

## 논문

## 정적압입 관통 실험을 이용한 복합재 적층판의 고속충격 탄도한계속도 예측

유원영\*, 김인걸\*\*+, 이석제\*, 김종현\*\*\*

## Prediction of Ballistic Limit for Composite Laminates Subjected to High-velocity Impact Using Static Perforation Test

Won-Young You\*, In-Gul Kim\*\*+, Seokje Lee\*, and Jong-Heon Kim\*\*\*

## ABSTRACT

The ballistic limit of Carbon/Epoxy composite laminates with the finite effective area are predicted by using the quasi-static perforation test and semi-empirical formula. The perforation energy were calculated from force-displacement curve in quasi-static perforation test. Also, the actual ballistic limit and penetration energy were obtained through the high-velocity impact test. The quasi-static perforation test and high-velocity impact test were conducted for the specimens with 3 different effective areas. In the high-velocity impact test, the air gun impact tester were used, and the ballistic and residual velocity was measured. The required inputs for the semi-empirical formula were determined by the quasi-static perforation tests and high-velocity impact tests. The comparison between semi-empirical formula and high-velocity impact test results were conducted and examined. The ballistic limits predicted by semi-empirical formula were agreed well with high-velocity impact test results.

## 초 록

본 논문에서는 유효 면적이 제한이 있는 복합재 적층판의 탄도한계속도를 예측하였다. 탄도한계속도를 예측하기 위해 정적압입 관통실험과 고속충격 실험 그리고 준실험식을 이용하였다. 정적압입 관통실험을 통해 하중-변위 데이터를 취득하고 이를 이용해서 관통에너지를 측정하였다. 고속충격 실험을 통해 실제 관통 속도 및 관통 에너지를 측정하였다. 정적압입 관통실험과 고속충격 실험을 통해 구한 에너지를 이용해 준실험식을 만들고, 준실험식과 고속충돌 실험결과와 비교해 보았다. 위 방법을 이용해 탄도한계속도를 예측하였고 정적압입 관통 실험과 준실험식에 의한 탄도한계속도 예측의 타당성을 확인하였다.

**Key Words** : 정적압입 관통실험(quasi-static perforation test), 관통에너지(perforation energy), 고속충격실험(high-velocity impact test), 탄도한계속도(ballistic limit), 복합재 적층판(composite laminates)

## 1. 서 론

최근 섬유강화 복합재료는 민간, 군용항공기를 중심으로 항공우주 구조물에 널리 사용되고 있으나 항공 구조물의 운용환경은 예상치 못한 외부 교란을 일으키기 쉽다. 특히, 고

속충격의 경우 충격체의 질량은 비교적 작지만 빠른 속도로 충돌하기 때문에 복합재 구조물의 손상 메커니즘을 예측하기 어렵고 구조물에 치명적인 피해를 줄 수 있다. 만약 충격체가 관통할 경우 구조물 안쪽에 위치한 주요장비, 폭발성 있는 연료 탱크, 승무원들에 대하여 직접적으로 위협을 줄 수

접수: 2012년 10월 02일, 수정: 2013년 2월 08일, 게재승인: 2013년 2월 12일

\* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

\*\*+ 충남대학교 항공우주공학과, Corresponding author(E-mail: igkim@cnu.ac.kr)

\*\*\* 국방과학연구소

있다. 그러므로 구조물의 생존성 설계를 위해 관통속도 및 관통 후 속도를 사전에 예측하고 설계시 고려되어야 한다.

고속충격을 구분하는 속도의 범위를 보면, Abrate[1]는 충격체의 속도가 100m/sec 이하인 경우를 저속충격이라 하고, 충격체의 속도가 1km/sec 이상인 경우를 고속충격으로 구분하였다. 하지만 Ruiz[2]는 충격지점 으로부터 응력파(stress wave)가 발생하여 동적해석이 필요한 50~300m/sec를 고속충격이라고 하고, 경제지점에서 다중파(multiple wave)가 반사되어 준정적 평형에 이르는 50m/sec 이하를 저속충격이라 구분하였다.

