

고속충격을 받는 Carbon/Epoxy 복합재 적층판의 충격체 질량손실을 고려한 흡수에너지 예측

조현준* · 김인걸*[†] · 이석제* · 김영아** · 우경식**

The Absorbed Energy of Carbon/Epoxy Composite Laminates Subjected to High-velocity Impact in Considering the Loss of Projectile Mass

Hyun-jun Cho*, In-Gul Kim*[†], Seokje Lee*, Young-A Kim**, Kyeongsik Woo**

ABSTRACT: In this paper, we conducted high velocity impact test for Carbon/Epoxy composite laminates and proposed advanced method for predicting the absorbed energy of composite laminates. During high-velocity impact test, we discovered loss of projectile mass macroscopically using high speed camera, thus we calculated the absorbed energy of composite laminates by taking loss of projectile mass into account. We proposed a model for predicting the absorbed energy of composite laminates subjected to high-velocity impact, the absorbed energy was classified into static energy and dynamic energy. The static energy was calculated by the quasi-static perforation equation that is related to the fiber breakage and static elastic energy. The dynamic energy can be divided by the kinetic energy of deformed specimen and fragment mass. Finally, the predicted absorbed energy considering loss of projectile mass was compared with experimental results.

초 록: 본 논문에서는 Carbon/Epoxy 복합재 적층판에 대하여 실사적 실험을 수행하였으며, 복합재 적층판의 흡수 에너지를 예측하기 위한 개선된 방법을 제시하였다. 고속충격실험 과정에서 충격체의 질량손실을 고속카메라를 통하여 거시적으로 확인하였으며, 따라서 이를 고려하여 복합재 적층판의 흡수 에너지를 계산하였다. 고속충격을 받는 복합재 적층판의 흡수 에너지를 예측하기 위한 모델을 제시하였으며, 복합재 적층판의 흡수 에너지는 크게 정적에너지와 동적에너지로 분류하였다. 정적에너지 계산은 섬유 파손과 정적 탄성에너지와 관련 있는 준정적 관통실험식을 통해 구한 관통 에너지를 사용하였다. 동적에너지는 변형되는 시편의 운동에너지와 손실된 파편 질량들의 운동에너지로 나눌 수 있다. 최종적으로 충격체 질량손실을 고려하여 예측된 흡수 에너지와 실험결과를 비교/분석하였다.

Key Words: 복합재 적층판(composite laminates), 고속 충격(high-velocity impact), 충격체 질량손실(loss of projectile mass), 흡수에너지(absorbed energy)

Received 27 June 2013, received in revised form 26 December 2013, accepted 27 December 2013

*충남대학교 항공우주공학과 대학원

*[†]충남대학교 항공우주공학과, Corresponding author (E-mail : igkim@cnu.ac.kr)

**충북대학교 토목공학과

1. 서 론

복합재는 금속재에 비하여 높은 비강도 및 비강성, 경량성, 내부식성 및 설계 유연성 등 많은 장점을 가지고 있어 항공 산업 및 군수 산업에 폭넓게 이용되고 있다. 항공기의 경우 우박(Hail stone), 조류 충돌(Bird strike) 등 외부 물체에 의하여 파손이 일어날 수 있으며, 외부의 물체가 항공기 외벽과 충돌 후 잔류속도를 가지게 되면 인명 피해 및 항공기 내부 장비에 파손을 일으킬 수 있다. 따라서 고속충돌에 의한 복합재 적층판의 손상거동에 대한 많은 연구가 진행되었다. S.R. Reid[1]는 유효면적을 조절해 가며 정적 압입 관통실험과 고속충격 실험을 수행하고, 이를 준 경험식으로 만들어 복합재의 고속충격을 예측하는 연구를 수행하였다. S.S. Morye[2]는 고속충격을 받는 고분자 복합재 적층판에 의한 흡수에너지를 계산하기 위한 간단한 모델을 제시하였으며, 흡수에너지를 크게 3가지 형태로 정의하였다. You[3]는 정적압입 관통실험 및 고속충격실험을 수행하였으며, 정적압입 관통실험, 고속충격실험 및 준 실험식사이의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문은 실제 화약충에 의하여 발사되는 강심탄을 이용하여 Carbon/Epoxy 복합재 적층판에 대한 고속충격 실험을 수행하였다. 또한 충돌 전/후 충격체의 질량손실을 실험적 및 수치적으로 확인하였으며, 충격체의 질량손실을 고려하여 복합재 적층판의 흡수에너지를 계산하였다. 마지막으로 고속충격을 받는 복합재 적층판의 흡수에너지를 예측하기 위한 방법을 제시하였으며, 충격체 질량손실을 고려한 실험결과 및 예측된 결과를 비교/분석하였다.

