

저속충격을 받는 Carbon/Epoxy 적층판의 손상 해석

이호철* · 이영신** · 김재훈** · 전제춘***

Failure Analysis on the Carbon/Epoxy Laminate Subjected to Low Velocity Impact

Ho-Chul Lee, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Je-Choon Jeon

Key Words: Composite, Low velocity impact, Damage

Abstract

Recently, composite material which has much excellent mechanical characteristics has been applied in many industries. However, it has a brittle characteristic under impact condition and its invisible characteristics of the damaged area has been the motivation of many engineers investigation.

The modified failure criterion is implemented to predict the failure behavior of the composite plate subjected to low velocity impact using commercial finite element analysis code, ABAQUS-Ver. 5.8. The new criterion is in good agreement with experimental results and can predict the failure behavior of the composite plate subjected to low velocity impact more accurately.

1. 서론

최근 다른 재료에 비해 우수한 기계적 특성을 가지고 있는 복합재료가 많은 산업분야에 적용되고 있다. 그러나 복합재료는 이러한 우수한 기계적 특성에 비해 충격에 매우 약한 단점이 있으며, 특히 저속충격에 의한 손상은 가시화 되기 힘들기 때문에 많은 연구자들의 연구 대상이 되고 있다. 저속충격에 의한 적층판의 손상 개시와 성장에 대한 연구는 실험 및 해석적 방법으로 대별되는데, 실험적 연구에 의하면, 기지파손 및 층간분리가 적층판의 잔류 강도를 저하시키는 가장 주요한 파손 모드로 밝혀지고 있다. 해석적 방법에서 충격 손상의 개시와 성장 예측은 다음과 같은 두 가지의 접근 방법이 사용된다. 하나는 손상의 성장을 파괴 역학적 관점에서 적용하는 방

법[1~2]이고, 또 하나는 충격 부위의 과도 응력장(transient stress field)을 파괴 기준과 연결시켜 해석하는 방법이다. 과도 응력장을 이용한 손상 해석의 연구 동향을 보면, J.P.Hou 등[3]은 Brewer-Lagace[4]의 층간 분리 기준을 수정한 새로운 층간분리 파손 기준을 유한요소 해석(LS-DYNA3D)에 적용하여 실험 결과와 유사한 예측을 하였다. 국내의 연구동향을 보면, 이영신 등[5]은 복합 구조물의 저속충격에 의한 손상특성을 연구하였고, 전제춘[6]은 적층판의 손상 거동을 실험과 정하중 압입 해석을 통해 연구하였다.

2. 해석 방법

2.1 파손 기준

2.2.1 기지의 균열

기지의 파손은 섬유와 직각 방향의 내평면 응력들(σ_{yy} , σ_{xy}) 및 외평면 전단 응력(σ_{yz})이 주요 원인이 된다.

Hou 등[3]은 식 (1),(2)와 같이 Chang-Chang[7]

* 충남대학교 기계설계공학과, 석사과정

** 충남대학교 기계설계공학과, 교수

*** 국방과학연구소

의 기지균열 파손 기준을 3차원 공간으로 확장하였다.

(a) 인장에 의한 기지의 파손($\sigma_{yy} \geq 0$ 인 경우)

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

(b) 압축에 의한 기지의 파손($\sigma_{yy} < 0$ 인 경우)

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

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

2.2.2 층간 분리

층간분리는 두께방향의 응력(σ_{zz}) 및 외평면 전단 응력 성분들(σ_{xz}, σ_{yz})이 주원인이 된다.

Brewer-Lace 등[4]의 3차원 층간분리 파손 기준의 단점을 극복하여, Hou 등[3]은 두께방향의 압축 응력은 층간 분리의 개시 및 성장을 구속한다는 새로운 파손기준을 제시하였다.

본 연구에서는 그들의 파손 기준을 개선하여 다음 식(3), (4)와 같은 층간분리 파손 기준을 새롭게 제시하여 해석에 적용하였다. 새로운 층간 분리 기준은 Hou 등[3]의 파손 기준과 함께, 인장 응력으로 인한 적층판의 기지 균열 영역에서는 항상 층간분리가 존재한다는 점에서 출발하였다.

(a) 인장에 의한 기지의 파손이 발생한 경우

(즉, $\sigma_{yy} \geq 0, e_m \geq 1$)

$$e_l \geq 1.0 \quad (3)$$

(b) 두께 방향의 응력이 양인 경우($\sigma_{zz} \geq 0$)

$$e_l^2 = \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{zz}}{Z_t}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

여기서 Z_t 는 적층판의 두께 방향의 인장 강도를 나타낸다.

실제 손상 거동을 고찰하기 위해서는 손상을 받은 요소가 발생할 경우, 강성 행렬을 바꾸어야 하지만, 이는 강성 행렬을 positive definite하지 않게 만들 수 있기 때문에 해를 얻는다는 것은 거의 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 해의 강성 행렬을 바꾸지는 않고, 정성적인 평가만을 고려하기로 하였다.