복합재 적층판의 고속충격거동 특성을 알아보기 위한 방법으로는 고속충격 실험, 정적압입 관통실험, 준실험식을 이용하는 방법, 그리고 유한요소해석 등이 있다. 최근 이러한 방법들을 이용한 복합재 적층판의 탄도한계속도 예측에 관한 연구가 널리 수행되고 있는데, Reid[3]는 유효면적을 조절해 가며 정적압입 관통실험과 고속충격 실험을 수행하고, 이를 준실험식으로 만들어 복합재의 고속충격을 예측하는 연구를 수행하였다. Sun[4,5]은 고속충격 실험에서 시편의 유효면적을 조절해 가며 충돌 특성을 비교하였으며 수학적 모델을 통한 예측을 연구하였다. Mines[6]는 다양한 폴리에스테르 적층판에 대해서 세 가지 형상의 충격체를 이용해 정적압입과 고속충격 실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Ulven[7]은 Carbon/Epoxy 복합재 적층판에 세 가지 형상의 충격체를 이용해 고속충격 실험을 하고, 그 결과를 준실험식과 비교하였다. Wen[8]은 FRP 적층판에 대해서 충격체의 형상에 따른 탄도한계속도를 고속충격 실험과 준실험식을 이용해 비교하였다. 본 논문에서는 효율적으로 복합재 적층판의 관통속도를 예측하기 위해 두께가 얇은 복합재 적층판 시편에 대한 정적압입 관통실험 및 고속충격 실험을 수행하여 관통에너지를 비교하였다. 또한 실험결과를 이용해 준실험식을 만들어 두께가 두꺼운 복합재 적층판의 탄도한계속도를 예측해 보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 준정적 관통 에너지 실험식

Wen과 Jones는 복합재 평판이 관통할 때까지 준정적 하중을 가했을 때 흡수된 에너지를 두 가지로 구분했다. 한 가지는 국부적인 변형에 의한 흡수에너지( $E_i$ ), 다른 한 가지는 복합재의 전체적인 변형에 의해 발산된 에너지( $E_g$ )로 정의했다.

$$E_f = E_i + E_g \quad (1)$$

여기서,  $E_f$ 는 복합재 평판이 관통될 때 까지 흡수된 에너지이다.

끝이 반구형인 압입체로 복합재 평판에 하중을 가하는 경

우  $E_i$ 은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$E_i = \frac{\pi d^2 T \sigma_u \epsilon_f}{8} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_u$ 는 복합재 평판의 파손응력(failure stress),  $\epsilon_f$ 는 복합재 평판의 인장 파단 변형률(fracture strain),  $d$ 는 압입체의 지름, 그리고  $T$ 는 복합재 적층판의 두께를 의미한다.

전체적인 변형에 의해 생성되는 에너지( $E_g$ )는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_g}{\sigma_u d^3} = A \left( \frac{D}{d} \right)^{\beta_1} \left( \frac{T}{d} \right)^{\beta_2} \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 시편 유효면적의 지름,  $A$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 는 실험에 의해 정해지는 상수를 의미한다.

식 (2)와 (3)을 식 (1)에 대입하면 관통 에너지( $E_f$ )를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_f}{\sigma_u d^3} = \frac{\pi \epsilon_f}{8} \left( \frac{T}{d} \right) + A \left( \frac{D}{d} \right)^{\beta_1} \left( \frac{T}{d} \right)^{\beta_2} \quad (4)$$

실험적인 경험을 바탕으로 충격체에 의한 관통에너지( $E_{pi}$ )는 다음과 같이 정의 한다.

$$E_{pi} = \phi E_f \quad (5)$$

$\phi$ 는 동적강화계수(dynamic enhancement factor)로 정적압입 에너지와 고속충격 에너지의 비이다.

충격체의 임계 운동 에너지와  $E_{pi}$ 가 같다고 가정 했을 때 충격체가 복합재 적층판을 관통하는 탄도한계속도( $V_b$ )에 대한 식을 얻을 수 있다[3].

$$V_b = \sqrt{\frac{2E_{pi}}{m}} \quad (6)$$

### 2.2 응력과 충격 실험식

식 (7)과 같이 복합재 평판에 수직으로 작용하는 평균압력( $\sigma$ )은 적층물질의 탄성-소성 변형에 의한 응집 정적 저항력(cohesive static resistive pressure,  $\sigma_s$ )과 속도의 영향에 의한 동적 저항력(dynamic resistive pressure,  $\sigma_d$ )으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d \quad (7)$$

