

〈논 문〉

## 이중펄스레이저 홀로그래픽 간섭법을 이용한 평판의 탄성과 전파특성에 관한 연구

이기백\* · 나종문\*\* · 김정훈\*\*\*

(1996년 4월 1일 접수)

### A Study on the Characteristics of Elastic Wave Propagation in Plates Using Double Pulsed Laser Holographic Interferometry

Ki-Baik Lee, Jong-Moon Na and Jeong-Hun Kim

**Key Words :** Double Exposure Holography(이중노출 홀로그래피), Impact Load(충격하중), Elastic Wave(탄성파)

#### Abstract

In this paper, the propagation of elastic wave generated by loading impact to plates made of isotropic or anisotropic material was studied. And the influence of boundary conditions(free or clamped edge) upon the reflection of elastic wave was analyzed. Also, double exposure holographic interferometer using ruby pulse laser was formed in order to investigate transient waves. Before the elastic wave was reflected from the edges, the elastic wave of isotropic plate such as aluminum plate showed circular interferometric fringe pattern, whereas that of anisotropic plate such as epoxy composite laminates showed elliptical one. And the transverse displacement curves obtained from experiment and theory for both plates agreed well. Also, the waves reflected from the boundary edges showed much differences according to the boundary condition of edges.

#### 기 호 설 명

$\rho$  : 평판의 밀도  
 $h$  : 평판의 두께  
 $p(r, t)$  : 평판의 단위 면적당 하중  
 $E$  : 평판의 탄성계수(modulus of elasticity)  
 $\nu$  : 평판의 푸아송비(Poisson's ratio)  
 $A$  : 상수  
 $T$  : 평판에 가해지는 충격하중의 시간폭  
 $J_0(x)$  : 0차 베셀(Bessel) 함수  
 $I_0$  : 평판에 전달된 충격량(impulse)  
 $n$  : 검은 간섭무늬의 번호

$a_n(x, y)$  :  $n$ 번째 검은 간섭무늬에 해당하는 진동체의 진폭  
 $\lambda$  : 레이저 광의 파장(=6943 Å)  
 $\theta_1$  : 진동면의 법선방향에 대한 물체광의 입사각  
 $\theta_2$  : 진동면의 법선방향에 대한 물체광의 반사각

#### 1. 서 론

홀로그래픽 간섭계<sup>(1)</sup>는 오래 전에 개발된 레이저 응용계측기법으로서 실용면에서 사용이 매우 쉬운 특성이 있다. 즉, 일반적인 광학간섭계에서는 시험

\*회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

\*\*회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*부산대학교 대학원 기계공학과

편의 표면이 편평하고 반사율이 매우 좋아야 하는데 홀로그래픽 간섭계에서는 시험편의 표면이 매끈하지 않아도 되고 복잡한 형상을 하고 있어도 된다. 이러한 홀로그래픽 간섭계기법은 정현적인 진동을 하는 진동체의 고유진동모드 연구<sup>(2,3)</sup>에 많이 사용되어 왔는데, 종래의 기술들은 주로 헬륨-네온 레이저와 같은 연속 레이저(continuous wave laser)를 이용하였다. 하지만 최근에는 루비(ruby) 레이저와 같은 펄스레이저(pulse laser)의 개발로 액체나 기체의 파동전파 연구나 고체의 표면변형 연구에 펄스레이저를 이용한 홀로그래픽 간섭계가 많이 이용되고 있는데, 이러한 펄스레이저 홀로그래픽 간섭계<sup>(4)</sup>를 Gottenberg<sup>(5)</sup>는 응력과(stress wave)에 의해서 발생된 변형을 측정하기 위해 사용하였고, Aprahamian<sup>(6,7)</sup> 등은 보(beam)와 평판의 굽힘파(bending wave)의 전파특성 연구에 이용하였다. 또한 Molin 등은 사각평판의 가장자리 중 극히 일부분만을 고정하여 전체적으로는 가장자리가 모두 자유단의 경계조건을 갖는 사각평판의 굽힘파 전파특성<sup>(8,9)</sup>과 바이올린 몸체의 음향 전파 특성<sup>(10,11)</sup>을 연구하였고, Olofsson 등<sup>(12)</sup>은 튜브(tube)와 링(ring)의 굽힘파 전파특성을 연구하였다. 그 실험적 결과는 수치적 해석결과와 비교되어 매우 좋은 일치성을 보였는데, 펄스레이저 홀로그래픽 간섭계기법의 주요 장점은 어떠한 특정한 순간에 관찰하고자 하는 시험편의 전체 영역의 파동전파 형상을 관찰할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 펄스레이저를 이용한 이중노출 홀로그래픽 간섭계(double exposure holographic interferometer)의 광학계를 구성하여, 가장자리가 모두 고정단의 경계조건을 갖는 사각평판에 충격하중이 가해졌을 때 발생하는 탄성파의 전파현상을 충격이 발생된 시점부터 시간적 변화에 따라 관찰함으로써 그 전파특성을 연구하였다. 즉, 평판에 충격하중이 가해졌을 때 발생하는 평판 내의 탄성파의 전파 현상을 평판이 등방성(isotropic) 재질인 경우와 이방성(anisotropic) 재질인 경우에 대해 연구함으로써 재질에 따른 그 전파특성을 실험적으로 해석하고, 실험적으로 구한 횡변위(transverse displacement) 분포곡선을 이론적인 해석결과와 비교함으로써 본 실험의 정확성을 검증하였다. 그리고 알루미늄 사각평판의 하단 가장자리를 고정단으로 하고 나머지 가장자리를 모두 자유단으로 구성하여 가장자리의 경계조건에 따른 반사파의

거동특성을 비교·분석하였으며, 평판내에 지지점과 구멍을 구성하여 탄성파의 전파에 있어서 그 영향을 분석하였다.

## 2. 평판의 횡변위분포에 대한 이론적 해석

평판이 선형 탄성적이고 등방성적인 재질로 이루어지며 그 두께가 일정하다고 가정할 때 평판의 변위와 평판에 가해지는 하중은 일반적으로 원통좌표계  $(r, \theta)$ 를 이용하여 표현하는데, 평판에 가해지는 하중이 원형적으로 대칭이라고 가정하면  $\theta$ 는 생략될 수 있다. 그리하여 평판의 횡변위  $w(r, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.<sup>(13)</sup>

$$D\nabla^4 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p(r, t) \quad (1)$$

여기에서,  $\nabla^4 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right\} \right]$ ,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 을 나타낸다.

