

광탄성가시화법에 의한 사각탐촉자의 지향성 평가에 관한 연구

南榮鉉, 伊達 和博
일본 동북대학

요약 고체내를 전파하는 초음파의 지향성과 음압 분포를 아는 일은 초음파탐상시험에 있어서 대단히 중요하다. 초음파의 지향성은 초음파탐상시험에 있어 감도, 주사 간격, 탐촉자의 배치, 결함의 종류등을 판단하는 지침이 되고 있다. 본 논문에서는 초음파가시화법을 이용해 초음파의 지향성을 측정했다. 사각탐촉자로부터 나온 횡파의 지향성은 초음파의 전파 거리에 따라 변하지 않았다. 2MHz와 4 MHz의 사각탐촉자에는 지향성의 차이가 있었다. 지향성의 중심 위치는 사각탐촉자의 입사점으로부터 뒤쪽 및 탐촉자의 내부에 위치하고 있었으며, 초음파의 전파 거리에 따라 변하지 않았다.

1. 서론

초음파탐상시험은 초음파 pulse가 한 방향으로 진행하는 지향성을 이용하고 있다. 고체내를 전파하는 초음파 pulse의 음압 분포와 지향성을 정량적으로 측정하는 일은, 초음파탐상시험의 탐상 감도, 탐촉자의 주사 간격, 최적한 탐상 방법을 결정하는데 기초가 되고 있다.

송신과 수신을 한개의 탐촉자로 탐상하는 1 탐촉자법에서, 탐촉자의 지향성은 결함의 위치 측정에 크게 영향을 미치고 있다. 또, 반사 지향성은 결함의 종류와 방향에 의해 변하기 때문에 결함에서의 반사 지향성은 검사의 정밀도, 신뢰도, 능률의 향상 및 탐상 결과를 해석하는 일에 있어서 대단히 중요하다. 종래에 초음파의 지향성 측정에는 반원형의 판상시험편의 중심에 탐촉자를 놓고, 원주 방향으로 초음파를 방사해, 그것을 electrodynamic sensor를 이용해 시험편을 주사하는 방법으로 탐촉자의 지향성을 측정했다¹⁾³⁾. 이와 같은 지향성 측정 방법의 경우, electrodynamic sensor의 미소한 기울기로 감도

가 변하며, 사용하는 electrodynamic sensor의 특성이 탐상 결과에 영향을 미치는 일과 제한된 위치에서 지향성을 측정함으로써, 지향성에 대한 상세한 검토는 어려웠다.

또, 최근의 새로운 광대역형 탐촉자의 개발에 따라, 과거의 연속파 이론으로는 설명할 수 없는 결과도 얻어지고 있으며, 탐상 결과의 정밀도 및 신뢰성 향상을 위해서도 고체내를 전파하는 초음파 pulse의 지향성을 정량적으로 측정하는 일은 중요한 과제가 되고 있다.

본 논문에서는 고체내를 전파하는 미소한 초음파 pulse의 음압을 정량적으로 측정하는 방법 「광탄성화상합성법」을 적용해 음압 분포를 가시화했으며, 지향성 해석용의 화상 해석 program을 작성해 사각탐촉자의 지향성을 조사했다.

가시화 실험에서는 굴절각 45°와 60°의 사각탐촉자를 이용하였으며 실험편에 입사되는 종파의 입사각이 종파의 임계각을 초과하므로 실험편 내에는 횡파만 존재하기 때문에 지향성 해석은 횡파에 대하여 행했다.

2. 광탄성화상합성법의 원리

광탄성법을 이용한 초음파 pulse의 가시화 장치는 원편광(circularly polarized light)을 이용하는 방법과 평면편광(plane polarized light)을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 원편광을 이용하는 방법은 음압에 비례한 가시화상이 얻어져 정량 측정이 가능한 반면, 감도는 낮고, 미소한 음압의 초음파 pulse는 가시화할 수 없는 결점을 가지고 있다. 이에 대해, 평면편광을 이용하는 방법은 감도는 높으나, 음압에 비례한 가시화상이 얻어지지 않으며, 평면편광 상태로는 정량적인 음압 측정이 어렵다(4,6).

