

〈論 文〉

# 고속 충격실험에 의한 적층 복합재의 파동전파에 관한 연구

김문생\* · 김남식\*\* · 박승범\*\*\*

(1992년 10월 29일 접수)

## Wave Propagation of Laminated Composites by the High-Velocity Impact Experiment

Moon-Saeng Kim, Nam-Shik Kim and Seung-Bum Park

**Key Words :** Laminated Composites(적층 복합재), High-Velocity Impact(고속 충격), Wave Propagation(파동전파), Strain Response(변형률 응답), Delamination(층간분리)

### Abstract

The wave propagation characteristics of laminated composites subjected to a transverse high-velocity impact of a steel ball is investigated. For this purpose, high-velocity impact experiments were conducted to obtain the strain response histories, and a finite element analysis based on the higher-order shear deformation theory in conjunction with the static contact law is used. Test materials for investigation are glass/epoxy laminated composite materials with  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  and  $[90^\circ/-45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  stacking sequences. As a result, the strain responses obtained from the experiments represented the wave propagation characteristics in the transversely impact, also the wave propagation velocities obtained from high-velocity impact experiments and wave propagation theory agree well.

### 기 호 설 명

$A_{ij}$  : 강성계수

$C_{ijkl}$  : 탄성계수

$c$  : 전파속도

$E_i$  : 종탄성계수

$G_{ij}$  : 횡탄성계수

$h$  : 적층판의 두께

$n_j$  : 방향여현

$Q_{ij}$  : 감소강성계수

$\bar{Q}_{ij}$  : 변환된 감소강성계수

$t$  : 시간

$u_i$  : 변위성분

$\Gamma_{ij}$  : Christoffel 강성계수

$\epsilon_{ij}$  : 변형률 성분

$\lambda$  : 파장

$\nu_{ij}$  : 푸아송비

$\rho$  : 밀도

$\sigma_{ij}$  : 응력성분

### 1. 서 론

기존의 금속재료에 비해 높은 비강도 및 비강성을 지니고 섬유방향 및 적층순서의 변화에 따른 유동적인 이방성을 지니는 유리/에폭시(glass/epoxy),

\*정회원, 부산대학교 기계설계공학과

\*\*정회원, 부산공업대학 기계설계과

\*\*\*정회원, 부산대학교 기계설계공학과 대학원

흑연/에폭시(graphite/epoxy), 탄소/에폭시(carbon/epoxy) 등과 같은 적층 복합재료(laminated composite materials)는 자동차, 항공우주산업 및 각종 스포츠용품에 이르기까지 많이 사용되고 있다.

이러한 복합재료는 부품의 무게감소 외에 긴 피로수명, 우수한 진동감쇠 특성 등 여러가지 장점을 지니고 있으나, 두께방향에 대한 강화의 결핍으로 충격하중에 대해서는 상당히 취약하여 충격에 대한 손상을 입기 쉽다는 점이 주요한 관심을 가져왔다. 비록 적은 양의 충격에너지라 하더라도 복합재료 구조물에는 상당한 손상을 입히게 되어 구조물의 강도를 현저히 저하시키게 된다. 충격에 의한 손상은 국부적인 영구변형, 섬유파단 및 층간분리(delamination)의 형태로 나타나게 된다.

그리고 충격은 정하중의 경우와는 달리 접촉영역에서의 재료의 접촉저동과 응력과 형태의 구조적저동을 포함하고 있다. 즉, 충격점에서의 초기에너지는 응력파의 형태로 나머지 부분에 전달되며 응력파의 반사와 기하학적 모양의 변화로 인한 응력집중으로 순간 응력이 크게 형성된다. 이와 같이 적층 복합재가 충격을 받을 때 수반되는 충격 응력파는 층간분리를 일으키게 되므로 복합재료의 구조물 설계시 이를 고려하여야 한다.

적층 복합재의 충격문제를 이론적으로 해석하기 위하여 Yang과 Sun<sup>(1)</sup>은 유리/에폭시 및 흑연/에폭시 복합재에 대하여 정적 압입실험(static indentation test)을 통하여 복합재의 충격문제 해석에 유용한 접촉법칙(contact law)을 제안하였으며, Tan과 Sun<sup>(2)</sup>은 흑연/에폭시 적층 복합재에 대하여 접촉법칙을 이용한 충격해석을 행하였다. 그리고 Whitney와 Pagano의 이론<sup>(3)</sup>에 기초하여 적층 복합재의 충격문제를 해석한 여러 연구들<sup>(4,5,6)</sup>과 Reddy의 고차 전단변형이론(higher-order shear deformation theory)<sup>(7)</sup>에 의한 저속 충격에 관한 이론적인 연구들<sup>(8,9)</sup>이 행하여져 왔다. 그리고 충격에 의한 적층 복합재의 파동전파에 관한 실험적인 연구들<sup>(10,11)</sup>도 행하여져 왔으나, 고속 충격에 대해서는 고속의 충격속도를 얻기 어려운 점과 충격속도의 정확한 측정문제 등으로 인하여 고속 충격실험에 관한 연구는 아직 미비한 실정이나, 앞으로 많은 연구가 이루어져야 하겠다.