$\sigma_s$ 는 적층판의 두께방향의 압축에 대한 선형탄성한계응력 ( $\sigma_e$ )와 같고,  $\sigma_d$ 는 식 (8)과 같이  $(\rho_t/\sigma_e)^{1/2} V_i$ 의 함수이다 [3]. 이 식을 식 (7)에 대입하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\sigma_d = \Gamma \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} V_i \sigma_e \tag{8}$$

$$\sigma = \left[ 1 + \Gamma \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} V_i \right] \sigma_e \tag{9}$$

$\rho_t$ 와  $V_i$ 는 각 복합재 적층판의 밀도와 충격체의 초기 속도이다.  $\Gamma$ 는 충격체의 형상에 따라 달라진다. 적층판의 탄도한계속도( $V_b$ )는 식 (9)와 에너지를 고려하여 다음과 같이 예측할 수 있다[3].

$$V_b = \frac{\pi \Gamma \sqrt{\rho_t} \sigma_e d^2 T}{4m} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{8m}{\pi \Gamma^2 \rho_t d^2 T}} \right] \tag{10}$$

### 3. 정적압입 관통실험 및 고속충격 실험

#### 3.1 실험방법 및 목적

정적압입 실험의 경우 전체적인 변형과 국부적인 변형 및 파괴가 동시에 일어나게 되고, 고속충격 실험은 국부적인 부분에서만 파손이 일어나게 된다. 정적압입 관통실험을 이용해서 고속충격 거동을 나타내기 위하여 Fig. 1과 같이 시편의 유효면적의 지름(D)과 압입체 지름(d)의 비인 D/d를 3, 4, 5인 경우로 나누어 정적압입 및 고속충격 실험을 수행하였다.

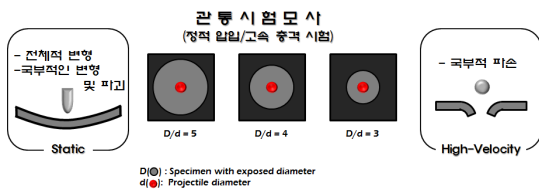


Fig. 1 Different exposed diameter of specimens.

본 논문에서는 앞서 언급한 두 가지 실험적 방법과 경험식을 이용한 예측 방법의 결과를 비교하였다.

#### 3.2 시편제한

실험에 사용된 시편은 Carbon/Epoxy 프리프레그(USN 150B, SK chemical)를 사용하였으며 물성치는 Table 1과 같다. 시편은 [45/0/-45/90]<sub>2S</sub>, [45/0/-45/90]<sub>3S</sub>, [45/0/-45/90]<sub>4S</sub> 세 종류로 크기는 동일하고 적층수가 다른 시편을 사용하였고, 2S, 3S, 4S 적층

Table 1 Material properties of Ca/Ep [0<sub>n</sub>] unidirectional prepreg

Property	Symbol	Unit	Value
Young's modulus along the fiber direction	E <sub>11</sub>	GPa	129.1
Young's modulus along the transverse direction	E <sub>22</sub>	GPa	8.1
Axial shear modulus	G <sub>12</sub>	GPa	3.6
Axial Poisson's ratio	$\nu_{12}$		0.28
Thickness	h	mm	0.125

Table 2 Material properties of Ca/Ep laminate([45/0/-45/90]<sub>2S</sub>)

Property	Symbol	Unit	Value
Young's modulus	E	GPa	48
Poisson's ratio	$\nu_{12}$		0.35
Failure stress	$\sigma_u$	MPa	770
Static linear elastic limit in through-thickness compression	$\sigma_e$	MPa	125
Fracture strain	$\epsilon_f$	%	1.63
Density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1580

시편이라고 간략히 정의하였다. 시편의 크기는 87.5mm×87.5mm이며, 두께는 각각 2.3mm, 3.4mm, 4.6mm이다. 준실험식에 사용하기 위한 [45/0/-45/90]<sub>2S</sub> 적층판에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 경계 조건은 고정지그에 의해 완전 고정된 형태이다.

#### 3.3 정적압입 관통실험

본 논문에서 사용된 정적압입 관통실험 장치는 INSTRON 사의 10톤 용량 만능시험기를 이용하였다. 시편을 장치 아래쪽 지그에 고정하고 장치 위쪽의 압입체가 내려오면서 하중이 작용하는 방식으로 실험을 수행하였다. 고정지그는 정사각형 시편의 가장자리를 완전히 고정하며 시편의 중심으로부터 원형의 유효면적 부분이 노출되는 형상이다. 시편의 유효면적은 3종류로 나누어 실험하였으며 Fig. 2와 같이 각각의 유효면적에 따른 지그를 설계하였다.

