

탐촉자와 표면 결함에 대한 지향성의 수치 실험에 관한 연구

남 영 현

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

요 약 초음파 검사는 초음파가 한 방향으로 진행한다고 하는 지향성을 이용하고 있으며, 지향성은 초음파의 전파방향 및 음압분포의 관계를 나타내고 있다. 본 논문에서는 가시화법을 적용하여 사각탐촉자로부터 방사되고, 표면결함으로부터 산란한 횡파의 지향성을 조사하고, 이런 실험결과들을 연속파를 기초로 한 기존 이론과 비교하였다. 연속파이론의 적용성이 d/λ 의 변수로 고찰되었다.(d 는 진동자 및 결함의 크기, λ 는 파장) 사각탐촉자의 경우, 실험결과들은 주극에서 이론적으로 계산한 지향성과 잘 일치하고 있었으며, 결함의 크기가 파장보다 작은 경우에도, 반사파에는 명확한 지향성이 관찰되었다. 파장에 대한 결함의 크기의 비가 동일할 때 결함으로부터 반사파의 지향성은 주파수의 차이에도 불구하고 거의 일치하였다. d/λ 가 1.5 이상일 때 측정된 지향성들은 이론적으로 계산한 지향성과 거의 동일하였다.

1. 서론

초음파탐상 시험은 초음파가 한 방향으로 진행한다는 지향성을 이용하고 있다. 이 지향성은 고체 내를 전파하는 초음파 펄스(pulse)의 전파방향과 음압의 관계를 정량적으로 표시한 것으로서, 탐상방법 및 탐상감도, 주사간격, 결함의 특성 및 위치 등의 결정에 밀접한 관계가 있다.

지향성 해석에 대한 지금까지의 연구는, 고체 내를 전파하는 초음파의 음압을 직접 측정하는 일이 가능하지 않았기 때문에, 음향이론으로 연속파를 이용한 해석이 주류를 이루어왔다.¹⁻⁵⁾ 그러나, 고체 내를 전파하는 초음파는 탄성파로서 종파, 횡파, 표면파 등의 파동 모드(mode)가 존재한다. 또한, 펄스파가 광대역 주파수 성분을 가지고 있는 특성을 고려할 때 초음파 펄스의 지향성에 대한 상세한 검토는 중요한 과제가 되고 있다. 본 논문에서는 정량적으로 음압을 측정하기 위하여 초음파의 가시화법을 적용하여 지향성을 조사하였으며, 공칭주파수 2MHz

와 4MHz, 굴절각 45°와 60°의 사각탐촉자를 이용하여 탐촉자의 지향성 및 표면결함으로부터의 반사파의 지향특성을 측정하였다. 또한, 이론계산식(음향이론, 연속파)을 이용하여 계산한 지향성과 가시화법으로부터 구한 지향성을 비교 검토하였다. 또, 이와같은 결과로부터 지향성을 표시하는 변수 d (진동자 및 결함의 크기)/ λ (파장) 값의 크기에 따른 종래의 지향성 이론의 적용범위를 조사하였다.

2. 고체내 초음파의 가시화

Fig. 1은 본 논문에서 이용한 음압해석 시스템의 모형도이다. 이 시스템은 광탄성화성합성법의 원리를 기초로 하여 컴퓨터로 화상의 가산처리(加算處理)를 수행하여 합성화상을 만들도록 되어 있다.

음압해석을 위하여 사용한 컴퓨터는 PC-9801이며 음압분포 측정결과는 printer 및 plotter에 출력 할수 있다. Interface controller는 실험편내를 전파하는 초음파 펄스를 정지 상태로 가시화 하기 위하여 컴퓨터