식 (1)의 양변을  $D$ 로 나누고  $a = \sqrt{D/\rho h}$ ,  $P = p/D$ 를 도입하면 식 (1)은 아래와 같이 된다.

$$\nabla^4 w + \frac{1}{a^2} w_{tt} = P \quad (2)$$

충격하중을 가해주는 추와 평판이 유한한 시간폭의 접촉시간을 갖고서 점접촉(point contact)을 한다고 가정하여, 충격하중을 아래와 같이 놓고

$$F(t) = \begin{cases} A \sin \pi t / T, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & T \leq t \end{cases} \quad (3)$$

초기조건을  $w(r, 0) = w_t(r, 0) = 0$ 로 나타내면 식 (2)의 해<sup>(9)</sup>는 다음과 같이 된다.

$$w(r, t) = \frac{Aa}{2\pi D} \int_0^\infty \frac{J_0(x)}{x} \cdot \frac{\frac{\pi}{T} \sin \frac{ax^2}{r^2} t - \frac{ax^2}{r^2} \sin \frac{\pi t}{T}}{\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 - \left(\frac{ax^2}{r^2}\right)^2} dx, \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

$$w(r, t) = \frac{Aa}{DT} \int_0^\infty \frac{J_0(x)}{x} \cdot \frac{\sin \left\{ \frac{ax^2}{r^2} \left( t - \frac{T}{2} \right) \right\} \cdot \cos \left( \frac{ax^2}{r^2} \frac{T}{2} \right)}{\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 - \left(\frac{ax^2}{r^2}\right)^2} dx, \quad T \leq t \quad (5)$$

위 식에서 상수  $A$ 는  $\int_0^T F(t) dt = I_0$ 로부터 결정되며,  $T$ 와  $I_0$ 는 실험으로부터 구해진다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서의 실험장치는 펄스레이저를 이용한 이중노출 홀로그래픽 간섭계의 광학계와 충격하중에 의해 발생한 탄성파의 시간적 변화에 따라 펄스레이저를 발진시키기 위한 펄스레이저 재동장치(trigger system), 그리고 평판에 충격하중을 발생시키기 위한 충격하중장치(impact loading system)로 구성된다. 펄스레이저를 이용한 이중노출 홀로그래피법은 레이저 광을 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)으로 이용하여 물체가 정지하고 있을 때와 진동하고 있을 때에 홀로그램 건판(hologram plate)을 2번 노출시키면 홀로그램에는 물체의 2가지 상태에서의 물체광이 서로 간섭하여 진동진폭에 대응한 간섭 패턴이 기록된다. 이 홀로그램을 재생(reconstruction)하면 진동진폭에 대한 간섭무늬가 얻어지는데 이러한 간섭무늬로부터 진동체의 임의의 위치에서의 진폭을 아래의 식에 의해 계산할 수 있다.

$$a_n(x, y) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{n}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}, \quad n=1, 3, 5, \dots \quad (6)$$

Fig. 1은 실험장치도를 나타낸다. 루비펄스레이저로부터 발진된 레이저 광은 광분할기(beam splitter)에 의해서 2개의 광으로 나누어지는데, 그 중의 하나는 평판에 입사되는 물체광으로 이용되고 다른 하나는 홀로그램 평면상에서 평판으로부터 반사된 물체광과 간섭을 일으키기 위한 참조광으로 이용된다. 물체광과 참조광은 각각 볼록렌즈를 통과함으로써 확산된다. 또한 충격하중에 의해 평판에 발생된 탄성파의 시간에 따른 전파형태를 관찰하기 위해 시간지연회로(time delay circuit)와 펄스발생기(pulse generator)로 이루어지는 펄스레이저 재동장치를 구성하였다. 본 실험에서 사용한 펄

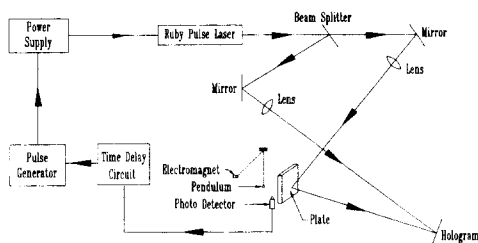


Fig. 1 Experimental setup

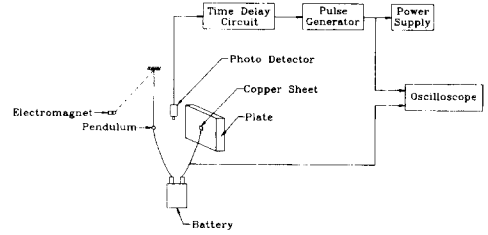


Fig. 2 Schematic diagram of impact loading system

스레이저는 전원공급장치(power supply)의 발진버튼(fire button)을 눌러 주면 10볼트(V)의 펄스신호가 발생되는데 이 순간을 기준으로 1 msec 후에 레이저 광이 발진된다. 그러므로 추(pendulum)가 낙하하여 평판과 충돌하기 전의 위치에 광검출기(photo detector)를 설치하여 광검출기가 추를 검출하는 순간을 기준으로 시간지연회로를 거쳐 펄스발생기에서 10볼트의 펄스신호가 발생되도록 하였는데, 펄스신호의 발생 순간과 추와 평판이 충돌하는 순간과의 시간차가 1 msec가 되어야 한다. 이를 위해서 Fig. 2와 같이 평판과 추가 충돌하는 부분에 얇은 구리판(copper sheet)을 부착하여 추와 전지(battery) 그리고 구리판으로 이루어지는 폐회로를 구성하였는데, 추와 평판이 부딪히는 순간에 발생하는 폐회로의 신호와 펄스발생기에서 발생하는 펄스신호와의 시간 차이를 오실로스코프를 이용해 측정하였다. 그리하여 펄스 발생기의 펄스 신호가 폐회로의 신호보다 1 msec 앞서도록 시간지연회로의 초기값을 변화시켜 줌으로써 충돌순간과 펄스발생기의 펄스신호 발생 순간의 시간차가 1 msec가 되도록 하였다. 이러한 시간지연회로의 초기값을 기준으로 관찰하고자 하는 순간의 시간값을 시간지연회로에 설정함으로써 충격발생 후의 시간에 따른 탄성파의 전파형태를 관찰할 수가 있다. 그리고 폐회로에서 발생하는 신호의 시간폭을 오실로스코프를 이용해 측정함으로써 평판에 가해지는 충격하중의 시간폭(T)을 구하였다. 또한, 평판의 충격은 일정한 높이에 고정되어 있는 전자석으로부터 추를 낙하시켜 사각 평판의 중앙에 법선방향으로 하중이 가해지도록 구성하였는데, 평판의 크기는 가로 250 mm, 세로 250 mm이고 두께는 각각 3 mm(알루미늄 평판)와 2 mm(에폭시 복합적층판)이다. 그리고 추는 직경 6.3 mm, 질량 1.02 g의 강구(steel sphere)를 이용하였다.

충격실험은 가장자리가 모두 고정된 등방성 재질

(알루미늄 평판)과 이방성 재질(에폭시 복합적층판 : epoxy composite laminates)의 2가지 종류의 사각 평판에 대해서 수행함으로써 재질에 따른 탄성파의 전파 특성을 해석하였다. 그리고 알루미늄 평판의 하단 가장자리만 고정단으로 하고 나머지 가장자리는 모두 자유단으로 구성하여 경계 조건에 따른 반사파의 거동 특성을 비교·분석하였다. 또한 평판내의 한 지점을 평판에 대해 법선방향으로 지지하고 또 다른 한 지점에는 직경 7 mm, 깊이 1.5 mm의 구멍을 형성하여 탄성파의 전파에 있어서 지지점과 구멍의 영향을 분석하였다.

