

저속 충격을 받는 Glass/phenol 복합적층재의 손상 해석

나재연* · 이영신** · 김재훈** · 조정미*** · 박병준***

A Damage Analysis of Glass/phenol Laminated Composite Subjected to Low Velocity Impact

Jae-Yeon Na, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Jung-Mi Cho and Byung-Jun Park

Key Words : Woven fabric laminated composite(직물 복합재료), Low velocity impact(저속 충격), Failure mode(파손 모드), Failure criterion(파손 기준)

ABSTRACT

Traditionally unidirectional laminated composite which are characterized by high specific stiffness and strength were used for structural application. But these composites are highly susceptible to impact damage because of lower transverse tensile strength. The main failure modes of laminated composite are fiber breakage, matrix cracking and delamination for low velocity impact. The modified failure criterions are implemented to predict these failure modes with finite element analysis. Failure behavior of the woven fabric laminated composite which is used in forehead part of subway to lighten weigh has been studied. The new failure criterions are in good agreement with experimental results and can predict the failure behavior of the woven fabric composite plate subjected to low velocity impact more accurately.

1. 서론

전형적인 일방향 복합재료 적층판은 비강도와 비강성과 같은 우수한 기계적 성질에 의하여 구조물에 적용되고 있으나 낮은 횡방향 인장강도에 때문에 충격 하중에 약하다는 단점을 가지고 있다.

저속 충격을 받는 적층판에 대한 파손 모드는 대표적으로 섬유 파손, 기지 파손, 층간 분리로 나눌 수 있다. 적층판이 충격체에 의하여 관통되었을 때 섬유 파손이 주요한 파손 모드인 고속 충격과는 달리 저속 충격인 경우는 기지 파손에 의한 층간 분리가 주요한 파손 모드이다.

저속 충격에 의한 이러한 파손 모드들에 인해

서 구조물이 가지고 있는 강도와 강성을 심각하게 감소시켜 안정성에 영향을 미치며 내부 손상은 가시화되기 힘들기 때문에 적층판의 손상 개시와 성장에 대한 많은 광범위한 연구가 국내외적으로 실험[1~2]과 해석적 방법[3~5]에 의해서 수행되고 있다.

복합재료의 충격 저항성을 향상시키기 위한 하나의 방법으로 일방향 층 대신에 직물 층(woven fabric layer)를 사용하는 것이다. Fill 과 warp 로 엮어진 직물 복합재료는 일방향 복합재료에 비하여 한 층 내부에서 모든 방향으로의 만족할 만한 저항력을 가지고 있을 뿐만 아니라 높은 파괴 인과 낮은 제작비의 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 저속 충격을 받는 직물 복합재료 적층판에 대한 손상 예측을 위하여 Hou 등[4]에 의해서 수정된 Chang-Chang[3]의 파손 기준과 유한요소 해석에 의하여 파손 예측을 하였으며 충격 실험[7]에서 얻어진 결과와 비교·검증하였다.

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원

** 충남대학교 기계설계공학과

*** 한국 화이버

2. 해석 방법

2.1 파손 기준

2.1.1 기지 파손

기지 파손은 섬유와 직각 방향의 내평면 응력들 σ_{xy} , σ_{yy} 및 외평면 전단응력 σ_{yz} 이 주요 원인이 된다. Hou 등[4]은 식 (1), (2)와 같이 Chang-Chang[3]의 기지 파손에 대한 파손 기준을 3 차원 영역으로 확장하였다.

(a) 섬유 방향 인장에 의한 기지 파손($\sigma_{yy} \geq 0$)

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

(b) 섬유방향 압축에 의한 기지 파손($\sigma_{yy} < 0$)

$$e_m^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{-\sigma_{yy}}{S_{yy}}\right)^2 + \frac{Y_c \sigma_{yy} - \sigma_{yy}}{4S_{yy} Y_c} + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

여기서 Y_t 및 Y_c 는 각각 섬유와 직각방향의 인장 강도 및 압축강도이며, $S_{ij}(i, j = x, y, z)$ 는 각 방향에 대한 전단강도를 나타낸다.

2.1.2 층간 분리

층간 분리는 두께방향의 응력 σ_{zz} 및 외평면 전단 응력 성분들 σ_{xz} , σ_{yz} 이 주원인이 된다.