이에 대해, 본 연구에서는 평면편광을 이용한 경우와 같은 감도를 가지며, 원편광을 이용한 경우와 같은 음압에 비례한 가시화상이 얻어지는 방법 「광탄성화상합성법」을 적용했다(7). 이 방법은 2차원적인 음장의 퍼짐을 가정해 해석한 것으로, 특징으로는 고체중의 초음파 pulse를 높은 감도로 가시화할 수 있으며, 음압에 비례한 가시화상이 얻어지는 것과 음압의 절대치를 구할 수 있다는 것이다.

주축 방향이 일치하고 있는 경우로, 빛의 밝기 I_1 은 광탄성 법칙으로부터 다음 (1)식과 같이 표시할 수 있다.

$$\delta = cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad I_1 = a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \delta / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

식에서, c 는 광탄성 계수, d 는 시험편 두께, σ_1, σ_2 는 주응력(음압), θ 는 주응력 σ_1 방향과 편광자의 주축 방향이 이루는 각도, a 는 상수이다.

제 2화상은 주응력(σ_1)방향과 편광자의 주축 방향이 이루는 각도가 45°되도록 같은 응력장을 편광자와 검광자의 직각상태에서, 45°회전했을 때 얻어지는 I_2 는 다음 (2)식으로 된다.

$$I_2 = a^2 \cos^2 2\theta \sin^2 \delta / 2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, I_1 과 I_2 를 합성하면 합성 화상에서의 빛의 밝기 I 는 식(3)에서 보는 바와 같이 평면편광의 각도 θ 에 의존하지 않는 관계가 얻어진다.

$$I = I_1 + I_2 = a^2 \sin^2 \delta / 2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

이때, 초음파의 응력은 극히 작기 때문에 다음 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

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

고체내를 전파하는 초음파의 주응력 σ_1 과 σ_2 의 관계를 고려할 때, 종파는 인장 압축 응력이 상호 존재하는 응력파이므로 $\sigma_2 = 0$ 가 되며 음압은 σ_1 의 식으로 표시된다. 한편 횡파는 전단 응력이 전파해 가는 파로, 이것을 τ 로 표시한다면, $2\tau = (\sigma_1 - \sigma_2)$ 의 관계에 있기 때문에 횡파의 음압은 $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ 로 표시 된다. 이 관계를 이용해 초음파의 음압 σ_1 는, 합성 화상에서의 빛의 밝기 I 를 측정하는 방법으로부터 다음 식 (5)와 같은 절대치를 얻을 수 있다.

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

식에서 A 는 상수, 종파의 경우 $A = 2/\sqrt{acd}$, 횡파의 경우 $A = 1/\sqrt{acd}$ 이다. 그러므로 같은 음압의 초

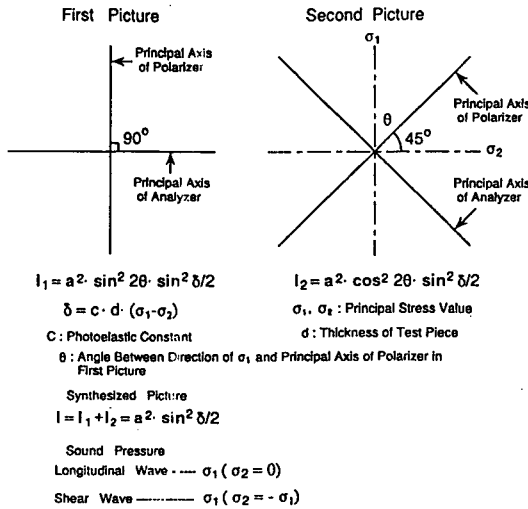


Fig. 1. Synthesized photoelastic method

Fig. 1은 평면편광을 이용한 광탄성 장치에서 얻어지는 2개의 화상에서의 임의의 점에 대한 빛의 밝기 I_1, I_2 를 표시한 것이다. 제 1화상은 주응력(σ_1, σ_2) 방향과 편광자(polarizer)와 검광자(analyzer)의

하는 초음파의 방향과 강도의 관계를 표시한 것으로, 가시화법을 이용해 초음파의 지향성을 측정하는 경우 그 중심점을 최초로 결정할 필요가 있다. 음압의 가시화상에서 지향성의 중심점을 구하는 경우, 가시화 시킨 초음파의 파면의 곡률을 조사해, 그 곡률의 중심을 지향성의 중심점으로 했다. 지향성을 구하는 방법은, Fig. 4와 같이 지향성을 조사하는 초음파가 포함되도록 2개의 원(r_1 , r_2)을 그려, 2개의 원에 둘러 쌓인 영역내의 θ 방향의 최대 음압과 그 위치를 구해 사각탐촉자의 지향성으로 했다⁸⁾.

