

# 곡률을 가진 적층복합재 구조에서의 저속충격손상 평가

전정규\* · 권오양\*\*

## Damage Assessment of Curved Composite Laminate Structures Subjected to Low-Velocity Impact

Jung-Kyu Jun and Oh-Yang Kwon

**Key Words:** Curved Composite Laminate, Low-Velocity Impact, Damage Resistance, Delamination

### Abstract

Damage induced by low-velocity impact on the curved composite laminates was experimentally evaluated for CFRP cylindrical shells with the radius of curvatures of 50, 150, 300, and 500 mm. The result was then compared with that of flat laminates. The radius of curvatures and the effective shell stiffness appeared to considerably affect the dynamic impact response of curved shells. Under the same impact energy level, the maximum contact force increased with the decreasing radius of curvatures, with reaching 1.5 times that for plates at the radius of curvature of 50 mm. Since the maximum contact force is directly related to the impact damage, curved laminates can be more susceptible to delamination and less resistant to the low-velocity impact damage. The distribution of delamination along the thickness direction of curved laminates are also different from that of flat plates. Delamination was distributed rather evenly at each interface along the thickness direction of curved laminates. This implies that the effect of curvatures has to be considered for the design of a curved composite laminate.

### 1. 서 론

적층복합재료 구조를 실용화함에 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나는 이 재료가 횡방향 충격하중에 약하다는 점이며, 따라서 이에 관한 연구가 국내·외적으로 매우 많이 이루어졌다. 그러나 지금까지 보고된 연구는 거의 대부분 복합재료 평판 또는 직선 단면을 갖는 빔 구조물에 관한 것이었으며, 실제 형상에 가깝게 곡률을 가진 복합재 셸 구조에 관한 연구는 매우 적다. 하지만 실제로 항공기 날개나 동체, 압력용기, 배관, 로켓모터 케이스와 같은 복합재료 구조물들은 거의

예외 없이 셸의 형태를 띠고 있으므로 곡률을 가진 복합재 셸의 동적 거동이나 손상 해석은 매우 중요하다. 저속충격의 문제는 실험과 해석적인 방법으로 계속 연구되어 왔는데, 크게 충격거동 해석과 충격손상해석으로 나눌 수 있으며 최근에 와서 복합원통셸의 저속충격거동을 해석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-8].

곡률을 가진 복합재료 셸의 충격거동은 Lee와 Huang[1], Palazotto와 Perry[2], Ramkumar와 Thakar[3] 등에 의해 실험과 해석적인 방법으로 연구되었고, 국내에서는 이영신·이기두[4], Goo와 Kim[5] 등이 충격거동을 연구하였다. 곡률을 가진 복합재 구조의 저속충격손상을 실험이나 이론적으로 해석한 연구는 더욱 제한적인데 Christoforou와 Swanson[6], Wardle와 Lagace[7], 최근에 Cho등[8]에 의해 충격손상에 관한 연구가 수행되었다.

다만, 복합재 셸의 충격손상에 관한 연구는 충

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

격거동에 관한 연구에 비해 매우 제한적이며, 대부분의 연구가 이론과 수치해석에만 의존하여 그 결과의 적합성을 입증하는데 있어 불충분하다고 할 수 있다. 특히, 저속충격을 받는 복합재료 평판에서 최대 접촉력(peak force)과 손상저항성(damage resistance)사이의 상호관계가 있음이 잘 알려진 사실이나[9], 곡률을 가진 복합재 쉘의 경우에는 그 연구가 아주 미흡하다. 따라서, 본 연구에서는 동일한 충격조건 하에서 구조의 기하학적 형상의 변화에 따라 달라지는 충격거동과 충격손상의 상호관계를 규명하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 곡률을 가진 시편

시편의 제작은 각 적층순서에 맞게 적층한 후 진공백 성형 공정을 통하여 오토클레이브 내에서 82°C, 0.29MPa에서 30분 그리고 125°C, 0.49MPa에서 90분 동안 2단계로 경화시켜 제작하였다. 사용된 프리프레그는 SK Chemicals의 UIN125B이고, 그 물성치는 Table 1과 같다. 원통의 일부본인 쉘 시편을 제작하기 위하여 각각의 곡률반경에 대하여 특별히 고안된 알루미늄 몰드를 제작하여 몰드 위에 진공백 성형을 하였는데, 그 성형 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 제작된 시편의 특성은 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Lamina properties of UIN 125B graphite/epoxy

