

論文

비구속 삽입된 직물 섬유를 이용한 샌드위치 쉴드의 초고속 충격 해석

문진범*, 박유림*, 손길상*, 김천곤***

Computational analysis of sandwich shield with free boundary inserted fabric at hypervelocity impact

Jin-Bum Moon*, Yurim Park*, Gil-Sang Son* and Chun-Gon Kim***

ABSTRACT

In this paper, a novel hybrid composite shield to protect space structures from hypervelocity impact of micrometeoroid and space debris is proposed. The finite element model of the proposed shield was constructed and finite element analysis was conducted to approximate the energy absorption rate. Before the final model analysis, analysis of each component including the aluminum plate, PMMA plate, and intermediate layer of fabric was performed, verifying the finite element model of each component. The material properties used in the analyses were predicted material property values for high strain rates. The analysis results showed that, other than the fabric, the energy absorption rate of each component was in agreement. Afterwards, the finite element model of the hybrid composite shield was constructed, where it was analyzed for the restrained and unrestrained fabric boundary condition cases. Through the finite element analysis, the fiber pullout mechanism was realized for the hybrid shield with free boundary inserted fabric, and it was observed that this mechanism led to energy absorption increase.

초 록

본 연구에서는 우주 파편들과의 초고속 충돌로부터 우주 구조물을 보호하기 위한 새로운 하이브리드 복합재료 쉴드가 제안되었다. 제안된 쉴드의 유한요소 모델을 구성하고, 에너지 흡수율을 예측하기 위해서 유한 요소 해석을 수행하였다. 최종 모델의 해석에 앞서 각 구성 요소인 알루미늄 판, PMMA 판 그리고 중간층인 직물 섬유의 해석이 먼저 수행되었으며, 각 요소의 유한요소 모델의 타당성이 검증되었다. 해석에 사용된 재료 물성은 고 변형률 속도에서의 재료 물성들을 예측하여 사용하였으며, 해석 결과 개별 요소의 에너지 흡수율이 직물섬유를 제외하고는 잘 맞음을 확인하였다. 이후 하이브리드 복합재료 쉴드의 유한 요소 모델을 구성하였고, 직물섬유의 구속 조건을 고정과 비 구속의 두 가지로 나누어 해석을 수행하여 비교하였다. 이를 통해서 비구속 삽입된 섬유를 이용한 하이브리드 쉴드가 섬유 풀아웃 현상이 잘 구현되었고, 이로 인해 에너지 흡수율이 향상 될 수 있음을 최종 확인하였다.

Key Words : 하이브리드형 복합재료 쉴드(hybrid composite shield), 초고속 충돌(hypervelocity impact), 비구속 섬유(unrestrained fabric), 유한요소 해석(FE analysis)

