

CFRP 적층셸의 적층구성 및 곡률 변화에 따른 관통 특성

조영재*, 김영남#, 양인영**

Penetration Characteristics of CFRP Laminated shells according to Stacking Sequence and Curvature

Young Jea Cho*, Young Nam Kim# and In Young Yang**

ABSTRACT

This study aims to examine an effect of stacking sequence and curvature on the penetration characteristic of a composite laminated shell. For the purpose, we manufactured specimens with different stacking sequences and curvatures, and conducted a penetration test using an air-gun. To examine an influence according to stacking sequence, as flat plate and curvature specimen had more plies, their critical penetration energy was higher. Critical penetration energies of specimen A and C with less interfaces somewhat higher than those of B and D with more interfaces. The reason that with less interfaces, critical penetration energy was higher is pre-impact bending stiffness of composite laminated shell with less interfaces was lower than that of laminated shell with more interfaces, but bending stiffness after impact was higher. And it is because interface, the weakest part of the composite laminated shell, was influenced by transverse impact. As curvature increases, critical penetration energy increases linearly. It is because as curvature increases, resistance to in-plane deformation as well as bending deformation increases, which need higher critical penetration energy. Patterns of cracks caused by penetration of composite laminated shells include interlaminar crack, intralaminar crack, and laminar fracture. A 0°ply laminar had a matrix crack, a 90°ply laminar had intralaminar crack and laminar fracture, and interface between 0°and 90°laminar had a interlaminar crack. We examined crack length and delamination area through a penetration test. For the specimen A and C with 2 interface, the longest circumferential direction crack length and largest delamination area were observed on the first interface from the impact point. For the specimen B and D with 4 interface, the longest crack length and largest delamination area were observed on the third interface from the impact point.

Key Words : Absorbed energy(흡수에너지), Composite Laminated Shell(복합재 적층셸), Curvature Radius(곡률반경), Penetration Characteristics(관통특성), Stacking Sequence(적층구성)

접수일: 2004년 6월 30일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 조선대학교 대학원 기계설계공학과

교신저자 : 중소기업 진흥공단

E-mail nyk21c@hanmail.net Tel. (062) 230-7169, 7840

** 조선대학교 기계설계공학과

1. 서론

수송기계용 구조부재로 주목받고 있는 선진 복합재료 중에서 탄소섬유 강화수지(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 비강도 및 비강성이 우수하여 구조 경량화가 요구되는 우주 항공분야를 시작으로 선박, 자동차, 스포츠 등 넓은 분야에서 구조 재료로 사용되고 있다. 그러나 적층복합재 구조를 실용화함에 있어서 금속재와 다른 설계변수는 이 재료가 두께 방향인 횡방향 충격하중(transverse impact)에 약하다는 점이다. 또한 적층복합재 구조부재를 적용하기 위해서는 먼저 횡방향 충격하중에 따른 충격거동 및 손상해석, 관통특성등의 규명이 필수적이며, 이와 더불어 실제 구조부재의 형상에 가까운 곡면 셀의 형태를 띠는 적층복합재 셀의 충격실험 및 관통실험 등이 선행되어야 한다.

CFRP 적층평판의 횡방향 충격 및 관통실험에 대한 논문을 살펴보면, 임¹등은 적층수 및 적층배향이 같은 CFRP 직교 이방성판에 충격손상을 가한 후 충격에너지의 크기와 박리손상면적의 관계 및 임계박리에너지의 관계를 실험적으로 고찰하였으며, 남²등은 섬유적층 배향에 따른 FML(섬유고속 적층판)의 압입 손상 거동에 관하여 고찰한바 있다. Cantwell³등은 FML 샌드위치 구조부재의 고속 충격실험을 통하여 각 시험편의 관통에너지 및 관통패턴에 대하여 고찰하였다.

