

부직포를 삽입한 Graphite/Epoxy 복합재료의 충격 특성

정성균 · 서유원 · 이승환
서울산업대학교 기계공학과

Impact Characteristics of Graphite/Epoxy Composite Materials with Non-woven Tissue

Seong-Kyun Cheong, Yu-Won Seo and Seung-Hwan Lee

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology,
Seoul 139-743, Korea

요 약

본 논문에서는 부직포를 삽입한 Gr/Ep 복합재료의 충격 흡수 특성을 연구하였다. 계면(interface) 층에 유리 부직포 또는 탄소 부직포를 삽입하여 복합적층판을 제작하였다. 저속충격 시험을 수행하였으며, 충격에 의한 층간분리(delamination)를 C-Scan과 현미경을 사용하여 관찰하였다. 실험결과 계면에 부직포를 삽입함으로써 충격에 의한 층간분리 면적이 감소함을 알 수 있었다.

Abstract

The characteristics of impact damage absorption of Gr/Ep composite materials with non-woven tissue are investigated in this paper. Composite laminates are made by inserting non-woven glass or carbon tissue between the interface layers. Low velocity impact test is accomplished and the impact induced delamination is examined by ultrasonic C-Scan and microscope observation. Experimental results show that the area of impact-induced delamination is reduced by inserting non-woven tissue between the interface of composite laminates

1. 서 론

지난 십여년간 복합재료는 높은 강성, 강도, 그리고 가볍다는 장점으로 인해 많은 발전을 가져왔다. 이 결과로 복합재료는 항공 우주분야의 중요 부분에 사용되었다. 반면에 몇 가지 단점을 들 수 있는데 그 중에서도 충격에 대한 특성을 예로 들 수 있다.

공구를 떨어뜨리거나, 날아가던 새와의 충돌로 인한 가벼운 충격으로도 보이지 않는 충격 손상을 받게 된다. 이러한 복합적층판으로 구성된 구조물이 외부로부터 저속충격을 받게 된 후 충격을 가한 쪽에서 표면을 육안으로 관찰하면 충격의 여부를 판정할 수 없는 경우가 많다. 이것은 복합적층판의 특성으로 일반 금속재료와 비교될만한 점일 것이다.

일반 금속재료는 탄성영역(elastic zone)을 초과하는 충격에너지를 외부로부터 받을 때 소성변형(plastic deformation)을 함으로서 에너지를 흡수하게 된다. 그러므로 소성변형 후 존재하는 영구변형을 통하여 외부로부터의 충격여부를 쉽게 확인할 수 있다. 그러나, 복합적층판에서는 이러한 소성변형 영역이 거의 없기 때문에 구조물의 변형이 탄성영역을 초과하면 바로 손상이 발생한다. 특히 저속 충격을 받은 쪽의 적층판 표면에는 거의 발생하지 않고 충격을 가한 반대쪽 면이나 내부에 층간분리(delamination)나 모재균열(matrix crack) 등의 손상 형태를 발생한다.¹⁾ 이러한 적층판의 손상은 부재의 기계적 성질 등을 저하시켜 구조물에 예기치 않은 문제를 일으키기도 한다. 따라서 복합재료의

충격특성을 개선하는 것은 구조물의 안전에 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 충격에 대한 특성을 향상시키기 위하여 부직포를 섬유 배양각이 바뀌는 계면에 삽입하여 하이브리드(hybrid) 복합 적층판을 제작하였다.²⁾ 중량을 자유 낙하시켜 적층판에 저속 충격을 가한 후 충격손상(damage)을 분석하였다.