1. 서 론

우주 구조물은 수많은 미소운석과 우주파편(MMOD)의 초고속 충돌 위협에 노출되어 있다[1]. 이러한 충격으로부터 구

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

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

조물을 보호하기 위해서는 적절한 실딩 시스템이 필요하며, 현재 널리 사용되고 있는 실딩 시스템은 위플 실드로서 실드 자체의 무게 절감 효과가 뛰어나고 성능이 좋은 실드이다. 하지만 두 개의 얇은 알루미늄 합금판으로 이루어진 위플 실드는 일정한 공간(standoff)이 반드시 필요하며, 이로 인한 부피증가를 피할 수 없다. 본 연구에서는 MMOD의 큰 운동에너지를 효과적으로 흡수할 뿐만 아니라 압축된 크기를 가져 부피를 감소시킬 수 있는 실드를 설계하고자 한다. 이에 CFRP복합재료와 직물섬유와 고분자 수지 판의 적절한 혼합으로 이루어진 하이브리드형 복합재료 실드(hybrid composite shield)를 제안하였다. 이 실딩 시스템은 앞 범퍼로서 단위 무게당 에너지 흡수율이 높은 CFRP 복합재료와 후판인 고분자 수지 사이에 비구속으로 삽입되는 직물섬유로 구성된다. 에너지 흡수율 향상의 주 메커니즘은 섬유 풀아웃현상이다. 상대적으로 약한 후판부에서 충돌에 의해 관통이 먼저 발생하고, 이를 통해 비구속 삽입된 직물 섬유가 풀아웃되면서 에너지를 천천히 오래 흡수하는 구조이다. 풀아웃 되는 직물 섬유는 4 면이 구속된 직물 섬유에 비해서 받는 하중이 완만하게 증가하고 또한 에너지를 흡수하는 시간이 증가하기 때문에 최종적으로 에너지 흡수율을 증가시킬 수 있다. 초고속 충돌 실험을 수행하였으며, 이러한 섬유 풀아웃 메커니즘이 구현되고 이로 인해 에너지 흡수율이 향상될 수 있음을 확인하였다[2]. 본 연구에서는 LS-DYNA를 이용하여 유한요소 해석을 수행함으로써 이러한 직물 풀아웃 방법의 효과를 해석적인 방법으로도 확인하였다.

2. 실드 구성요소의 개별 해석

2.1 메쉬 크기 결정

유한 요소 해석은 메쉬의 크기에 따라서 해석 결과 값에 큰 차이를 보인다. 더 정교한 메쉬를 사용할수록 해석 결과의 정확도가 좋아지는 반면, 해석을 수행하는데 걸리는 시간이 증가하게 된다. 반대로 큰 메쉬를 사용하게 되면 해석 결과에 많은 오차가 포함되어 해석 결과의 정확도가 떨어지는 반면 빠른 해석을 수행할 수 있다. 따라서 해석을 수행하기에 앞서 해석 결과에 큰 오차가 생기지 않으면서도 빠른 시간 안에 해석을 수행할 수 있는 메쉬의 크기를 결정 할 필요가 있다. 본 연구에서는 하이브리드 복합재료 실드의 구성요소 중의 하나인 알루미늄 판의 해석을 수행하는 과정에서 적당한 메쉬 크기를 결정하기 위해서 메쉬 크기 검증 작업을 수행하였다.

2.2 단일 알루미늄 판의 초고속 충돌 해석

2.2.1 모델링

본 과정에서 사용한 모델은 Fig. 1과 같이 Al 6061로 이루어진 1mm 두께의 단일 범퍼 실드와 Al 2017로 만들어진 5.56mm의 구형 발사물로 구성된다. 발사물은 1 km/s의 속도로 범퍼에 충돌하며, 반복 해석을 통하여 범퍼가 흡수한 운

동 에너지를 계산하여 실험 결과와 비교하였다.

메쉬 크기를 결정하는 과정에서 변수는 메쉬의 크기이며, 나머지 조건들은 모두 동일하게 구성되었다. 초고속 충돌에서는 충돌 지점의 가까운 국부영역에 손상이 제한되기 때문에 Fig. 1과 같이 충돌지점 주변 일부 사각 영역을 관심영역으로 정의하였으며, 40mm × 40mm의 영역으로 정의하였다. 한 면에서의 노드의 개수를 달리해 줌으로써 메쉬의 크기를 조절하였다.

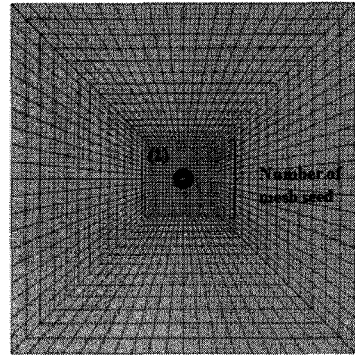


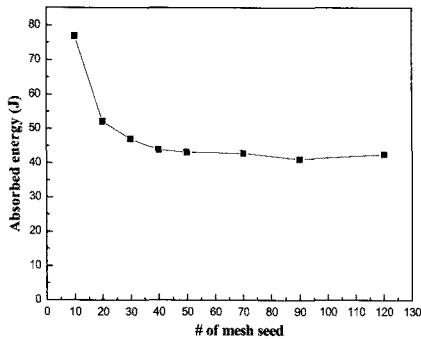
Fig. 1 Finite element model of hypervelocity impact for mesh verification.