또한 곡률을 갖는 CFRP 적층셀의 횡방향 충격에 대한 논문을 살펴보면, Krishnamurthy⁴등은 헤르쯔 접촉이론(Hertz's contact law), 푸리에 급수(fourier series) 및 선형-비선형 유한요소해석 등을 통하여 곡면을 갖는 셀과 원통형 셀의 충격거동 및 손상량에 대하여 연구하였으며, Wardle^{5,6} 등은 다양한 곡률반경을 갖는 복합재 적층 셀을 제작하여 정적 및 저속 충격실험을 행하였으며, 그 결과 곡률반경 변화가 충격하중 및 변위에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다. 이 논문에 의하면 평판으로 갈수록 충격하중은 커지는 반면, 변형량은 감소하고, 스팬(span) 간격이 커질수록 충격하중은 감소하고 변형량은 증가하였다.

그러나 CFRP 적층판의 충격실험 및 이론논문들은 평판의 충격거동 해석 및 손상해석, 관통실험이 대부분이며, 곡률을 갖는 셀의 실험은 저속충격실험을 통한 손상규명 및 거동해석이 대부분이다.

따라서 실제 수송기계구조부재에 복합재 셀을

적용시키기 위한 기초자료를 확립하기 위해 본 연구에서는 항공기 날개부분에 가장 대표적인 곡률형태인 곡률반경 100mm, 150mm, 200mm 및 평판시험편을 제작하고 에어건에 의한 관통실험을 통하여 적층구성 및 곡률변화가 복합재 적층셀의 관통특성에 미치는 영향에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 연구에서 이용된 CFRP 적층복합재 시험편의 적층구성은 8플라이로 적층된 $[0_2/90_2]_s$, $[0_3/90_3]_s$, $[0_2/90_3/0]_s$ 로서 계면수 2개와 4개를 갖도록 적층하였다. 또한 CFRP 적층부재가 실제 구조부재에 이용될 것을 상정하여 일정한 곡률을 갖는 적층복합재 셀을 시험편으로 사용하였다. 시험편의 곡률 반경은 항공기 날개에 일반적으로 사용되는 곡률 반경을 이용하였으며, 곡률반경이 100mm, 150mm, 200mm 및 ∞ 를 제작하였다.

시험편의 제작은 각 적층순서에 맞게 적층한 후 진공백 성형공정을 통하여 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 제작하였다. 챔버(Chamber) 내부 들레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 시험편을 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레서에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 시험편의 성형사이클은 Fig. 1과 같으며, 사용된 프리프레그는 한국화이버(주)의 CU125NS로서 그 물성치는 Table 1과 같다.

제작된 시험편은 다이아몬드휠을 부착한 자동정밀 절단기(MICRACUT Precision Cutter)를 이용하여 100×140mm 크기로 절단하였다. 본 연구에서 사용한 시험편의 규약을 Table 2에 나타냈다. A는 $[0_2/90_2]_s$ 로 적층된 시험편으로 플라이수는 8개, 계면수는 2개이며, 곡률반경은 평판부터 R20, R15 및 R10으로 성형하여 제작하였다. Table 2와 같이 제작된 시험편을 가지고 본 연구에서는 A와 B, C와 D를 비교함으로써 계면수 변화가 관통특성에 미치는 영향에 관하여 고찰하고자 하며, A와 C, B와 D를 비교함으로써 두께변화에 따른 영향을 고찰하고자 한다. 또한 각 시험편에 대해 4가지 형태의 곡률반경을 적용함으로써 곡률변화에 따른 관통특성을

고찰하고자 한다.

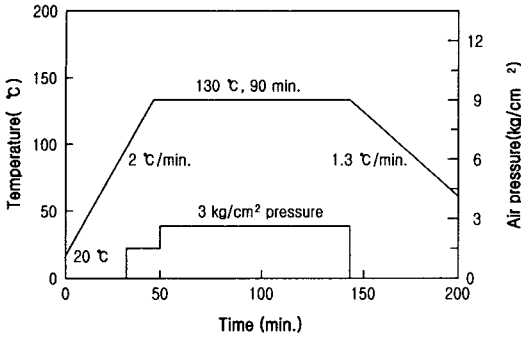


Fig. 1 Curing cycle of CFRP specimen

Table 1 The material properties and laminate strength

Types	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg Sheet (CU125NS)
Density [kg/m^3]	1.83×10^4	1.24×10^4	-
Tensile Strength [GPa]	4.89	0.08	2.53
Elastic Modulus [GPa]	240	3.60	138
Breaking Elongation [%]	2.1	3.0	1.7
Poissons ratio	-	-	0.30
Resin Content	-	-	33 [% Wt]
Curing Temperature [°C]	-	130	130 °C × 90 min.

