

論文

정적압입 관통실험을 이용한 복합재 적층판의 고속충격 관통에너지 예측

유원영*, 이석제*, 김인걸**, 김종현***

Prediction of the Penetration Energy for Composite Laminates Subjected to High-velocity Impact Using the Static Perforation Test

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

ABSTRACT

In this paper, static perforation tests are conducted to predict the penetration energy for the composite laminates subjected to high velocity impact. Three methods are used to analyze the perforation energy accurately. The first method is to select the perforation point using the AE sensor signal energy, the second method is to retest the tested specimen and use the difference between initial and retested perforation energy, and the third method is to select the perforation point based on the maximum loading point in the retested load-displacement curve of the tested specimen. The predicted perforation energy results are presented and verified by comparing with those by the high velocity tests.

초 록

본 논문에서는 복합재 적층판의 고속충격 관통에너지를 예측하는 방법 중 하나인 정적압입 관통 실험을 수행하였다. 정적압입 관통 에너지를 정확히 분석하기 위해서 세 가지 방법을 이용하였다. 첫 번째로 AE 센서 신호 변화를 이용해서 압입 관통 지점을 판단하고 관통 에너지를 구하는 방법, 두 번째는 관통된 시편에 다시 관통실험을 수행하여 두 에너지 차를 이용해서 구하는 방법, 세 번째는 재수행한 관통실험의 하중-변위 그래프에서 최대하중지점을 압입 관통 지점으로 판단하고 에너지를 구하는 방법이다. 위 방법들에 의한 관통에너지 예측 결과를 제시하였고 고속충격 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

Key Words : 정적압입 관통 실험(static perforation test), 복합재 적층판(composite laminates), 관통에너지(perforation energy), 음향방출 신호(AE signal), 유효면적(effective area), 고속충격(high-velocity impact)

1. 서론

복합재료는 일반 금속재료에 비해 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)이 우수하고 필요에 따라 제작시 강성과 강도의 조절이 가능하다는 특징이 있어 다양한 분야에서 이용되고 있다. 특히 항공우주용 비행체의 경우 성능 향상에 있어 구조물의 경량화가 중요한 요인이기 때문에 구조물의 경량화에 효율적인 복합재 구조물의 사용이 날로 증대

되고 있다.

그러나 고속비행 항공기의 경우 비행 중 조류 충돌, 부서진 엔진의 팬 블레이드 또는 우박 등에 의해 고속충격 손상이 일어날 수 있다. 복합재료는 연성이 좋은 일반 금속재료와는 다르게 탄성변형 에너지를 초과하는 하중을 받게 되면 소성단계 없이 곧바로 손상이 발생하게 되며, 다양한 손상모드를 가지고 있어서 정확한 예측이 쉽지 않다. 그러므로 내부 및 외부 손상에 의해 기계적 특성이 갑자기 저하되는 복

접수: 2012년 5월 30일, 수정: 2012년 9월 21일, 게재승인: 2012년 9월 25일

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

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

*** 국방과학연구소

합재료의 충격거동에 대한 명확한 규명을 필요로 하게 된다.

복합재료의 고속충격거동 특성을 알아보기 위한 방법으로 고속충격 실험, 정적압입 관통실험, 유한요소 해석법, 그리고 준실험식을 이용하는 방법이 있다[1-3]. 고속충격 실험의 경우, 복합재료의 두께가 두꺼워 질수록 시간, 비용, 위험성이 증가하고 취득할 수 있는 데이터에 제한이 있다는 단점이 있다[4-8]. 정적압입 관통실험은 고속충격 실험에 비해 경제적이고 안전하며, 보다 다양한 데이터를 취득할 수 있다[9,10]. 그러나 실제 고속충격에 의한 거동을 근접하게 모사할 수 있는 메커니즘 구현이 요구된다. 유한요소법은 변수 및 형상 변화가 용이하여 다양한 해석이 가능하지만 실제 충격실험 결과와의 비교를 통한 해석모델의 수정보완이 요구된다. 준실험식을 이용한 방법은 변수에 따른 민감도 연구에 용이하다.

