

복합재료의 방탄충격에너지 흡수에 관한 연구

강은영*, 윤영기, 황도인(전남대 대학원 기계공학과), 윤희석(전남대 기계공학과)

A study of ballistic impact energy absorbing mechanism of composites

E. Y. Kang (Mech. Eng. Dept. CNU), Y. K. Yoon, D. I. Hwang, H. S. Yoon (Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

This paper presents an investigation of the energy absorption of composite laminates during ballistic impact. Three components are responsible for the absorption of energy – the tensile failure of fiber, the elastic deformation of the composite, the delamination of composite laminates. The ballistic limit, V_0 , of the laminates is determined using a previous model implemented to determine the energy absorption of the three components listed above. The size of the deformed zone during impact was estimated by an approximate solution for impacts on plates. The carbon/epoxy plates were examined for this research.

Key Words : Ballistic limit velocity (방탄한계속도), Composites (복합재료), Delamination (박리), Energy balance (에너지 평형), Elastic deformation (탄성변형), Impactor (충격체)

1. 서론

섬유강화 복합재료는 높은 비강도, 비강성 및 내충격성, 내부식성, 내피로성이 우수하여 일반 민수용뿐 아니라 군사용으로도 광범위하게 적용되고 있다. 섬유강화 복합재료의 군사적 응용의 하나로 우수한 내충격성을 이용하여 방탄재로 사용되고 있는데, 전투헬멧이나 방탄복과 같은 개인 방탄재에서 헬기외, 같은 방탄구조재까지 다양하게 적용되고 있다.

방탄재로서 복합재료는 충격체가 가진 운동에너지를 흡수함으로써 방탄효과를 발휘하게 된다. 대부분 이 에너지는 강화섬유의 인장파괴, 복합재료의 탄성변형, 층간 분리, 층간 전단 등의 형태로 흡수되는데 특히 강화섬유의 인성, 수지의 물성, 섬유배열, 복합재료의 두께, 층간 결합력 등에 많은 영향을 받는다. 복합재료를 방탄재로 효과적으로 사용하기 위해서는 우선 고속충격 하에서 재료의 충격거동 특성을 이해할 필요가 있다.

복합재료는 비균일성, 이방성을 지닌 재료이므로 고속충격 하에서 완벽한 충격거동을 설명한다는 것은 어려운 일이다. 대부분 실험을 통해 충격체가 재료를 관통할 수 있는 한계속도(V_0)를 정의하여 방탄성능을 평가하는데 MIL-STD-662E 규격서에 명시된 방호한계속도(V_{50})가 성능평가 기준으로 많이

사용된다. 그러나 실험적인 방법은 재료와 충격체의 충돌과정에 관한 세부적인 이해를 돕지 못 할뿐 아니라 실험장비를 구축하는데도 많은 비용이 소모되므로 한계가 있다. 그러므로 해석적 방법을 이용한 복합재료의 고속충격 연구 또한 많이 진행되고 있다. 해석적 방법은 단순화된 모델을 구성하고 차원 해석 등을 통해 간단한 공식을 만든 다음 몇 가지 상수들을 실험 데이터와 비교하여 결정하게 되는데 이 방법은 물리적 원리에 근거하여 관통 현상을 해석할 수 있으나 여러 가지 가정과 단순화로 인하여 합리성을 상실할 수 있다. 해석적 방법은 평판의 전단변형을 고려한 Mindlin 이론과 Von-Karman의 대치집 이론을 고려한 비선형 해석, 3차원 탄성론을 이용한 Wu 와 Chang 의 선형 유한해석, 충격체와 평판을 스프링과 질량으로 이상화시킨 모델 (spring-mass model)이나 에너지 보존법칙을 이용한 모델 (energy-balance model) 등이 있다.

본 연구에서는 에너지평형모델 (energy-balance model)을 이용하여 복합재료의 방탄한계속도를 구하려고 한다. 에너지평형모델은 충돌 전 충격체가 가지고 있는 운동에너지는 충돌 시 방탄재가 흡수한 에너지와 같다는 개념이다. 여기서 중요한 것은 방탄재가 어떤 형태로 충격체의 운동에너지를 흡수하는가 이다. Morye[1]는 충격실험을 통하여 복합재료의 변형이 충격에너지 흡수의 중요한 메카니즘임을 규명하였고, Zhu et al.[2]과 Zee & Hsieh[3]는 fiber

의 인장파괴가 에너지 흡수에 중요한 역할을 함을 보였다. 복합재료의 적층순서와 층간의 접착 상태 등에 따라 박리 또한 에너지 흡수에서 무시할 수 없는 요소이다[4].