Table 2 Specimen definition

Spec.	Stacking Sequences	Ply No.	Interface No.	Curvature Radius
A	[0 ₂ /90 ₂] _s	8	2	RU, R=∞
B	[0/90 ₂ /0] _s	8	4	R20, R=200mm
C	[0 ₃ /90 ₃] _s	12	2	R15, R=150mm
D	[0 ₂ /90 ₃ /0] _s	12	4	R10, R=100mm

2.2 관통실험

본 실험에서 사용된 실험장치의 구성은 Fig. 2에 나타낸것과 같이 공기를 압축시키는 에어컴프레서, 압력을 조절하는 게이지, 충격실험 기구인 에어

건(air-gun), 발사된 강구의 속도를 측정하는 볼 스크린 센서(ballistic-screen sensor) 및 오실로스코프와 시험편 고정지그로 구성되어 있다.

곡률을 갖는 셸과 평판은 동일한 경계조건을 만족시키는 시험편 고정지그가 필요하다. 따라서 곡률 셸과 평판 셸 모두가 적절한 지지조건을 갖는 시험편 고정지그를 설계하는 것이 중요하다. ASTM D-3763의 평판용 지그를 참고하여 100mm, 150mm, 200mm 곡면에 맞는 곡면 지그를 제작하였다. CFRP 적층판은 이방성을 가지고 있기 때문에 방향성에 영향을 받지 않도록 원형지그(ø80mm) 조건으로 제작하였다. 또한, 지그 사이에는 고무를 사용하여 하중을 받을 때 시험편의 미끄러짐을 최소화하고, 충격시 전단파에 의한 진동으로 에너지가 손실되는 것을 방지하기 위해 제진대의 역할로 방진고무패드를 이용하였다.

Fig. 3에 본 연구에서 사용된 시험편 고정지그를 나타냈다. 평판과 곡면 지그 모두 시험편의 원형고정(circular clamping)지지 조건을 갖는 구조로 되어 있다. 또한 이러한 시험편을 지지하는 경계조건은 기존의 연구논문^{5~8}에서 나타낸 바와 같이 복합재 적층셸의 거동에 절대적인 영향을 미친다. 고정된 시험편의 중앙에 강구가 정확히 관통되게 하기 위해 에어건의 충구 둘레에 레이저 빔을 부착하였다. 또한 강구의 발사는 에어건의 챔버(chamber)에 의해 압축된 공기를 이용하였으며, 게이지 압력 3~8bar까지 1bar 씩 상승시켜 관통실험을 행하였다. 강구의 충격속도는 시험편의 앞·뒤에 설치된 볼 스크린 센서에 의해 강구가 2정점 간을 통과하는 시간을 체크하여 측정하였으며, 시험편의 흡수 에너지는 관통직전과 관통직후 강구의 운동에너지 차에 의해 측정하였다.

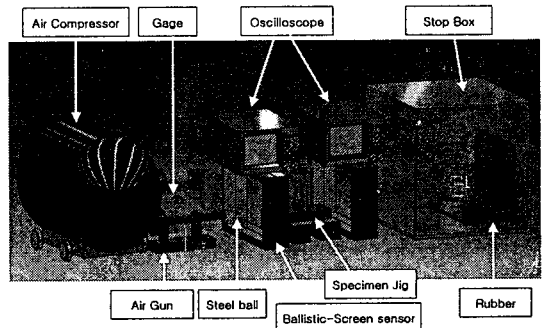
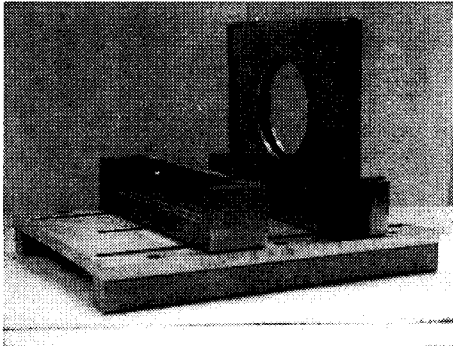
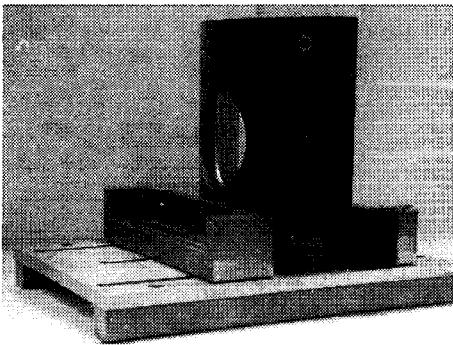