Fig. 3과 같이 실험장치 위쪽에 부착된 압입체는 지름 6.35mm의 강철재질의 반구형이며, 압입체가 하강하면서 시편의 중심에 하중을 가한다. 이때 압입체는 변위제어 방식을 이용하였고, 변위 속도는 2.5mm/min이다.

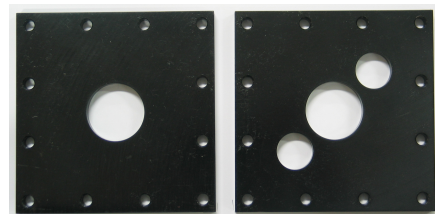


Fig. 2 Static perforation test jig(D/d=5).



Fig. 3 Hemispherical indenter.

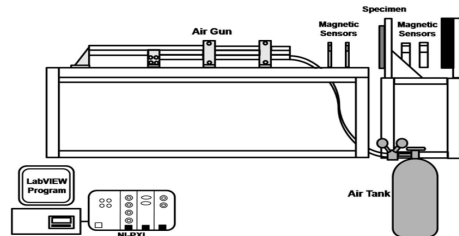


Fig. 5 Schematic diagram of the pneumatic gun facility.

Table 3 Static perforation test matrix

Lay up	D/d	Exposed diameter of specimen(mm)	Indenter diameter(mm)
2S	3	19.05	6.35
	4	25.40	
	5	31.75	
3S	3	19.05	6.35
	4	25.40	
	5	31.75	
4S	3	19.05	6.35
	4	25.40	
	5	31.75	

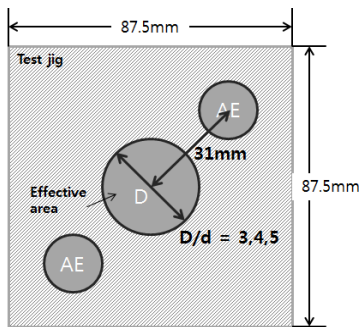


Fig. 4 Schematics of specimen.

실험은 Table 3에 나타난 경우의 수에 대해 3회 반복실험을 수행 하였고, 두 개의 음향방출(acoustic emission)센서를 Fig. 4와 같이 압입지점으로부터 31mm 떨어진 곳에 부착한 후 관통실험 중 시편이 파괴되면서 발생하는 음파를 측정하였다.

### 3.4 고속충격 실험

고속충격 실험장치는 Fig. 5와 같이 2개의 압축 공기탱크, 총관, 4개의 속도 마그네틱 센서, 강구(steel ball), 시편 지그 및 신호취득시스템(DAQ system)으로 구성되어 있다. 압축 공기탱크에서 원하는 강구속도를 얻기 위해 총관에 연결된 소형 공기탱크에서 압축공기를 보내고 강구를 총관에 넣은 후 압축공기탱크를 열어 발사된다. 충격용 강구의 지름은 6.35mm로 정적압입 관통실험과 동일한 지름을 가지며 무게는 1.044g이다.

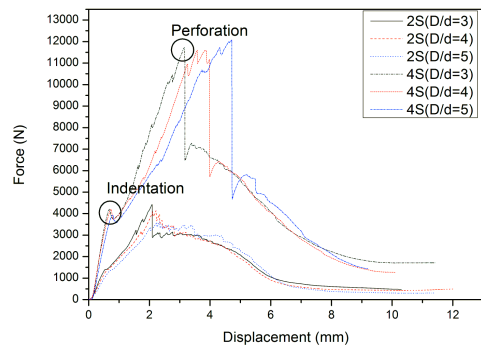


Fig. 6 Force-displacement curve of each specimen.

