

예 하중이 유리섬유 복합재료 곡선 보의 충격특성에 미치는 영향

이승민[†](KAIST), 임태성* (KAIST), 이대길** (KAIST)

Impact Characteristics of Glass Fiber Reinforced Composite Curved Beams w.r.t. Pre-load

Seung Min Lee, Tae Seong Lim, Dai Gil Lee

Key Words: Specific Strength (비강도), Specific Stiffness (비강성), Macrography (육안검사), Impact damage (충격파손), Delamination (층간박리), Impact energy absorption capacity (충격에너지 흡수능)

Abstract : The low velocity impact characteristics of composite laminate curved beams are investigated to increase damage tolerance and reduce the deflection. Drop weight impact tests of the composite curved beam were performed with respect to pre-load, then the damage after impact was measured by macrography. Also, finite element analyses were performed using ABAQUS to investigate the stress state of composite curved beam with respect to pre-load and impact. From the investigation, it was found that pre-load of the composite curved beams had much influence on impact damage of the curved beam, which showed good agreement with the experiment results.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성과 비강도로 경량화가 요구되는 다양한 산업분야에 적용되고 있으며, 또한 우수한 충격에너지 흡수 특성으로 로봇구조, 차량 충격 빔 뿐만 아니라 보호 장비에도 적용되고 있다. 다양한 섬유강화 복합재료 중에서 유리섬유강화 복합재료는 높은 충격에너지 흡수능 (Impact energy absorption capacity)과 상대적으로 가격이 저렴하다는 장점으로 많은 연구와 이의 사용이 이루어지고 있다.^(1, 2, 3, 4)

유리섬유 강화복합재료에 가해지는 외부의 저속충격은 손상 정도가 잘 식별되지 않는 경우에도 복합재료의 잔류 강도 (Residual strength)를 저하시키게 된다.^(5, 6, 7) 이러한 외부의 충격은 복합재료에 층간박리 (Delamination), 섬유파단 (Fiber Breakage), 기지의 변형 및 균열 (Matrix Deformation and Cracking), 섬유박리 (Fiber Debonding), 섬유인출 (Fiber Pullout)등의 다양한 파괴모드로 나타날 수 있기 때문에 복합재료구조에 있어서 충격 파손 내구성 설계 (Impact Damage Tolerance Design)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(8, 9)

일정한 곡률을 가진 얇은 복합재료 구조물은

항공기의 외판이나 차량 Body Panel 또는 보호장비의 용도로 그 사용빈도가 증가하고 있으나 상기한 저속 충격 파손으로 인하여 적용하는데 어려움이 있어 충격 파손모드에 대한 이해와 충격내구성을 증대시킬 수 있는 설계가 매우 중요하다.

본 연구에서는 곡률을 가지는 유리섬유강화 복합재료 보의 충격특성을 고찰하기 위하여, 일정한 곡률을 가진 복합재료 보를 성형하여 Pre-load 에 따른 복합재료의 응력분포를 평가하였고, 복합재료에 가해진 Pre-stress 가 충격 파손모드에 미치는 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 시험편 재료는 SK 케미칼에서 제조하는 유리섬유강화 복합재료 프리프래그 (UGN-150)로 재료의 성질은 Table 1 과 같다. 시험편의 형상은 길이 200 mm, 폭 20 mm 로 제단한 UGN-150 을[UGN±10]5s 과 같은 적층방법으로 총 20 장의 프리프래그를 적층하여 두께 2.2 mm 의 시험편을 준비하였다. 적층된 시험편은 곡률반지름이 103 mm 인 금형을 이용하여 오토클레이브 (Autoclave)에서 진공백 성형방법으로 제조하였고 제조 시 가해진 압력은 6 기압이다. 시험편 제조 시에 사용한 경화 사이클은 Fig. 1 과 같다.

