

저속 충격을 받는 복합재료 적층판의 손상 해석

이호철*·이영신*·김재훈*·전제춘**

Analysis on the Composite Laminated Plate Subjected to Low Velocity Impact

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

Key Words: Composite(복합재료), Low Velocity Impact(저속충격), Damage(손상)

Abstract

Recently, composite material which has much excellent mechanical characteristics has been applied in many industries. However, it has a brittle characteristic under impact event. Especially, its invisible characteristics of the damaged area has been the motivation of many engineers investigation, and the nonlinearity of the impact mechanism is one of the main reason to assume the damaged area too simple. The damage mechanism of the composite laminated plate subjected to low velocity impact using ABAQUS/Standard & user subroutine was presented here.

1. 서 론

최근 다른 재료에 비해 우수한 기계적 특성을 가지고 있는 복합재료가 첨단 산업분야 등에 많이 적용되고 있다. 그러나 복합재료는 이러한 우수한 기계적 특성에 비해 충격에 매우 약한 단점이 있으며, 특히 저속충격에 의한 손상은 접촉면에서 손상의 정도를 파악하기 힘들기 때문에 많은 연구자들의 연구 대상이 되고 있다. 또한, 충격 자체의 큰 비선형적 거동은 파손 해석의 이론적 접근을 어렵게 하며, 충격 거동 및 손상 기구를 지나치게 단순화시켜 해석하는 동기가 되고 있다. 이에 따라 저속충격에 의한 적층판의 손상 개시와 성장에 대해서 광범위한 연구가 수행되고 있다. 실험적 연구에 의하면, 기지파손과 층간분리가 적층판의 잔류강도를 저하시키는 가장 중요한 파손 모드로 밝혀지고 있으며, 특히 층간 분

리는 적층판의 압축강도를 현저하게 저하시키는 가장 주요한 요인이 되고 있다.

이론적 측면에서, 충격 손상의 개시와 성장 예측은 다음과 같은 두 가지의 접근 방법이 많이 적용되고 있다. 하나는 손상의 성장을 파괴역학적 관점에서 적용하는 것이고, 또 하나는 충격 부위의 과도응력장(transient stress field)을 파괴 기준과 연계시켜 해석하는 방법이다.

파괴역학적 관점의 손상 해석 연구 동향을 보면, Jih 등⁽⁴⁾은 저속충격하에서 층간분리의 성장을 연구하였고, Mukherjee 등⁽⁵⁾은 준 정적 하중 하에서 손상의 성장을 연구하였다. 과도응력장을 이용한 손상 해석의 연구 동향을 보면, Collombet 등⁽⁶⁾은 최대응력기준(maximum stress criterion)을 적용하여 기지파손에 대해 연구하였고, Hung 등⁽⁷⁾은 LS-DYNA3D 코드를 이용하여 층간분리 현상을 연구하였다. 또한 Hou 등⁽¹⁰⁾은 실험과 유한요소해석(LS-DYNA3D)을 통해 저속충격에 의한 적층판의 손상에 대해 연구하였다.

국내의 연구동향을 보면, 이영신 등^(3,9)은 복합재료 적층판 및 혼합 적층판의 저속충격 응답을

* 충남대학교

** 국방과학연구소

연구하였고, 전제춘⁽⁸⁾은 적층판의 손상 거동을 실험과 유한요소해석을 통해 연구하였고,

많은 연구자들은 FEM을 이용한 손상 해석에서, Chang-Chang⁽¹¹⁾ 손상이론을 응용한 기지파손과 Brewer-Lagace⁽²⁾가 제안한 층간분리 손상 이론을 응용하여 수행하고 있다. 그러나, Chang-Chang 손상 이론의 단점은, 기지 파손의 경우 층간 전단 응력(τ_{23})에 의한 전단파손을 고려할 수 없으며, Brewer-Lagace 등의 층간분리 이론은 두께방향 응력(σ_{33})의 부호에 무관하게 적용되고 있다는 것이다. 실험적 연구에 의하면⁽¹⁰⁾, 접촉면에서 발생되는 국부적인 두께방향의 압축응력은 층간분리 현상을 막아주는 구실을 하고 있다.

