

## 엑시머 레이저 펄스에 의해 여기된 광음향신호 분석

### An Analysis of Photoacoustic Signals Excited by Excimer Pulsed Laser

李 鍾 昊\*, 田 啓 石\*\*  
(Chong Ho Yi\*, Kye Suk Jun\*\*)

#### 요 약

본 논문에서 XeF, KrF 엑시머레이저 펄스에 의해 금속에서 여기되는 광음향신호를 PZT 변환기로 검출하여 광음향 변환 매카니즘과 지향성패턴을 분석하였다. 고체에서 레이저펄스에 의한 광음향 변환 매카니즘은 조사되는 레이저의 에너지밀도에 따라 열탄성영역과 플라즈마영역으로 나뉘며 두영역에서 서로 다른 양상을 보인다. 열탄성영역에서는 표면과 수평방향의 변위가 크고 플라즈마영역에서는 반사력에 의해 수직방향의 변위가 크게 나타나는 것으로 모델링되며 이를 중심파장 480nm의 XeF엑시머레이저와 248nm의 KrF엑시머레이저를 사용하여 실험적으로 증명하였다. 또한 열탄성영역에서 최대종파에너지는 60°, 최대횡파에너지는 30°부근에서 나타났고 플라즈마영역에서는 최대 종파와 횡파에너지가 각각 0°, 30°부근에서 나타나는 지향특성을 보였다.

#### ABSTRACT

In this paper, the PA(PhotoAcoustic) signals excited in metals by XeF, KrF excimer laser pulse were detected by a PZT transducer, and its transforming mechanism and directivity patterns were analysed. The laser energy density in irradiation spot divides the PA transforming mechanism to be classified into thermoelastic and plasma regime, and the transforming mechanisms in two regimes are different from each other. Based on theoretical model, it is predicted that shear wave is greater than longitudinal in the thermoelastic regime and longitudinal is greater than shear wave by reaction force in plasma regime. These predictions were verified through experiments by using of the XeF excimer pulsed laser of 480nm center-wavelength and the KrF excimer pulsed laser of 248nm. Also, for its directivity pattern, an arrival angle of the maximum longitudinal energy was around 60° and maximum shear energy was around 30° in the thermoelastic regime, and an arrival angle of maximum longitudinal energy was shown on normal to the surface and maximum shear energy was represented in about 30° in plasma regime.

#### I. 서 론

최근 반도체 및 재료산업분야에서 현미경기술과 비파괴검사기술의 필요성이 증가되고 우주, 항공 및 원자력 산업등에서 안전진단을 위한 정밀측정기술이 크게 대두되고있다. 광음향기술은 이와같은 분야에서 물질의 광, 열, 탄성특성을 포함하므로 많은 정보를 얻을 수 있는 정밀측정 주요기술 중 하나이다.

본 논문에서는 열탄성모우드에 의한 광음향신호를 연구하였고 이 신호는 레이저펄스와 같이 짧은 존속시간동안에 많은 에너지가 포함된 광원을 사용할때 발생된다. 이 모우드에서는 레이저펄스의 조사지점에서 열탄성현

상에 의해 순간적으로 광음향변환이 이루어지고 이 지점이 음향에너지를 발진시키는 음향원이되며 이 음향원으로부터 종파와 횡파 및 표면파가 음향파의 전파형식과 동일하게 전파된다.

1963년 White[1]가 광음향원을 모델링한 이후로 1980년 Scruby[2], 1988년 Aussel[1]등은 펄스레이저에 의한 열탄성이론을 해석하였다. 또한 1980년 Wellman[1]등은 펄스레이저를 이용하여 비파괴검사에 응용하였고 1978년 Wickramasinghe[3]등은 펄스레이저를 사용하여 800MHz 대역의 광음향 현미경을 구성하는 등 현재에도 이 분야에 대한 많은 연구가 진행중이다.

본 논문에서는 레이저펄스에 의해 조사지점에서 변환되는 광음향신호의 변위 및 지향성패턴을 해석하고 실험에서 XeF, KrF 엑시머 레이저를 이용하여 알루미늄, 탄소강, 황동 및 스텐레스강에서 광음향변환되는 종파와

\*인하공업전문대학 조교수

\*\*경희대학교 공과대학 전자공학과 교수

접수일자: 1996년 8월 29일

황과를 열탄성영역과 플라즈마영역으로 나누어 검출하여 이론과 비교, 분석한다. 이와같은 실험을 통하여 레이저 펄스에 의해 여기되는 광음향신호의 특성을 실험적으로 분석하며 펄스레이저를 이용한 광음향 정밀측정기술에 대한 기본시스템을 개발하고 그 응용분야를 제시하고자 한다.