본 연구에서는 기존의 에너지 흡수기구에 대한 이론과 연구를 바탕으로 bending 과 stretching 으로 나타나는 복합재료의 변형, 박리 메카니즘으로 충격체의 운동에너지를 흡수하는 에너지 평형 모델을 구성하고 필요한 상수를 구하였다.

2. 연구내용

2.1 Energy Balance Model

본 연구에서는 충격에 대한 동적해석을 위해 앞에서 언급한 바 있는 에너지 평형 모델을 이용하였다. 이 모델은 초기에 충격체가 갖고있는 운동에너지는 충돌이 일어나는 동안 구조물의 변형에 사용되고 충격체는 강체라 가정하였다. 방탄한계속도 V_0 은 충격체가 구조물에 충돌하였을 때 가지고 있던 운동에너지가 구조물에 의해 모두 흡수되고 속도가 '0'이 되는 충격체의 초기 속도이다. 다시말해 관동률 0%를 의미한다.

충격체의 질량 m 과 방탄한계속도 V_0 을 이용하여 흡수된 에너지를 나타내면 다음과 같다.

$$E_L = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (1)$$

충격체의 손실된 운동에너지는 Fig. 1에서 보듯이 충격체가 충돌할 때 복합재료의 후면에 cone 모양의 변형이 발생하면서 흡수된다.

Morye는 우선 cone 내의 복합재료를 충격체가 직접 yarn을 당기므로 인장파괴(Tensile failure)가 일어나는 Primary yarn과 cone의 형성에 의해 탄성변형(Elastic deformation)을 하는 Secondary yarn 개념으로 나누어서 재료 변형에 의한 두 가지 에너지 흡수 메카니즘을 설명하였다.

Primary yarn에서 인장파괴(Tensile Failure)에 의한 에너지 흡수량(E_T)은 다음과 같다.

$$E_T = E_C V \quad (2)$$

여기서, E_C 는 단위 부피당 복합재료의 인장파괴 지점에서 흡수된 에너지이고 V 는 Primary yarn 의 부피이다.

Secondary yarn에서 탄성변형(Elastic Deformation)에 의한 에너지 흡수량(E_E)은 다음과 같다.

$$E_E = M \varepsilon^2 / 2 \quad (3)$$

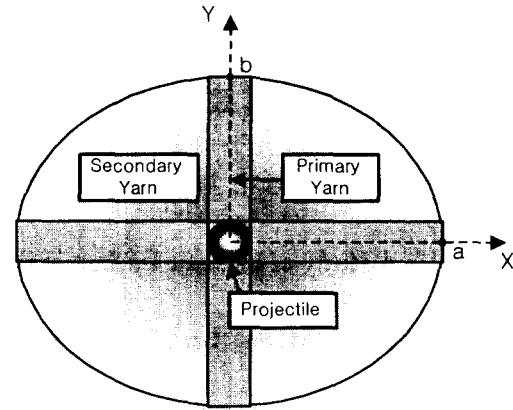


Fig. 1 Deformed zone of composites during ballistic impact by a projectile.

M 은 복합재료의 인장강도이고 ε 은 복합재료의 변형률이다. 이 두 값은 재료의 응력-변형률 곡선으로부터 구할 수 있다. 경계조건은 $r=0$ 일 경우 $\varepsilon = \varepsilon_0$, $r=R$ 일 경우 $\varepsilon = 0$ 이다. 여기서, r 은 타원의 중심으로부터 변형영역 내에 있는 한 점까지의 길이이고, R 은 타원의 둘레이다. 변형률을 r 에 대해 선형적이라 가정하고 전체 변형영역의 면적으로 적분하여 탄성변형에 의한 에너지량을 구하였다.

박리는 Mode I 과 Mode II 하중에서 전파되는데 복합재료에서 crack 전파를 정량적으로 분석하기 어려우므로 본 논문에서는 G_{IIc} 를 대표적으로 이용하여 박리를 설명하였다. 그러므로 박리에 의해 흡수된 에너지(E_D)는

$$E_D = A G_{IIc} \quad (4)$$

여기서, A 는 변형영역의 면적, G_{IIc} 는 delamination fracture toughness 이다.

