

'10 추계학술대회 우수 논문

우주용 실딩 시스템에 적용할 복합재료 평판의 초고속 충돌 해석

손유나*, 문진범*, 임 건*, 김천곤**+

Hypervelocity Impact Analysis Of Composite Plate For Space Shielding System

Yu-Na Son*, Jin-Bum Moon*, Gun Lim*, Chun-Gon Kim**+

ABSTRACT

Among the factors that threaten spacecraft, Micrometeoroid and Orbital Space Debris(MMOD) cause damage to spacecraft and impact velocity is about 8~70km/s. Nowadays, various Whipple Shield are studied and applied to protect spacecraft. As the materials used to Shielding System, aluminum is usually used but composite is also used increasingly. So this study compared characteristics of hypervelocity impact of Aluminum and composites through finite element analysis. The Projectile was a spherical shape using Aluminum 2017-T4, and aluminum plate was using Aluminum 6061-T6, CFRP plate was using T300/5208. Initial impact velocity of projectile was 1km/s. As a result, kinematic energy of projectile decreased to about 64J and about 63J for aluminum plate and CFRP plate, respectively after impact. Although both results is almost same about the absorption of impact energy, you can think the CFRP has good ballistic characteristic, because CFRP is lighter about 1.7 times compared with density of aluminum.

초 록

우주 구조물을 위협하는 여러 요소들 중 MMOD(MicroMeteoroid and Orbital Debris)는 약 8~70km/s의 속도로 우주 구조물과 충돌하여 큰 피해를 주고 있다. 이러한 피해로부터 우주 구조물을 보호하기 위해서 현재 다양한 위플 실드가 연구, 적용되고 있다. 위플 실드에는 알루미늄이 주로 사용되고 있지만, 복합재료의 사용도 증가하고 있어 본 연구에서는 알루미늄과 복합재료의 초고속 충돌 특성을 유한 요소 해석을 통해 비교하였다. 충격체는 직경 5.5mm인 알루미늄 2017-T4의 구를 사용하였고, 알루미늄 평판은 6061-T6, CFRP 평판은 T300/5208을 사용하였다. 충격체의 초기 충돌 속도는 1km/s이다. 충돌 후 충격체의 운동에너지는 알루미늄 평판의 경우 약 64J 감소하였고, CFRP 평판의 경우 약 63J 감소하였다. 비슷한 충돌 에너지 흡수 정도를 보이고 있지만, 밀도를 비교해 보았을 때 CFRP가 약 1.7배 가볍기 때문에 방탄 특성이 더 좋다고 할 수 있다.

Key Words : 초고속 충돌(Hypervelocity Impact), 복합재료(Composite Materials)

1. 서 론

우주에 대한 관심이 급증하고 있는 지금, 지구 궤도에는 많은 우주 구조물들이 있다. 하지만 우주 환경에는 우주 구조물을 위협하는 여러 유해 요소들이 존재한다. 원자산소에 의한 부식, 큰 편차를 보이는 온도 사이클, 고진공, 유해 자

외선, 그리고 MMOD(MicroMeteoroid and Orbital Debris)와 의 고속 충돌 등이다.

이 중 MMOD는 최근 들어 급격히 증가하여 우주 구조물에 미치는 위협이 커지고 있다. 이들은 약 8~70 km/s의 빠른 속도로 궤도를 돌고 있어 충돌 후, 우주 구조물에 큰 피해를 줄 수 있다. 현재 약 2만여 개의 MMOD가 우주 궤도

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

**+ 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

상에 존재하여 그 피해가 점차 증가하고 있다.[1,2,3]

이렇듯 증가하는 MMOD의 위협에서 벗어나기 위해 우주 구조물에 MMOD 설딩 시스템을 적용하는 연구가 진행되고 있다. 현재 사용중인 MMOD 설딩 시스템으로는 위플 실드(Whipple Shield)가 있다. 초기의 위플 실드는 두 개의 알루미늄 판으로 구성된 것으로 일정한 거리만큼 떨어져 있어 가장 기본적인 형태를 띠고 있었다. 근래에는 Multi-Layered Shield, Stuffed Whipple Shield 등 중간 층에 방탄 효과가 좋은 재료를 사용하는 형태도 많이 연구되고 있다. 이러한 위플 실드는 우주 정거장(ISS)뿐만 아니라 인공위성 등에도 실제로 적용되고 있다.