II. 광음향 신호검출 장치

펄스레이저에 의한 광음향신호를 분석하기 위해 광원으로서는 중심파장이 480nm인 XeF 엑시머 레이저(경희대학교 레이저공학연구소 제작)와 중심파장이 248nm인 KrF 엑시머레이저(러시아)를 사용하였으며 표 1에서는 엑시머레이저의 실험환경을 나타냈다.

표 1. 엑시머 레이저의 실험환경

레이저 실험환경	XeF엑시머 (XeF excimer)	KrF엑시머 (KrF excimer)
중심파장	480nm	248nm
반전력대역폭	70nm	17nm
펄스폭	39ns	17ns
조사에너지 밀도	15.3MW/cm <sup>2</sup> (1mmdia.spot)	352MW/cm <sup>2</sup> (1mmdia.spot)
사용영역	열탄성영역	플라즈마영역

그림 1에서는 알루미늄, 탄소강, 황동 및 스텐레스강에서 엑시머레이저 펄스에 의한 광음향 신호 검출장치를 나타냈다.

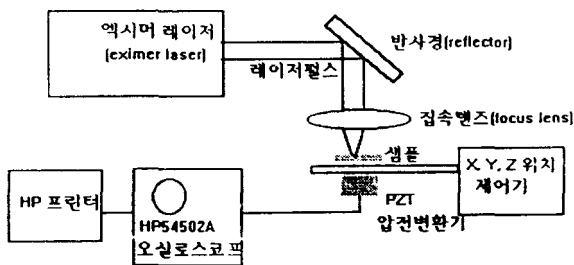


그림 1. 광음향신호 검출장치

그림 1에서 XeF, KrF 엑시머레이저로부터 발진된 펄스는 Ni 반사경(VS사, 영국)과 ZnSe 집속렌즈(VS사)에 의해 샘플표면으로 집속되며 매질에서 광음향변환된 신호는 제작한 PZT 변환기로 epicenter지점에서 검출되고 HP 54502A 디지털 오실로스코프로 관찰되며 프린트되었다. 검출소자로 사용된 PZT 변환기는 치수가 25mm × 12.5mm × 6mm이고 중심주파수가 800KHz이며 그림 2에서는 측정된 압전변환기의 임펄스응답과 주파수특성을 나타낸다.

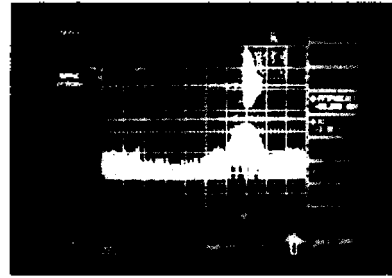


그림 2. PZT변환기의 임펄스응답 및 주파수 특성

III. 변위파형분석

레이저 빔의 형태를 원형이라고 놓으면 조사지점내에 매질 입자들의 열팽창으로 인하여 음향에너지가 발생되는 음향원을 원판형 음향원으로 나타낼 수 있다. 그림 3과 같이 레이저펄스 조사지점에서 매질입자의 순간적인 열팽창을 힘 쌍극자(force dipole) D<sub>11</sub>, D<sub>22</sub>, D<sub>33</sub>로 나타내면 이를 식(1)과 같이 놓을 수 있다.

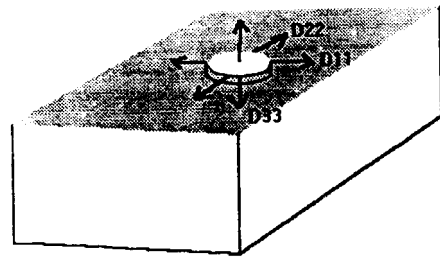


그림 3. 레이저 펄스에 의한 force dipole의 분포

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = B \cdot \delta V, \quad \delta V: \text{팽창된 부피}, B: \text{벌크계수.} \quad (1)$$

위와같은 상황에서 Sinclair[1, 2]는 레이저 펄스가 샘플 표면에 조사될때 epicenter지점에서 표면과 수직방향변위 u<sub>3</sub>를 Green함수를 이용하여 식(2)와 같이 모델링하였다.

$$u_3 = G_{3j,j}(h, t; 0, 0) D_{jj}, \quad jj = 11, 22, 33. \quad (2)$$

식(2)는 레이저 펄스의 조사점에 대해 epicenter지점에서 표면과 수직한 방향의 변위를 나타낸 것으로서 힘 쌍극자, D<sub>jj</sub>가 발생된 시간과 공간을 기준으로 하여 이 힘에 의해 시간 t후, 두께 h인 지점에서 발생된 축방향 변위를 Green 함수를 이용하여 나타낸 일반식이다. 식(2)로부터 레이저펄스에 의해 변환된 변위에 관한 일반식을 유도하면 식(3)과 같이 놓을 수 있다.