Fig. 2 Schematic diagram of impact test apparatus

관통실험 후 시험편 내부에 발생한 크랙패턴 및 관통모드를 판별하기 위해 본 연구에서는 디지털식 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 계면수 변화에 따른 크랙패턴 및 관통모드와 곡률변화에 따른 크랙패턴 및 관통모드에 관하여 고찰하였다.



(a) for flat plate



(b) for curved shell

Fig. 3 Circular clamping fixtures

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격속도 변화에 따른 관통특성

충격속도 변화에 따른 CFRP 적층셸의 관통특성을 알아보고자, 게이지 압력 3~8 bar, 충격속도 83~132 m/s로 변화를 주어 각 시험편에 대한 관통실험을 행하였다. 또한 본 연구에서는 임계관통에너지(critical penetration energy)를 CFRP 복합재 적층셸의 관통특성을 규명하는 파라메타로 보고 관통전 운동에너지를 x-축에, 관통 후 운동에너지를 y-축에 대입하고, 선형커브피팅(linear curve fitting)을 통하여 각 시험편의 관통에 필요한 최소 운동에너지인 임계관통에너지를 구하였다.

Fig. 4에 평판 시험편의 관통 전·후의 운동에너지를, Fig. 5에 곡률반경 100mm을 갖는 시험편의 관통 전·후의 운동에너지를 나타냈다. Figs. 4, 5에서 x-축상의 ●는 각 시험편의 임계관통에너지를 나타낸다. Figs. 4, 5를 살펴보면, 평판과 곡면 시험편 모두 플라이수가 많은 $[0_3/90_3]_s$ 시험편의 임계관통에너지가 $[0_2/90_2]_s$ 시험편 보다 더 높게 나타났다. 왜냐하면, 복합재 적층부재의 강도와 강성은 적층부재의 두께와 적층구성에 지배적이기 때문이다.

또한 Figs. 4, 5를 비교해 보면, 곡률반경 100mm를 갖는 곡면 시험편의 임계관통에너지가 평판 시험편의 임계관통에너지 보다 더 높게 나타남을 확인할 수 있다. 횡방향 충격하중이 가해질 때 굽힘변형(bending deformation)에 의해 충격에너지를 흡

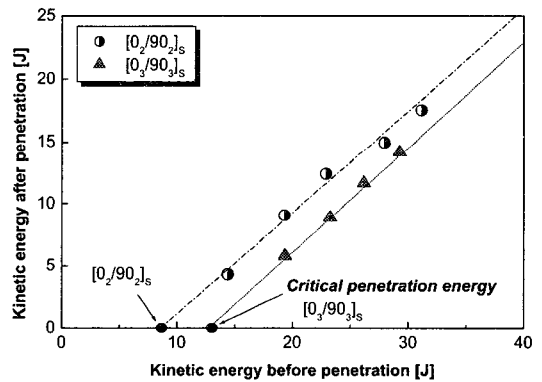


Fig. 4 Prediction of critical penetration energy, flat-plate specimens

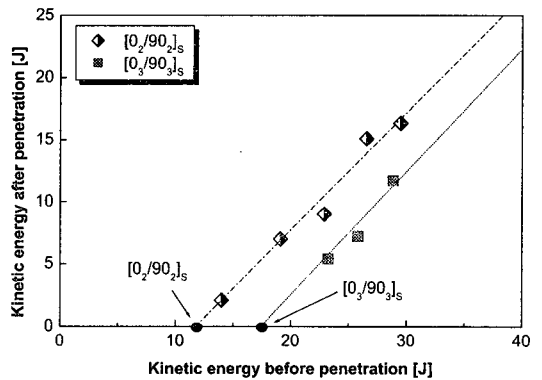


Fig. 5 Prediction of critical penetration energy, curved shells, R=100mm

수하는 평판과는 달리 곡률을 갖는 시험편은 굽힘에 의한 변형 뿐만 아니라 면내 변형(in-plane deformation) 또한 발생하게 된다. 이러한 굽힘변형과 면내변형에 의한 저항은 곡률이 증가할수록 커지며, 그 결과 곡률을 갖는 복합재 적층셀에 있어 관통에 필요한 임계관통에너지는 더욱 증가하게 된다.