[†] 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : mh7375@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3261 FAX : (042)869-5221

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

Table 1 Material property of UGN-150 (SK 케미칼)

E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}	ρ_{xy} (kg/m ³)
43.3	14.7	4.4	0.3	1980
X^t (MPa)	X^c (MPa)	Y^t (MPa)	Y^c (MPa)	S (MPa)
1050	700	65	120	65

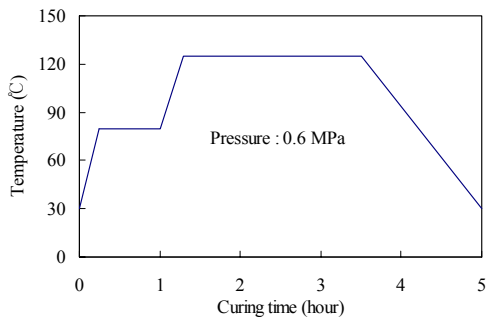


Fig. 1 Curing cycle of UGN-150

2.2 실험 지그 설계 및 Pre-load

곡률을 가진 복합재료 시험편의 Pre-load 영향을 연구하기 위한 지그는 Fig. 2. 와 같다.

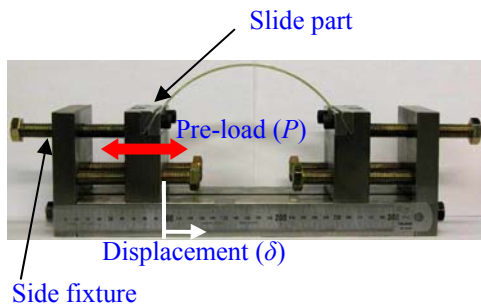


Fig. 2 Experimental jig for pre-load

Fig. 2 와 같이 제작된 지그는 양쪽에 설치된 볼트를 이용하여 변위 (δ)에 따른 Curved beam 의 pre-load 를 조절할 수 있도록 설계하였다. 기술한 성형방법으로 제조된 Curved beam 의 변위(δ)에 따른 응력은 스트레인 게이지를 부착하여 Fig. 3 과 같이 측정하였다. Curved beam 이론에서 일정한 곡률을 가진 beam 에서 Fig. 4 와 같이 하중을 가했을 때 중심에서의 각 (θ)에 따른 응력은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

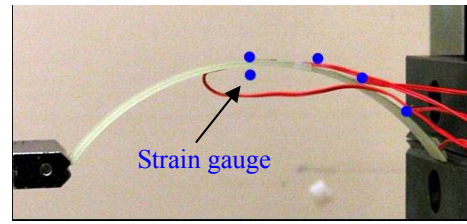


Fig. 3 Measuring of stress w.r.t. pre-load

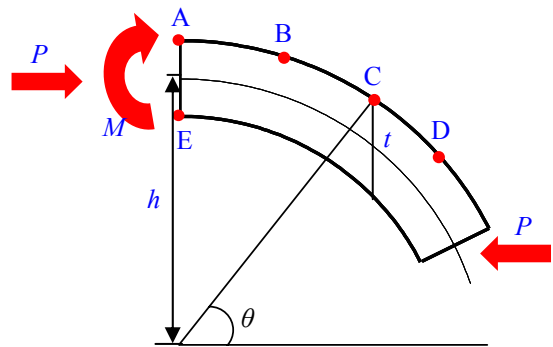


Fig. 4 Free body diagram of curved beam

$$M = ph$$

$$= p(r_2 \sin \theta - \frac{r_2 \sin \theta - \sqrt{r_1^2 - r_2^2 \cos^2 \theta}}{2}) \quad (1)$$

여기서 하중 P 에 수직방향인 높이 t 는 θ 에 대한 함수이므로,

$$c = \frac{t}{2} = \frac{r_2 \sin \theta - \sqrt{r_1^2 - r_2^2 \cos^2 \theta}}{2} \quad (2)$$

와 같은 식으로 나타낼 수 있고 θ 에 따른 응력은 다음과 같은 식이 된다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} + \frac{P}{A} \quad (3)$$