로부터 신호를 받아 stroboscope의 발광, 초음파의 송신, CCD 카메라의 화상입력등의 작동시간을 10nsec 단위로 설정하여 trigger 펄스를 보내는 장치이며, real-time digitizer는 가시화상의 입력,입력화상의 합성 등의 신호를 보내 실제화상 처리를 행한다. 초음파 탐상기는 USIP-11(Krautkramer)를 이용 하였으며, 실험편에 초음파 펄스의 입사와 동시에 일정한 지연시간을 가한 trigger 펄스를 stroboscope에 보내 stroboscope를 발광시킨다. Stroboscope의 발광시간이 실험편내를 전파하는 초음파 펄스의 속도에 비해 대단히 짧기때문에 CCD 카메라를 통한 초음파 펄스는 정지상태로 관찰 할수 있다. 본 실험에서는 발광 시간이 20nsec의 stroboscope(菅原 研究所, NP-10)를 이용 하였으며 발광 시간 중의 초음파 펄스의 이동량은 종파가 0.11mm, 횡파가 0.07mm이다. 펄스 모터는 합성화상을 만들기 위하여 편광자와 검광자의 편광 방향을 바꾸기 위한 것으로 컴퓨터 프로그램에 의해 편광판을 회전시킨다.

이와같은 방법으로 합성된 화상의 빛의 밝기 I로부터 음압 P의 분포를 구하기 위하여 식(1)을 이용하였다.^{6,7)}

$$P = A \sqrt{I} \quad (A: 상수) \quad \dots\dots\dots (1)$$

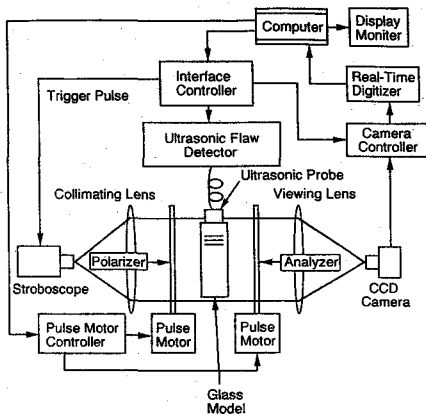


Fig. 1. Diagram of sound pressure visualization system.

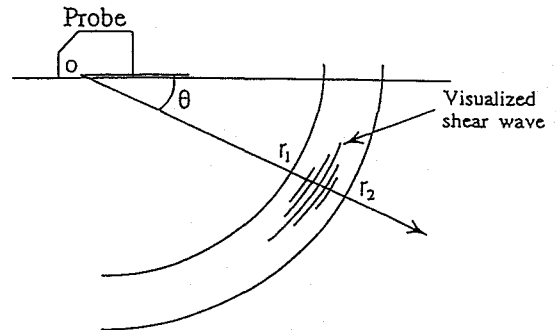
본 논문에서는 지향성을 구하는 것이 목적이므로,

식(1)의 A에 대하여 특별히 보정하지 않았으며, 가시화상으로부터 상대적인 음압분포를 얻어냈다.

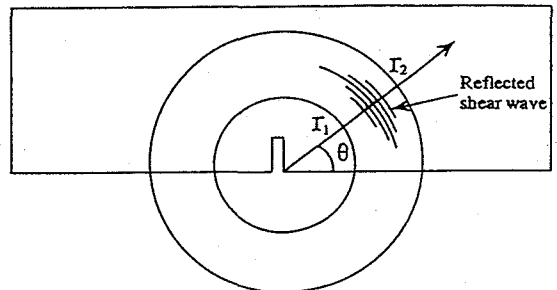
3. 지향성 해석법

초음파의 지향성은 한 점을 중심으로 방사하는 초음파의 방향과 강도의 관계를 표시한 것인데, 가시화법을 이용하여 초음파의 지향성을 구하는 경우에는 그 중심점을 최초로 결정할 필요가 있다. 음압의 가시화상에서 지향성의 중심점을 구하는 경우, 가시화시킨 초음파 펄스 파면의 곡률을 측정하여 그 곡률의 중심을 지향성의 중심점으로 정하였다.

지향성을 구하는 방법은, Fig. 2와 같이 지향성을 조사하는 초음파가 포함되도록 2개의 원(r_1, r_2)을 그려서 2개의 원에 둘러쌓인 영역내의 θ 방향의 최대 음압과 그 위치를 구하여 탐촉자 및 표면결합의 지향성으로 선택하였다.^{7,8)}



(a) Shear wave emitted from angle probe



(b) Shear wave reflected from surface defect

Fig. 2. Determination of directivity of ultrasonic wave.