복합재료의 고속충격 거동 연구의 한 방법으로 정적압입 관통 실험을 이용하는 방법들이 활발히 연구되고 있다. 유효면적을 조절해 가며 정적압입 관통 실험과 고속충격 실험을 수행하고, 이를 준 실험식으로 만들어 복합재의 고속충격을 예측하는 방법[1]과, woven glass 복합재의 유효면적을 조절해 가며 정적압입 관통 실험을 수행하고, 시편내부에서 일어나는 현상을 관찰하고 유한요소법과 비교하는 방법이 연구되었다[9].

본 논문에서는 효과적으로 고속충격 관통속도를 예측하기 위해 정적압입 관통 실험을 수행하여 관통 에너지를 측정하고, 고속충격 실험 결과와 비교분석 하였다. 정적압입 관통 에너지는 실험결과에 의한 하중-변위 그래프를 적분하여 구할 수 있는데, 시편과 압입체와의 마찰 때문에 실제 관통 에너지보다 더 큰 에너지에서 관통이 되고, 이로 인해 정확한 관통 에너지를 측정하는데 많은 어려움이 따르게 된다. 정적압입 관통실험에서 정확한 관통 에너지를 구하기 위해 AE 센서를 이용하는 방법과 관통실험을 수행한 시편에 한 번 더 관통실험을 하는 방법을 이용해서 관통에너지를 측정하고 결과를 비교, 분석하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 정적압입 실험장치

본 논문에서 사용된 관통실험 장치는 Fig. 1과 같이 INSTRON사의 만능시험기 5882 모델을 이용하였다. 시편을 지그에 고정하고 cross head에 장착된 압입체를 변위 제어하여 하중을 가하는 방식으로 실험을 진행하였다. 고정 지그는 직사각형인 시편의 가장자리를 완전 고정하며 시편의 중심으로부터 원형의 유효면적 부분이 노출되는 형상이다. 압입체의 지름에 대한 유효면적 지름을 3종류로 나누어 실험하였으며 Fig. 2와 같이 각각의 유효면적에 따른 지그를 설계하였다.



Fig. 1 Static perforation test setup.

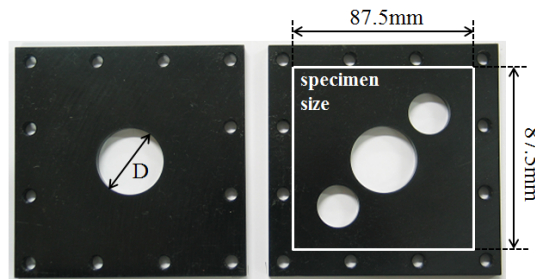


Fig. 2 Static perforation test jig(D=31.75).

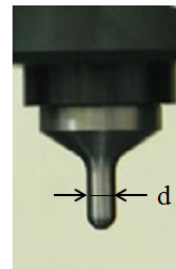


Fig. 3 Hemispherical indenter.

실험 장치 위쪽에 부착된 압입체는 Fig. 3과 같은 형상으로 지름(d) 6.35mm의 강철재질의 반구형이며 압입체가 하강하면서 시편의 중심에 하중이 작용하여 압입 하중을 발생시키게 된다. 이 때 변위 속도는 2.5mm/min이다.

2.2 시편 제원

실험에 사용된 시편은 Carbon/Epoxy 프리프레그(USN 150B, SK 케미칼 제조)를 사용 하였으며 물성치는 Table 1과 같다. 시편은 [45/0/-45/90]_{2s}, [45/0/-45/90]_{3s}, [45/0/-45/90]_{4s}, 세 종류로 적층각은 동일하고 적층수가 다른 시편을 사용하였다. 시편의 크기는 약 87.5mm × 87.5mm이며, 두께는 각각 2.3mm, 3.4mm, 4.6mm이다. 경계 조건은 고정지그에 완전고정 형태로 고정된다. Table 2와 같이 시편은 유효면적의 지름(D)과 압입체 지름(d)의 비율인 D/d에 따라 세 종류의 유효면적을 가지며, 그 지름은 각각 19.05mm, 25.4mm, 31.75mm이다.