Brewer-Lace 등[5]의 3 차원 층간 분리 파손 기준의 단점을 극복하여, Hou 등[4]은 두께방향의 인장 응력은 층간 분리를 촉진하지만 압축 응력은 억제한다는 식 (3)와 인장 응력으로 인한 적층판의 기지 균열 영역에서는 항상 층간 분리가 발생한다는 식 (4)를 제안하였다.

(a) 두께 방향 압축에 의한 층간 분리($\sigma_{zz} \geq 0$)

$$e^2 = \left(\frac{\sigma_{zz}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{Z_t}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

(b) 인장에 의한 기지 파손 발생($\sigma_{yy} \geq 0$, $e_m \geq 1$)

$$e_i \geq 1 \quad (4)$$

여기서 Z_t 는 적층판의 두께 방향의 인장 강도를 나타낸다.

2.2 유한요소 해석

2.2.1 해석 대상 및 해석 모델

수정된 Chang-Chang 의 파손 기준을 이용하여 (주)한국 화이바에서 제작된 경량화 지하철 전두부에 사용되는 Glass/phenol 복합적층재에 대하여 범용 유한요소 해석프로그램 ABAQUS 을 이용하여 저속 충격에 대한 손상 예측을 수행하였다.

Glass/phenol 복합적층재에 대한 해석 모델은 충격 실험 규격 BSS 7260 에 따라 충격 실험[6]과 동일한 $152 \times 101 \times 5\text{mm}$ 으로 정하였으며 충격체는 반구형으로 직경이 15.7mm, 무게는 6.45kg 으로 강재로 되어있다.

적층판에 가하는 충격 에너지는 충격체의 높이와 동일한 에너지를 가지는 초기 속도로 주어진다. 해석 모델은 해석 비용을 효과적으로 줄이기 위하여 1/4 대칭 모델을 사용하였다. 경계조건은 충격 실험과 동일하게 4 변 단순지지로 적용되었다.

해석 모델에 사용된 요소는 충격 하중에 의한 적층판 중앙에서의 굽힘을 고려하여 8 절점의 incompatible mode 를 가진 3 차원 요소(C3D8I), 충격체는 에너지 흡수와 소성 변형이 없는 강체 요소(R3D4)로써 모델링 하였으며, 적층판은 한 층에 1 개의 요소를 사용하였다. 적층판 요소의 두께 방향 적분점은 층간 접합면에서의 내평면 전단 응력을 구하기 위하여 3 개를 사용하였다[7].

Table 1 은 Glass/phenol 복합적층재의 재료 물성을 나타내며, Fig. 1 은 해석 모델을 나타낸다.

Table 1 Material properties of the Glass/phenol

Material properties	Quantity	
Young's modulus	E_x	19.74 GPa
	E_y	19.74 GPa
	E_z	8.88 GPa
Poisson's ratio	ν_{xy}	0.138
	ν_{yz}	0.318
	ν_{zx}	0.318
Shear modulus	G_{xy}	3.69 GPa
	G_{yz}	2.80 GPa
	G_{zx}	2.80 GPa
Ultimate strength	X_t	259.6 MPa
	Y_t	259.6 MPa
	Y_c	354.3 MPa
	Z_t	37.3 MPa
	S_{xy}	91 MPa
	S_{yz}	91 MPa
	S_{zx}	91 MPa
Density	ρ	1770 kg/m ³

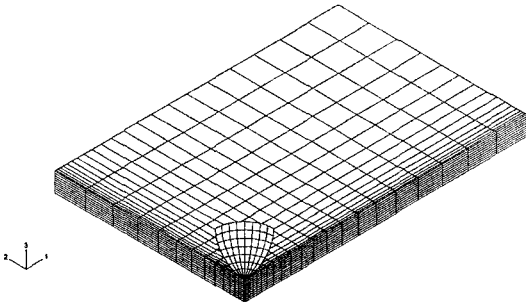


Fig. 1 Finite element model of the woven fabric composite plate for impact analysis

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 충격 하중 및 변위

충격 에너지 6.69J, 13.03J 그리고 31.70J의 충격 하중을 받는 Glass/phenol 복합적층재의 손상에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 충격 에너지 6.69J은 충격 실험 결과로부터 적층판의 손상이 발생하기 시작하며 13.03J과 31.70J의 충격 에너지 증가에 따라 적층판 두께 방향에 걸쳐 손상이 진전된다.