2. 이론 전개

2.1 고속충격실험을 통한 흡수에너지 계산

일반적으로 충돌에 의한 복합재의 적층판의 흡수에너지는 충돌 전/후 충격체가 손실한 에너지와 같다고 가정한다. 따라서 충돌에 의한 복합재 적층판의 흡수에너지는 식 (1)과 같다.

$$E_{abs} = \frac{1}{2}m_p(V_i^2 - V_r^2) \quad (1)$$

여기서 m_p 는 충격체의 질량, V_i 는 충격체의 충격속도이며, V_r 은 잔류속도이다. 식 (1)의 가정은 충격체를 강체로 가정함으로써 충격 전/후 변형으로 인한 에너지 손실이 없다. 하지만 본 논문에서 진행한 고속충격실험에서는 충돌 전/후 충격체의 질량손실을 Fig. 1과 같이 고속카메라를 통하여 확인하였다. 따라서 충격체의 질량손실 고려하면 복합재 적층판의 흡수에너지는 다음 식 (2)와 같다.

$$E_{abs} = \frac{1}{2}(m_i V_i^2 - m_r V_r^2) - \frac{1}{2}m_e V_e^2 \quad (2)$$

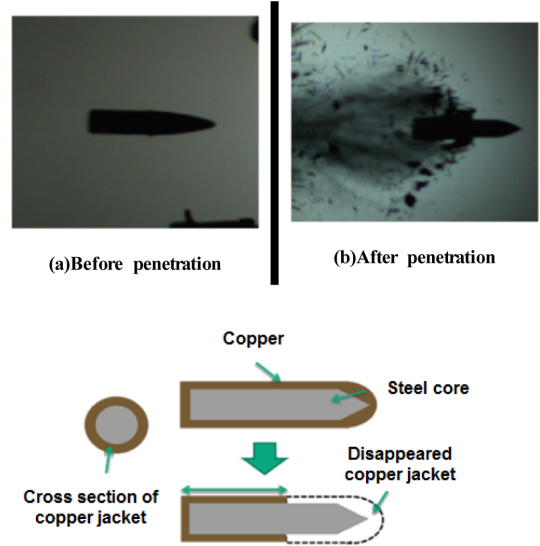


Fig. 1. Loss of projectile mass

여기서 m_p , m_r 및 m_e 는 각각 충격체의 초기 질량, 잔류질량 및 손실된 질량이며, V_e 는 충격체에서 손실된 질량이 가지는 속도이다. 이때 충격체에서 손실된 질량이 가지는 운동에너지는 식 (3)과 같다.

$$E_e = \frac{1}{2}m_e V_e^2 \quad (3)$$

손실된 충격체의 질량이 가지는 속도는 거시적으로 확인하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 손실된 충격체의 질량이 가지는 속도를 충격체의 잔류속도대비 0%, 25%, 50%, 75%, 100%인 상태로 가정하고 5가지 경우에 대하여 복합재 적층판에 흡수되는 에너지를 계산하였다. 0%의 경우 손실된 충격체의 질량이 가지는 운동에너지는 복합재 적층판에 의해 모두 흡수된 경우를 나타내며, 100% 경우 손실된 충격체의 질량이 가지는 운동에너지는 복합재 적층판의 흡수에너지에 대하여 어떠한 영향을 미치지 않으며 이는 충격체가 강체로 가정한 경우와 같다.