초기 위플 실드의 재료로 알루미늄이 많이 연구되었었다. 하지만, 낮은 열 변형률과 높은 강도, 강성을 갖는 복합재료의 사용이 우주 구조물뿐만 아니라 설딩 시스템에도 점점 증가하고 있다. 방탄 특성 또한 복합재료가 알루미늄보다 현저히 좋기 때문에 보다 가벼운 복합재료를 설딩 시스템에 적용하려는 연구가 활발히 진행 중이다. 또한, 금속재료만 사용하는 것보다는 복합재료와 함께 사용하는 시스템이 더 좋은 성능을 보인다.[4,5]

본 연구에서는 상용해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 고속충돌 해석을 수행하였다. 기존의 연구들은 약 200~500m/s의 속도 범위를 고속 충돌로 정의하여 해석 연구를 수행하였다.[6,7] 하지만 우주 공간 상에서 충돌이 일어나는 속도는 그보다 훨씬 높은 범위에서 발생하기 때문에 그에 맞는 해석 연구가 필요하다.

본 연구에서는 복합재료를 이용한 새로운 설딩 시스템을 제안하기 위해서 선행 연구로서, 알루미늄 평판과 CFRP 평판의 초고속 충돌 특성을 해석을 통해 알아보려고 한다. 본 해석에서는, 알루미늄 충격체가 1km/s로 알루미늄 평판과 CFRP 평판에 충돌하는 해석을 수행하고, 그 결과를 비교해 보았다.

또한, 본 연구실에서 보유하고 있는 2 Stage Gas Gun을 사용하여 알루미늄 평판과 CFRP 평판의 초고속 충돌 실험을 해 보았다. 약 1km/s의 속도 범위에서 실험한 결과와 해석한 결과를 비교하여 해석의 타당성을 확보하고 어떠한 보완 점이 필요한지 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 문제설명

본 연구에서는 고속 충돌 시 에너지 흡수 정도를 비교하기 위해, 2mm 두께의 알루미늄 평판과 CFRP 평판의 1km/s의 속도로 충돌하는 고속 충돌 해석을 수행하였다.

충격체는 직경 5.5mm 알루미늄 2017-T4의 구를 사용하였다. 평판은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가로×세로×두께가

100×100×2 mm³이다. 알루미늄 평판은 알루미늄 6061-T6을 사용하였고, CFRP 평판은 T300/5208을 사용하였으며 적층 순서는 [0/45/-45/90]_{2s}이다. 또한, 경계 조건은 4 Edge Fixed이다. 본 연구에 사용된 알루미늄과 CFRP의 재료 물성은 Table 1, 2, 3에 나타나 있다.

2.2 수치해석 모델링

고속 충돌의 경우, 시편의 전 범위에 걸쳐 변형이 일어나지 않고 충격체가 부딪친 국소 부위만 큰 변형이 발생하기 때문에 그 부분의 격자를 조밀하게 나타내었다. 평판은 약 6400여 개의 셀(Shell) 요소로 구성되어 있고, 충격체는 약 7000여 개의 솔리드(Solid) 요소로 구성되어 있다.

알루미늄은 탄성영역 외에도 소성영역에서의 변화가 크기 때문에 평판과 충격체는 MAT003 (Plastic Kenematic)을 사용하였다. CFRP 평판은 직교성 재료를 잘 표현하는 MAT054 (Enhanced Composite Damage)을 사용하였다. 복합재료의 경우 많은 디자인 변수들이 있기 때문에 적절한 값을 선택하여 입력해 주어야 한다.

본 연구에서는 충격체에 의한 파손과 충격체의 관통을 모사하기 위해 응력이 일정한 파손기준식 또는 파손 변형률을 만족하면 해당 요소가 소멸되는 Contact Eroding Surface to Surface를 사용하였다. 요소의 소멸 효과를 주기 위해 각 재료에 유효 파손 변형률(Effective Failure Strain)을 적용하였다. 알루미늄 평판은 0.12, CFRP 평판은 0.06의 값을 적용하였다.

