

## 적층구성 및 곡률 변화에 따른 CFRP 적층셸의 관통특성

조 영 재<sup>1)</sup> · 김 영 남<sup>2)</sup> · 양 인 영<sup>\*3)</sup>

조선대학교 대학원<sup>1)</sup> · 중소기업진흥공단<sup>2)</sup> · 조선대학교<sup>3)</sup>

### The Penetration Characteristics of CFRP Laminated Shells on the Change of Stacking Sequences and Curvatures

Youngjea Cho<sup>1)</sup> · Youngnam Kim<sup>2)</sup> · Inyoung Yang<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>2)</sup>Small Business Corporation, 621-15 Docheon-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-301, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received 10 May 2005 / Accepted 10 October 2005)

**Abstract** : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) of the advanced composite materials as structural materials for vehicle, has a wide application in light-weigh structural materials of airplanes, ships and automobiles because of high strength and stiffness. However, there is a design variable to be considered in practical application of the laminate composite materials, these materials are vulnerable to transverse impact. This paper is to study the effects of stacking sequence and curvature on the penetration characteristics of composite laminate shell. They are stacked to  $[0_3/90_3]_S$ ,  $[90_3/0_3]_S$  and  $[0_2/90_3/0]_S$ ,  $[90_2/0_3/90]_S$  and their interlaminar number two and four. They are manufactured to various curvature radius ( $R=100, 150, 200\text{mm}$  and  $\infty$ ). 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 determing the time for it to pass two ballistics-screen sensors located a known distance apart. The critical penetration energy of specimen A and B with less interfaces were a little higher than those of C and D. As the curvature increases, the critical penetration energy increases linearly because the resistance to the in-plane deformation as well as bending deformation increases, which need higher critical penetration energy. The specimen A and C have higher critical penetration energy than B and D because of different stacking sequences. We examined crack length through a penetration test. For the specimen A with 2interfaces, the longest circumferential direction crack length were observed on the first interface from the impact point. For the specimen B 4-interface, the longest circumferential direction crack length were observed on the second interface from the impact point.

**Key words** : Stacking sequence(적층구성), Penetration characteristics(관통특성), Curvature radius(곡률반경)  
Critical penetration energy(임계관통에너지)

### 1. 서 론

기존의 금속 및 목재 구조재료보다 비강성 및 비강도가 우수하고 사용자의 요구에 맞게 특정방향별

로 강도를 달리 할 수 있는 장점을 가진 탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics)은 항공기 및 우주비행체의 구조부재, 건축구조물의 보강, 레이더 돔 및 선박구조부재, 자동차의 고강도/고강성이 요구되는 구조부재 등 다양한 분야에 그 응용

\*To whom correspondence should be addressed.  
iyyang@chosun.ac.kr

이 확대되고 있다.

현재 국내외에서 사용되어지는 탄소섬유강화플라스틱의 성형법은 한 겹의 복합재 시트(prepreg sheet)를 다중 적층하여 열과 진공 압축에 의해 성형하고 원하는 형상을 제작하는 오토클레이브(auto-clave) 성형방법이 대부분이다.

그러나 탄소섬유와 강화 플라스틱인 에폭시(epoxy) 수지는 고강도를 갖는 취성재료이며, 이에 따라 외부에서 가해진 이물충격손상(FOD; Foreign Object of Damage)에 의한 충격손상 및 파손에 미치는 영향은 매우 크다. 이러한 이물충격손상 중 탄소섬유강화플라스틱을 항공기, 자동차 및 우주비행체 등 다양한 곡면을 가진 구조부재에 적용하기 위해서는 먼저, 횡방향 충격 및 관통실험에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 그러나 발표된 논문들은 횡방향 저속 충격에 관한 손상거동 해석이 대부분이며 곡면을 갖는 탄소섬유강화플라스틱의 관통실험에 대한 연구는 이루어져 있지 않다.

