

## 탄성파의 응력평가를 위한 가시화시스템 설계

남 영 현<sup>†</sup>

(2008년 4월 22일 접수, 2008년 5월 17일 수정, 2008년 5월 19일 심사완료)

### Design of Visualization System for Stress Evaluation of Elastic Wave

Young Hyun Nam

**Key Words:** Elastic Wave(탄성파), Design(설계), Visualization(가시화), Sound Pressure(음압)

#### Abstract

This paper describes a synthesized photoelastic method developed for the visualization and evaluation of sound pressure distribution of elastic wave in a solid. The visualization of wave stress field is achieved by synthesizing two photoelastic pictures, in which the direction of the principal axis of linear polariscopes differs by  $45^\circ$ . From the analysis of the wave stress distribution using this method, it is possible to evaluate the characteristics of elastic waves in a solid, such as the intensity of stress, directivity and resolution characteristics of the wave emitted from a commercial probe, and characteristics of scattering from various types of defects.

#### 1. 서론

고체 내를 전파하는 미소한 탄성파가 결함에서 반사되는, 반사 에코(echo)를 이용하는 초음파 검사는 각종 기계 및 구조물의 안전성을 보증하는데 대단히 중요하다. 탄성파가 결함에서 반사될 때 종파에서 횡파로의 모드(mode) 변환 등이 복잡하게 발생하므로 탄성파의 반사거동을 정량적으로 평가하는 일은 검사 결과의 신뢰성 및 재현성에 중요한 인자가 되고 있다.

이와 같은 목적으로 본 연구에서는 광탄성법을 이용한 고체 내 탄성파 펄스의 가시화/해석 시스템과 파동응력의 정량적인 측정을 위한 “광탄성화상합성법”을 개발하였다. 본 시스템은  $45^\circ$  다른 2개의 평면편광 화상을 합성하여, 합성 화상위에 원편광과 같은 주응력과 빛의 밝기의 관계

를 이용하여 빛의 밝기로부터 파동응력을 측정하는 원리이다. 그러나 이와 같은 연구는 산업분야 등 대단히 넓은 분야에서 이용이 기대되고 있으나 실용화되지 않고 있는 것이 현실이다. 본 시스템의 응용분야는 초음파 센서의 성능평가, 탄성파의 기초적 문제의 실험적 해석, 복잡한 형상을 가지는 시험체의 검사방법 평가, 검사 기술자의 교육 등을 생각할 수 있다. 센서의 성능평가는 고체 내를 전파하는 탄성파의 음압분포를 측정하므로 송/수신파의 감도, 거리분해능, 거리진폭특성곡선 등을 구하여 각종 센서의 성능평가, 새로운 센서의 개발연구에 큰 도움이 될 것이다. 기초적 문제의 실험적 해석은 투과파 및 반사파의 음압측정을 통하여 음압통과율과 음압반사율을 구하여 곡면체 및 모서리에서 탄성파의 반사특성과 각종 결함에서의 반사지향성의 해석이 가능하며, 복잡한 시험체 내에서의 탄성파 펄스의 반사 및 모드변환 등의 특성을 정량적으로 밝히므로 최적의 검사방법 결정, 얻어진 검사 결과의

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 하기소닉

E-mail : namyh@hagisonic.com

TEL : (042)936-7740 FAX : (042)936-7742

해석 등에 유효하다. 또한 탄성파의 모드변환 등 이론에서는 이해하기 어려운 현상 등을 직접 관찰하므로 검사 기술자의 교육에도 이용할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 고체 내 탄성파의 가시화와 정량적인 해석이 가능한 “광탄성화상합성법”을 적용하여 사각센서에서 입사된 횡파의 가시화상과 음압분포, 전과거리에 따른 음압분포의 변화, 관통구멍에서의 횡파의 반사거동 등에 대해 연구하였다.