3. 유한 요소 해석

3.1 해석 대상 및 유한 요소 모델

새롭게 제시한 파손 기준을 Hou 등[3]의 파손 기준과 비교/검증하기 위하여, 그들이 연구하였던 Carbon/Epoxy 적층판을 해석 모델로 하였다. Hou 등[3]은 CFRP T300/914 프리 프레그를 $[0^\circ / 90^\circ]$ 로 연속 적층하여, 총 21적층, 두께 2.16mm의 탄소/에폭시 적층판을 충격 시편으로 하였다. 적층판의 치수는 가로 85 mm, 세로 85 mm이며, 충격체의 끝단은 직경 16 mm의 반구형 형태이다. 적층판은 직경 45 mm의 steel ring에 단순 지지되어 있으며, 적층판과 steel ring은 접촉 처리를 하였다. 또한, 충격체의 질량은 260 g, 충격체의 충격 속도는 7.08 m/s로 적층판이 받는 충격 에너지는 충격체의 운동에너지와 동일한 6.5 J이다.

적층판은 C3D8R의 선형 솔리드 요소를, 충격체는 강체 요소로써 모델링 하였으며, 적층판은 플라이 당 1개의 요소를 사용하였으며, 두께 방향 적분점은 층간 접합 면(ply interface)에서의 층간 전단 응력(inter-laminar shear stress)을 추출하기 위해 3개를 사용하였다. 민감도 해석을 통해, 요소는 총 4855개, 절점은 5913개가 적용되었다.

Table 1은 해석에 적용된 적층판의 물성 및 각 방향의 극한강도를 나타내며, Fig. 3은 해석에 적용된 유한요소 모델을 나타낸다.

3.2 해석 결과

3.2.1 충격 하중 및 에너지

해석 결과, 충격하중은 충격체가 재 반동되는 시점인 약 0.9 msec에서 약 3 kN의 값을 나타내었으며, 충격 에너지는 예상한 대로 6.5 J의 값을 나타내었다.

Table 1 Material properties of the laminated plate

Material properties		Quantity
Young's modulus	E_x	139 GPa
	E_y	9.4 GPa
	E_z	9.4 GPa
Poisson's ratio	ν_{xy}	0.0209
	ν_{yz}	0.33
	ν_{xz}	0.0209
Shear modulus	G_{xy}	4.5 GPa
	G_{yz}	2.98 GPa
	G_{xz}	4.5 GPa
Ultimate strength	Y_t	74 MPa
	Y_c	237 MPa
	Z_t	74 MPa
	S_{xy}	64 MPa
	S_{yz}	64 MPa
	S_{xz}	86 MPa
ρ		1580 kg/m ³

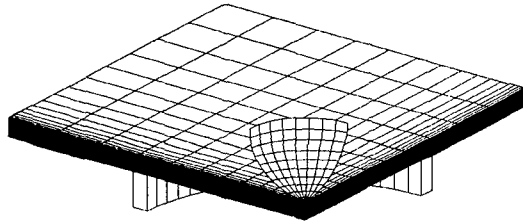


Fig. 3 Finite element model for impact simulation

3.2.2 파손 모드

기지의 균열은 먼저, 접촉 부위에서의 판의 국소 압입과, 접촉 후면에서의 판의 굽힘에 의한 인장 파손으로 개시되기 시작한다. 접촉부의 국소 압입은 판이 가장 큰 에너지를 받는 시간까지 크기가 거의 유지되는 경향을 보이며, 인장에 의한 균열은 시간이 지나면서 중앙면 근처까지 확대되는 모습을 볼 수 있다. 접촉면에서 중앙면까지는 인장에 의한 기지 균열이 거의 나타나지 않으며, 중앙면 이후 부터는 전단 파손의 양상이 발생함을 볼 수 있다. 이것은 실험 결과와 거의 유사한 결과이다.

새롭게 제시한 층간 분리 파손 기준에 의한 해석 결과, Hou 등[3]의 연구 결과와 비교해 볼 때

보다 실험 결과와 유사하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 층간분리 는 중앙면을 중심으로 상하 면으로 비슷한 크기의 파손 영역이 발생하는데, 이것은 중앙 면으로 갈 수록 외평면 전단 응력이 커지기 때문이다.

Fig. 4는 시간별로 본 기지 균열 및 층간 분리의 성장 과정을 보여준다.