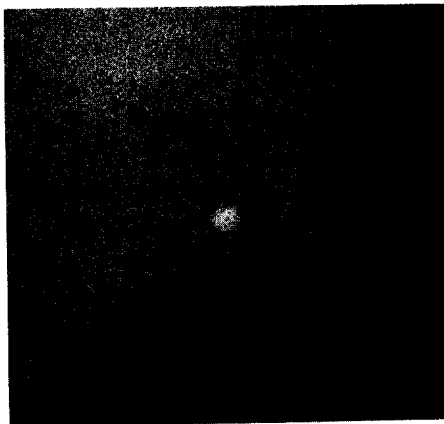
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 등방성 재질 평판의 탄성파 전파특성

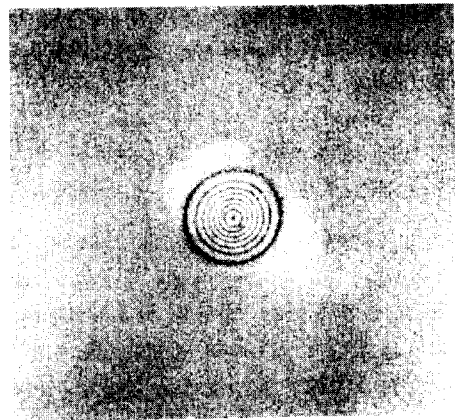
Fig. 3은 등방성 재질인 알루미늄 평판의 충격

실험 결과를 나타내는데 가장자리가 모두 고정된 사각 평판의 시간에 따른 탄성파의 전파형태를 보여준다. Fig. 3의 (a)~(l)은 충격후 각각 5  $\mu\text{sec}$ , 30  $\mu\text{sec}$ , 60  $\mu\text{sec}$ , 90  $\mu\text{sec}$ , 130  $\mu\text{sec}$ , 170  $\mu\text{sec}$ , 200  $\mu\text{sec}$ , 250  $\mu\text{sec}$ , 300  $\mu\text{sec}$ , 500  $\mu\text{sec}$ , 1, 500  $\mu\text{sec}$ , 2, 500  $\mu\text{sec}$  순간의 탄성파의 전파상태이다.

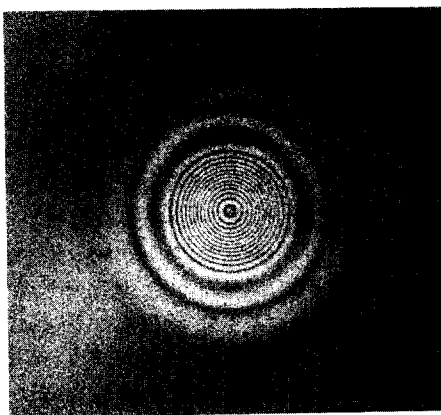
Fig. 3(a)에서는 충격지점인 평판의 중앙부분에 하얀 간섭무늬가 형성되어 있는데 충격 초기의 횡변위의 생성을 보여준다. Fig. 3의 (b)~(d)에서는 충격후 시간이 경과함에 따라 진폭에 대응한 검은 간섭무늬의 수가 증가하고 있는데 이는 충격지점을 중심으로 동심원의 형태로 탄성파가 퍼져 나가 탄성파의 전파범위가 점점 넓어지고 있음을 나타낸다. Fig. 3(e)에서는 평판의 중앙을 중심으로 형성된 탄성파가 평판의 가장자리까지 도달되어 있음을 볼 수 있다. 알루미늄 평판에 있어서 이론적인 전



