

곡률변화가 CFRP 적층셀의 관통특성에 미치는 영향

조영재*, 이상훈+, 김영남**, 양인영**

The Effects of Curvature Change on Penetration Characteristics of CFRP Laminate shell

Young Jea Cho*, Sang Hoon Lee+, Young Nam Kim**, In Young Yang**

Abstract

Currently, carbon-fiber reinforced plastics(CFRP) are widely used in both space and civil aircraft due to their superior stiffness and strength to weight ratios compared to conventional metallic materials. This paper is to study the effects of curvature and stacking sequence on the penetration characteristics of composite laminated shell. And were performed to investigate the penetration characteristics of composite laminated shells by the oblique impact. They are stacked to $[0_3/90_3]_s$, $[90_3/0_3]_s$ and $[0_2/90_3/0]_s$, $[90_2/0_3/90]_s$ their interlaminar number two and fore. They are manufactured to varied curvature radius ($R=100,150,200\text{mm}$ and ∞). When the specimen is subjected to transverse impact by a steel ball, the velocity of the steel ball was measured both before and after impact by determining the time for it to pass two ballistics-screen sensor located a known distance apart. In general, the critical penetration energy interface decrease and slope angle on the impact surface increased. $[0_3/90_3]_s$ and $[0_2/90_3]_s$ specimens higher than $[90_3/0_3]_s$ and $[90_2/0_3/90]_s$ specimens.

Key Words : Curvature(곡률), Stacking sequence(적층구성), Oblique Impact(경사충돌), Critical Penetration Energy(임계관통에너지)

1. 서론

선진 복합재료인 탄소 섬유강화 플라스틱 (이하 CFRP)일반 구조용 재료보다 비강성 및 비강도가 우수하여 경량화가 요구되는 자동차산업분야, 조선산업분야, 일반산업분야 등 구조용 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 적층복합재 구조를 실용화할 경우

가장 큰 문제점은 금속재와는 달리 횡방향 충격하중(transverse impact)에 약하다는 점이다. 또한, 적층복합재를 구조 경량화 수송기계의 구조부재에 적용하기 위해서는 먼저 횡방향 충격하중에 따른 충격거동, 손상해석 및 관통특성등의 규명이 필수적이며 특히, 실제 구조부재의 형상에 가장 가까운 곡면셀의 형태를 갖는 적층복합재 셀의 충격실험 및 관통실험등이 선행되어야 한다.

CFRP는 충격시 역학적 거동이 매우 복잡 하여 섬유와 모재의 파괴, 섬유의 파단,

* 주저자, 조선대학교 기계설계학과 (yj8523@hanmail.com)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학부

++ 조선대 기계정보공학과

적층계면에 있어서의 층간박리 등 여러 가지 요소가 복합적으로 동시에 작용한다. 또한, 손상의 크기 및 형태는 충격체의형상, 질량, 속도 및 복합재료 자체의 적층구성에도 관계되며, 충격에 따른 손상은 재료가 가진 잔류강도를 현저히 저하시킨다. 이러한 문제로부터 복합재료를 실용화 시키고, 그에 대한 안전성 및 신뢰성의 보증을 위해 충격강도 및 손상허용성 평가등에 대한 연구결과들이 발표되었다. 따라서 본 연구에서는 실제 수송기계 부재에 복합재 쉘을 적용시키기 위한 기초자료를 확립하기 위해 CFRP 적층셸을 제작한후 에어건에 의한 관통실험을 통하여 최외층각도 변화에 따른 관통특성 및 경사충돌에 따른 관통특성을 고찰하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용된 시험편의 적층구성은 $[0_3/90_3]_S$, $[0_2/90_3/0]_S$, $[90_3/0_3]_S$, $[90_2/0_3/90]_S$ 로서 2계면 구조와 4계면 구조를 갖도록 하여 총 12ply로 적층하였다. 또한, CFRP 적층셸이 실제 항공기 날개에 일반적으로 적용되는 곡률반경 $R=100, 150, 200\text{mm}$ 를 갖는 시험편을 제작하였다. Fig. 1은 2계면 시험편의 최외층각도 변화에 따른 적층 방법을 나타냈으며 Fig. 2는 4계면 시험편의 최외층각도 변화에 따른 적층방법을 나타냈다. 시험편 제작에 사용된 복합재료는 한국 화이바(주)의 일방향 프리프레그 CU125NS를 사용하였으며 진공백 성형과정을 통해 오토클레이브를 이용하여 제작하였다.