본 연구에서는 이러한 손상 이론들의 단점을 보완하여, 굽힘에 의한 양의 내평면 인장응력(σ_{22})과 전단응력들(τ_{12}, τ_{23})이 기지파손을 주도하고, 양의 두께방향 응력(σ_{33})과 층간전단응력들(τ_{13}, τ_{23})이 층간분리를 주도한다는 가정을 이용하여 손상 해석을 수행하였다. 또한 굽힘에 의한 기지의 파손은 곧 바로 층간 분리로 성장된다는 가정을 적용하였다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 충격 과정의 과도응력장과 새롭게 제안된 파손기준을 이용하여 저속충격에 의한 적층판의 손상 거동을 고찰하였다. 해석에 사용된 코드는 ABAQUS/Standard⁽¹²⁾이며, 사용자 부프로그램(user subroutine)을 사용하여 파손기준을 적용하였다.

2.1 파손 기준

2.2.1 섬유방향의 파손

Chang-Chang 이론을 이용하여, 계산된 섬유방향의 인장응력이 섬유방향의 극한강도를 넘어서게 되면, 섬유의 파손이 발생한다는 가정으로, 파손 기준은 다음과 같다.

$$e_j^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

여기서, σ_{11} 은 계산된 섬유방향의 인장응력이고, X_T 는 적층판의 섬유방향 인장극한강도이다.

섬유의 파손 기준을 만족하는 요소가 발생할 경우, 해석을 종료하게 된다. 이것은 섬유의 파손은 더 이상의 하중을 받을 수 없는 가장 심각한 손상 형태이기 때문이다. 섬유의 파손은 첫 번째 층과 마지막 층에서 충격에 의한 높은 굽힘응력에 의해서 발생하며, 그 부분의 섬유방향의 전단 응력 성분들(τ_{12}, τ_{13})은 끝단 효과로 인해 그 크기가 상대적으로 매우 작게 된다. 따라서 본 연구에서는 섬유방향의 파손에 기여하는 응력은 단지 굽힘에 의한 섬유방향의 인장응력만을 고려하였다.

2.2.2 기지의 파손

기지의 파손은 굽힘에 의한 인장 파괴와 전단 응력에 의한 전단 파괴의 양상을 나타낸다. 따라서, 섬유와 직각방향의 응력들, 즉 $\sigma_{22}, \tau_{12}, \tau_{23}$ 에 의해 발생하게 되며, 파손 기준은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

(a) $\sigma_{22} \geq 0$ 인 경우,

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

(b) $\sigma_{22} < 0$ 인 경우,

$$e_m^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{-\sigma_{22}}{S_{12}} \right)^2 + \frac{Y_C \sigma_{22}}{4S_{12}} - \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

여기서, σ_{22} 는 계산된 섬유와 직각방향의 인장 응력이고, Y_T 는 적층판의 섬유와 직각방향으로의 인장 극한강도이다. 또한 τ_{12} 와 τ_{23} 는 계산된 섬유와 직각방향의 전단응력, S_{12}, S_{23} 는 해당 방향의 전단극한강도이다. 많은 실험 결과에서, 섬유와 직각방향의 압축응력($\sigma_{22} < 0$)에 의해 발생하는 파손은 접촉지점의 국부적 Hertz 응력에 의하며 기지가 국부적인 찌그러짐 현상을 보이게 된다.

어떤 요소가 기지파손기준을 만족하게 되면, 해당 방향의 물성을 0으로 바꾸어 준다. 즉, E_2, G_{12}, G_{23} 및 ν_{12}, ν_{23} 의 값을 0으로 바꾸어 주게 된다.

