

論文

소재-구조 최적화 기반 다층-복합재료구조 충격흡수성능

김병조*, 김태원**+

Impact Absorption Performance of Multi-layered Composite Structures based on Material-Structure Optimization

Byung-Jo Kim* and Tae-Won Kim**+

ABSTRACT

Total thickness, areal density and mass moment of inertia of materials are important material factors for structural characteristics. In this work, a material-structural optimization was performed up to the maximum ballistic limit of multi-layered composite structures under high impact velocity followed by the investigation of the influence of these factors on an impact absorption performance. A unified model combined with Florence's and Awerbuch-Bonder's models was used in optimizing the multi-layered composite structure consisting of CMC, rubber, aluminum and Al-foam. Total thickness, areal density and mass moment of inertia were used for the optimization constraint. As shown in the results, the ballistic limit determined from a newly developed unified model was closely similar to the finite element analysis. Additionally, the ballistic limit and impact absorption energy obtained by the optimized structure were improved approximately 16.8 % and 26.7 %, respectively comparing with a not optimized multi-layered structure.

초 록

적층 두께, 면밀도, 질량관성모멘트는 소재의 구조-역학적 특성을 나타내는 중요한 인자들이다. 본 연구에서는 이와 같은 인자들이 다층-복합재료구조의 내충격 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위해 높은 충격자 속도 하에서 탄자한계속도가 최대가 되는 재료-구조 최적화를 수행하였다. 세라믹복합재료, 고무, 알루미늄 그리고 알루미늄 폼으로 구성된 다층-복합재료구조의 최적화를 위해 Florence 모델과 Awerbuch-Bonder 모델을 연계한 통합 모델을 개발하였으며, 구속 조건으로써 적층 두께, 면밀도, 질량관성모멘트를 함께 사용하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 제안된 통합 모델을 통해 계산된 탄자한계속도는 유한요소해석에서의 탄자한계속도와 거의 유사함을 확인하였다. 통합 모델을 바탕으로 재료-구조 최적화를 통해 설정된 다층구조는 최적화를 수행하지 않은 다층구조에 비해 약 16.8 %의 탄자한계속도 및 26.7 %의 충격흡수에너지 향상이 나타남을 알 수 있다.

Key Words : 다층구조(multi-layered structure), 탄자한계속도(ballistic limit, BL), 유한요소해석(finite element analysis), 면밀도(areal density), 질량관성모멘트(mass moment of inertia)

1. 서 론

최근 들어 첨단 신소재의 필요성이 주목 받고 있는 가운데 각종 산업기계, 수송기계 및 군장비의 경량화와 이로 인

한 기동성 증가, 에너지 절감 등의 문제에 대한 관심이 날로 증대하고 있다. 그러나 단소재 만으로 만들어진 구조물의 경우 경량화는 기계적 성능 특히, 강성 또는 내충격 특성이 저하될 가능성을 상대적으로 내포하게 된다. 따라서 이와 같은

* 한양대학교 자동차공학과 대학원

**+ 한양대학교 기계공학부 교수, 교신저자(E-mail:twkim@hanyang.ac.kr)

문제점을 고려하여 구조물의 경량-고성능화를 구현시킴과 동시에 내충격 성능을 향상할 수 있는 다층-복합재료구조에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 미국을 비롯한 유럽 각국은 사용소재 자체의 경량화와 함께 성능 향상을 위해 다공질재료, 세라믹복합재료 및 나노복합재료 등을 활용한 다수의 연구를 수행하고 있다[1-3].

일반적인 내충격 복합 재료-구조의 설계에서는 전면에 취성을 지니는 세라믹 재료를 배치하고 후면에 연성을 갖는 재료를 배치하는 방법이 사용되고 있으며, 적층 방식으로는 재료 성능, 변형 특성, 구조성형기술 등을 고려하여 세라믹/금속 또는 세라믹복합재료/고무 등의 조합을 선호하고 있다. 실험적인 적층 구조 개발 방식은 많은 수의 시료 제작과 충격시험을 필요로 하며 따라서 실질적으로 유용한 제품을 개발하기 위해서는 고비용과 오랜 시간이 요구된다[4]. 이와 같은 문제점을 고려하여 실제의 복잡한 현상들을 모사한 재료-적층 모델링 기술이 개발되고 있으며 따라서 해석적 모델에 기반한 실험적 연구가 효율적으로 병행되고 있다[5, 6].

본 연구에서는 다층-복합재료구조의 경량화 및 충격흡수성능 향상을 위해 기존의 이론적 모델[7-10]을 연계한 통합 모델을 제시하였으며, 이를 통해 적층 두께, 면밀도 그리고 질량관성모멘트 등의 구속조건 하에서 다층구조의 탄자한계속도가 최대가 되는 재료-구조 최적화를 수행하였다. 이론적 모델의 타당성 검증에 위해 유한요소해석을 수행하였으며 이를 바탕으로 최적화를 수행하지 않은 일반적인 다층구조와 최적화된 다층구조의 내충격 거동을 비교, 분석하였다. 수치해석을 위해 LS-DYNA를 이용하였으며 해석에 사용된 각 소재의 기계적 물성치 확보를 위해 기존의 연구결과[11,12] 및 실험결과를 이용하였다.