4. 실험 방법

본 실험에 사용한 사각탐촉자는 Table 1에 표시한 것과 같이 공칭주파수는 2MHz 와 4MHz, 굴절각 45° 와 60° 의 4종류를 사용하였다. 이때 실측굴절각은 가시화법에 의한 지향성 해석 결과로부터 구하여졌다.

Fig. 3(a) (b)는 본 실험에서 사용된 pyrex glass 로 만든 실험편의 형태를 나타내고 있다. (a)는 사각탐촉자의 지향성을 측정하기 위한 실험편이며, (b)는 표면결함으로부터 반사파의 지향성을 측정하기 위한 실험편으로서 폭 0.3mm, 결함의 깊이 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0mm 의 slit 결함을 제작하였다.

사각탐촉자의 지향성은, (a)의 실험편에서 탐촉자의 입사점 부근으로부터 전파거리 R 이 90mm 가 되는 위치에서 회파를 가시화하여 해석하였다. 결함으로부터의 반사지향성은, 탐촉자를 echo의 높이가 최대가 되는 위치에 놓고, 반사회파의 가시화상을 제작함으로써 해석하였다. 반사회파의 가시화상은 전파거리가 결함의 개구부(開口部)로부터 약 10mm 되는 지점에서 얻었다.

Table 1. Angle probes used in experiment.

Type of Angle Probe	Actual Refraction Angle in Pyrex glass(degree)
2Z8×9A45	50
4Z8×9A45	49
2Z8×9A60	65
4Z8×9A60	66

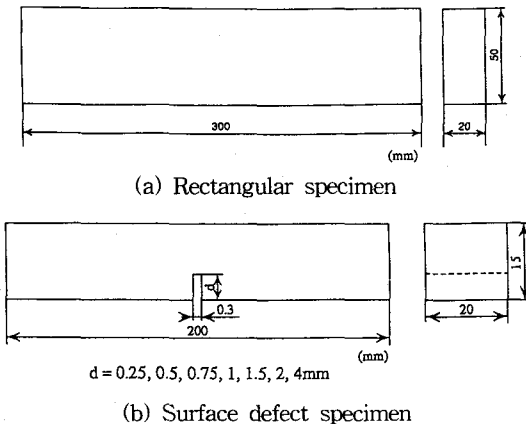


Fig. 3. Dimensions of test specimen.

5. 지향성의 이론 계산

5. 1. 사각탐촉자

Fig. 4는 사각탐촉자의 지향성의 계산 모델을 나타내고 있다. 사각탐촉자의 지향성은 기존 이론계산식^{9),10)}을 이용하여 계산하였으며, 그것은 식(2)와 같다.

$$D_p(\theta) = \sin E/E \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta / \cos \alpha \cdot t(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

$$E = K_{IL} \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$K_{IL} = 2\pi/\lambda_{IL} = 2\pi f/C_{IL}$$

이 식에서 sinE/E는 크기가 2d인 방형(方形) 진동자의 썩기 내에 대한 종파의 지향성이며, cosβ는 썩기가 고체이기 때문에 부가한 지향계수이고, cosθ/cosα는 각도함수이며, t(θ)는 썩기로부터 pyrex glass로의 음압통과율¹¹⁾이고, C_{IL}와 λ_{IL}은 각각 썩기의 종파음속 및 파장이다. 종파임계각은 Fig. 5에서 보듯이 38.7° 이었고, Table 2에 표시된 바와 같이 썩

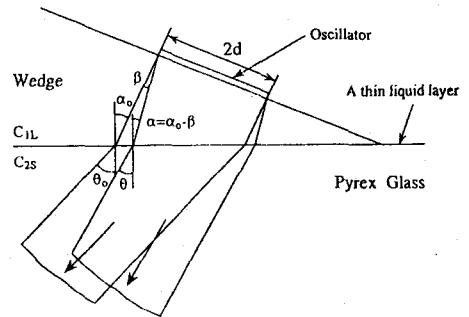


Fig. 4. Calculation model for the directivity of an angle probe.