따라서 본 연구에서는 강구에 의하여 횡방향 고속 충격하중을 받는 적층 복합재의 파동전파 특성을 연구하기 위하여  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 와  $[90^\circ/$

$45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 적층형태를 갖는 유리/에폭시 적층복합재에 대하여 고속 충격실험을 행하여 변형률 응답을 구하였다. 또한 Reddy의 고차 전단변형이론<sup>(7)</sup>을 기초로 하여 정적 압입실험에 의한 접촉법칙을 이용한 유한요소해석(finite element analysis)<sup>(9)</sup>을 행하여 실험에 의한 변형률 응답과 비교하였다. 그리고 고속 충격실험에 의한 변형률 응답으로부터 파동전파 특성에 대하여 고찰하였으며, 파동 전파속도를 계산하여 파동전파 이론에 의한 전파속도와 비교 고찰하였다.

## 2. 파동전파이론

### 2.1 파동방정식

물체력(body force)을 무시하는 경우의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i, \quad (i, j=1, 2, 3) \tag{1}$$

여기서  $\sigma_{ij}$ 는 응력성분,  $u_i$ 는 변위성분 그리고  $\rho$ 는 밀도이다. 그리고 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \tag{2}$$

여기서  $C_{ijkl}$ 는 탄성계수(elastic stiffness)이고, 변형률 성분  $\epsilon_{kl}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{kl} = \frac{1}{2}(u_{k,l} + u_{l,k}) \tag{3}$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하면

$$C_{ijkl} u_{k,jl} = \rho \ddot{u}_i \tag{4}$$

식(4)의 해는 다음과 같다.

$$u_k = U_k e^{\frac{2\pi i}{\lambda}(n_j x_j - c_n t)} \tag{5}$$

여기서  $\lambda$ 는 파장(wave length),  $n_j$ 는 파두면(wave front)에 수직선의 방향여현이고,  $c_n$ 은 전파속도이다. 식(5)를 식(4)에 대입하면 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho c^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho c^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{6}$$

여기서  $\Gamma_{ij}$ 는 Christoffel 강성계수<sup>(12)</sup>로서 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{ij} = \Gamma_{ji} = n_j n_l C_{ijkl} \tag{7}$$

식(6)이 Nontrivial해를 가지기 위해서는 행렬식이 0이 되어야 한다.

직교이방성(orthotropic) 재료에 대한 응력-변형률 관계는

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

와 같다. 여기서  $Q_{ij}$ 는 감소강성계수(reduced stiffness coefficient)<sup>(13)</sup>이다.

따라서 Christoffel 강성계수는 다음과 같다.

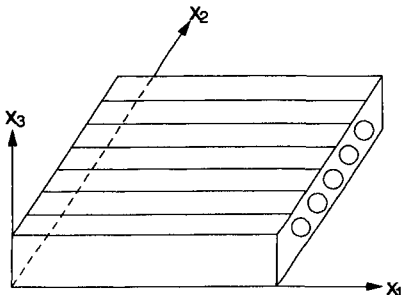
$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= l^2 Q_{11} + m^2 Q_{66} + n^2 Q_{55} \\ \Gamma_{22} &= l^2 Q_{66} + m^2 Q_{22} + n^2 Q_{44} \\ \Gamma_{33} &= l^2 Q_{55} + m^2 Q_{44} + n^2 Q_{33} \\ \Gamma_{23} &= mn(Q_{23} + Q_{44}) \\ \Gamma_{13} &= ln(Q_{13} + Q_{55}) \\ \Gamma_{12} &= lm(Q_{12} + Q_{66}) \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.2 전파속도

일방향 섬유강화 복합재 단층의 좌표계를 Fig. 1과 같이 섬유방향을  $x_1$ 축( $x_2-x_3$ 면)에 일치시키면, 평면운동과 관련된 2개의 파와 굽힘변형과 관련된 3개의 파로 이루어짐을 알 수 있다.