2. 이론적 모델

탄자한계속도(ballistic limit, BL)는 충격자가 구조물에 수직으로 충격 시, 충격자가 구조물을 완전 관통 후 충격자의 잔류 속도가 0이 되는 초기 속도로서 구조물의 내충격 성능을 나타내는 중요한 인자이다. 충격자의 속도는 충격자의 운동에너지와 밀접한 관계에 있으며 즉, 구조물 내부를 관통함에 따른 운동에너지의 변화는 충격자의 속도 변화에 기인된다. 따라서 구조물의 탄자한계속도란 충격자에 의한 충격에너지를 해당구조물이 얼마나 흡수할 수 있는지를 평가할 수 있는 척도로 사용되고 있다. 한편 실질적인 다층 구조물의 탄자한계속도를 실험적 또는 이론적으로 정확히 산출하기란 사용 소재 특성 및 각 소재로 구성된 층간 구조물의 상호작용에 따른

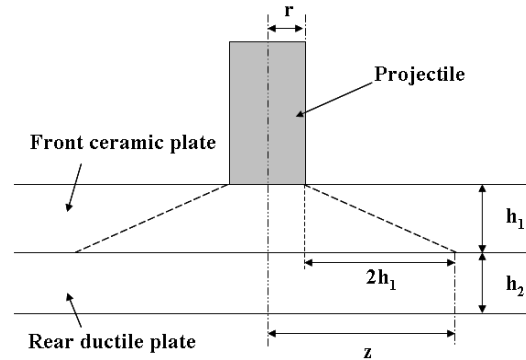


Fig. 1 Diagram showing the Florence's model [7].

영향으로 인해 상당히 어려운 실정이다. 본 연구에서는 선행 개발된 단층 및 두 층(two-layer)에서의 탄자한계속도에 관한 이론 모델[13]을 확장하여 보다 향상된 내충격 성능을 갖는 다층-복합재료구조를 제시하였다. 최적화 재료-구조 선정과 그에 따른 탄자한계속도 계산에 있어 적층 재료는 완전 접합 상태로 구속하였으며 재료간 마찰로 인한 에너지 소산은 없는 것으로 가정하였다.

충격자의 잔류 속도가 0이 되는 초기 속도로서 구조물의 내충격 성능을 나타내는 중요한 인자이다. 충격자의 속도는 충격자의 운동에너지와 밀접한 관계에 있으며 즉, 구조물 내부를 관통함에 따른 운동에너지의 변화는 충격자의 속도 변화에 기인된다. 따라서 구조물의 탄자한계속도란 충격자에 의한 충격에너지를 해당 구조물이 얼마나 흡수할 수 있는지를 평가할 수 있는 척도로 사용되고 있다. 한편 실질적인 다층 구조물의 탄자한계속도를 실험적 또는 이론적으로 정확히 산출하기란 사용 소재 특성 및 각 소재로 구성된 층간 구조물의 상호작용에 따른 영향으로 인해 상당히 어려운 실정이다. 본 연구에서는 선행 개발된 단층 및 두 층(two-layer)에서의 탄자한계속도에 관한 이론 모델[13]을 확장하여 보다 향상된 내충격 성능을 갖는 다층-복합재료구조를 제시하였다. 최적화 재료-구조 선정과 그에 따른 탄자한계속도 계산에 있어 적층 재료는 완전 접합 상태로 구속하였으며 재료간 마찰로 인한 에너지 소산은 없는 것으로 가정하였다.

2.1 Florence 모델

두 층 세라믹 구조 설계를 위한 Florence 모델[7-10]은 다수의 내충격 성능 실험을 줄일 수 있게 함으로써 기존 연구에 자주 인용되었다. Florence 모델의 핵심은 전면 세라믹 층이 충격 시 원추형으로 파쇄 됨으로써 충격자로 인해 집중된 에너지를 넓은 면적으로 분산시켜 주는 효과를 기반으로 한

다. Florence 모델의 세라믹 층 후면에는 연성 재료를 사용함으로써 분산된 충격에너지를 흡수할 수 있게 된다. Fig. 1은 Florence 모델의 개념도이며, 여기서 r 은 원통형 충격자의 반경, h 는 층의 두께, z 는 충격 시 생성되는 세라믹 파쇄의 기저면 반경을 나타내며, 하첨자 1, 2는 각각 세라믹 층과 후면 연성 층을 나타낸다. 한편 Florence 모델은 세라믹과 연성 재료로 이루어진 두 층 구조 만에서의 관통현상을 표현할 수 있으며, 아울러 세라믹 층이 흡수할 수 있는 충격에너지 전달 기구(mechanism)에 대한 모사가 부족한 문제점이 지적되고 있다.