2. 층간분리(delamination)

지금까지 많은 연구 결과들에 의하면 저속 충격을 받은 경우 각층의 섬유방향의 차이에 기인한 굽힘강성(bending stiffness)의 차이로 층간분리가 일어나고, 층간분리 현상은 일반적으로 땅콩모양을 하고 있으며, 계면 아래층의 섬유방향과 평행한 방향으로 진전한다고 보고되어 있다.^{1,3,4)}

Chester와 Clark⁵⁾의 연구에서는 층간분리의 모양이 땅콩모양인 이유, 층간분리 확장과 적층각과의 관계를 규명하였다. 먼저 이들은 Fig. 1과 같이 2플라이(ply)를 고려하였으며, 충격에 의한 굽힘을 받았다고 가정하였다. 위 플라이(upper ply)와 아래 플라이(lower ply)간에 인장이 발생하는 지역(A)에서는 위, 아래 플라이의 인장력에 의해 층간분리가 발생하고 아래 플라이의 방향의 계면을 따라 진전하게 된다. 다른 지역(B)에서는 플라이 상호간에 압축력이 발생하여 층간분리를 감소시킨다고 하였다. 또한 이들은 단순한 모델을 이용하여 몇 가지의 특성을 지적하였다. 첫째, 층간분리는 인접한 플라이의 섬유 각도에 의존한다고 하였다. 그래서 각도가 커지면 층간분리도 커진다고 예측하였다.

둘째, 손상된 플라이의 하중작용을 고려해 본다

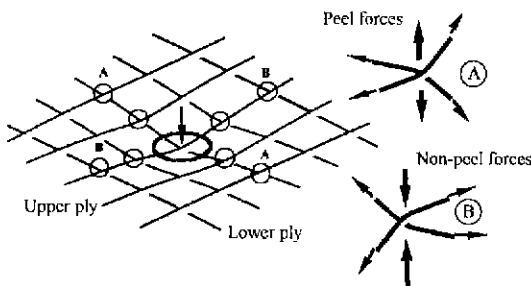


Fig. 1. Simple two-ply damage model.

면 충격이 가해지는 동안에 모재균열이 발생하게 된다. 플라이의 모재균열의 발생은 국부적인 응력 집중을 유발하게 되며 이 결과 층간분리를 형성하게 된다.

이러한 복합재료의 손상진전과정은 많은 부분이 모재균열과 층간분리의 형태로 나타나게 된다. 특히 초기 손상형태인 모재균열은 적층 구조에 의해서 최종 파단을 즉시 유발하지는 않으나 적층구조물의 강성을 저하시키고 균열 선단에서 유기 되는 층간응력으로 인해서 층간분리가 발생한다.

3. 실험

3-1. 시험편의 물성치와 형상

복합재료의 성형은 오토클레이브(autoclave)를 사용하였다. 사용된 적층판은 부직포를 삽입하지 않은 시험편(Laminate A), 유리 부직포를 삽입한 시험편(Laminate B) 그리고 탄소 부직포를 삽입한 시험편(Laminate C) 3종류를 제작하였으며, 적층 순서는 $[0_4/90_4]_s$ 으로서 Fig. 2와 같다. 충격시험편의 크기는 100×100 mm의 정사각형으로 제작되었다. 부직포는 Fig. 2와 같이 섬유의 각도가 변화되는 경계면에 삽입하였다. 실험에 사용된 부직포와 복합재료의 물성실험은 ASTM D-3039에 의거하여 실험하였으며, 부직포의 물성치는 Table 1과 같고, 탄소섬유 복합 적층판의 물성치는 Table 2에 나타내었다.^{2,6)} 여기서 E_i 과 X_i 는 섬유방향의 탄성계수

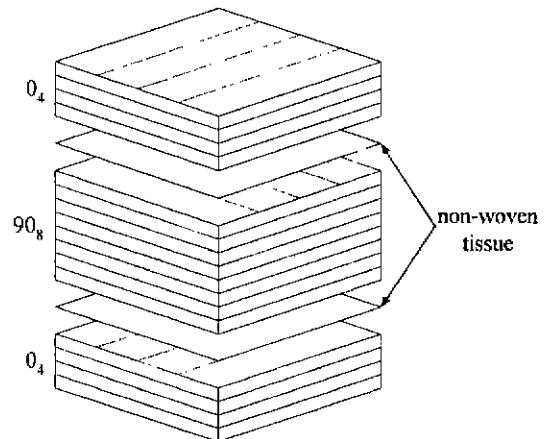


Fig. 2. Stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ laminates.