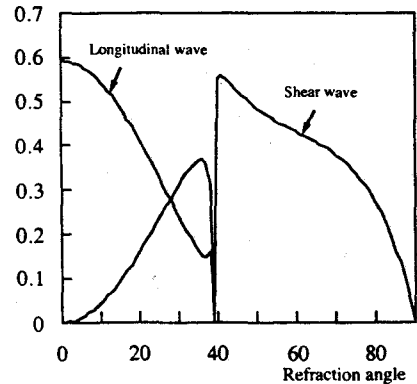


Fig. 5. Transmission coefficient of sound pressure from wedge to pyrex glass.

Table 2. Materials and material constants

Material	Sound Velocity(m/sec)		Density (kg/m ³)
	L wave	S wave	
Acrylic Resin	2730	1430	1180
Pyrex Glass	5490	3420	2119

L and S indicate longitudinal and shear respectively

기재료는 아크릴수지이고, 실험편 재료는 pyrex glass라 가정하여 이들의 재료상수를 사용하였다.

5. 2. 표면 결함

Fig. 6 에 나타난 바와 같이 대상(帶狀)결함의 반사지향성 계산모델을 이용하여 표면결함의 반사지향성을 측정하였다. Werner와 Ammirato^{1~5)}에 의하면, 대상결함에 초음파를 경사입사시킨 경우의 반사지향성 $D_r(\alpha, \beta)$ 는 식(3)과 같이 나타난다.

$$D_r(\alpha, \beta) = 2d \cdot \cos\alpha \cdot \sin X_t / X_t \dots\dots\dots (3)$$

$$X_t = 2\pi d / \lambda \cdot (\sin\beta - \sin\alpha)$$

- 2d : 대상결함의 높이
- $\alpha = \pi/2 - \theta$: 결함의 법선에 대한 입사각
- β : 반사각, λ : 파장
- θ : 탐촉자의 굴절각

이 식은 대상결함의 폭d 와 파장 λ 의 관계로부터 반사지향성이 크게 변하는 것을 의미하고 있다. 그러나, 이 계산모델은 실험편의 저면에서 전반사한다

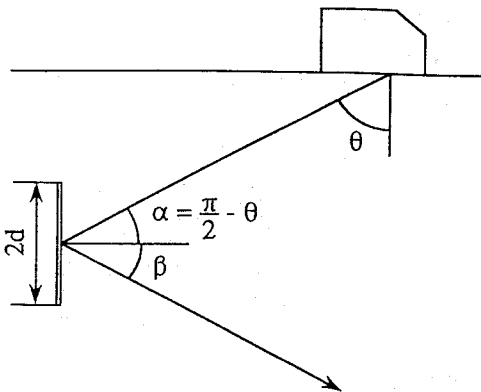


Fig. 6. Scattering pattern of elastic waves by strip like defect.

는 것을 전제조건으로 하고 있기 때문에, 45° 탐촉자의 결과는 이 계산모델을 이용하여 비교할 수 있으나, 60° 탐촉자의 결과는 비교할 수 없다

6. 실험 결과와 계산 결과의 비교

6. 1. 사각탐촉자의 지향성

Fig. 7(a)는 2Z8×9A45의 사각탐촉자를 이용한 지향성의 실험결과(o) 와 이론계산식에 의한 계산결과(실선)를 비교한 것이다. 종축은 가시화법과 이론계산식으로부터 구한 각각의 최대음압에 대한 음압비를 표시하며, 횡축은 pyrex glass에 대한 황파의 굴절각을 표시하고 있다. 또한, 이론계산에 이용한 사각탐촉자의 굴절각은 가시화법으로부터 측정된 사각탐촉자의 굴절각으로부터 썩기의 각도를 구하여 계산되었다, d_t/λ_{LL} 는 2.92이고, 실험과 이론이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)은 4Z8×9A60의 사각탐촉자에 대한 지향성의 실험결과와 이론계산식에 의한 계산결과를 비교한 것인데, d_t/λ_{LL} 는 5.88 이고 지향성의 형태는 탐촉자의 굴절각을 중심으로 한 주극의 영역에서 잘 일치하고 있으며, Fig. 7(a)와 비교할 때 주파수가 높을 수록 지향성이 날카롭게 되었음을 알 수 있다. 또한, 이론계산에서 나타나고 있는 부극은 가시화 실험에서 확인되지 않고 있는데, 이것은 연속파 음장과 펄스파 음장의 차이 때문이라고 사료된다.