2.2.3 층간분리

실험적 연구^(4~5)에 의하면, 층간분리는 기지의

파손에 의해 가장 먼저 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 기지의 파손이 발생된 요소는 층간분리도 동시에 발생한다는 새로운 가정을 세웠다. 또한, 층간분리는 적층판의 두께방향의 응력 성분들, 즉 $\sigma_{33}, \tau_{13}, \tau_{23}$ 에 의해서도 발생하게 된다.

본 연구에서 제시하는 층간분리의 파손 기준은 다음과 같다.

(a) 굽힘에 의한 인장응력으로 인한 기지파손이 발생한 경우(두께방향 응력의 부호에 무관하게)

$$e_d = e_m \quad (e_m \geq 1) \quad (4)$$

(b) $\sigma_{33} \geq 0$ 인 경우⁽¹⁰⁾,

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

(c) 기지파손이 없고, $\sigma_{33} < 0$ 인 경우⁽¹⁰⁾,

$$e_d = 0 \quad (6)$$

여기서, σ_{33} 은 계산된 두께방향의 양의 응력이고, Z_T 는 적층판의 두께방향의 인장극한강도이다. 또한, τ_{13} 와 τ_{23} 는 계산된 두께방향의 전단응력이고, S_{13}, S_{23} 는 해당 방향의 전단극한강도이다.

층간분리의 손상 기준을 만족하는 요소는, E_3, G_{13}, G_{23} 및 ν_{13}, ν_{23} 의 값을 0으로 바꾸어 준다.

Fig. 1~3은 각각의 파손 모드와 관계된 응력 성분들을 개략적으로 나타낸다. 또한 층간분리는 층간의 접착면에서 발생하기 때문에 Fig. 3의 응력 성분들은 층간의 접착면에서의 응력 성분을 나타낸다.

2.2 파손 기준의 적용

위에서 제시한 3가지의 파손 기준을 해석에 적용하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 사용자 부프로그램(user subroutine)을 이용하였다. 해석에 사용된 사용자 부프로그램은 USDFLD로써, FORTRAN 코딩을 필요로 한다. USDFLD는 매 시간증분에서 각 요소의 적분점에서의 응력값을 추출하여 위에서 제안된 3가지 파손모드의 식들에 적용되게 된다. 또한, 갱신되는 재료 상수들 중에,

