

\* 본 연구는 학술진흥재단의 학술연구조성비에 의해 연구된 것임.

Glass/Epoxy 積層 複合版의 衝擊 應答  
및 衝擊 應力

김 문생\*, 김 남식\*\*

The Impact Response and Impact Stress of Glass/Epoxy  
Laminated Composite Plates.

Moon-Saeng Kim\*, and Nam-Shik Kim\*\*

Abstract

The purpose of this research is to analyze the impact behaviors of laminated composite plates subjected to the transverse low-velocity impact by the steel ball.

A plate finite element model based on Whitney and Pagano's the first-order shear deformation theory(FSDT) in conjunction with experimental static contact laws is formulated and then compared with the results of the impact experiments.

Because the input data and the output data printed at every integration time step are lots of amount, these are interactively processed by the developed pre-processor(PREPLOTT) and postprocessor(POSTPLOTT).

All results from these processors are automatically generated by CALCOMP plotter.

Test materials are glass/epoxy composite materials. The specimens are composed of  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_2s$  and  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$  stacking sequences and have  $4.5' \times 200'' \times 200'$  ( $mm$ ) and  $4.5' \times 300'' \times 300'$  ( $mm$ ) dimensions.

\* 부산대학교 기계설계공학과(정회원)

\*\* 부산대학교 기계설계공학과(정회원)

## 1. 序 論

복합 재료는 부품의 무게 감소 외에 긴 피로 수명, 우수한 진동특성 및 내식성, 전기 절연성이 우수한 점 등 여러 면에서 장점을 지니고 있는 반면에, 상대적으로 충격 하중에 매우 약하다는 점이 최근의 주요한 관심이 되고 있다.

집중 충격 하중을 받는 재료의 충격 응답 해석에 관한 많은 연구는 균질, 등방성 재료에서 이루어졌다.

<sup>1)</sup> 특히 Sun<sup>2)</sup>은 고차 보 유한요소(higher-order beam finite element) 이론을 개발하여 균질, 등방성 재료에 대한 충격 문제를 해석하였으며, 최근에 저자들<sup>3)</sup>은 이 고차 보 이론을 이질, 이방성 적층 복합 보의 충격 해석에 수정 적용하여 이 수정된 이론의 타당성을 입증하였다. 그러나, 재료의 형상비(길이/폭)가 크다 할지라도 응력과의 영향을 고려하는 적층재의 동적 거동을 정확히 기술하기 위하여는 판이론을 적용해야 한다. Sun<sup>4)</sup>은 초기 응력을 가지는 복합체에 대하여 충격 속도, 초기 응력 및 강구의 질량과 크기의 변화에 따른 충격 거동을 해석하였고, 최근에 저자들<sup>5)</sup>은 Whitney와 Pagano의 판이론<sup>6)</sup>에 기초를 두고 정적 접촉법칙과 연계한 동적 유한 요소 및 실험적 연구를 통하여 적층 복합판의 응력과 전파 해석을 행하였으나, 충격 응력에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 강구에 의한 횡방향 저속 충격을 받는 적층 복합 판의 충격 응답 및 충격 응력을 해석하기 위하여 Whitney와 Pagano의 전단 변형 이론<sup>6)</sup>에 기초를 두고 정적 압입실험에 의한 접촉 법칙을 고려한 후, CAD/CAE기법을 이용하여 개발한 pre-processor 프로그램(PREPLOT)에 의한 입력 데이터로 동적 유한 요소해석(dynamic finite element analysis)을 행하여 그 결과들을 post-processor 프로그램(POSTPLOT)에 의하여 컴퓨터그래픽하였으며, 실험에 의한 결과와 비교 검토하므로써 본 이론 해석의 타당성을 입증하였다.

본 연구에 사용된 복합재는  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_2s$ 와  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$ 의 적층 형태를 갖는 유리/에폭시 적층 복합재이고, 크기가  $4.5' \times 200' \times 200'$  (mm)와  $4.5' \times 300' \times 300'$  (mm)인 양단 고정 및 양단 단순 지지된 경계 조건을 가지는 적층판이다.

## 2. 理論 解釋

### 2.1 理論 解釋의 모델

일정한 두께 h의 적층판(laminate)은 다수의 한방향 섬유 강화 복합재 단층(lamina)으로 구성되어 있고, 각 단층들은 서로 완벽히 접촉되어 있다.

섬유가 임의의 방향으로 나열되어 있는 각 단층은 균질 직교성 재료로 간주할 수 있다. Whitney와 Pagano의 이론<sup>6)</sup>에 의하면 적층판의 변위 성분들은 Fig. 1에서

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u^0(x, y, t) - z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v^0(x, y, t) - z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w^0(x, y, t) = w(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

이 된다. 여기서  $u^0$ ,  $v^0$  및  $w^0$ 는 각각 판의 중립면에서의 x, y 및 z축 방향의 판의 변위 성분이고,  $\phi_x$ 와  $\phi_y$ 는 각각 x와 y축에 대한 회전 성분이다.