6. 2. 표면결함의 지향성

Fig. 8(a), (b), (c), (d)는 4MHz 사각탐촉자를 이용하여 표면결함에 대한 반사지향성의 실험결과(점선)와 계산결과(실선)를 비교한 것인데, 표면결함의 깊이 d는 0.25, 0.5, 1.5, 2.0mm 이며 d/λ 는 각각 0.29, 0.59, 1.75, 2.34 이다. 여기서 알 수 있는 것은 d/λ 가 커짐에 따라서 실험치와 계산치가 비교적 잘 일치되고 있다는 점이다. 또한 이 실험결과는 파장보다 작은 결함에 대해서도 명확한 반사지향성이 있었고, 이론치와 실험치가 크게 차이남을 보여준다.

Fig. 9는 2MHz 사각탐촉자를 이용한 경우로서, d는 0.5, 4.0mm 이고, d/λ 는 각각 0.29, 2.34 이다. 이 그림과 4MHz 사각탐촉자의 실험결과 Fig. 8(a), (d)를 비교할 때, d/λ 가 동일하면 표면결함에 대한 반

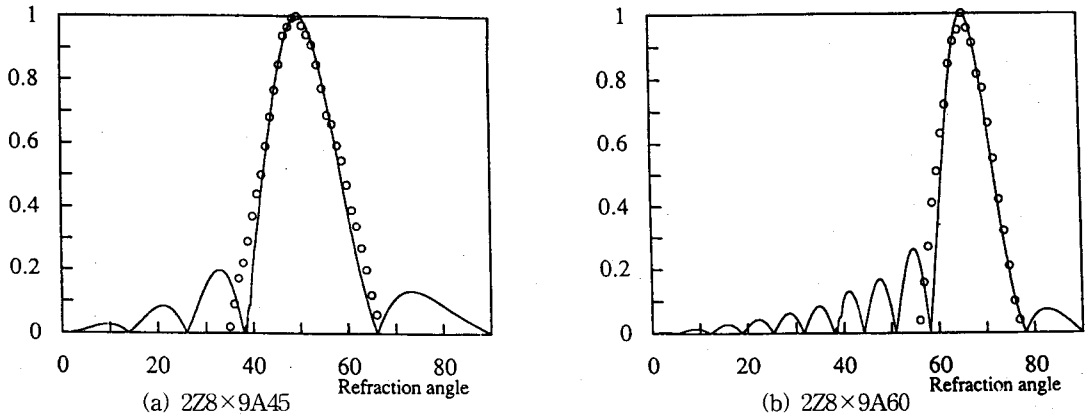
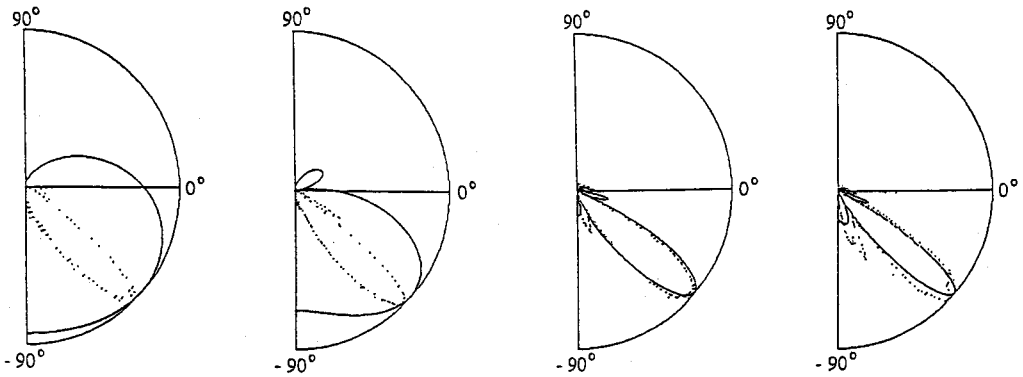


Fig. 7. Comparison of the experimental with calculated results for the directivity of an angle probe.