$x_1$ 축 방향( $l=1, m=n=0$ )으로 전파되는 파를 살펴보면

$$\Gamma_{11} = Q_{11}, \Gamma_{22} = Q_{66}, \Gamma_{33} = Q_{55}, \Gamma_{23} = \Gamma_{13} = \Gamma_{12} = 0 \quad (10)$$



$(x_1, x_2, x_3)$  : lamina reference axes

Fig. 1 Unidirectional reinforced lamina

이므로 식(6)의 행렬식은

$$\begin{vmatrix} Q_{11} - \rho c^2 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{66} - \rho c^2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{55} - \rho c^2 \end{vmatrix} \quad (11)$$

따라서  $x_1$ 축 방향으로의 파동에서는 다음의 속도로 각각 전파되는 세가지의 파들이 있음을 알 수 있다.

$$c_{11L} = \sqrt{\frac{Q_{11}}{\rho}}, c_{12T} = \sqrt{\frac{Q_{66}}{\rho}}, c_{13T} = \sqrt{\frac{Q_{55}}{\rho}} \quad (12)$$

여기서, 숫자 첨자는 각각 파동 및 질점의 운동 방향을 나타내고,  $L$ 과  $T$ 는 종파 및 횡파를 각각 나타낸다.

판의 두께가 얇은 경우에 두께에 비해서 파장이 큰 경우 몇 가지 단순화가 가능하며, 두 평면 주축 방향을 따라 전파하는 종파의 전파속도는

$$c_{11L} = \sqrt{\frac{E_1}{\rho(1-\nu_{12}\nu_{21})}}, c_{22L} = \sqrt{\frac{E_2}{\rho(1-\nu_{12}\nu_{21})}} \quad (13)$$

이고, 횡 전단변형과 관련된 두 횡파의 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$c_{13T} = \sqrt{\frac{Q_{55}}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_{13}}{\rho}}, c_{23T} = \sqrt{\frac{Q_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_{23}}{\rho}} \quad (14)$$

그리고  $x_1$ 축 및  $x_2$ 축과  $45^\circ$ 경사진 방향( $l=m=1/\sqrt{2}, n=0$ )을 따라서 전파되는 파를 살펴보면

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= \frac{1}{2}(Q_{11} + Q_{66}) = \frac{1}{2}\left(\frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} + G_{12}\right) \\ \Gamma_{22} &= \frac{1}{2}(Q_{22} + Q_{66}) = \frac{1}{2}\left(\frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} + G_{12}\right) \\ \Gamma_{33} &= \frac{1}{2}(Q_{44} + Q_{55}) = \frac{1}{2}(G_{13} + G_{23}) \\ \Gamma_{12} &= \frac{1}{2}(Q_{12} + Q_{66}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} + G_{12}\right) \\ \Gamma_{23} &= \Gamma_{13} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

따라서

$$(\Gamma_{33} - \rho c^2)[(\Gamma_{11} - \rho c^2)(\Gamma_{22} - \rho c^2) - \Gamma_{12}^2] = 0 \quad (16)$$

순수 종방향 또는 횡방향은 아니지만, 더 빠른 파를 준 종파(quasi-longitudinal wave), 느린 파를 준 횡파(quasi-transverse wave)라 하며, 준 횡파의 속도는 다음과 같다.

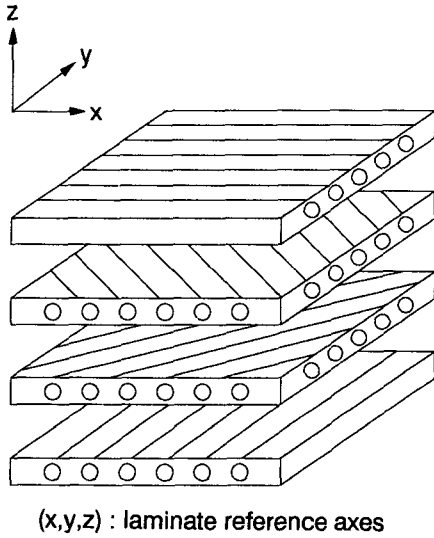


Fig. 2 Laminates with z axis normal to plate

$$C_{45/3T} = \sqrt{\frac{Q_{44} + Q_{55}}{2\rho}} = \sqrt{\frac{Q_{13} + Q_{23}}{2\rho}} = \sqrt{\frac{C_{13T}^2 + C_{23T}^2}{2}} \quad (17)$$

다수의 단층을 여러 각도로 적층한 적층복합판에 있어서의 전파속도는 각 단층의 물성치 뿐만 아니라 적층 각도 및 그 단층의 수에도 영향을 받는다. Fig. 2와 같이 임의의 섬유방향을 가지고 적층되어 있는 적층판의 판 기준좌표계 (laminareference coordinates)에 대한 강성계수(stiffness matrix)는<sup>(13)</sup>

$$A_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{11}^{(k)} dz, \quad A_{22} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{22}^{(k)} dz, \\ A_{44} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{44}^{(k)} dz, \quad A_{55} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{55}^{(k)} dz \quad (18)$$

와 같다. 여기서  $h$ 는 적층판의 두께이고,  $\bar{Q}_{ij}^{(k)}$ 는 각 단층의 판 기준좌표계에 대한 변환된 감소강성계수(transformed reduced stiffness matrix)<sup>(13)</sup>이다.