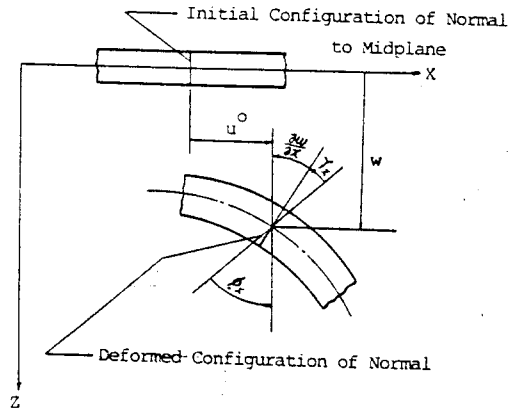


Fig. 1 Geometry of deformation in the x-z plane

판의 중립면으로부터 그만큼 위치한 지점에서의 변형율은

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \partial u^0 / \partial x - z \partial \phi_x / \partial x \\ \epsilon_y &= \partial v^0 / \partial y - z \partial \phi_y / \partial y \\ \gamma_{xy} &= \partial u^0 / \partial y + \partial v^0 / \partial x - z (\partial \phi_x / \partial y + \partial \phi_y / \partial x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &= \partial w / \partial x - \phi_x = -\gamma_x \\ \gamma_{yz} &= \partial w / \partial y - \phi_y = -\gamma_y \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

와 같다.

적층판의 임의의 k번째 단층에서의 응력과 변형을 관계를 Fig. 2와 같이 판 기준 좌표계(plate reference axes :  $x_1, x_2, x_3$ )로 나타내면

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3. a)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (3. b)$$

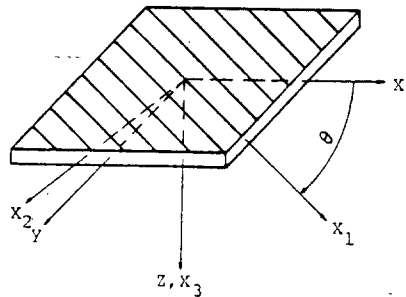
이 되고, 여기서  $\bar{Q}_{ij}$ 는 변환된 감소 강성 행렬(transformed reduced stiffness matrix)로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= \bar{Q}_{11} m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2 n^2 + Q_{22} n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= Q_{12} n^2 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2 n^2 + Q_{22} m^4 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2 n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3 n \\ &\quad + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m n^3 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m n^3 + (Q_{12} - Q_{22} \\ &\quad + 2Q_{66})m^3 n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2 n^2 + Q_{66} \\ &\quad (m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{44} &= Q_{44} m^2 + Q_{55} n^2 \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{44} n^2 + Q_{55} m^2 \\ \bar{Q}_{45} &= (Q_{44} - Q_{55})m n \\ m &= \cos \theta, \quad n = \sin \theta \end{aligned}$$

적층판에 작용하는 응력의 합력들은 (2)를 식(3)에 대입하여 각 단층의 두께에 따라 적분하여 모든 단층에 대하여 더하면

$$\begin{bmatrix} N \\ M \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & O \\ B & D & O \\ O & O & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 되고, 여기서



( $x_1, x_2, x_3$ ) : Material (lamina) reference axes  
( $x, y, z$ ) : Plate (laminate) reference axes

Fig. 2 Reference coordinates for lamina and laminate

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (5)$$

$$H_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} k_i k_j \bar{Q}_{ij} dz \quad i, j = 4, 5$$

이고,  $k_i k_j$ 는 전단 수정 계수(shear correction coefficients)이다.

그리고 적층판의 물체력(body force)을 무시한 경우의 판의 운동 방정식은

$$\begin{aligned} N_{x,x} + N_{xy,y} &= P\ddot{u}^0 + R\ddot{\phi}_x \\ N_{xy,x} + N_{y,y} &= P\ddot{v}^0 + R\ddot{\phi}_y \\ Q_{x,x} + Q_{y,y} + q &= P\ddot{w} \\ M_{x,x} + M_{xy,y} - Q_x &= R\ddot{u}^0 + I\ddot{\phi}_x \\ M_{xy,x} + M_{y,y} - Q_y &= R\ddot{v}^0 + I\ddot{\phi}_y \end{aligned} \quad (6)$$

이 되고, 여기서

$$(P, R, I) = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(1, z, z^2) dz \quad (7)$$

이다.

## 2.2 有限 要素 解釋의 모델

이 기본 이론으로 횡 방향 전단 변형을 고려하는 적층판의 해석에서는 신장(extension), 굽힘(bending) 외에도 전단 변형(shear deformation)항이 변위 구성식에 포함되어야 한다. 이를 위해 본 해석에서는 Reddy<sup>9)</sup>에 의해 사용된 각 절점당 5자유도( $u^0, v^0, w, \phi_x, \phi_y$ )를 가지는 4절점 요소(4 node quadrilateral element)의 유한 요소 모델을 사용하였다.

4절점 유한 요소의 변위 성분들을 동일한 형상함수  $\phi_i$ 를 사용하여 나타내면

$$\{\Delta\} = \sum_{i=1}^4 [\phi_i] \{\Delta\}_i \quad (8)$$

와 같이 된다.

전형적인 유한 요소 과정에 의하여 전체 적층판의 운동 방정식을 구하면

$$[M] \{\ddot{\Delta}\} + [K] \{\Delta\} = \{F\} \quad (9)$$

이 된다. 여기서  $[M]$ 은 질량 매트릭스(mass matrix),  $[K]$ 는 강성 매트릭스(stiffness) 그리고  $\{F\}$ 는 하중 벡터(load vector)이다.

### 3. 數値解釋

강구의 운동 방정식은

$$F = -m_s \ddot{w}_s \quad (10)$$

이 되고, 여기서 강구와 판의 접촉력  $F$ 는

$$F = \begin{cases} k \alpha^n & : \text{하중과정} \\ F_m \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right)^q & : \text{제하과정} \end{cases} \quad (11)$$

와 같이 표현되며, 충격점에서의 압입량(indentation)  $\alpha$ 는

$$\alpha = w_s - w(x_0, y_0) \quad (12)$$

로 표현된다. 식(11)에서  $F_m$ 은 제하과정이 시작되는 최대접촉력,  $\alpha_m$ 은  $F_m$ 에 상응하는 최대압입량,  $\alpha_0$ 는 영구 압입량이며,  $q$ 는 제하과정의 접촉법칙지수이다.