Table 1. Material properties of non-woven tissue

| | Young's Modulus (E) | Poisson's ratio (ν) | Tensile strength (σ_u) |
|-------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Non-woven glass tissue | 8.50 GPa | 0.43 | 93.6 MPa |
| Non-woven carbon tissue | 16.46 GPa | 0.50 | 177 MPa |

Table 2. Material properties of composite laminates

| E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | ν_{12} | G_{12} (GPa) | S (GPa) | X_t (MPa) | Y_t (MPa) |
|-------------|-------------|------------|----------------|---------|-------------|-------------|
| 124.8 | 7.80 | 0.31 | 4.62 | 173.0 | 1920 | 37.7 |

와 강도, E_2 와 Y_t 는 섬유 수직방향의 탄성계수와 강도를 나타낸다. ν_{12} 는 프이송비(poisson's ratio), G_{12} 는 전단계수, S는 전단강도이다.

3-2. 충격시험(Impact test)

중량 낙하시 충격 시험기(Dynatup-8250 drop weight tester)를 사용하였다. 각각의 적층판을 Fig. 3과 같이 클램프에 고정시키고 중량을 일정한 높이

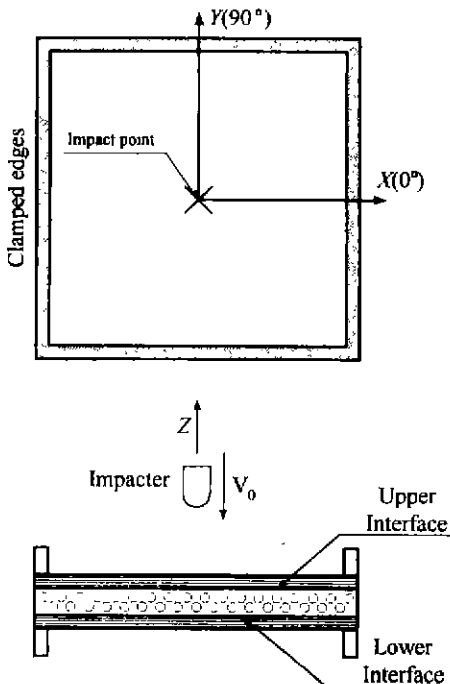


Fig. 3. Impact test of a $[0/90]_4s$ laminate.

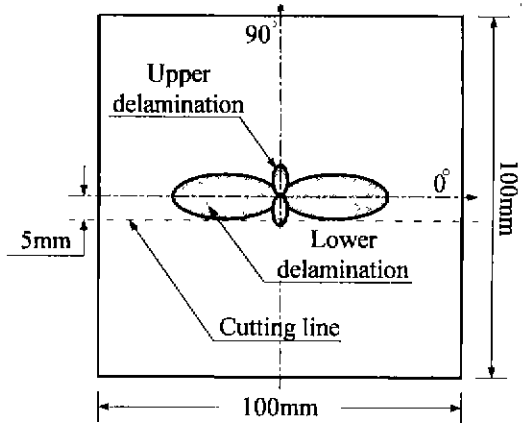


Fig. 4. Cutting line of specimen.

(90 mm)에서 자유 낙하시켜 시험편에 충격을 가하였다. 금속 충격체의 직경은 0.5 in의 반구형으로 되어있으며, 총질량은 2.73 kg이다. 시험편과 충돌 후 2차 충돌을 방지하는 장치(anti-rebound system)를 장착하였다.

실험 후 충격부의 손상은 C-Scan을 이용하여 손상부의 층간분리 면적을 확인하였다.⁷⁻⁹⁾ 또한 Fig. 4와 같이 시험편의 충격부에서 5 mm 떨어진 지점을 수평으로 절단하여 충격부까지 연마하였다. 연마된 면은 층간분리 양상을 관찰하기 위해서 광학현미경(versamet 3, union)으로 관찰하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4-1. 충격실험

각각의 적층판을 충격 시험기를 이용하여 충격을 가하였다. 모든 시험편에 대해서 2.3 J로 동일한 에너지를 공급하였다. Table 3에서는 각각의 적층판의 충격 후 측정된 최대값이다.