Fig. 1은 탄소섬유강화플라스틱 특성을 결정하는 인자들을 나타낸 그림이다. Fig. 1에 나타낸 인자 중 가장 중요한 것은 충격에 의한 충격손상, 파손, 흡수 에너지, 섬유 및 기지의 파단이며, 그 이유는 탄소섬유 강화플라스틱은 이물충격에 의한 손상에 매우 취약하기 때문이다.<sup>1,2)</sup>

CFRP 적층판의 관통실험에 대한 논문을 살펴보면, Symons<sup>3)</sup>는 CFRP 적층판의 고속관통 및 저속 충격과 준 정적실험을 행하였으며, 손상결과를 C-Scan, Optical microscopy와 X-Ray Computer microtomography 촬영을 통해 CFRP 적층판의 관통특성 및

에너지 흡수 능력을 비교, 고찰하였다. Yasuhiro<sup>4)</sup> 등은 물성치가 다른 프리프레그로 일정한 크기와 두께를 갖는 CFRP 적층판을 제작한 후 고속 관통실험을 통해 관통특성 및 흡수에너지에 대해 연구 하였다.

또한 곡률을 갖는 CFRP 적층셀의 횡방향 충격에 대한 논문을 살펴보면, Caprino G<sup>5)</sup> 등은 다양한 적층구성을 갖는 CFRP 셀을 제작하여 충격실험을 통해 Indentation 값을 실험으로 얻어지는 값과 수식으로 얻어지는 값을 비교, 고찰한 바 있으며, Cho<sup>6)</sup> 등은 곡률반경을 고려한 CFRP 적층판의 관통특성을 평가하고자 에어건을 제작하고 관통실험을 행함으로써 CFRP 적층셀의 곡률반경에 따른 관통특성 및 적층구성에 따른 관통특성을 실험적으로 고찰하고 발표한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 곡률이 요구되는 구조부재에 CFRP 적층판을 적용하기 위한 기초자료를 확립하기 위해, 적층구성(계면수, 최외층각도) 및 곡률반경을 변화주어 관통실험을 행하고 각 시험편에 따른 관통모드와 손상길이를 측정하여 계면수와 최외층각도 변화 및 곡률반경변화에 따른 임계 관통에너지와 관통모드에 관하여 고찰하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

시험편 제작에 사용된 복합재료는 H.F.사의 일방향 프리프레그시트(prepreg sheet; CU125NS)를 사용하였으며 진공백 성형과정을 통해 오토클레이브를 이용하여 제작하였다. Table 1에 프리프레그 물성치를 나타내었다. 성형방법은 먼저, 챔버(chamber) 내부둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간 90분으로 하여 성형하였다. 경화된 시험편은 다이아몬드 휠을 부착한 자동정밀 절단기(MICRACUT Precision cutter)를 이용하여 100×140 mm 크기를 갖도록 절단·제작하였다.

본 연구에서 사용된 시험편의 규약을 Table 2에 나타냈다. 시험편의 적층구성은 최외층각도가 0°인 [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>3</sub>/0]<sub>s</sub>와 최외층각도가 90°인 [90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>]<sub>s</sub>, [90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>/90]<sub>s</sub>로서 2계면 구조와 4계면 구조를 갖도록 12Ply로 적층하였다. 또한 곡률반경은 RU(평판),

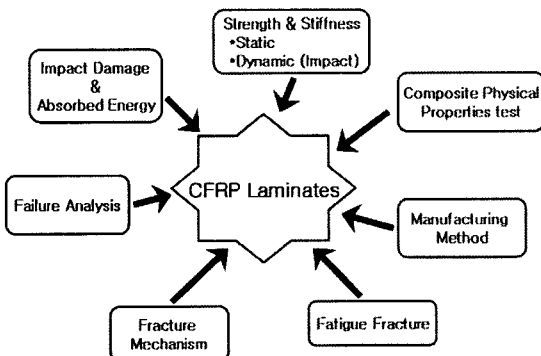


Fig. 1 The key factors of CFRP laminates

Table 1 The material properties and laminate strength

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet (CU125NS)
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.83×10 <sup>3</sup>	1.24×10 <sup>3</sup>	-
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 temp. [°C]	-	130	130°C for 90min

Table 2 Specimen definition

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

R20(R=200mm), R15(R=150mm) 및 R10(R=100mm)으로 성형하여 제작하였다.