고속충격실험에 사용된 시편은 정적압입 관통실험에 사용된 시편과 동일한 재질과 크기의 시편을 사용하였다. 경계조건도 정적압입 관통실험과 동일한 완전고정지지이며 정적압입 관통실험에서 수행한 관통에너지의 50%~100%의 크기로 실험을 수행하였다. Table 3에 정리한 실험 조건에 대하여 3번 이상 반복 실험을 수행하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 정적압입 관통실험 결과

정적압입 관통실험을 수행하면서 취득한 하중-변위 그래프는 Fig. 6과 같다. 2S와 4S인 적층 시편에 대한 결과를 함께 도시하였다. D/d가 커질수록 최대하중이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 하중 신호는 급격히 증가하다가 시편의 표면이 파괴 되었을 때 약간 줄어드는 것을 확인 하였으며, 최대하중 지점에 도달할 때까지 층간 분리 및 파손이 일어나다가 완전히 관통 됐을 때 하중이 급격히 줄어드는 것을 확인 하였다. 그리고 관통이 되고난 후에도 잔여하중이 남아 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 압입체가 시편을 통과하면서 발생하는 마찰력에 의한 것으로 판단된다. 그리고 적층수가 많아질수록 최대 관통하중이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 동일한 적층수에서는 시편의 유효면적이 작을 경우 최대하중이 높게 측정되지만, 최대하중이 급격히 떨어지는 지점은 낮은 변위 지점에서 발생

**Table 4 Comparison of perforation energy for specimen with different exposed diameters(high velocity impact tests)**

Lay up	D/d	$V_i$ (m/s)	$E_i$ (J)	$V_r$ (m/s)	$E_{pe}$ (J)	$E_{qp}$ (J)
2S	3	159	13.20	24.00	12.90	12.2
		185	17.87	93.04	13.35	
	4	167	14.56	26.82	14.18	12.7
		184	17.67	86.36	13.78	
	5	173	15.62	26.51	15.26	12.8
		182	17.29	61.49	15.32	
3S	3	207	22.37	박힘	-	22.7
		216	24.35	19.44	24.16	
		242	30.57	104.42	24.88	
	4	223	25.96	34.83	25.33	23.5
		229	27.37	35.62	26.71	
		240	30.07	48.49	27.62	
	5	231	27.85	27.23	27.47	23.9
		245	31.33	75.31	28.37	
		275	39.49	78.53	36.27	
4S	3	273	39.02	76.48	35.96	33.3
		278	40.38	96.77	35.49	
		275	39.64	44.48	38.61	
	4	270	38.31	43.79	37.31	34.1
		275	39.54	박힘	-	
		297	46.11	94.61	40.73	

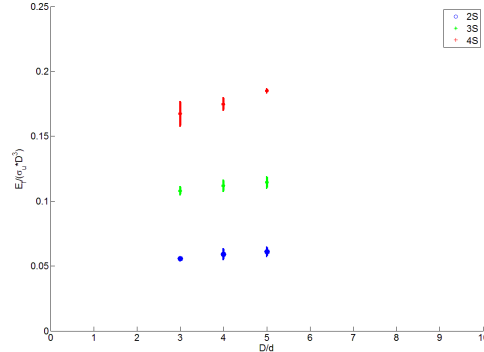
\*  $V_i$  : impact velocity  
 $E_i$  : impact energy  
 $V_r$  : residual velocity  
 $E_{pe}$  : penetration energy  
 $E_{qp}$  : quasi-static perforation energy

하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유효면적이 작을수록 시편의 굽힘 변형이 작게 일어나기 때문으로 생각된다.

Fig. 6의 하중-변위 그래프를 적분하면 정적압입에 의한 관통 에너지를 계산할 수 있다. 하지만 마찰에 의한 영향 등이 포함되어 있기 때문에 정확한 관통 에너지를 구하기 위해 세 가지 방법을 이용해 관통에너지를 확인한 바 있다[9]. 그 중에서 가장 일관성 있는 관통된 시편에 다시 관통 실험을 수행했을 때 최대 하중지점을 관통지점으로 예측하는 방법을 이용해서 관통에너지를 구하였고, 그 결과를 고속충격 실험 결과와 함께 Table 4에 정리하였다.

**4.2 고속충격 실험 결과**

고속충격 실험의 경우 충격체와 시편 사이에서 발생하는 하중을 측정하는 것이 어렵기 때문에 충격 전후의 속도를 측정해서 충격 에너지와 관통 에너지를 구하였다. 관통 에너지는 관통 전/후의 운동에너지 차이로 정의한다. Table 4는 고속충격 실험 결과로 정적압입과 마찬가지로 D/d가 커질수록 고속충격 실험에서 관통에 필요한 에너지가 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 실험에서 사용된 유효면적이 고속충격에 의한 손상 영역보다 작기 때문에 경계조건의 영향이 미치기 때문으로 판단된다.