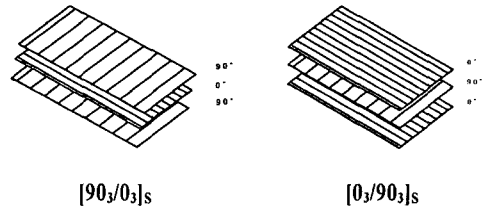


Fig. 1 Schematic of a 2-interface laminate stacking sequence

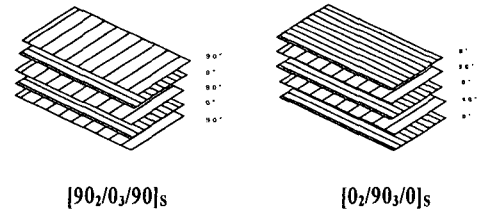


Fig. 2 Schematic of a 4-interface laminate stacking sequence

Table 1 The material properties and laminate strength

Types Characteristics	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy#2500)	Prepreg Sheet (CU125NS)
Density [kg/m ³]	1.83×10 ³	1.24×10 ³	-
Tensile Strength [Gpa]	4.89	0.08	2.53
Elastic Modulus [GPa]	240	3.60	138
Breaking Elongtion [%]	2.1	3.0	1.7
Poisons ratio	-	-	0.30
Resin Content	-	-	33[%Wt]
Curing Temperature [°C]	-	130	130°C×90min

Table 1은 프리프레그 시트의 물성치이다.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치 구성은 Fig.3에 나타낸 것과 같이 공기를 압축시키는 에어 콤퓨레서(air compressor)와 에어건 압력

을 조절하는 게이지, 강구속도를 측정하는 ballistic screen sensor 및 오실로스코프와 시험편 고정지그로 구성되어있다.

시험편을 고정한 지그는 시험시 곡률셀과 평판셀의 모든 경계조건을 만족시킬 수 있는 지그를 사용하는 것이 중요하다. 따라서 ASTM D-3736의 평판용지그를 참고하여 곡률반경 R=200, 150 및 100mm 곡면에 맞는 지그를 제작하였다. 또한 관통시 시험편의 변형에 의한 미끄러짐을 최소화하고 충격시 전단파에 의한 진동으로 에너지가 손실되는 것을 방지하기 위한 제진대의 역할로 고무패드를 지그 사이에 위치 시켰다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 지그 형상이다.

측정된 속도로부터 관통직전의 운동에너지와 관통후 운동에너지를 구할 수 있으며, 관통 실험후 시험편의 내부에 발생한 섬유파단 및 층간크랙, 층내크랙등을 관찰하기 위해 본 연구에서는 고해상도 디지털 카메라를 이용하였다.

경사충돌에 의한 관통시험은 제작된 지그를 각도가 표시된 정반위에 전자석 척(magnetic chuck)을 이용하여 고정시켰으며, Fig. 2에 나타내 것과 같이 각도를 변화주어 관통실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 최외충각도 변화에 따른 관통특성

최외충각도 변화에 따른 관통특성을 알아보기 위해 충격속도의 변화를 주어 각 시험편에 대한 관통실험을 행하였다. Figs. 6과7에 최외충각도 변화에 따른 임계관통에너지를 나타냈다. x 축에 관통 전 운동에너지 y 축에 관통 후 운동에너지를 대입하고 선형