Table 1 Material properties of unidirectional Ca/Ep prepreg(USN 150B, SK Chemicals)

	Symbol	Unit	Value
Young's modulus along the fiber direction	E_{11}	GPa	129.1
Young's modulus along the transverse direction	E_{22}	GPa	8.1
Axial shear modulus	G_{12}	GPa	3.6
Axial Poisson's ratio	ν_{12}		0.28
Thickness	h	mm	0.125

Table 2 Static perforation test matrix

Lay up	D/d	Specimen with exposed diameter(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	

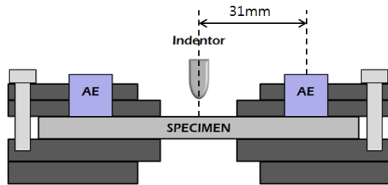


Fig. 4 Schematics of static perforation test.

2.3 정적압입 실험

각 실험 경우의 수에 대해 3회의 반복 실험을 수행하였다. 시편은 고정지그에 완전고정 형태로 고정되고, 압입체와 유효면적의 비율인 D/d에 따라 세 종류의 유효면적을 가진다. 음향방출 센서는 UT-1000과 R-15 두 가지를 사용하였고, Fig. 4와 같이 압입지점으로부터 31mm 떨어진 곳에 부착되었다.

2.4 고속충격 실험

고속충격 실험 장치는 Fig. 5와 같이 2개의 압축 공기탱크, 총관, 4개의 마그네틱 센서, 강구, 시편 지그 및 신호취득 시스템으로 구성되어 있다. 충격용 강구의 지름은 6.35mm로 정적압입 실험과 동일한 지름을 가지며 무게는 1.044gr이다. 마찬가지로 고속충격 실험에 사용된 시편 및 구속조건도 정적압입 실험과 같으며, 실험 횟수는 Table 2에 나타난 경우의 수에 대해 각 3번 또는 그 이상 실험을 수행하였다.

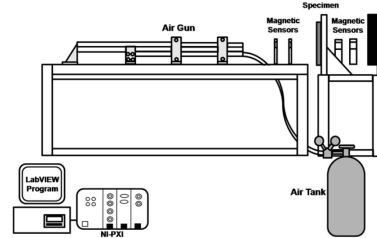


Fig. 5 Schematics of high-velocity impact test.

2.5 동적강화 계수

본 논문에서는 정적압입 관통 에너지와 고속충격 관통 에너지의 상관관계를 알아보기 위해 동적강화계수(ϕ)를 적용하였다. 정적압입 관통 실험에서 끝이 반구형인 압입체로 인한 관통에너지를 E_f 라 정의 하면, 이를 무차원화 한 계산식은 식 (1)과 같다[1].

$$\frac{E_f}{\sigma_u d^3} = \frac{\pi \epsilon_f}{8} \left(\frac{T}{d}\right) + A \left(\frac{D}{d}\right)^{\beta_1} \left(\frac{T}{d}\right)^{\beta_2} \tag{1}$$

여기서 σ_u 는 적층판의 파손응력, ϵ_f 는 인장하중에서의 파단변형률, d 는 압입체의 지름, T 는 적층판의 두께, D 는 구속조건 경계의 지름을 의미한다. 그리고 A , β_1 , β_2 는 실험적으로 구해지는 상수이다.

고속충격 실험에서 충격체가 복합재 평판에서 관통될 때 흡수된 관통 에너지를 E_{pi} 라고 정의 했을 때, 동적강화계수를 적용한 관통에너지를 식 (2)와 같이 정의 할 수 있다[1].

$$E_{pi} = \phi E_f \tag{2}$$

본 논문에서는 E_f 를 실험적으로 정확히 측정하기 위해 세 가지 방법을 이용하여 정적압입 하중-변위 선도에서의 관통 지점을 선정하였다. 첫 번째는 시간에 따라 검출된 AE 신호를 에너지로 변환한 후 AE 신호 에너지가 급격히 줄어드는 지점, 두 번째는 관통된 시편에 다시 관통실험을 수행한 후 두 에너지의 차를 이용해 관통 에너지를 예측하는 방법, 그리고 세 번째는 관통된 시편에 다시 관통 실험을 수행했을 때 최대 하중 지점을 관통 지점으로 예측하는 것이다. 이를 바탕으로 계산된 에너지(E_f)와 고속충격에 의한 관통에너지(E_{pi})와의 비인 동적강화계수(ϕ) 이용하여 제시한 방법의 타당성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정적압입 하중-변위 비교

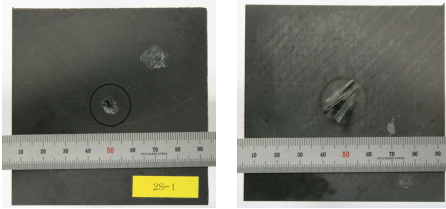


Fig. 6 Specimen configuration after static perforation test(2S).