Fig. 2는 각 충격 에너지에 대한 충격 실험과 해석에서의 적층판 중앙에서의 최대 처짐의 시간에 따른 이력 선도를 나타내고 있다. 충격 에너지 6.69J에 대하여 실험과 해석의 최대 처짐의 결과 차이는 0.19mm이며 충격 에너지 13.03J의 경우 0.18mm으로 근접하다. 반면에 충격 에너지 31.70J의 경우 1.22mm으로 결과 오차 범위가 커진다.

Fig. 3은 각 충격 에너지에 대한 실험과 유한요소 해석의 적층판과 충격체 사이에서의 충격력을 나타내고 있다. 충격력의 경우에도 최대 처짐과 같이 충격 에너지 6.69J에서는 해석은 실험의 결과의 차이는 578.8N으로 근접하지만 충격 에너지 13.03J과 31.70J의 경우 각각 2266N과 3990N으로 상당한 오차가 발생하게 된다.

손상이 개시되는 충격 에너지 6.69J의 경우에는 충격 실험과의 결과와 유한요소 해석과의 결과는 근접하지만 적층판의 두께 방향에 걸쳐 보다 많은 손상 영역이 발생하는 충격 에너지 31.70J에서 대해서는 다소 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 유한요소 해석시 충격 하중을 받을 경우 손상이 발생하는 요소의 재료 물성을 재정의해야만 한다. 하지만 이러한 경우, 전체 강성 행렬의 고유치 중에서 음의 값을 갖는 고유치가 발생하게 되며, 결국 해를 얻을 수 없는 소위 non-positive definite의 특성을 가지게 되므로, 해를 구하지 못

한 채 해석이 종료되는 경우가 빈번히 발생하기 때문에 재료의 물성은 손상이 발생되지 않은 경우와 발생한 경우는 동일하다고 가정한다. 이러한 이유로 해석 모델은 파손에 의한 강도와 강성의 저하를 무시하게 되며 실험과 해석의 두 결과에서 상당한 오차가 발생하게 된다.

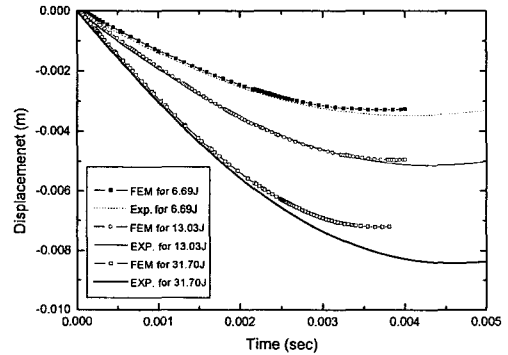


Fig. 2 Displacement time history of the Glass/phenol under impact energy 31.70J

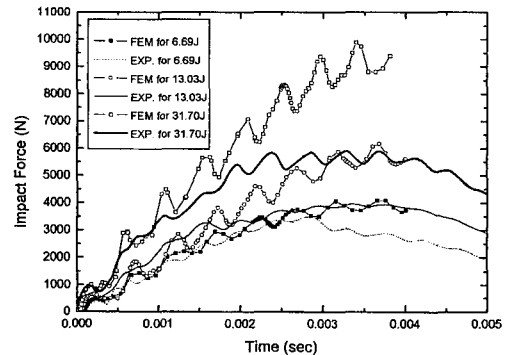


Fig. 3 Impact force time history of the Glass/phenol under impact energy

3.2 파손 모드

Fig. 4~6는 충격 에너지 6.69J, 13.03J 그리고 31.70J는 유한요소 해석에서 예측된 기지 파손과 층간 분리의 손상 영역을 나타내고 있다.

충격 에너지 6.69J의 경우 기지 파손은 적층판과 충격체의 접촉지점에서 국소적인 압입과 함께 미소적인 영역에서 발생하며 충격시 적층판의 대변형에 의해서 발생하는 최대 인장 굽힘 응력에 인해서 그 반대편의 접촉후면에서는 보다 넓은 영역에서 발생한다. 층간 분리는 기지 파손이 인접

한 층에 이르면 개시되기 때문에 기지 파손이 발생하는 영역과 동일한 영역에서 발생한다. 충격 에너지 31.70J 에서는 손상 영역이 적층판의 두께 방향으로 중앙면까지 걸쳐 발생한다.