식(9)와 식(10)은 동시에 해석되어야 하므로 본 해석에서는 가속도의 변화가 시간 간격  $\Delta t$ 에 대하여 선형적이라고 가정하는 Wilson과 Clough<sup>10)</sup>의 유한 차분법을 이용하여 시간 적분을 행하여 Gauss소거법에 의한 시간 증분에 따라 단계별로 전체 응답을 구하였다.

강구에 의한 횡방향 충격을 받는 적층판의 충격 해석을 위하여 다음과 같은 수치 계산을 행하였다.

적층판은 두께가 일정하고 상하 및 좌우가 대칭이므로 판의 1/4을 Fig. 3과 같이 36개의 요소와 49개의

절점이 되도록 사각형으로 분할하였으며, 강구의 직경은 12.7mm이고, 강구의 충격 속도는 4m/sec이다. 그리고 적층판은 양단 고정 및 양단 단순 지지된 경우에 대하여 해석하였다.

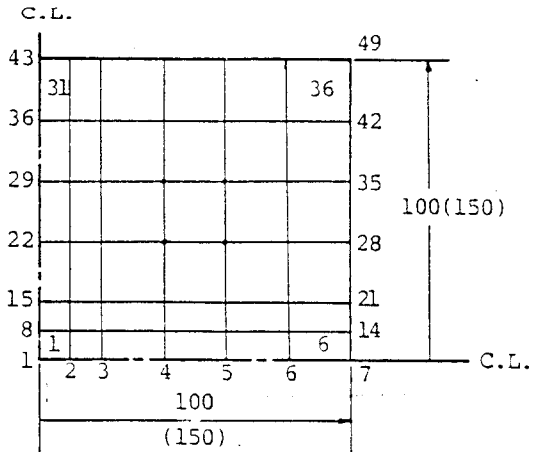


Fig. 3 Refined finite element discretization (nodes=49, elements=36) super-element mesh (nodes=4, element=1)

강구의 충격후 충격점에서 x축 방향으로 2.1mm(3.2mm), y축 방향으로 2.1mm(3.2mm) 떨어진 지점(충격점 부근)과 x축 방향으로 44.2mm(66.3mm), y축 방향으로 2.1mm(3.2mm) 떨어진 지점(절점 4부근)의 시간의 변화에 따른 변형률과 응력의 변화를 컴퓨터 그래픽화하였으며, 변형률 응답은 충격 실험에 의한 결과와 비교 검토하였다.

여기서 시간 증분을 0.01μsec로 하여 전체 320μsec까지 계산하였다.

그리고 계산에 사용된 각 재료 상수는 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties of the specimens and the steel ball

Material	$E_1$ [GPa]	$E_2$ [GPa]	$G_{12}$ [GPa]	$\nu_{12}$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Glass/epoxy	55.85	14.75	6.43	0.31	2050
Steel ball	207	207	79.6	0.30	7860

## 4. 實 驗

### 4.1 시편

정적 압입 실험과 충격 실험에 사용된 시편은 (주)한국화이바에서 제작한 유리/에폭시 적층 복합재로서  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_2s$ 와  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$ 의 적층 형태를 가지며  $4.5 \times 200 \times 200$  (mm)와  $4.5 \times 300 \times 300$  (mm)의 크기를 가진다.

시편의 양단을 고정시키고 다른 양단을 단순 지지할 수 있도록 시편의 폭 방향으로 물림 부분을 두고 길이 방향으로 1mm 정도 깊이의 V자 홈을 가공하였다.

### 4.2 정적 압입 실험

정적 압입 실험 장치는 Fig. 4에 나타내었으며, 인덴터(indentor)와 시편간의 상대 변위, 즉 압입량이 측정되도록 다이얼 게이지를 하중 피스톤에 고정된 "C" 브래킷상에 설치하였다.

본 실험은 만능 시험기(UTM25T)에서 행하였으며,

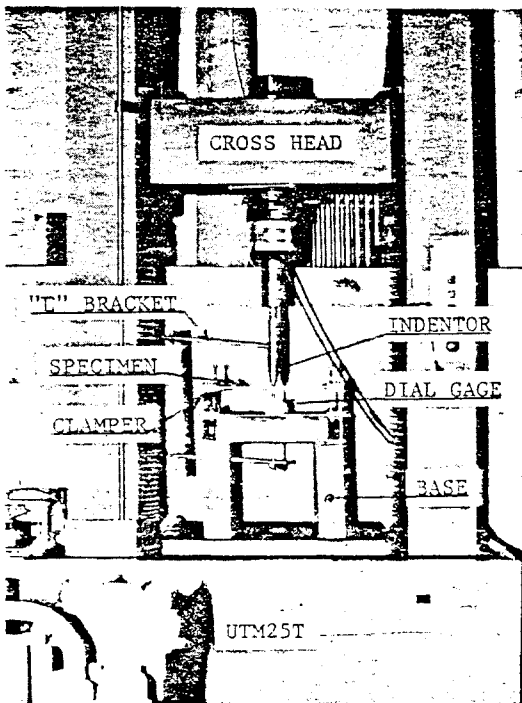


Fig. 4 Static indentation test setup

인덴터를 2mm/min의 속도로 하중을 가하면서 하중이 5kg, 변할 때마다 그때의 하중과 압입량을 측정하여 하중 과정과 제하 과정의 실험을 행하였다. 제하 과정의 최대 하중이 40kg, 70kg, 100kg인 경우에 대하여 실험을 행하였으며, 그때의 영구 압입량을 기록하였다.