$$u_n(X, t) = \int_V c_{ijkl} S_{kl}^T(\xi, t) \cdot \frac{\partial G_{ni}}{\partial \xi_j} \cdot (X; \xi; t) dV(\xi) \quad (3)$$

$$u_3(t) = \frac{1}{6\pi\mu h^2} \frac{[X_1 + Y_1 t (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2}] (3\lambda + 2\mu) \delta VH(t-t_1)}{(\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + 1/2 \dot{t}_2^2)^{3/2} - t (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2} (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2)^{3/2} (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2}}$$

$$+ \frac{[X_2 + Y_2 t (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2}] (3\lambda + 2\mu) \delta VH(t-\dot{t}_2)}{(\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + 1/2 \dot{t}_2^2)^{3/2} - t (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2} (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2)^{3/2} (\dot{t}^2 - \dot{t}_1^2 + \dot{t}_2^2)^{1/2}} \quad (4)$$

여기서, n은 1, 2, 3이고  $G_n(X; \xi; t)$ 은  $t=0$  에서  $\xi$ 지점에 조사된 impulsive point force에 의해 시간 t 후, X 지점에서 발생한 n번째 변위성분에 의한 그린함수이다. 식(3)을 이용하여 두께 h인 지점에서 축방향 변위를 음향에너지 도달시간에 대해 유도하면 식(4)와같이 나타낼 수 있다. 식(4)에서,  $t_1$ : 종파도달시간,  $t_2$ : 횡파도달시간,  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$ : 종파 및 횡파도달시간( $t_1, t_2$ )에 관한 계수이다. X와 Y는 아래와 같이 정의된다.

$$X_1 = y(y+w)t_1^2 [5y^2 + (10u+9v)y^3 + (5u^2+18uv+4v^2)y^2 + uv(9u+8v)y + 4u^2v^2] - (2y+w)t_1^2 [2y^5 + 4(u+v)y^4 + 2(u^2+4uv+v^2)y^3 + 4uv(u+v)y^2 + 2u^2v^2y]$$

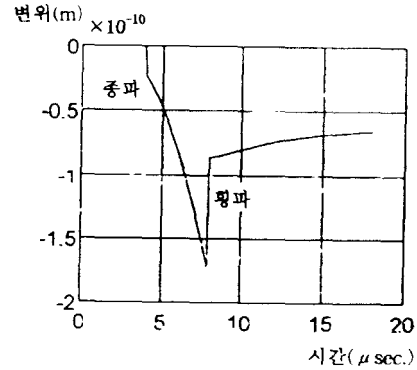
$$Y_1 = -y(y+w)t_1^2 [5y^3 + (7u+6v+2w)y^2 + (4wu+8uv+6wv-3w^2)y - 2vw^2 + 8uvw - uw^2] + (2y+w)t_1^2 [2y^4 + 2(u+v+2w)y^3 + 2(uv+2uw+2vw+w^2)y^2 + 2w(2uv+uw+vw)y + 2uvw^2]$$

여기서  $y = t^2 - t_1^2, u = t_1^2, v = t_2^2, w = t_2^2 * 1/2$ 이다.

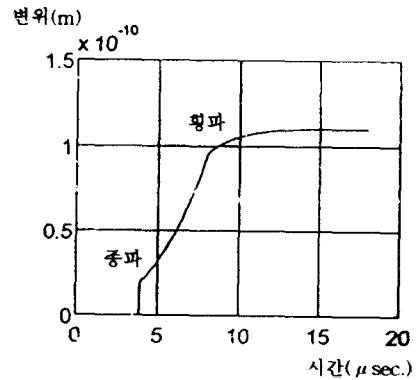
그림 4는 열탄성영역에서 레이저펄스에 의한 알루미늄 epicenter지점에서의 축방향변위를 시뮬레이션한것이고 그림 5는 플라즈마영역에서의 변위파형을 시뮬레이션한 것이다.

레이저 펄스에 의해 음향원이 형성되는 과정에서 레이저 에너지의 출력밀도 및 샘플의 광흡수율에 따라서 조사지점을 용해시키지 않고 열탄성현상을 유도하는 출력범위인 열탄성 영역(thermoelastic regime)과 표면이 용해(ablation)되는 레이저 출력범위인 플라즈마 영역(plasma regime)으로 나뉘는데 각 영역에서 광음향원의 형성이다른 양상을 나타낸다.