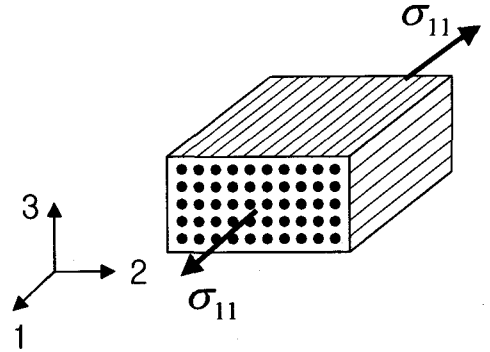


Fig. 1 Stress inducing fiber failure

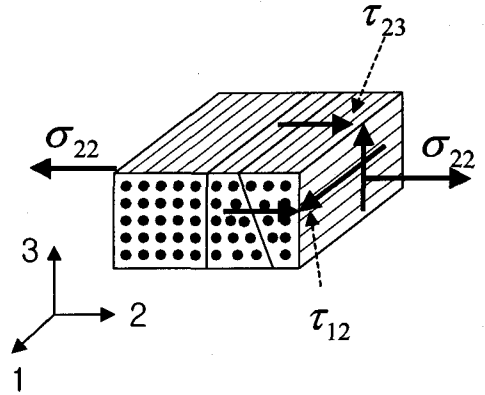


Fig. 2 Stresses inducing matrix cracking

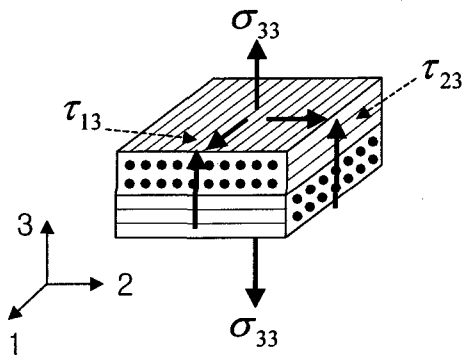


Fig. 3 Stresses inducing delamination

탄성 및 전단계수들을 0(zero)으로 바꿀 경우 수치 계산이 안되기 때문에, 1.0 Pa로 바꾼다.

Table 1은 손상모드별 재료 상수의 갱신 방법을 보여준다.

Table 1 Damage mode and corresponding material property update

Damage mode	Material property update
Fiber failure	Terminate the analysis process
Matrix cracking	$E_2=G_{12}=G_{23}=1\text{Pa}$, $\nu_{12}=\nu_{23}=0$
Delamination	$E_3=G_{13}=G_{23}=1\text{Pa}$, $\nu_{13}=\nu_{23}=0$

2.3 해석 모델

새롭게 제안된 파손기준의 타당성을 검증하기 위해, Hou 등⁽¹⁰⁾이 실험 및 유한요소해석을 통해 연구 하였던 CFRP 적층판을 해석 모델로 하였다. 적층판은 $85 \times 85 \times 2.6 \text{ mm}^3$ 의 치수를 가지며 $[0^\circ/90^\circ]$ 를 반복 적층하여 총 21층의 적층수를 갖는다.

Table 2와 Table 3은 각각 해석에 적용된 재료의 물성과 극한강도를 나타낸다. 각각의 값은 Hou 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 적용했던 값이다.

Table 2 Material properties of the laminated plate

Mechanical property	Quantity
E_1	139 GPa
E_2	9.4 GPa
E_3	9.4 GPa
G_{12}	4.5 GPa
G_{13}	4.5 GPa
G_{23}	2.98 GPa
μ_{12}	0.0209
μ_{13}	0.0209
μ_{23}	0.33
ρ	1580 kg/m^3

Table 3 Limit strength of the laminated plate

Limit strength	Quantity
X_T	2.07 GPa
Y_T	74 MPa
Z_T	74 MPa
S_{12}	64 MPa
S_{13}	86 MPa
S_{23}	64 MPa

3. 유한요소해석 및 토의

3.1 해석 방법

복합재료 적층판의 지속충격에 의한 손상 거동을 고찰하기 위하여 ABAQUS/Standard⁽¹²⁾ 및 사용자 부프로그램을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

수직 낙하하는 충격체는 질량 0.52 kg, 충격체 끝단은 16 mm 직경의 반구형이며, 5.0 m/s의 초기 속도로 적층판에 충돌하게 되어, 약 6.5 J의 충격 에너지를 받게 된다. 반구형의 충격체 끝단은 강체요소를 사용하였으며, 적층판은 감차적분을 수행하는 3차원 선형 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였다. 해석에서 사용된 요소의 수는 4840개, 절점의 수는 5883개 이며, 두께방향으로는 층별 1개씩 총 21개의 요소를 사용하였다. 경계조건은 네 변 단순지지이며, 1/4 대칭 경계조건을 부여하였다. 충격체(강구)와 적층판간의 접촉에 의한 마찰의 영향은 고려하지 않았고, 이상적인 Hertzian 접촉이라는 가정을 적용하였다.

Fig. 2는 해석에 적용한 유한요소 모델을 나타낸다.