Pre-load 에 따른 Curved beam 에 가해지는 응력은 측정된 하중 (P)와 중심에서의 높이 (h)를 이용하여 각 (θ)에 따라 plot 한 결과와 strain gauge 를 부착하여 측정된 결과는 Fig. 5 와 같다. Fig. 5 에서와 같이 θ 에 따른 각 점 (A~E)은 strain gauge 에서 측정된 응력을 나타내며, 그래프에 나타난 선은 기술한 식을 이용한 결과이다. Fig. 5 에서 점 A~D 에서는 인장응력이 발생하였고, 점 E 에서는 압축응력이 발생하였다. 또한 변위 (δ)가

증가할수록 높은 응력이 발생하였고, curved beam 의 중심인 지점 ($\theta=90^\circ$)에서 가장 높은 응력이 발생함을 알 수 있다.

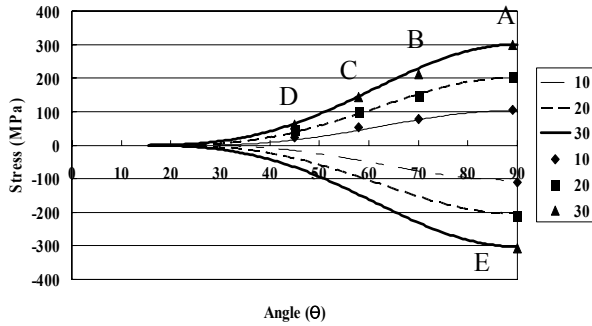


Fig. 5 stress of curved beam w.r.t. pre-load

점 A 와 E 에서 변위에 따른 하중과 curved beam 에 발생한 응력은 Table 2 와 같다.

Table 2 Load, stress at points A and E w.r.t. displacement

변위	10 mm	20 mm	25 mm	30 mm
하중	37 N	63 N	74 N	85 N
응력 A	106.3MPa	204.5MPa	253.4MPa	299.8MPa
응력 E	111.4MPa	212.0MPa	261.2MPa	307.4MPa

2.3 Impact 실험장치

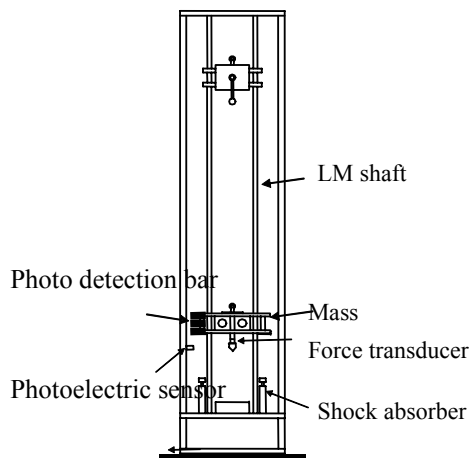


Fig. 6 Schematic diagram of impact tester

Curved beam 에 가해진 Pre-load 에 따른

충격특성을 연구하기 위해 Fig. 6 과 같은 Drop weight 충격시험기를 사용하였다. 충격시험에서 사용된 반구형의 Tup 질량과 반지름은 각각 6.4 kg, 5 mm 이며, photoelectric sensor (E32-T11L and E3X-F21, Omron, Japan)를 사용하여 측정된 Tup 의 초기속도는 2.7 m/s 였고, force transducer (PCB234B, PCB, USA)로부터 하중신호를 얻었다.