그림 4(a)의 열탄성영역에서 음향원(레이저펄스 조사지점)은 광흡수깊이에 의해 subsurface에 존재하며 이 지점에서 발생한 힘 쌍극자  $D_{33}$  성분중에 아래방향의 양성분과 표면에서 반사된 음성분이 짧은 시간지연 간격으로 서로 간섭하여 epicenter지점에서 종파의 변위가 음으로 나타나며 종파와 횡파의 전파속도 차 만큼 시간지연후에 횡파가 나타난다. 또한 음향원에서 표면과 평행한 방향의 힘 쌍극자 성분( $D_{11}, D_{22}$ )이 수직인 방향의 성분( $D_{33}$ )보다 크게 작용하므로 epicenter지점에서 횡파가 종파에 비해 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)에서 레이저 펄스의 에너지 밀도값이 높아짐에 따라 점차적으로 조사지점이 용해되며 이에 의한 반사력성분이 작용하여 종파성분이 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있으며 그림 5

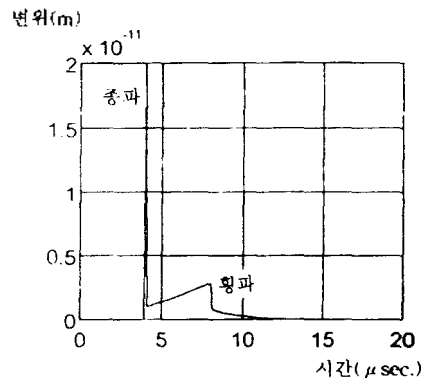


(a) 14MW/cm<sup>2</sup>



(b) 80MW/cm<sup>2</sup>

그림 4. 열탄성 영역에서의 변위파형



500MW/cm<sup>2</sup>

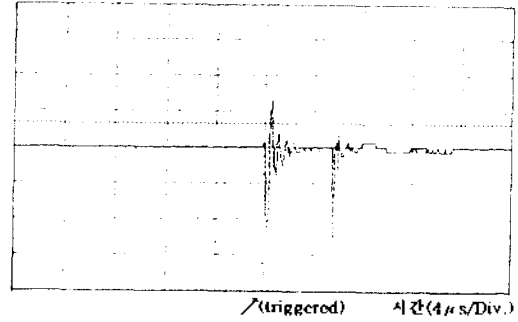
그림 5. 플라즈마영역에서의 변위파형

에서와 같이 플라즈마영역에서는 샘플표면의 레이저 펄스 조사지점에서 심한 용해현상이 발생되어 이 힘의 반사력이 순간적으로 샘플표면과 수직인 방향으로 크게 작

용하여 샘플이 팽창되는 것으로써 각 영역에서의 변위과형을 해석하였다. 실험에서 두께가 30mm 인 알루미늄, 탄소강, 황동 및 스텐레스강 표면에 XeF 엑시머 레이저 펄스를 조사하여 열탄성현상을 유도하였고 KrF 엑시머 레이저 펄스를 조사하여 플라즈마현상을 유도하여 두 영역에서 변환되는 광음향신호를 분석하였다. 그림 6에서는 열탄성영역에서 각 샘플로부터 검출된 종파와 횡파의 실험값이다.

그림 6에서 레이저를 one-shot 으로 조사하였고 HP 54502A 스코프로 화면의 center 지점에 start 트리거를 맞추었으며 level 트리거와 storage 를 사용하여 one-shot 신호를 검출하였다.

전폭값(5V/Div.)



(d) 스텐레스강

그림 6. 열탄성영역에서 광음향변환된 종파 및 횡파

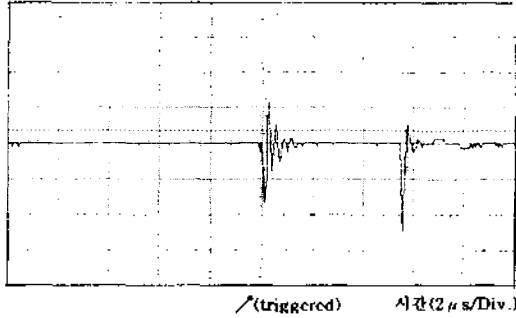
위의 신호에서 종파와 횡파가 전파시간지연을 사이에 두고 나타나는 것을 볼 수 있으며 트리거된 화면중심에서 종파가 먼저 검출되고 시간지연 후에 횡파가 검출되는 것을 볼 수 있다.

알루미늄으로부터 검출된 종파는 약 13V이고 횡파는 약 14V로 나타나서 종파보다 횡파가 크게 나타났으며 탄소강으로부터 검출된 종파는 약 19V이고 횡파는 약 24V로 검출되었다.

황동으로부터 광음향변환된 종파는 약 9V로 나타났고 횡파는 약 16V로 나타났으나 스텐레스강에서는 종파가 약 17V로 나타나고 횡파가 약 15V로 나타나므로 스텐레스강에서는 종파성분이 오히려 약 2V정도 크게 나타났는데 이것은 스텐레스강은 다른 샘플에 비해 엑시머레이저 파장대역에서 에너지를 많이 흡수하며 이로 인하여 그림 4(b)에서 시뮬레이션한 것과 같이 점차적으로 플라즈마현상이 발생되어 종파성분이 증가되는 것으로 분석된다. 그림 7에서는 플라즈마영역에서 각 샘플로부터 검출된 종파와 횡파를 나타냈다.

