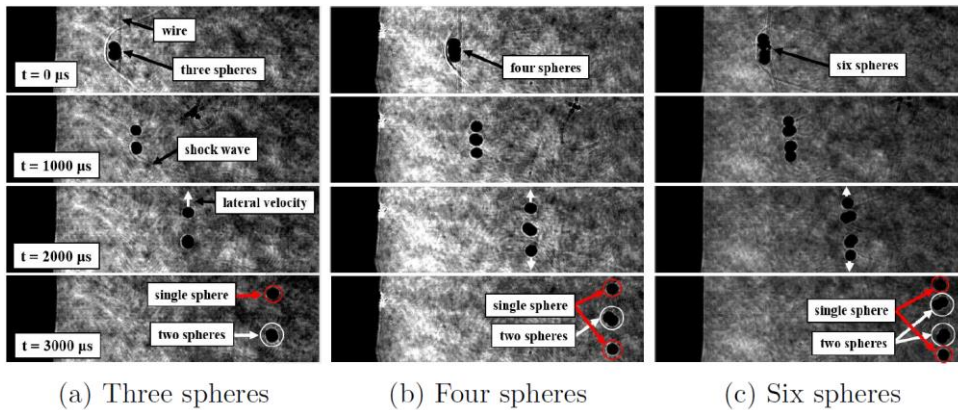


Fig. 6. Separation behaviour of multi-spheres.

### 4. 재진입 해석 프로그램 개발

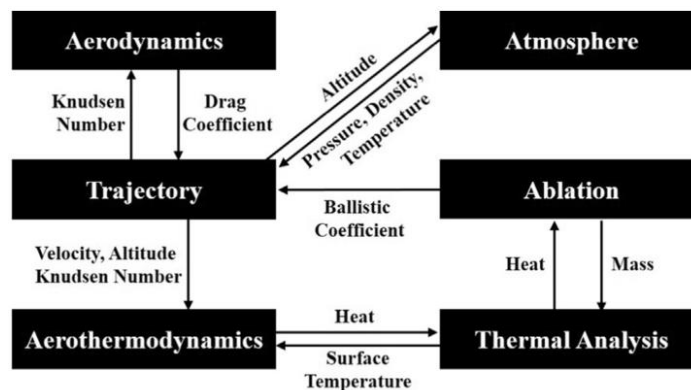


Fig. 7. Logic schema of the reentry code.

재진입 우주물체의 궤적 및 생존성을 분석하는 해석 프로그램이 개발되었다. 궤적 모듈, 공기역학 모듈, 대기 모듈, 공기열역학 모듈, 열분석 모듈 그리고 삭마 모듈인 총 6개의 모듈로 구성되어 있다.

### 5. 해석 결과

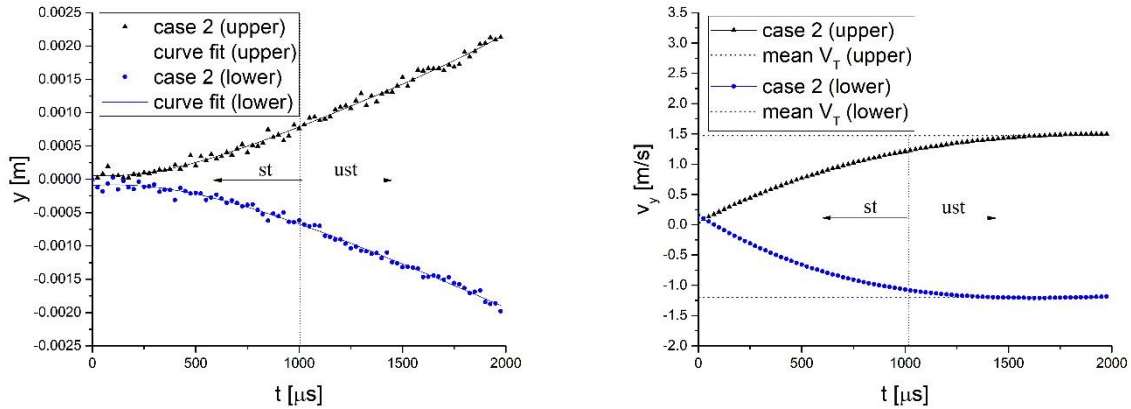


Fig. 8. Displacement and velocity for two spheres.