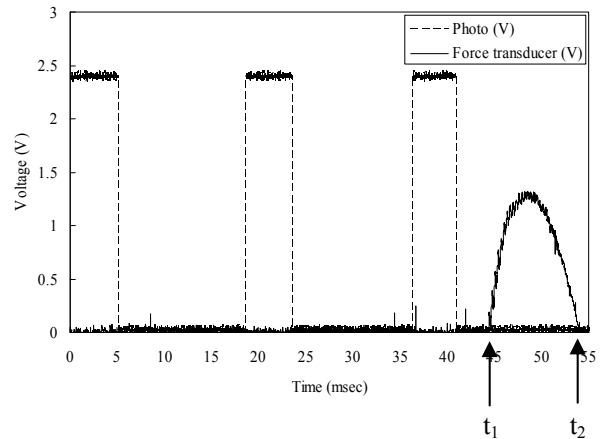


Fig. 7 Signal from the photoelectric sensor and the force transducer

Fig. 7 은 충격시험 중에 photoelectric sensor 와 force transducer 로부터 얻은 그래프이며, photo detection bar 간의 거리로부터 중력을 고려하여 초기속도를 구할 수 있었다. 다음과 같은 식으로 하중, 가속도, Tup 의 변위 와 충격에너지 E 를 구할 수 있다.

$$a = F / m + a_g \tag{4}$$

$$v = \int_{t_1}^{t_2} a dt + v_{initial} \tag{5}$$

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v dt \tag{6}$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} F ds = \int_{t_1}^{t_2} F v dt \tag{7}$$

여기서, F 는 측정된 하중이고, a_g 는 실험장치의 LM shaft 의 마찰력을 고려한 Tup 의 가속도이며, a 는 충격자의 가속도이다. 센서로부터 측정된 속도 v , 충격자의 수직 변위 s 와 충격에너지 E 는 센서로부터 측정된 시간 t_1 부터 t_2 까지 적분함으로써 얻을 수 있다.

3. 충격시험 결과 및 유한요소 해석

3.1 충격실험 결과

충격에너지에 의한 복합재료의 파괴는 다양한 파손모드로 진전되게 되는데 일반적으로 저속 충격일 경우 충격자가 접촉하는 면에서는 압흔에 의한 압축응력이 발생하며, 반대 면에서는 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 응력이 재료의 강도보다 높은 경우에는 파손으로 진전되게 된다. 복합재료 Curved beam 에 Pre-load 를 가한 상태에서 외부의 충격이 가해질 경우에는 일반적인 Curved beam 에 발생하는 응력과는 다른 형태의 응력이 발생 할 수 있다. 이러한 Curved beam 에 충격하중을 가했을 경우 Pre-load 효과에 대한 연구를 수행하기 위해 시험편의 중앙인 A 지점에 Tup 이 접촉할 수 있도록 실험을 수행 하였다. Fig. 8 은 Pre-load ($\delta=0, 10, 20, 25, 30$ mm)에 따른 하중-시간 그래프를 나타내고, Fig.9 는 Pre-load ($\delta=0, 10, 20, 25, 30$ mm)에 따른 수직변위-시간 그래프를 나타낸다.

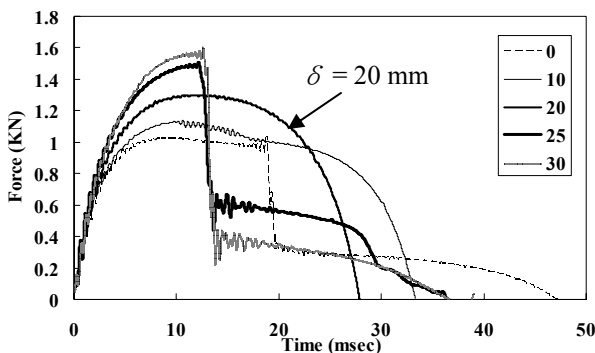


Fig. 8 Impact force-time history of curved beam

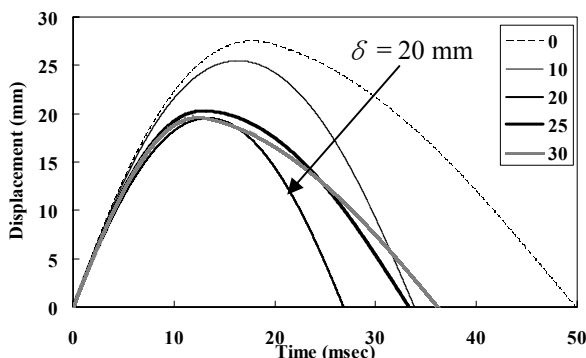


Fig. 9 Impact displacement-time history of curved beam

Fig. 8 은 Pre-load 가 증가할수록 Curved beam 의 최대하중이 증가하는 경향을 보이고 있다. Pre-load 를 가하지 않았을 경우와 변위 (δ)가 10 mm 인 경우 (A 지점 인장응력 : 106.3 MPa, E 지점 압축