3.2 적층구성변화에 따른 관통특성

Figs. 6, 7에 각 시험편에 대한 임계관통에너지를 나타냈다. Fig. 6은 평판(RU)과 곡률반경 200mm를 갖는 시험편(R20)의 임계관통에너지이며, Fig. 7은 곡률반경 150mm와 100mm를 갖는 시험편(R15, R10)의 임계관통에너지 결과이다. 시험편 기호에서도 밝혔듯이 A는 $[0_2/90_2]_s$, B는 $[0/90_2/0]_s$, C는 $[0_3/90_3]_s$, D는 $[0_2/90_3/0]_s$ 시험편을 의미한다.

일반적으로 계면수(interface)가 적은 시험편인 A와 C 시험편이 B와 D 시험편 보다 다소 높은 임계관통에너지를 보였다. 그 이유는 기존의 평판 논문에서 많이 거론되었듯이 적은 계면수를 갖는 적층판 시험편의 충격 전 굽힘강성(bending stiffness)은 계면수가 많은 시험편에 비해 낮게 나타나는 반면, 충격을 받은 시험편의 경우에는 더 높은 굽힘강성을 보인다. 따라서 본 연구에서도 평판 뿐만 아니라 곡률을 갖는 시험편의 경우에도 이와 유사한 경향을 보였다.

Figs. 6, 7에서도 Figs. 4, 5와 마찬가지로 플라이 수가 적은 A와 B 시험편이 C와 D 시험편에 비해 더 낮은 임계관통에너지를 보였다. 플라이 수가 많을수록 이러한 경향은 뚜렷하게 나타날 것으로 예상되며, Fig. 6의 RU 시험편 중 A 시험편의 임계관통에너지가 B 시험편 보다 낮게 나타난 이유는 적은 적층 플라이 수에 따른 실험적 오차로 생각된다.

3.3 곡률변화에 따른 관통특성

곡률변화에 따른 임계관통에너지를 Figs. 8, 9에 나타냈다. Figs. 8과 9를 살펴보면, 모든 시험편에 있어 곡률이 증가함에 따라 임계관통에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 3.2절에서 밝혔듯이 곡률이 증가할수록 굽힘에 의한 변형과 면내변형의 저항에 의해 손실되는 충격에너지량이 증가하게 되며, 그 결과 더 높은 임계관통에너지를 갖는다.