범퍼로서 100mm × 100mm의 알루미늄 판을 사용하였으며, 4 면이 모두 고정된 경계조건이 적용되었다. 관심 영역의 노드의 개수를 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, 120개의 순서로 달리하면서 반복 해석을 수행하였으며, 그 결과 에너지 흡수율 및 계산 시간을 각각 구하였다. 발사물은 총 7000개의 솔리드 메쉬로 이루어졌다.

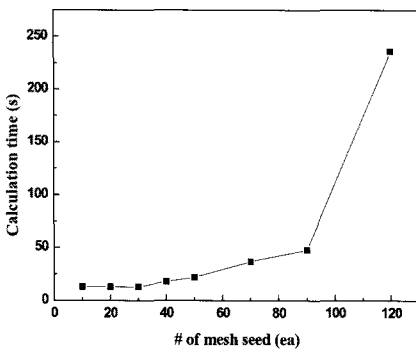
본 해석에서 사용된 재료 물성은 높은 변형률 속도(high strain rate)에서의 재료 물성이 사용되었다. 일반적으로 충돌 현상에서는 스트레인의 변화율이 매우 크기 때문에 그에 상응하는 스트레인 변화율에서의 재료 물성을 고려해야 한다. 본 연구에서의 속도 영역대는 1km/s 영역이며, 이를 위해서는 최고 변형률 속도가 $10^5 - 10^6 \text{ S}^{-1}$ 로 알려져 있다[3]. 하지만 대부분의 문헌에서 10^4 S^{-1} 이하의 변형률 속도에서의 실험 결과들이 알려져 있으며, 10^5 S^{-1} 이상의 변형률 속도에서의 물성에 관한 자료가 없다. 따라서 본 연구에서는 준정하중 재료 물성부터 10^4 S^{-1} 까지의 자료를 이용하여 10^5 S^{-1} 에서의 물성을 예측하여 사용하였다. 예측된 재료 물성은 Table 1과 같다.

Table. 1 Estimated dynamic material properties of aluminum and polymer plate at strain rate 10^5 S^{-1} [4-7]

	Al 2017	Al 6061	PMMA
Density (g/cm ³)	2.79	2.70	1.18
Tensile modulus (GPa)	72.4	68.9	5
Poisson's ratio	0.33	0.33	0.4
Tensile yield strength (MPa)	640	345	120
Tangential modulus (MPa)	260	100	-
Elongation at break	-	0.074	0.024



(a) Absorbed kinetic energy of 1mm Al plate at 1,000 m/s against the mesh seed number



(b) Calculation time against the mesh seed number

Fig. 2 Computational analysis result of mesh verification (Al 2017 projectile impacted with 1mm Al 6061 bumper with 1000 m/s).

재료 물성은 등방성 재료의 탄성과 소성을 고려 할 수 있고, 파손모드까지 모사할 수 있는 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC을 사용하여 적용하였다.

2.2.2 해석 결과

Fig. 2 (a)는 메쉬의 사이즈에 따른 에너지 흡수율 계산 결과를 보여 주고 있다. 그래프에서와 같이 노드의 수가 40개 이상에서부터 흡수된 에너지가 42 J에 수렴하는 결과를 보여 주고 있다. 실제 실험을 통해서 구해진 결과인 38.74 J과 유사한 값을 가짐을 확인하였다. 또한 각 경우에 대한 계산 시간을 나타내는 Fig. 2 (b)를 보면 노드의 수가 90개 까지는 계산 시간의 증가율이 심하지 않지만, 90개 이후로는 크게 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 해석결과에 큰 오차를 포함하지 않으면서 계산시간이 크지 않은 메쉬의 크기로 50개의 노드를 이용한 메쉬가 선택되었다. 또한 실험 결과와 해석결과의 에너지 흡수율이 유사함을 확인하였고, 유한요소 모델이 적절히 구현되었음을 확인하였다.