2.2 복합재 적층판의 흡수에너지 예측 모델

본 논문에서는 고속충격을 받는 Carbon/Epoxy 복합재 적층판의 흡수에너지는 크게 정적에너지(E_{static})와 동적에너지($E_{dynamic}$) 2가지 형태로 정의하였다. 정적에너지는 보강섬유의 파손과 정적 탄성에너지와 관련 있는 준정적 관통실험식을 통해 구한 관통 에너지를 사용하였으며, 동적에너지는 고속충격 시 변형된 시편 일부의 움직임(E_{cone})과 손실된 파편 질량의 운동에너지($E_{particle}$)의 합으로 표현하였다. 따라서 고속충격을 받는 Carbon/Epoxy 복합재 적층판의 흡수에너지는 식 (4)와 같다.

$$E_{abs} = E_{static} + E_{cone} + E_{particle} \quad (4)$$

2.2.1 준정적 관통실험식

Wen과 Jone[5]은 복합재 적층판에 준정적 하중을 가하여 관통될 때까지의 판에서 흡수한 에너지를 국부적인 변형의 흡수한 에너지(E_f)와 복합재의 전체적인 변형에 의해 발생되는 에너지(E_g)의 합으로 정의하였다. 본 논문에서 사용된 끝이 반구형인 압입체에 관한 관통 에너지(E_f)의 계산식은 다음과 같다.

$$E_f = \sigma_u d^3 \left(\frac{\pi \epsilon_f}{8} + A \left(\frac{D}{d} \right)^{\beta_1} \left(\frac{T}{d} \right)^{\beta_2} \right) \quad (5)$$

여기서 σ_u 는 적층판의 파손응력, ϵ_f 는 인장에 의한 파단 변형률, d 는 압입체의 지름, T 는 적층판의 두께, D 는 구속조건의 지름을 의미하며, A , β_1 , β_2 는 실험적으로 구할 수 있는 상수이다. 동일시편과 압입체에 대한 A , β_1 , β_2 는 기수행 연구결과와 값을 사용하였다[3,4].

2.2.2 변형된 시편의 운동에너지(E_{cone})

Morye[2]는 복합재 적층판이 고속충격을 받으면 충격지점을 중심으로 cone 형태의 변형이 생기며, 이렇게 변형된 시편의 일부는 충격에 의하여 운동 상태에 놓이게 된다. 이때 변형된 시편이 가지는 운동에너지를 다음과 같이 정의하였다.

$$E_{KE} = \frac{1}{2} \pi R_c^2 T \rho V_c^2 \quad (6)$$

여기서 R_c 는 변형된 시편 크기의 반지름, T 는 시편의 두께, ρ 는 시편의 밀도, V_c 는 변형된 시편의 운동속도이다. 이때의 변형된 시편이 가지는 속도 범위를 충격체의 잔류속도부터 0까지 선형적으로 감소한다고 가정하였으며, 변형된 시편의 속도분포는 식 (7)과 같다.

$$V_c(r) = -\frac{V_r}{R_c} r + V_r \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 변형된 시편의 운동에너지를 식 (8)과 같이 적분형태로 정의하였으며, 적분범위를 손실된 파편 질량으로부터 계산된 반지름(R_d)에서부터 변형된 시편의 크기의 반지름(R_c)까지로 가정하였다.

$$E_{cone} = \frac{1}{2} \int_{R_d}^{R_c} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} r T \rho \left(-\frac{V_r}{R_c} r + V_r \right)^2 d\theta dr \quad (8)$$

2.2.3 손실된 파편 질량의 운동에너지($E_{particle}$)

본 논문에서는 손실된 파편 질량의 운동에너지를 계산하기 위하여 충격체 관통직후의 고속촬영 사진을 관찰하여 시편의 파편속도분포를 정규분포로 가정하였으며, 이때의 분포의 범위는 충격속도(V_i)부터 잔류속도(V_r)로 가정하여 손실된 파편 질량의 운동에너지를 계산하였다.