Fig. 2에 제작된 시험편의 적층구성을 표현하였다. 축방향을 0°, 원주방향을 90°로 하여 적층하였으며, 충격면에 해당되는 각도를 최외측각도로 명명하였다. 또한 관통시험에서 중요한 또 하나의 변수는 곡면과 수직으로 충돌하여 관통되는가 이며 이

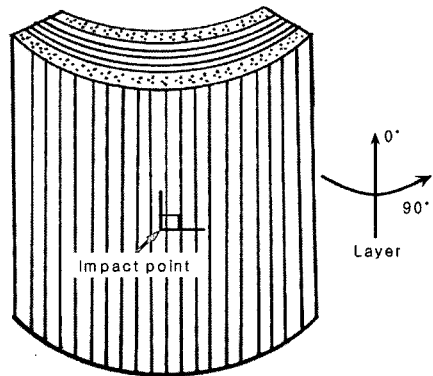


Fig. 2 Schematic of a stacking sequence

는 실험 시 데이터의 오차를 크게 발생시키는 중요한 변수이다.

### 2.2 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치 구성은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 공기를 압축시키는 에어컴프레셔, 에어건의 압력을 조절하는 게이지, 시험편의 중앙에 직각으로 관통되게 하기 위해 관통점을 조준하는데 사용하는 레이저 빔, 강구속도를 측정하는 Ballistic Screen Sensor 및 오실로스코프와 시험편 고정 지그로 구성되어있다.

관통시험은 에어컴프레셔에서 공기를 압축시킨 후 게이지로 압력(5,6,7,8bar)을 조절하고, 레이저 빔으로 시험편의 중심을 맞춘 후 에어건으로 강구를 발사시킨다. 발사된 강구는 첫 번째 Ballistic Screen

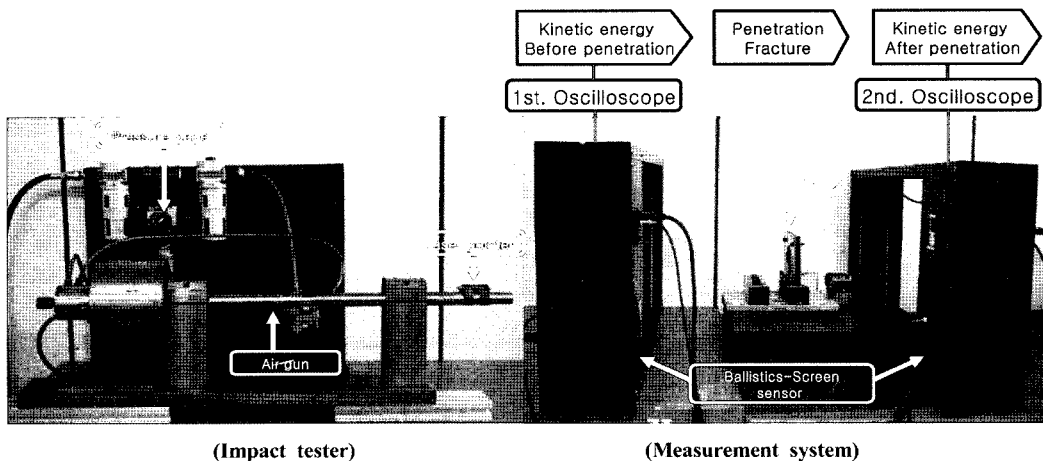


Fig. 3 Schematic diagram of impact test apparatus

Sensor에 의해 관통 전 속도(초기도)를 측정하고 지그에 고정된 시험편을 관통시킨 후 두 번째 Sensor에 의해 관통 후 속도를 측정한다. 측정된 속도로부터 관통 전 운동에너지와 관통 후 운동에너지를 구할 수 있으며 속도변화에 따른 관통 전/후 운동에너지를 비교 고찰함으로써 임계관통에너지(critical penetration energy)를 구한다. 또한 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 관통 실험 후 시험편의 내부에 발생한 섬유파단 및 층간크랙, 층내크랙 등을 관찰함으로써 적층구성(계면수, 최외층각도) 및 곡률변화가 관통과피모드에 어떠한 영향을 미치는지에 관하여 고찰한다.

