

곡률을 고려한 CFRP 복합재 적층셸의 관통특성 -관통에 의한 파괴모드를 중심으로-

조영재* (조선대 대학원), 김영남, 심재기, 양인영 (조선대)

Penetration Characteristic of CFRP laminate shell by the curvature
-A focus of fracture mode by the penetration-

Y. J. Cho, (Mechanical Design Eng. Dept., Graduate School Chosun University),

J. K. Sim, (Mechatronics Eng. Dept., Chosun University)

Y. N. Kim, I. Y. Yang, (Mechanical Information Eng. Dept., Chosun University)

ABSTRACT

CFRP composite materials have wide application in structure materials of airplane, ships, and aero space vehicles because of their high strength and stiffness. This paper is to study the effects of curvature and orientation angle on the penetration characteristics of CFRP laminate shell. They are stacked with 8 Ply specimens $[0_2/90_2]_S$, $[0/90_2/0]_S$ and the stacked of outer plates degree with 12 Ply specimens $[0_3/90_3]_S$, $[0_2/90_2/0]_S$ and $[90_3/0_3]$, $[90_2/0_2/90]_S$. They are manufactured to varied curvature radius ($R=100,150,200\text{mm}$ and ∞). They are cured by heating to the appropriate hardening temperature(130°C) by mean of a heater at the vaccum bag of the autoclave. Test specimens were prepared with dimensions $100\text{mm} \times 140\text{mm}$. 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 ballistic-screen sensor located a known distance apart. In general, kinetic energy after impact-kinetic energy before impact rised in all specimens. This study observed a fracture mode inside the specimen after a penetration test using a digital camera and it examined a fracture mode and a penetration mode to stack of outer orientation angle and curvature.

Key Words : CFRP (탄소섬유강화복합재), Stack of Outer Orientation Angle (최외층적층각도),
Fracture Mode (파괴모드)

1. 서론

최근 구조용 재료로 가장 주목받고 있는 선진 복합재료중 탄소섬유 강화 복합재(Carbon Fiber Reinforce Plastics)는 일반 구조용 재료보다 비강성 및 비강도가 우수고 또한 적층방법에 따라 특정방향으로 강도를 높일 수가 있어 경량화가 요구되는 선박, 항공기, 우주비행체, 자동차등 여러 분야에 사용되고 있다. 그러나 적층복합재를 실용화함에 있어 금속재와 다른 설계변수는 횡방향 충격하중에 약하다는 점이다. 따라서 복합적층재 구조부재 적용하기 위해서는 먼저 횡방향 충격하중에 따른 충격거동 및 손상해석, 관통특성 등의 규명이 필수적이며, 이와 더불어 실제 구조부재의 형상에 가까

운 곡면셸의 형태를 위한 적층복합재 셸의 충격실험 및 관통실험 등이 선행되어야 한다. 그러나 CFRP 적층판의 충격에 관한 실험 및 이론 논문들은 평판 또는 직선단면을 갖는 빔 구조물의 충격거동해석 및 손상해석, 관통실험이 대부분이며, 곡률을 갖는 셸의 실험은 저속충격실험을 통한 손상규명 및 거동 해석이 대부분이다. 따라서 실제 수송기계 구조부재에 복합재 셸을 적용시키기 위한 기초자료를 확립하기 위해 최외층각도 변화, 곡률변화, 적층 두께의 변화 및 계면수의 변화를 적용하여 에어건에 의한 관통실험을 행한 후 임계관통에너지를 측정하였다. 또한 관통 후 시험편 내부에 발생한 크랙 패턴 및 관통모드를 관찰하기 위해 다이아몬드 휠을 부착한 자동정밀 절단기로 시험편을

절단한 후 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였으며 최외층각도 변화, 계면수의 변화 및 곡률반경의 변화에 따른 관통모드와 크랙 패턴에 대해 고찰하였다.