### 4.3 충격 실험

충격 실험 장치는 Fig. 5에 나타내었으며, 강구를 4m/sec의 속도로 시편의 중앙에 충돌시키기 위하여 시편으로부터 0.82m의 높이에서 강구를 자유 낙하시켰다.

충격후 변형을 응답을 측정하기 위하여 충격점에서 x축 방향으로 2.1mm(3.2mm), y축 방향으로 2.1mm(3.2mm) 떨어진 지점과 x축 방향으로 44.2mm(66.3mm), y축 방향으로 2.1mm(3.2mm) 떨어진 세방향 스트레인 게이지(TYPE KFC-2-D17-11)를 부착하였다.

강구가 충격후 스트레인 게이지로부터의 신호는 휘스톤 브릿지를 거쳐서 증폭기에 의해 증폭되어 F.F.T.에 나타나고, 이를 컴퓨터 그래픽하였다.

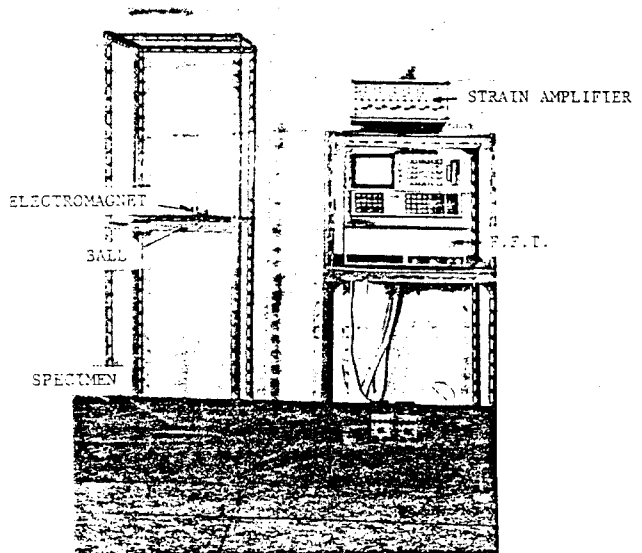


Fig. 5 Equipment of impact test

### 5. 結果 및 考察

#### 5.1 정적 접촉 법칙

하중 과정의 접촉 법칙에서 접촉 계수  $k$ 와 지수  $n$ 은 정적 압입실험에서 얻어진 하중과 압입량 데이터를 가지고 최소 자승법에 의하여 구하였다(Table 2). 그 결과 지수  $n$ 은 대부분 1.5에 가깝게 나타났으며, 따라서  $n$ 을 1.5로 두고 그때의 접촉계수  $k$ 를 다시 최소 자승법에 의하여 구하였다.

그 결과 접촉 계수  $k$ 는 시편의 크기에 관계없이 거의 같고, 적층형태에 대해서도 거의 같고, 적층형태에 대해서도 차가 거의 없었다. 그리고 소성 변형이 고려되는 제하 과정의 접촉법칙에서 영구 압입량은 Fig. 6에서와 같이 최소 자승법을 이용하여 다음의 관계를 얻었다. 여기서  $\alpha_p$ 는 영구 압입변형이 일어나는 임계 압입량이며  $S_p$ 는 비례상수이다.

$$\alpha_0 = 0.150 \times (\alpha_m - 0.02) \tag{13}$$

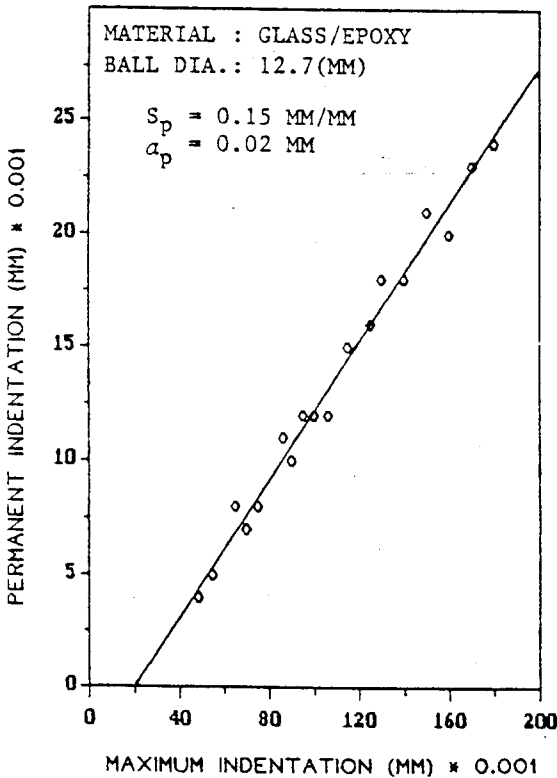


Fig. 6 Relation between permanent indentation and maximum indentation

Material		Glass/epoxy			
Stacking sequences		[0°/45°/0°/-45°/0°]2s [90°/45°/90°/-45°/90]2s			
Size		200w×200L	300w×300L	200w×200L	300w×300L
Least square fit	n	1.352	1.480	1.617	1.462
	$k [N/mm^n]$	2.62E4	3.33E4	4.60E4	3.41E4
1.5 power fit	n	1.5	1.5	1.5	1.5
	$k [N/mm^n]$	3.35E4	3.34E4	3.57E4	3.66E4
average		$F = 3.48 \times 10^4 \alpha^{1.5}$			