$E_1$ (GPa)	144.6
$E_2$ (GPa)	6.9
$G_{12}$ (GPa)	4.2
$\nu_{12}$	0.32
$\rho$ (g/cc)	1.6

Table 2 Parameters of the test specimens

Parameter	[0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> ]	[45 <sub>4</sub> /-45 <sub>4</sub> /-45 <sub>4</sub> /45 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>
Radius(mm)	50, 150, 300, 500, ∞	100
Length(mm)	76.2	76.2
Arc length(mm)	76.2	76.2
Thickness(mm)	1.7	3.6
Quantity(ea.)	20	20

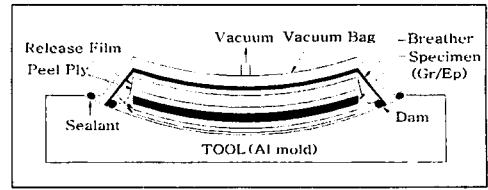


Fig. 1 A schematic of vacuum-bag molding system

### 2.2 시편 고정대

제작된 쉘과 평판에는 충격시험기의 시편 고정장치에 적합하고, 동시에 모든 시편에 대해 동일한 경계조건을 만족시키는 시편 고정대(fixture)가 요구되었다. 모든 시편의 축방향 가장자리는 고정지지(fixed) 경계조건이고, 원주방향으로는 자유(free) 경계조건을 만족시키도록 시편 고정대가 제작되었다. 고정대는 또한 시편의 곡률반경과 두께에 따라 각 경계조건을 만족시키도록 제작하였으며, 볼트로 조이도록 제작된 두 지그와 시편 양 끝단과 접촉이 발생하는 부위에 부착된 고무로 구성되어 있다.

### 2.3 충격실험

충격실험은 Dynatup 8250 충격시험기를 사용하여 이루어졌으며, 모든 실험에서 시편에 한번의 충격만이 가해지도록 리바운드 브레이크 시스템을 작동시켰다. 본 실험에서 사용된 팁(tip)은 지름 12.7mm인 반구형의 스틸이고 충격체 질량은 3.25kg이었다. 데이터의 취득은 Instron 830-I 프로그램을 통해 접촉력, 변위, 충격에너지를 얻었다.

본 실험에서는 [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] 적층구조를 갖는 시편에 대해 동일한 충격에너지 3.2J을 가하였고, [45<sub>4</sub>/-45<sub>4</sub>/-45<sub>4</sub>/45<sub>4</sub>]<sub>s</sub> 적층구조의 시편은 충격속도를 1.81, 2.10, 2.22, 2.35, 2.52 m/s와 같이 증가시키면서 충격응답을 관찰하였다.

### 2.4 충격손상의 관찰

충격손상의 관찰은 [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] 적층구조를 갖는 시편에 대해 곡률반경이 각각 50, 150, 500 mm인 경우에 동일한 충격에너지 3.2J을 가한 후 수행하였다. 충격실험 후에 생긴 시편 내부의 층간분리는 Fig. 2의 90° 플라이 방향으로 약 1mm 간격으로 다이아몬드 커터로 절단한 후 단면을 광학현미경(배율 100×)으로 관찰하여, 4개의 계면에서의 층간분리 형태와 영역을 손상지도(damage map)로 도시하였다. 편의상, Fig. 2에서처럼 충격면으로부터 각 계면을 1, 2, 3, 4로 정하였다. 손상도를 정량화하기 위해서 각 계면에서

0° 플라이와 90° 플라이 방향으로 발생한 가장 긴 층간분리 길이를 측정한 후, 두 값을 평균하여 평균손상길이(average damage extent)로 하였다.