Fig. 1과 같은 구조물에서 Florence 모델에 기반한 탄자의 한계속도는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$BL^2 = \frac{\epsilon_2 \sigma_2 h_2 \pi z^2 [(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \pi z^2 + m]}{0.91 m^2} \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 재료의 파단변형률, σ 는 인장강도, ρ 는 밀도, m 은 충격자의 질량을 나타내며, h , z 는 Fig. 1에 명시된 바와 같다.

2.2 Awerbuch-Bonder 모델

원통형 충격자에 의한 단일 연성 재료의 관통 기구를 설명하는 Awerbuch-Bonder 모델은 충격자가 금속 판재에 수직으로 충돌, 완전 관통되는 과정을 다음과 같은 3단계로 표현하였다[10]. 즉 1단계에서는 관통자가 표적을 압축하는 단계로서 전단변형이 일어나지 않는다고 가정하였으며, 이후 2단계에서는 전단변형에 의하여 플러그가 형성되고, 최종적인 3단계에서는 플러그의 배출로서 완전 관통을 형성하게 된다. 따라서 Awerbuch-Bonder는 원통형 충격자에 의해 플러그가 발생됨에 따라 표적재료에 형성된 관통 전후면 구멍의 평균 반지름은 관통자의 반지름 r 과 같고, 플러그의 길이는 표적 두께 h 와 같다고 할 때 다음 식과 같은 이론적인 탄자한계속도를 제시하였다.

$$BL^2 = \frac{2\pi r \sigma h^2}{\sqrt{3} m} \quad (2)$$

여기서 σ 및 m 은 각각 식 (1)에 기술된 바와 같다. 한편 Awerbuch-Bonder 모델 또한 연성 재질로 이루어진 단층에서의 탄자한계속도 만을 제시할 수 있으며, 취성 재료 및 다층 구조에서의 관통기구는 표현하지 못하는 한계를 지니고 있다.

2.3 통합모델 및 최적화

선형연구[13]를 통해 적층 두께와 면밀도 조건하에서 Florence

모델 및 Awerbuch-Bonder 모델을 각각 이용하여 구조 최적화를 수행하였고 따라서 내충격 성능 평가와 관련한 상기 모델의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 한편 이 같은 방식에 의해 이론적으로 계산한 탄자한계속도와 유한요소해석을 통해 예측한 탄자한계속도가 상당한 차이가 있음을 확인한 바, 근본적인 문제는 첫째, 다층 구조를 형성하는 이중 소재의 재료-구조적 특성이 적절히 반영되지 못함과 아울러 둘째, 독립적으로 최적화된 두 모델이 다층-복합구조의 충격, 관통 기구를 충분히 연계시키지 못함에 기인한 것으로 분석하였다.

본 연구에서는 따라서 다층-복합재료구조의 탄자한계속도를 보다 정확히 예측하기 위하여 전술한 두 모델을 연계하여 다음과 같은 통합 모델을 제시하였다.

$$BL_{total} = BL_{12} + BL_3 + BL_4 \quad (3)$$

여기서, BL_{12} 는 Florence 모델을 이용하여 계산한 세라믹 기반 재료와 연성재료 즉, 고무 층의 탄자한계속도이며, BL_3 과 BL_4 는 각각 Awerbuch-Bonder 모델을 이용하여 계산된 알루미늄과 알루미늄 폼의 탄자한계속도를 나타낸다. 통합 모델의 적용을 위해 세라믹복합재료와 연성재료를 포함하는 두 층 구조 및 단층소재의 관통 기구가 동시에 고려되었으며 최적화를 위해 적층 두께, 재료 면밀도 및 질량관성모멘트를 함께 고려함으로써 소재-구조적 특성을 효과적으로 반영하였다. 한편 적층 재료 두께, 면밀도 및 질량관성모멘트는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$h_{total} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (4)$$

$$(\rho h)_{total} = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3 + \rho_4 h_4 \quad (5)$$

$$I_{total} = \int_0^{h_{total}} h^2 dm \quad (6)$$

여기서, h_{total} 은 전체 구조물의 두께, $(\rho h)_{total}$ 은 전체 구조물의 면밀도, I_{total} 은 전체 구조물의 질량관성모멘트를 나타내며, 하첨자 1~4는 각각 적층된 순서의 재료를 나타낸다. 동일한 소재를 이용하되 구조물의 두께를 증가시키면 충격자가 이동해야 할 거리가 확장됨에 따라 구조물의 탄자한계속도는 증가시킬 수 있지만 반면에 구조물의 경량성이 저감되는 단점이 있다. 면밀도는 사용 소재의 단위 면적당 무게로 정의된다. 밀도가 큰 재료는 일반적으로 충격자의 관통 진행을 방해함으로써 구조물의 탄자한계속도를 증가시킬 수 있지만 역시 구조물의 경량성이 저감되는 단점이 있다. 한편 구조물의 질량관성모멘트가 증가하게 되면 충격 시 발생하는 구조물의 변형, 즉 굽힘에 대한 저항성이 커지게 된다.

