

저속 충격을 받는 적층판의 충격거동과 손상에 관한 연구

안국찬[†] · 김규수* · 박승범** · 황병선**

진주산업대학교 기계설계공학과 · *진주산업대학교 대학원 기계설계공학과 · **한국기계연구원
(2001. 9. 18. 접수 / 2002. 3. 14. 채택)

A Study on the Impact Behavior and Damage of Laminated Composite Plates Subjected to the Low-Velocity Impact

Kook-Chan Ahn[†] · Kyu-Su Kim* · Seung-Bum Park** · Byung-Sun Hwang**

Department of Mechanical Design Engineering, Chinju National University

*Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School of Chinju National University

**Korea Institute of Machinery & Materials

(Received September 18, 2001 / Accepted March 14, 2002)

Abstract : This paper presents the impact behavior and damage of laminated composite plates subjected to the low-velocity impact. For this purpose, a pendulum impact test for impact behavior and C-scan for impact damage are done. Test materials are carbon/epoxy laminated composite plates and stacking sequences [0/90]_s, [0/45₂/-45]_s, [45₂/-45/90]_s, [0/45/-45/90]_s and [0/26/51/77/-77/-51/-26/0].

Key Words : low-velocity impact, impact behavior, impact damage, composite plates, C-scan

1. 서 론

기존 금속 재료에 비해 높은 무게비 강도(specific strength) 및 강성도(modulus)와 섬유 방향 및 적층 순서의 변화에 따른 유동적인 이방성(anisotropic)의 기계적 성질을 지니는 흑연/에폭시(graphite /epoxy), 유리/에폭시(glass/epoxy), 탄소/에폭시(carbon/epoxy)와 보론/에폭시(boron/epoxy) 등과 같은 복합재료(composite material)는 자동차 산업 및 항공우주산업 등 방위산업의 발달과 각종 스포츠 및 레저용품 등의 급격한 증가 추세에 따라 많이 사용되고 있다. 이러한 복합재료는 부품의 무게 감소 외에 긴 피로 수명, 우수한 진동 감쇠 특성 및 내식성, 전기 절연성이 우수한 점 등 여러 면에서 장점을 지니고 있다.

그러나, 두께 방향에 대한 상대적인 강화(reinforcement)의 결핍으로 외부 물체의 충격에 매우 약하며 손상을 입기 쉽다는 점이 최근의 주요한 관심이 되

고 있다. 특히 이러한 복합 재료는 외부 물체의 충격을 받기 쉬운 자동차, 항공기, 전투기와 각종 차량의 적재함 구조물 등에 주로 사용되기 때문에 외부 물체가 상대적으로 작은 경우의 충격손상은 접촉면을 포함하는 작은 영역에 한정되며 손상 정도는 명백히 외부 물체와 구조물 사이의 접촉력에 의존하므로 이 접촉력과 이에 해당하는 변형 및 응력의 정확한 계측 및 해석 방법의 연구는 충격손상을 예측하기 위하여 필요하다.^{1,2)}

동적 접촉력의 직접적 측정은 넓은 범위의 충격 변수와 충격 현상은 정하중의 경우와는 달리 비록 적은 양의 충격에너지(impact energy)라 하더라도 복합재 구조물은 내부에 손상을 유발한다. 복합재에 가해지는 충격에너지는 충격지점의 국부적인 영구 압입, 섬유의 파단, 단층의 모재균열, 경계면의 층간 분리 및 적층판의 관통 등과 같은 손상을 일으키는 데 소모되며, 이것은 초기 파괴 거동과 관련이 있기에 매우 중요하므로 외부 물체의 충격을 받게 되는 복합재 구조물을 설계할 때에 필히 고려하여야 할 충격거동 및 손상에 관한 연구는 아주 중요한 과제

[†]To whom correspondence should be addressed.
kcahn@chinju.ac.kr

이다.³⁻⁷⁾ 따라서 충격시 복합재에 작용하는 충격하중과 충격에너지의 응답 특성은 복합재의 손상을 평가하는데 아주 중요하다.