따라서 전체 적층판에 대한 종파의 전파속도는

$$C_{xxL} = \sqrt{\frac{A_{11}/h}{\rho}}, \quad C_{yyL} = \sqrt{\frac{A_{22}/h}{\rho}} \quad (19)$$

이고, 횡파의 전파속도는

$$C_{yzT} = \sqrt{\frac{A_{44}/h}{\rho}}, \quad C_{xzT} = \sqrt{\frac{A_{55}/h}{\rho}} \quad (20)$$

이다.

### 3. 고속 충격실험

#### 3.1 시편

고속 충격실험에 사용된 재료는 유리/에폭시 적층 복합재로서 한국 화이바(주)에서 오토클레이브(auto-clave)법으로 성형 제작되었으며, 재료상수 값은 Table 1과 같다. 유리/에폭시 적층 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 가지며  $4.5' \times 200'' \times 200''$ (mm)와  $4.5' \times 300'' \times 300''$ (mm)의 크기를 가진다. 그리고 강구의 충격 후 발생하는 변형률 변동을 검출하기 위하여 충격면의 반대면에 스트레인게이지(KYOWA Electronic Instruments Co. LTD)를 부착하였으며, 충격지점과  $4.5' \times 200'' \times 200''$ (mm)의 시편의 경우 충격지점에서 x축 방향과 y축 방향으로 40 mm 위치한 지점에,  $4.5' \times 300'' \times 300''$ (mm)의 시편의 경우 충격지점에서 x축 방향과 y축 방향으로 75 mm 위치한 지점에 각각 부착하였다.

#### 3.2 고속 충격실험

적층 복합재의 횡방향으로 강구를 고속 충격을 가하기 위한 고속 충격실험 장치를 Fig. 3에 나타내었다. 강구를 고속 충돌시키기 위하여 공기 압축기(air compressor)를 이용하였으며, 직경 7.14 mm와 5 mm의 강구를 내경 8 mm의 유리관으로 통과 시킴으로서 시편에 충격을 가하였다. 그리고 유리관에 10 cm의 간격으로 수광센서를 부착하여 강구가 유리관을 통과하는 시간을 타이머(digital counter)로 측정하므로써 충격속도를 구하였다.

강구의 충돌 후 발생하는 변형률 응답은 충격점의 반대면에 부착된 스트레인게이지에 의해서 검출되며, 휘스톤브릿지 회로를 거쳐서 동적변형증폭기(SHOWA, Model 5392)에 의해 증폭되어 2채널 다

Table 1 Mechanical properties of glass/epoxy laminated composites

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	0.310	2050

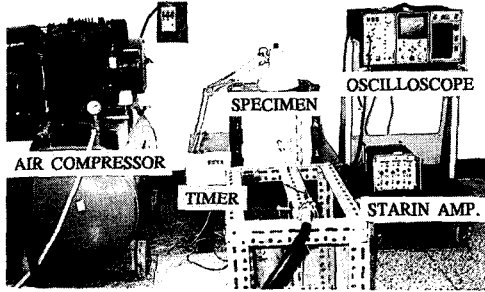


Fig. 3 Experimental setup for high-velocity impact test and recording instrumentation

지털 오실로스코우프 (NICOLET Instrument Co.) 에 기록된다.

#### 4. 결과 및 고찰

강구가 판에 충돌한 후 시간의 변화에 따른 충격 점 부근의  $x$  및  $y$  축 방향의 변형률 응답  $\epsilon_x$ 와  $\epsilon_y$ 를  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층형태의 유리/에폭시 적층재에 대하여 고속 충격실험에서 구한 결과와 고차 전단변형이론에 의한 유한요소해석 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 같이 나타내었다.

$[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층형태의 경우  $x$  축 방향의 강성은  $y$  축 방향에 비해서 상대적으로 작기 때문에  $x$  축 방향의 변형률  $\epsilon_x$ 는  $y$  축 방향의 변형률  $\epsilon_y$ 에 비해서 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 고속 충격실험에 의한 변형률 응답은 충격 초기에는 유한요소해석의 결과와 잘 일치하나, 그 후 현저히 감소함을 알 수 있는데, 이는 강구의 충격으로 인하여 적층 복합재는 영구압입 뿐만 아니라 내부에 층간분리와 같은 손상이 발생하기 때문이다.