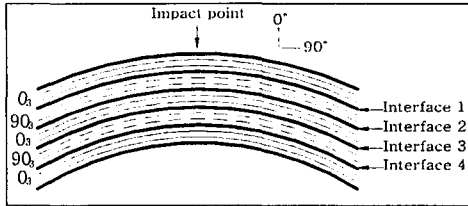


Fig. 2 Interfaces of a curved composite laminate specimen

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 충격거동

Fig. 3은 충격속도가 1.40m/s일 때 각각 50, 300, 500 mm 및 ∞의 곡률반경을 갖는 복합재 셀에서 시간에 따른 접촉력의 변화를 [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] 적층구조의 시편에 대하여 나타낸 것이다. 곡률반경이 감소함에 따라 최대 접촉력은 증가하고 접촉시간은 감소하였다. 이것은 평판에서 곡률이 큰 셀 형태의 구조물로 천이될 때, 구조물의 강성이 더 커진다는 것을 의미한다. 이 결과는 강성과 셀의 곡률반경이 동적 충격거동에 상당한 영향을 미침을 보여준다. [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] 적층구조의 시편에서 곡률반경 50mm인 셀의 최대 접촉력은 평판에서의 최대 접촉력보다 1.46배 더 크게 나타났다.

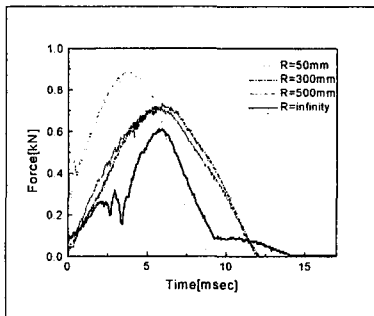


Fig. 3 Contact force vs. time curves with different radius of curvatures for [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] specimens

Fig. 4는 충격속도가 1.40m/s일 때 최대 처짐

(deflection)에 대한 곡률반경의 영향을 보여준다. [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] 적층구조 시편에서 R=500mm인 경우 R=300mm인 경우보다 최대 처짐이 0.35mm 더 작게 나타나서 약 5%의 감소를 보이지만, 전체적으로 곡률반경이 커질수록 최대 처짐이 크게 나타났고, 이것은 강성의 저하에 기인한 결과로 생각된다.

동일한 곡률반경을 갖는 셀의 경우, 충격속도의 변화에 따른 접촉력과 충격거동의 변화는 비슷한 양상을 가지며 접촉력의 크기는 대략적으로 충격속도에 비례함을 실험을 통해 알 수 있었다. Fig. 5는 충격속도가 1.81, 2.10, 2.35 m/s인 충격체에 의해 충격을 받았을 때 발생하는 접촉력이력을 보여준다. 고려된 충격속도가 1.81m/s인 경우 시간에 따른 접촉력이력 곡선의 요동 정도가 비교적 작지만, 충격속도가 증가하여 2.35m/s가 되면 접촉력 곡선은 심하게 요동함을 알 수 있다. 또한 접촉시간과 변위이력 곡선도 충격속도가 증가하면서 커짐을 알 수 있었다.

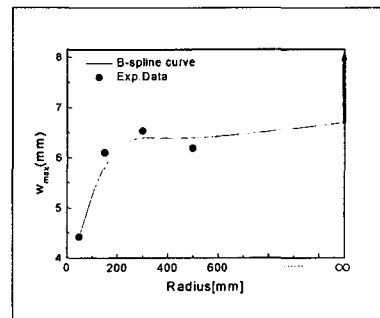


Fig. 4 Effect of the radius of curvature on the maximum central deflection for [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] specimens

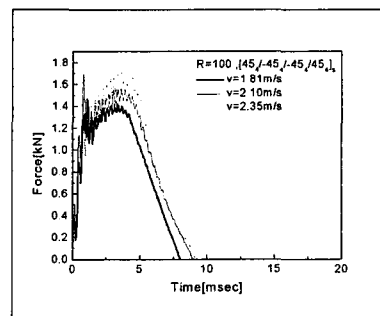


Fig. 5 Contact force vs. time curves with different impact velocities

### 3.2 충격손상 특성

Fig. 6은 저속충격 실험 후 충격을 받은 위치에 서 각각 500, 150, 50 mm의 곡률을 가진 세 개의 시편 내부 계면에 생긴 층간분리 영역을 계면별로 (a), (b), (c)에 나타내었다. 동일한 충격에너지를 가했지만 각 계면에서 발생한 손상의 형태와 영역은 곡률반경이 감소할수록 평판에 가까운 R=500mm 시편과 비교할 때 매우 다르다는 것을 알 수 있다. 곡률반경이 큰 (a)에서는 계면 4에서 가장 큰 층간분리를 보였고, 층간분리의 형태와 형상의 양상은  $[0_n/90_n/0_n/90_n/0_n]$  구조의 평판에서 발생하는 저속충격손상과 거의 동일한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