응력 : 111.4 MPa) 23 J 의 충격 에너지에 의해 A 지점과 E 지점에서 각각 압축과 인장의 파손모드를 나타내고 있다. 그러나 변위 (δ)가 20 mm 인 경우 (A 지점 인장응력 : 204.5 MPa, E 지점 압축응력 : 212.0 MPa)에는 파손모드를 관찰 할 수 없었고, 변위 (δ)가 각각 25 mm 이상인 경우 (A 지점 인장응력 : 253.4 MPa, E 지점 압축응력 : 261.2 MPa)에는 전단 및 압축응력으로 인한 파손모드가 관찰되었다.

Fig. 9 는 Pre-load 가 증가 할수록 수직변위가 감소하는 경향을 보이고 있으나, A 지점에서 인장응력이 204.5 MPa, E 지점에서 압축응력이 212.0 MPa 이상일 경우에 정점에 도달함을 알 수 있다. 이는 Fig. 9 의 결과를 고려해 볼 때 전단파손에 의한 영향으로 생각된다. 충격실험 후 각각의 시험편을 육안검사 (Macrography)의 방법으로 확인한 파손정도는 Fig. 10 의 결과와 같다.

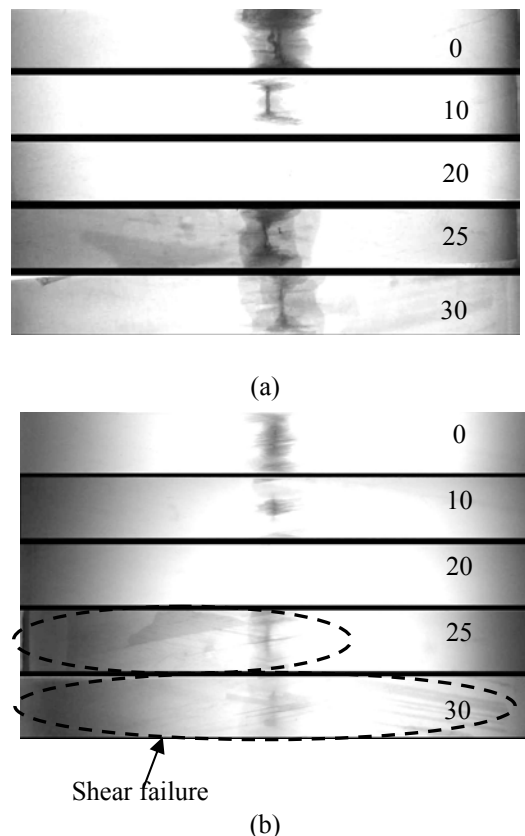


Fig. 10 Damage after impact test w.r.t. pre-load : (a) Top surface, (b) Bottom surface

Fig. 10 의 결과와 같이 Curved beam 에 가해진 Pre-load 는 충격파손정도에 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 10 (a)의 결과에서 204.5 MPa 의 인장응력이 가해진 상태에서 외부의 충격하중이 가해질 경우 접촉면에서 파손이 거의 없음을 확인 할 수 있

었고, 나머지의 경우에는 접촉면에서 압축에 의한 파손을 보여주고 있다. 접촉면과 반대면인 시험편의 충격후면에서 200 MPa 이상의 압축응력이 가해진 상태에서 외부의 충격이 가해질 경우에는 파손이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나, 260 MPa 이상의 압축응력이 가해진 경우에는 전단에 의한 파손이 발생되었고, 전단파손의 길이도 Pre-load 에 비례하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 9 의 하중-시간선도 그래프와 Fig. 10 (b)의 결과를 고려해보면 260 MPa 이상의 Pre-stress 가 가해진 경우 전단, 압축파손이 발생되었음을 알 수 있다. 그러므로 이러한 Curved beam 을 설계 시 일정한 Pre-load 효과를 고려 한다면 실험결과와 같이 충격 파손 내구성 (Impact Damage Tolerance)을 증가 할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 유한요소 해석

