

## CF/Epoxy 복합재 적층셸의 충격특성

### - Impact Characteristics on the Laminated Shell for CF/Epoxy Composite -

양 현 수 \*

Yang Hyun Soo

정 풍 기 \*

Jeong Poong Gi

김 영 남 \*\*

Kim Young Nam

이 중 선 \*\*

Lee Joung Sun

### Abstract

This paper is to study the energy absorption characteristics of CF/Epoxy(Carbon Fiber/Epoxy Resin) laminated shell with the various curvatures subjected to transverse impact loadings under the low impact velocity in consideration of design of structural members for use of transportation machine, which are consisted of the characteristics of high stiffness, strength and lightweight. The curvature radius are associated with the energy absorption characteristics of CF/Epoxy laminated shell which is brittleness material. In all tests, maximum load of CF/Epoxy laminated plate is higher than that of laminated shell with curvature, but maximum deflection is lower. And then absorbed energy of laminated shell with curvature is higher than laminated plate(curvature radius is unlimited). As curvature radius is increased, the absorbed energy is increased in laminated shell with curvature.

**Keyword** : Energy Absorption Characteristics(에너지흡수특성), CF/Epoxy(탄소섬유/Epoxy 수지), Lamiated Shell(적층셸), Curvature(곡률), Transverse Impact Loading(횡방향충격하중)

---

\* 군장대학 자동차기계학부 부교수

군장대학 자동차기계학부 겸임교수 및 오토라인 대표이사

\*\* 조선대학교 기계설계공학과 연구원

\*\*\* 창원금속공업주식회사 대표이사

## 1. 서 론

현재 각 산업분야에 요구되는 재료성질은 그 사용조건이 가혹해지고, 복잡화되어 강도, 강성, 내식성, 내마모성, 경량성, 내구성, 내열성, 차음성, 미관 등에 부합되는 특성을 가진 것을 바라 고 있다. 이 같은 요구를 가능한 많이 만족시키는 것은 단독의 재료로는 매우 곤란하다는 사실 은 말할 필요도 없으며, 각각의 요구조건에 맞는 적합한 재료를 이용함으로써 구조물 및 기계 기구의 안전성 향상 및 효율증대를 꾀할 수 있을 것이다. 최근에는 구조경량화 및 환경오염의 경감을 위해 수송기계분야의 구조부재에 복합재료가 널리 이용되고 있으며, 복합재료의 역학적 특성에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1~7)</sup>

그러나 취성재료인 CF/Epoxy 복합재료는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특 성을 가진 반면에 충격부하에 대해서는 우수한 특성을 기대할 수 없고, 특히 저속충격 을 받은 복합재료 구조물은 외형상으로는 손상이 보이지 않지만 내부에는 손상이 발 생하여 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질의 저하를 가져오고 있다.<sup>3~6)</sup>

특히, CF/Epoxy 적층재 중 복합적층셀이 실용화되기 위해서는 고려되어야할 점이 대단히 많으며, 그 중 재료의 두께 방향인 횡방향 충격하중(transverse impact load)에 약하기 때문에 이에 관한 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 지금까지 보고된 연구는 거의 대부분 복합재료 평판 또는 직선 단면을 갖는 빔 구조물에 관한 것이었으며,<sup>8~14)</sup> 실제 형상에 가깝게 곡률을 가진 복합재 셀 구조에 관한 충격 거동 및 충격손상에 관한 연구는 매우 적은 편이다.

따라서 본 연구에서는 CF/Epoxy 복합재 적층셀 형상의 구조부재 설계 시 고려해야 할 고강성, 고강도 측면을 중점으로 2개의 계면수를 갖는 직교이방성 CF/Epoxy 복합 재 적층셀에 대하여 횡방향 하중을 받는 정적실험 및 저속충격실험을 행하고 직교이 방성 적층셀의 역학적 특성을 실험을 통하여 고찰하고자 한다. 또한, 곡률의 크기에 따른 CF/Epoxy 적층셀의 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 충격속도의 크기에 따른 에너지 흡수특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 시험 편