**Fig. 7 Non-dimensional perforation energy along with D/d using quasi-static perforation test.**

**Table 5 Calculated constant using quasi-static perforation test**

	[45/0/-45/90] <sub>2S</sub>	[45/0/-45/90] <sub>3S</sub>	[45/0/-45/90] <sub>4S</sub>
A	0.2587	0.2449	0.2261
$\beta_1$	0.0956	0.1097	0.1448
$\beta_2$	1.5107	1.4401	1.4175

**4.3 정적압입 관통 실험식을 이용한 속도 예측**

정적압입 관통 실험에서 구한 압입에너지와 재료의 물성치를 이용해서 정적압입 관통 실험식을 완성시킬 수 있다. 식 (4)의 왼쪽 항에 있는  $E_f$ 에 실험에서 구한 압입 에너지를 대입하고,  $\sigma_u$ 와 d에 각각 적층판의 파단응력과 압입체 지름을 대입했을 때 무차원화 시킨 압입 에너지를 구할 수 있다. Fig. 7에 2S, 3S, 4S인 적층 시편에 대한 정적압입 관통실험의 압입에너지를 무차원화 한 결과를 도시하였다. 식 (4)의 오른쪽 항에서 실험을 이용해 구해야 하는 상수들(A,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ )을 구하기 위해 무차원화된 압입에너지를 이용하였다.

MATLAB에서 제공하는 최적화 알고리즘을 이용하여 계산된 상수(constant)들을 Table 5에 정리하였다.

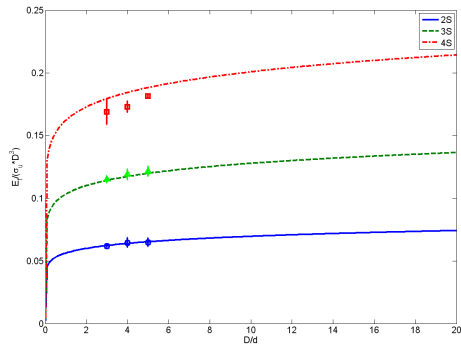
Fig. 8은 앞서 구한 상수를 대입하여 무차원화된 압입에너지 예측식을 완성시키고 D/d에 따라 도시한 것이다. D/d가 커질수록 무차원화 된 관통에너지의 증가율이 감소하는 것을 확인하였다.

정적압입 관통 실험식을 이용해 탄도한계속도를 예측하기 위해서는 동적강화계수( $\phi$ )를 선정해야 한다. 이것은 정적압입 관통 에너지와 고속충격 관통 에너지의 비를 이용해서 구할 수 있다.

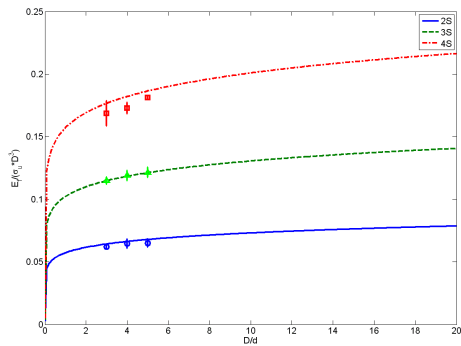
Table 6은 두 종류의 시편에 대한 정적압입 관통 에너지와 고속충격 관통 에너지의 비를 나타낸 것이다.

동적강화계수는 D/d가 커질수록 다소 증가하는 확인 할 수 있었다. 그러므로 동적강화계수는 6개 결과의 평균인 1.115를 사용해서 고속충격에 의한 관통속도 결과와 비교하였다.

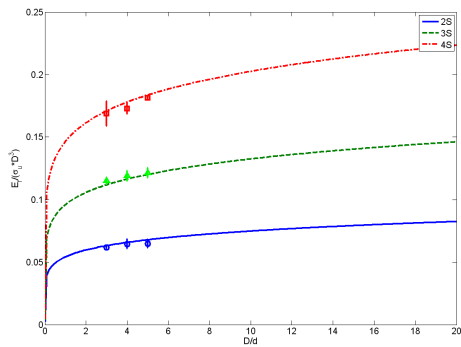
Fig. 9는 시편의 두께(2S, 3S)에 따른 탄도한계속도 예측 결과로, 동적강화계수를 적용한 정적압입 관통 실험식을 이용해 탄도한계속도를 예측한 그래프와 고속충격 실험결과를 함께 도시하였다.