(a) $d=0.25\text{mm}$, $d/\lambda=0.29$ (b) $d=0.5\text{mm}$, $d/\lambda=0.59$ (c) $d=1.5\text{mm}$, $d/\lambda=1.75$ (d) $d=2\text{mm}$, $d/\lambda=2.34$

Fig. 8. Comparison of the experimental with calculated results for the directivity of 4MHz shear waves reflected from surface defect. (Angle probe: 45°)

사지향성은 사각탐촉자의 사용주파수에 관계없이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

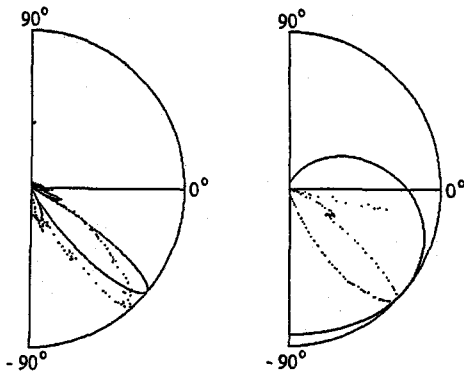
6. 3. 고찰

지금까지는 사각탐촉자의 공칭주파수 2MHz와 4MHz, 굴절각 45° 와 60° 인 경우에, 사각탐촉자의 지향성과 표면결함에 대한 반사지향성을 측정하여, 이론계산식에 의한 지향성과 본 논문에서 제안한 가시화법에 의한 지향성을 비교 검토하였다.

사각탐촉자의 지향성의 경우에, 탐촉자의 굴절각을 중심으로 한 주극의 영역에서 실험치와 이론치는 일치하였으나, 부극의 영역에서는 실험치가 측정되지 않았는데, 그 이유는 연속파의 파동이론으로 다음과 같이 설명할 수 있다. 음원을 미소한 요소로

분할하여 생각하면, Fig. 10과 같이 진동자의 좌단면으로부터 X의 거리에 있는 미소음원과 이 음원으로부터 d만큼 떨어진 음원을 고려할 때, 이 두 음원에 의한 θ 방향의 간섭을 고찰한다. 2개의 음원으로부터 발생하는 파는 경로차 Δ 가 $\lambda/2$ 의 홀수배일 때 상쇄되고, 그 경로차가 λ 의 배수일 때는 합성파의 진폭이 극대화된다. 이 2개의 미소음원을 완화(緩和)($0 < X < d$) 하여도, θ 방향의 간섭은 변하지 않기 때문에 부극이 발생된다.

Fig. 11은 2MHz, 45° 탐촉자로부터 입사된 횡파의 진행방향의 음압분포[Fig. 2(a)의 $r_2 \sim r_1$ 선상의 음압변화]를 나타낸 것이다. 가시화법의 원리로부터 각각의 첨두치(peak)는 음압의 절대치를 표시하기 때문에 첨두치의 간격은 $\lambda/2$ 에 대응하고 있다. 지향



(a) $d=0.5\text{mm}$, $d/\lambda=0.29$ (b) $d=4\text{mm}$, $d/\lambda=2.34$

Fig. 9. Comparison of the experimental with calculated results for the directivity of 2MHz shear waves reflected from surface defect.

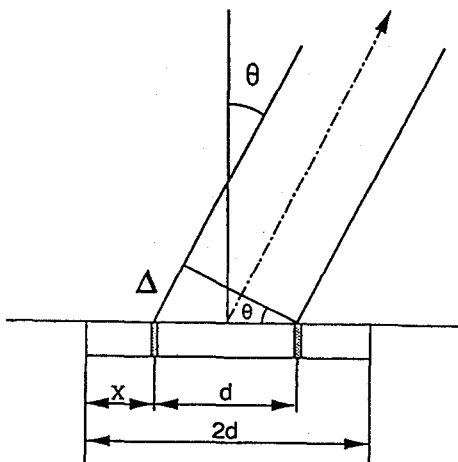
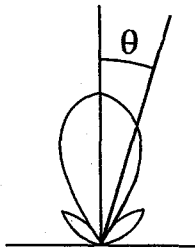


Fig. 10. Describe the interference pattern arising from two point sources.