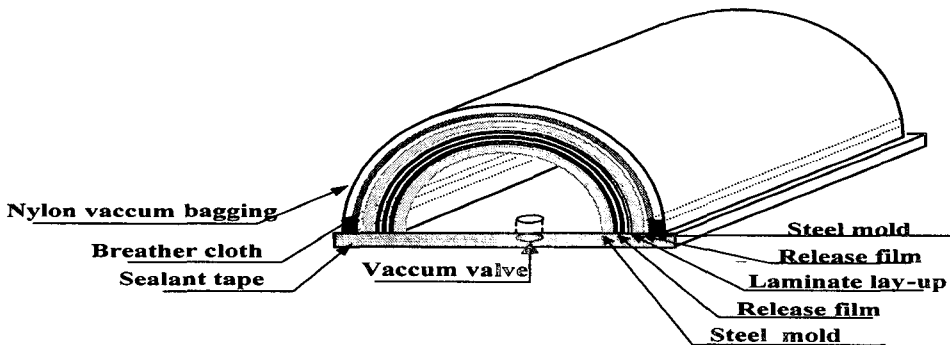
본 연구에서는 CF/Epoxy 적층부재가 실제 항공기 구조부재에 이용될 것을 상정하여 항공기 날개부분과 같이 일정한 곡률을 갖는 평판 부재를 시험편으로 사용하였다. 시험편 의 제작은 각 적층순서에 맞게 적층한 후 진공백 성형공정을 통하여 오토클레이브 내에 서 경화시켜 제작하였다. 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 진공펌프에 의해 진공백 속을  $10^{-1}$  Pa 까지 진공 시킨 후 킴프래tu에 의해 진공백의 외측으로부터  $3 \times 10^5$  Pa 정도 가압 시켜 제작하였다. 사용된 프리프레그 시트의 물성치는 Table 1과 같다. 원통의 일부분인 셀 시험편을 제작하기 위하여 각각의 곡률반경(100mm, 150mm, 200mm,  $\infty$ )에 대하여 Fig. 1과 같은 몰드 위에 진공백 성형을 통하여 제작하였다.

제작 한 시험편에 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 휠을 부착한 자동정밀절단기(MICRACUT Precision cutter)를 이용하여 100×100mm 정사각형 투영 단면을 갖는 시편으로 절단하여 제작하였다.

본 연구에서 사용한 시험편의 기호규약을 Table 2에 나타냈다. S는 정적실험, D는 동적실험(저속충격실험)을 의미하며, 10R은 100mm, 15R은 150mm, 20R은 200mm, U는 ∞의(평판) 곡률반경을 갖는 시험편이다. 또한 저속충격실험의 경우 낙하높이를 표현하기 위해 H06(H=0.6m), H08(H=0.8m), H10(H=1.0m)으로 하였으며, 그 때의 충격속도는 각각 3.43m/s, 3.96m/s, 4.43m/s 이었다.

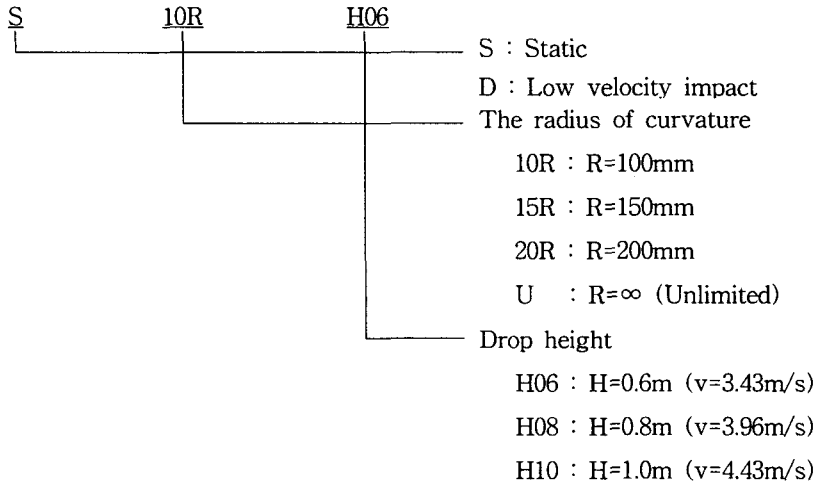
< Table 1 > Characteristics of CF/Epoxy prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)
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
Elastic Modulus [GPa]	240	3.60
Breaking Elong. [%]	2.1	3.0
Curing Temp. [°C]	-	130



< Fig 1 > Steel mold for curing laminates

&lt; Table 2 &gt; Specimen definition



### 3. 실험 장치

본 연구에서는 CF/Epoxy 복합재 적층셀의 횡방향 충격실험을 위하여 자체 제작한 낙추식 충격장치를 사용하였으며, 원하는 충격속도를 갖도록 강봉을 일정한 높이에서 자유 낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. Fig. 2는 실험장치의 계측시스템의 구성도이다.