2.3 단일 PMMA판의 초고속 충돌 해석

2.3.1 모델링

앞 장에서의 알루미늄 판의 해석 모델과 동일한 유한요소 모델을 이용하여 PMMA(Poly methylmethacrylate) 단일 범퍼의 초고속 충돌 해석을 수행하였다. 동일하게 재료 물성은 $10^{-5} S^{-1}$ 에서의 물성을 예측하여 사용하였으며, 사용된 재료 물성은 표 1에 나타내었다. 위와 같은 조건을 사용하여 1,000 m/s 속도를 가지는 알루미늄 발사물과의 초고속 충돌 해석을 수행하였다.

2.3.2 해석 결과

Fig. 3은 충돌 해석 후 결과를 보여주고 있다. 또한 해석 결과의 검증을 위해서 2mm PMMA 판에 대해서 충격 실험을 수행하였고 Fig. 4는 실험 후 시편의 관통 형상 및 발사물의 변형 모습을 보여주고 있다.

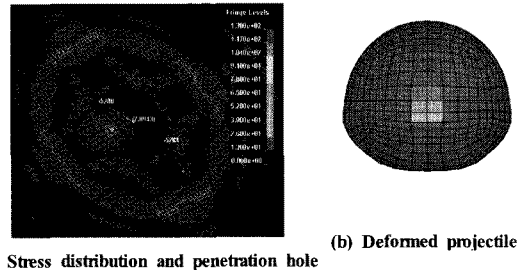


Fig. 3 Computational analysis result(2mm PMMA impacted with 1000m/s 5.56mm Al 2017).

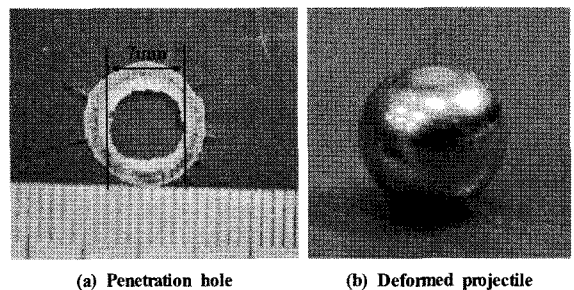


Fig. 4 Hypervelocity impact experiment result(2mm PMMA impacted with 1000m/s 5.56mm Al 2017).

해석 결과 PMMA에 7.89mm의 관통 구멍이 발생하였고, 이는 실험 결과 7mm의 관통 구멍과 거의 흡사한 결과를 보여주고 있고, 충돌 후 발사물의 변형 거의 흡사한 형상을 보임을 알 수 있다.

해석 결과 에너지 흡수율은 Fig. 5와 같이 32.58J 이었고, 초고속 충돌 실험 결과는 29.98J 로서 실험 결과에 비해서 8.7%정도의 오차를 보임을 확인하였다. 결과를 바탕으로 2mm PMMA의 유한요소모델은 적당하다 볼 수 있다.