본 연구에서는 횡방향으로 충격을 받는 적층판(laminated composite plates)의 충격거동(impact behavior)을 연구하기 위하여, 진자식 충격 시험(pendulum impact test)을 행하여 충격시 탄소/에폭시 적층판에 작용하는 충격하중과 충격에너지 응답을 구하였으며, 적층판 내부에 발생한 손상을 C-scan으로 관찰하였다. 이로부터 적층판에 작용하는 충격하중과 충격에너지가 충격거동과 손상에 미치는 영향등을 연구하였다.

2. 실험

2.1. 충격시험편

본 연구의 충격실험에 사용된 복합재료는 탄소/에폭시 적층판이다. 시험편은 두께 1mm, 가로 76 mm, 세로 76mm의 크기를 가지는 정방형 판이며, 충격실험시 Fig. 1과 같이 직경 50mm의 원환에 의해 지지된다. 그리고 시험편은 8개의 단층이 서로 임의의 각도로 적층된 [0/90]₄, [0/45₂/-45]_s, [45₂/-45/90]_s, [0/45/-45/90]_s, [0/26/51/77/-77/-51/-26/0]의 적층 형태를 가지고 있다.

2.2. 충격시험 장치 및 방법

본 연구의 충격시험에 사용된 충격시험 장치는 진자식 충격시험기(pendulum impact tester)이며, 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 진자식은 낙하식에 비하여 적층판에 충격을 가할 때 가속도가 없는 순수한 충격속도를 가할 수 있는 장점이 있다. 시험에

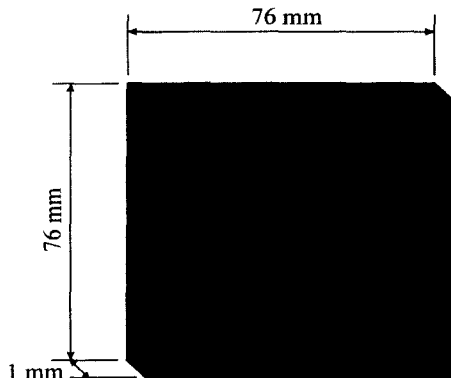


Fig. 1. Dimension of impact specimen

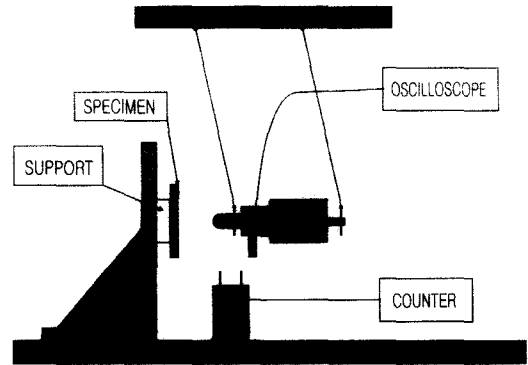


Fig. 2. Pendulum impact tester

사용된 충격체의 질량은 5.867kg이며, 높이를 조절함으로써 충격속도를 변화시켜 적층판에 가해지는 충격에너지를 변화시켰다. 충격체의 머리(nose) 부분은 50mm의 반경을 가지는 반구 형상을 가진다. 충격체가 적층판에 충격을 가하기 직전의 충격속도를 측정하였으며, 충격 후 적층판과 충격체 사이에 발생하는 접촉력, 즉 충격력의 변화를 로드 셀(load cell)로부터 구하였다. 그리고 시험에서 얻어진 시간 변화에 대한 충격력 데이터로부터 충격체의 충격속도와 적층판에 가해지는 충격에너지 변화를 구하였으며, 충격후 적층판에 흡수된 에너지를 구하였다.⁸⁾ 적층판에 가해지는 충격에너지는

$$E_i = \frac{1}{2} m V_i^2 \quad (1)$$

이 된다. 여기서 m 은 진자의 질량이고, V_i 는 진자의 초기 속도이다.