본 논문에서는 음압 해석을 횡파에 한정했다.

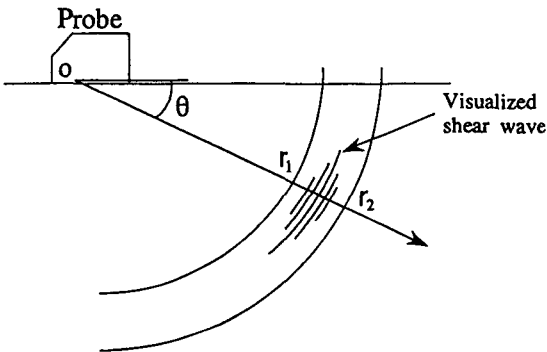
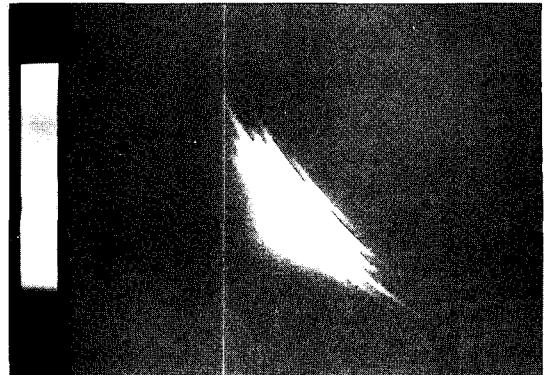


Fig. 4. Determination of directivity of shear wave emitted from angle probe

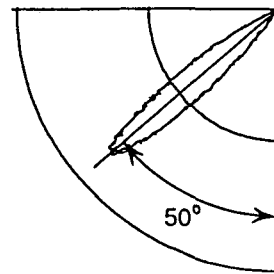
5. 사각탐촉자의 지향성 측정 결과

Fig. 5는 주파수 2MHz, 굴절각 45°의 사각탐촉자로부터 나온 횡파의 가시화상과 지향성을 나타낸 것이다. 가시화상은 횡파의 전파 거리 R이 사각탐촉자의 입사점의 부근으로부터 15mm가 되는 곳에서 얻었다. 50°방향에 최고로 강한 횡파가 방사되고 있으므로 사각탐촉자의 굴절각은 50°이다. 또, 지향성의 형태가 굴절각 50°를 중심으로 대칭하고 있음을 알 수 있다. 탐촉자의 굴절각이 측정치와 다른 값을 나타내고 있는 것은 실험편(횡파 : 3420m/sec) 과 강(鋼)(횡파 : 3230 m/sec)의 음속의 차이에 의한 것이다.

Fig. 6은 주파수 4MHz, 굴절각 45°의 사각탐촉자로부터 나온 횡파의 지향성을 나타낸 것이다. 이 사각탐촉자의 굴절각은 49°이며, 초음파의 음압이 최대 음압치의 6dB되는 곳을 기준으로 하여 계산한



(a) Visualized shear wave



(b) Directivity(R=15mm)

Fig. 5. Directivity of 2MHz, 45° probe

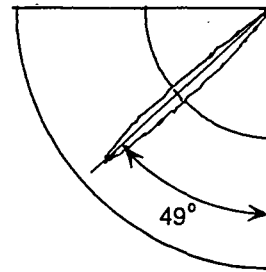
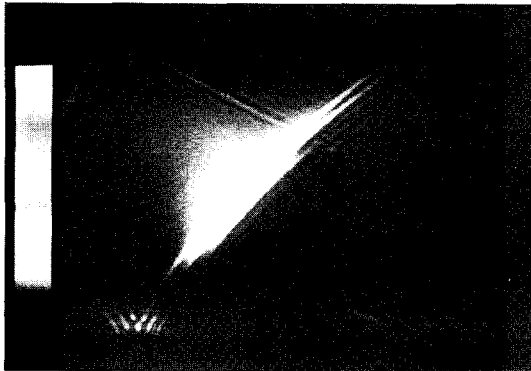