(a) 5  $\mu\text{sec}$



(b) 30  $\mu\text{sec}$

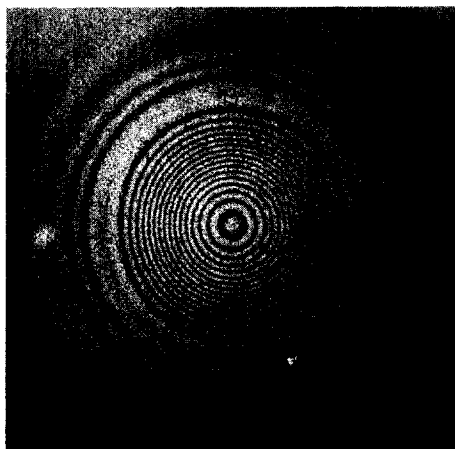


(c) 60  $\mu\text{sec}$

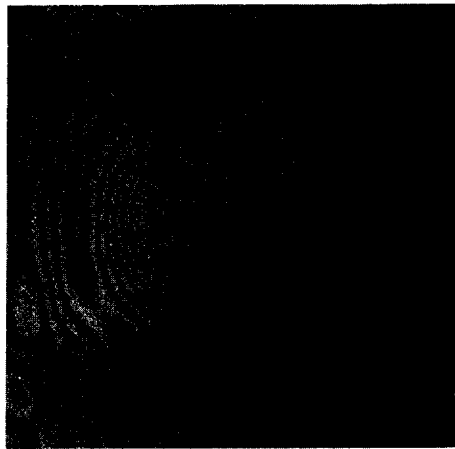


(d) 90  $\mu\text{sec}$

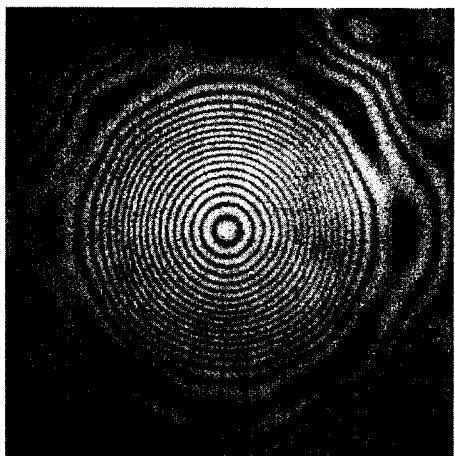
Fig. 3 Continued



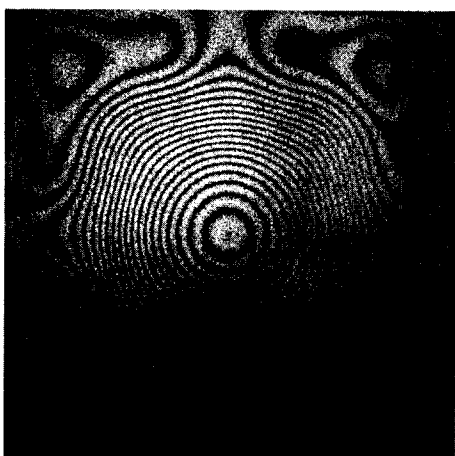
(e) 130  $\mu$ sec



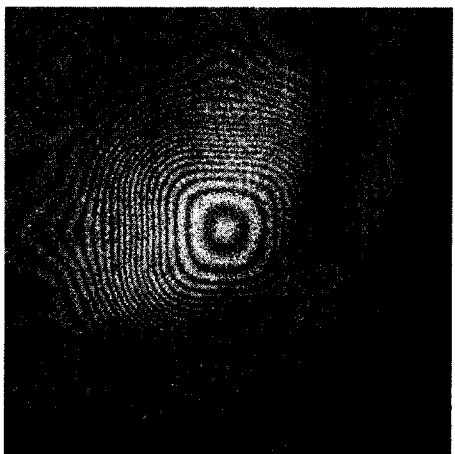
(f) 170  $\mu$ sec



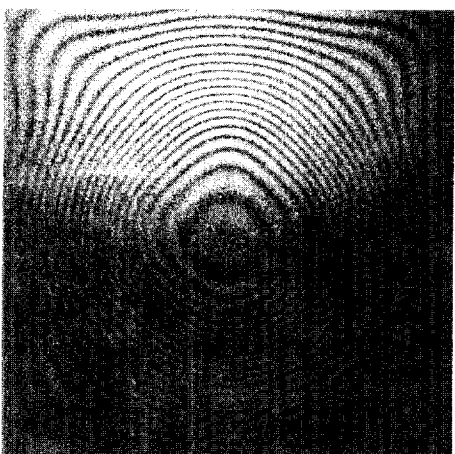
(g) 200  $\mu$ sec



(h) 250  $\mu$ sec



(i) 300  $\mu$ sec



(j) 500  $\mu$ sec

Fig. 3 Continued

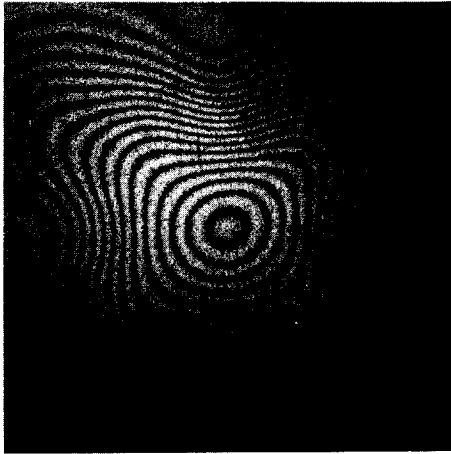
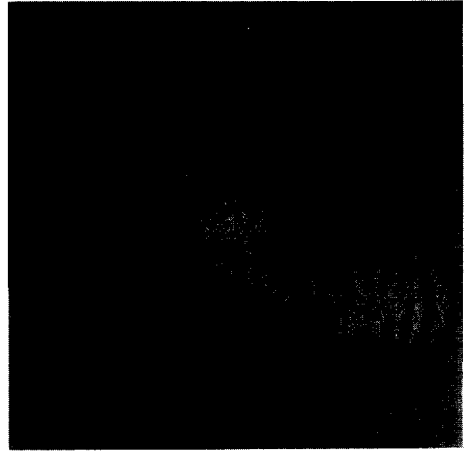
(k) 1,500  $\mu\text{sec}$ (l) 2,500  $\mu\text{sec}$ 

Fig. 3 Elastic wave propagation of aluminum plate by impact load (boundary conditions: C-C-C-C)

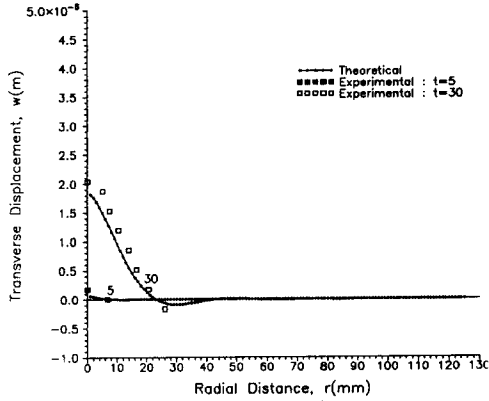
파속도 ( $v$ )는  $v = \sqrt{E/\rho(1-\nu^2)}$  ( $E=70 \text{ GPa}$ ,  $\rho=2,700 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu=0.33$ )로부터  $v=5.394 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ 가 되므로, 이론적으로는 충격후 약  $23 \mu\text{sec}$ 가 지나면 평판의 가장자리까지 탄성파가 전파할 것이나 실험적으로는 약  $100 \mu\text{sec}$  후에 가장자리에 도달한 탄성파의 간섭무늬를 관찰할 수가 있었다. 그리하여 실험적으로는 전파속도가 약  $1.25 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ 가 된다. 이와 같이 전파속도에 있어서 실험과 이론이 상당한 차이를 나타내는 이유는, 평판의 중심으로부터 반경방향을 따라 외곽으로 갈수록 평판의 횡변위가 매우 미소해지기 때문에 그 미소 진폭을 홀로그래픽 간섭계에서는 간섭무늬로 관찰할 수 없기 때문이다. 즉, 평판의 횡변위가 레이저 파장( $\lambda$ )의  $\lambda/4$ 보다도 작으면 홀로그래픽 간섭계에서는 그 진폭에 대응한 간섭무늬가 형성되지 않기 때문에  $100 \mu\text{sec}$  전에도 매우 작은 진폭의 탄성파가 가장자리에 이미 도달되어 있었겠지만 그 미소진폭에 해당하는 간섭무늬를 눈으로 관찰할 수 없기 때문이다. Fig. 3의 (f)~(i)에서는 평판의 중심으로부터 형성되어 전파하여 간 탄성파가 평판의 가장자리와 모서리로부터 반사된 반사파와 서로 혼합되어 있는 형태를 보인다. 그리고 평판의 모서리부분에서 진동형태의 다양한 변화를 관찰할 수 있다. Fig. 3의 (j)~(l)에서는 충격하중으로 인한 탄성파가 점점 소멸되어 가는 과정을 관찰할 수 있는데 평판 모서리로부터의 반사파의 영향은 거의 없어지고 가장자리로부터의 반사파의 영향을 다소 많이 받고 있는 상태를 보인다. 그리고 평판 중앙의 동심원 형태의

간섭무늬가 원의 형태를 잃으면서 진동은 점점 소멸되어 감을 알 수 있다.