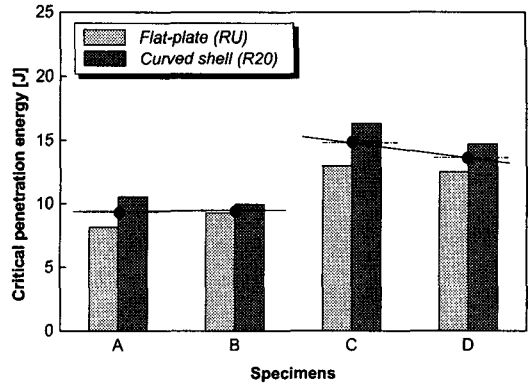


Fig. 6 Critical penetration energy according to stacking sequences, RU and R20

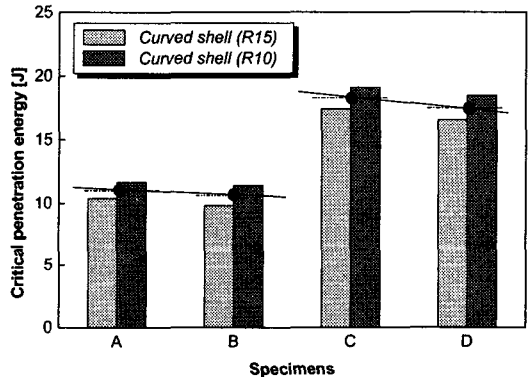


Fig. 7 Critical penetration energy according to stacking sequences, R15 and R10

Figs. 8, 9에서 8플라이로 적층된 CFRP 복합재 적층셀의 곡률에 대한 임계관통에너지의 기울기 (slope a)는 그다지 크지 않은 반면, 12플라이로 적층된 CFRP 복합재 적층셀의 곡률에 대한 임계관통에너지의 기울기(slope b)는 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 Figs. 8, 9를 통하여 곡률에 대한 임계관통에너지의 기울기는 플라이수에 지배적이며, 플라이수가 많아질수록 더욱 뚜렷해지리라 사료된다.

또한 Fig. 8에 나타난 결과처럼, 플라이수가 작은 경우에는 같은 플라이를 적층하였다고 할지라도 적층구성에 따라 그 기울기가 크게 변화하는 반면, Fig. 9의 12플라이로 적층된 $[0_3/90_3]_s$ 과 $[0_2/90_3/0]_s$

시험편의 경우에는 그다지 큰 변화 기울기를 보이지 않았다. 즉, 플라이수가 증가할수록 곡률에 대한 임계관통에너지의 기울기는 적층구성에 큰 영향을 받지 않는다고 사려되며, 앞 절에서도 거론했듯이 계면수가 적은 A와 C 시험편이 더 큰 임계관통에너지를 갖는다.

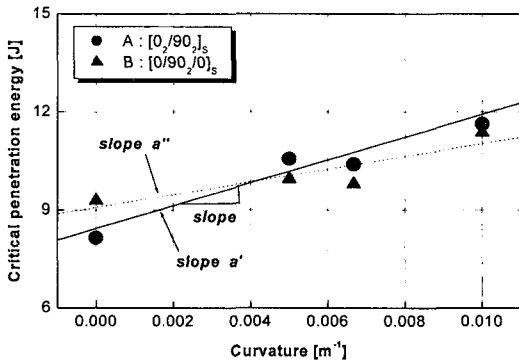


Fig. 8 Relationship between critical penetration energy and curvature, A and B specimens

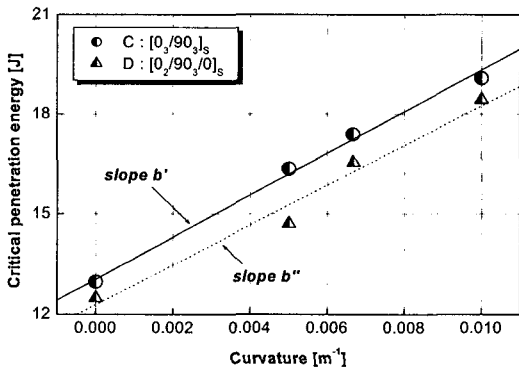
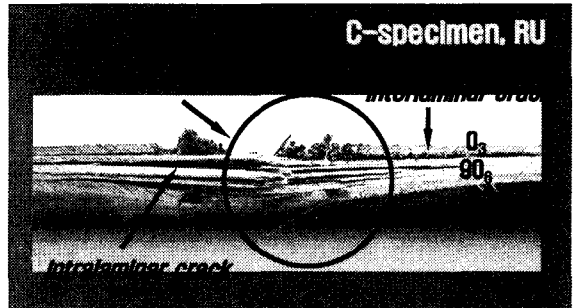


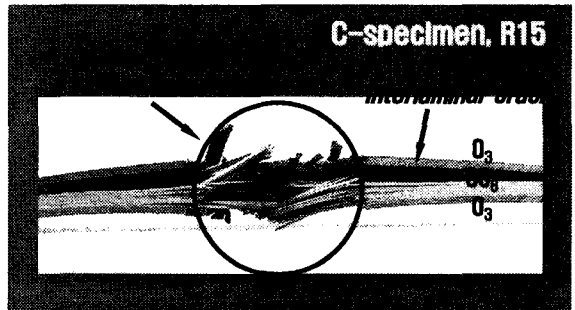
Fig. 9 Relationship between critical penetration energy and curvature, C and D specimens