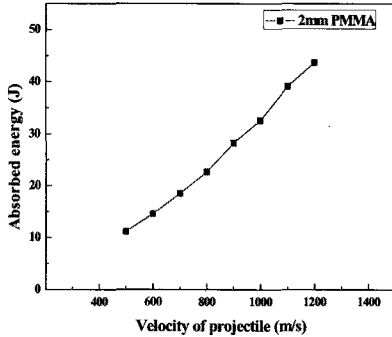


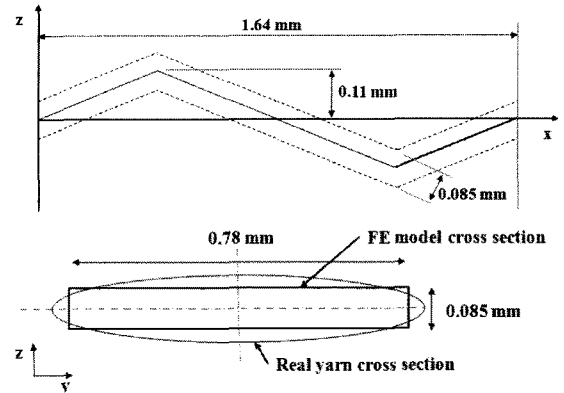
Fig. 5 Calculated energy absorption with different velocity (bumper: 2mm PMMA, projectile: 5.56mm Al 2017 ball).

2.4 Kevlar KM2 직물 섬유들의 초고속 충돌 해석

직물 섬유를 모델링함에 있어서 섬유단위로의 모델링은 계산 시간 뿐만 아니라 높은 컴퓨터 사양을 요구하기 때문에 비현실적이다. 따라서 많은 연구들에서 섬유의 다발인 양을 기준으로 모델링을 수행하였다[6, 8-9].

본 연구에서 사용된 직물은 Kevlar KM2이며, Kevlar KM2의 양의 형상정보는 Fig. 6 (a)에 보인 바와 같이 미시 이미지를 이용하여 추출되었다. 계산 시간등을 고려하여 직물 섬유의 형태를 간략화 하였다. 직물 단면의 그림에서 보면 각 양들이 곡선 형태를 띠고 있지만 본 연구에서는 보다 간단히 하기 위해 Fig. 6 (b)와 같이 곡선을 직선으로 대체하였다. 최종적으로 완성된 직물 섬유의 유한요소 모델은 Fig. 7과 같다. 직물 섬유를 구성하는 메쉬의 크기는 0.37×0.39 mm 이며, 사용된 총 메쉬의 개수는 23,980개이다. 발사물은 동일하게 5.56mm Al2017 구형 발사물을 사용하였으며, 동일한 속도 1,000 m/s에서 충돌 해석을 수행하였다.

직물 섬유 또한 다른 재료와 마찬가지로 초고속 충돌에 노출이 되기 때문에 고 변형률 속도를 고려한 재료 물성을 사용하였으며, Table 2와 같이 예측된 값을 사용하였다.



(b) Schematic diagram of a yarn profile

Fig. 6 Microscopic image and extracted dimension of Kevlar KM2 fabric.

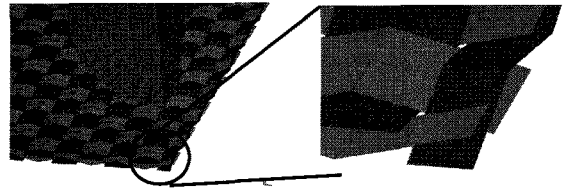


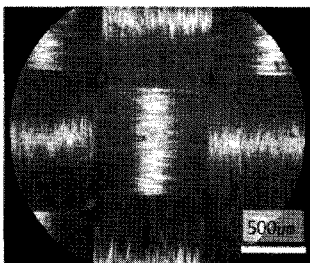
Fig. 7 Finite element model of fabric material.

Table 2 Estimated dynamic material properties of Kevlar KM2 at strain rate 10⁵ S⁻¹

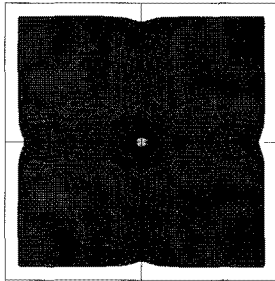
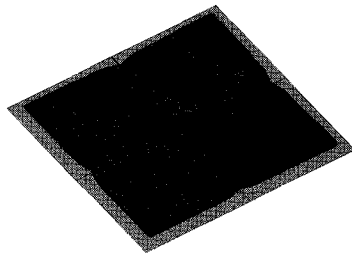
	Kevlar KM2
Density (ρ)	1.47 g/cm ³
Longitudinal modulus (E1)	53.2 GPa
Transverse modulus (E2)	10.0 GPa
Poisson's ratio (ν12)	0.01
Longitudinal strength (σ1)	3900 MPa
Transverse strength (σ2)	3900 Mpa
Static friction coefficient (μs)	0.15
Dynamic friction coefficient (μd)	0.12
Exponential decay coefficient (c)	1.23