실험장치는 시험편에 충격을 가하는 봉, 봉의 정확한 위치를 제어하는 2개의 가이드바 및 프레임 등으로 구성되어 있다. 특히 2개의 가이드바의 상·하 끝단을 고정플레이트(fix plate)에 볼트 조임을 통하여 고정함으로써 봉의 낙하 시 흔들림의 감소와 정확한 위치에 충격이 가해지게끔 제작하였다.

시험편에 작용하는 충격하중은 봉의 전체길이(600mm)의 1/3과 2/3 지점에 접착한 Full-bridge 방식의 스트레인게이지에 의해 충격 후 응력과 전파에 의한 시간에 대한 변형율을 계측하고, 이를 응력과 전파이론을 고려한 C-프로그램을 이용하여 시간에 대한 하중으로 환산함으로써 시간에 따른 하중이력을 얻을 수 있었다.

시험편의 충격시 발생하는 변형량(deflection)은 시험편의 실제 변형량과 봉의 상하 이동량이 일치한다고 보고 봉에 부착된 표적(target)의 움직임을 광학식 변위계(Zimmer OHG사, 100F)로 비접촉 계측하여 변형량을 측정하였다.

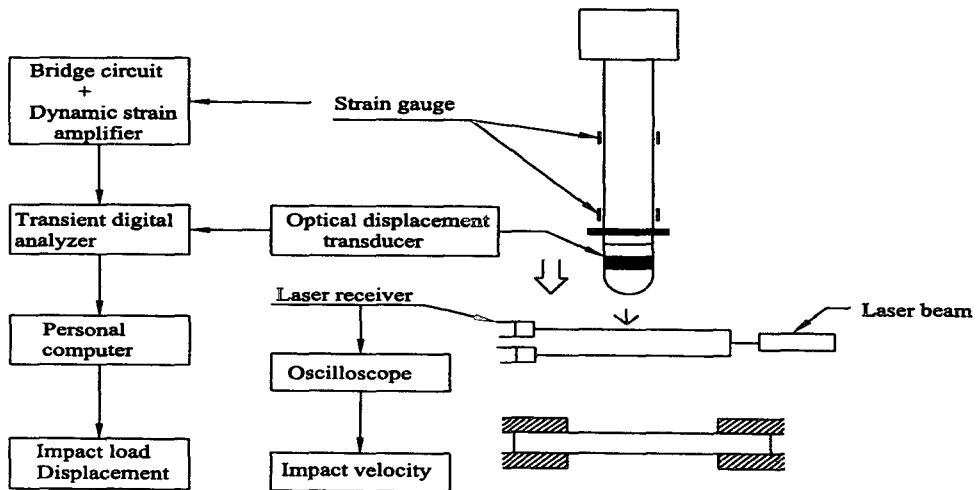
광학식 변위계는 광학렌즈를 이용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압변화로 측정하는 것이며, 렌즈의 교환에 따라 측정범위를 달리할 수 있다. 본 연구에서 사용한 광학식 변위계의 초점거리는 2160mm이며 최대 200mm의 이동량을 측정할 수 있는 100D-200형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

또한 봉의 충격속도는 낙추식 충격실험장치에 설치된 레이저 속도측정장비를 이용

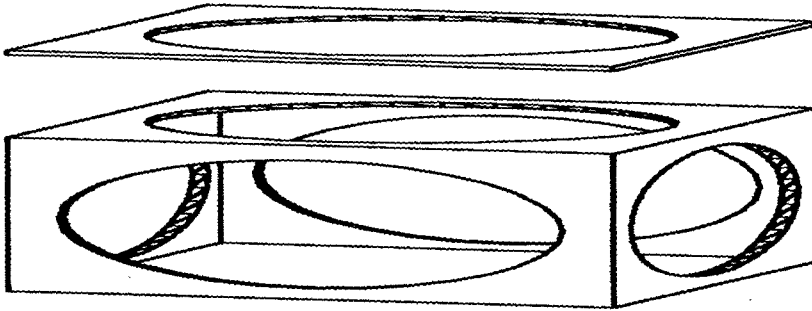
하여 낙추가 2정점간을 이동한 시간을 오실로스코프를 이용하여 측정한 후 2정점간 거리를 이동시간으로 나누어줌으로써 계측하였다.