그러므로 충격체의 손실된 운동에너지는 다음과 같다.

$$m V_0^2 / 2 = E_T + E_E + E_D \quad (5)$$

2.2 변형영역(Deformed Zone)

충격체에 의해 복합재료 plate 에 변형이 일어나고, 이 변형에너지의 형태로 충격체의 운동에너지가 손실된다고 앞에서 언급하였다. 복합재료의 변형영역을 구하기 위해 wave propagation 이론을 이용하였다. Fig. 2와 같이 적층된 plate 의 굽힘강성과 충격에 의해 생성되는 wave 가 전파되는데 걸리는 시간과의 관계를 이용하여 변형영역을 정의한다.

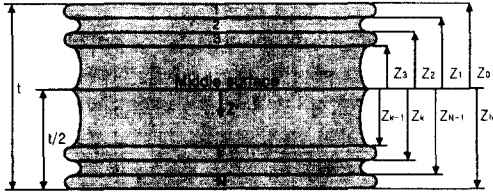


Fig. 2 Laminated plate geometry and ply numbering.

Laminate의 굽힘강성은 다음과 같다.

$$D_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k Z^2 dZ = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) \quad (6)$$

Laminate의 곡률과 관계되는 굽힘강성은 충격 하에서 복합재료의 변형에 의해 형성된 cone의 크기에 영향을 주는데 이를 이용하여 변형영역을 정의하면 x, y 방향에 대해 아래식과 같이 각각 나타낼 수 있다.

x방향:

$$a = 2\sqrt{\pi} \left(\frac{D_{11}}{m} \right)^{1/4} [2(A+1)]^{1/8} \sqrt{t^*} \quad (7)$$

y방향:

$$b = a / (D_{11} / D_{22})^{1/4} \quad (8)$$

3. 실험 및 해석

3.1 실험

3.1.1 인장실험

실험에 사용한 시편은 Carbon/epoxy 복합재료를 사용하여 Hot Press 를 사용하여 Fig. 3 과 같은 경화 조건으로 하였다. 성형치수는 기본물성 시편 및 방탄시편을 만들기 충분한 크기(250mm *250mm)로 제조하였다.

기계적 시험편을 채취하여 Model I-8872 INST-ROTON 를 이용하여 인장시험을 실시하여 Table 1 과 같은 결과를 얻었다. 이 결과는 식(2),(3)의 상수로 쓰인다.

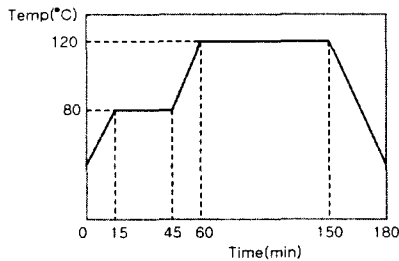


Fig. 3 Cure cycle for Carbon/epoxy.

Table 1 Stress-strain behaviour

Tensile Strength [Gpa]	0.489
Failure Strain [%]	1.38
Modulus [Gpa]	0.3543

3.1.2 방탄충격실험

방탄 한계속도(V_0)를 구하기 위하여 방탄실험장치를 개발·제작하였다. 압축가스를 이용하여 충격체의 속도를 조절하였으며 압축기와 실린더로 구성된 격발장치를 통하여 충격체를 발사하였으며, 충격체의 속도를 측정하기 위해 고속카메라를 사용하였다.

Carbon/epoxy 복합재료를 10ply([0/90/0/90/0]_s) 적층하였을 경우, 방탄실험 결과와 2 절의 이론식을 통해 식(5)로부터 얻은 V_0 를 비교한 결과를 Table 2 에 나타내었다.

3.2 유한요소해석

본 연구에서 사용한 모델은 정방형의 복합재료 Plate 로 lamina 는 [0°/90°]_{ns} 방향으로 적층되어 있으며 충격체의 경우 강체로 설정하였다. 해석모델은 Fig. 4 에 나타냈다. 모델링 및 해석은 유한요소 해석 프로그램인 I-DEAS 와 PAM 을 사용하였고, 4 절점 쉘(shell) 요소를 선택했으며, plate 의 경우 사용된 요소는 600 개, 총 절점은 676 개이고, 충격체의 경우 사용된 요소는 150 개, 총 절점은 216 개이다. plate 의 경계조건은 완전고정인 경우를 고려하였다.