2. 연구방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서는 CFRP 적층부재가 실제 구조부재에 이용될 것을 상정하여 일정한 곡률을 갖는 평판부재를 시험편으로 사용하였다. 시험편의 제작은 각 적층순서에 맞게 적층한 후 진공백 성형공정을 통해 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 제작하였다. 챔버(Chamber) 내부 물체에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90 분으로 하여 시험편을 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1}Pa 까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 정도 가압시켜 제작하였다. 사용된 프리프레그는 한국화이바(주)의 CU125NS 로서, 그 물성치는 Table 1 과 같다.

본 실험에 사용된 시험편의 적층구성은 8Ply 경우 $[0_2/90_2]_S$, $[0/90_2/0]_S$ 이며 12Ply 경우는 최외층각도가 0°인 $[0_3/90_3]_S$, $[0_2/90_3/0]_S$ 와 최외층각도가 90°인 $[90_3/0_3]_S$, $[90_2/0_2/90]_S$ 로서 2 계면 구조와 2 계면구조를 갖도록 적층하였다. Fig. 1 은 2 계면 시험편의 최외층각도 변화에 따른 적층방법을 나타냈으며 Fig. 2 는 4 계면 시험편의 최외층각도 변화에 따른 적층방법을 나타냈다. 시험편의 곡률반경은 CFRP 적층부재가 실제항공부재에 이용 될 것을 상정하여 항공기 날개에 일반적으로 사용되는 곡률반경을 ∞ , 100mm, 150mm, 200mm 로 적용하였으며 제작된 시험편은 다이아몬드 휠을 부착한 자동정밀 절단기를 이용하여 100mm×140mm 크기로 절단하였다. 본 연구에 사용된 시험편 규약을 Table 2 에 나타냈다. A 는 $[0_2/90_2]_S$ 로 적층된 시험편으로 최외층각도는 0°, 계면수는 2 개이며 곡률반경은 평판(RU)부터 R20, R15, R10 으로 성형하여 제작하였다.

Table 2 와 같이 제작된 시험편을 가지고 본 연구에서는 A 와 C, B 와 D 를 비교 함으로써 두께의 변화에 따른 관통특성을 고찰하고자 하며 C 와 E, D 와 F 를 비교함으로써 최외층각도 변화에 따른 관통특성을 고찰하고자 한다. 또한, 4 가지 형태의 곡률반경을 적용함으로써 곡률반경 변화에 따른 관통특성을 고찰하고자 한다.

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 elongation [%]	2.1	3.0	1.7
Poissons ratio	-	-	0.30
Resin content	-	-	37 [% Wt]
Curing temperature [$^{\circ}\text{C}$]	-	130	130 $^{\circ}\text{C}$ × 90min.

Table 1 Specimen definition

Spec.	Ply No.	Stacking sequences	Interface No.	Curvature Radius[mm]
A	8Ply	$[0_2/90_2]_S$	2	RU
B		$[0/90_2/0]_S$	4	
C	12Ply	$[0_3/90_3]_S$	2	R20
D		$[0_2/90_3/0]_S$	4	R15
E		$[90_3/0_3]_S$	2	R10
F		$[90_2/0_2/90]_S$	4	

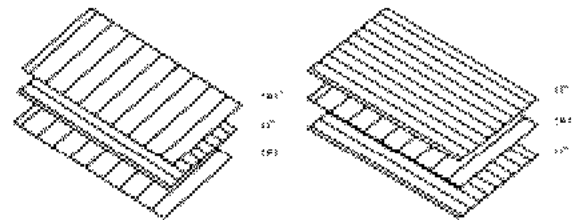


Fig. 1 Schematic of a 2-interface laminate stacking sequence

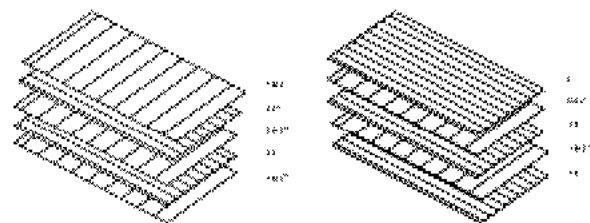


Fig. 2 Schematic of a 4-interface laminate stacking sequence

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치 구성은 Fig. 3 에 나타낸것과 같이 공기를 압축시키는 에어컴프레셔와 에어건 압력을 조절하는 게이지, 초점을 맞추는 레이저 빔, 강구 속도를 측정하는 ballistic screen sensor 및 oscilloscope 와 시험편 고정 지그로 구성되어있다.