Table 2. Loading law  $F = k \alpha^n$  for glass/expoxy with 12.7mm indenter

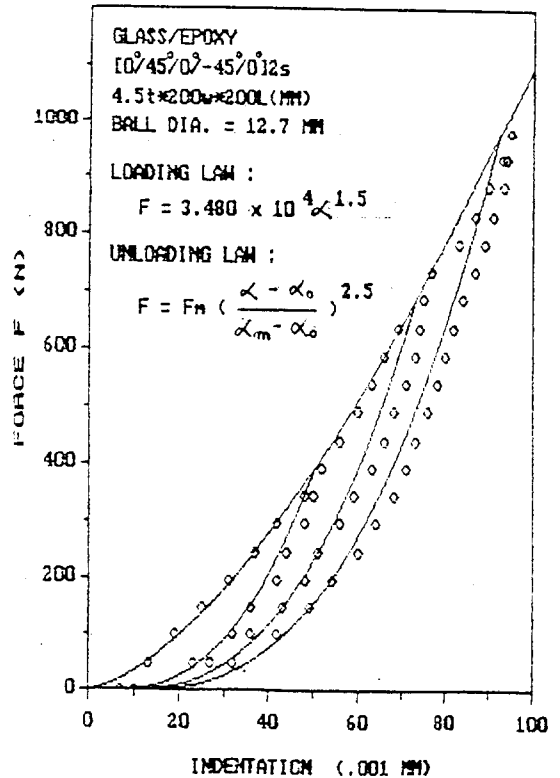


Fig. 7 Loading and unloading curves for a [0°/45°/0°/-45°/0°]2s glass/epoxy plate with  $n=1.5$ ,  $q=2.5$  and 12.7mm indenter

또한 제하 법칙의 지수  $q$ 는 Fig. 7과 같이  $q$ 가 2.5 일때 제하 법칙을 가장 잘 나타내고 있다.

여기서 구한 접촉 법칙을 접촉 계수  $k$ 와 영구 압입량  $\alpha_0$  및 지수  $n$ 과  $q$ 를 동적 유한 요소 해석의 입력 데이터로 사용하였다.

### 5.2 충격 거동

강구가 판에 충돌후 시간의 변화에 따른 접촉력과 강구 및 판의 변위를 Fig. 8에 나타내었으며, 강구의 속도 및 가속도를 Fig. 9, Fig. 10에, 각 적층판에 대한 최대 접촉력의 크기를 Table 3에 나타내었다.

강구와 판의 접촉은 대부분 120 $\mu$ sec 정도 소요되며, 최대 접촉력은 강구의 충돌후 48-56 $\mu$ sec에서 발생하였다.

Table 3에서 최대 접촉력의 크기는 적층 형태에 관계없이 거의 같게 나타났으며 판의 크기에 대한 차이도 아주 작게(약 3.7%) 나타났다. 이러한 결과는 접촉력은 단지 재료 상수와 압입량에만 좌우되며, 이는 정적 압입 실험의 결과와도 잘 일치한다.

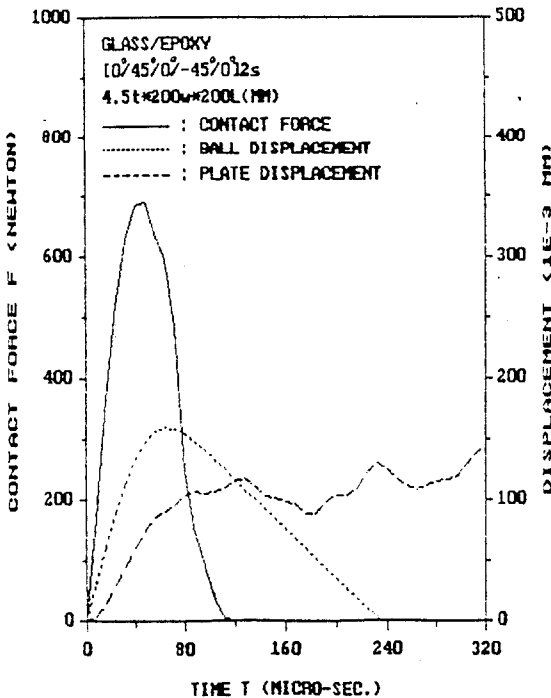


Fig. 8 Contact force and displacements for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate subjected to impact

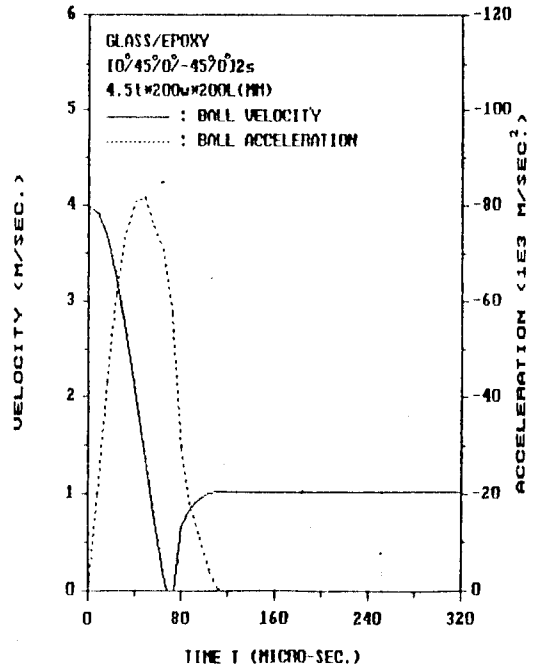


Fig. 9 Ball velocity and acceleration for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate