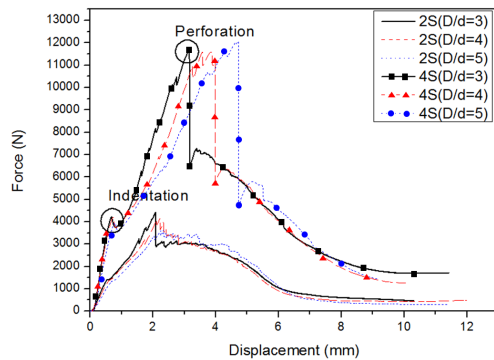


Fig. 7 Force-displacement curve of each specimen.

음향방출 신호의 해석은 크게 음향방출 신호의 과다로 표현되는 활성도(activity) 및 신호의 모양과 관련된 파형분석에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 음향방출 활성도에 의한 방법은 음향방출원의 크기 및 빈도수와 직접적 관계가 있는 event 수, count, 최대진폭 및 에너지 등의 변수를 평가하는 것이다[11].

본 논문에서는 음향 방출 활성도에 의한 방법으로 시간에 따른 AE 신호 에너지를 이용해서 정적압입 관통실험에서 관통시점을 예측해 보았다.

정적압입 관통실험 후 시편의 손상 형상을 보면 Fig. 6에서와 같이 시편의 앞쪽은 압입체의 지름과 동일한 관통 자국이 있으며 시편의 뒤쪽에는 경계조건 내에서 적층된 방향으로 섬유가 끊어져 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 정적압입 관통실험을 통해 취득한 2S와 4S 시편에 대한 하중-변위 그래프이다. 시편의 D/d가 커질수록 최대하중이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 하중 신호는 시편 표면에 압입이 발생 하였을 때 다소 줄어드는 것을 확인하였으며, 최대하중 지점에 도달할 때까지 층간 분리 및 파손이 일어나다가 관통이 시작되었을 때 하중이 급격히 줄어드는 것을 확인하였다. 그리고 관통이 되고 난 후에도 어느 정도 하중을 지지하는 것을 볼 수 있는데, 이는 압입체와 시편 사이에 발생하는 마찰력에 의한 것으로 판단된다. 또한 적층수가 많은 [45/0/-45/90]_{4s} 시편에서 더 큰 최대 하중을 가지는 것을 알 수 있으며, 최대 관통 하중의 수치가 적층 수에 따라 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 두께의 시편에서는 유효면적이 작은 경우가 최대 하중이 높게 측정 되었으며, 최대

하중이 급격히 떨어지는 지점 또한 더 낮은 변위에서 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 그 이유는 유효면적이 작을수록 시편의 급형 변형이 작게 일어나기 때문으로 생각할 수 있다.

3.2 관통에너지 비교

정적압입 관통 실험결과에서 얻은 하중-변위 그래프를 적분한 것을 정적압입 관통 에너지라고 정의한다. 하지만 마찰에 의한 관통에너지도 포함되어 있기 때문에 관통까지의 정확한 관통 에너지를 구하기 위해 2.4절에서 언급된 세 가지 방법을 이용해 관통에너지를 확인해 보았다.