## 2. 가시화시스템

탄성파를 가시화시키기 위하여 사용한 장치는 Fig. 1에 표시한 것과 같이 광탄성법을 기초로 한 음압해석 시스템을 이용하였다. 시스템 controller (interface controller)는 시험편 내를 전파하는 탄성파를 정지 상태로 가시화하기 위하여 컴퓨터로부터 신호를 받아 stroboscope의 발광, 탄성파의 송신, CCD 카메라의 화상 입력 등의 작동시간을 10 ns 단위로 설정하여 trigger 펄스를 보내는 장치이다. Real-time digitizer는 가시화상의 입력, 입력화상의 합성 등의 신호를 보내어 실제 화상처리를 행하는 장치이다. 초음파 탐상기는 USD15SQ를 이용하였으며 시험편에 탄성파 펄스의 입사와 동시에 일정한 지연시간을 가한 trigger펄스를 stroboscope에 보내어 stroboscope를 발광시킨다. Stroboscope의 발광 시간이 시험편 내를 전파하는 탄성파의 속도에 비해 대단히 짧기 때문에 CCD 카메라를 통한 탄성파는 정지 상태로 관찰 할 수 있다. 본 실험에서는 발광 시간이 20 ns의 stroboscope를 이용하였으며 발광 시간중의 탄성파의 전과거리는 종파가 0.11 mm, 횡파가 0.07 mm이다. 펄스 모터(pulse motor)는 합성화상을 만들기 위하여 편광자와 검광자의 편광방향을 바꾸기 위한 것이며, 펄스 모터 controller는 컴퓨터에서 신호를 받아 펄스 모터를 제어 할 수 있다. 시험편으로 Pyrex Glass를 이용한 이유는 초음파의 속도(종파: 5490 m/s, 횡파: 3420 m/s)가 철강 재료에서 초음파의 속도(종파: 5900 m/s, 횡파: 3230 m/s)와 비슷하며, 다른 재료에 비해 감쇠가 적으며, 광탄성 감도가 높기 때문이다.

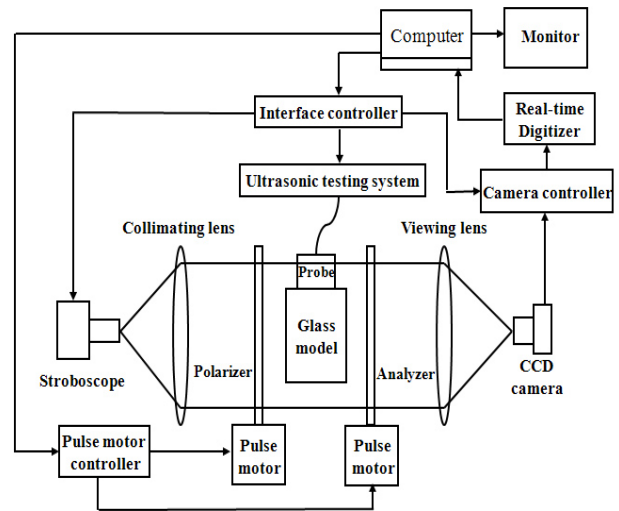


Fig. 1 Diagram of the visualization and evaluation system

## 3. 광탄성화상합성법

고체 내를 진행하는 탄성파의 전과과정을 관찰할 수 있는 가시화법에는 굴절무늬법 (schlieren method)과 광탄성법(photoelastic method) 등이 이용되고 있으나, 종파 및 횡파의 전과 과정을 관찰하는데에는 광탄성법이 유리하므로 본 연구에서는 광탄성법을 적용하였다. 광탄성법을 이용하여 탄성파를 가시화시키는 장치에는 원편광(circularly polarized light)을 이용하는 방법과 평면편광(plane polarized light)을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 원편광을 이용하는 방법은 음압에 비례한 가시화상을 얻을 수 있어 정량적인 측정이 가능하나, 감도는 낮고 미소한 음압의 탄성파를 가시화시킬 수 없는 단점을 가지고 있다. 이에 대해 평면편광을 이용하는 방법은 가시화 감도는 높으나 음압에 비례한 가시화상을 얻을 수 없어서, 정량적인 음압측정이 불가능한 단점을 가지고 있다.<sup>(1-10)</sup>