충격체의 경우, 식 (1)과 같이 큰 충격 에너지를 받아 요소가 소멸되면 해석 시간이 지날수록 소멸된 요소만큼 질량이 감소하게 되어 속도 감소에 비해 운동에너지의 감소가 상대적으로 크게 된다. 또한, 질량의 감소로 인해 충돌 에너지가 약해지게 된다. 그러한 이유로, 본 해석에서는 충격체의 유효 파손 변형률은 적용하지 않았다. 식 (1)에서 ΔE_{K,D}는 충격체의 운동에너지 변화량을 나타내고, m_i와 V_i는 초기의 질량과 속도, m_r와 V_r는 충돌 후의 질량과 속도를 나타낸다.

$$\Delta E_{K,D} = \frac{1}{2} m_i V_i^2 - \frac{1}{2} m_r V_r^2 \quad (1)$$

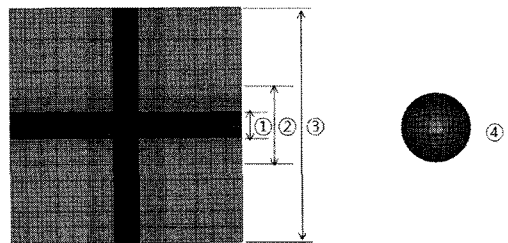


Fig. 1 Mesh and Dimension of Model.

Table 1 Material Properties of Al 2017-T4 (Projectile)

Density [g/cm ³]	2.79
Young's Modulus [GPa]	72.4
Poisson's Ratio	0.33
Ultimate Tensile Strength [MPa]	179
Tensile Yield Strength [MPa]	68.9
Fatigue Strength [MPa]	89.6

Table 2 Material Properties of Al 6061-T6 (Plate)

Density [g/cm ³]	2.7
Young's Modulus [GPa]	68.9
Poisson's Ratio	0.33
Ultimate Tensile Strength [MPa]	310
Tensile Yield Strength [MPa]	276
Fatigue Strength [MPa]	96.5
Elongation at Break [%]	12

Table 3 Material Properties of T300/5208 (CFRP)

Density [g/cm ³]	1.6
Longitudinal Young's Modulus [GPa]	181
Transverse Young's Modulus [GPa]	10.3
Shear Modulus [GPa]	7.17
Poisson's Ratio	0.28
Longitudinal Tensile Strength [MPa]	1500
Longitudinal Compressive Strength [MPa]	1500
Transverse Tensile Strength [MPa]	40
Transverse Compressive Strength [MPa]	246
Shear Strength [MPa]	68

또한, CFRP 평판의 층별 충돌 특성을 살펴보기 위하여 솔리드 요소로 모델링 하였다. 여기에는 MAT059(Composite Failure Solid Model)와 층 별 층간 분리를 모사하기 위해 Tiebreak(Contact Automatic One Way Surface to Surface Tiebreak) 옵션을 적용하였다.

해석 시 고려해야 하는 것으로 Hourglass가 있다. 대부분의 Explicit Code에서 발생할 수 있는 문제로 요소의 변형이 일어났음에도 불구하고 내부 에너지(Internal Energy)가 '0'에 가까운 상태가 발생할 수 있다. 이는 하나의 적분점을 가지고 있는 솔리드, 셸, 두꺼운 셸(Thick Shell) 요소에서 적분점이 충분하지 않아 발생한다. 일반적으로 해석 모델에 대한 전체의 Hourglass 에너지가 그 내부 에너지의 10% 이상이면 해석 결과를 신뢰하지 않는다. 본 연구에서는 Hourglass type 4를 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 알루미늄 평판의 고속 충돌 특성

실링 시스템의 재료로 많이 쓰이는 알루미늄은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 충돌 후 발생된 응력 또는 에너지가 전 방향으로 확산되는 등방성 재료의 특징을 잘 보여주고 있다. 셸 요소로 모델링 한 경우, 평판의 중립면(Mid-Surface)에서의 결과를 보인다. 시간이 지남에 따라 응력이 확산되어 그 영향이 점차 약해짐을 볼 수 있다.

충격체의 경우, Table 4에서 보는 바와 같이 속도는 약 323.62m/s가 감소하였고 운동에너지는 약 64.863J 감소하였다. 충격체의 감소된 운동에너지는 알루미늄 평판이 흡수한 충돌 에너지와 같다고 볼 수 있다.

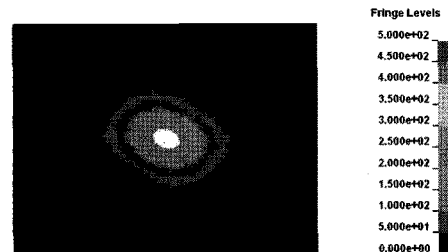
Fig. 2 Von Mises Stress Results for Aluminum Plate ($t=0.005\text{ms}$, $V=1000\text{m/s}$).