$[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  적층형태를 가지는  $4.5' \times 300'' \times 300''$  (mm) 크기의 유리/에폭시 적층재의 충격점에서  $x$  축 방향으로 75 mm 위치한 지점의 변형률 응답  $\epsilon_x$ 와  $y$  축 방향으로 75 mm 위치한 지점의 변형률 응답  $\epsilon_y$ 를 임의의 충격속도에 대하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 충격속도 변화에 대한 변형률 응답들은 변형률값의 크기만 차이를 보일 뿐, 파동이 전파되는 양상은 거의 같음을 알 수 있다. 즉, 충격에 의하여 발생하는 종파 및 횡파가 전파되는 시간은 충

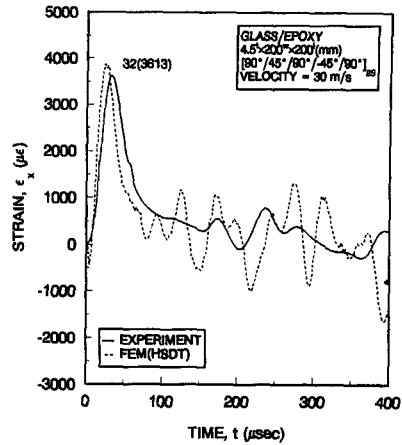


Fig. 4 Strain response histories for  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 2.25 mm from the impact point

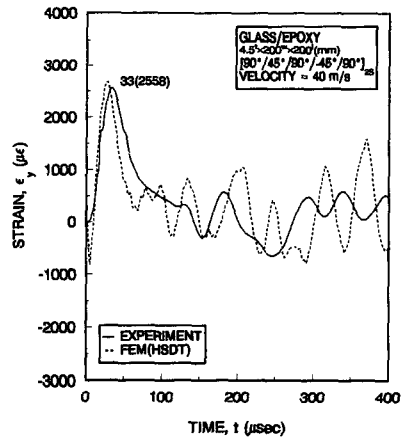


Fig. 5 Strain response histories for  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 2.25 mm from the impact point

격속도와 상관없이 거의 동일하다.

시간의 변화에 따른 변형률 응답을 살펴보면, 강성이 상대적으로 큰  $x$  축 방향으로서는 시간 18  $\mu\text{sec}$ 에서, 강성이 작은  $y$  축 방향으로서는 시간 26  $\mu\text{sec}$ 에서 매우 작은 진폭의 변형률이 나타나는데, 이는 진폭은 작으나 속도가 매우 빠른 종파가 도달하는 것으로 여겨진다. 그 후 각각 42  $\mu\text{sec}$ 와 56  $\mu\text{sec}$ 에서 다소 큰 진폭을 가지는 인장 변형률 성분이 발생하는데, 이는 진폭은 크나 속도가 느린 횡파가 도달하였음을 알 수 있으며, 뒤이어 가장 큰 진폭을 가지는 횡파가 각각 시간 87  $\mu\text{sec}$ 와 104  $\mu\text{sec}$ 에

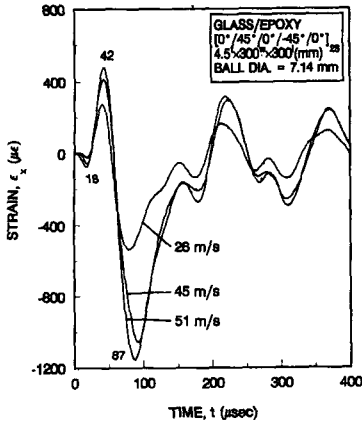


Fig. 6 Strain response histories for  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 75 mm from the impact point

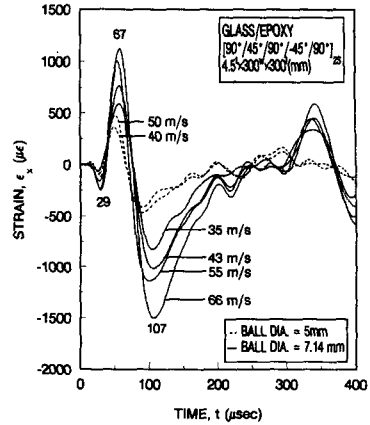


Fig. 8 Strain response histories for  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 75 mm from the impact point

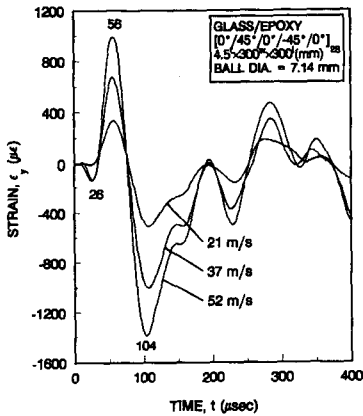


Fig. 7 Strain response histories for  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 75 mm from the impact point