실험 방법으로는 에어컴프레셔에서 공기를 압축시킨후 게이지로 압력을 조절한다. 8Ply 시험편은 게이지 압력 3, 4, 5, 6, 7bar 을 적용하였으며 12Ply 시험편은 5, 6, 7, 8bar 을 적용하였다. 레이저 빔으로 시험편의 중심을 맞춘 후 에어 건으로 강구를 발사시킨다. 발사된 강구는 첫번째 센서를 지나 지그에 고정된 시험편을 관통시킨후 두번째 센서를 지나고 스톱박스 안으로 들어간다. Fig. 4는 곡물철펴과 평판철펴의 모든 경계조건을 만족시킬 수 있는 지그를 나타냈다. 강구의 속도는 앞 · 뒤에 설치된 센서에서 감지하여 oscilloscope 로 측정하였으며, 시험편의 임계관통에너지는 관통직전과 관통직후의 운동에너지 차에 의해 측정하였다. 관통실험 후 시험편의 내부에 발생한 섬유파단 및 층간크랙, 층내크랙등을 관찰하기 위해 다이아몬드 휠을 부착한 자동정밀 절단기로 시험편을 절단한 후 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 두께 변화에 따른 관통특성

두께 변화에 따른 CFRP 적층철펴의 관통특성을 알아보기 위해 충격속도의 변화를 주어 각 시험편에 대한 관통실험을 행하였다. Figs. 5, 6 에 관통 전 · 후의 운동에너지를 나타냈다. x 축에 관통 후 운동에너지 y 축에 관통 전 운동에너지를 대입하고 선형커브 피팅을 통해 각 시험편을 관통시키는데 필요한 최소운동 에너지인 임계관통 에너지를 구하였다. 선형으로 커브 피팅한 y- 축상에 위치한 ●는 시험편의 관통에 필요한 최소운동에너지인 임계관통에너지를 나타낸다. Figs. 5, 6 을 살펴보면 2 계면 시험편과 4 계면 시험편 모두 플라이 수가 많은 $[0_3/90_3]_S$, $[0_2/90_2/0]_S$ 시험편의 임계관통에너지가 $[0_2/90_2]_S$, $[0/90_2/0]_S$ 시험편 보다 더 높게 나타났다. 이는 복합재 적층부재의 강도와 강성은 적층부재의 두께와 적층구성에 지배적이기 때문이다.

CFRP 철펴의 파괴모드를 관찰하기 위해 본 연구에서는 관통점을 기준으로 하여 원주 방향을 따라 다이아몬드 커터기를 이용하여 절단하고 고해상도 디지털 카메라로 관찰하였다.

Fig. 7 은 평판시험편의 2 계면을 갖는 8Ply 시험편과 12Ply 시험편의 단면형상이며 Fig. 9 은 곡물

R=100mm 시험편의 단면형상이다.

단면 형상을 보면 가장 눈에 띄는 크랙 즉, 층간크랙을 볼 수 있으며 관통 파괴되는 부분에 층내크랙 및 라미나 굽힘에 의한 파단을 볼 수가 있다. 또한, 2 계면 시험편에서는 첫번째 계면에서 가장 큰 크랙길이를 보이고 있으며, 4 계면 시험편에서는 세번째 계면에서 가장 큰 크랙길이를 보이고 있다. 이는 Fig. 8 처럼 2 계면 시험편은 (A)와 같은 크랙 진전을 보이고 있으며 4 계면 시험편인 경우 (B)와 같은 크랙 진전을 보이고 있기 때문이다.