Table 4 Results of Velocity and Kinetic Energy for Projectile (Case of Aluminum Plate)

	Initial	Residual
Velocity[m/s]	1000	676.38
Kinetic Energy[J]	119.94	55.077

3.2 CFRP 평판의 고속 충돌 특성

가볍고 고강성, 고강도의 특성을 가진 CFRP 평판의 고속 충돌에 대한 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 특징적으로 볼 수 있는 것은 방향성을 가지고 있다는 점이다. 적층 순서는 [0/45/-45/90]2s로 중립면에 위치한 0°방향으로 응력이 확산됨을 볼 수 있다. 이러한 특징은 등방성 재료의 알루미늄과는 다른 고속 충돌 특성을 보인다.

약 500m/s의 속도에서는 층간 분리가 나타남을 보였지만[8] 1km/s가 넘는 초고속 충돌의 경우, 층간 분리가 일어나기 전에 요소가 파손한계에 도달하여 소멸되어 층간 분리는 나타나지 않았다. Fig. 4는 충격체가 솔리드 요소로 모델링한 CFRP 평판을 관통하는 모습을 모사하고 있다. 또한, 솔리드 요소로 모델링하면 Fig. 5처럼 적층 각도에 따른 응력 분포를 확인 할 수 있다.

셸 요소로 모델링한 결과를 보면 314.82m/s의 속도 감소를 보이고, 충격체의 운동에너지 감소도 약 63.606J을 보이고 있다. 솔리드 요소로 모델링 한 것과 비교해 보았을 때 약 150m/s의

속도 차이를 보이고 있다. 이는 셸 요소와 솔리드 요소의 계산 방법 차이에서 발생된 것으로 보고 있다. 또한, 사용된 Material Card와 Contact Card도 서로 다르기 때문에 다른 결과를 보이는 것으로 생각된다.

알루미늄 평판과 비교해 보면, 알루미늄의 응력분포보다 약 3배 높은 응력이 국소 부분에 분포함을 볼 수 있다. 이는 CFRP 평판이 더 높은 충돌 에너지를 흡수하는 것으로 판단된다. 따라서, 같은 두께로 해석한 결과 비슷한 방탄 효과가 있음을 볼 수 있으나 밀도에서 CFRP 재료가 더 가볍기 때문에 같은 밀도 기준에서 보면, 복합재료의 사용이 일반 금속을 사용할 때보다 충돌 에너지 흡수 효율이 좋음을 알 수 있다.

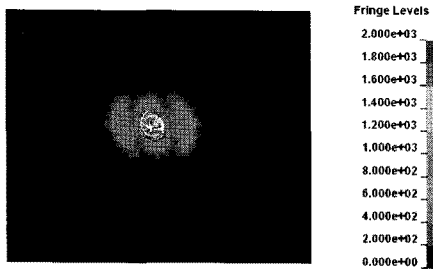


Fig. 3 Von Mises Stress Results for CFRP Plate ($t=0.005ms$, $V=1000m/s$).

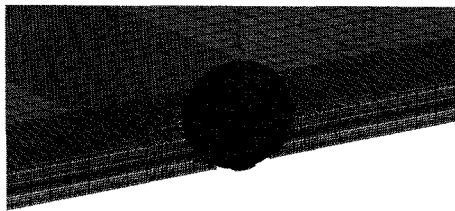


Fig. 4 Simulation of Eroding Element at $t=0.004ms$.

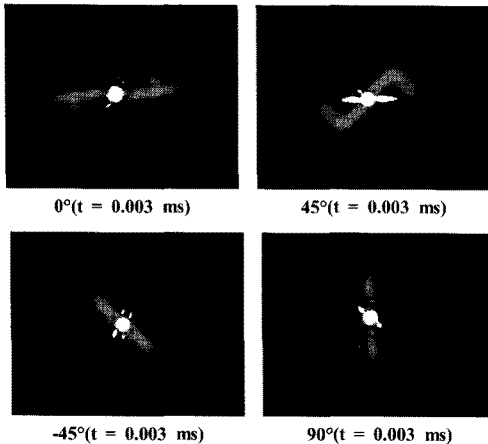


Fig. 5 Result of Stress Range at Different Layered Angles (Using Solid Element for CFRP Plate).