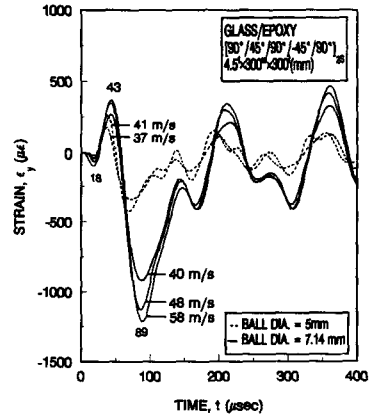


Fig. 9 Strain response histories for  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  glass/epoxy laminates at 75 mm from the impact point

도달하게 되는데, 이러한 횡파에 의한 급격한 변형률의 변화는 적층 복합재에 있어서 상대적으로 취약한 횡방향의 층간분리를 일으키게 된다.<sup>(11,14)</sup>

그리고  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층형태에 대한 충격속도 및 강구의 직경변화에 대한 변형률 응답  $\epsilon_x$ 와  $\epsilon_y$ 를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 마찬가지로 동일한 전파 특성을 나타내는 것을 알 수 있으며, 강성이 큰  $y$ 축 방향이  $x$ 축 방향보다 약간 빠르게 전파됨을 알 수 있다. 또한,  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층형태의  $x$ 축과  $y$ 축의 강성은  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  적층형태의  $y$ 축과  $x$ 축의 강성과 각각 동일하므로, 그 방향으로의 파의 전파시간은

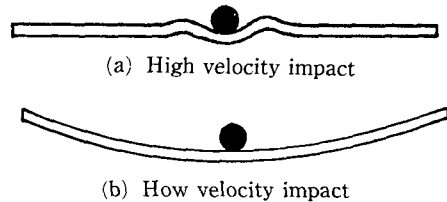


Fig. 10 Schematic representation of the impact response under

거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 강구의 직경이 5 mm인 경우가 7.14 mm인 경우보다 파의 전파가 약간 빠르게 전파되는데, 이는 강구와 파의 접촉시

간에 의한 영향으로서 강구의 크기가 작을 수록 접촉시간이 짧기 때문에 강구가 큰 경우보다 전파속도가 크게 나타났다.

이와 같은 고속 충격에 의하여 파동전파 특성은 잘 나타나나, 저속 충격에 의해서는 이러한 현상이 잘 나타나지 않는다. 일반적으로 고속 충격에서는 Fig. 10a와 같이 충격에너지는 충격지점 부근의 매우 작은 영역에서 국부적인 변형을 발생시키는데 소요되며, 저속 충격에 있어서는 Fig. 10b와 같이 충격에너지는 전체 영역의 변형을 일으키는데 주로 소요되기 때문이다.<sup>(15)</sup> 충격속도가 3~4 m/sec인 저속 충격실험에 의한 변형률 응답을 Fig. 11에 나타내었는데, 고속 충격에서와 같은 파동전파 특성은 잘 나타나지 않는다.

Fig. 12와 Fig. 13은 고차 전단변형이론에 의한 유한요소해석을 행하여 적층판의 중립면에 있어서의 z축 방향의 변위, 즉 처짐을 시간의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 강구의 충격에 의하여 충격점에서 국부적인 변형이 발생하는 것을 알 수 있으며, 시간이 경과함에 따라 점차 적층판의 경계로 전파됨을 알 수 있다. 또한 그 전파되는 속도는  $[0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$  적층형태의 경우 강성이 큰 x축 방향이 y축 방향보다 더

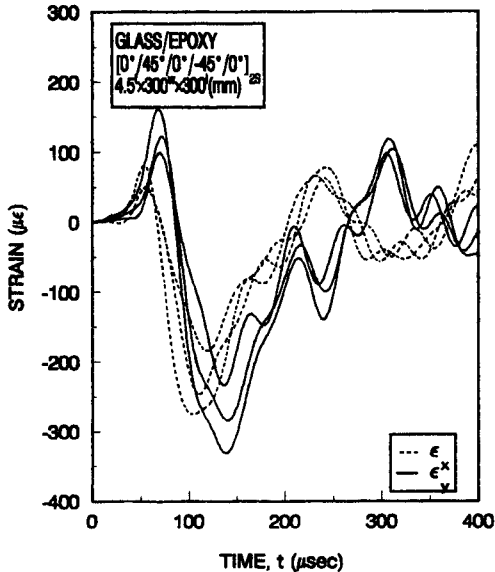


Fig. 11 Strain response histories for  $[0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$  glass/epoxy laminates under low velocity impact