본 연구에서는 평면편광을 이용한 경우와 같이 높은 감도를 가지며 원편광을 이용한 경우와 같이 음압에 비례한 가시화상이 얻어지는 광탄성화상합성법을 적용하였다. 이 방법은 2차원적인 음장(sound field)의 퍼짐을 가정해 해석한 것으로 고체 내를 전파하는 탄성파를 높은 감도로 가시

화할 수 있으며, 음압에 비례한 가시화상을 얻어 음압의 절대치를 구할 수 있다.<sup>(1-15)</sup>

Fig. 2는 평면편광을 이용한 광탄성장치에서 얻어지는 2개의 화상에서 임의의 점에 대한 빛의 밝기  $I_1, I_2$ 을 표시한 것이다. 제 1화상은 주응력 ( $\sigma_1, \sigma_2$ )방향과 편광자(polarizer) 및 검광자(analyzer)의 주축방향이 일치하고 있는 경우로 빛의 밝기  $I_1$ 은 광탄성법칙으로부터 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$I_1 = a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

여기에서  $\delta = cd(\sigma_1 - \sigma_2)$ 이며,  $a$ 는 상수,  $\theta$ 는 주응력  $\sigma_1$ 방향과 편광자의 주축방향이 이루는 각도,  $c$ 는 광탄성 계수,  $d$ 는 시험편 두께,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 주응력(음압)이다.

제 2화상의 빛의 밝기  $I_2$ 는 주응력( $\sigma_1$ )방향과 편광자의 주축방향이 이루는 각도가  $45^\circ$  되도록 편광자와 검광자의 직각상태에서  $45^\circ$  회전했을 때 얻어지는데 식 (2)과 같이 표시할 수 있다.

$$I_2 = a^2 \cos^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

$I_1$ 과  $I_2$ 을 합성하면 합성화상에서의 빛의 밝기  $I$ 는 식 (3)과 같이 평면편광의 각도  $\theta$ 에 의존하지 않는 관계가 얻어진다.

$$I = I_1 + I_2 = a^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

이때, 탄성파의 응력상태는 대단히 작기 때문에 식 (3)은 식 (4)과 같이 표시할 수 있다.

$$I = a^2 \frac{\delta^2}{4} \quad (4)$$

고체 내를 전파하는 탄성파의 주응력  $\sigma_1$  및

$\sigma_2$ 의 관계를 고려할 때 종파는 인장/압축응력이 상호 존재하는 응력과 이므로  $\sigma_2=0$ 이 되며 음압은  $\sigma_1$ 의 식으로 표시된다. 횡파는 전단응력이 전파해 가는 파로  $\sigma_2=-\sigma_1$ 되며, 이것을  $\tau$ 로 표시한다면  $2\tau=(\sigma_1-\sigma_2)$ 의 관계에 있기 때문에 횡파의 음압은  $(\sigma_1-\sigma_2)/2$ 로 표시된다. 이 관계를 이용하여 탄성파의 음압  $\sigma_1$ 은 합성화상에서 빛의 밝기  $I$ 을 측정하여 식 (5)과 같은 음압의 절대치를 얻을 수 있다.

$$\sigma_1 = A\sqrt{I} \quad (5)$$

$A$ 는 상수이고 종파의 경우  $A=2/\sqrt{acd}$ , 횡파의 경우  $A=1/\sqrt{acd}$ 이다. 따라서 같은 음압의 탄성파를 가시화할 경우 횡파의 빛의 밝기가 종파보다 4배가 되어 횡파의 가시화 감도가 종파보다 높으며, 빛의 밝기( $I$ )가 같은 경우에는 횡파의 음압이 종파의  $1/2$ 이 됨을 알 수 있다.