Fig. 6. Directivity of 4MHz, 45° probe(R=15mm)

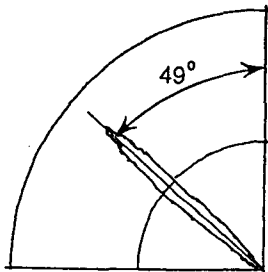
지향각은 5°이다. Fig. 5의 2MHz의 지향각 8°와 비교하여 지향각이 작아짐에 따라, 4MHz쪽의 지향성이 날카롭게 되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 사각탐촉자로부터 나온 횡파를 glass 시험편의 저면에 반사시킨 경우에 얻어진 반사횡파의 가시화상과 지향성을 나타낸 것이다. 반사횡파의 각도는 49°로, 탐촉자로부터 나온 횡파의 굴절각과 일치하고 있는 것으로부터, 초음파가 평면반사에서는 鏡面 반사를 하고 있음을 확인했다.

Fig. 8(a)는 주파수 4MHz, 굴절각 60°의 사각탐촉

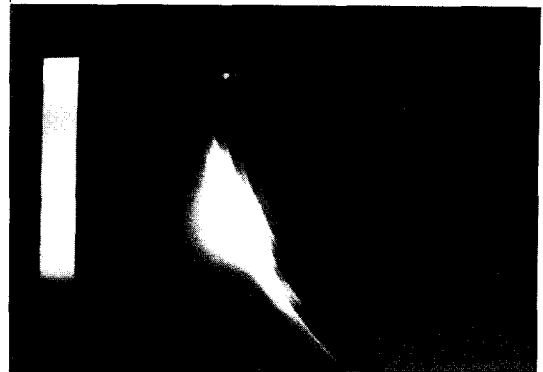


(a) Visualized shear wave

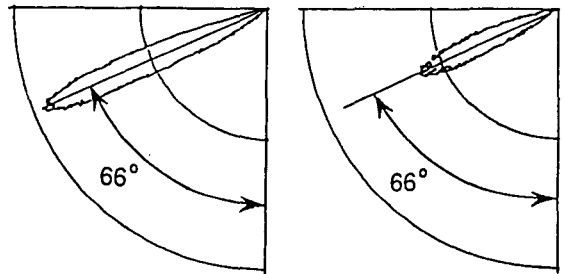


(b) Directivity

Fig. 7. Directivity of reflected shear wave from base of test specimen(4MHz, 45°)



(a) Visualized shear wave(R=32mm)



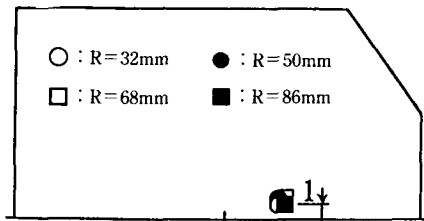
(b) Directivity(R=32mm) (c) Directivity(R=86mm)

Fig. 8. Directivity of 4MHz, 60° probe

자료부터 나온 횡파의 음압의 가시화상으로, 횡파의 전파 거리 R은 32mm이다. Fig. 8(b), (c)는 횡파의 전파 거리 R이 32, 86mm 되는 곳에서 얻은 지향성이다. 사각탐촉자로부터 나온 횡파가 원통형으로 퍼져 가는 것과 사각탐촉자의 굴절각이 66°방향에 있음을 알 수 있다. 또 지향성의 형태가 相似形에 있는 것으로부터 사각탐촉자의 지향성은 전파 거리가 멀어져도 변하지 않으며, 지향성의 강도는 전파 거리에 따라 약해지고 있음을 알 수 있다.