Table 5 Results of Velocity and Kinetic Energy for Projectile (Case of CFRP Plate)

Element	Velocity[m/s]	Initial	Residual
		Shell Element	1000
Solid Element	Kinetic Energy[J]	119.94	56.334
	Velocity[m/s]	1000	837.46
Solid Element	Kinetic Energy[J]	119.94	84.147

3.3 실험 결과 비교

본 연구실에서 보유하고 있는 2 Stage Gas Gun을 이용하여 알루미늄 평판과 CFRP 평판의 초고속 충돌 실험을 해 보았다. 본 실험에서는 CFRP 평판의 면밀도와 동일하게 하기 위해 알루미늄 평판의 두께를 1mm로 하였다. 알루미늄 평판은 12번, CFRP 평판은 8번 실험하였고, 이들의 평균 값을 Table 6에 제시하였다.

해석한 결과와 비교해 보면 알루미늄 평판의 경우, 해석을 두께 1mm로 하면 두께 2mm 결과의 약 1/2배를 보여준다. 해석을 통해 얻은 두께 1mm에서의 충격에너지 흡수는 약 37.6J로 실험 값보다 훨씬 더 낮은 흡수 결과를 보인다.

CFRP 평판은 같은 두께 2mm로, 실험에 비해 해석 결과가 약 81%의 높은 흡수 결과를 보인다. 이와 같이 알루미늄 평판과 CFRP 평판 모두에서 실험과 해석이 차이를 보이고 있다. 이는 해석 시 사용되는 유효 파손 변형률의 적용값에 따라 달라지는 것으로 생각된다.

따라서, 실험과 비교하여 적절한 유효 파손 변형률을 적용하는 것이 중요하다.

Table 6 Results of Velocity and Kinetic Energy (Case of Experiment)

	Average Initial Velocity[m/s]	Average Residual Velocity[m/s]	Change of Kinetic Energy[J]
Aluminum	1032.667	791.5	55.422
CFRP	994.375	745.625	55.19

4. 결론

본 연구에서는 우주용 MMOD 설딩 시스템에 사용될 재료의 초고속 충돌 해석을 상용 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 재료는 알루미늄과 CFRP로, 두께 2mm의 평판을 약 1km/s의 속도로 충돌하여 결과를 비교하였다.

알루미늄 평판은 충돌 후 발생된 응력 분포가 전방향으로 일정하여 등방성 재료의 특성을 잘 나타내었다. CFRP 평판은 충돌 후 발생된 응력 분포가 방향성을 띠며 복합재 특유

의 적교성을 잘 나타내고 있다. 또한, 적층 각도에 따른 응력 분포도 살펴볼 수 있었다.

CFRP 평판의 충돌 에너지 흡수 성능은 알루미늄 평판과 비슷한 흡수 정도를 보이고 있다. 하지만, 밀도를 비교해 보면 CFRP 평판이 약 1.7배 가볍기 때문에 MMOD 설당 시스템에 적용하는 것이 보다 효율적이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단이 지원하는 중견연구자지원사업으로 이루어진 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Handbook for Limiting Orbital Debris”, National Aeronautics and Space Administration(NASA), 2008.
- 2) Nicholas L. Johnson, “Orbital Debris : The growing threat to space operations”, National Aeronautics and Space Administration(NASA), 2010.
- 3) “Orbital Debris Quarterly News”, National Aeronautics and Space Administration(NASA), Vol. 14, 2010.
- 4) William P. Schonberg and Eve J. Walker, “Use of composite materials in multi-wall structures to prevent perforation by hypervelocity particle impact”, Composite Structures, Vol. 19, 1991, pp. 15-40.
- 5) William P. Schonberg and Eve J. Walker, “Hypervelocity impact of dual-wall space structures with graphite/epoxy inner walls”, Composite Engineering, Vol. 4, 1994, pp. 1045-1054.
- 6) L.J. Deka, S.D. Bartus, “Damage evolution and energy absorption of FRP plates subjected to ballistic impact using a numerical model”, 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006.
- 7) M. Yong, L. Iannucci, “Efficient modeling and optimization of hybrid multilayered plates subject to ballistic impact”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, 2010, pp. 605-624.
- 8) 안정희, 권진희, “케블라 복합재 평판의 고속충돌 특성 수치해석”, 한국복합재료학회지, Vol. 22, 2009, pp. 18-23.