평판 및 곡률을 갖는 시험편의 고정대를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3(a)의 평판용 시험편 고정대는 기존에 제작된 프레임에 이용하였다. 복합재 평판은 이방성을 가지고 있기 때문에 시험편의 지지방법에 따라 방향성의 영향을 받게 되며, 이를 보완하기 위해 고정대의 시험편 접촉부분을 원형지지 되도록 제작하였다. 본 연구에서 사용한 평판용 고정대는  $\phi 80\text{mm}$ 의 구멍이 있는  $180 \times 180 \times 10\text{mm}$ 의 연강제 정방형판을 2매 사용하여, 상·하 방향에서 시험편을 끼워 고정하였다.

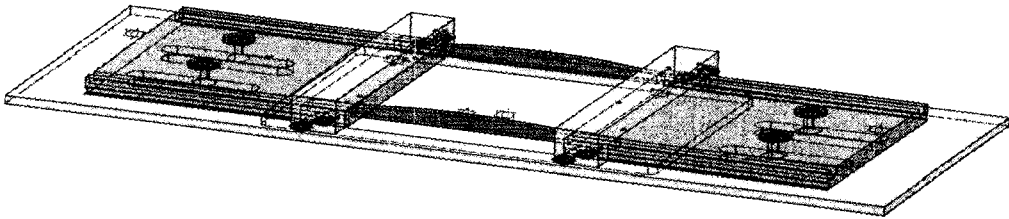
곡률을 가진 시험편의 고정은 Fig. 3(b)와 같은 고정대(fixture)를 이용하였으며, 동일한 경계조건을 만족시키기 위해 모든 시험편의 축 방향 가장자리는 고정지지(fixed) 경계조건으로, 원주방향은 단순지지(support) 경계조건을 만족시키도록 시험편 지그를 제어하였다. 또한 고정대는 시험편의 곡률반경과 두께에 따라 각 경계조건을 만족시키도록 제작하였다. 곡률을 갖는 적층셀용 시험편 고정대는 베이스 플레이트, 축 방향 가장자리를 고정 지지하는 2개의 fixture, 원주방향으로 단순지지 경계조건을 만족시키도록 제작된 2개의 supporter와 시험편 양 끝단 및 원주와 접촉이 발생하는 부위에 부착된 4개의 방진고무로 구성되어 있으며, 시험편의 곡률에 따라 각각 2개의 supporter를 제작하였다. 부착된 방진고무의 두께는  $0.5\text{mm}$ 로서 충격시 발생된 응력파를 양 끝단에서 흡수하여 충격체의 충격에너지가 지그의 진동에너지로 손실되는 것을 방지하도록 하였다. 또한 충격 시 충격체가 고정대위에 놓여진 시험편의 중앙에 낙하하도록 고정대를 제작하였다.



< Fig 2 > Signal acquisition system



(a) Jig for flat laminates



(b) Jig for laminates with curvatures

&lt; Fig 3 &gt; Fixture for supporting specimens

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 정적실험

본 연구에서는 복합재 적층셀의 충격거동을 FEM으로 해석하기 위한 기초단계로서 횡방향 정적실험과 더불어 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS Ver. 5.7을 이용한 FEM 해석을 행하였으며, CF/Epoxy 적층셀의 강도평가를 위하여 Nonlinear Layered Structure Shell 요소인 SHELL 99 요소를 이용하여 모델링하고 해석하였다.

횡방향 정적실험은 CF/Epoxy 적층셀을 지그에 부착하고, U.T.M을 사용하여 횡방향 정적실험을 행하였으며, 섬유가 파단될 때까지의 하중-변위 선도를 구하였다.

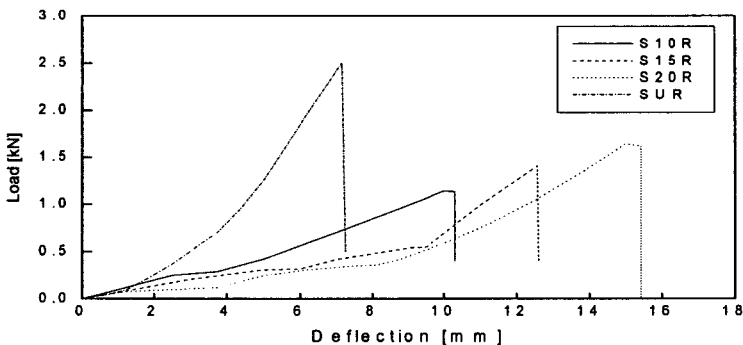
횡방향 정적실험 및 FEM 해석에 의한 흡수에너지 및 하중-변위 선도를 Fig. 4와 Table 3에 나타냈다. Fig. 4를 살펴보면, 평판보다 곡률을 갖는 시험편이 더 높은 변위를 나타냈으며, 곡률을 갖는 시험편의 경우 곡률반경이 증가할수록 최대하중 및 최대 변위가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 곡률반경이 무한대인 평판의 경우에는 최대 변위가 곡률시험편 보다 더 낮게 나타난 반면, 최대하중은 높게 나타났다.