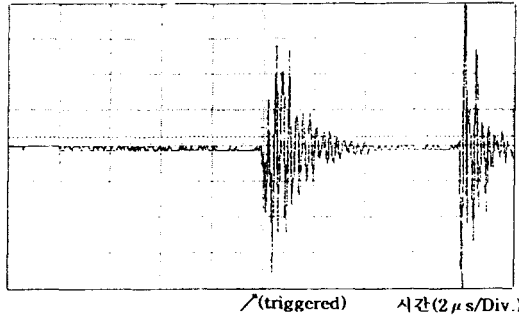
플라즈마영역에서는 알루미늄에서 검출된 종파가 약 30V이고 횡파는 약 18V정도로 나타나서 횡파에 비해 종파가 크게 나타났으나 탄소강에서 검출된 종파는 약 28V이고 횡파는 약 31V로 나타났다. 이것은 탄소강에서 엑

전폭값(5V/Div.)



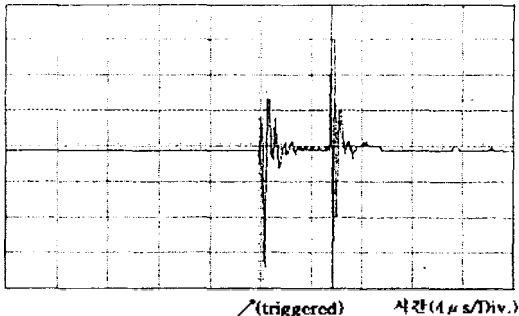
(a) 알루미늄

전폭값(3V/Div.)



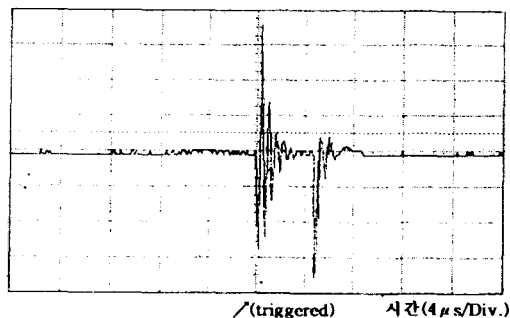
(b) 탄소강

전폭값(2V/Div.)



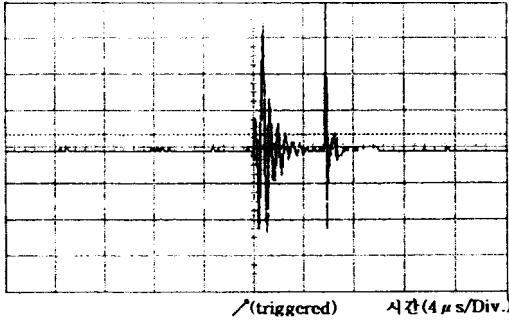
(c) 황동

전폭값(5V/Div.)



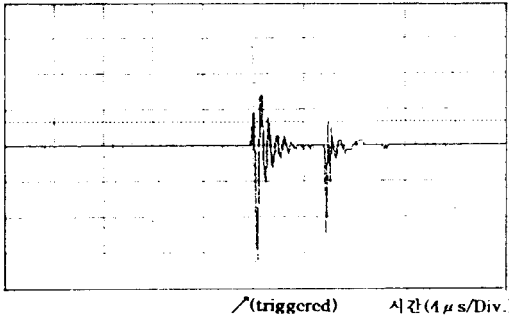
(a) 알루미늄

전폭값(5V/Div.)



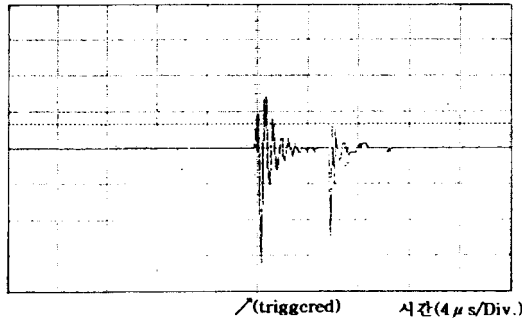
(b) 탄소강

전폭값(5V/Div.)



(c) 황동

전폭값(10V/Div.)



(d) 스텐레스강

그림 7. 플라즈마 영역에서 광음향변환된 종파 및 횡파

시머레이저 파장대의 흡수율이 다른샘플에 비해 비교적 낮기때문인 것으로 분석된다. 황동과 스텐레스강의 실험에서도 종파가 횡파에 비해 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 실제 플라즈마영역의 실험에서 샘플표면이 엑시머레이저 펄스로 인해 조금 파인것을 확인할 수 있었다.