곡률을 갖는 복합재 시험편에 대한 관통실험을 행하는데 있어 중요한 것 중 하나는 실험 시 곡률을 갖는 적층판과 평판 시험편에 있어 동일한 경계조건을 만족시켜야 한다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 사용했던 평판용 지그를 참고하여 곡률반경  $\infty, 200, 150$  및  $100\text{mm}$  곡면에 맞는 지그를 제작하였다. 또한 관통시 시험편의 변형에 의한 미끄러짐을 최소화하고 충격시 전단파에 의한 진동으로 에너지가 손실되는 것을 방지하기 위해 제진대의 역할로 고무패드를 지그에 부착시켰다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 계면수 변화에 따른 관통특성

계면수 변화에 따른 CFRP 적층셀의 관통특성을 알아보기 위해 충격 속도의 변화를 주어 각 시험편에 대한 관통실험을 행하였다. Figs. 4~7은 x축에 관통 전 운동에너지(kinetic energy before penetration)를, y축에 관통 후 운동에너지(kinetic energy after penetration)를 나타냈으며 선형 커브 피팅(curve fitting)을 통해 각 시험편의 임계관통에너지(critical penetration energy)를 구하였다. 선형으로 커브 피팅한 후 x축 상에 위치한  $\bullet$ 는 각 시험편의 관통에 필요한 최소 운동에너지인 임계관통에너지를 의미한다. Fig. 4는 곡률반경이  $\infty$ 인 평판시험편의 실험결과이며 Fig. 5는 곡률반경  $200\text{mm}$ , Fig. 6은 곡률반경  $150\text{mm}$ , Fig. 7은 곡률반경  $100\text{mm}$  시험편의 실험결과이다.

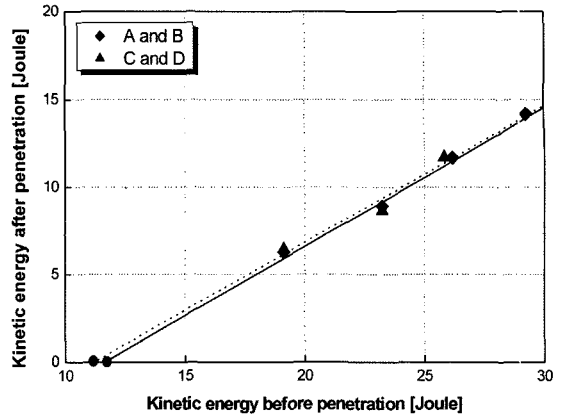


Fig. 4 Prediction of critical penetration energy,  $R=\infty$

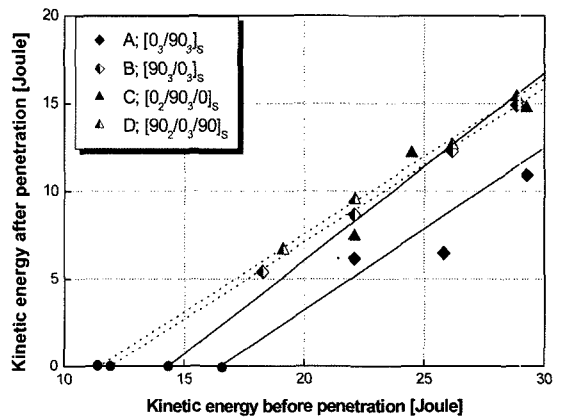


Fig. 5 Prediction of critical penetration energy,  $R=200$

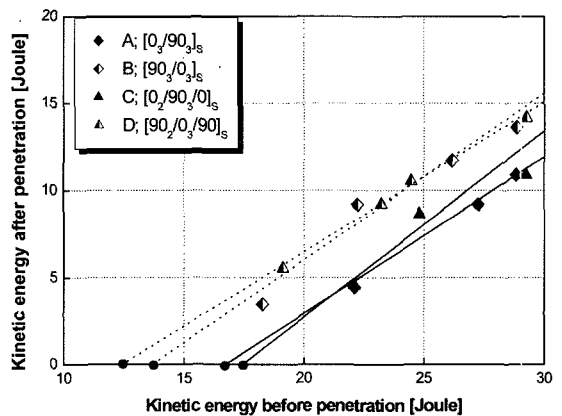


Fig. 6 Prediction of critical penetration energy,  $R=150$

Figs. 4~7를 살펴보면, 일반적으로 2계면을 갖는 A와 B 시험편이 4계면을 갖는 C와 D 시험편보다 다소 높은 임계관통에너지를 보였다. 그 이유는 기존