시험편 가공 시 시험편 내에 존재하는 잔류응력의 영향을 제거하기 위하여 식 (6)과 같이 탄성파를 입사하지 않은 상태에서 잔류응력 분포 화상을 구성한 후, 시험편 내에 탄성파를 입사시켜 탄성파와 잔류응력을 포함하는 합성화상을 구성하여 잔류응력 화상을 빼므로 탄성파의 음압만을 표시하는 가시화상을 구성하였다.

$$\sigma = A[\sqrt{I_{U+R}} - \sqrt{I_R}] \quad (6)$$

여기에서  $A$ 는 상수이며,  $I_{U+R}$ 는 탄성파+잔류응력 화상,  $I_R$ 는 잔류응력 화상이다.

Fig. 3은 종파의 인장과 압축에 대한 위상검출법을 표시하고 있다. 가시화상에서는 음압의 절대치만을 알 수 있지만, 임의의 응력을 가하므로 그 때 나타나는 음압변화를 조사하여 파동의 어느 부분이 인장되고 압축되는가를 알 수 있다. 즉 센서를 손으로 눌러 압축응력을 종파의 전파 방향에 평행하게 가하는 경우, 종파의 인장 응력측은 압축응력이 가하지므로 음압은 저하되나, 반대로 압축 응력측의 음압은 상승된다.

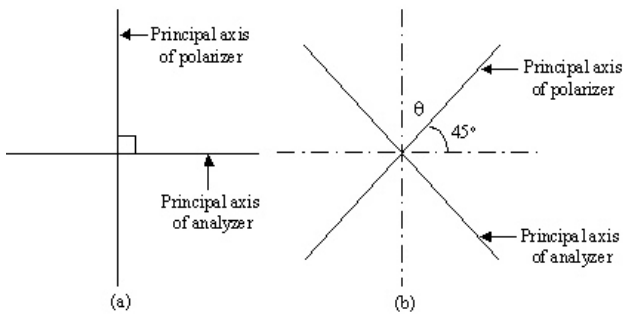


Fig. 2 Synthesized photoelastic method

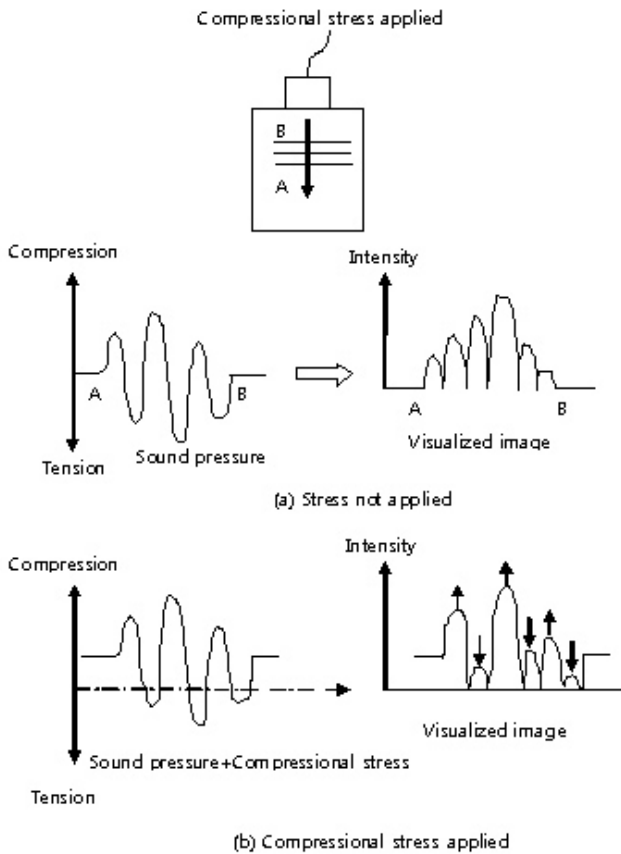


Fig. 3 Determination of wave phase in longitudinal wave

Fig. 4는 횡파의 위상검출법을 표시하고 있다. 횡파의 주응력 방향이 전파방향과 45° 각도를 유지하기 위해서는 가하는 압축응력도 전파방향과 45° 다른 주응력 방향에 평행해야 한다. 압축응력에 평행한 방향의 주응력이 인장인 경우, 주응