Table 2 The ballistic limit velocity (V_0)

Velocity	Initial velocity (m/s)	Limit velocity (m/s)
Method		
Predicted value	80	27.2
Ballistic test	80	34.4

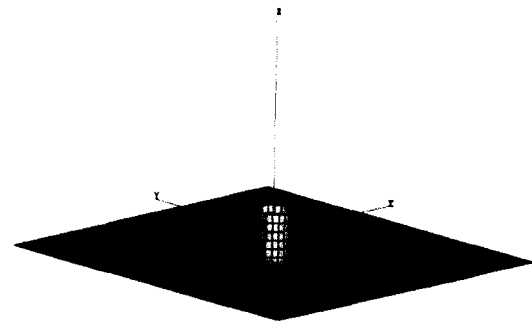


Fig. 4 FEM mesh of the plate.

유한요소해석을 통해 Fig. 5와 같이 contact force history를 구하였다. 해석을 통해 얻은 결과는 충격체의 관통을 보여주지 못하고 단순히 복합재료 plate에 부딪혀 한계에 도달하면 다시 회복되어 실제와 다를 수 있다. 이 결과로부터 얻고자 하는 것은 복합재료 plate가 관통되기 직전까지 즉, contact force가 최대가 되는데 걸리는 시간(t^*)이다. Fig. 6은 복합재료의 ply 수에 따라 t^* 값을 구하여 비교하였다. Ply 수가 많을수록 t^* 가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 복합재료의 두께가 증가할수록 굽힘강성이 커지기 때문이다. 구한 t^* 값을 식(7)과 (8)에 대입하여 변형영역을 구하였다. Table 3는 다양한 ply 수로 해석했을 때 변형영역의 크기를 보여주고 있다. Ply 수가 증가할수록 변형영역이 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

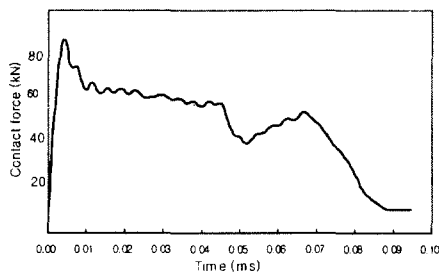


Fig. 5 Contact force history for high-velocity impact on 10ply CERP plate.

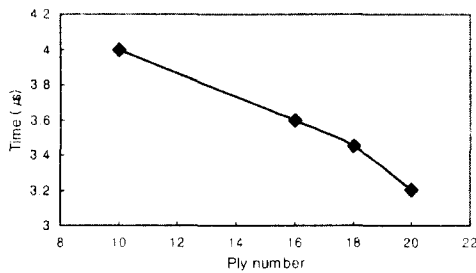


Fig. 6 The contact duration for the wave to travel through the thickness of the laminate.

Table 3 The size of deformed zone predicted by Eq.(7), (8)

Ply 수	size	
	a (mm)	b (mm)
10 ply	13.3	11.8
16 ply	15.9	14.7
18 ply	17	15.8
20 ply	17.6	16.5

4. 결론

본 연구에서는 carbon/epoxy 를 이용하여 방탄충격 시 흡수되는 에너지 메커니즘을 이해하기 위해 간단한 에너지 평형 모델을 구성하였으며 이론식과 방탄실험을 통하여 복합재료의 방탄한계속도를 비교해 보았다. 실험값이 약간 높았는데 이는 단순 모델을 만들기 위해 마찰손실, 전단력에 의한 에너지 손실 등을 무시하였기 때문이다. 고속충격 시 복합재료의 후면에 생기는 변형영역을 예측해 보기 위해 wave propagation 이론과 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 ply 수가 증가할수록 변형영역이 넓어지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 BK21 사업의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. S.S. Morye, P.J. Hine, R.A. Duckett, D.J. Carr, I.M. Ward. "Modeling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact". *Composites Science and Technology* 2000;60:2631-42
2. Zhu G, Glodsmith W, Dharan CKH. "Penetration of laminated Kevlar by projectiles - II: Analytic model". *Int J Solids Structure* 1992;29(4):421-36.
3. Zee RH, Hsieh CY. "Energy loss partitioning during ballistic impact of polymer composites" *Polym Compos* 1993;14(3):265-71
4. R.A.W. Mines, A.M. Roach, N. Jones, " High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates", *International Journal of Impact Engineering* 1999;22: 561-588