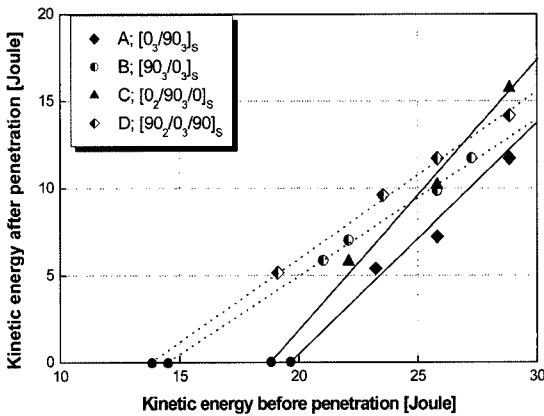


Fig. 7 Prediction of critical penetration energy, R=100

의 평판 논문에서 많이 거론되었듯이 계면수가 작을수록 충격 전 굽힘 강성(bending stiffness before impact, no-delamination)이 낮게 나타나는 반면, 충격 후 굽힘강성은 높게 나타난다. 따라서 본 연구에서도 평판실험과 유사한 경향을 보였으며 최외층각도 변화 및 곡률반경 변화와 무관하게 모두 유사한 경향을 보였다.

### 3.2 곡률반경 및 최외층각도 변화에 따른 관통특성

곡률변화에 따른 임계관통에너지를 Fig. 8에 나타냈다. x축을 곡률반경으로 표현할 경우 평판시험편의 경우 ∞의 값을 갖게 되며, 정량적인 분석 그래프를 얻기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 x축을 곡률반경의 역수인 곡률로 나타냈다. 또한 Figs. 4~7의 커브 피팅을 통하여 얻은 임계관통에너지를 y축에 나타냈다.

Fig. 8을 살펴보면, 모든 시험편에 있어 곡률이 증가함에 따라 임계관통에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 CFRP적층셀에 횡방향 충격하중이 가해질 경우 평판형상의 시험편은 굽힘하중변형에 의한 크랙진전 및 섬유파단 등에 의해 에너지를 흡수하는 반면 곡률형상의 시험편은 굽힘에 의한 변형뿐만 아니라 면내 변형에 의한 크랙진전 및 섬유파단 등에 의해 충격에너지를 흡수함에 따라 임계관통에너지가 더 높게 나타났으며 곡률이 증가할수록 면내변형에 의한 충격에너지 흡수율이 증가하게 됨에 따라 임계관통에너지는 증가한다고

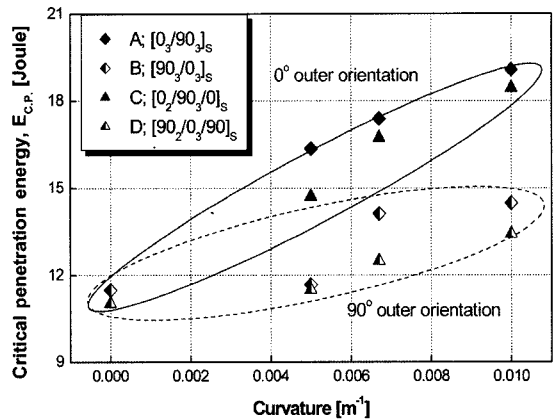


Fig. 8 Critical penetration energy versus curvature

사료된다.

최외층각도 변화에 따른 관통특성을 살펴보면, Fig. 8과 같이 최외층각도 방향이 0°인 A와 C 시험편이 90°인 B와 D 시험편보다 임계관통에너지가 높음을 알 수 있다. 이는 관통실험 시 시험편이 갖는 관통저항력은 굽힘과 전단의 형태로 나타나며, 저속 충격실험에 있어서는 굽힘에 대한 영향을 많이 받는 반면, 관통실험에 있어서는 굽힘에 대한 영향은 미소하며, 전단특성에 지배적이다. 이에 따라 적층셀의 두께방향 중심에 전단응력이 집중되며, 0°로 적층된 레이어가 중심에 위치하는 것 보다 90°로 적층된 레이어가 위치하였을 경우 더 높은 전단저항력을 갖게 된다.