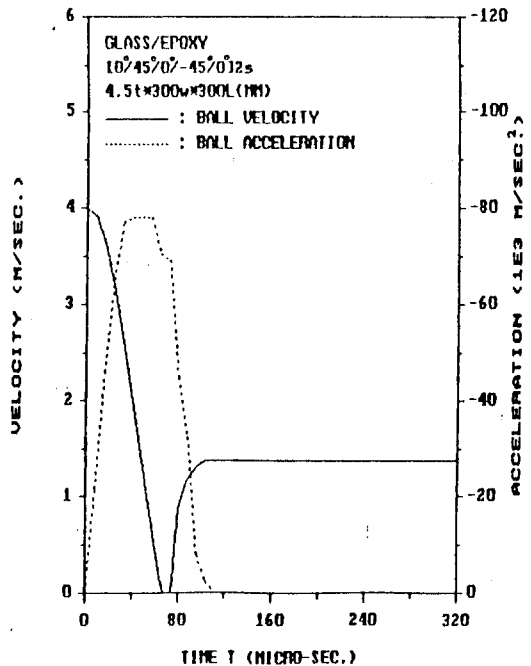


Fig. 10 Ball velocity and acceleration for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate

강구의 충격후 충격점 부근의 x축 방향의 변형율은  $\epsilon_x$ 와 응력  $\sigma_x$  그리고 y축 방향의 변형율은  $\epsilon_y$ 와 응력  $\sigma_y$ 를 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14에 나타내었으며, 충격 실험에서 구한 변형율  $\epsilon_x$ 와  $\epsilon_y$ 를 같이 나타내었다.

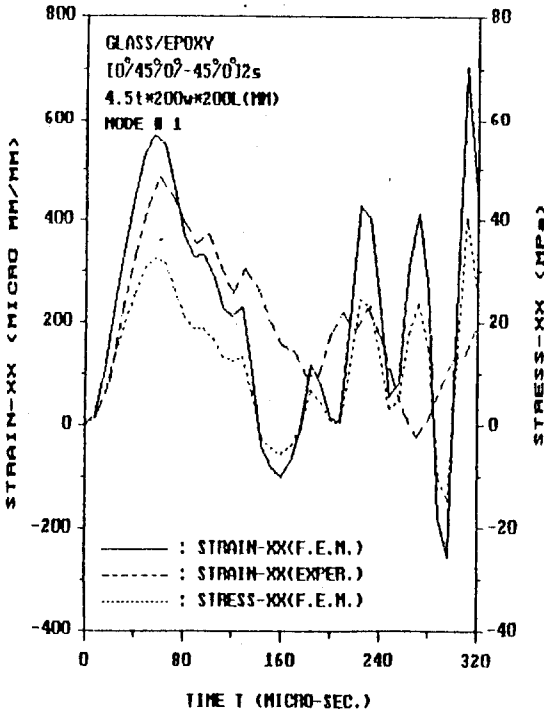


Fig. 11 Strain and stress response histories for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 2.1mm from the impact point

강구의 충격에 의하여 발생한 전단파가 적층판의 경계에서 반사되어 되돌아오는데 걸리는 시간(120~150  $\mu$ sec) 이전에서는 유한 요소법에 의한 결과와 실험에 의한 결과는 잘 일치하였으며, 그 시간 이후에서는 전체적인 경향은 비슷하나 시간이 증가함에 따라 차가 크게 나타났다. 이러한 차이는 판의 경계에서 파의 반사가 불완전하였기 때문인 것으로 생각된다.

그리고 각 적층판에 대하여 접촉시간내에서의 충격점 부근과 절점4부근의 최대 변형율과 최대 응력을 Table 3에 나타내었다. 충격점 부근에서는 다른 부분에 비해서 매우 큰 변형율과 응력이 발생하였다.

Table 3에서  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 의 적층형태에

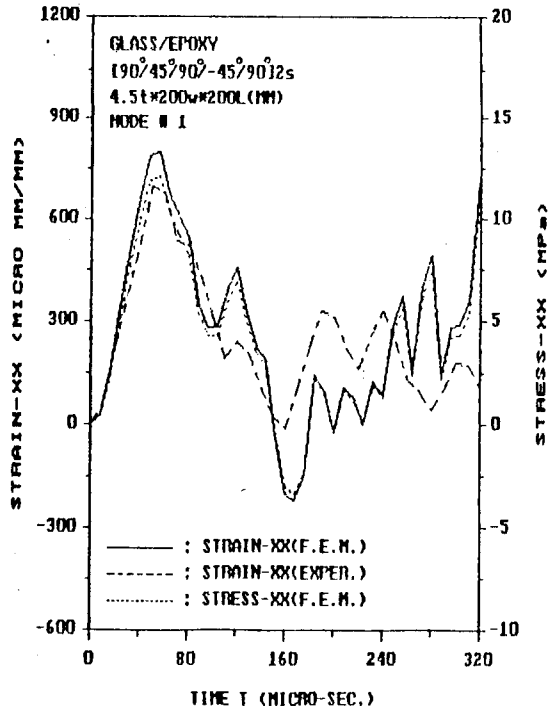


Fig. 12 Strain and stress response histories for a  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 2.1mm from the impact point

는 y축 방향의 변형율  $\epsilon_y$ 와 x축 방향의 응력  $\sigma_x$ 가 크게 나타났으며,  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 적층 형태에서는 x축 방향의 변형율  $\epsilon_x$ 와 y축 방향의 응력  $\sigma_y$ 가 크게 나타났다. 이는 적층 복합판이 충격을 받게되면 섬유방향에 횡방향의 변형율 성분이 크게 발생하고 반대로 응력은 섬유방향의 응력 성분이 크게 발생함을 의미한다. 이러한 횡방향의 큰 변형율의 발생은 적층재의 횡방향 강성 및 강도를 현저히 저하시키게 된다.