본 해석에서 사용된 재료 물성 카드는 직물의 직교 이방성을 모사할 수 있고, 또한 직물의 관통도 모사할 수 있어야 한다. 이를 모두 모사하기위해서 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 카드를 사용하였다. 그리고 직물의 가장 큰 특징 중 하나인 유연성(flexibility)을 모사하기 위해서 Hughes-Liu 쉘 엘리먼트와 두께 방향으로 1개의 적분점을 가지게 모델링 함으로서 구현하였다[6].

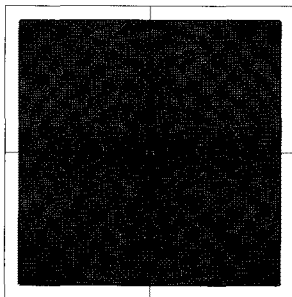
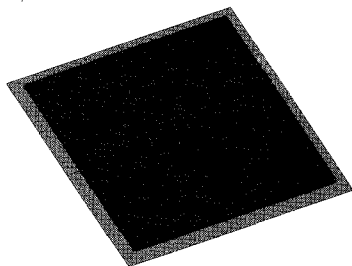
이상과 같이 구성한 직물 섬유 모델을 이용하여 400m/s와 1000m/s 에서 초고속 충격 해석을 수행하였다. Fig. 8은 각 속도에 따른 해석 결과를 일정 시간에 따라 보여주고 있다.



(a) Microscopic image of fabric [6]



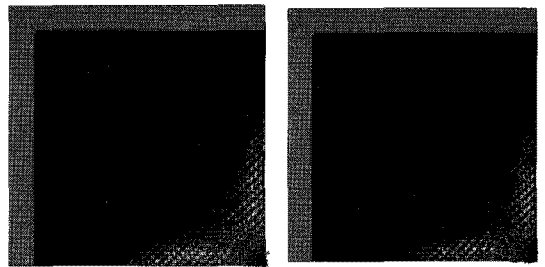
(a) Hybrid composite shield with unrestrained boundary fabric



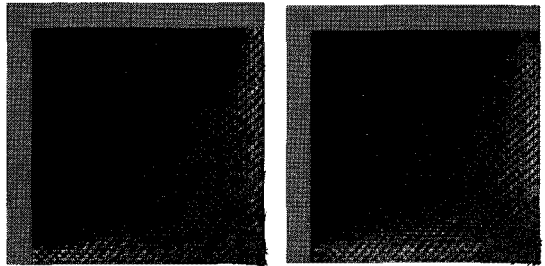
(b) Hybrid composite shield with 4 edge fixed fabric

Fig. 10 Predicted inside view of hybrid composite shield after penetration.

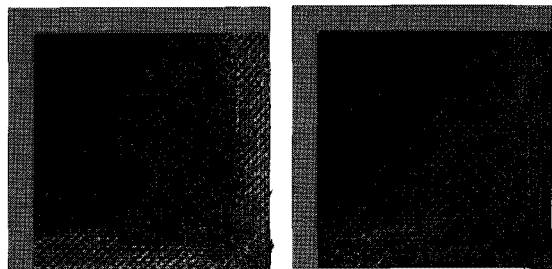
Fig. 11은 시간에 따른 관통 형상을 보여주고 있다.