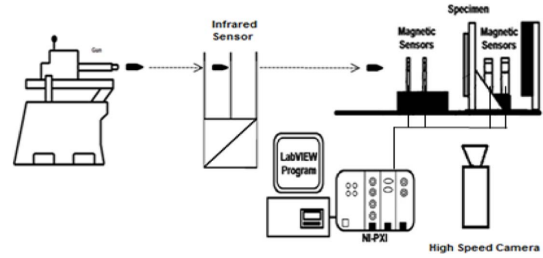


Fig. 2. Experimental set-up of high-velocity impact test

3. 고속충격실험

3.1 실험장치 및 방법

고속충격실험 장치는 Fig. 2와 같이 화약충, 충격체, 적외선 센서, 마그네틱 센서, 고속촬영카메라, 시편, 지그 및 신호취득시스템(DAQ)로 구성되어 있으며, 충격체는 최대직경 5.59 mm, 무게 3.59 gr인 강심탄을 사용하였다.

3.2 시편

실험에서 사용된 시편은 Carbon/Epoxy 일방향 Prepreg (USN 150B, SK Chemicals)를 사용하였고, 87.5×87.5 mm 크기의 정사각형이다. 시편의 적층 순서는 [45/0/-45/90]_{ns}이며, 두께는 4S(4.66 mm)와 8S(9.29 mm)를 사용하였다. 고속충격실험은 4S 시편에 대하여 600 m/s, 8S 시편에 대하여 600 m/s 및 800 m/s의 충격속도에서 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 고속충격실험결과

Table 1은 충돌 전/후 충격체의 속도를 측정한 결과이다. 동일한 충격속도에서 복합재 적층판의 두께의 증가는 충격체의 충격 후 잔류속도의 감소를 야기하고 이는 두꺼운 시편에서 흡수하는 에너지의 양이 더 많음을 나타낸다. Table

Table 1. Result of High velocity impact tests

Specimen	Impact velocity (m/s)		Residual velocity (m/s)		Absorbed energy (J)
	Infrared sensor	Magnetic sensor	High speed camera	Magnetic sensor	
S454HC-1	592.8	591.72	570.6	557.1	71.39
S454HC-2	602.6	609.76	-	567.91	88.47
S454HC-3	612.3	612.87	-	571.97	86.96
S458HC-1	587.2	589.39	520.4	511.07	154.71
S458HC-3	621.6	621.12	-	564.44	120.62
S458HC-4	807.3	816.33	771.0	753.77	176.32

1에서 계산된 흡수에너지는 충격체에서 손실된 질량과 복합재 적층판 사이에 에너지 교환이 없다고 가정된 경우의 값 즉, 충격체에서 손실된 질량의 속도가 잔류속도 대비 100% 일 경우로 마그네틱 센서로 측정된 속도를 이용하여 계산하였다.

Table 2의 결과는 C-scan을 이용하여 확인한 충격 후 복합재 적층판의 손상영역이다. 본 논문에서는 복합재 적층판

Table 2. Damaged area of composite laminates




Specimen	S454HC-1	S458HC-1	S458HC-4
Impact velocity (m/s)	591.72	589.39	816.33
C-scan image			
Diameter of damaged area (mm)	49.1	74.6	68.4

Table 3. Disappeared fragment mass of specimens

Specimen	Disappeared mass (g)
S454HC-1	0.44
S454HC-2	0.54
S454HC-3	0.27
S458HC-1	0.35
S458HC-3	0.57
S458HC-4	1.11

Table 4. Weight change of projectiles

Specimen	Projectile mass (gr)	Projectile mass of After impact (gr)		Disappeared mass (gr)	
		High speed camera	LS-DYNA	High speed camera	LS-DYNA
S454HC-1	3.59	3.05	3.29	0.54	0.3
S458HC-1	3.59	3.05	3.07	0.54	0.52
S458HC-4	3.59	2.93	3.02	0.66	0.57