범용구조 해석프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 변위 (δ)에 따른 Curved beam 의 응력과 충격에 의한 응력을 해석하였다. 유한요소해석에 사용된 Curved beam 의 물성은 UGN-150 의 적층각과 적층순서를 고려하여 Axiomatic CLPT⁽¹⁰⁾ 프로그램을 사용하여 계산된 구형좌표계 물성을 사용하였고, 경계조건은 Curved beam 의 양끝을 구속하였으며, 충격실험과 동일한 무게, 초기속도, Tup 형상으로 모델링 하였다. 유한요소해석은 먼저 변위 (δ)에 따른 정적 해석을 통해 Curved beam 에 가해지는 응력을 확인하였고, Pre-load 를 가한 상태와 그렇지 않은 상태의 충격해석을 하여 그 결과를 비교하였다.

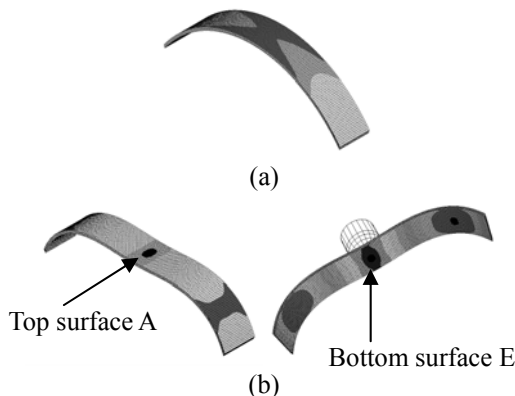


Fig. 11 Finite element analysis process : (a) Before impact, (b) After impact

Fig. 11 (a)와 같이 상면 (Top surface)과 하면 (Bottom surface)에 각각 인장과 압축 Pre-stress 가 가해진 상태에서 Fig. 11 (b)와 같이 충격해석을 실

시하였고, 이때 A 지점과 E 지점에 가해지는 응력과 충격실험에서 얻어진 결과를 비교하였다. 충격 해석 시 Tup 이 접촉하는 A 지점에서는 압축응력이 발생하였고, E 지점에서는 인장응력이 발생함을 알 수 있다.

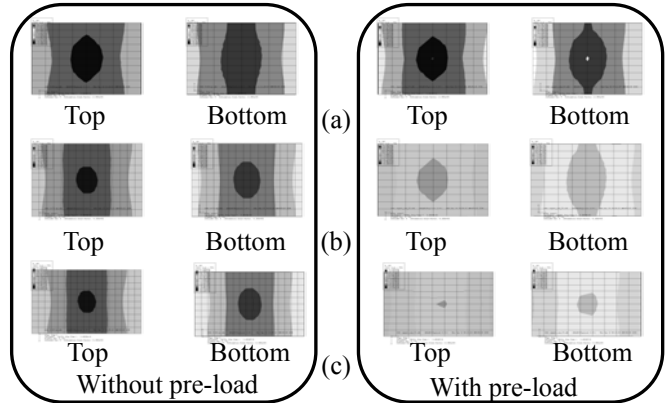


Fig. 12 Comparison of impact stress between the with and without pre-load : (a) $\delta = 10$ mm, (b) $\delta = 20$ mm, (c) $\delta = 30$ mm

Table 3 FE analysis result w.r.t. pre-load

		Impact stress (MPa)	
		A	E
$\delta = 10$ mm	Without pre-load	-765.9	735.3
	With pre-load	-590.0	540.0
$\delta = 20$ mm	Without pre-load	-806.1	768.1
	With pre-load	-529.6	483.8
$\delta = 30$ mm	Without pre-load	-822.8	785.9
	With pre-load	-445.1	443.6