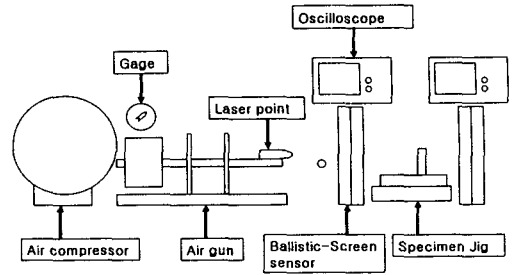
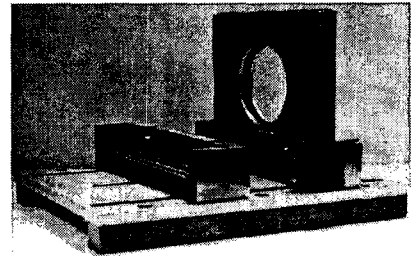
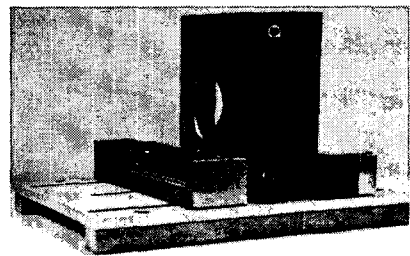


Fig. 3 Schematic diagram of impact test apparatus



(a) Flat-plate fixture



(b) Curved shell fixture

Fig. 4 The fixtures for specimens

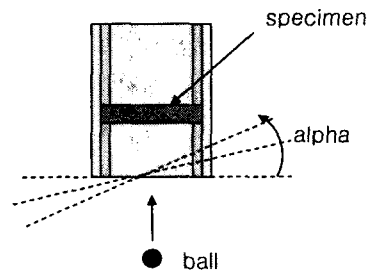


Fig. 5 The penetration experiment under oblique impact

커브피팅한 x축상에 위치한 ●는 시험편의 관통에 필요한 최소에너지인 임계관통에너지를 나타낸다. Figs. 6과 7을 보면 최외층 각도가 0°인 시험편이 90°인 시험편 보다 임계관통에너지가 높게 나타났다. 이는 관통저항력에 영향을 미치는 인자 중 하나는 굽힘이며, 또 하나는 전단이다. 그러나, 저속충격실험에 있어 굽힘에 대한 영향을 많이 받는 반면, 본 연구에서와 같이 관통실험에 있어서는 그 영향은 미소하여, 전단에 기인하게 된다. 따라서, 적층셀의 두께에 대한 중심으로 갈수록 전단 응력이 집중되며 0°로 적층된 레이어가 중심에 위치한 것보다 90°로 적층된 레이어가 위치하였을 경우 더 높은 전단 저항력을 갖는다.

Fig. 9는 곡률 R=150의 2계면을 가지는 최외층 각도가 90°인 시험편과 0°인 시험편을 절단한 단면이다. 또한, Fig. 10은 곡률 R=150의 4계면을 갖는 최외층각도가 90°인 시험편과 0°인 시험편의 단면을 나타냈다. 모든 시험편에 있어 관통에 따른 파괴패턴은 층간크랙(interlaminar crack), 층내크랙(intralaminar crack) 및 라미나 파단(laminar fracture)등을 포함하였다. CFRP 적층셀에서 가장 중요한 크랙은 층간크랙이다. 시험편의 단면을 보면 2계면을 갖는 시험편인 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 첫 번째 계면에서 가장 큰 층간크랙을 보여주고 있으며 90°인 시험편은 두 번째 계면에서 가장 큰 층간 크랙을 보여주고 있다. 또한, 4계면의 시험편인 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 세 번째 계면에서 최외층각도가 90°인 시험편은 네 번째 계면에서 가장 큰 층간크랙을 보여주고 있다.

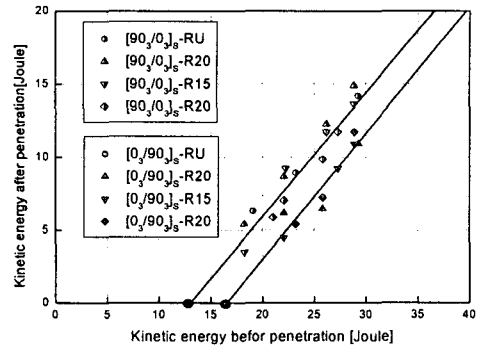


Fig. 6 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0_0/90_0]_s$, $[90_0/0_0]_s$