위의 실험들은 시뮬레이션과 잘 일치하였고 레이저펄스의 에너지 밀도를 조정하여 광음향신호의 특성을 제어할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### IV. 지함성페턴 분석

그림 8에서 나타낸 바와 같이 레이저 펄스 조사지점을

음향원으로 놓고 음향원으로부터 각  $\theta$ 로 전파되는 종파의 변위를  $u_R$  각  $\theta$ 로 전파되는 횡파의 변위를  $u_\theta$ 로 놓을 수 있다.

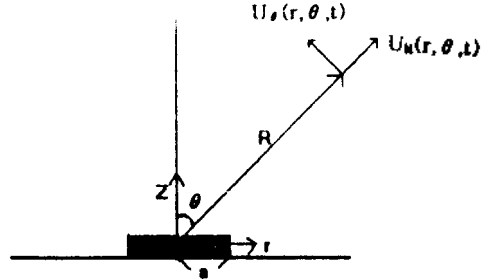


그림 8. 음향원으로부터 전파되는 종파와 횡파

플라즈마영역에서는 표면과 수직방향의 변위성분이 수평방향의 변위성분에 비해 크므로 레이저 조사지점을 표면과 수직방향으로 진동하는 음향원으로 모델링할 수 있다. 또한 등방성매질에서 음향파동방정식은 식(5)와 같다.

$$c_{11} \nabla \nabla \cdot u - c_{44} \nabla \times \nabla \times u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

여기서  $c_{11}$ : longitudinal elastic constant,  
 $c_{44}$ : shear elastic constant.

조사지점이 원형이므로 원통형좌표계로 해석하면  $u_\phi = 0$  이고  $u$ 에 대한 경도 및 회전은 식(6), 식(7)과 같이 나타낼 수 있고 식(8), 식(9) 및 식(10)이 성립된다.

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (6)$$

$$\nabla \times u = \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) j \quad (7)$$

조사점에서의 stress 성분들은 아래와 같다.

$$z z = c_{12} \Delta + 2c_{44} \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (8)$$

$$\phi z = c_{44} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

$$z r = c_{44} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (10)$$

여기서,  $\nabla \cdot u = \Delta$ 이다. free surface에서 표면과 수직 방향으로 진동하는 음향원으로 생각하면  $z=0$  지점에서 경계치조건은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z z = 1(r(a), z z = 0(r) a), z r = 0 \quad (11)$$

(for all r)

식(6)~식(10)을 경계치조건인 식(11)에 대하여 풀면 식(12), 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_z \approx \frac{i a^2 \cos \theta}{2 c_{44} R} \left\{ \frac{2 \mu^3 \sin^2 \theta \sqrt{(\mu^2 \sin^2 \theta - 1)}}{F_0(\mu \sin \theta)} e^{-i \mu R} + \frac{i \cos \theta (\mu^2 - 2 \sin^2 \theta)}{F_0 \sin(\theta)} \right\} e^{i R} \quad (12)$$

$$u_r \approx \frac{i a^2 \cos \theta}{2 c_{44} R} \left\{ - \frac{\mu^3 \sin 2 \theta \sqrt{(\mu^2 \sin^2 \theta - 1)}}{F_0(\mu \sin \theta)} e^{-i \mu R} + \frac{i \sin \theta (\mu^2 - 2 \sin^2 \theta)}{F_0 \sin(\theta)} \right\} e^{i R} \quad (13)$$

여기서,  $F_0(\xi) = (2 \xi^2 - \mu^2)^2$

$$-4 \xi^2 \sqrt{(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \mu^2)} \quad (14)$$

$$\mu = \sqrt{(c_{11}/c_{44})} = \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)} \quad (15)$$

또한 원통형좌표계에서 식(16), (17)이 성립된다.

$$u_R = u_z \cos \theta + u_r \sin \theta \quad (16)$$

$$u_\theta = u_r \cos \theta - u_z \sin \theta \quad (17)$$

식(12), (13)과 식(16), (17)을 이용하여 플라즈마영역에서 종파와 횡파의 지향성패턴 관계식을 식(18), (19)와 같이 유도할 수 있다.

$$u_R \propto \frac{2 k^2 \cos \theta_0 (k^2 - 2 \sin^2 \theta_0)}{\{(k^2 - 2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4 \sin^2 \theta_0 (1 - \sin^2 \theta_0)\}^{1/2}} \cdot (k^2 - \sin^2 \theta_0)^{1/2} \quad (18)$$

$$u_\theta \propto \frac{\sin 2 \theta_0 (1 - k^2 \sin^2 \theta_0)^{1/2}}{\{k(1 - 2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4 \sin^2 \theta_0 (1 - \sin^2 \theta_0)\}^{1/2}} \cdot (1 - k^2 \sin^2 \theta_0)^{1/2} \quad (19)$$