Fig. 12 와 Table 3 의 유한요소해석 결과와 같이 Curved beam 의 Pre-load 와 저속 충격에 의해 발생하는 응력의 상관관계를 비교해 보면, Pre-load 상태에서는 A 지점에 인장응력이 E 지점에서는 압축응력이 발생되었고, 외부의 충격 시 A 지점에서는 국부적인 압축응력이 E 지점에서는 인장응력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 해석결과를 통해 A 지점에서의 인장 Pre-stress 가 충격 시 가해지는 압축응력을 상쇄하는 역할을 하여 상대적으로 낮은 응력수준을 보여주고 있고, E 지점에서의 압축 Pre-stress 가 충격간 가해지는 인장응력을 상쇄하

는 동일한 결과를 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께 2.2 mm, 폭 20 mm 의 유리섬유강화 복합재료 Curved beam 의 충격특성 중 Pre-load 따른 충격 응력, 수직변위 (Deflection), 충격 파손에 대하여 연구하여 최적의 Pre-load 조건을 알아내었으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 유한요소 해석 결과 Pre-load 를 가한 조건에서 외부의 충격으로 인해 응력이 발생할 경우 Pre-load 의 응력과 충격응력은 일정한 상관관계를 보여 주었다.
- 2) 충격 실험간 Pre-load 가 증가할수록 Curved beam 이 견딜 수 있는 최대하중과 굽힘강도 (Flexural rigidity)는 증가하고, 충격 하중방향의 변위는 일정 수준까지 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) Curved beam 에 가해진 Pre-load 에 따라 동일한 충격에너지 (23 J)에서 서로 다른 파손모드를 보여 주었고, 특히 일정 수준의 Pre-load 를 가했을 경우 충격 하중에 의한 파손 (Damage)이 현저히 감소하는 효과를 볼 수 있었다. 그러나 최적의 Pre-load 조건을 넘는 경우에는 Pre-load 를 가하지 않은 조건에서와는 달리 층간분리 (Delamination)→압축파손 (Compressive failure)의 순서로 진전됨을 알 수 있었다.
- 4) Curved beam 에 이러한 최적의 Pre-load 효과를 적용하면 충격 파손 내구성 설계 (Impact Damage Tolerance Design)가 가능하여 우수한 충격특성을 가진 복합재료 구조물로 설계할 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 두뇌한국 21 사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gibson, R.F., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, New York, pp. 13-31
- (2) Thornton PH., 1979, "Energy Absorption in Composite Structures. J," *Journal of Composite Materials*, Vol. 13, pp. 247 - 262
- (3) Suh JD, Lee DG, 2002, "Composite Machine Tool Structures for High Speed Milling Machines,"

Annals of the CIRP 51, pp. 285 - 288

- (4) Lee CS, Lee DG, Oh JH, Kim HS, 2002, "Composite Wrist Blocks for Double Arm Type Robots for Handling Large LCD Glass Panels," *Composite Structures*, Vol. 57, pp. 345 - 355
- (5) de Freitas M, Reis L, 1998, "Failure Mechanisms on Composite Specimens Subjected Compression after Impact," *Composite Structures*, Vol. 42, pp. 365 - 373
- (6) Hitchen SA, Kemp RMJ, 1995, "The effect of Stacking Sequence on Impact Damage in a Carbon Fibre / Epoxy Composite," *Composite Structures*, Vol. 25, pp. 207 - 214
- (7) de Freitas M, Silva A, Reis L., 2000, "Numerical Evaluation of Failure Mechanisms on Composite Specimens Subjected to Impact Loading," *Composites Part B* 31, pp. 199 - 207
- (8) Liu D., 1988, "Impact-induced Delamination - a View of Bending Stiffness Mismatching," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 674 - 691
- (9) Abrate S., 1998, *Impact on Composite Structures*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 161 - 162
- (10) Lee DG, Suh NP, 2004, *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures*, Oxford in press