Table 3의 Laminate A는 최대하중이 낮으면서 더 큰 처짐을 보인다. 이러한 처짐량의 증가는 적층판에 더 많은 굽힘 응력이 작용하게 되어 충격을 가한 적층판의 아래면에 더 큰 굽힘 균열(bending crack)과 층간분리를 일으키리라 예상된다. 유리와 탄소 부직포를 계면에 삽입한 Laminate B와 C의 경우 부직포를 삽입하지 않은 Laminate A에 비해 가해지는 충격 하중에 더 큰 저항력을 갖고 있다. 그리고, 흡수에너지를 볼 때 Laminate B가 가장 적

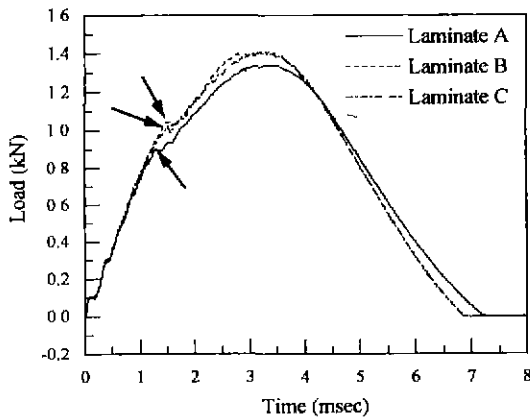
Table 3. Maximum value of impact test

| Laminates | Velocity (m/s) | Deflection (mm) | Load (kN) | Impact Energy (J) | Absorbed Energy (J) |
|-----------|----------------|-----------------|-----------|-------------------|---------------------|
| A | 1.302 | 3.085 | 1.339 | 2.400 | 1.611 |
| B | 1.291 | 2.943 | 1.410 | 2.352 | 1.504 |
| C | 1.303 | 2.991 | 1.408 | 2.398 | 1.608 |

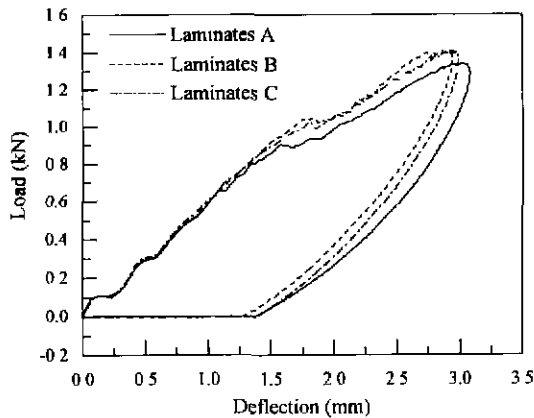
으며, 이것은 탄성에 의한 복원력이 다른 적층판에 비해서 우수함을 알 수 있다.

Fig. 5는 충격이 가해지는 동안의 하중-시간 곡선과 하중-변위 곡선을 나타내었다.

특이할 사항은 Fig. 5(a) 곡선에서 1 msec에서 1.5 msec 사이에서 하중이 증가하지 않는 현상을



(a) Load vs. time.



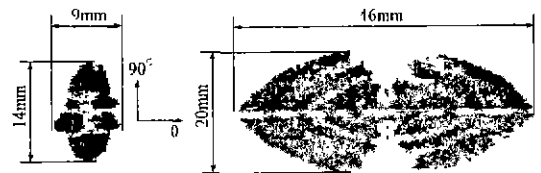
(b) Load vs. deflection.

Fig. 5. History diagram of impact test.