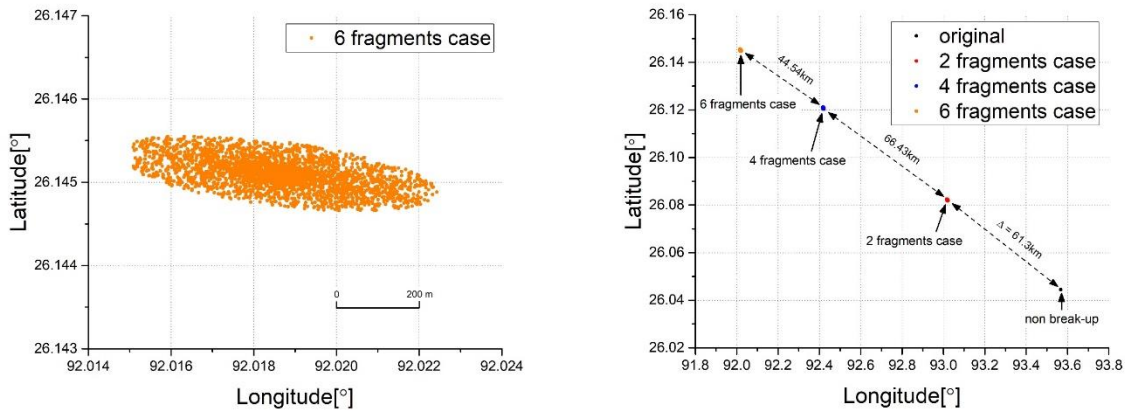


Fig. 9. Monte Carlo simulation results of ground footprint for multi-spheres.

Figs. 8은 두 파편에 대하여 실험적으로 측정된 최종 측면 속도를 나타낸다. 두 물체가 가까울 때는 충격파의 상호작용으로 인하여 가속도 운동을하다가 충분히 멀어졌을 때는 최종 측면 속도를 가지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 재진입 인공위성의 지상 충돌 궤적에 대한 결과이다. 부서진 파편의 개수에 따라 footprint 및 downrange가 크게 달라지는 것을 알 수 있다.

### 6. 결론

본 연구는 인공위성의 부서짐 과정을 고려한 재진입 생존성 및 궤적 예측에 관한 내용이다. 먼저, 충격파 터널을 활용한 극초음속 유동에서의 다중 객체의 분리 현상에 대한 실험적 연구가 진행되었다. 서로 다른 크기와 재질을 가진 구 형상의 모델이 고려되었으며, 실험을 위한 모델 장착 기법, 모델 추적 기법, 그리고 광학 기법이 개발되었다. 다중 객체에 대한 측면 속도가 측정되었으며, 실험 데이터를 기반으로 하여 본 연구진이 제안한 이론을 검증하였다. 다음으로 재진입 물체의 생존성 및 궤적을 예측하는 프로그램을 개발하였다. 총 6 개의 모듈로 구성하였으며, NASA의 ORSAT 프로그램을 기반으로 한다. 마지막으로 실험 데이터를 기반으로 검증된 이론을 재진입 해석 프로그램에 접목하였으며, 재진입 인공위성의 지상 충돌 궤적을 Monte Carlo 방법을 활용하여 분석하였다. 부서진 파편들의 개수에 따라 변화된 측면 속도 및 탄도 계수는 지상 충돌 궤적 예측에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 재진입 인공위성의 부서짐 현상은 지상 충돌 궤적 예측에 반드시 고려되어야 한다.