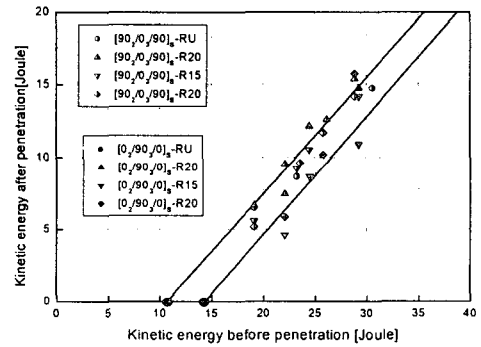


Fig. 7 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0_2/90_0/0_0]_s$, $[90_2/0_0/90_0]_s$

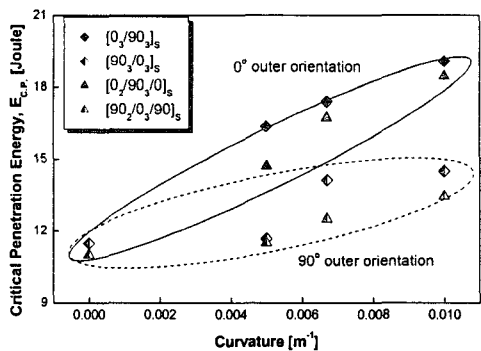
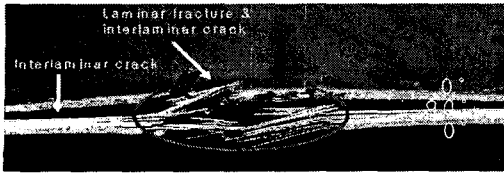
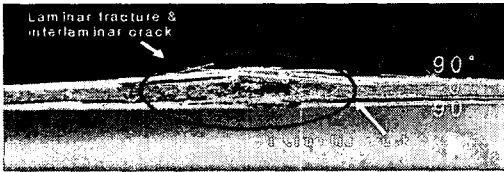


Fig. 8 Critical penetration energy versus curvature



(a) $[0_3/90_3]_s$

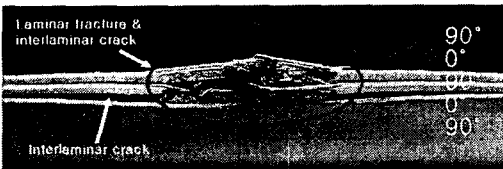


(b) $[90_3/0_3]_s$

Fig. 9 Cross section of curvature shell specimen with 2 interfaces



(a) $[0_2/90_3/0]_s$



(b) $[90_2/0_3/90]_s$

Fig. 10 Cross section of curvature shell specimen with 4 interface

3.2 경사충돌에 따른 관통특성

본 연구에서는 경사 관통시험의 기본 데이터를 확립하기 위해 먼저 평판 시험편에 대한 관통시험만을 수행하였으며, 경사각 (slope angle)에 변화를 주어 관통시험을 수행한 결과 얻어진 경사각에 대한 임계관통 에너지를 Fig. 11에 나타냈다. 경사각이 증

가할수록 시험편을 관통시키는데 필요한 임계관통에너지는 증가하는 경향을 보였으며, 이는 운동량 보존법칙에 의한 충격면에 대한 수직 충격량과 수평 충격량의 상호작용 관계 때문으로 사료된다.

경사 관통시험에 의한 관통파괴 패턴을 Figs. 12와 13에 나타냈다. Fig. 12는 40°의 경사각을 갖는 실험조건 하에서 관통시험에 의한 2계면을 갖는 시험편의 단면형상이며 Fig. 13은 동일 조건 하에서의 4계면을 갖는 시험편의 단면형상이다. Fig. 12를 살펴보면, 경사각이 0°인 경우보다 경사각이 증가함에 따라 시험편의 중앙에 위치한 90° 레이어의 섬유가 파단되는 위치가 오른쪽으로 이동됨을 알 수 있었다. Fig. 13을 살펴보면, 2계면을 갖는 시험편과 유사한 경향을 보였으며, 일반적으로 오른쪽은 라미나 묶음의 파단이 감소하는 반면, 왼쪽은 증가하는 경향을 보였다.