나타내고 있다. 이 지점은 충격과정 중에 발생한 복합적층판의 손상이 어느 순간에 이르러 전파됨으로서 적층판의 처짐이 순간적으로 증가하여 이로 인해 충격체와 평판사이의 접촉력이 감소하기 때문이다.³⁾ Laminate A에서는 0.9 kN 부근에서 처음으로 나타나지만 부직포를 삽입한 Laminate B와 C는 1.1 kN 부근에서 일어난다. 이는 1.1 kN 이하의 하중 구간에서는 적층판의 손상을 일으키지 않는 구간으로 보인다. 이 실험 결과로 알 수 있는 것은 초기 손상 하중이 증가됨을 나타내며, 이것은 부직포를 삽입한 적층판이 충격에 의한 내부 결함의 발생에 대한 초기 저항력을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 하중과 처짐과의 컴플라이언스(compliance)를 나타낸다. 각각의 곡선으로 둘러싸인 면적은 적층판이 흡수한 에너지를 나타낸다. 부직포를 삽입한 경우에는 같은 에너지의 공급에 대해서 더 높은 하중에 견디며, 최대 처짐량이 감소함을 볼 수 있다.

4-2. 층간분리 관찰

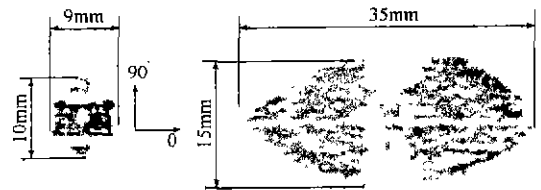
층간분리 영역의 관찰은 C-Scan(Mi-Scope, Hitachi)을 이용하여 적층판의 섬유 배양각이 변화되는 각각의 계면에 발생된 층간분리의 면적을 관찰



(a) Upper

(b) Lower

Fig. 6. Projected delamination of Laminate A by C-Scan display.



(a) Upper

(b) Lower

Fig. 7. Projected delamination of Laminate B by C-Scan.

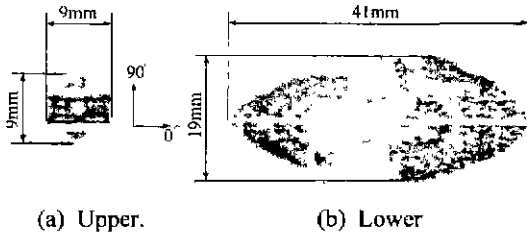


Fig. 8. Projected delamination of Laminate C by C-Scan.

Table 4. Delamination area of [0₄/90₄]_n laminates

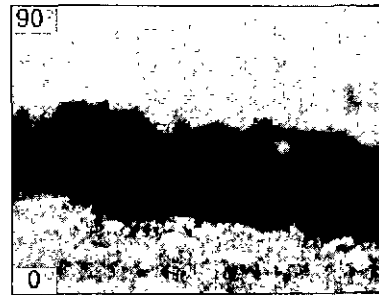
| Laminate | Region | W (mm) | H (mm) | Damage area (mm ²) | Total damage (mm ²) |
|----------|--------|--------|--------|--------------------------------|---------------------------------|
| A | Upper | 9 | 14 | 98.96 | 821.52 |
| | Lower | 46 | 20 | 722.56 | |
| B | Upper | 9 | 10 | 70.68 | 483.01 |
| | Lower | 35 | 15 | 412.33 | |
| C | Upper | 9 | 9 | 63.62 | 675.45 |
| | Lower | 41 | 19 | 611.83 | |

하였다. Figs. 6, 7, 8은 각각의 적층판에 대한 C-Scan 이미지이다. 각각의 시험편의 윗 경계면 (upper interface)에서는 작은 크기의 층간분리가 90° 방향으로 확장된 형상이 관찰되며, 아래 경계면 (lower interface)에서는 큰 층간분리가 0° 방향으로 확장됨을 관찰 할 수 있다. 각각의 계면에서 발생하는 층간분리는 계면 윗층의 횡방향의 모재균열로 인해 시작되며, 계면 아래층의 섬유방향을 따라서 진전하게 된다.