### 3.3 파괴모드

최외층각도 및 계면수 변화에 따른 CFRP 적층셀의 파괴모드를 고찰하기 위해 본 연구에서는 관통점을 기준으로 다이아몬드 커팅기를 이용하여 시험편을 90°방향(원주방향)으로 절단하고 고해상 디지털 카메라로 절단면을 관찰하였다. Figs. 9, 10은 곡률 R=150의 2계면을 갖는 최외층각도 0°인 시험편과 90°인 시험편을 절단한 단면사진이며, Figs. 11, 12는 곡률 R=150의 4계면을 갖는 최외층각도 0°인 시험편과 90°인 시험편의 단면사진을 나타냈다. 모든 시험편에 있어 관통실험에 따른 파괴 패턴은 층간크랙(interlaminar crack), 층내크랙(intralaminar crack) 및 라미나 파단(laminar fracture)등을 포함하였다.

CFRP 적층셀의 임계관통에너지에 가장 중요한 인자는 층간크랙이다. 시험편의 단면을 보면 2계면을 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 첫 번째 계면에서, 90°인 시험편인 경우는 두 번째 계면에서 가장 큰 층간크랙 길이를 보였으며 또한, 4계면을 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 세 번째 계면에서, 90°인 시험편의 경우는 네 번째 계면에서 가장 큰 층간크랙 길이를 보였다.

2계면을 갖는 시험편의 경우를 예로 들면, Fig. 13에서와 같이 관통 시 크랙 진전은 시험편의 충격 뒷면부터 시작되며<sup>10)</sup> 2계면의 시험편인 경우 Fig. 13과 같은 크랙 진전을 보인다. 이에 따라 최외층각도가 90°인 A 시험편은 두 번째 계면에서, 최외층각도가 0°인 B 시험편은 첫 번째 계면에서 가장 큰 크랙 길이를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 적층구성 및 곡률변화가 CFRP 적층셀의 관통특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 곡률 및 적층구성의 변화를 주어 시험편을 제작하고 에어건에 의한 관통실험을 행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계면수에 따른 관통특성을 살펴보면 계면수가 적은 A와 B 시험편의 임계관통에너지는 계면수가 많은 C와 D 시험편보다 높게 나타났다. 그 이유는 계면수가 적을수록 CFRP 적층셀의 충격 전 굽힘강성이 계면수가 많은 CFRP 적층셀의 굽힘강성에 비해 낮게 나타나는 반면, 충격 후 굽힘강성은 더 높게 나타나기 때문이다.
- 2) 곡률 변화에 따른 관통특성을 살펴보면 곡률이 증가함에 따라 임계관통에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 곡률이 증가할수록 굽힘에 의한 변형뿐만 아니라 면내 변형의 저항이 증가하게 되고, 결국 시험편이 관통되는데 필요한 에너지가 더 많이 필요하기 때문이다.
- 3) 최외층각도 변화에 따른 관통특성을 살펴보면 최외층각도가 90°인 B와 D 시험편이 최외층각도가 0°인 A와 C 시험편 보다 낮은 임계관통에너지를 보였다. 이는 적층셀의 두께에 대한 중심으로 갈수록 전단응력이 지배적이며, 90°로 적층된