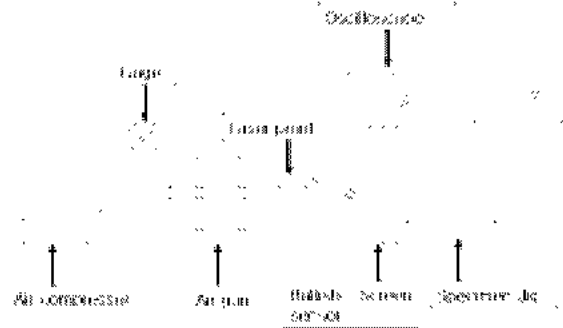


Fig. 3 Schematic diagram of impact test apparatus



Fig. 4 Circular clamping fixtures (a) for flat plate (b) for curved shell

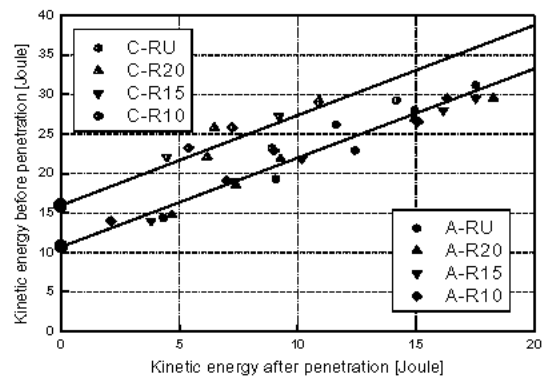


Fig. 5 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0_2/90_2]_S$, $[0_3/90_3]_S$

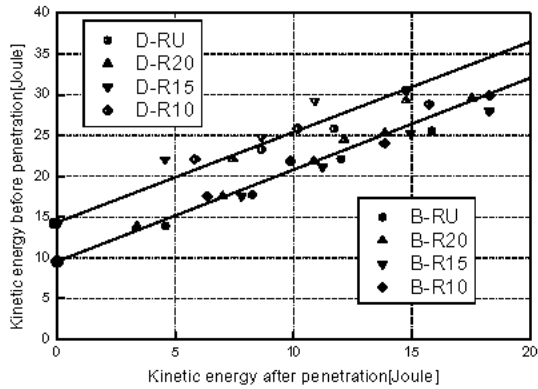


Fig. 6 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0/90_2/0]_S$, $[0_2/90_2/0]_S$



(a) $[0/90_2/0]_S$



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

Fig. 7 Cross sectional shape (flat plate, RU)



(a) $[0_2/90_2]_S$



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

Fig. 8 Cross section shape (curved shell, R10)

3.2 최외층각도 변화에 따른 관통특성

최외층각도 변화에 따른 임계관통 에너지를 Figs. 10, 11에 나타냈다. Figs. 10, 11을 보면 최외층각도가 0° 인 시험편이 90° 인 시험편보다 임계관통 에너지가 높게 나타났다. 이는 관통저항력에 영향을 받

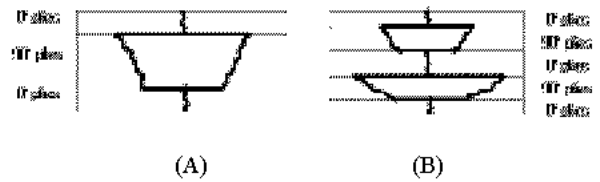


Fig. 9 Laminates' crack pattern

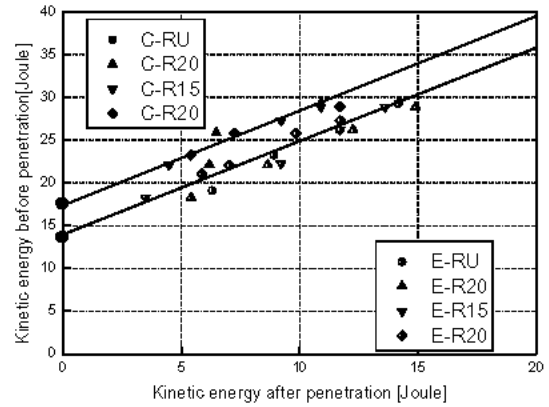


Fig. 10 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0_3/90_3]_S$, $[90_3/0_3]_S$