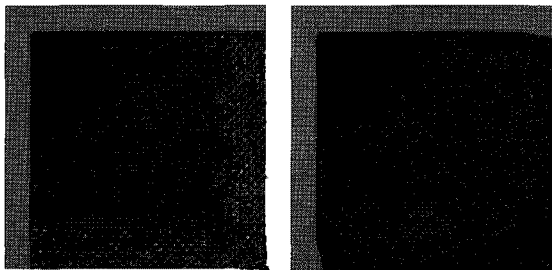
15 μ s



26 μ s



34 μ s



46 μ s

(a) Fixed fabric

(b) Unrestrained fabric

Fig. 11 Stress distribution of intermediate layer fabric.

두 모델에 대해서 초기 26 μ s까지는 직물의 응력이 끝단에 도달하지 않아 비슷한 변형 형태를 보이고 있다. 하지만 26 μ s 이후에는 응력이 끝단에 도달하게 되고, 두 모델의 구속 조건의 차이로 인해서 다른 형태를 보이게 된다. 비구속 삽입된 직물의 경우 끝단에서 직물이 안쪽으로 빨려 들면서

안에 걸려 있던 응력이 소산됨을 확인하였고, 이로 인해 안의 파단이 지연되는 현상을 확인하였다. 반면, 모서리가 고정되어 있는 직물의 경우 응력이 끝단에 도달하면서 안의 응력이 더 커져 일찍 파단이 발생하여 더 이상 에너지를 흡수할 수 없는 상태가 되었다. 이로 인해서 고정된 섬유에 비해서 비구속 삽입된 섬유를 이용할 때 에너지 흡수율이 향상된 것으로 사료된다.

3.3 에너지 흡수를 비교

Fig. 12는 시간에 따른 발사물의 운동에너지의 변화를 보여주고 있는 곡선이다.

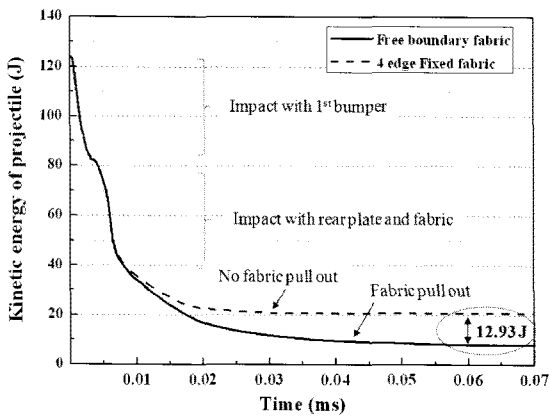


Fig. 12 Projectile kinetic energy of the hybrid composite shield with unrestrained boundary fabric and hybrid composite shield with 4 edge fixed fabric against time.

그래프에서 초기 5 μ s까지의 운동에너지의 감소는 앞 범퍼인 알루미늄 판과의 충돌에 의해서 발생한 것이다. 이어 두 번째로 나타나는 에너지의 떨어짐은 후판인 PMMA와 직물섬유에 의한 것이다. 직물의 구속 조건이 다른 두 모델에 대해서, 후판에서 파단이 일어나기까지의 에너지 변화 곡선은 유사한 형태를 가진다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 응력이 아직 경계까지 전달되지 않았기 때문이다. 하지만 10 μ s 이후로는 구속 조건에 따라 다른 에너지 곡선을 가짐을 확인 할 수 있다. 비구속 삽입된 섬유를 이용한 쉴드의 섬유 풀아웃에 의해서 에너지 흡수율이 더 향상되었음을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 샌드위치 쉴드의 초고속 충돌해석을 수행하여 적당한 유한 요소 모델을 구성하였다. 샌드위치 쉴드의 초고속 충돌 모델을 구성하기 위해서 먼저 쉴드 구성요소들의 개별 해석을 수행하였으며, 각 개별해석에 대한 적당한