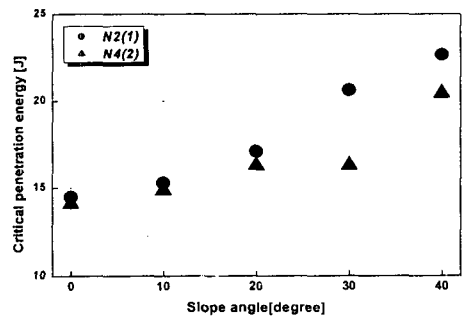


Fig. 11 Relationship between critical penetration energy and slope angle

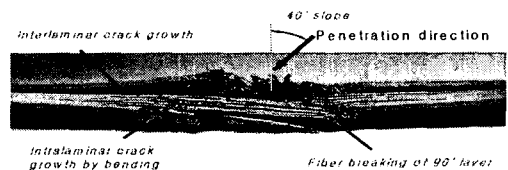


Fig. 12 Cross section of flat-plate specimen with 2 interface

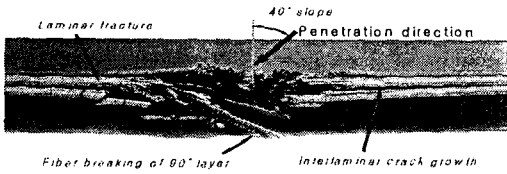


Fig. 13 Cross section of flat-plate specimen with 4 interface

4. 결론

본 연구에서는 최외층각도 및 경사충돌에 의한 CFRP적층셸의 관통특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 곡률과 적층구성을 고려한 복합재 셸 시험편을 제작하고 관통실험을 행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최외층각도 변화에 따른 관통특성을 살펴보면 최외층각도가 90°인 시험편이 최외층각도가 0°인 시험편 보다 낮은 임계관통에너지를 보였다. 이는 적층셸의 두께에 대한 중심으로 갈수록 전단 응력이 지배적이며, 90°로 적층된 레이어가 중심에 위치하였을 경우 더 높은 전단 응력을 갖는다.
2. 관통된 시험편의 단면을 살펴본 결과, 2계면 수를 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 충격점으로 부터 첫 번째 계면에서 가장 큰 크랙길이를 보였다. 또한, 4계면 수를 갖는 시험편은 최외층각도가 0°인 시험편 경우 세번째 계면에서 최외층각도가 90°인 시험편 경우 네 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이가 관찰되었다.
3. 경사 충돌에 의한 관통실험의 경우 일반적으로 경사각이 증가할수록 시험편을 관통시키는데 필요한 에너지인 임계관통에너지는 증가하였으며, 이는 운동량 보존 법칙에 의한 충격면에 대한 수직 및 수평 충격량의

상호작용관계 때문으로 사료된다.

4. 경사 충돌에 따른 파괴 패턴을 살펴보면 경사각이 증가함에 따라 시험편의 중앙에 위치한 90°레이어의 섬유가 파단되는 위치는 오른쪽으로 이동됨을 알 수 있었다. 또한, 가장 큰 층간크랙은 경사각이 0°인 시험편과 유사한 경향을 보였다.

참고문헌

- (1) LAURA. KISTLER, ANTHONY, WAAS., "Impact Response of Cylindrically Curved Laminates Including Large Deformation Scaling Study", Publish by Elsevier Science Ltd. Vol. 21, pp. 61-75. 1998.
- (2) Wardle B. L., Lagace P. A., "Behavior Composite Shells under Transverse Impact and Quasi-State Loading", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 6, pp. 1065-1073, 1998.
- (3) Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "Impact Response and Damage of Composite Shell with Various Curvatures" 11th APCNDT2003, pp.72-77, 2003.
- (4) Y. J. Cho, Y. N. Kim, I. Y. Yang, J. A. Jung and K. H. Im, "The Effects of Curvature and Stacking Composition on the Penetration Characteristics of CFRP Laminates Shell", The Korea Society of Automotive Engineers, 2004 Spring Conference Proceedings, pp.847-852, 2004.
- (5) Y. J. Cho, Y. N. Kim and I. Y. Yang, "Energy Absorption Characteristics of CFRP Laminated Shell according to High Speed Penetration", 2004 KSPE Spring Conference Proceedings, pp.912-915, 2004.
- (6) Im, K. H., Park, N. S., Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "A Study on Impact Characteristics of the Stacking Sequences in CFRP Composites Subjected to Falling-Weight Impact Loading" *International Journal of Automotive Technology* Vol.4, No.4, pp.203-211, 2003.