따라서 본 연구에서는 곡률반경에 따른 에너지흡수특성을 정량적으로 평가하기 위해 각 하중-변위 선도를 적분하여 면적을 계산하였으며, 이 면적을 시험편이 흡수한 에너지라 상정하여 Table 3에 나타냈다.

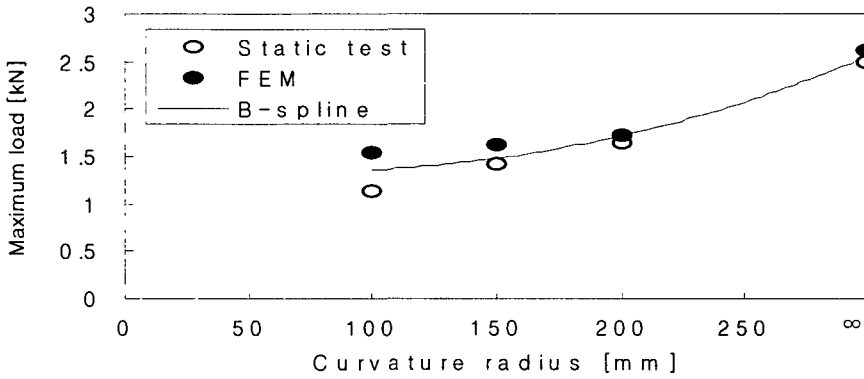
곡률변화에 따른 정적거동을 고찰하기 위해 Figs. 5, 6에 곡률반경에 대한 최대하중 및 최대변위를 나타냈다. Figs. 5, 6을 살펴보면 곡률반경이 증가함에 따라 시험편의 최대하중은 서서히 증가하는 반면, 최대변위는 곡률반경 200mm 시험편까지는 증가하다가 무한대의 곡률반경을 갖는 평판에서 감소하는 경향을 보였다.

< Table 3 > Results for static test and FEM analysis

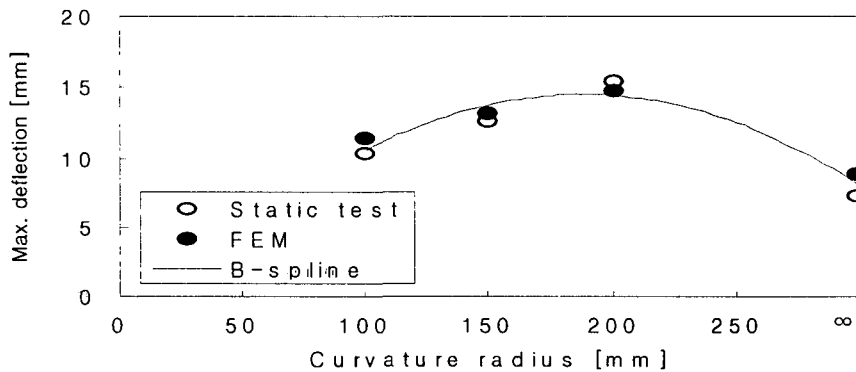
Spec.	Max. load [kN]	Max. deflection [mm]	Absorbed energy [Joule]
S10R	1.14	10.3	5.88
S15R	1.41	12.6	6.65
S20R	1.64	15.4	7.59
SUR	2.50	7.2	7.95



< Fig 4 > Load-deflection curve of CF/Epoxy laminates by static test



< Fig 5 > Effect of the radius of curvature on the maximum load



< Fig 6 > Effect of the radius of curvature on the max. deflection

## 4.2 저속충격실험

저속충격하에서 곡률변화에 따른 에너지 흡수특성을 고찰하고자 본 연구에서는 곡률반경을 각각 100mm, 150mm, 200mm, ∞(평판)로 주어 시험편을 제작하여 저속충격 실험을 행하였으며, 그 결과 얻어진 낙추높이(h) 변화에 따른 하중-변위선도를 Figs. 7~10에 나타냈다. Fig. 7은 곡률반경 100mm를 갖는 시험편의 낙추높이 0.6m, 0.8m, 1.0m 경우의 하중-변위선도이다.