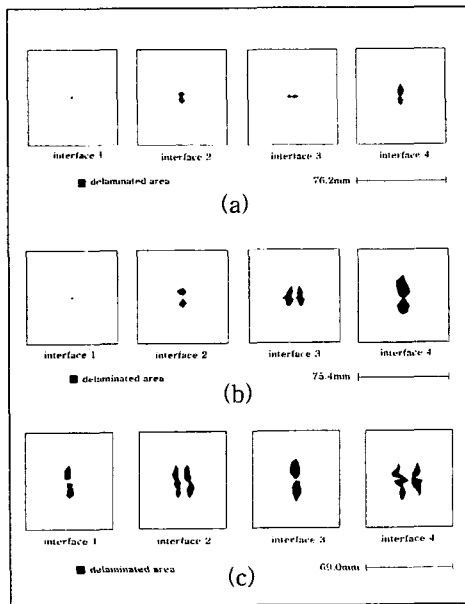


Fig. 6 Damage map of the impacted  $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$  specimens after 3.2J impact  
(a) R=500mm, (b) R=150mm, (c) R=50mm

그러나 곡률반경이 감소하면서 (b)와 (c)에서는 평판의 손상과 뚜렷이 구분되는 손상특성을 나타냄을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 특히, 계면 3의 층간분리 형상이 평판에 가까운 R=500mm 시편의 경우와 대조적인 특성을 보이고 있는데, 손상의 장축 방향이 각 계면 아래 플라이의 섬유 방향을 따라가지 않고 수직하게 분포하고 있다. 계면 1의 층간분리 형상도 (a)와 (b)에서는 보이지 않지만 (c)의 경우는 계면 3과 동일한 손상특성을 보

인다. 이런 분포 경향은 곡률을 가진 셀에서는 계면 아래 플라이의 섬유방향과 무관하게 시편의 축 방향에 평행하게 층간분리가 성장함을 보여준다. 이것은 충격하중 부하 중에 셀은 내부에 면내압축응력(compressive membrane stress)들이 존재하여 판과 층간응력의 분포 상태가 다르기 때문이다[8].

Fig. 7은 4개의 계면에서 발생한 손상에 대해 동일한 충격조건 하에서 시편의 곡률반경과 평균 손상길이의 관계를 보여준다. 계면 1에서는 R=50 mm 시편의 경우만 관찰 가능한 손상이 발생되었고, 계면 2, 3, 4에서는 곡률반경이 감소할수록 평균손상길이가 뚜렷하게 커지는 경향을 볼 수 있다. 즉, 동일한 충격조건 하에서 곡률을 가진 복합재 셀은 평판보다 더 큰 저속충격손상이 내부에 발생한다. 또한, 평판에 가까운 R=500mm 시편의 경우는 손상의 발생이 충격지점의 반대편으로 집중되어 있으나, 곡률반경이 작은 R=50mm 시편에서는 충격지점에 가까운 계면 1과 계면 2에서도 큰 손상이 발생함을 확인하였다.

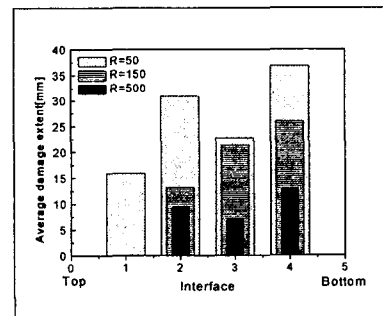


Fig. 7 Average damage extent vs. interface with different radius of curvatures

### 3.3 충격거동과 충격손상의 상호관계

Fig. 8은 서로 다른 곡률을 가진 복합재 셀(R=50, 150, 500 mm)에 동일한 충격조건이 적용될 때, 실험을 통해 관찰된 평균손상길이와 최대 접촉력 사이의 관계를 보여준다. 최대 접촉력이 증가할수록 각 계면에서 발생한 층간분리가 증가됨을 알 수 있다. 최대 접촉력의 증가는 동일한 충격조건 하에서 곡률반경의 감소를 의미하므로, 곡률이 심한 복합재 셀에서는 곡률이 완만한 경우보다 더 큰 최대 접촉력과 충격손상이 발생한다. 이에 따라 곡률을 가진 적층복합재 셀은 평