(a) [45/0/-45/90]<sub>2s</sub>



(b) [45/0/-45/90]<sub>3s</sub>

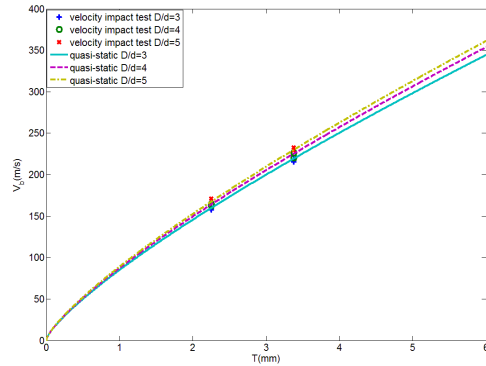


(c) [45/0/-45/90]<sub>4s</sub>

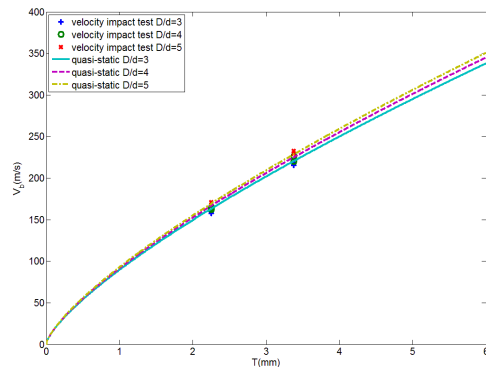
Fig. 8 Comparison of non-dimensional perforation energy.

Table 6 Comparison of dynamic enhancement factor using quasi-static perforation and high velocity impact energy

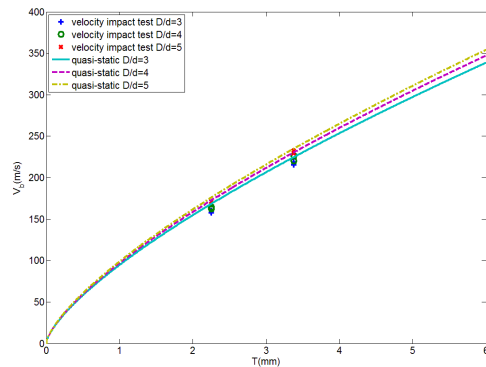
Lay up	D/d	Quasi-static	High-velocity	$\phi$
		Perforation Energy (J)		
2S	3	12.2	13.13	1.076
	4	12.7	13.98	1.101
	5	12.8	15.29	1.195
3S	3	22.7	24.52	1.080
	4	23.5	26.55	1.130
	5	23.9	27.92	1.168



(a) With constant calculated by [45/0/-45/90]<sub>2s</sub> specimen



(b) With constant calculated by [45/0/-45/90]<sub>3s</sub> specimen



(c) With constant calculated by [45/0/-45/90]<sub>4s</sub> specimen

Fig. 9 Predicted ballistic limit-thickness curve of specimen (quasi-static perforation empirical formula)

Fig. 9의 오차를 Table 7에 정리하였다. 시편 종류에 맞는 상수를 이용하여 예측한 경우 실험과 오차가 가장 작은 것을 알 수 있었고, 동일한 상수를 모든 종류의 시편에 적용한다면, 4S 적층 시편을 이용하여 구한 상수를 이용하는 것이 오차를 최소화 할 수 있을 것이다.

Table 8은 [45/0/-45/90]<sub>2S</sub> 시편의 정적압입 실험 결과로 계산한 상수를 이용하여 예측한 결과와 [45/0/-45/90]<sub>4S</sub> 시편의 고속충격 실험 결과와 비교한 것이다. 이는 얇은 시편의 정적압입 실험 결과를 가지고 두꺼운 시편의 탄도한계속도 예측 가능성을 알아보기 위한 것이다. 예측한 탄도한계속도가 고속충격 실험과 비교했을 때 3~5% 정도 크게 예측되는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 7 Comparison of ballistic limit error with different specimen constants

Lay up	D/d	Constant calculated by [45/0/-45/90] <sub>2S</sub> specimen(%)	Constant calculated by [45/0/-45/90] <sub>3S</sub> specimen(%)	Constant calculated by [45/0/-45/90] <sub>4S</sub> specimen(%)
2S	3	2.05	3.73	2.84
	4	0.22	2.07	1.69
	5	-3.18	-1.24	-1.24
3S	3	1.47	1.67	0.34
	4	-1.22	-0.79	-1.60
	5	-2.67	-2.09	-2.53
4S	3	3.70	2.93	1.26
	4	2.29	1.73	0.58
	5	-0.22	-0.61	-1.36