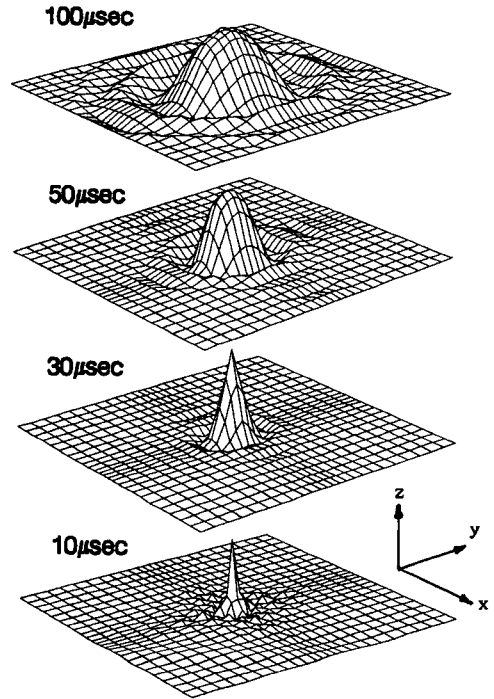


Fig. 12 Plate deflection surfaces for  $[0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$  glass/epoxy laminates under 50 m/s impact velocity

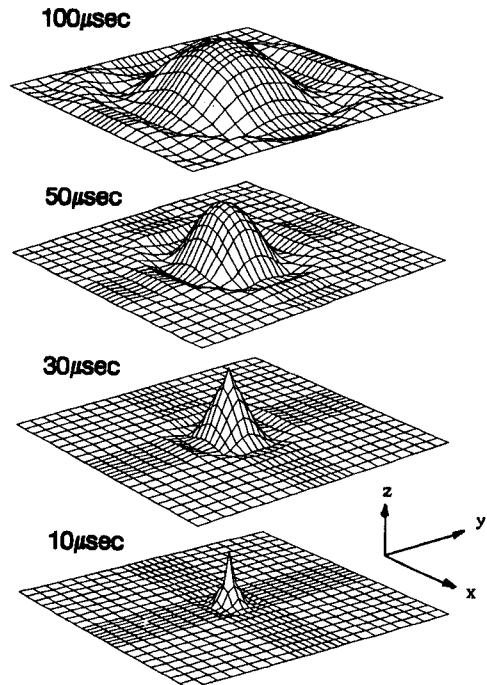


Fig. 13 Plate deflection surfaces for  $[90^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$  glass/epoxy laminates under 40 m/s impact velocity

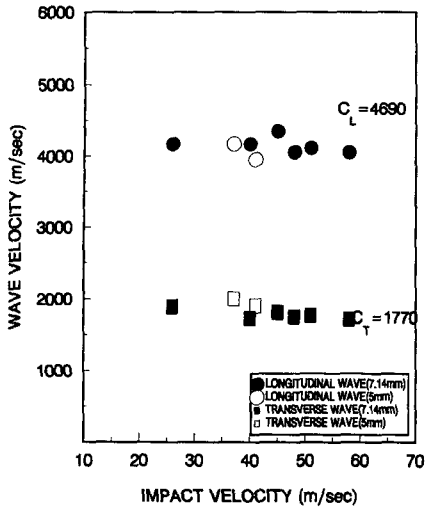


Fig. 14 Wave velocity in the direction of higher stiffness with respect to impact velocity and ball diameter

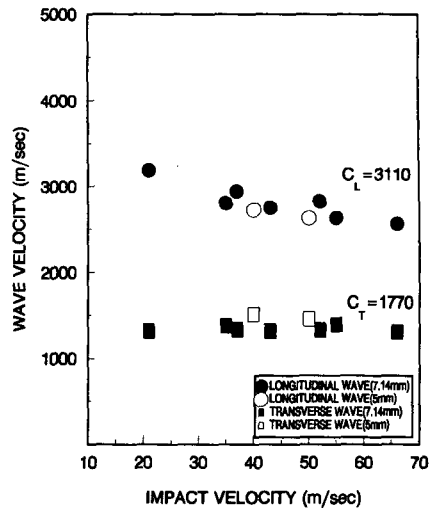


Fig. 15 Wave velocity in the direction of lower stiffness with respect to impact velocity and ball diameter

빨리 전파되며,  $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층형태의 경우  $y$ 축 방향이  $x$ 축 방향보다 더 빨리 전파됨을 알 수 있다.

이상과 같은 결과로부터 충격에 의하여 발생하는 종파 및 횡파의 전파속도를 각각의 충격속도에 대하여 계산하여 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었으며,

그 평균값을 파동전파이론에 의하여 구한 전파 속도들과 비교하여 Table 2에 나타내었다.