AE 센서가 탄성파, 음파 등 여러 가지 파동이 방출되는 것을 측정하였을 때, 일반적으로 이런 물리현상의 파동이 가지는 에너지는 그 파가 가지는 진폭의 제곱에 비례하며, 진동속도의 제곱에 비례한다. AE 센서로 측정된 신호는 지속 시간에서의 전압 값으로 표시되며, 이전부터 단순히 AE 신호 진폭을 제공한 값을 AE 신호 에너지로 간주하고 있다. 본 논문에서도 아래 식을 이용하여 AE 신호 에너지를 계산하였다. $a(t)$ 는 시간에 따른 AE 신호 값이다[11,12].

$$E_{AE} = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt \quad (3)$$

Fig. 8은 D/d가 3일 때 각 시편 종류에 대한 3번의 반복 실험중 하나의 데이터를 예로 보여주고 있다. 그래프의 범례 중 Test 1은 시편에 정적압입 관통실험을 수행한 것이고, Test 2는 Test 1에서 정적압입 관통실험을 수행 후 관통했던 시편을 다시 압입 실험을 수행한 그래프이다. UT1000은 Test 1에서 정적압입 관통실험 수행 중 측정했던 AE 신호를 에너지로 변환해 시간에 따른 AE 신호 에너지로 나타낸 것이다. 여기서 나타난 AE 신호 에너지의 특징은 압입 하중이 가장 큰 부분에서 AE 신호 에너지도 최대값을 가진다는 것이다. 면내 하중을 주로 지지하는 탄소 섬유들이 파괴 됐을 때 가장 큰 탄성파와 음파를 발생하기 때문인 것으로 생각되며, 그 이후에 생기는 에너지는 마찰과 층간 분리에 의해 생기는 에너지로 생각된다. 관통 후에는 마찰에 의한 AE 신호만 측정되기 때문에 AE 신호 에너지가 급격히 줄어드는 지점이 압입체가 관통되어 나오는 지점으로 판단하였다.

관통된 시편에 다시 실험을 수행한 하중 변위 그래프를 확인해 보면 처음에는 하중이 증가하지 않다가 일정 시간이 지나면 하중이 올라가는데 이는 압입체와 시편사이의 마찰력에 의해 생기는 하중으로 모든 시편에서 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3은 AE 신호 에너지를 이용한 관통 에너지(method 1)와 관통된 시편에 관통 실험을 다시 수행해서 구한 관통 에너지와의 차이(method 2), 관통된 시편에 관통실험을 다시 수행한 하중-변위 그래프의 최대하중 지점까지의 관통에너지(method 3)를 고속충격 실험결과와 비교한 것이다. 여기서

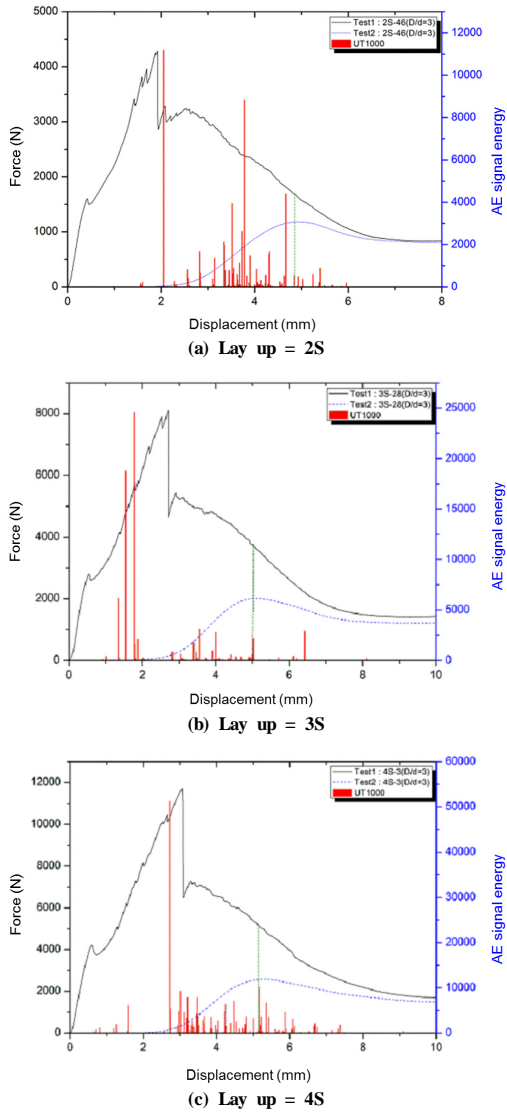


Fig. 8 Force-AE signal energy-displacement curve(D/d=3).