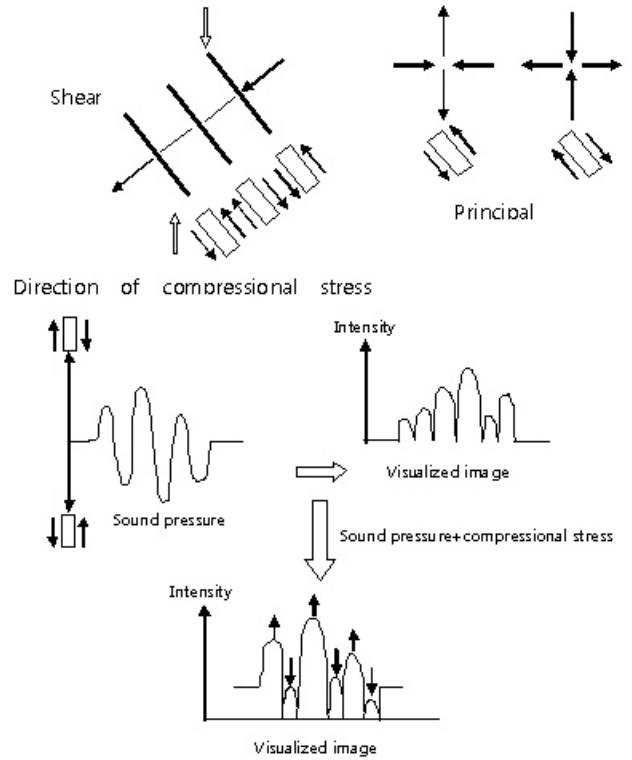


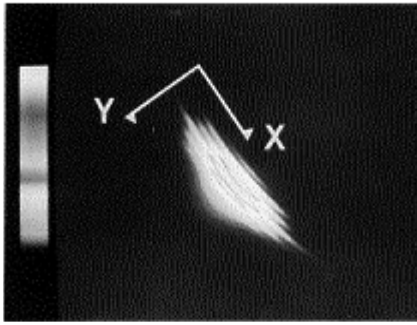
Fig. 4 Determination of wave phase in shear wave

력 차는 작게 되므로 나타나는 음압은 저하된다. 반대로 주응력 방향이 압축인 경우는 주응력 차는 크게 되므로 음압은 상승된다. 이와 같이 임의의 응력을 가하여 나타나는 음압변화를 관찰하므로 파동의 위상변화를 알 수 있다.

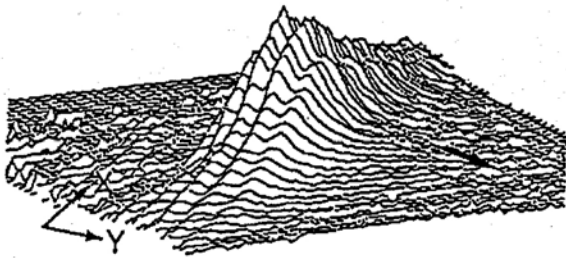
#### 4. 탄성파 음압 측정

Fig. 5는 주파수 2 MHz, 굴절각 45°, 진동자 크기 8×9 mm의 사각센서를 이용하여 측정한 횡파의 가시화상과 음압분포를 표시한 것이다. 해석상 음압분포는 X-Y 좌표계로 표시하였으며, 화살표 방향이 탄성파의 전파 방향이다.