Table 1 Material-structure characteristics of a general and optimized multi-layered structures

Layer	Materials	General multi-layered structures			Optimized multi-layered structures		
		Thickness (mm)	Areal density (kg/m ²)	Mass moment of inertia (x10 ⁻³ kg·m ²)	Thickness (mm)	Areal density (kg/m ²)	Mass moment of inertia (x10 ⁻³ kg·m ²)
1	AD-90	20	69.8	3.070	15.6	54.44	2.642
2	EPDM50	3	3.60	0.013	7.4	8.87	0.045
3	Al7039	2	5.48	0.098	6.3	17.26	0.268
4	Al-foam	25.4	11.40	0.063	21.1	9.47	0.046
Total		50.4	90.28	3.244	50.4	90.04	3.001

통합 모델을 이용하여 식 (4) - (6)의 구속조건에 따라 다음과 같은 방법으로 최적화를 수행하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } BL_{total} \\
 & \text{find } \{h_1, h_2, h_3, h_4\} \\
 & \text{subject to } h_{total} \leq 50.4 \text{ mm}, \\
 & (\rho h)_{total} \leq 90 \text{ kg/m}^2, \\
 & I_{total} \geq 3.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

세라믹 층을 포함하는 내충격용 적층 구조는 전면에 세라믹 복합재료, 후면에 금속재로 보강하는 형태의 두 층 구조로 발전되어 왔으며 충격효과를 감소시키기 위하여 세라믹 소재와 금속재 사이에 고무 층을 추가하기도 한다[1,14,15]. 구조물의 후면에 알루미늄 폼을 배치하면 충격 시 구조물 내부에 발생한 응력이 전체 대상 물체에 전달하는 속도를 지연시키는 효과가 있다[16]. 일반적인 내충격 구조물은 약 2 인치 이내의 두께 [17] 및 100 kg/m² 이내의 면밀도 범위에서 개발, 사용되고 있다[2]. 이러한 기존 연구결과[1-3,14-17]를 참조, 전체 구조물의 적층 순서, 두께 및 면밀도 조건을 조합하여 최적화를 수행하지 않은 일반적인 내충격 다층구조를 설정하였다[13]. 최적화를 위한 다층-복합재료구조 또한 계산결과들의 상대비교, 분석을 위해 총 두께 및 적층 순서는 일반적인 다층구조와 동일하게 적용하였음에 반해 각 소재별 두께는 최적화 수행을 통해 결정된 값으로 적용하였다. 면밀도 및 질량관성 모멘트는 각 소재별 두께에 따라 계산될 수 있다. 이상과 같이 산출한, 즉 최적화를 수행하지 않은 일반적인 내충격 다층구조와 최적화를 통해 제시된 다층-복합재료구조 특성은 Table 1과 같다.

3. 유한요소해석

일반적인 다층구조와 최적화된 다층구조의 충격흡수성능을

고찰하기 위하여 상기 구조들에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 이 과정에서 첫째, 세라믹복합재료(AD-90) 및 고무(EPDM50) 층으로 이루어진 두 층 구조 해석이 수행되었으며 둘째, 알루미늄(Al7039) 단층 또는 알루미늄 폼 단층 구조 해석을 하였고 끝으로 전체 다층-복합재료구조에 대한 해석을 수행하였다.

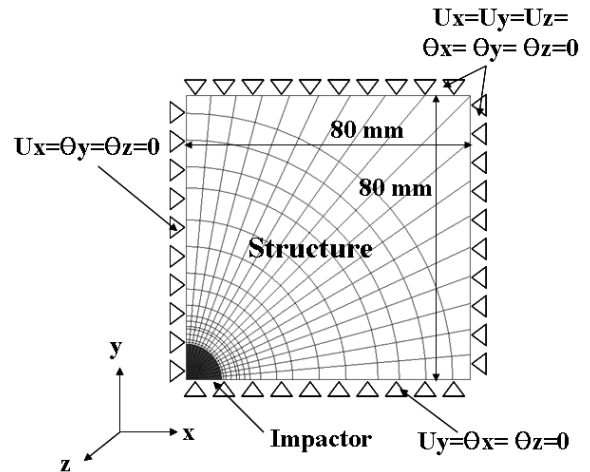


Fig. 2 Finite element model for the ballistic impact analysis.