낙추의 낙하높이가 증가함에 따라 동일한 곡률반경을 갖는 시험편의 최대하중과 변위가 증가하는 경향을 보였다. 즉, 동일한 곡률반경을 갖는 CF/Epoxy 적층셀의 있어, 충격속도의 변화에 따른 최대하중 및 충격거동은 비슷한 양상을 보이며 최대하중의 크기는 충격속도에 비례하였다. 즉, 충격속도가 증가할수록 파형의 변동이 더 심해지



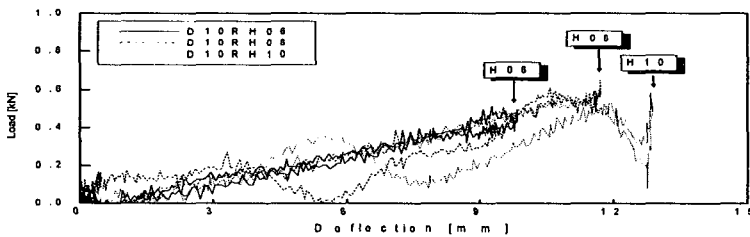
고, 최대하중과 변위는 증가하였다.

Figs. 8, 9은 곡률반경 150mm, 200mm를 갖는 시험편의 낙추높이 0.6m, 0.8m, 1.0m 경우의 하중-변위선도이며, 곡률반경 100mm를 갖는 시험편의 충격거동과 유사한 경향을 보였다.

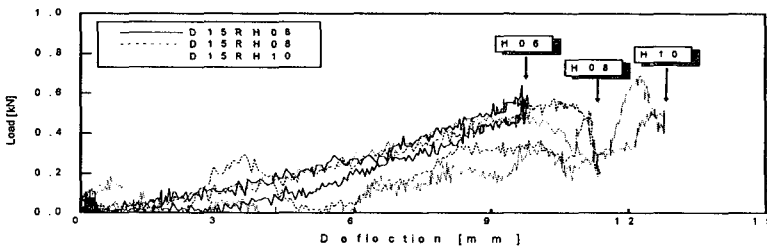
Fig. 10은 무한대의 곡률반경을 갖는 평판 시험편의 낙추높이 0.6m, 0.8m, 1.0m 경우의 하중-변위선도이다. Figs. 7~10을 살펴보면 평판시험편이 곡률을 갖는 시험편에 비해 최대하중은 증가하나, 변위는 감소하는 경향을 나타냈으며, 횡방향 정적실험과 유사한 경향을 보였다. 또한, 충격속도가 증가함에 따라 하중-변위선도 곡선은 심하게 요동함을 알 수 있다. 이는 충격속도가 증감함에 따라 단파장의 파동 수가 많아지게 되고, 이로 인하여 심한 요동이 발생하기 때문이라 사려된다.

곡률변화에 따른 충격거동을 고찰하기 위해 Figs. 11, 12에 곡률반경에 대한 최대하중 및 최대변위를 나타냈으며, 정적거동과 유사한 경향을 보였다.

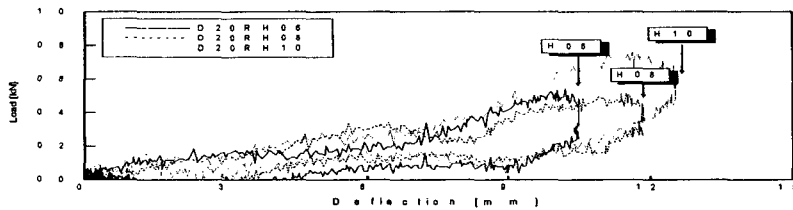
Figs. 11, 12에서 H06은 각 곡률반경에 따른 낙하높이 0.6m의 경우 얻어진 시험편의 최대하중 및 최대변위를 의미하며, H08은 낙하높이 0.8m, H10은 낙하높이 1.0m의 경우를 의미한다. 또한, Fig. 13에 최대하중과 최대변위의 관계를 나타냈다. Fig. 13를 살펴보면 최대하중이 증가함에 따라 최대변위는 감소하는 경향을 보였으며, 이는 CF/Epoxy 복합재료는 취성재료이며 이 취성재료에 곡률을 부여함으로써 굽힘에 대한 저항을 크게 할 수 있다. 그러나 곡률반경이 증가함에 따라 굽힘 저항이 증가하는 반면 곡률변화에 따른 시험편의 강도 저하에 의해 최대하중은 감소하게 된다. 즉, 곡률을 갖는 CF/Epoxy 적층셀에 있어 초기 피크하중(최대하중)이 높을수록 취성재료인 CF/Epoxy 시험편의 박리진전은 쉽게 일어나게 되며 이로 인하여 변위량은 감소하게 되고 충격특성을 좌우하는 평균하중에 영향을 미치게 된다.