Fig. 6은 Fig. 5에 표시한 횡파의 X방향과 Y방향의 음압분포를 자세히 표시한 것이다. (a)는 Y방향의 빔(beam) 중심부근의 음압분포를 표시한 것으로, 본 시스템에서는 음압의 절대치를 구하므로 일반적인 초음파 탐상기의 CRT화면에서 관찰되는 것과 같이 음압의 정류파로 되어 있다. (b)는 본래의 진동 파형으로 고치기 위하여 (a)에



(a) Visualized shear wave



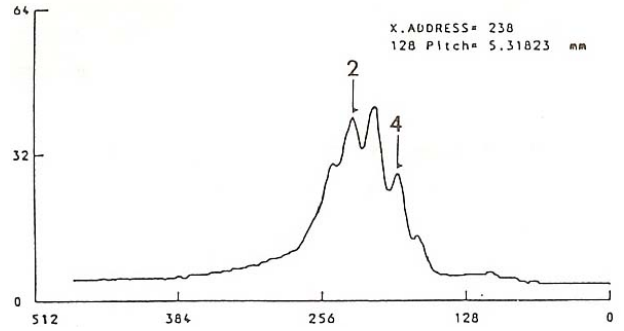
(b) Sound pressure distribution of shear wave

**Fig. 5** Visualized wave and sound pressure distribution

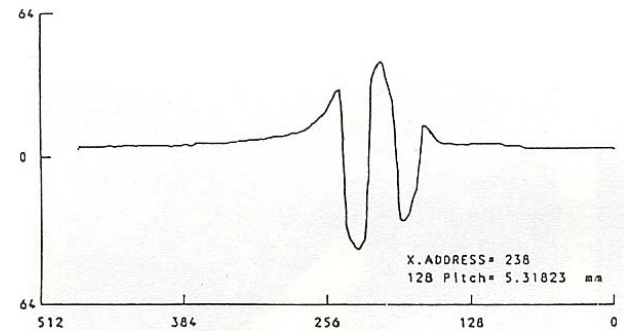
표시된 음압파형 중 2번째와 4번째의 음압의 부호를 반전시켜, 소프트웨어에서 실제의 음압파형으로 표시함과 동시에 평균 파장을 구한 것이다. (c)는 X방향의 빔 퍼짐에 관한 음압분포를 표시한 것으로, 파형의 최대 음압을 표시하는 파면상의 X방향의 음압 변화를 측정하는 것이다.

Fig. 7은 횡파의 전파에 따른 음압분포의 변화를 표시한 것이다. 그림의 좌측 AB면이 시험편의 단면이고, B점 부근에 사각센서가 위치하고 있으며, 센서로부터 발생한 횡파가 전파함에 따라 변하는 음압분포를 표시한 것이다. 근거리음장(near field)이라고 생각되는 발생 직후의 횡파는 2개의 산이 중첩된 것과 같은 음압분포를 나타내고 있으나, 탄성파가 진행됨에 따라 빔의 중심 부근의 음압이 최고로 높아지고 있음을 알 수 있다.

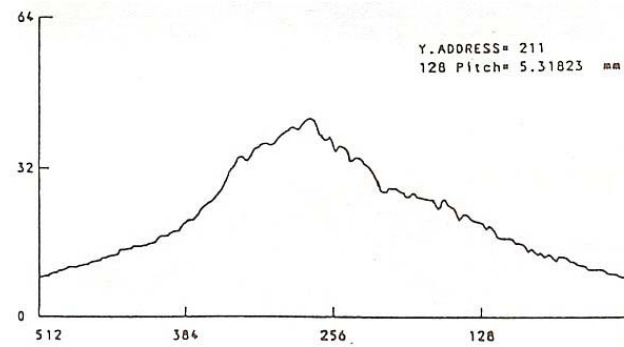
Fig. 8은 거리진폭특성곡선에 해당한 것으로 Fig. 7에 표시한 3개 횡파의 음압분포, 파면형상, 음압최대치와 그 위치, 최대치로부터 음압이 -6 dB 되는 빔의 폭을 나타낸 것이다.