임의의 시간 t 에서의 충격체의 속도는

$$V(t) = V_i - \frac{1}{m} \int_0^t F(t) dt \quad (2)$$

이며, 시간 t 에서 적층판에 작용하는 에너지는

$$E(t) = E_i - \frac{m}{2} V(t)^2 \quad (3)$$

이다. 그리고 충격 완료후 적층판에 흡수된 에너지는

$$E_{loss} = \frac{m}{2} (V_i + V_r)(V_i - V_r) \quad (4)$$

이다. 여기서 V_r 은 진자의 최종 속도이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 [45_y/45/90]_s 적층판에 대하여 충격 후 시간의 경과에 따른 충격력과 충격에너지의 변화를 나타내었다. 적층판에 가해지는 충격력은 판과 충격체의 접촉이 진행됨에 따라 하중이 증가하는 부하과정을 거친후 최대값에 도달한 후 하중이 감소하는 제하과정을 이루며, 제하과정에서는 접촉지연이 발생하였다.

비교적 작은 1,459J의 충격에너지가 적층판에 작용하는 경우에는 130N의 충격력에서 최초의 load drop이 발생하였으며, 이는 Fig. 4(a)와 같이 적층판에 국부적인 압입과 층간분리가 거의 진전되지 않은 손상만 존재하였다. 그리고 2,319J 크기의 충격에너지를 가한 경우에는 220N의 충격력에서 최초의 load drop이 발생하였으며, 이는 Fig. 4(b)와 같이 적층판의 충격점을 중심으로 다소 큰 층간분리 손상영역이 존재하였다. 또한 5,415J의 큰 충격에너지가 가해진 경우에는 최초의 load drop이 520N에서 발생하였으며, 충격력의 크게 상승하는 도중인 2,470N의 충격력에서 매우 큰 load drop이 발생하였다. 이는 충격 후 적층판에서는 매우 심각한 손상의 형태인 충격체에 의한 관통이 발생하였다.

임의의 적층형태에 대하여 충격에너지의 변화에 대한 적층판에 작용하는 최대 충격력과 load drop이 발생하는 충격력을 Fig. 5에 나타내었다. 최초의 load

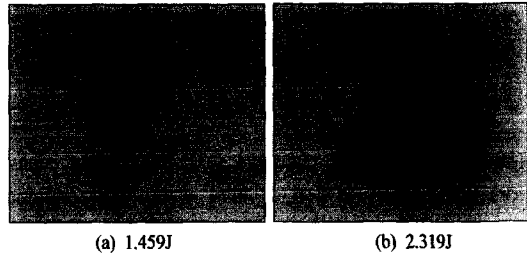


Fig. 4. C-scan photograph of damaged [45/45/-45/90]_s specimen

drop은 충격에너지의 크기에 관계없이 150~450N의 충격력 범위에서 발생하였으며, 5J 이상의 충격에너지가 작용한 충격에서는 2,100~2,700N의 충격력 범위에서 급속한 load drop이 추가로 발생하였다. 이러한 초기의 load drop은 적층판의 단층에 모재균열이 발생하여 서로 인접한 단층과의 경계면에 층간분리를 일으키며, 충격력이 계속 증가함에 따라 층간분리가 진전된다. 충격에너지가 큰 경우에서의 추가적인 급속한 load drop이 발생한 후 충격에너지가 적층판의 관통과 파손을 일으키는데 소요되어, 충격 후 적층판에 큰 손상을 일으키게 된다. 그리고 추가적인 load drop이 발생하지 않는 비교적 작은 에너지의 충격에서는 적층판에 작용하는 최대 충격력의 크기는 충격에너지의 크기에 거의 비례하였다.