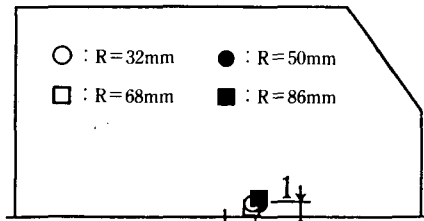
Fig. 9는 주파수 2MHz, 굴절각 60°의 사각탐촉자로부터 나온 횡파의 전파 거리 R이 32, 50, 68, 86mm 되는 곳에서 구한 지향성의 중심 위치로, 지향성의 중심 위치는 사각탐촉자의 입사점으로부터 4mm 뒤쪽에, 탐촉자의 내부에 1mm 들어간 한 점에 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 주파수 4MHz, 굴절각 60°의 사각탐촉자로부터 나온 횡파의 지향성의 중심을 구한 것이다. 지향성의 중심 위치는 사각탐촉자의 입사점으로부터



The incident point

Fig. 9. The center of directivity of 2MHz, 60° probe



The incident point

Fig. 10. The center of directivity of 4MHz, 60° probe

터 2mm 뒤쪽에, 탐촉자의 내부에 1mm 들어간 한 점에 거의 일치하고 있었다.

이상의 결과로부터, 사각탐촉자로부터 방사되는 초음파는 원통형의 퍼짐을 하고 있으며, 초음파의 전파 거리에 의해 지향성은 변하지 않음을 알 수 있었다, 또 2MHz와 4MHz의 사각탐촉자에서는 4MHz 쪽이 날카로운 지향성을 가지고 있었으며, 지향성의 형태는 굴절각을 중심으로 대칭하고 있었다.

6. 결 론

초음파 pulse의 음압을 정량적으로 측정하는 광탄성화상합성법을 적용해, 사각탐촉자의 지향성과 지향성의 중심 위치를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탐촉자의 지향성은 초음파의 전파 거리에 의해 변하지 않았으며, 지향성의 강도는 전파 거리에 따라 약해지고 있었다.
- 2) 사각탐촉자의 지향성의 중심 위치는 탐촉자의 입사점으로부터 뒤쪽에, 탐촉자의 내부에 들어간 한 점에 거의 일치하고 있었다.
- 3) 2MHz와 4MHz의 사각탐촉자에서는, 4MHz쪽이 날카로운 지향성을 가지고 있었으며, 지향성의 형태는 굴절각을 중심으로 대칭하고 있었다.
- 4) 초음파가 평면반사에서는 鏡面반사를 하고 있음을 확인했다.

참 고 문 헌

- 1) J. and H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag, (1990), pp. 58-92
- 2) A. Erhard, H. Fuchs, W. Mohrle and P. Matscholl, "Characterization of Sound Field Parameters of Ultrasonic Probes using a Computer-controlled Measurement and Data Acquisition System," NDT INTERNATIONAL, Vol. 18, No. 6(1985), pp. 359-362
- 3) 日本學術振興會製鋼第19委員會編, 超音波深傷法, (1977), pp. 5-50
- 4) K. G. Hall, "A Qualitative Evaluation of Variable-Angle Ultrasonic Transducers by the Photoelastic Visualization Method," Ultrasonics, November (1977), pp. 245-252
- 5) K. G. Hall, "Observing Ultrasonic Wave Propagation by Stroboscopic Visualization Methods," Ultrasonics, July (1982), pp. 159-167
- 6) K. G. Hall, "Visualization Technique for the Study of Ultrasonic Wave Propagation in the Railway Industry," Materials Evaluation, June (1984), pp. 922-929
- 7) 伊達和博, 島田平八, "固體內超音の光彈性可視化法による定量評價" 日本非破壊検査協會誌, Vol.36, No. 9(1987), pp. 605-612
- 8) 南榮鉉, 伊達和博, 高橋秀明, "可視和法による超音波の指向性解析," 日本非破壊検査協會誌, Vol. 42, No. 1(1993), pp. 17-22

The Directivity Measurement of Angle Probe by Photoelastic Visualization Method

Y. H. Nam and K. Date
Tohoku University, Japan

Abstract It is important for an ultrasonic testing to know the sound pressure field and the directivity of ultrasonic waves propagating in a solid. The directivity of ultrasonic wave is closely related to the sensitivity, the scanning pitch, the arrangement of angle probe, and the defect kind in ultrasonic testing.

This paper describes on the directivity measurement of ultrasonic wave using ultrasonic wave visualization method. The directivity of the shear wave emitted from the angle probes were constant during propagation. The difference of directivity was existed between 2MHz and 4MHz angle probes. The centers of directivity were located backward from the incident poing and inside of the angle probe and were not changed during the wave propagation.

(Received : February 24, 1994)