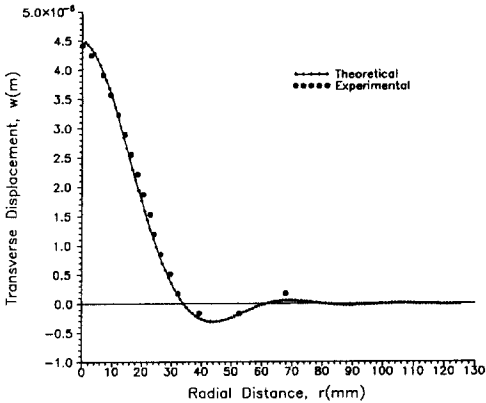
Fig. 4는 Fig. 3의 (a)~(d)에 있어서 평판의 중앙을 중심으로 반경방향에 대한 횡변위의 변화를 나타내는데 이론적 해석결과와 비교하고 있다. 실험으로부터 구한 횡변위분포와 이론적으로 구한 횡변위분포곡선은 매우 좋은 일치성을 보이는데 이로부터 본 실험의 정확성을 검증할 수 있다. 이론적인 횡변위분포 곡선은 식 (4)와 식 (5)로부터 구하였는데, 본 실험에서 충격하중이 가해지는 시간폭 ( $T$ )은  $70 \mu\text{sec}$ 였고 평판에 전달된 충격량( $I_0$ )은  $0.00143 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{sec}$ 였다. 실험으로부터 구한 횡변위분포는 식 (6)으로부터 구하였는데, 홀로그래픽 간섭계에서 간섭무늬는 레이저 파장의  $\lambda/4$ 에 해당하는 변위차를 간격으로 검은 간섭무늬와 하얀 간섭무늬가 차례로 생성되므로 이웃하는 검은 간섭무늬에 대한 변위값은 레이저 파장의  $\lambda/2$ 만큼의 차이를 나타내게 된다. Fig. 3의 (a)~(d)는 탄성파가 평판의 가장자리에 도달하기 전까지의 상태를 나타내는데 가장자리로부터의 반사파의 영향은 거의 없는 상태이다. 그리하여 전체적인 간섭무늬가 평판의 중앙을 중심으로 동심원 형태를 보이는데, 검은 간섭무늬는 평판의 중앙으로부터 반경방향을 따라 일정 간격의 촘촘한 부분을 나타내다가 그 간격이 다소 넓어지는 변화를 나타낸다. 이와 같이 간섭무늬의 간격이 넓어지는 부분에서 횡변위의 양(+)과 음(-)이 바뀌게 되고 더 나아가서 다시 그 간격이 넓어지는 부분에서 횡변위의 양(+)과 음(-)이 또

바뀌게 된다. 본 실험에서 사용한 평판의 기하학적 조건으로부터 평판의 중앙을 횡변위분포곡선의 양 (+)의 최대점으로 생각하고, 중앙을 기점으로 각

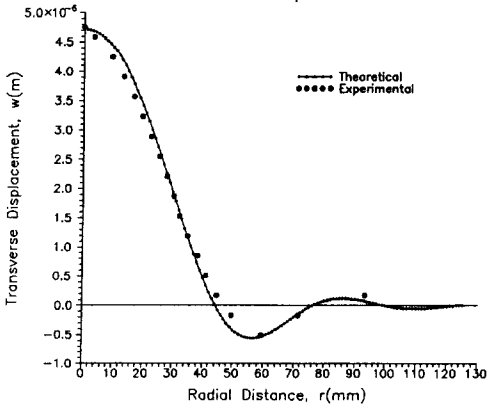
간섭무늬에 해당하는 변위값을 식 (6)으로부터 산출하면 결국 평판의 반경방향에 따른 횡변위 분포가 구해진다. Fig. 4를 보면, 평판의 중심에서 반경방향으로 거리가 멀어짐에 따라 횡변위분포곡선의 파장이 점점 작아짐을 알 수 있다.



(a)  $t=5 \mu\text{sec}$  and  $t=30 \mu\text{sec}$



(b)  $t=60 \mu\text{sec}$



(c)  $t=90 \mu\text{sec}$

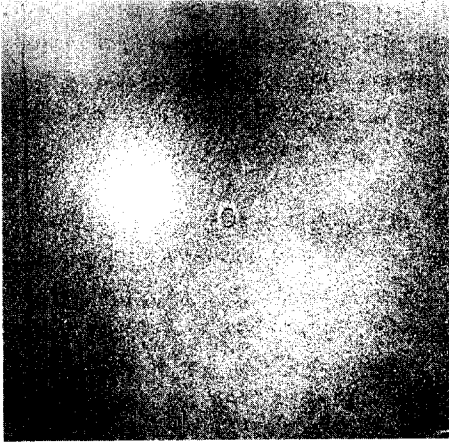
**Fig. 4** Transverse displacement curves of aluminum plate obtained from experiment and theory for times  $t=5 \mu\text{sec}$ ,  $30 \mu\text{sec}$ ,  $60 \mu\text{sec}$ ,  $90 \mu\text{sec}$  after impact (boundary conditions : C-C-C-C)

#### 4.2 이방성 재질 평판의 탄성과 전파특성

Fig. 5는 이방성 재질인 에폭시 복합적층판( $E_1=138 \text{ Gpa}$ ,  $E_2=10 \text{ Gpa}$ ,  $\rho=1,550 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu=0.21$ )의 충격실험 결과를 나타내는데 가장자리가 모두 고정된 사각평판의 시간에 따른 탄성파의 전파 형태를 보여준다. Fig. 5의 (a)~(l)은 충격후 각각  $10 \mu\text{sec}$ ,  $30 \mu\text{sec}$ ,  $60 \mu\text{sec}$ ,  $90 \mu\text{sec}$ ,  $120 \mu\text{sec}$ ,  $150 \mu\text{sec}$ ,  $180 \mu\text{sec}$ ,  $210 \mu\text{sec}$ ,  $240 \mu\text{sec}$ ,  $270 \mu\text{sec}$ ,  $300 \mu\text{sec}$ ,  $450 \mu\text{sec}$  순간의 탄성파의 전파상태이다.

Fig. 5(a)에서는 충격하중이 가해진 평판의 중앙을 중심으로 타원형태의 간섭무늬가 형성되어 있는데 충격후 시간이 점점 더 경과함에 따라 그 타원 형태는 더욱 확실해진다. 4.1절의 알루미늄 평판과 같은 등방성 재질에서는 가로방향과 세로방향의 탄성계수가 동일하여 각 방향에 따른 탄성파의 전파속도가 일정하기 때문에 탄성파의 전파가 동심원의 형태를 보이는데 반해, 에폭시 복합적층판과 같은 이방성 재질에서는 탄성파의 전파가 타원의 형태를 보이는데 이러한 것은 이방성 재질의 평판에서는 가로방향과 세로방향의 탄성계수가 서로 달라서 가로 방향과 세로방향의 탄성파의 전파속도가 서로 다르기 때문이다. 따라서 이러한 탄성파의 전파특성으로부터 그 재질의 탄성계수의 정성적인 평가가 가능할 것이다. Fig. 5의 (a)~(d)는 충격하중으로 인해 형성된 탄성파가 아직 가장자리까지는 도달하지 않은 상태이고 Fig. 5(e)는 가로방향으로는 탄성파가 아직 가장자리에 도달하지 않았으나 세로방향으로는 가장자리까지 거의 도달하고 있는 상태이다. 그리고 Fig. 5의 (f)~(h)는 가로 방향으로는 탄성파가 가장자리에 도달하고 있으나 세로방향으로는 가장자리로부터의 반사파가 형성되어 진행과와 서로 혼합되고 있는 상태이다. Fig. 5의 (i)~(l)은 가로방향의 가장자리로부터의 반사파도 형성되어 평판의 4개의 가장자리로부터 형성된 반사파와 평판의 중앙으로부터 진행되는 진행과가 서로 혼합되어 매우 복잡한 탄성파의 형성상태를 보인다.