일반적으로 고속 충격실험에 의하여 구한 전파속도는 파동전파이론에 의한 전파속도와 비교할 때 잘 일치하였으며, 종파의 전파속도는 강성이 큰 방향은 12%, 강성이 작은 방향은 10% 정도 낮게 나

Table 2 Comparison of wave velocities between high-velocity impact experiment and wave propagation theory

Stacking sequence	Wave Type	Wave velocity (m/sec)	
		High-Velocity Impact Experiment	Wave Propagation theory
$[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$	$C_{xxL}$	4208	4692
	$C_{yyL}$	2988	3110
	$C_{xzT}$	1820	1771
	$C_{yzT}$	1326	1771
$[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$	$C_{xxL}$	2684	3100
	$C_{yyL}$	4075	4692
	$C_{xzL}$	1379	1771
	$C_{yzT}$	1839	1771

subscript  $\left\{ \begin{array}{l} L : \text{Longitudinal wave} \\ T : \text{Transverse wave} \end{array} \right.$



타났으며, 횡파의 전파속도는 강성이 큰 방향은 4% 정도 크게, 강성이 작은 방향은 22% 정도 낮게 나타났다.

### 5. 결 론

강구에 의한 횡방향 고속 충격을 받는 적층 복합재의 파동전파 특성을 연구하기 위하여 고속 충격 실험을 행하여 강구의 충격에 의한 변형률 응답을 구하여 파동전파 특성을 고찰하였으며, 변형률 응답으로부터 파동전파속도를 계산하여 파동전파이론에 의한 전파속도와 비교 검토하였다.

그 결과 강구의 충격으로 인하여 충격점에서 국부적인 변형이 발생하여 시간이 경과함에 따라 점차 판의 경계로 전파되며, 강성이 큰 방향으로 더 빨리 전파됨을 알 수 있었다. 강구의 충격에 의한 파동전파 특성은 저속 충격에서 보다는 고속 충격에서 잘 나타났으며, 강구의 충격에 의하여 각각의 전파 속도를 가지고 서로 다른 방향으로 전파하는 종파 및 횡파가 발생하며 강성이 큰 방향으로 더 빠른 속도를 가지고 전파함을 알 수 있었다.

그리고 고속 충격실험에서 구한 변형률 응답으로부터 구한 종파 및 횡파의 전파속도는 파동전파이론에 의한 전파속도와 잘 일치하였으며, 본 연구의 충격속도 범위 (25~60 m/sec) 내에서는 충격속도에 의한 영향은 거의 없었으며, 강구의 크기에 대해서는 강구와 적층판의 접촉시간에 의한 영향으로 장구가 작을 수록 전파속도는 약간 크게 나타났다.

### 참고문헌

(1) Yang, S.H. and Sun, C.T., 1982, "Indentation Law for Composite Laminates," ASTM STP 787, pp. 425~449.  
 (2) Tan, T.M. and Sun, C.T., 1985, "Use of Statical Indentation Laws in the Impact Analysis of Laminated Composites Plates," Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, pp. 6~12.  
 (3) Whitney, J.M. and Pagano, N.J., 1970, "Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates," Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 1031~1036.  
 (4) Sun, C.T. and Whitney, J.M., 1973, "Theories

for the Dynamic Response of Laminated Plates," AIAA Jouranal, Vol. 11, No. 2, pp. 178~183.  
 (5) Reddy, J.N., 1980, "A Penalty Plate-Bending Element for the Analysis of Laminated Anisotropic Composite Plates," Int'l J. for Numerical Methods in Engng., Vol. 15, pp. 1187~1206.  
 (6) Sun, C.T. and Chen, J.K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 19, pp. 490~504.  
 (7) Reddy, J.N., 1984, "A Simple Higher-Order Theory for Laminated Composite Plates," Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 51, pp. 745~751.  
 (8) 이영신, 박 응, 1990, "고차 전단변형이론에 의한 복합재료 적층판의 저속 충격응답," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1365~1381.  
 (9) 김문생, 김남식, 이현철, 1991, "고차 전단변형이론에 의한 적층 복합판의 충격해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 735~750.  
 (10) Daniel, I.M., Liber, T. and LaBedz, R.H., 1979, "Wave Propagation in Transversely Impacted Composite Laminated," Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 1, pp. 9~16.  
 (11) Takeda, N., Sierakowski, R.L. and Malvern, L.E., 1981, "Wave Propagation Experiments On Ballistically Impacted Composite Laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 15, pp. 157~174.  
 (12) Tauchert, T.W. and Guzelsu, A.N., 1972, "An Experimental Study of Dispersion of Stress waves in a Fiber-Reinforced Composite," Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 39, pp. 98~102.  
 (13) Jones, R.M., 1975, Mechanics of Composite Materials, McGRAW-HILL.  
 (14) 안국찬, 김문생, 김규남, 1989, "저속충격을 받은 적층 복합재의 응력과 전파에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제13권, 제 1호, pp. 9~19.  
 (15) Cantwell, W.J and Morton, J, 1989, "Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP," COMPOSITES, Vol. 20, pp. 545~551.