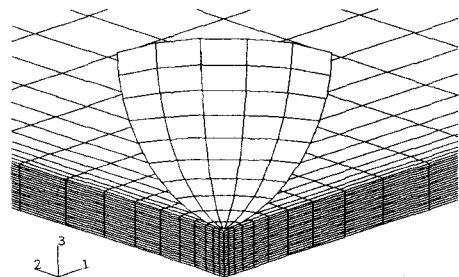


Fig. 4 FE model of the laminated plate

3.2 해석결과 및 고찰

3.2.1 기지의 파손해석 결과

충격에 의한 적층판의 굽힘은 충격지점의 반대면에서 높은 인장응력을 발생시킨다. 이 응력은 섬유방향에 비해 상대적으로 강도가 낮은 섬유와 직각방향으로 기지의 파손을 발생시키게 된다. 이러한 섬유와 직각방향의 인장응력은 충격지점을 중심으로 섬유방향으로 땅콩 모양을 나타내게 된다. 많은 실험적 연구에서 기지의 파손이 땅콩 모양의 형태를 띠는 것은 바로 이러한 이유라 할 수 있겠다.

Fig. 5는 충격체가 재반동 되는 시점의 지지 파손 형태를 나타낸다. 이 때의 충격 에너지는 약 6.5 J을 나타내었다. 전술한 대로, 기지의 파손은 충격지점의 반대면에서 굽힘에 의한 높은 섬유와 직각방향의 인장응력에 의해 가장 크게 발생하며, 접촉점에서는 국부적 Hertz 응력으로 인해 찌그러짐 현상을 나타내고 있다. 또한, 중앙면 근처에서는 높은 전단응력으로 인한 전단 파손이 발생되고 있으며, 접촉지점에서 하단부로 점점 넓어지는 경향을 나타낸다. 이것은 실험적 연구로부터 매우 타당한 결과라 할 수 있다.

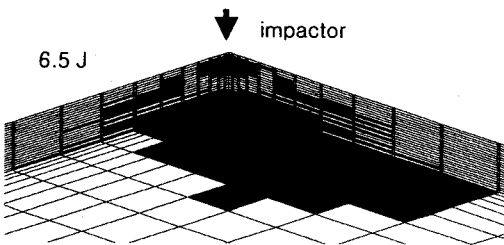


Fig. 5 Predicted matrix cracking of the laminated plate

3.2.2 층간분리 해석 결과

층간분리는 기지의 파손으로부터 가장 먼저 발생하게 된다. 이것은 기지의 파손면에서 매우 높은 전단응력에 의한 결과이며, 두께방향의 인장응력은 층간분리를 확대시키게 된다. 이에 따라 층간분리 역시 섬유와 직각방향으로 땅콩 모양의 양상을 띠게 된다.

본 연구에서는 이러한 층간분리의 개시, 진전 현상을 보다 실제적으로 모사하기 위해 새로운

파괴 기준을 적용하였다. 즉, 식 (4)~(6)에 제시한 바와 같이, 섬유와 직각방향의 인장응력으로 발생된 기지의 파손 영역은 동시에 층간분리로 발전하며, 두께방향의 압축응력은 층간분리의 진전을 막는다는 가정을 적용하였다.

Fig. 6은 새롭게 제안된 층간분리 파괴 기준을 이용하여 예상한 에너지별 층간분리의 진전 과정을 나타낸다. 충격 시간에 따라 에너지 레벨이 증가하면서, 층간분리는 중앙면 근처에서의 높은 층간 전단응력과 충격지점의 반대면에서의 지지 파손으로 인해 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