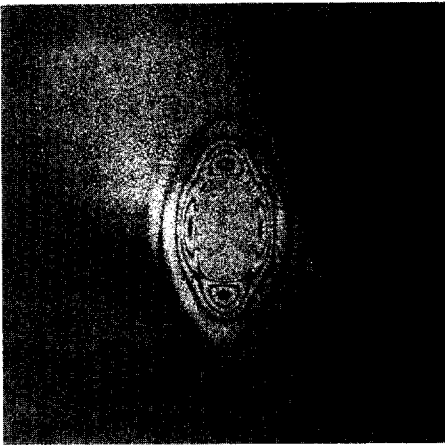
Fig. 6은 Fig. 5(d)에 대해 평판의 중앙으로부터



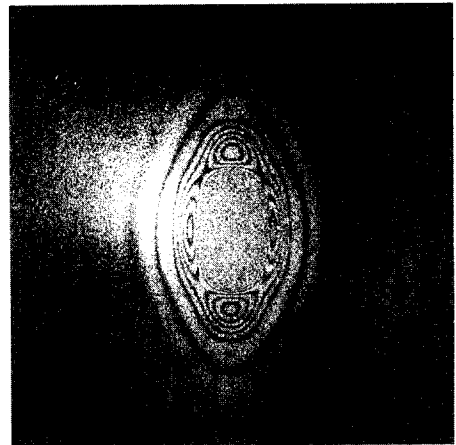
(a) 10  $\mu$ sec



(b) 30  $\mu$ sec



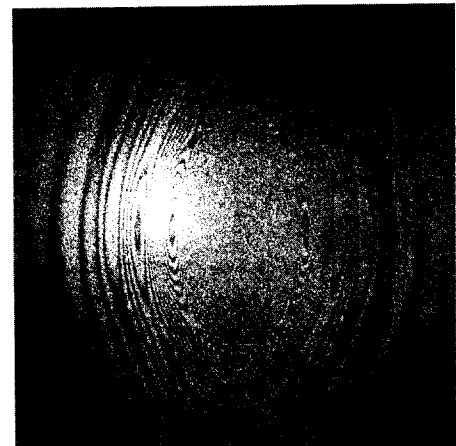
(c) 60  $\mu$ sec



(d) 90  $\mu$ sec



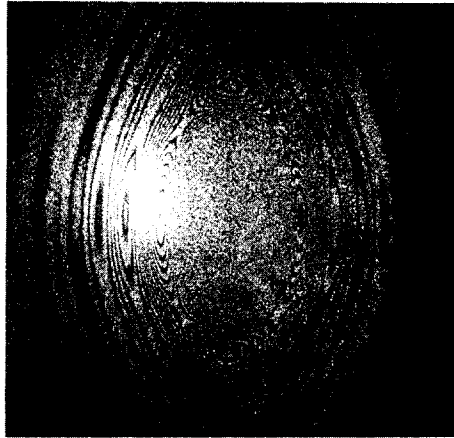
(e) 120  $\mu$ sec



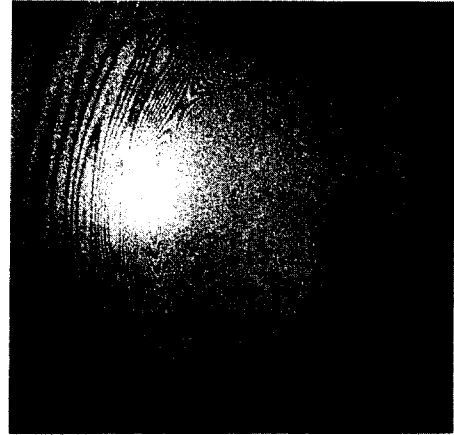
(f) 150  $\mu$ sec

Fig.5 Continued

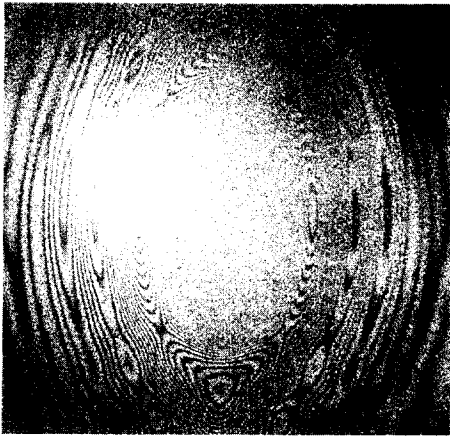




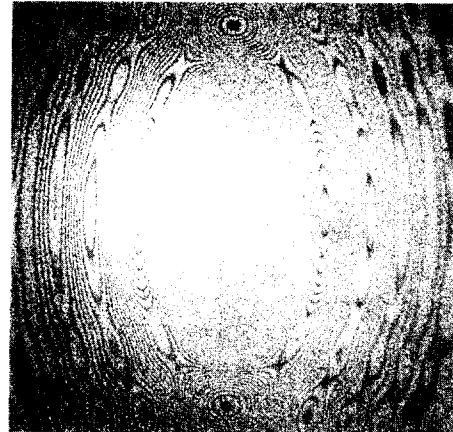
(g) 180  $\mu$ sec



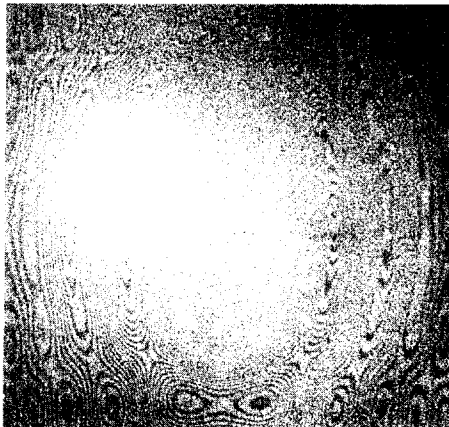
(h) 210  $\mu$ sec



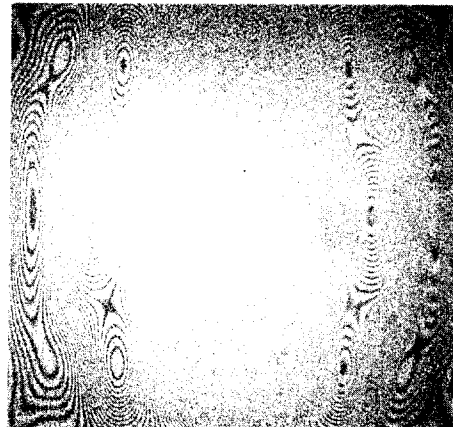
(i) 240  $\mu$ sec



(j) 270  $\mu$ sec

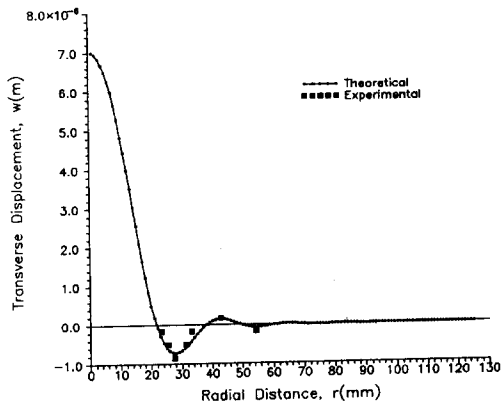


(k) 300  $\mu$ sec

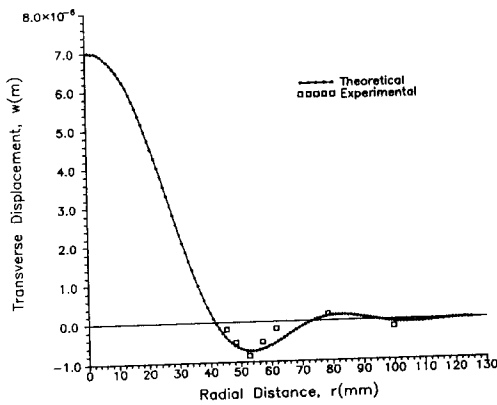


(l) 450  $\mu$ sec

**Fig. 5** Elastic wave propagation of epoxy composite laminates by impact load (boundary conditions : C-C-C-C)



(a) Along the minor axis