Table 5. Calculation of absorbed energy_impact test

Specimen	$E_{abs-0\%}$ (J)		$E_{abs-25\%}$ (J)		$E_{abs-50\%}$ (J)		$E_{abs-75\%}$ (J)	
	High speed camera	LS-DYNA	High speed camera	LS-DYNA	High speed camera	LS-DYNA	High speed camera	LS-DYNA
S454HC-1	155.19	117.94	134.24	106.31	113.29	94.67	92.34	83.03
S454HC-2	175.55	136.85	153.78	124.75	132.01	112.66	110.24	100.56
S454HC-3	175.3	136.04	153.21	123.76	131.13	111.50	109.04	99.23
S458HC-1	225.23	222.62	207.60	205.64	189.97	188.67	172.34	171.69
S458HC-3	206.63	203.44	185.13	182.75	163.63	162.04	142.12	141.33
S458HC-4	363.82	338.25	316.94	297.77	270.07	257.28	223.19	216.80

의 손상영역을 고속충격시 변형되는 시편의 크기와 동일하다고 가정하였다.

Table 3은 충격 후 시편의 손실된 파편 질량을 측정한 결과이다. 4S 두께의 시편인 경우, 3번 시편을 제외하고 0.5 gr 내외로 측정이 되었다. 8S 두께의 시편인 경우, 600 m/s 충격속도 조건보다 800 m/s 조건에서 손실된 파편 질량이 많은 경향을 보였다.

4.2 충돌 후 충격체의 손실된 질량

고속카메라 이미지 및 상용 S/W LS-DYNA를 통하여 충돌 전/후 충격체의 무게 변화를 확인하였으며 결과는 아래의 Table 4와 같다. 4S의 경우 고속카메라를 통하여 얻은 충격 후 충격체의 질량과 LS-DYNA를 통하여 얻은 질량 사이에 차이가 나는 것을 확인하였으며, 이는 실제 고속카메라를 통하여 얻은 이미지에서 4S의 경우 충격체의 질량손실은 충격체의 머리 부분에서 발생했고 이를 고속카메라를 통하여 손실된 부분을 측정하기 어렵기 때문에 생기는 오차라고 판단된다.

4.3 흡수에너지 예측 및 분석

식 (3)을 이용하여 충격체에서 손실된 질량이 가지는 운동에너지를 계산하였으며, 충격체에서 손실된 질량이 가지는 속도가 충격체의 잔류속도 대비 0%, 25%, 50%, 75%로 가정된 경우의 흡수에너지를 계산하였으며, 결과는 Table 5와 같다.

충돌 전/후 시편의 질량변화를 저울을 통하여 측정하여 확인하였으며, 또한 시편의 질량 변화에 따른 흡수에너지의 변화를 확인하기 위하여 충돌 후 손실된 시편의 질량을 충격체 지름 대비 1배, 1.5배, 2배에 해당하는 지름의 면적을 구하여 그때의 질량이 시편의 손실된 질량이라고 가정하였고 이때 계산된 결과는 Table 6과 같다. 충격속도가 600 m/s 조건에서 4S 시편의 경우, 실제 측정량이 충격체 대비 1.5배~2배 사이에서 측정되는 경향을 보였다. 8S 시편의 경우, 600 m/s 충격조건에서는 1배~x1.5배 사이에서 측정되는 경향을 보이며 800 m/s 충격속도 조건에서 1.5배~2배 사이에서 측정되는 경향을 보였다. 복합재 적층판의 흡수

Table 6. Calculation of disappeared mass

Specimen	x1(gr)	x1.5(gr)	x2(gr)	Measured value(gr)
S454HC-1	0.18	0.39	0.7	0.44
S454HC-2				0.54
S454HC-3				0.27
S458HC-1	0.35	0.78	1.39	0.35
S458HC-3				0.57
S458HC-4				1.11