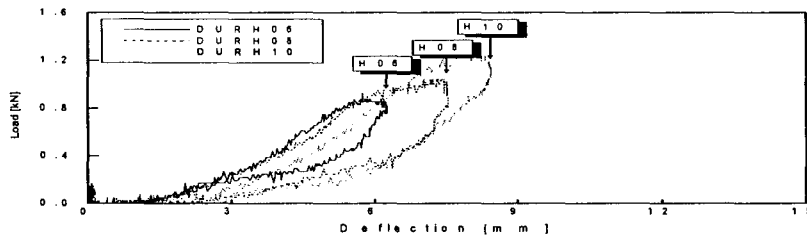
< Fig 7 > Load-deflection curve by drop weight test(D10R)



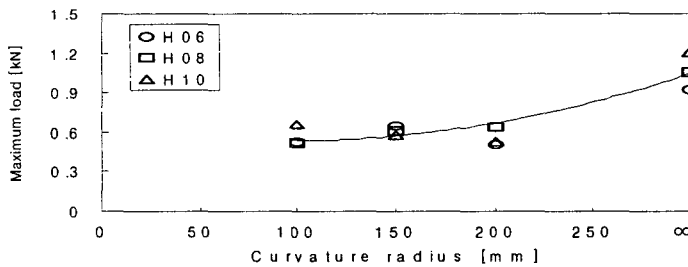
< Fig 8 > Load-deflection curve by drop weight test(D15R)



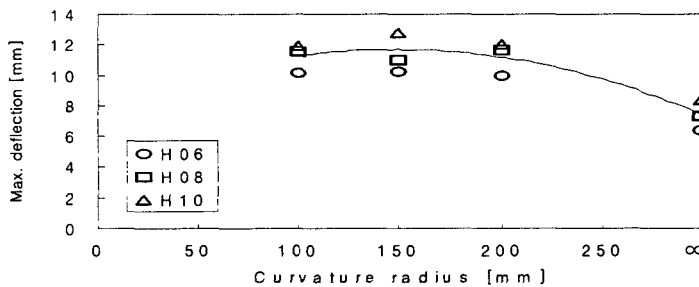
< Fig 9 > Load-deflection curve by drop weight test(D20R)



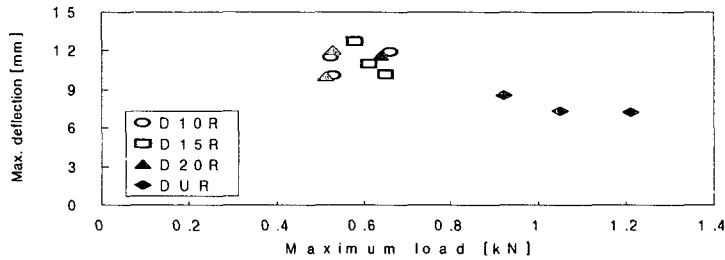
< Fig 10 > Load-deflection curve by drop weight test(DUR)