적층판에 가해지는 충격에너지는 적층판의 변형에너지의 형태로 흡수되어 충격후 완전히 회복되어야 하지만, 적층판에 영구적인 손상이 발생하는 경

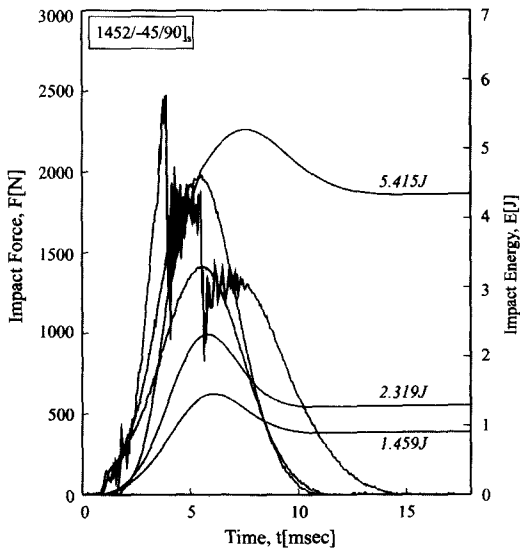


Fig. 3. Impact force and energy histories

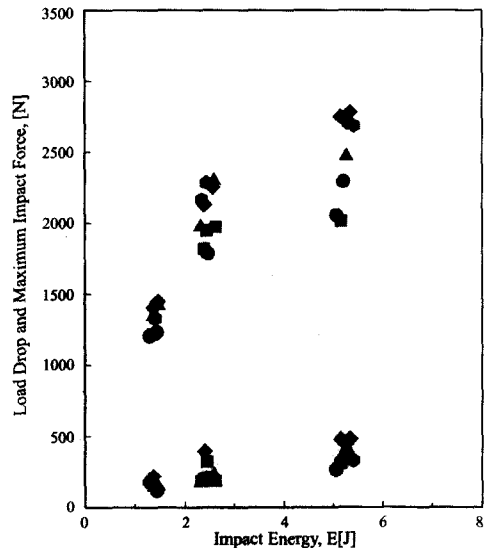


Fig. 5. Load drop and maximum force

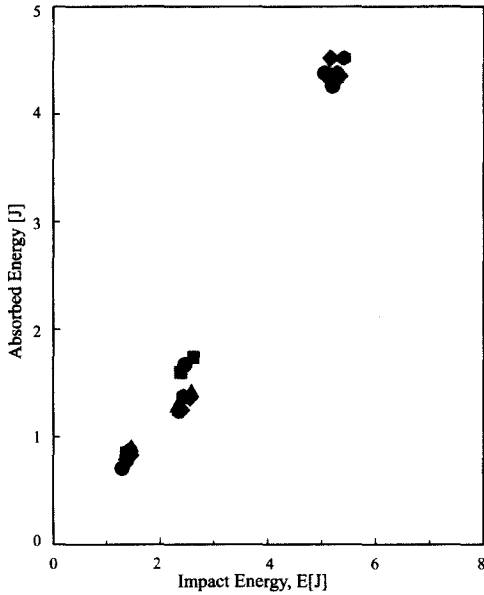


Fig. 6. Energy absorption

우 일부가 손상을 일으키는데 소모되고 남은 에너지만 회복된다. 임의의 적층형태에 대하여 적층판에 손상을 발생시키는데 소모된 에너지, 즉 흡수에너지 (absorbed energy)의 크기를 Fig. 6에 나타내었다. 적층판에 관통이 발생하지 않는 충격에너지 범위에서는 충격에너지의 크기에 대하여 흡수에너지의 크기가 비례하였으며, 이 소모되는 에너지의 대부분은 층간분리 손상을 일으키는데 소요되는 것으로 생각된다. 그리고 적층판에 관통이 발생한 경우에는 관통이 발생하기 이전의 층간분리 손상을 일으키는데 필요한 에너지 외에도 관통을 일으키는데 필요한 에너지가 추가로 소모되어 더욱 큰 흡수에너지로 나타났다.