3.4 관통 파괴 모드

적층구성 및 곡률변화에 따른 관통 파괴 모드를 고찰하고자 본 연구에서는 관통점을 기준으로 하여 원주방향을 따라 다이아몬드 커터기를 이용하여 절단하였으며, 그 결과 얻어진 각 시험편의 대표적인 단면사진을 Figs. 10, 11에 나타냈다. Fig. 10은 $[0_3/90_3]_S$ 시험편의 평판과 곡률반경 150mm를 갖는 셸의 관통 단면 사진이며, Fig. 11은 $[0_2/90_3/0]_S$ 시험

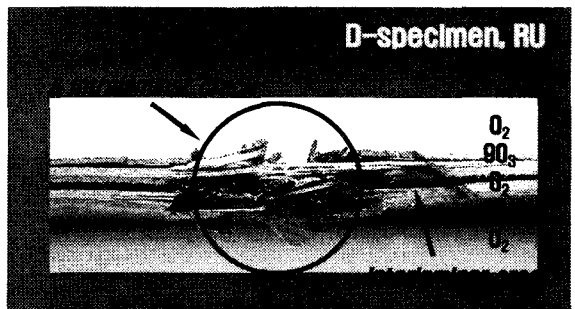


(a) RU, flat-plate

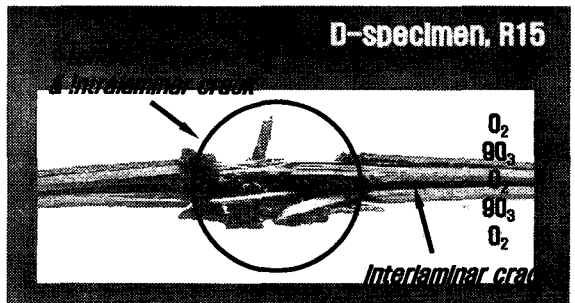


(b) R15, curved shell (R=150mm)

Fig. 10 Section area of C-specimen, $[0_3/90_3]_S$



(a) RU, flat-plate



(b) R15, curved shell (R=150mm)

Fig. 11 Section area of C-specimen, $[0_2/90_3/0]_S$

편의 평판과 곡률반경 150mm를 갖는 셸의 관통 단면 사진이다.

Fig. 10을 살펴보면, 각 시험편에 대해 관통에 의해 발생하는 크랙 패턴은 층간크랙(interlaminar crack), 층내크랙(intralaminar crack) 및 라미나파단(laminar fracture) 등이 나타났다. 층간크랙은 0° 플라이와 90° 플라이의 계면에서 발생하였으며, 층내크랙은 90°로 적층된 플라이의 층내에서 발생하였다. 또한 라미나 묶음의 파단은 90°로 적층된 플라이에서 나타났다. 이러한 형태로 크랙 및 라미나 파단이 나타나는 이유는 횡방향 충격하중 시 0° 플라이는 기지의 전단크랙(matrix crack)에 의해, 90° 플라이는 섬유층의 굽힘과 파단에 의해 충격에너지를 흡수하기 때문이다. 즉, 횡방향 충격하중이 가해질 때 0° 플라이는 전단에, 90° 플라이는 굽힘에 관여되며, 그 결과 2 계면수를 갖는 C 시험편의 경우에는 충격점을 기준으로 첫 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이를 보인다고 사료된다.

또한 평판시험편과 곡률을 갖는 시험편의 크랙 길이 및 박리면적을 비교해보면, 곡률이 증가할수록 첫 번째 계면에서 발생하는 크랙길이 및 전체 박리면적(total delamination area)이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 경향이 나타난 이유는 3.1~3.3절에서도 밝혔듯이 곡률이 증가함에 따라 횡방향 충격하중에 의해 발생하는 면내변위에 대한 저항은 증가하며, 적층배향이 서로 다른 라미나 묶음들 사이에서 면내변위의 변형량 차이로 인한 계면간 전단형태의 양상을 띄기 때문이다.

Fig. 11을 살펴보면, 2 계면수를 갖는 경우와 유사한 경향을 보였으나, 단 최대의 크랙길이와 박리면적을 보이는 계면은 충격점으로부터 세 번째 계면에서 나타났다. 이러한 경향은 평판의 충격실험 및 관통실험에 대한 기존의 논문과 유사하였다.