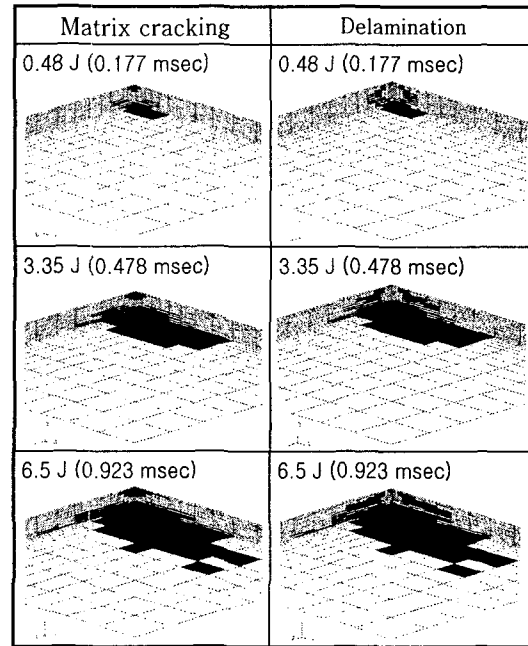


Fig. 4 Sequence of the matrix cracking & delamination failure mode

4. 결론

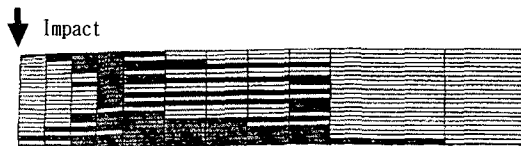
Fig. 5는 Hou 등[3]의 연구 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 나타낸 그림이다. Hou 등[3]은 실험을 통해서 충격체와 적층판의 접촉부에서는 층간분리가 발생되지 않는다는 사실로부터, 두께 방향의 응력(σ_{zz})이 양인 경우에만 층간 분리 파손 기준을 적용하여 Fig. 5의 (b)와 같은 수치 해석 결과를 얻었다. 그러나, 그들의 수치 해석 결과는 적층판의 중앙면 근처에서 접촉 후면까지도 층간분리가 존재하지 않고 있으며, 이는 실험 결과와 다소 상이하다 할 수 있다.

본 연구에서 새롭게 제시한 파손 기준은, Hou 등[3]의 수정된 층간 분리 기준과 함께 접촉 후면에서 발생하는 양의 인장응력에 의한 기지 균열 부위에서는 항상 층간분리가 개시된다는 사실로부터, 양의 인장 응력에 의한 기지 균열 부위는 층간 분리가 동시에 발생된다는 파손 기준을 적용하였다.

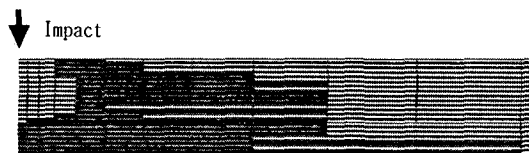
Fig. 5 (c)의 해석 결과를 보면, Hou 등[3]의 해석 결과보다는 그들의 실험 결과에 보다 근사한 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 접촉 지점의 중앙면 근처에서 접촉 후면까지는 층간분리가 발생되고 있는 것이다. 그러나, Hou 등[3]의 해석 결과와 본 연구에서의 해석 결과에서 공통적으로 발생하는 현상은, 접촉 후면에서의 층간 분리 영역이 실험치 보다 지나치게 크게 예측되고 있다는 사실인데, 이는 파손 진행 과정에서 파손된 요소의 재료 상수들을 적절히 갱신시키지 않고, 정성적인 평가를 하고 있기 때문이라 사료된다.



(a) Experimental result (Hou et al.[3])



(b) LS-DYNA3D (Hou et al.[3])



(c) ABAQUS (New criterion)

Fig. 5 Comparison with Ref. and present work on the delaminated zone

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

(1) 접촉부의 압축 응력에 의한 국소 압입 영역은 최대 에너지를 받을 때까지 그 크기의 변화가 매우 미미하다.

(2) 기지의 균열은, 최초 접촉 후면에서 높은 인장 응력에 의해 발생되어 중앙면 근처로 성장되는 양상을 나타낸다.

(3) 층간 분리는 접촉 지점으로부터 중앙면 근처까지의 국소 영역에서는 발생되지 않으며, 중앙면 근처에서 접촉 후면까지는 존재하게 된다.

(4) 새롭게 제시된 층간 분리 파손 기준은 실험치와 매우 유사한 예측이 가능하다.

참고문헌

- (1) C.J. Jih and C.T. Sun, "Prediction of Delamination in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact," *Journal of Composite Materials*, 1993, Vol. 27, pp. 684~701
- (2) Y.X. Mukherjee, S.N. Gulrajani, S. Muk-herjee and A.N. Netravali, "A Numerical and Experimental Study of Delaminated Layered Composites," *Journal of Composite Materials*, 1994, Vol. 28, pp. 837~870
- (3) J.P. Hou, N. Petrinic, C. Ruiz, S.R. Hallett, "Prediction of Impact Damage in Composite Plates," *Composites Science and Technology*, 2000, Vol. 60, pp. 273~281
- (4) J.C. Brewer and P.A. Lagace, "Quadratic Stress Criterion for Initiation of Delamination," *Journal of Composite Materials*, 1988, Vol. 22, No. 12, pp. 1141~1155
- (5) 이영신, 박웅, "고차전단변형이론에 의한 복합재료 적층판의 저속충격응답," *대한기계학회 논문집*, 1990, Vol. 14, No. 6, pp. 1365~1381
- (6) 전제춘, "준등방성 복합적층판의 저속충격 손상에 관한 연구," 박사학위 논문, 충남대학교, 1996
- (7) F.K. Chang and K.Y. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, 1987, Vol. 21, pp. 834~855