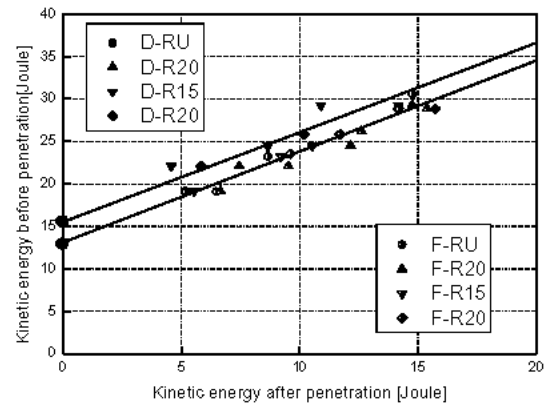


Fig. 11 Relation between kinetic energy after penetration and kinetic energy before penetration, $[0_2/90_2/0]_S$, $[90_2/0_2/90]_S$

는 반면, 본 연구에서와 같이 관통실험에 있어서는 그 영향은 미소하며, 전단에 기인하게 된다. 따라서, 적층셀의 두께에 대한 중심으로 갈수록 전단응력이 집중된다.

Fig. 12에 곡률 변화에 따른 임계관통 에너지를 나타냈다. Fig. 12를 살펴 보면, 모든 시험편에 있어서 곡률이 증가함에 따라 임계관통 에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 CFRP 적

층셀에 횡방향 충격하중이 가해질 경우 평판형상의 시험편은 굽힘에 의한 변형으로 에너지를 흡수하는 반면 곡률형상의 시험편은 굽힘에 의한 변형 뿐만 아니라 면내 변형에 의한 충격에너지를 흡수할 수 반하게 되어 그 결과 더 높은 임계관통에너지를 갖는다.

Fig. 13 은 곡률 R=150 의 2 계면을 가지는 최외층각도가 90°인 시험편과 0°인 시험편의 단면을 나타내었다. 또한, Fig. 14 는 곡률 R=150 를 가지는 최외층각도가 90°인 시험편과 0°인 시험편이 단면을 나타내었다. 2 계면을 갖는 시험편의 단면을 살펴보면 0°인 시험편은 첫번째 계면에서 90°인 시험편은 두번째 계면에서 가장 큰 크랙길이를 보여주고 있다. 또한 4 계면을 갖는 시험편의 단면을 살펴보면 최외층각도가 0°인 시험편은 세번째 계면에서 90°인 시험편은 네번째 계면에서 가장 큰 크랙 길이를

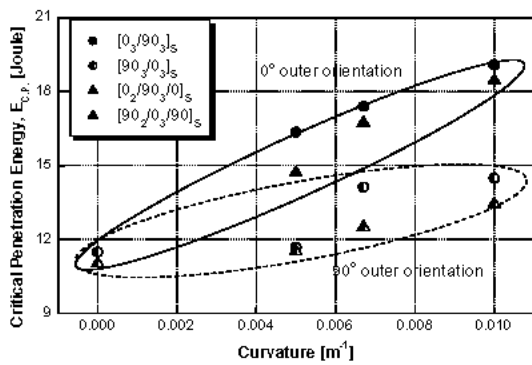
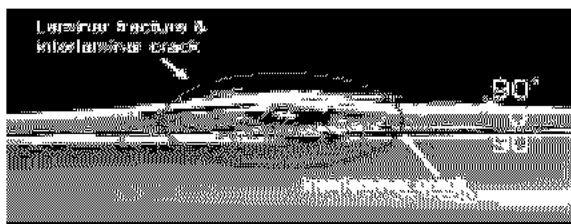


Fig. 12 Critical penetration energy versus curvature



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



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

Fig. 13 Cross section of curved shell specimen with 2 interfaces

보여주고 있다. 이는 충격시 크랙진전은 시험편의 뒷부분부터 이루어지며 2 계면의 시험편인 경우 Fig. 15 와 같은 크랙진전을 보이고 있다. 따라서 2 계면에서 최외층각도가 0°인 시험편은 첫번째 계면에서 90°인 시험편은 두번째 계면에서 가장 큰 크랙 길이를 보이고 있다.