4. 결론

본 연구에서는 적층구성 및 곡률변화가 복합재 적층셸의 관통특성에 미치는 영향에 관하여 고찰하고자 적층구성 및 곡률을 변화주어 시험편을 제작하고, 에어건에 의한 관통실험을 행하였다. 그 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 적층구성에 따른 영향을 살펴보면, 평판과 곡면 시험편 모두 플라이수가 많을수록 더 높

은 임계관통에너지를 보였으며, 계면수가 적은 A와 C 시험편의 임계관통에너지가 계면수가 많은 B와 D 시험편 보다 다소 높게 나타났다. 계면수가 작을수록 임계관통에너지가 높게 나타난 이유는 평판의 관통실험에 대한 기존의 논문과 고찰과 같이 계면수가 적은 복합재 적층셸의 경우 충격전 굽힘강성은 계면수가 많은 복합재 적층셸에 비해 낮은 반면, 충격후 굽힘강성은 더 높게 나타나기 때문이다. 또한 이러한 결과는 횡방향 충격에 대해 복합재 적층셸의 가장 취약부분인 계면(interface)의 영향으로 사료된다.

2. 곡률이 증가함에 따라 임계관통에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 곡률이 증가할수록 굽힘에 의한 변형뿐만 아니라 면내변형의 저항이 증가함에 따라 더 높은 임계 관통에너지가 필요하기 때문이라 사료된다.
3. 곡률에 대한 임계관통에너지의 기울기는 플라이수에 지배적이며, 플라이수가 많아질수록 더욱 뚜렷해지리라 사료된다.
4. 복합재 적층셸의 관통에 의한 파괴패턴은 층간크랙(interlaminar crack), 층내크랙(intralaminar crack)과 라미나 파단(laminar fracture)등이 나타났다. 0°로 적층된 라미나에서는 기지의 크랙진전(matrix crack)이 90°로 적층된 라미나에서는 층내크랙 및 라미나 묶음의 파단등이 나타났으며, 0°와 90° 라미나의 사이인 계면에서는 층간크랙이 나타났다.
5. 관통실험에 따른 크랙길이 및 박리면적을 살펴본 결과, 2 계면수를 갖는 A와 C 시험편에서는 충격점으로부터 첫 번째 계면에서, 4 계면수를 갖는 B와 D 시험편에서는 충격점으로부터 세 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이 및 박리면적이 관찰되었다.

후기

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구 되었음.

참고문헌

1. Im, K. H., Sim, J. K. and Yang, I. Y., "A Study on Impact Response Damage Behavior of

- CF/Epoxy Composite Laminates," Transactions of the KSME, Vol. 26, No. 5, pp. 835-842, 2002.
2. Nam, H. W., Jung, S. W. and Han, K. S., "Stacking Sequence Effects on Indentation Damage Behaviors of Fiber Metal Laminate," Transactions of the KSME, Vol. 26, No. 5, pp. 960-968, 2002.
 3. Cantwell, W. J. and Villanueva, G. Reyes, "The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures," Composites Science and Technology 63, pp. 1-20, 2003.
 4. Krishnamurthy, K. S., Mahjn, P. and Mittal, R. K., "Impact Response and Damage in Laminated Composite Cylindrical Shells," Composite Structures, Vol. 59, pp. 15-36, 2003.
 5. Wardle, B. L. and Lagace, P. A., "Behavior of Composite Shells under Transverse Impact and Quasi-Static Loading," AIAA Journal, Vol. 36, No. 6, pp. 1065-1073, 1998.
 6. Wardle, B. L. and Lagace, P. A., "Importance of Instability in Impact Response and Damage Resistance of Composite Shells," AIAA Journal, Vol. 35, No. 2, pp. 389-396, 1997.
 7. Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "Impact Response and Damage of Composite Shell with Various Curvatures," 11th APCNDT 2003, pp. 72-77, 2003.
 8. Cho, Y. J., Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "Energy Absorption Characteristics of CFRP Laminated Shell According to High Speed Penetration," Proceeding of kspe, pp. 912-915, May 2004.
 9. Kim, Y. N., Kim, J. H. and Yang, I. Y., "Influence of Stacking Conditions on the Absorbed Energy Characteristics of Composite Tubes," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 11, pp. 34-41, 2001.
 10. 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.