(b) Along the major axis

**Fig. 6** Transverse displacement curves of epoxy composite laminates obtained from experiment and theory for time  $t = 90 \mu\text{sec}$  after impact (boundary conditions : C-C-C-C)

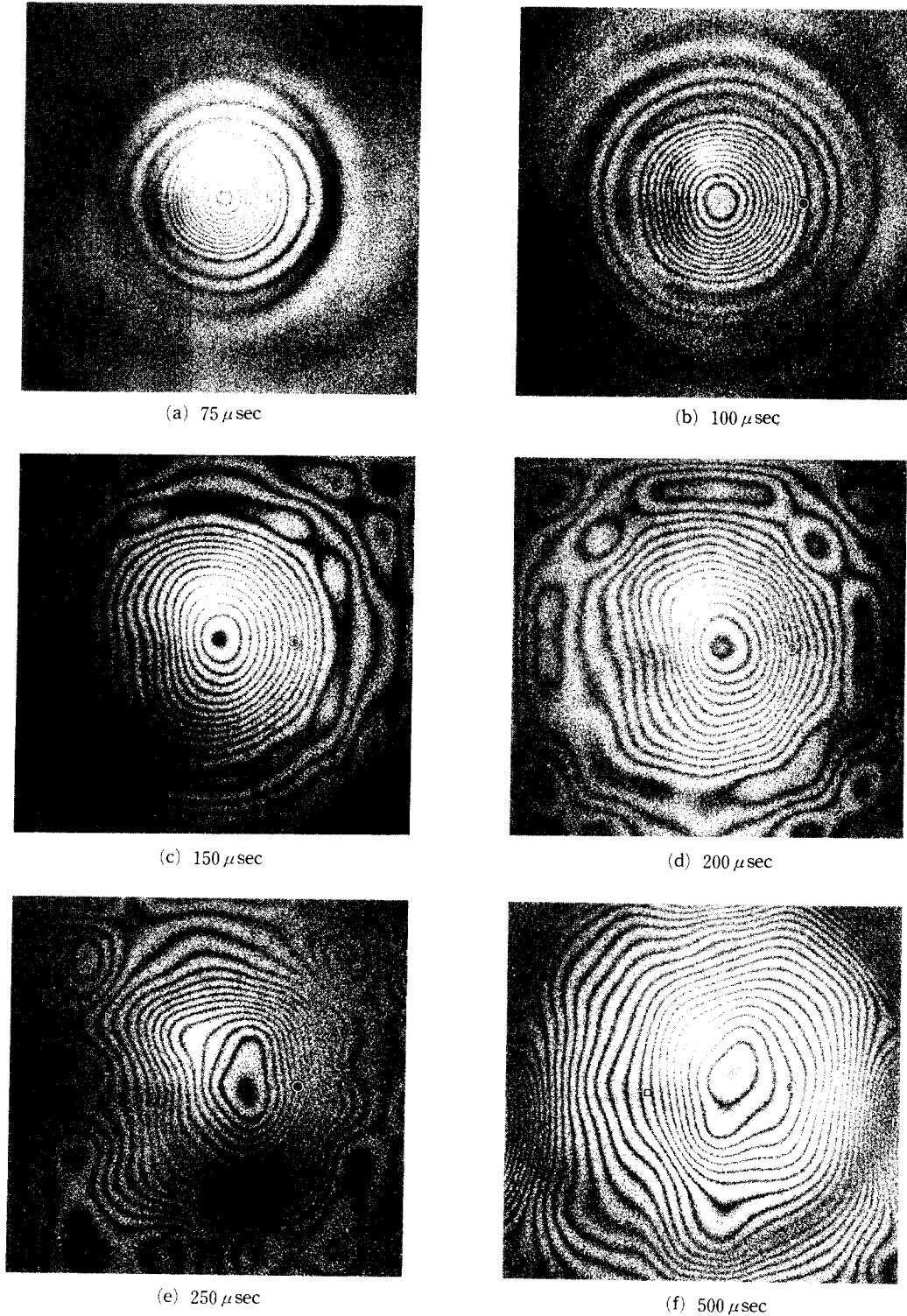
반경 방향에 따른 횡변위의 변화를 실험과 이론으로부터 구하여 나타내고 있다. Fig. 5(d)에서는 타원의 형태로 탄성파가 전파하고 있으므로, Fig. 6(a)는 타원의 단축(minor axis)에 대한 횡변위 분포곡선이고 Fig. 6(b)는 장축(major axis)에 대한 횡변위 분포곡선이다. 본 실험에서 충격하중이 가해지는 시간폭( $T$ )은  $60 \mu\text{sec}$ 였다. 횡변위의 실험치는 4.1절에서와 동일한 방법으로 구하였는데 평판의 가운데 부분은 간섭무늬가 너무 촘촘하게 형성되어 실험치를 구하기가 어려우므로 눈으로 간섭무늬를 식별할 수 있는 부분에 대해서 그 변위값들을 나타내었다. 그리고 이론적인 횡변위분포곡선은 타원의 단축방향과 장축방향을 따라서는 재질이 직향성(orthotropic)이라고 가정하여 식 (5)로부터

구하였다. 실험치와 이론치가 서로 유사한 크기를 갖도록 변위값의 크기를 조정하여 방향에 따라서 횡변위분포곡선이 변화하는 특성만을 살펴보았다. 탄성계수가 작은 타원의 단축방향에 있어서 평판 중앙부의 횡변위분포곡선의 기울기가 훨씬 크게 됨을 알 수 있다.