윗 식(18)과 식(19)를 이용하여 플라즈마영역에서 알루미늄 샘플에 대한 종파와 횡파의 지향성패턴을 시뮬레이션하였다. 열탄성영역에서는 표면과 수평방향의 변위가 수직방향의 변위보다 크므로 표면과 tangential 방향으로 진동하는 음향원으로 모델링할 수 있다. 열탄성영역에서도 플라즈마영역과 동일한 방법으로  $\nabla \cdot u$ 와  $\nabla \times u$  방정식을 풀고 경계치조건에 관해 계산하면 종파와 횡파의 지향성패턴은 식(20), (21)과 같이 유도된다[4, 5].

$$u_R \propto \frac{\sin 2 \theta_0 (k^2 - \sin^2 \theta_0)^{1/2}}{\{(k^2 - 2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4 \sin^2 \theta_0 (1 - \sin^2 \theta_0)\}^{1/2}} \cdot (k^2 - \sin^2 \theta_0)^{1/2} \quad (20)$$

$$u_\theta \propto \frac{k \sin 4 \theta_0}{\{k(1 - 2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4 \sin^2 \theta_0 \cdot (1 - \sin^2 \theta_0)^{1/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta_0)^{1/2}\}} \quad (21)$$

그림 9에서는 실험을 위한 샘플과 지향성패턴 검출방식을 나타냈다.

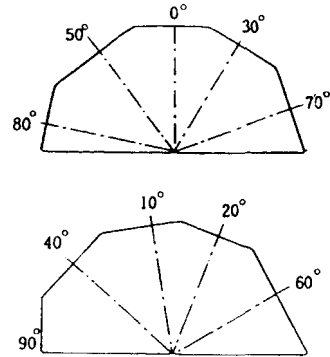
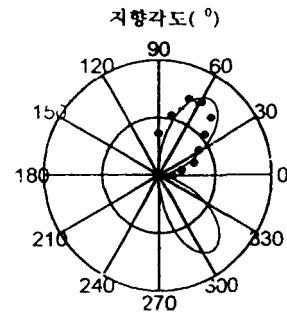


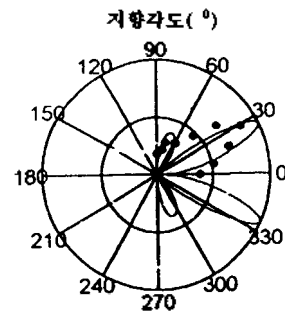
그림 9. 지향성패턴실험을 위한 샘플 및 검출방식

그림 10과 11, 12, 13에서는 열탄성영역과 플라즈마영역에서 알루미늄에 대해 광음향변환된 종파 및 횡파의 지향성패턴을 나타냈다.



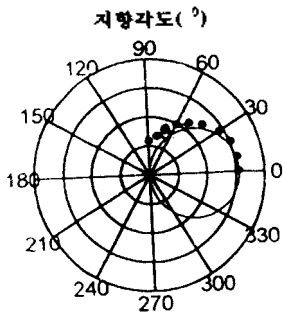
— : 이론값, · : 실험값

그림 10. 알루미늄에서 종파의 지향성패턴(열탄성영역)



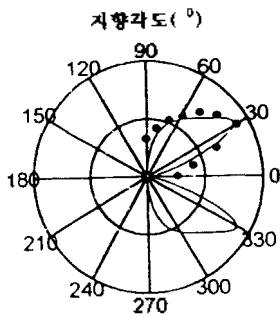
— : 이론값, · : 실험값

그림 11. 알루미늄에서 횡파의 지향성패턴(열탄성영역)



— : 이론값, · : 실험값

그림 12. 알루미늄에서 종파의 지향성패턴(플라즈마영역)



— : 이론값, · : 실험값

그림 13. 알루미늄에서 횡파의 지향성패턴(플라즈마영역)

위의 실험에서 XeF 엑시머레이저를 사용하였으며 샘플로는 두께가 20mm, 지름이 70mm 인 알루미늄, 탄소강, 황동 및 스텐레스강 샘플을 반원형으로 절단하여 PZT 변환기의 부착지점을 0°에서 90°까지 변화시키면서 광음향신호를 검출하도록 설계, 제작하였다.

위의 시뮬레이션과 실험에서 나타난 바와 같이 열탄성영역에서는 표면과 평행한 방향의 변위가 크게 작용하여 광음향변환된 종파는 60° 부근에서 최대 에너지가 도래하고 횡파는 여기 입계각인 약 30° 부근에서 최대에너지가 나타나며 플라즈마영역에서는 표면과 수직방향으로 작용하는 플라즈마의 반사력으로 인하여 종파는 0°에서 최대에너지가 나타나며 횡파는 열탄성영역과 마찬가지로 입계각인 약 30°에서 최대에너지가 도래하는 것을 알 수 있다. 또한 탄소강, 황동, 스텐레스강의 실험에서도 알루미늄과 유사한 결과를 나타냈다.