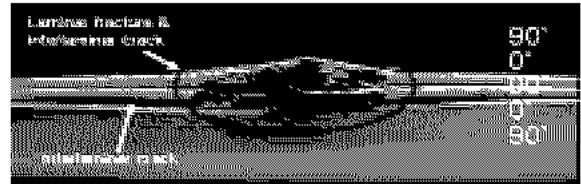
4. 결론

본 연구에서는 두께 변화 및 최외층각도 변화가 곡률 CFRP 적층셀에 미치는 영향을 평가하기 위해 다양한 시험편을 제작하고, 에어 건에 의한 관통실험을 행하였다. 그 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 두께변화에 따른 영향을 살펴보면 평판과 곡률시험편 모두 플라이 수가 많을 수록 더 높은 임계관통에너지를 보였다. 이는 복합재 적층부재의 강도와 강성은 적층부재의 두께와 적층구성에 지배적이기 때문이다



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



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

Fig. 14 Cross section of curved shell specimen with 4 interfaces

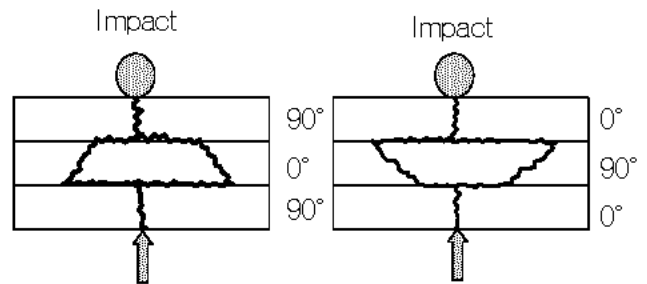


Fig. 15 Laminate penetration mode

2. 최외층각도 변화에 따른 관통특성을 살펴보면 최외층각도가 0°인 시험편이 최외층각도가 90°인 시험편 보다 낮은 임계관통에너지를 보였다. 이는 적층셀의 두께방향에 대해 중심으로 갈수록 전단응력이 지배적이며, 90°로 적층된 레이어가 중심에 위치 하였을 경우가 더 높은 전단응력을 갖는다.

3. 곡률변화에 따른 관통특성을 살펴보면 모든 시험편에 있어 곡률이 증가함에 따라 임계관통에너지는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 곡률이 증가할수록 굽힘에 의한 변형뿐만 아니라 면내 변형의 저항이 증가하게 되고, 결국 시험편이 관통하는 데 필요한 에너지가 더 많이 필요하기 때문으로 생각 된다.

4. 파괴모드를 살펴보면 2 계면 수를 갖는 시험편의 경우 최외층각도가 0°인 시험편은 충격점으로 부터 첫번째 계면에서 최외층각도가 90°인 시험편은 두번째 계면에서 가장 큰 크랙길이를 보였다. 또한, 4 계면 수를 갖는 시험편은 최외층각도가 0°인 시험편 경우 세번째 계면에서 최외층각도가 90°인 시험편 경우 네 번째 계면에서 가장 큰 원주방향 크랙길이가 관찰되었다.

7. Cho, Y. J., Kim, Y. N., Jung, J. A., Yang, I. Y., "The effects of curvatures and Stacking sequences on the penetration characteristic of CFRP laminated Shell" KSAE Proceeding, pp. 847-852, 2004.
8. 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.
9. 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.

참고문헌

1. Im, K. H., Park, N. S., Kim, Y. N., Kim, S. K., Yang, I. Y., "Characteristic Analysis of Falling Weight Impact Response in CF/Epoxy Composite Plates Using Frequency Responses", The Korea Society for Composite Materials, Vol. 16 No. 2, pp. 9-17, 2003.
2. Hwang, J. J, Lee, G S., Kim, Y. N., Ra, S. W., Sim, J. K., Yang, I. Y., "Impact Damage of CFRP Laminated Shells with the Curvature", KSPE Proceeding, pp1341-1344, 2003.
3. Digby 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. Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "Impact Response and Damage of Composite shell with Various Curvatures", 11th APCNDT 2003, pp.72-77,2003
5. Kim, Y. N., Kim, J. H. and Yang, I. Y., "Influence of stacking conditions on the Absorbed Energy characteristics of composite tubes", Vol.18, No.11, pp.34-41, 2001.
6. Cho, Y. J., Kim, Y. N. and Yang, I. Y., "Energy Absorption Characteristics of CFRP Laminated Shell According to High Speed Penetration", KSPE Proceeding, pp.912-915, 2004.