모델을 구성하였다. 각 모델을 구성하는 과정에서 초고속 충격 중 겪는 높은 변형률 속도를 고려한 물성을 기존의 자료들로부터 예측하여 사용하였다. 해석 결과 알루미늄과 PMMA의 경우 실험 결과와 흡사한 에너지 흡수율과 파손 모드를 가지는 모델을 구성할 수 있었던 반면, 직물의 경우 유한요소 모델을 만드는 과정에서 들어가는 가정들에 의해서 파손 형태는 비슷하게 구성할 수 있었으나, 최종 에너지 흡수율이 실험 결과에 비해서 매우 크게 나타났다. 이는 여러 가닥의 섬유들로 이루어진 안을 균일한 셀 엘리먼트로 대체하면서 발생하는 섬유 수직방향 재료 물성의 차이에 의한 것으로 사료된다. 저속에서는 이러한 가정에 의한 에러가 크게 관여하지 않지만, 초고속 충돌에서는 매우 큰 응력이 국부적인 영역에 나타나며 이로 인해 파손이 발생하기 때문에 이러한 가정이 해석에 큰 차이를 나타낸 것으로 사료된다. 추후 이러한 영향을 해결할 수 있는 적당한 섬유의 모델링이 필요할 것으로 사료된다.

최종적으로 각각의 모델을 이용하여 샌드위치 쉴드를 구성하여 해석을 수행하였다. 섬유 풀아웃에 의한 에너지 흡수율의 증가 효과를 알아 보기 위해서 삽입된 섬유에 대해서 고정과 비 구속된 경우 두 가지를 해석하여 비교하였다. 그 결과 실제 실험 결과 확인된 섬유 풀아웃 현상이 비구속 삽입된 샌드위치 쉴드에서 동일하게 구현되었음을 확인하였다. 또한 비구속된 섬유에 비해서 에너지 흡수량 또한 12J 가량 더 증가하였음을 확인하였다.

본 연구를 통해 구성된 유한 요소 모델을 이용하여 최종 목표인 샌드위치 쉴드의 에너지 흡수율을 정확히 예측할 수는 없었지만, 섬유 풀아웃을 모사할 수 있었고, 이것으로 인해서 에너지 흡수 효율이 향상 될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 연구 재단의 중견연구자 지원 사업(과제번호: 2009-0079968) 및 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD100048JD) 으로 수행 되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 1) J. H. Han and C. G. Kim. "Low earth orbit space environment simulation and its effects on graphite/epoxy composites", *Composite Structures*, Vol. 72, 2006, pp. 218-226.
- 2) J. B. Moon, G. Lim, C. G. Kim and S. Bhowmik, "Energy dissipation of CFRP-Kevlar Hybrid Composites Shield for Space Use," *ACCM-7*, Taiwan, 2010. pp. 15-18.

- 3) Sharpe and Jr, William N., *Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Springer, 2008, pp. 1098 pages.
- 4) K. G. Hoge., "Influence of Strain Rate on Mechanical Properties of 6061-T6 Aluminum under Uniaxial and Biaxial States of Stress", *Experimental Mechanics*, Vol. 6, No. 4, 1966 pp. 204-211.
- 5) K. Sakino., "Strain rate dependence of dynamic flow stress of 2017 aluminum alloy at very high strain rates," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 22, 2008, pp. 1209-1214.
- 6) R. Barauskas and A. Abraitene., "Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, 2007, pp. 1286-1305.
- 7) M. Cheng and W. Chen., "Mechanical Properties of Kevlar KM2 Single Fiber", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, No. 2, 2005, pp. 197-203.
- 8) B. W. Lee., "Ballistic impact characterization of SiO₂ colloidal suspension impregnated fabrics and application to armor systems", *Ph.D. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Daejeon, Republic of Korea, 2009, pp. 167 pages.
- 9) 손유나, 문진범, 임건, 김천곤, "우주용 설딩 시스템에 적용할 복합재료 평판의 초고속 충돌 해석", *한국복합재료 학회지*, 제 23권, 6호, 2010, pp. 14-18.