Table 2 Summary of material properties [4, 12]

Materials	Density (g/cc)	Elastic or shear modulus (GPa)	Strength (GPa) (failure strain, %)
Projectile	7.83	E=200	-
AD-90 (CMC)	3.60	G=113	Y=2.482 (0.9 %)
EPDM50 (Rubber)	1.20*	G=1.361*	-
Al7039	2.70	G=28.19	Y=0.480 (7 %)
Al-foam	0.449*	E=0.631*	Y=0.00133* (5.0 %)*

* 본 연구의 실험결과, E: elastic, G: shear, Y: yield

사용된 모델의 크기는 가로, 세로 각각 80 mm 이며, 해석 모델은 대칭성을 고려하여 전체 모델의 1/4 형상으로 설정하였다(Fig. 2). 각각의 모델은 모두 8 개의 절점을 갖는 직육면체 요소로 구성되며, 충격 부위 중심부에 이룰수록 더욱 조밀하게 모사하였다. 미소 직육면체 요소의 최소 크기는 $0.2 \times 0.2 \times 0.017 \text{ mm}^3$ 이며, 전체 요소의 개수는 4 개의 재료가 모두 적용된 다층구조의 경우 138,250 개로 구성하였고 충격자의 요소는 11,550 개로 설정하였다. 전체절점의 개수 또한 다층구조의 경우 146,033 개로 구성하였고 충격자의 절점은 13,209 개로 설정하였다. 적층구조 내 재료 경계조건은 tied surface to surface를 적용하였다. Table 2는 유한요소해석에 사용된 각 재료의 물성치를 나타내고 있다.

상용유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 각 재료의 항복강도를 고려한 탄-소성(elasto-plastic) 영역에서 세라믹 복합재료와 알루미늄은 isotropic elastic plastic failure, 고무는 Blatz-Ko 그리고 알루미늄 폼은 crushable foam 재료 모델을 사용하여 원통형의 충격자 (무게: 123.0 g, 반경: 10 mm, 길이: 50 mm, 강체로 가정)에 의한 충격거동을 고찰하였다. 충격자와 구조물 내 재료 간의 접촉조건은 eroding surface to surface를 사용하였다. 임의의 충격자 속도에서 정확한 탄자한계속도를 계산하기 위해서는 다음과 같은 방법을 사용하였다. 즉 임의의 초기 속도로 해석을 수행 후 충격자의 전면부가 각 층을 완전히 통과할 때의 종극 속도를 측정하여 식 (8)과 같이 충격자의 운동에너지 손실, 즉 충격 흡수에너지를 계산하였으며, 이를 통해 식 (9)와 같이 구조물의 탄자한계속도를 계산할 수 있었다. 충격자에 의한 충분한 관통성능을 고찰하기 위해 충격자 초기속도를 다층-복합재료 구조의 경우 500 m/s, 세라믹복합재료-고무 두 층 구조의 경우 500 m/s, 알루미늄 단층의 경우 100 m/s, 알루미늄 폼 단층의 경우 50 m/s로 각각 선정하였다.

$$\begin{aligned} E_{absorption}^{structure} &= E_{initial}^{impactor} + E_{final}^{impactor} \\ &= \frac{1}{2}(V_{initial}^2 - V_{final}^2) \\ &= \frac{1}{2}mV_{BL}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_{BL} = \sqrt{V_{initial}^2 - V_{final}^2} \quad (9)$$

여기서 $E_{absorption}^{structure}$, $E_{initial}^{impactor}$, $E_{final}^{impactor}$ 는 각각 소재의 충격 흡수에너지, 충격자의 초기운동에너지, 충격자의 최종운동에너지를 나타내며, m , $V_{initial}$, V_{final} , V_{BL} 은 각각 충격자의 질량, 초기 속도, 종극 속도, 탄자한계속도를 나타낸다.

Table 3 Analytical and numerical ballistic limits for the general multi-layered structure

Materials	Thickness (mm)	Analytical BL (m/s)	Numerical BL (m/s)	
AD-90	20	349	485	384
EPDM50	3			
AI7039	2	24	40	
Al-foam	25.4	20	28	
Total	50.4	393	553	384

Table 4 Analytical and numerical ballistic limits for the optimized multi-layered structure

Materials	Thickness (mm)	Analytical BL (m/s)	Numerical BL (m/s)	
AD-90	15.6	367	423	432
EPDM50	7.4			
AI7039	6.3	75	67	
Al-foam	21.1	17	29	
Total	50.4	459	519	432