판보다 손상저항성이 더 작은 것을 의미하므로 복합재료 설계 시 구조의 기하학적 형상을 반드시 고려하여야 하며 평판에서 얻은 자료를 그대로 적용하는 것은 곤란하다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단의 학술 연구비에 의하여 지원되었음.(KRF-98-018-E00088)

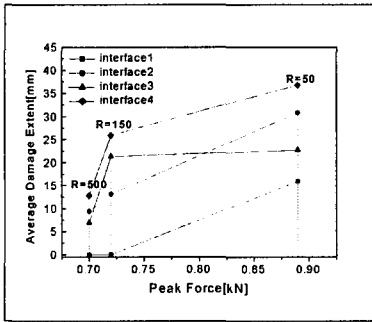


Fig. 8 Average damage extent vs. peak force at different interfaces

#### 4. 결론

본 연구는 곡률을 가진 적층복합재 구조의 저속충격손상을 평가하기 위한 것으로 적층복합재 셀 형태의 시편을 제작하고 횡방향 충격하중을 가하였을 때의 충격거동과 충격손상 특성을 평가한 지금까지의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 곡률을 가진 얇은 적층복합재 구조에서 최대 접촉력은 곡률반경이 감소함에 따라 증가하고, 접촉시간과 최대 처짐은 감소한다. 이것은 동일한 충격조건 하에서도 곡률반경의 감소에 따라 셀의 강성이 증가하는데 따른 결과이다.

2. 동일한 곡률반경을 갖는 적층복합재 셀의 경우, 충격속도의 변화에 따른 접촉력과 충격거동은 비슷한 양상을 보이며 접촉력의 크기는 충격속도에 비례한다.

3. 동일한 충격조건 하에서 곡률을 가진 적층복합재 셀에서는 평판의 경우보다 더 큰 층간분리가 유발되어 적층복합재 구조의 손상저항성이 감소한다.

4. 곡률을 가진 적층복합재 구조에서 손상위치는 평판의 경우 층간분리가 충격면 반대편에서부터 발생하는 것과 달리 충격면에 가까운 계면에서도 층간분리가 일어난다. 또한 층간분리의 성장 방향도 평판의 경우와는 달리 계면 아래 플라이의 섬유방향과 무관하게 시편의 축 방향에 평행하다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, L. J. et al., "Geometrical nonlinear analysis of composite cylindrical shell panels subjected to impact", Finite Element in Analysis and Design, Vol.15, 1993, pp.135~149.
- (2) Palazotto, A. and Perry, R., "Impact Response of Graphite/Epoxy Cylindrical Panels", AIAA J., Vol.30, No.7, 1992, pp.1827~1832.
- (3) Ramkumar, R. L. and Thakar, Y. R., "Dynamic response of curved laminated plates subjected to low velocity Impact", ASME J. Engr. Mats. & Tech., Vol.109, 1987, pp.67~71.
- (4) 이영신, 이기두, "동하중을 받는 복합재료 원통셀의 동적거동 해석", 대한기계학회논문집, 제17권 제11호, 1993, pp.2684~2693.
- (5) Goo, N. S. and Kim, S. J., "Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact", AIAA J., Vol.35, No.9, 1997, pp.1518~1521.
- (6) Christoforou, A. P. and Swanson, S. R., "Analysis of Simply-Supported Orthotropic Cylindrical Shells Subject to Lateral Impact Loads", ASME J. Applied Mechanics, Vol.57, 1990, pp.376~382.
- (7) Wardle, B. L. and Lagace, P. A., "Importance of Instability in Impact Response and Damage Resistance of Composite Shells", AIAA J., Vol.35, No.2, 1997, pp.389~396.
- (8) Cho, C., Zhao, G. and Kim, C. B., "Nonlinear Finite Element Analysis of Composite Shell Under Impact", KSME International J., Vol.14, No.6, 2000, pp.666~674.
- (9) Jackson, W. C. and Poe, C. C., Jr., "The Use of Impact Force as a Scale Parameter for the Impact Response of Composite Laminates", J. Composites Technology and Research, Vol.15, 1992, pp.282~289.