Table 7. Prediction of absorbed energy by composite laminates

Specimen	Absorbed energy(J)		
	x1	X1.5	x2
S454HC-1	65.52	101.03	151.18
S454HC-2	66.55	104.00	156.24
S454HC-3	66.89	105.36	159.30
S458HC-1	174.1	238.21	330.75
S458HC-3	185.57	261.59	370.06
S458HC-4	234.34	368.11	555.07

에너지는 앞에서 제시된 모델 식 (5)~(8) 및 소실된 파편의 운동에너지를 각각 계산하여 정적에너지 및 동적에너지 합으로 계산하였으며 결과는 Table 7과 같다. 이를 Table 5의 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

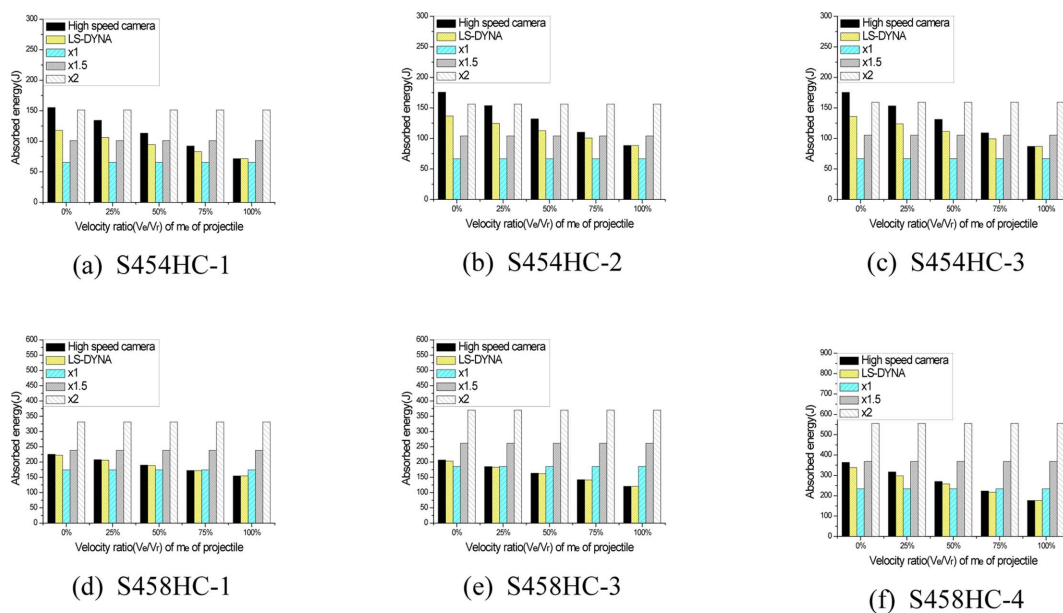
Fig. 3(a)~(c)를 보면 두께 4S 시편에의 경우, 충격체에서 손실된 질량의 속도가 충격체 잔류속도 대비 0~25% 사이의 속도를 가질 경우 실험값과 예측된 값 사이에 매우 유사한 경향을 보인다. Fig. 3(d)~(f)를 보면 8S, 600 m/s의 경우, 충