4. 결과 및 고찰

전술한 바와 같이 탄자한계속도를 실지로 측정하는 것은 매우 어려우며 따라서 해석결과를 기반으로 변형량 또는 충격에너지의 상대비교를 통해 그 값을 추정하고 있다[18]. Table 3은 최적화를 수행치 않은 일반적인 다층구조에서 이론적으로 계산한 탄자한계속도와 유한요소해석을 통해 예측한 탄자한계속도를 비교하고 있다. 아울러 Table 4는 최적화된 다층-복합재료구조에서 동일한 물리량을 두 방법에 따라 계산한 결과를 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 세라믹복합재료와 고무 두 층으로 이루어진 이론적인 탄자한계속도와 수치해석 결과에서 계산된 탄자한계속도는 약 15-38 %의 오차를 보였으며, 특히 세라믹복합재료 층이 두꺼울수록 큰 오차를 보였다. 이는 유한요소해석에서는 세라믹복합재료 층에 의해 충격자의 운동에너지 감소가 뚜렷이 나타나지만 Florence 모델에서는 세라믹 층이 가지는 충격흡수 기구가 적절히 반영되지 않은 결과로 보여진다. 알루미늄 및 알루미늄 폼으로 이루어진 단층의 경우 이론적인 탄자한계속도와 수치적인 탄자한계속도는 약 10-70 %의 오차를 보였다. 재료 층이 두꺼워 질수록 그 오차는 줄어들었으며, 이는 Awerbuch-Bonder 모델에서 두께가 두꺼울수록 구조물 내부에 발생하는 전단변형이 커지기 때문으로 보여진다. 다층-복합재료구조의 경우 이론적 탄자한계속도와 수치적인 탄자한계속도는 2-6 %의 오차를 나타내며 이는 통합모델에서 각 재료의 특성 및 관통기구를 적절히 고려하였음을 알 수 있다. 한편 최적화된 다층-복합재료구조의 탄자한계속도가 일반적인 다층구조의 탄자한계속도보다 이론적으로 약 17 %, 수치적으로 13 %가 향상됨을 알 수 있다.

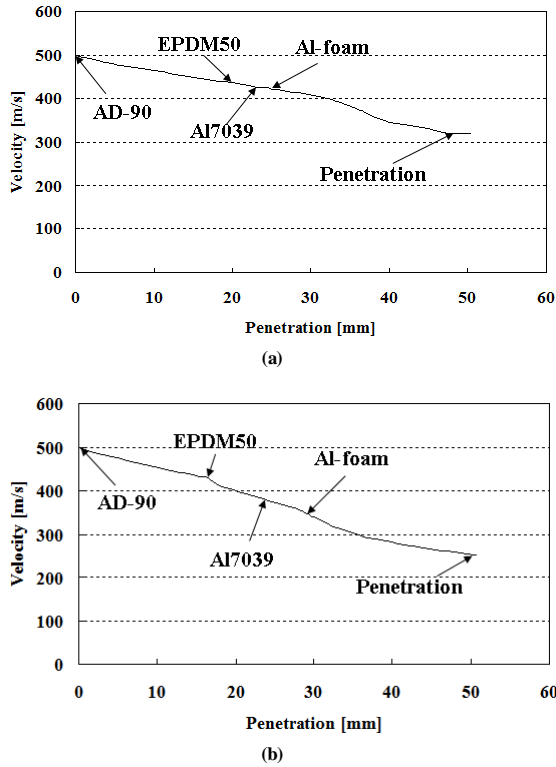


Fig. 3 Impactor velocity change against penetration depth in (a) general and (b) optimized multi-layered composite structures.

임의의 충격자 속도 하에서 구조물의 충격흡수성능 고찰은 다음과 같이 수행하였다. Fig. 3은 다층-복합재료구조에서 관통된 깊이에 따른 속도변화를 나타내고 있으며, 표시된 지점은 충격자가 다층구조를 통과하면서 각 소재에 도달한 순간을 의미한다. 즉, 최적화된 다층-복합재료구조에 있어 세라믹복합재료의 경우 충격자가 초기속도인 500 m/s로 충격되어 433 m/s의 속도로 통과됨을 알 수 있다. 두 번째 적층 소재인 EPDM50 고무는 433 m/s의 속도로 충격되어 384 m/s의 속도로 통과되었으며 그 후로 알루미늄, 알루미늄 폼을 차례로 통과하여 최종적으로 252 m/s의 속도로 다층구조를 관통하였다. 이러한 결과를 바탕으로 각 층에서의 충격흡수에너지를 계산한 후 Fig. 4와 같이 비교, 분석하였다. 결과에서 알 수 있듯이 최적화된 다층-복합재료구조 내에서 알루미늄 폼을 제외한 소재들이 흡수한 충격흡수에너지가 최적화를 수행치 않은 일반 다층구조 내에서 각각의 소재가 흡수한 충격흡수에너지보다 큼을 알 수 있다. 또한 일반적인 다층구조와 최적화된 다층구조가 흡수한 총 충격흡수에너지는 일반적인 다층구조의 경우 9.07 kJ, 최적화된 다층구조의 경우 11.48 kJ로써 최적화된 다층구조가 일반적인 다층구조에

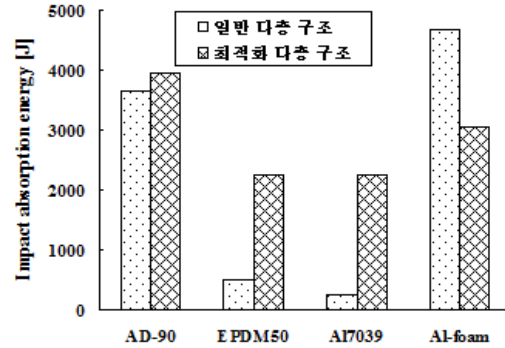


Fig. 4 Comparison of the impact absorption energy in each layer between general and optimized multi-layered composite structures.