Table 8 Comparison with prediction by quasi-static perforation formula of thin specimen and high velocity impact test of thick specimen

D/d	Predicted ballistic limit (m/s)	Tested ballistic limit (m/s)	Error (%)
3	275.11	261.87	4.8
4	282.13	266.82	5.4
5	288.10	279.52	3.0

4.4 응력과 충격 실험식을 이용한 속도 예측

응력과 충격 실험식은 구속조건 경계의 지름(D)과 충격체 지름(d)의 비가 적용되지 않는 준실험식이다. 식 (9)에서 언급된 형상 계수(I)는 원기둥형의 경우 2.0, 반구형은 1.5, 원뿔형의 경우 2sin(원뿔각도/2)를 사용한다[3]. 본 논문에서는 끝단의 형상이 반구형인 충격체를 사용하였기 때문에 1.5를 사용하였고, ρ<sub>t</sub>와 σ<sub>c</sub>는 Table 2의 적층판 물성치를 사용하였다. Fig. 10은 시편의 두께에 따른 응력과 충격 실험식을 이용한 탄도한계속도 예측 그래프이다. 실제 실험이 응력과 충격식보다 낮은 속도에서 관통이 되는 이유는 고속충격 실험에서 경계조건이 관통에 영향을 주었기 때문이다.

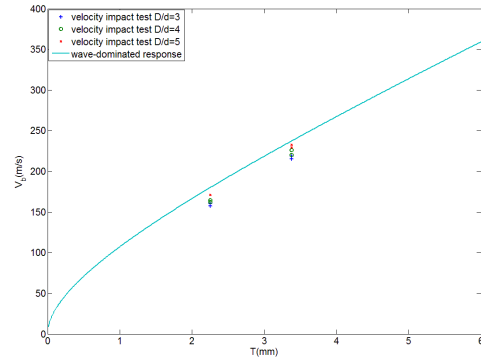


Fig. 10 Predicted ballistic limit-thickness curve of specimen (wave dominated response empirical formula)

5. 결론

본 논문에서는 정적압입 관통실험을 통해 고속충격 거동을 모사하고, 정적압입 관통 실험식과 응력과 충격 실험식을 이용해서 복합재 적층판의 탄도한계속도를 예측해 보았다.

정적압입 관통실험과 고속충격 실험을 통해 구한 복합재 시편의 관통 에너지의 비를 이용해서 동적강화 계수를 구할 수 있었고, 동적강화 계수를 적용한 정적압입 관통 실험식을 이용했을 때 유효면적이 정해져 있는 상태에서 두께가 두꺼운 시편에 대해 3~6% 오차 안에서 고속충격에서의 탄도한계속도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구에서는 국방과학연구소의 지원으로 수행 되었습니다. (과제번호 : 10-01-08-17)

참고문헌

- 1) Abrate, S., "Impact on Lamina Composite Materials," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44 No. 4 , 1991, pp. 155-190.
- 2) Ruiz, C., and Harding, J., *Modelling Impact of Composite Structures Using Small Specimens in Impact Behaviour of Fiber-reinforced Composite materials and Structures*, Woodhead Publishing Ltd., 2000.
- 3) Reid, S.R., and Wen, H.M., *Impact Behaviour of Fiber-reinforced Composite Materials and Structures*, CRC Press, 2000, pp. 237-279.
- 4) Sun, C.T., and Potti, S.V., "A Simple 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. 339-353.
- 5) Potti, S.V., and Sun, C.T., "Prediction of Impact Induced Penetration and Delamination in Thick Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 31-48.
- 6) 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, No. 6, 1999, pp. 561-588.
- 7) Ulven, C., Vaidya, U.K., Hosur, M.V., "Effect of Projectile Shape During Ballistic Perforation of VARTM Carbon/Epoxy Composite Panels," *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1-2, 2003, pp. 143-150.
- 8) Wen, H.M., "Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles with Different Nose Shapes," *Composite Structures*, Vol. 49, No. 3, 2000, pp. 321-329.
- 9) 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*, Vol. 25, No. 5, 2012, pp. 147-153.