충격점에서 어느 정도 떨어진 절점4부근의 x축 방향의 변형율  $\epsilon_x$ 와 응력  $\sigma_x$ 를 나타낸 Fig. 15, Fig. 16을 보면, 강구의 충격후 어느 정도의 시간이 경과한 후 매우 작은 압축의 변형율이 발생하고 뒤이어 중간크기의 인장 변형율이 발생하고 연이어 가장 큰 최대 압축 변형율이 발생함을 알 수 있다. 여기서 마지막에 발생한 매우 큰 변형율변동을 속도는 매우 느리나 진폭이 매우 큰 횡파에 의한 것으로, 이 횡파에 의한 변형율의 급격한 변화는 적층재의 층간 분리(delamination) 현



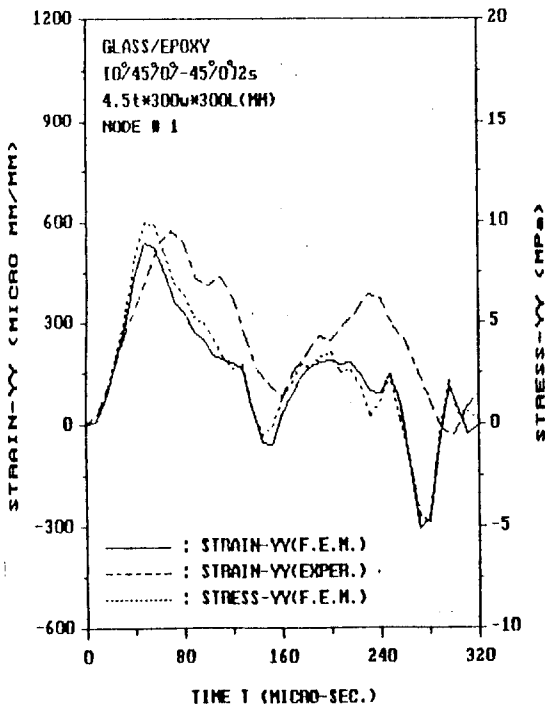


Fig. 13 Strain and stress response histories for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 2.1mm from the impact point

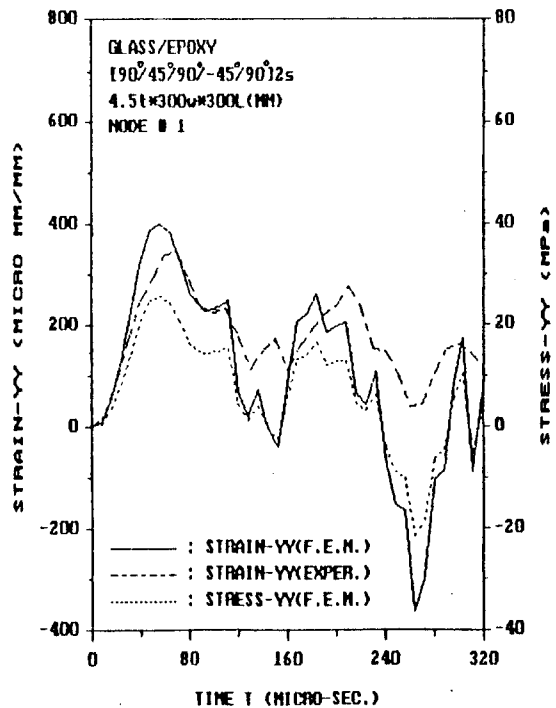


Fig. 14 Strain and stress response histories for a  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 2.1mm from the impact point

Table 3. Comparison of maximum contact force, maximum strain and maximum stress

Material	Glass/epoxy				
	Size	200w × 200L		300w × 300L	
Stacking sequences	0°	90°	0°	90°	
Maximum contact force	689	685	659	656	
Maximum strain and stress	$\epsilon_{x1}$	567	800	402	543
	$\sigma_{x1}$	32.5	12.1	23.1	8.2
	$\epsilon_{y1}$	804	570	539	402
	$\epsilon_{x2}$	14.8	36.4	10.0	25.6
	$\sigma_{x2}$	-155	-198	-87	-112
	$\sigma_{y1}$	-3.9	-3.0	-5.0	-1.7

\* 주 : 0° :  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$   
 90° :  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 를 의미함.

상을 일으키게 된다.

## 6. 結 論

강구에 의한 횡방향 저속 충격을 받는 적층 복합판의 충격 응답 및 충격응력에 관한 연구를 위하여, Whitney와 Pagano의 전단 변형이론을 기초로하여 정적 압입실험에 의한 접촉법칙을 고려한 동적 유한요소 해석을 행하여, 충격 실험에 의한 결과와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정적 압입 실험에 의한 접촉 법칙을 고려한 본 동적 유한요소 해석은 적층 복합판의 충격 응답 및 충격 응력 해석을 위해 유용하다는 것을 알았다.