< Fig 11 > Effect of the radius of curvature on the maximum load



< Fig 12 > Effect of the radius of curvature on the max. deflection



< Fig 13 > Maximum deflection vs. maximum load

## 5. 결 론

곡률의 크기에 따른 CF/Epoxy 적층셀의 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 정적 및 저속충격 실험을 행하였으며, 실험결과로부터 얻은 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 저속충격에 있어 낙하높이가 증가함에 따라 최대하중 및 최대변위량은 선형적으로 증가하였다. 정적·충격 실험 모두 곡률반경이  $\infty$ 인 CF/Epoxy 적층판이 곡률을 갖는 적층셀보다 최대하중은 높으나 최대처짐은 작음을 알수 있었다. 이는 최대하중이 클수록 층간박리가 먼저 나타나 판의 굽힘 강성이 낮아지기 때문이라 사료된다. 곡률을 갖는 적층셀의 경우 곡률반경이 증가함에 따라 시험편의 흡수에너지도 함께 증가하는 경향을 보였으며, 곡률반경이  $\infty$ 인 평판시험편의 경우의 시험편에 흡수된 에너지는 감소하였다. 따라서 CF/Epoxy 적층셀로 수송기계용 구조부재를 제작 시 적절한 곡률을 부여할 경우 이물충격손상(FOD)에 대한 손상저항성이 크게 되어 최적의 구조부재를 설계 가능하리라 사려된다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] D. R. Ambur, J. H. Starnes, "Effect of Curvature on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates", Presented at the 39th AIAA Structures, No. 98-1881, 1998.
- [2] Y. S. Lee, B. H. Jun, J. M. Oh, "A Study on the Design Optimization of Composite Cylindrical Shells with Vibration, Buckling Strength and Impact Strength Characteristics ", Transaction of KSAE, Vol. 5, No. 4, pp. 48-69, 1997.
- [3] Y. N. Kim, K. H. Im, J. W. Park, I. Y. Yang, "Experimental Approach on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes", Reviews of Progress in QNDE, pp. 369~376, 2000
- [4] Y. N. Kim, C. S. Cha, I. Y. Yang, "The Study on the Axial Collapse Characteristics of Composite Thin-Walled Members for Vehicles ", Transaction of KSAE, Vol. 9, No. 6, pp. 195~200, 2001

- [5] K. H. Im, S. K. Kim, I. Y. Yang, "Impact Damages and Hygrothermal Effects on Fatigue Bending Strength of Orthotropy Composite Laminates", *KSME, International Journal*, Vol. 13, No. 7, pp. 524~535, 1999
- [6] K. H. Im, H. J. Jeong, I. Y. Yang, "A Study on the Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Carbon/Carbon Composite Disks." *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 320-330, 2000
- [7] K. H. Im, I. Y. Yang, "A Study on Effects to Residual Fatigue Bending Strength of Orthotropy CFRP Composite Laminates under High Temperature and Moisture", *Transaction of KSAE*, Vol. 8, No. 6, pp. 247-258, 2000
- [8] David W. Sleight, Norman F. Knight, John T. Wang, "Evaluation of a Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures", *AIAA Paper*, No. 97-1187, 1997
- [9] N. S. Goo, S. J. Kim, "Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact", *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 9, pp. 1518-1521, 1997
- [10] Wardle B. L., 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
- [11] I. Y. Yang., J. K. Sim. and K. H. Im., "Impact Damages and Residual Bending Strength of CFRP Composite Laminates Subjected to Impact Loading", *KSME International Journal*. Vol. 10, No. 4, pp. 423~434, 1996
- [12] Morita, H., Adachi, T., Tateishi, Y. and Matsumoto, H., 'Charaterization of Impact Damage Resistance of CF/PEEK and CF/Toughened Epoxy Laminates under Low and High Velocity Impact Tests', *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 16-2, pp. 131-143, 1997
- [13] H. Hamada, S. Ramakrishan, M. Maekawa and M. Nakamura., "Comparison of Static and Impact Energy Absorption of Glass Cloth/Epoxy Composite Tubes", *Proceeding of the 10th annual ASM/ESD advanced composites conference*, pp. 501-510, 1994
- [14] C. H. Chiu, K. H. Tsai, W. J. Huang, "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes", *J. Composite Materials*, Vol. 32, No. 21, pp. 1964-1983, 1998

## 저 자 소 개

양 현 수 : 조선대학교 정밀기계과를 졸업하고, 시립인천대학교 대학원에서 석사 및 박사학위를 취득하였다. 현재는 군장대학 자동차·기계학부 부교수로 근무 중이며 주요관심분야는 자성재료, 자동차 재료 개선 및 복합재료 분야 등

정 풍 기 : 호원대학교 기계공학과를 졸업하고, 현재 오토라인 대표이사로 근무하면서 군장대학 자동차·기계학부 겸임교수로 재직 중이며, 주요관심분야는 자동차 재료 개선 및 복합 재료 분야, 자동차 튜닝, 덴트 클리닉 연구 개발 등

김 영 남 : 조선대학교 기계설계과를 졸업하고, 동 대학원에서 석사 및 박사학위를 취득하였고 또한 군장대학 자동차·기계학부 와 국립익산대학 자동차과 겸임교수로 근무하고 있다. 주요관심분야는 자동차 재료 개선 및 복합 재료 분야 등

이 종 선: 창원금속공업주식회사 대표이사로서 브레이크 페달, 페달 마운팅 어셈블리를 제작하는 회사로서 저희 대학과 산학협동으로 많은 기술지도 및 연수를 통하여 상부상조하는 업체로서 많은 학생들이 취업하는 회사이다. 관심분야는 자동차 재료 및 복합재료분야 등