(a) Sound pressure distribution in cross section (Y direction)



(b) Vibration waveform of sound pressure



(c) Sound pressure distribution of X direction

**Fig. 6** Sound pressure distribution of shear wave

Fig. 9는 횡파가 단면에서 반사하는 거동을 음압분포의 변화로 표시한 것이다. 화살표 방향으로 입사된 횡파가 AB단면에서 반사되어 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 직경이 3 mm인 관통구멍(cylindrical hole)에서 산란된 탄성파의 산란현상을 보여주고 있다. 가시화상에서 종파의 강도(intensity)는 횡파

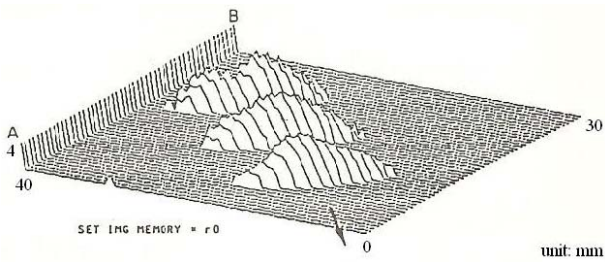


Fig. 7 Sound pressure distribution change with propagation of shear wave

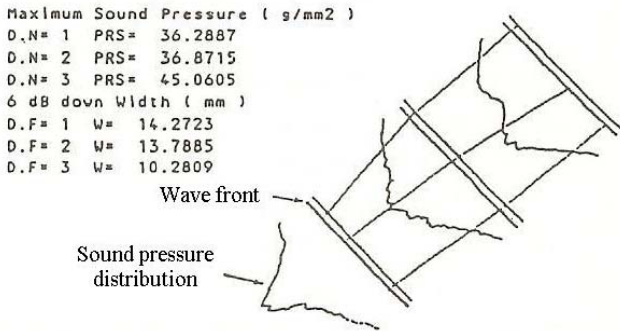


Fig. 8 Distance amplitude curve of shear wave

의 약 1/2정도이므로 가시화상에서 종파는 연하게, 횡파는 진하게 표시된다. 관통구멍에 입사된 입사횡파(A)는 2개의 반사 횡파(C, D)와 모드 변환된 반사종파(B)를 발생시킨다. 반사횡파(D)는 관통구멍 주위를 따라 전파하는 회전표면파이며, 이는 입사횡파가 관통구멍에서 산란 시 모드 변환된 것이다.

이와 같이 고체 내를 전파하는 탄성파의 전파 거동, 반사거동, 모드변환 등과 같은 복잡한 산란 현상을 본 연구에서 설계한 가시화시스템을 이용하여 해석하므로 탄성파의 정량적 평가가 가능하다고 생각된다.