2) 강구의 충격후 발생하는 최대 접촉력은  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 와  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 두적층 형태의 판에서는 적층형태 및 판의 크기에는 무관하며 반발 속도는 판의 크기가 클수록 커진다는 것을 알았다.

3) 충격후 충격점 부근에서는 다른 부분에 비해 순

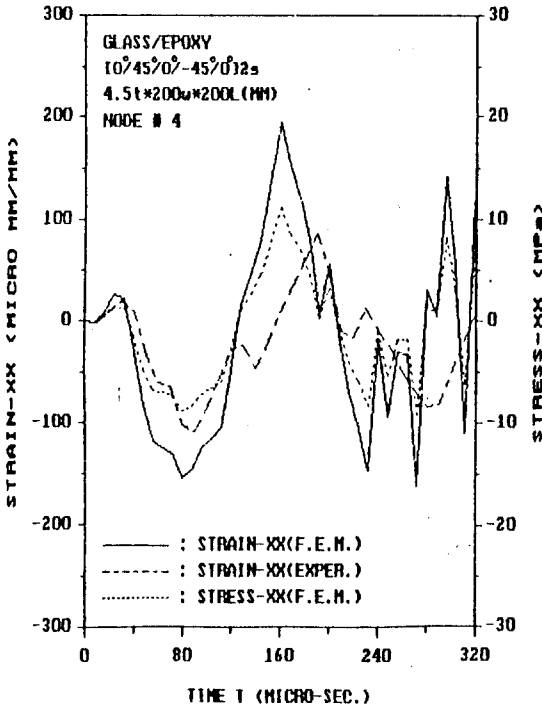


Fig. 15 Strain and stress response histories for a  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 44.2mm from the impact point

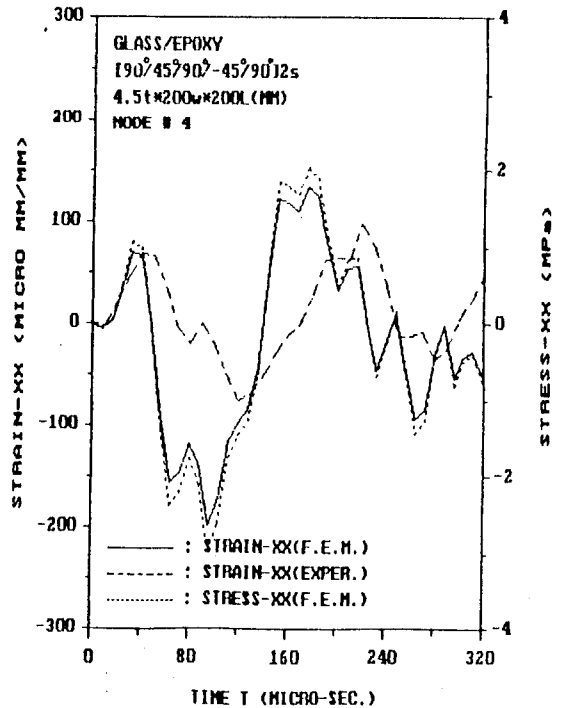


Fig. 16 Strain and stress response histories for a  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy plate at 44.2mm from the impact point

간적으로 매우 큰 변형율과 응력이 발생하고, 특히 섬유 방향에 횡방향으로 큰 변형율이 발생하기 때문에 적층재의 강성 및 강도를 현저히 저하시킬 것으로 사료된다.

4) 충격 응력을 고려한 적층 복합재의 설계시 충격 현상을 지배하는 횡파에 의한 급격한 변형을 변화로 인한 층간 분리 현상을 고려하여야 한다.

<후 기>

본 연구는 학술진흥재단의 학술연구 조성비에 의해 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

參考文獻

1) Goldsmith, W., 1960, Impact, Edward Arnold.

2) Sun, C. T. and Huang, S. N., 1975, "Transverse Impact Problems by Higher-Order Beam Finite Element", Computers and Structures, Vol. 5, pp. 297~303.

3) 安國燦, 全文生, 金奎南, 1988, "有限 요소法에 의한 적층 복합보의 충격 해석", 大韓機械學會 論文集, 第12卷, 第4號, pp. 652~661.

4) Sun, C. T. and Chen, J. K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates", J. of Composite Materials, Vol. 19, pp. 490~504.

5) 安國燦, 全文生, 金奎南, 1989, "低速 衝擊을 받는 적층 복합材의 應力波 電波에 관한 研究", 大韓機械學會 論文集, 第13卷, 第1號,

- pp. 9~19.
- 6) K. C. Ahn, M. S. Kim and G. N. Kim, 1989, "A Theoretical and Experimental Study on the Stress and Wave Propagation in Transversely Impacted Composite Laminates", III Conference of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation, Yokohama, JAPAN.
  - 7) 全文生, 安國燦, 金奎南, 1989, "보와 판이론에 의한 보 형상 複合材의 衝擊 거동에 관한 研究", 大韓機械學會 論文集, 第13卷, 第4號, pp. 451~460.
  - 8) Whitney, J. M. and Pagano, N. J., 1970, "Shear Deformation in Hetero-geneous Anisotropic Plates", J. of Applied Mechanics, 37, pp.1031~1036.
  - 9) Reddy, J. N., 1980, "A Penalty Plate-Bending Element for the Analysis of Laminated Anisotropic Composite Plates", Int. J. Num, Meths., Engrg., Vol. 15, pp. 1187~1206.
  - 10) Wilson, E. L. and Clough, R. W., 1962, "Dynamic Response by Step by Stop Matrix Analysis", Symp. on Use of Computers in Civil Engineering, Lisbon.