정적압입 관통 에너지는 3회 반복실험에 의한 평균과 표준편차를 나타내었고, 고속충격 관통 에너지는 반복 실험 결과의 평균을 나타낸다. 고속충격 실험의 경우, 하중-변위 선도를 측정하기 어렵기 때문에 충격 전후의 운동에너지 차를 이용하여 관통 에너지를 계산하였다.

관통 에너지만을 이용해서 세 가지 method에 대한 데이터를 비교하기 어렵기 때문에, 정적압입관통 에너지와 고속충격의 관통 에너지 사이에 동적강화계수(dynamic enhancement factor, Φ)라는 개념을 도입해 각 method 별 정적압입 에너지와 고속충격 관통에너지의 비를 계산하였다.

Table 3 Comparison of static perforation energy using three method and high-velocity impact

D/d	Perforation energy(J)				
	Method 1	Method 2	Method 3	High-velocity impact	
2S	3	10.0±3.56	10.9±0.23	12.2±0.02	13.13
	4	12.5±0.85	11.6±0.74	12.7±0.45	13.98
	5	9.8±3.86	12.0±0.65	12.8±0.14	15.29
3S	3	19.5±4.49	20.9±0.57	22.7±0.48	24.52
	4	24.9±2.07	22.0±0.79	23.5±0.55	26.55
	5	23.4±2.19	22.5±0.81	23.9±0.32	27.92
4S	3	34.3±0.76	33.5±1.96	33.3±0.56	35.96
	4	34.7±1.35	34.2±0.88	34.1±0.51	37.96
	5	38.0±3.42	36.4±0.25	35.8±0.71	40.73

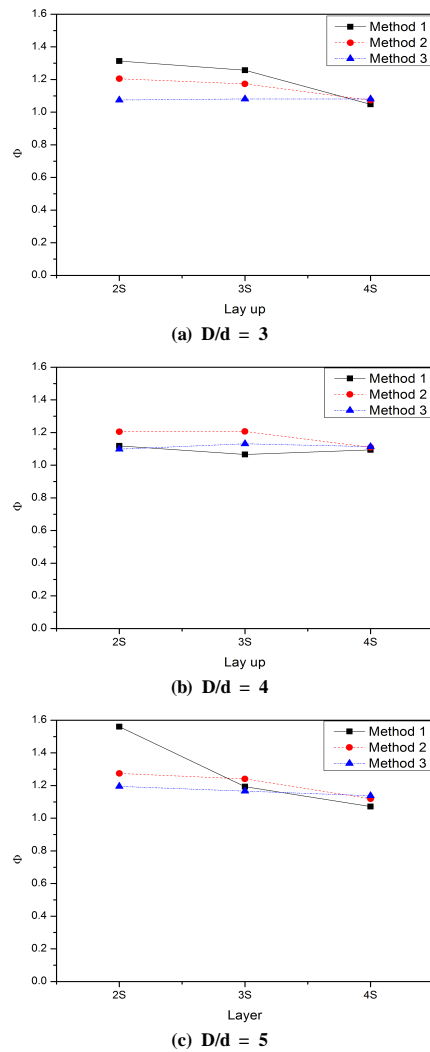


Fig. 9 Changes of Φ by lay up.

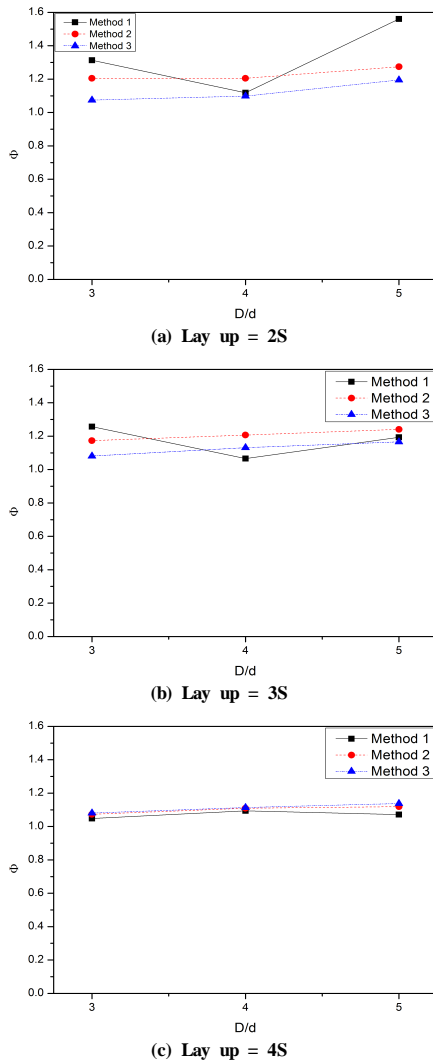


Fig. 10 Changes of ϕ by D/d.