위의 실험들은 시뮬레이션과 약 5~10% 정도의 오차 내에서 잘 일치하였으며 이것은 레이저 펄스가 샘플표면에 수직으로 입사될때 각도조정에서의 오차와 광음향신호의 수신단에서 수신각도 오차때문인 것으로 분석된다.

그림 14에서는 알루미늄 샘플에 KrF 엑시머 레이저 펄스를 조사하고 조사지점으로부터 30mm 떨어진 표면에 서 wedge형 PZT 변환기로 검출한 표면파를 보인 것이다.

그림 14에서는 352MW/cm<sup>2</sup> KrF 엑시머 레이저 펄스를 지름이 약 1mm인 조사면적으로 알루미늄 표면에 조

사하였을때 발생된 표면파를 나타낸 것으로서 표면파의 출력이 약 25V 로 나타났다. 이 실험으로 펄스레이저에 의한 광음향신호는 종파 및 횡파를 포함하여 표면파까지도 효율적으로 발진시킨다는 것을 확인하였다.

전폭값(5V/div.)

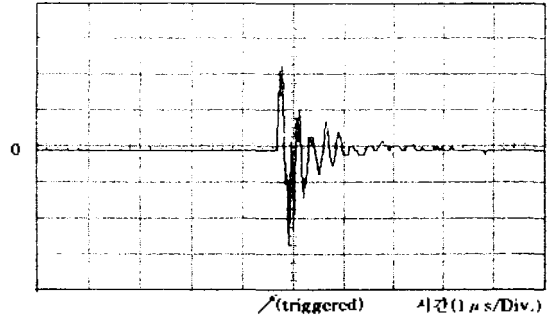


그림 14. 엑시머 레이저 조사에 의한 표면파 검출

### V. 결 론

본 논문에서 XeF, KrF 엑시머레이저 펄스에 의해 급속으로부터 여기된 광음향신호를 분석한 결과, 열탄성영역에서는 표면과 수평방향의 변위가 수직방향의 변위보다 우세하여 횡파가 종파에 비해 크게 나타나며 종파 및 횡파의 최대에너지가 각각 60°와 30° 부근에서 도래하는 지향특성을 보였다. 또한 플라즈마영역에서는 조사지점에서의 플라즈마로 인한 반대방향의 반사력때문에 종파가 횡파에 비해 크게 나타나고 지향성패턴에서는 최대 종파와 횡파에너지가 각각 0°와 30° 부근에서 최대값을 보였다. 이러한 실험결과는 열탄성영역과 플라즈마영역으로 나누어 모델링한 광음향원 이론과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 연구된 광음향신호의 분석결과는 고체에서 광음향신호의 특성을 파악하고 효율적으로 탐상하는 데에 기초가 되며 본 연구에서 구성된 시스템은 재료, 반도체 및 정밀기계분야등에 현미경 및 비파괴검사시스템에 응용될 수 있고 매질의 광음향학적 특성을 검출하여 물질의 미소 영역에 대한 물리적인 성질과 기하학적인 구조를 밝히는 분야에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. C. B. Scruby, "Laser Ultrasonics(Techniques and Applications)", Adam Hilger, 1990.
2. Allan Rosenwaig, "Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy", Vol. 57, John Wiley & Sons, 1980.
3. C. B. Scruby, "A laser-generated standard acoustic emission source", Materials Evaluation, 39, Dec. 1981.
4. A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins and S. B. Palmer, "Laser-generated ultrasonic pulses at free metal

- surfaces", J. Acoust. Soc. Am. 69(2), Feb. 1981.
5. D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, S. B. Palmer, "Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum", J. Acoust. Soc. Am. 70(5), Nov. 1981.
  6. Ivan Tolstoy, "Wave Propagation", New York: McGraw-Hill, Inc., 1962.
  7. V. P. Zharov, V. S. Letokhov, "Laser Optoacoustic Spectroscopy", Vol. 37, Springer Series in Optical Sciences, 1986.
  8. W. Nowacki, "Thermoelasticity", Oxford: Pergamon Press, 1962.
  9. Edson Lord, "Geometric diffraction loss in longitudinal and shear wave attenuation measurements in an isotropic half space", J. Acoust. Soc. Am. vol. 39(4), 1966.
  10. L. R. F. Rose, "Point-source representation for laser generated ultrasonic", J. Acoust. Soc. Am. 75(3), March 1984.

### ▲ 이 증 호



1965년 10월 8일생

1988년 2월: 경희대학교 전자공학과  
(공학사)

1990년 2월: 경희대학교 전자공학과  
(공학석사)

1990년 3월~1991년 3월: ETRI 연구  
원

1995년 2월: 경희대학교 전자공학과  
(공학박사)

1994년 9월~현재: 인하공업전문대학 조교수

### ▲ 전 계 석

경희대학교 공과대학 전자공학과 교수