격체 잔류속도 대비 0%~25% 사이의 속도를 가질 경우 실험값과 예측된 값 사이에 유사한 경향을 보였으나 8S, 800 m/s의 경우 경향성을 띄지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 Carbon/Epoxy 복합재 적층판에 대하여 고속충격실험을 수행하였다. 충격실험 중 충격체의 질량손실을 고속카메라를 통하여 거시적으로 확인하였고 따라서 이를 고려한 복합재 적층판의 흡수에너지를 계산하였다. 충격체에서 손실된 질량의 속도는 거시적으로 확인할 수 없기 때문에 충격체에서 손실된 질량의 속도를 충격체의 잔류속도 대비 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 가정을 하여 충격속도를 계산하였다. 100%의 경우는 충격체가 강체로 가정된 경우와 같으며 0%의 경우는 손실된 충격체의 질량이 가지는 운동에너지는 복합재 적층판에 모두 흡수된 것으로 가정된다. 고속충돌 후 복합재 적층판에서의 질량손실 또한 발견되었으며, 충돌 후 충격체의 시편의 질량을 측정하여 손실된 양을 측정하였다. 이를 충격체의 지름의 크기에 비교하기 위하여 충격체 지름 대비 1배, 1.5배, 2배로 가정하여 손실된 시편의 질량을 가정하였으며, 4S의 시편의 경우 손실된 질량이 1.5배~2배 사이에서 측정되는 경향을 보였다. 8S 시편의 경우 600 m/s 충격속도 조건에서는 1배~1.5배 사이, 800 m/s 충격속도 조건에서는 1.5배~2배 사이에서 손실된 질량이 측정되는 경향을 보였다.

고속충격을 받는 복합재 적층판의 흡수에너지를 예측하기 위하여 몇 가지 모델을 제시하였다. 모델을 통하여 흡수에너지를 예측하였으며, 손실된 충격체 질량을 고려한 실험결과와 비교/분석을 하였다. 4S 시편의 경우 손실된 질량

**Fig. 3.** Comparison with predicted value and experimental value

이 충격체 대비 1.5배~2배 사이에 존재하며 이를 통하여 실험값과 비교할 경우 충격체에서 손실된 질량의 속도가 충격체의 잔류속도 대비 0~25%의 속도를 가질 경우 실험값과 예측된 값 사이에 비슷한 경향을 보이며 8S, 600 m/s의 경우 0%~25% 사이의 속도를 가질 경우 실험값과 예측된 값 사이에 비슷한 경향을 보였으나 8S, 800 m/s의 경우 유사한 경향성을 띄지 않았으며 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Reid, S.R., and Wen, H.M., 2000, *Impact behaviour of Fibre-reinforced Composite Materials and Structures*, CRC Press, pp. 239-273.
2. Morye, S.S., Hine, P.J., Duckett, R.A., Carr, D.J., and Ward, I.M., "Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites upon Ballistic Impact," *Composite science and Technology*, Vol. 60, Issue 14, 2000, pp. 2631-2642.
3. You, W.Y., *A Study on the High Velocity Impact Behavior of Gr/Ep Composite Laminates Based on uasi-static Perforation Test*, MS. Thesis, Chungnam National University, Korea, 2012.
4. You, W.Y., Lee, S.J., Kim, I.G., and Kim, J.H., "Prediction of the Penetration Energy for Composite Laminates Subjected to High-velocity Impact Using the Static Perforation Test," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, 2012, pp. 147-153.
5. Wen, H.M., and Join, N., "Semi-empirical Equations for the Perforation of Plates by Mass," *Structure Under Shock and Impact-II*, 2000, pp. 369-380.
6. Sun, C.T., and Potti, S.V., "A Somple Model to Predict Residual Velocities of Thick Composite Laminates Subjected to High Velocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 3, 1996, pp. 337-353.
7. Morye, S.S., Hine, P.J., Duckett, R.A., Carr, D.J., and Ward, I.M., "A Comparison of the Properties of Hot Compacted Gel-spun Polyethylene Fiber Composite with Conventional Gel-spun polyethylene Fiber Composite," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, Issue 5, 1999, pp. 649-660.
8. Gama, B.A., and Gillespie, Jr. J.W., "Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-section Composite," *Composite Structures*, Vol. 86, Issue 144, 2008, pp. 356-369.
9. Mines, R.A.W., Roach, A.M., and Jones N., "High Velocity Perforation Behaviour of Polymer Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, Issue 6, 1999, pp. 561-588.
10. Nailk, N.K., Shrirao, P., and Reddy, B.C.K., "Ballistic Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Formulation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, Issue 9, 2006, pp. 1521-1552.