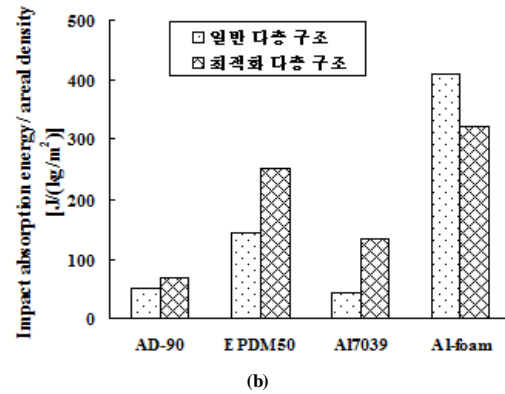
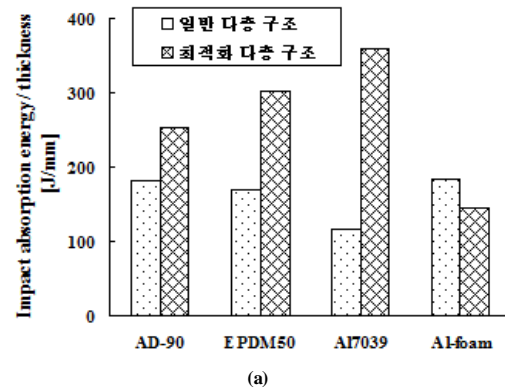


Fig. 5 Comparison of the impact absorption energy in each layer between general and optimized multi-layered composite structures divided by (a) thickness and (b) areal density.

비해 약 26.7 % 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 높은 내충격 성능 개발을 위해서는 본 연구에 제시된 최적화 방법이 매우 효과적임을 알 수 있다. Fig. 5는 일반적인 다층구조와 최적화된 다층구조에서 흡수된 충격에너지를 각 소재의 두

계 및 면밀도로 나눈 값으로써, 이는 각 소재의 충격흡수효율을 평가함에 있어 중요한 척도로 활용될 수 있다. 결과에서 알 수 있듯이 소재 두께 별 충격흡수에너지의 경우 알루미늄 폼을 제외한 여타 재료들은 일반적인 다층구조보다 최적화된 다층구조에서 각각 높게 나타났으며 따라서 최적화된 다층-복합재료구조에서 각 소재의 두께 별 충격흡수효율이 증가함을 알 수 있다.

세라믹복합재료를 구조 전면에 배치할 경우 충격자의 마모를 유발시킬 수 있으며 아울러 충격을 분산시키는 효과를 얻을 수 있다[1,7-9,14]. 그러나 두께 별 충격흡수효율 측면에서 세라믹복합재료는 일반적인 다층 구조의 경우, 차지하는 두께가 전체의 40 %에 이르는데 반해 여타 재료의 두께 별 충격흡수효율에 비해 비교적 높지 않게 나타났으며, 최적화된 다층 구조의 경우에 차지하는 두께가 전체의 31 % 임에도 불구하고 알루미늄 폼을 제외한 여타 재료의 두께 별 충격흡수효율에 비해 낮게 나타났다. 뿐만 아니라 면밀도 별 충격흡수효율에서도 세라믹복합재료가 차지하는 면밀도가 전체의 60-77 %에 이르는데 반해 다른 재료의 면밀도 별 충격흡수효율에 비해 가장 낮게 나타났다. 한편 세라믹복합재료는 두께가 얇을수록 두께 또는 면밀도 대비 충격흡수효율 모두에서 증가함을 알 수 있다. 알루미늄 폼의 경우 면밀도별 충격흡수에너지는 최적화를 수행치 않은 일반 다층구조와 최적화된 다층구조 모두 다른 재료보다 월등히 높음을 알 수 있고 따라서 경량 다층-복합재료구조를 구성함에 있어 알루미늄 폼의 두께 비율을 상대적으로 높여주는 것이 무게에 따른 충격흡수에너지 효율을 증가시키는데 크게 기여할 것으로 보인다.

5. 결론

다층-복합재료구조의 충격흡수성능 연구와 관련하여 사용 소재 별 적층 두께, 면밀도, 질량관성모우멘트를 고려하였으며 탄자한계속도가 최대화되는 소재-구조 최적화를 수행하였다. 소재 또는 적층 구조에 따라 관통기구가 적절히 고려된 통합모델이 제시되었으며 각 층들과 탄자한계속도 및 임의의 속도 하에서 각 소재-구조의 충격흡수에너지를 비교, 분석하기 위해 이론적 계산과 함께 유한요소해석을 병행하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 다층-복합재료구조 해석을 위해 제시한 Florence 및 Awerbuch-Bonder 통합 모델을 이용하여 계산한 이론적 탄자한계속도와 유한요소해석에서 예측된 탄자한계속도가 각각의 모델로 산출한 이론값과 수치해석 결과의 차이보다 작은 오차를 보임에 따라 다층-복합재료구조 설계에

필요한 통합모델의 타당성을 확인 할 수 있다.