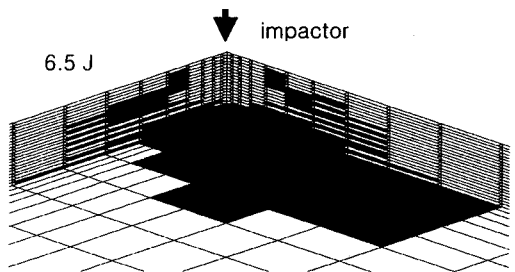
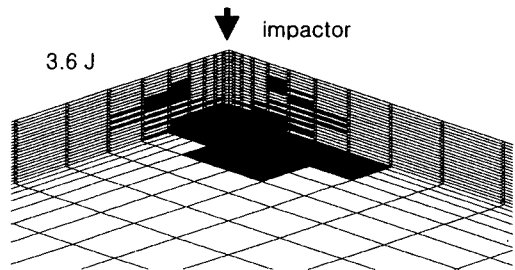
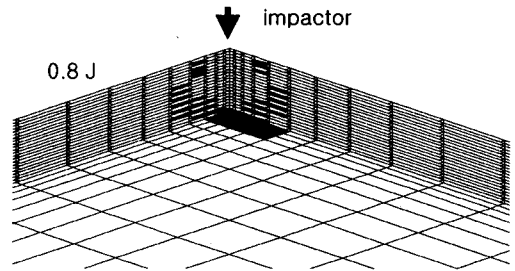


Fig. 6 Predicted delamination of the laminated plate

4. 결론

Chang-Chang⁽¹⁾의 지지파손 이론과 Brewer-lagace⁽²⁾의 층간분리 이론의 단점을 개선하여 저속충격에 의한 복합 적층판의 파손 양상을 예측하였다. Chang-Chang의 지지파손 이론에서는 두께방향의 전단응력(τ_{23})의 영향을 포함시켰으며, Brewer-lagace의 층간분리 이론에서는 두께방향의 양의 응력만이 층간분리를 진전시키며, 인장에 의한 지지파손은 바로 층간분리로 성장한다는 가정을 포함시켰다.

본 논문에서 새로 제안된 파괴기준에 의한 해석 결과를 검증하기 위해, Hou⁽¹⁰⁾ 등의 연구 결과와 비교, 고찰하였다. Fig. 7(a)는 Hou 등의 실험적 연구 결과로써, 6.5 J의 충격 에너지를 받은 적층판의 층간분리 형태를 나타낸다. 또한, Fig. 7(b)는 새롭게 제안된 파괴 기준을 이용하여 예측한 층간분리의 형태이다. 해석 결과 실험과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 새롭게 제안된 파괴 기준의 타당성을 얻을 수 있었다.



(a) Experimental result on delamination
(by Hou et. al.⁽¹⁰⁾)



(b) Predicted delamination by new criterion

Fig. 7 Comparison of experimental and numerical result on delamination

참고문헌

- (1) F. Chang and K. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, 1987, Vol. 21, pp. 834~855
- (2) 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
- (3) 이영신, 박웅, "고차전단변형이론에 의한 복합 재료 적층판의 저속충격응답," *대한기계학회 논문집*, 1990, Vol. 14, No. 6, pp. 1365~1381
- (4) 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
- (5) 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
- (6) F. Collombet, J. Bonini, V. Martin and J.L. Lataillade, "Three Dimensional Damage Prediction of Laminates under Low Velocity Impact," *Proceedings of ICCM-10*, A.Poursatip and K.Street, eds., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1995, Vol. V, pp. 631~638
- (7) K.S. Hung, L. Nilsson and Z.H. Zhong, "Numerical Studies on the Delamination Mechanism in Laminated Composites under Impact Loading," *Proceedings of ICCM-10*, A.Poursatip and K.Street, eds., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1995, Vol. V, pp. 623~630
- (8) 전제춘, "준등방성 복합적층판의 저속충격 손상에 관한 연구," 박사학위 논문, 충남대학교, 1996
- (9) Y.S. Lee, K.H. Kang and O. Park, "Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact," *Computers and Structures*, 1997, Vol. 65, No. 6, pp. 965~974
- (10) 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
- (11) E.R.Green, C.J.Morrison and R.K.Luo, "Simulation and Experimental Investigation of Impact Damage in Composite Plates with Holes," *Journal of Composite Materials*, 2000, Vol. 34, No. 6, pp. 502~521
- (12) HKS, ABAQUS User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1998