층간분리의 형상을 타원으로 가정하고 장축의 길이를 L, 단축의 길이를 W라 할 때 층간분리의 면적 $A = \pi WL/4$ 라고 할 수 있다. Table 4에서는 각각의 시험편에 발생한 층간분리 영역의 면적을 나타내었다. 부직포를 삽입하지 않은 Laminate A보다 부직포를 삽입한 Laminate B, C에서 층간분리 영역이 감소함을 알 수 있다. 또한, 유리와 탄소 부직포를 삽입한 Laminate B와 Laminate C를 비교해 볼 때 유리 부직포를 삽입한 Laminate B가 충격에 의한 층간분리 영역이 더 많이 감소함을 보이고 있다. 전체적인 입력 에너지는 거의 같았다. 하지만 층간분리 영역이 부직포를 삽입한 경우에 상당히 감소함을 보이고 있다.



(a) Laminate A (×500)



(b) Laminate B (×500)



(c) Laminate C (×500)

Fig. 9. Delamination surface of laminates.

그것은 재료내부에 다른 형태로 에너지가 흡수되었다고 생각할 수 있다. 그래서 광학 현미경을 사용하여 층간분리의 형상을 관찰하였다. Fig. 9는 층간분리가 발생한 계면을 광학현미경으로 촬영한 사진이며, 아래 계면의 90° 층과 0° 층 사이에 층간분리의 모습이다. Fig. 9(a)는 부직포를 삽입하지 않은 시험편의 층간분리 면, (b)와 (c)는 유리와 탄소 부직포를 삽입한 시험편의 층간분리 면의 사진이다. 층간분리된 계면을 비교해 볼 때 부직포를 삽입한 경우에 표면의 요철이 더 심하여 에너지를 더 많이 흡수한 것으로 보인다.

5. 결 론

복합적층판은 외부 충격에 대해서 낮은 응답 특성을 가지며 내부에 보이지 않는 손상을 보이게 된다. 본 연구에서는 복합적층판의 낮은 충격응답특성을 개선하기 위해 적층판의 섬유배양각이 변화되는 계면에 부직포를 삽입하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부직포를 삽입한 Laminate B와 C에서는 초기 충격 손상 하중이 증가되었으며 이에 따른 적층판의 최대 처짐량도 감소하였다.

2. C-Scan을 통한 비파괴적 이미지 관찰시 층간 분리 영역이 상당히 감소함을 알 수 있었으며, 잔류 강도의 증가를 예상할 수 있다.

3. 층간분리의 형상은 요철이 심하게 되고 이로 인하여 층간분리의 면적은 작을지라도 에너지를 많이 흡수하는 것으로 예측된다.

감사의 글

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

Reference

- 1) Choi, H. Y. and Chang, P. K., "A Model for Predicting Damage in graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity point Impact", *J. Composite Materials*, **26**(14), 2134-2169 (1992).
- 2) Cheong, S. K., Lee, S. H. and Lim, S. G., "A Study on the Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Laminates with Non-woven Carbon Mat", First Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Osaka, Japan, 420 (1998).
- 3) 고종인, "저속충격에 의한 복합적층판의 손상 해석", KAIST 석사논문, (1990).
- 4) 김문생, 박승범, "적층복합판의 충격에 의한 모계 균열 및 층간분리에 관한 연구", 대한기계학회 논문집(A), **21**(2), 317-326 (1997).
- 5) Chester, R. J. and Clark, G., "Modeling of Impact Damage Features in Graphite/Epoxy Laminates", *Damage Detection in Composite Materials*, ASTM STP 1128, American Society for Testing and Materials, 200-212 (1992).
- 6) 이승환, 서유원, 정성균, 임승규, "부직포를 삽입한 Gr/Ep 복합적층판의 기계적 특성평가", 춘계 한국항공우주공학회 논문집, 266-269 (1998).
- 7) Steiner, K. V., "Detect Classification in Composites Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation Technique", *Damage Detection in Composite Materials*, ASTM STP 1128, American Society for Testing and Materials, 72-84 (1992).
- 8) Kaczmarek, H., "Ultrasonic Detection of Damage in CFRPs", *J. Composite Materials*, **29**(1), 59-95 (1995).
- 9) 권대훈, "초음파 탐상법을 이용한 복합 적층판의 저속충격손상 평가", 추계 복합재료 학회 논문집, 63-66 (1997).