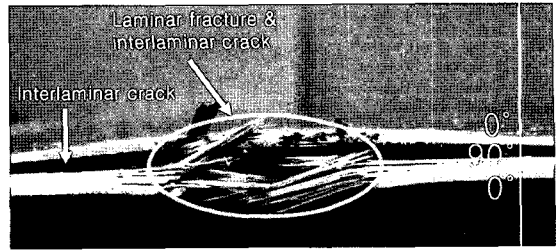


Fig. 9 Section area of A-specimen, R=150

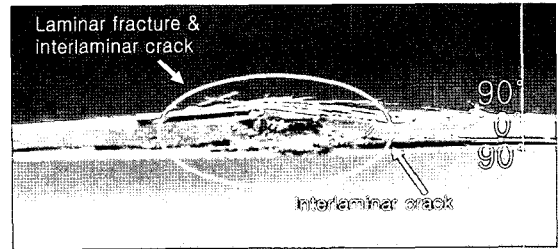


Fig. 10 Section area of B-specimen, R=150

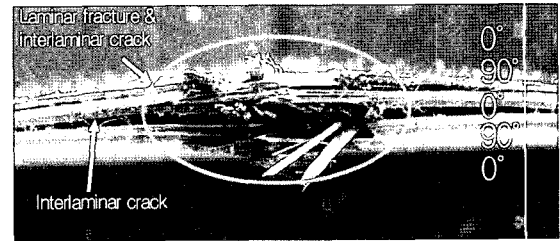


Fig. 11 Section area of C-specimen, R=150

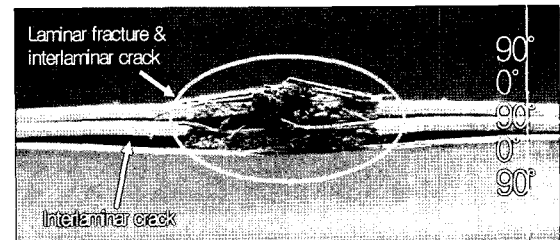


Fig. 12 Section area of D-specimen, R=150

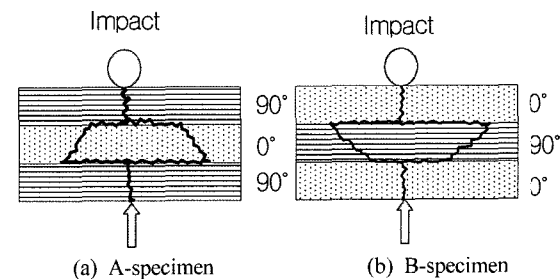


Fig. 13 Laminate penetration mode

레이어가 중심에 위치하였을 경우가 더 높은 전단응력을 갖기 때문이다.

- 4) 관통된 시험편을 절단해서 관통모드를 살펴본 결과, 2계면 수를 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 A 시험편은 충격점으로부터 첫 번째 계면에서 최외층각도가 90°인 B 시험편은 두 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이를 보였다. 또한, 4계면수를 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 C 시험편은 세 번째 계면에서 최외층각도가 90°인 D 시험편은 네 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이를 보였다.

### 후 기

“이 논문은 산업자원부 - 한국산업기술평가원 지정 지역협력 연구 센터인 레이저응용 신기술 연구 개발 연구센터의 2005년도 연구비 지원에 의해 연구되었음”

### References

- 1) K. H. Im, N. S. Park, Y. N. Kim, S. K. Kim and I. Y. Yang, “Characteristic Analysis of Falling Weight Impact Response in CF/Epoxy Composite Plates Using Frequency Responses,” The Korea Society for Composite Materials, Vol.16, No.29, pp.9-17, 2003.
- 2) J. J. Hwang, G. S. Lee, Y. N. Kim, S. W. Ra, J. K. Sim and I. Y. Yang, “Impact Damage of CFRP Laminated Shells with the Curvature,” KSPE Proceeding, pp.1341-1344, 2003.
- 3) D. D. Symons, “Characterisation of Indentation Damage in 0/90 Lay-up T300/914 CFRP,” Composite Science and Technology, Vol.60, No.3, pp.391-401, 2000.
- 4) Y. Tanabe, M. Aoki, K. Fujii, H. Kasano and E. Yauda, “Fracture Behavior of CFRPs Impacted by Relatively High-velocity Steel Sphere,” International Journal of Impact Engineering, Vol.28, pp.627-642, 2003.
- 5) G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, “Indentation and Penetration of Carbon Fibre Reinforced Plastic Laminates,” Composite Engineering, Vol.34, No.4, pp.319-325, 2003.
- 6) Y. J. Cho, Y. N. Kim and I. Y. Yang, “Energy Absorption Characteristics of CFRP Laminated Shell According to High Speed Penetration,” KSPE Proceeding, pp.912-915, 2004.
- 7) Y. N. Kim and I. Y. Yang, “Impact Response and Damage of Composite Shell with Various Curvatures,” 11th APCNDT 2003, pp.72-77, 2003.
- 8) K. H. Im, N. S. Park, Y. N. Kim and I. Y. Yang, “A Study on Impact Characteristics of the Stacking Sequence in CFRP Composites Subjected to Falling-weight Impact Loading,” Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.4, pp.203-211, 2003.
- 9) Y. J. Cho, Y. N. Kim, J. A. Jung and I. Y. Yang, “The Effects of Curvatures and Stacking Sequences on the Penetration Characteristic of CFRP Laminated Shell,” KSAE Proceeding, pp.847-852, 2004.
- 10) S. R. Reid and G. Zhou, “Impact Behaviour of Fiber Reinforced Composite Materials and Structures,” Woodhead Publishing Limited, pp.75-105, 2000.