충격 에너지 6.69J 에서는 손상 영역은 충격 실험 결과는 254.1mm² 이며 해석은 98.4mm² 으로 발생한다. 충격 에너지 13.03J 에 대하여 해석과 실험에서 예측된 손상 영역은 각각 480.0mm² 과 529.2mm² 이다. 충격 에너지 31.70J 에서는 실험은 1033.4mm² 이며 해석에서는 888mm² 로 모든 충격 에너지에 대하여 유한요소 해석에서 예측된 손상 영역은 실질적으로 충격 실험에서 얻어진 영역보다 적은 영역으로 예측된다.

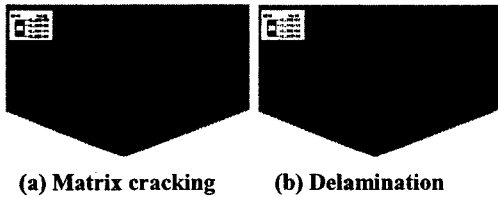


Fig. 4 Failure mode of the glass/phenol under impact energy 6.69J with FE analysis

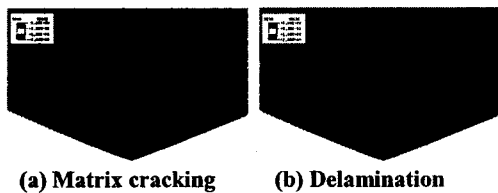


Fig. 5 Failure mode of the glass/phenol under impact energy 13.03J with FE analysis

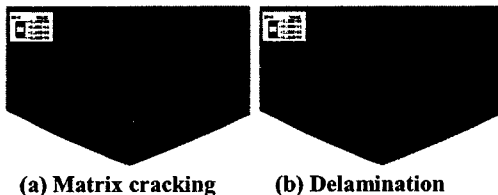


Fig. 6 Failure mode of the glass/phenol under impact energy 31.70J with FE analysis

4. 결론

본 연구는 지속 충격을 받는 직물 복합재료 적층판에 대한 수정된 Chang-Chang[3]의 파손 기준을 이용한 유한요소 해석과 충격 실험의 결과를 비교·검증을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 적층판의 기지 파손은 충격체와 판의 접촉 지점에서 국소적인 영역이 발생하며 반면에 접촉 후면에서 더 넓은 영역으로 발생한다.

(2) 충격 에너지의 증가에 따라 적층판의 기지 파손은 접촉후면에서 높은 인장 응력에 의해 넓은 영역으로 발생하며 판의 두께 방향으로 중앙면까지 발생한다.

(3) 층간 분리의 경우 접촉부에서 중앙면 근처까지 발생하지 않으며, 중앙면 근처에서 접촉후면까지는 존재하게 된다.

(4) 충격 하중에 의한 응력파의 영향보다는 적층판의 변형이 파손을 주도한다.

(5) 적층판의 손상이 진전되지 않는 경우 해석은 실험 결과와 유사한 거동을 예측할 수 있는 반면에 손상에 의하여 재료 물성의 상당한 변화를 따르는 높은 충격 에너지 경우 오차를 가지게 된다.

후 기

이 연구결과는 산업 자원부와 (주)한국 화이바의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) C.J. Jih and C.T. Sun, 1993, "Prediction of Delamination in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, pp. 684~701.
- (2) Y.X. Mukherjee, S.N. Gulrajani, S. Muk-herjee and A.N. Netravali, 1994, "A Numercal and Experimental Study of Delaminated Layered Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, pp. 837~870.
- (3) F.K. Chang and K.Y. Chang, 1987, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 834~855.
- (4) J.P. Hou, N. Petrinic, C. Ruiz, S.R. Hallett, 2000, "Prediction of Impact Damage in Composite Plates," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 273~281.
- (5) J.C. Brewer and P.A. Lagace, 1998, "Quadratic Stress Criterion for Initiation of Delamination," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, No. 12, pp. 1141~1155.
- (6) 김재훈, 2001, "Glass/phenol 복합적층판의 저속 충격 특성," 대한기계학회 추계학술대회논문집 (A), pp. 228~233.
- (7) HKS, 1998, ABAQUS User's Manual, Hibbit, Karlon & Sorence Inc.