이와 같이 적층판에 나타나는 손상의 형태는 충격시 가해지는 충격에너지의 크기와 관계가 있으며, 관통이 발생하지 않은 충격에너지에 대하여 적층판에 발생한 손상을 C-scan을 통하여 층간분리 손상의 크기를 구한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과 각 적층형태에 대하여 손상의 크기는 충격에너지에 비례하며, 적층형태에 따라 손상의 크기는 다음을 알 수 있었다.

4. 결 론

횡방향으로 충격을 받는 적층판의 충격거동과 충

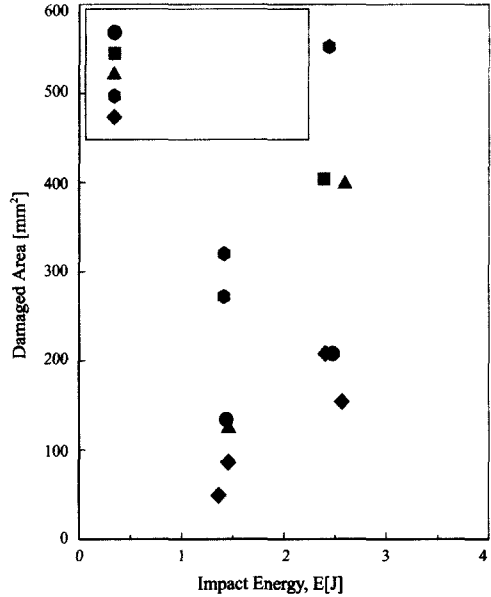


Fig. 7. Damaged area and impact energy

격손상을 연구하기 위하여, 진자식 충격 시험시 적층판에 작용하는 충격하중과 충격에너지 응답 특성을 연구한 결과는 다음과 같다.

충격에 의해 적층판에 작용하는 충격하중과 충격에너지는 충격 손상을 지배하는 중요한 특성이다. 적층판에 손상이 발생하는 경우에 손상의 형태에 따른 고유의 충격하중 load drop이 발생하였다. 적층판에 작용하는 최대 충격력은 충격에너지의 크기에 비례하였으며, 적층판의 충격 손상인 층간분리의 크기는 적층판에 흡수된 에너지에 비례하였다.

본 연구 결과는 산업체에서의 첨단재료 설계, 군사적 목적 및 레저용 등 복합재를 이용한 초기 안전 설계 및 제작을 위해 광범위하게 이용될 것이다.

참고문헌

- 1) 안국찬, 김문생, 김규남, 저속 충격을 받는 적층 복합재의 응력과 전파에 관한 연구, 대한기계학회논문집, Vol. 13, No. 1, pp. 9~19, 1989.
- 2) 안국찬, 박형렬, 유한요소법에 의한 등방성과 이방성 재료의 저속 충격해석, 산업안전학회지, Vol. 16, No. 1, 2001.
- 3) W. Goldsmith, Impact, Edward Arnold Ltd., London, 1960.
- 4) ASTM, Foreign Object Impact Damage to Com-

- posites, STP568, 1973.
- 5) B. V. Sankar and C. T. Sun, Low-Velocity Impact Response of Laminated Beams Subjected to Initial Stresses, Vol. 23, No. 12, 1962.
 - 6) J. S. Kook, et al, Load and Strain Histories for CFRP Laminates under Low-Velocity Impact, JSME Int'l Journal, Vol. 35, No. 2, 1992.
 - 7) E. Wu, K. Shyu, Response of Composite Laminates to Contact Loads and Relationship to Low-Velocity Impact, J. of Composite Materials, Vol. 27, No. 15, 1993.
 - 8) P. O. Sjöblom and J. T. Hartness, On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials, J. of Composite Materials, Vol. 22, 1988.