### 5. 결 론

“광탄성화상합성법”의 원리를 이용하여 고체 내를 전파하는 탄성파 펄스를 가시화 하여, 가시화상에서 음압의 측정 및 해석이 가능한 가시화

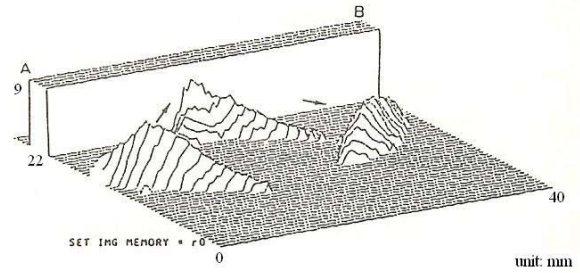


Fig. 9 Reflection of shear wave from section

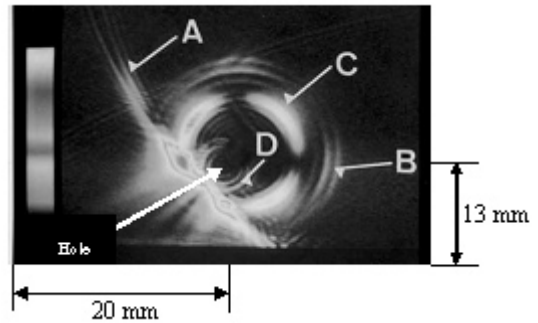


Fig. 10 Reflection of shear wave from a 3 mm diameter cylindrical hole

시스템을 설계하였다. 본 시스템은 고속으로 전파하는 탄성파를 정지상으로 입력하여 해석하기 때문에 stroboscope를 광원으로 하는 광탄성의 광학계와 입력한 가시화상의 음압해석을 위한 화상처리계, 전체를 제어하는 소프트웨어로 구성되어 있다.

본 가시화시스템은 가시화상의 입력에서 음압 분포 결과의 출력까지 고속으로 진행되며, 정량적인 평가가 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 초음파 센서의 성능평가, 기초적인 문체의 검토, 복잡한 형상을 가지는 물체 내를 전파하는 탄성파의 전파 해석 등에 활용이 크게 기대된다.

### 참고문헌

(1) Hall, K. G., 1976, “Crack Depth Measurement in Rail Steel by Raleigh Waves Aided by Photoelastic Visualization,” *Non-destructive Testing*, pp. 121~126.

- (2) Hall, K. G., 1977, "A Qualitative Evaluation of Variable-angle Ultrasonic Transducers by the Photoelastic Visualization Method," *Ultrasonics*, Vol. 15, pp. 245~252.
- (3) Archer-Hall J. A. and Hutchins, D. A., 1979, "The Photoelastic Visualization of Ultrasonic Waves in Liquids," *Ultrasonics*, Vol. 17, pp. 209~212.
- (4) Hall, K. G., 1982, "Observing Ultrasonic Wave Propagation by Stroboscopic Visualization Methods," *Ultrasonics*, Vol. 20, pp. 159~170.
- (5) Light, G. M., Singh A. and Rudwick, T., 1982, "Ultrasonic Transducer Characterization using the Combined Schlieren, Photoelastic, and Raman Nath System," *Materials Evaluation*, Vol. 40, pp. 783~790.
- (6) Bar-Cohen, Y. 1983, "Schlieren Visualization of Acoustically Imaged Defects," *Material Evaluation*, Vol 41, pp. 88~93.
- (7) Hall, K. G. 1984, "Railway Applications of Ultrasonic Wave Visualization Techniques," *British Journal of NDT*, pp. 162~171.
- (8) Hall, K. G. 1984, "Visualization Techniques for the Study of Ultrasonic Wave Propagation in the Railway Industry", *Materials Evaluation*, Vol. 42, pp. 922~929.
- (9) Zhang ,S. Y., Shen J. Z. and Ying, C. F., 1988, "The Reflection of the Lamb Wave by a Free Plate Edge: Visualization and Theory," *Materuaks Evakuation*, Vol. 46, pp. 638~641.
- (10) Hennige, C. W. 1989, "Schlieren Optical System for Visualizing Ultrasonic Waves," *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp. 922~929.
- (11) McNab A. and Cornwell, I. H. 1995, "Visualization of 3D Ultrasonic NDT Data," *Insight*, Vol. 37, pp. 814~819.
- (12) Rychagov M. N. and Ermert, H., 1996, "Cross-flow Visualization by Acoustic CT Measurements," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 517~522.
- (13) Data, K. and Udagawa, 1989, "Visualization of Ultrasonic Waves in a Solid by Stroboscopic Photoelasticity and Image Processing Techniques," *Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 8B, pp. 1755~1762.
- (14) Nam, Y. H., 1999, "Directivity Evaluation of an Artificial Defect in a Simulated a Buff Joint by the Visualization Method," *Welding Journal*, Vol. 78, pp. 338~342.
- (15) Nam, Y. H. 2001, "Modeling of Ultrasonic Testing in Butt Joint by Ray Tracing", *KSME International Journal*, Vol. 15, pp. 441~447.