- (2) 일반적으로 단층구조의 경우, 면밀도가 증가함에 따라 탄자한계속도가 증가한다. 하지만 최적화된 다층구조에서는 최적화를 수행치 않은 일반 다층구조보다 면밀도가 감소함에도 불구하고 탄자한계속도가 증가함을 확인하였으며 이는 이중 재료의 적층에 따른 추가적인 충격흡수성능의 차이에 기인된 것으로 판단된다. 따라서 경량-내충격 구조를 설계함에 있어 다층-복합재료구조 최적화가 유용함을 제안할 수 있다.
- (3) 세라믹복합재료는 충격자의 마모를 유발시키며 충격을 분산시키는 효과를 지님에 반해 여타 재료에 비해 두께 또는 면밀도 대비 충격흡수효율이 낮게 나타났다. 또한 두께가 얇을수록 면밀도 대비 효율이 증가함에 따라 다층구조 설계 시 보다 적절한 두께 선정이 요구된다.
- (4) 면밀도 효과를 고려하여 충격흡수효율을 분석한 결과 상대적으로 알루미늄 폼이 가장 우수한 성능을 보였으며 따라서 알루미늄 폼이 다층-복합재료구조의 경량화에 특히 유용함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 ADD-06-05-01)

참고문헌

- 1) 안성훈, 정우균, 김희재, “전투차량용 세라믹복합재료 복합장갑의 개발추세,” *한국정밀공학회지*, 제22권, 제7호, 2005, pp. 7-18.
- 2) “Military Specification Armor,” *U. S. Patents*, 1984, MIL-A-62473.
- 3) Gooch, W.A. and Burkins, M.S., “The Analysis of Threat Projectiles for Protection of Light Tactical Vehicle,” *U. S. Army Research Laboratory*, 2004, ARL-RP-89.
- 4) Borvik, T., Hopperstad, O.S. and Langseth, M., “Effect of Target Thickness in Blunt Projectile Penetration of Weldox 460 E Steel Plate,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 4, 2003, pp. 413-464.
- 5) Hetherington, J.G., “The Optimization of Two Component Composite Armours,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 3, 1992, pp. 409-414.
- 6) Wang, B. and Lu, G., “On the Optimization of Two-component Plates against Ballistic Impact,” *Journal of*

- Materials Processing Technology*, Vol. 57, No. 1, 1996, pp. 141-145.
- 7) Florence, A.L., "Interaction of projectile and composite armor, Part II," *Stanford Research Institute, Menlo Park (CA, USA)*, 1969, AMMRG-CR-69-15.
 - 8) Ben-Dor, G., Dubinsky, A. and Elperin, T., "Optimization of two-component composite armor against ballistic impact," *Composite Structures*, Vol. 69, No. 1, 2005, pp. 89-94.
 - 9) Shi, J. and Grow, D., "Effect of double constraints on the optimization of two-component armor systems," *Composite Structures*, Vol. 79, No. 3, 2007, pp. 445-453.
 - 10) Awerbuch, J. and Bonder, S.R., "Experimental Investigation of Normal Perforation of Projectiles in Metallic Plates," *International Journal of Solid Structures*, Vol. 10, 1974, pp. 685-699.
 - 11) Mahfuz, H., Zhu, Y. and Haque, A., "Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 2, 2000, pp. 203-217.
 - 12) <http://www.matweb.com/>(AGY Holding Corp., Coors Ceramics Co., the Aluminum Association, Inc., DuPont)
 - 13) Kim, Y., Gimm, H., Seo, M.-Y. and Kim, T.-W., "Determination of Shock Absorption Characteristics with Florence Scheme in Multi-layered Composite Structures," *The 6th Asian-Australasian Conference on Composite Materials*, 2008, pp. 267-270.
 - 14) Lee, M. and Yoo, T.H., "Analysis of Ceramic/metal Armour Systems," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 9, 2001, pp. 819-829.
 - 15) Woodward, R.L., Gooch, W.A. and O'Donnell, R.G., "A Study of Fragmentation in the Ballistic Impact of Ceramics," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 15, No. 5, 1995, pp. 605-618.
 - 16) Fink, B.K., Monib, A.M. and Gillespie Jr., J.W., "Damage Tolerance of Thick-section Composites Subjected to Ballistic Impact," *U. S. Army Research Laboratory*, 2001, ARL-TR-2477.
 - 17) Gama, B.A., Bogetti, T.A. and Fink B.A., "Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension in Armor Design," *Composite Structures*, Vol. 52, No. 3/4, 2001, pp. 381-395.
 - 18) Rosenberg, Z. and Dekel, E., "A numerical study of the cavity expansion process and its application to long-rod penetration mechanics," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 147-154.