같은 D/d에서 적층수가 변할 때 동적강화계수의 변화과정을 Fig. 9에 도시하였고, 같은 적층 수에서 D/d의 변화에 따른 동적강화계수의 변화과정을 Fig. 10에 도시하였다.

Method 1의 경우 Fig. 9와 10에서 동적강화계수의 변화폭이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다. 그리고 method 2와 method 3을 비교해보면, Fig. 9에서와 같이 method 3을 이용했을 때 적층수의 변화에 의한 동적강화 계수의 변화폭이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 정적압입관통에너지와 고속충격 관통에너지를 비교했을 때 같은 경계조건에서 일정한 비율로 거동이 일어나야 하므로, 동적강화계수의 변화폭이 상대적으로 작은 method 3을 이용한 방법이 정확도가 뛰어난 정적압입 관통에너지를 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 고속충격에 의한 복합재 적층판의 관통에너지를 예측하기 위하여 유효면적과 시편 두께에 따른 정적압입 실험을 수행하고 고속충격 실험 결과와 비교하였다.

정적압입 실험결과를 바탕으로 관통에너지를 구하기 위한 세 가지 방법을 제시하였으며, 그 결과, 관통된 시편에 다시 관통 실험을 수행했을 때 최대 하중지점을 관통 지점으로 판단하는 방법(method 3)을 이용한 경우의 정확도가 가장 우수한 것을 확인 하였다.

상대적으로 저렴하고 안전한 정적압입 실험을 통하여 고속충격 거동의 예측 가능성을 확인하였고, 본 논문의 결과는 실험식을 이용한 관통속도 예측의 기초자료와 충격에 의한 파단 전개 메커니즘 연구에 활용될 예정이다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Reid, S.R. and Wen, H.M., *Impact Behaviour of Fiber-reinforced Composite Materials and Structures*, CRC Press, 2000, pp. 237-279.
- 2) Sun, C.T. and Potti, S.V., "A Simple Model to Predict Residual Velocities of Thick Composite Laminates Subjected to High Velocity Impact," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 18, No. 3, 1996, pp. 339-353.
- 3) Potti, S.V. and Sun, C.T., "Prediction of Impact Induced Penetration and Delamination in Thick Composite Laminates", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 31-48.
- 4) Powell, D., Zohdi, T., and Johnson, G., *Impact and Delamination Failure Characterization of BMS 8-212 Composite Aircraft Material*, Federal Aviation Administration, University of California, 2008.
- 5) Olsson, R., Donadon, M.V., and Falzon, B.G., "Delamination Threshold Load for Dynamic Impact on Plates," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 43, No. 10, 2006, pp. 3124-3141.
- 6) Baucom, J.N. and Zikry, M.A., "Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite System Under Quasi-static Perforation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 18, 2003, pp. 1651-1674.
- 7) Evci, C. and Gülgeç, M., "An Experimental Investigation on the Impact Response of Composite Materials," *Int. J.*

- Impact Eng.*, Vol. 43, 2012, pp. 40-51.
- 8) Xiao, J.R., Gama, B.A., and Gillespie Jr, J.W., "Progressive Damage and Delamination in Plain Weave S-2 Glass/SC-15 Composites Under Quasi-static Punch-shear Loading," *Composite Structures*, Vol. 78, 2007, pp. 182-196.
- 9) Lim, C.T., Shim, V.P.W., and Ng, Y.H., "Finite-element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 28, No. 1, 2003, pp. 13-31.
- 10) (사)일본비파괴검사협회, 음향방출 계측공학, 구미서관, 2008.
- 11) Cho, S.G., Kim, I.G., Lee, S.J., and You, W.Y., "Study on the Damage Characteristics Under the High-Velocity Impact of Composite Laminates Using Various Sensor Signals," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 6, 2011, pp. 49-55.