#### 4.3 경계조건에 따른 반사파의 거동특성 및 지지점과 구멍의 영향

Fig. 7은 알루미늄 재질의 사각평판의 하단 가장자리만 고정단으로 하고, 나머지 가장자리는 모두 자유단으로 구성하였는데 경계조건에 따른 반사파의 거동특성을 비교·분석하였다. 그리고 평판의 중심으로부터 왼쪽으로 35 mm, 아래로 5 mm 위치에 평판에 대해 법선방향으로 지지점을 형성하고, 평판의 중심으로부터 오른쪽으로 50 mm 위치에 직경 7mm, 깊이 1.5 mm의 구멍을 형성하여 탄성파의 전파에 있어서 평판내의 지지점과 구멍의 영향을 분석하였다. Fig. 7의 (a)~(f)는 충격후 각각  $75 \mu\text{sec}$ ,  $100 \mu\text{sec}$ ,  $150 \mu\text{sec}$ ,  $200 \mu\text{sec}$ ,  $250 \mu\text{sec}$ ,  $500 \mu\text{sec}$  순간의 탄성파의 전파상태이다.

Fig. 7의 (a)~(b)는 평판의 중앙으로부터 형성된 탄성파가 평판의 가장자리까지 도달하지 않은 상태에서 탄성파의 전파형태는 Fig. 3의 (a)~(d)와 거의 동일하다. 즉, 탄성파가 평판의 가장자리에 도달하기 전에는 평판 가장자리의 경계조건에 관계없이 탄성파의 전파형태는 동일함을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서는 평판의 왼쪽 지지점에서 동심원형태가 약간 일그러지는 징후가 관찰되나 평판 오른쪽의 구멍부분에서는 구멍의 영향이 거의 관찰되지 않는다. Fig. 7(b)에서는 평판 왼쪽의 지지점에서 동심원형태가 훨씬 더 분명하게 일그러지는데 그 지지점을 중심으로 탄성파가 반사되어 평판의 중심으로부터 전파하는 진행파와 혼합되고 있다. 그리고 평판 오른쪽의 구멍부분에서는 구멍에 걸쳐 있는 탄성파가 약간 안쪽으로 굽어 있음을 보인다. 이러한 특성들은 구조물의 결함부를 검사하기 위한 비파괴 검사에 응용될 수 있을 것이다. Fig. 7의 (c)~(e)에서는 평판 가장자리의 경계조건에 따른 반사파의 거동특성을 비교할 수 있는데, 하단 고정단에서의 반사파의 거동은 Fig. 3의 (f)~(h)와 거의 동일하나 나머지 자유단에서는 상당히 다른 거동특성을 보인다. 즉, 가장자리가 자유단인 경우에는 가장자리로부터 형성되는 반사파가 가장자리가



**Fig. 7** Elastic wave propagation of aluminum plate by impact load (boundary conditions : C-F-F -F,  $\bigcirc$  : a hole of 7mm in diameter and of 1.5 mm depth,  $\square$  : supporting position)

고정단인 경우에 비해 훨씬 활발하게 발달한다. 그리고 Fig. 7의 (c)~(e)에서는 평판 왼쪽의 지지점을 중심으로 형성된 반사파가 점점 더 평판의 중심 쪽으로 영향을 미치고 있음을 보인다. Fig. 7(f)는 탄성파가 소멸되어 가는 상태를 보인다.

## 5. 결 론

루비펄레이저를 이용한 이중노출 홀로그래픽 시스템을 구성하여 평판의 충격하중에 따른 탄성파의 전파특성을 시간적 변화에 따라 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 펄레이저를 이용한 이중노출 홀로그래픽 시스템은 충격하중에 의한 탄성파의 전파와 같이 매우 순간적으로 변화하는 물리적인 현상을 관찰하고 해석하는 데에 있어서 유용하게 이용될 수 있으며, 구조물 내부의 결함검사 등을 위한 비파괴검사에도 응용될 수 있다.

(2) 등방성 재료의 평판에 있어서 충격하중에 의한 탄성파는 평판의 충격지점을 중심으로 동심원의 형태를 그리면서 외곽으로 전파되는데 가장자리가 모두 고정된 평판의 경우 모서리부분에서 반사되는 반사파의 영향이 없어지고 동심원 형태를 잃으면서 평판에 발생된 탄성파는 점점 소멸되어 간다.

(3) 평판의 횡변위분포는 실험과 이론이 매우 좋은 일치성을 보였는데, 반경방향을 따라 외곽으로 갈수록 횡변위 분포곡선의 파장은 점점 작아진다.

(4) 평판의 가장자리가 자유단인 경우에는 고정단인 경우에 비해 가장자리로부터 형성되는 반사파가 매우 활발하게 발달한다.

(5) 이방성 재료의 평판에 있어서는 타원의 형태를 그리면서 충격하중으로 인한 탄성파가 외곽으로 전파하는데 이러한 특성으로부터 그 재료의 탄성계수를 정성적으로 평가할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME95-D-02)에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*,

John Wiley and Sons, Newyork.

- (2) Powell, R. L. and Stetson, K. A., 1965, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 55, No. 12, pp. 1593~1598.
- (3) Monahan, M. A. and Bromley, K., 1968, "Vibration Analysis by Holographic Interferometry," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 44, No. 5, pp. 1225~1231.
- (4) Felske, A. and Happe, A., 1978, "Vibration Analysis by Double Pulsed Laser Holography," *Society of Automotive Engineers*, No. 770030, pp. 88~104.
- (5) Gottenberg, W. G., 1968, "Some Applications of Holographic Interferometry," *Experimental Mechanics*, Vol. 8, No. 9, pp. 405~410.
- (6) Aprahamian, R., Evensen, D. A., Mixson, J. S. and Wright, J. L., 1971, "Application of Pulsed Holographic Interferometry to the Measurement of Propagating Transverse Waves in Beams," *Experimental Mechanics*, Vol. 11, No. 7, pp. 309~314.
- (7) Aprahamian, R., Evensen, D. A., Mixson, J. S. and Jacoby, J. L., 1971, "Holographic Study of Propagating Transverse Waves in Plates," *Experimental Mechanics*, Vol. 11, pp. 357~362.
- (8) Lindgren, L. E. and Molin, N.E., 1989, "Transient Bending Waves in Anisotropic Plates Studied by Hologram Interferometry," *Experimental Mechanics*, Vol. 29, pp. 409~413.
- (9) Gustavsson, H. and Molin, N. E., 1989, "Transient Bending Waves in Plates Studied by Hologram Interferometry," *Experimental Mechanics*, Vol. 29, pp. 378~387.
- (10) Molin, N.E. and Jansson, E.V., 1989, "Transient Wave Propagation in Wooden Plates for Musical Instruments," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 85, No. 5, pp. 2179~2184.
- (11) Molin, N.E. and Jansson, E.V., 1990, "Transient Wave Response of the Violin Body," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 88, No. 5, pp. 2479~2481.
- (12) Olofsson, K. and Lindgren, L. E., 1993, "Holo-

graphic Interferometry Measurements of Transient Bending Waves in Tubes and Rings," *Experimental Mechanics*, pp. 308~313.

(13) Meirovitch, L., 1967, *Analytical Methods in Vibrations*, pp. 375~381, The Macmillan Company.