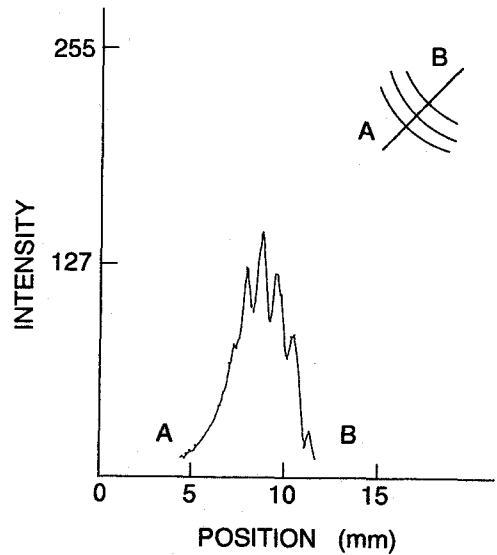


Fig. 11. Intensity distribution of the visualized wave on the A-B line.

성을 측정하기 위하여 가시화한 배율이 크지 않았으며, stroboscope의 발광시간 때문에 이상적인 산과 골의 형태로 되어 있지 않았다. 따라서, 음압의 최대 침투치가 한 파장의 배수 만큼 어긋나서 중첩되었을 때에도 합성파의 진폭은 연속파와 같이 크지 않았다. 본 실험에서 사용된 펄스파는 이와같은 음압파형을 가지고 있기 때문에 부극이 발생하지 않았다.

한편, d/λ 값에 주목하면, 진동자크기 $2d_s$ 는 8mm 이므로 d_s/λ 는 2.92 및 5.88 이었다. 표면결함에 대한 반사지향성의 경우에, 결함의 깊이 d 는 0.25~4.0mm 이고, d/λ 는 0.15~4.7 이었다. d/λ 가 약 1.5 보다 작은 경우에는 실험치와 이론계산치는 큰 차이가 있었으나, d/λ 가 약 1.5 이상에서는 비교적 잘 일치하고 있었다.

이상의 결과로부터 음향이론에서 연속파를 대상으로 한 이론계산식을 이용하여 지향성을 평가하는 경우에, d/λ 가 약 1.5 이상일 때 적용하여야 한다고 사료된다.

7. 결론

고체 내를 전파하는 미소한 초음파 펄스의 음압

을 정량적으로 측정하는 광탄성화상합성법을 적용하여, 사각탐촉자의 지향성 및 표면결함에 대한 반사지향성을 측정하였다. 또, 각각의 이론계산식을 적용하여 계산한 지향성과 가시화법으로부터 구한 지향성을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사각탐촉자의 경우, 지향성의 형태는 굴절각을 중심으로 한 주극의 영역에서 잘 일치하고 있었다.
2. 결함의 크기가 파장보다 작은 경우에도 명확한 반사지향성이 나타나고 있었다.
3. d/λ 가 일치하면, 사용주파수가 달라도 표면결함으로부터의 반사지향성은 거의 일치하고 있었다.
4. 음향이론에서 연속파를 대상으로 한 이론계산식을 적용하여 사각탐촉자 및 표면결함의 지향성을 평가하는 경우, d/λ 가 약 1.5 이상일 때 이론계산식의 적용이 가능하였다.

참고 문헌

- 1) R. Werneyer and U. Schlengeremann "The Reflection of Ultrasonic Waves by Surface Cracks and Notch-Shaped Reference Defects-Introduction and Model Conception", Materialpruf. 13, Nr. 7(Juli 1971), pp. 213-218
- 2) R. Werneyer and U. Schlengeremann, "The Reflection of Ultrasonic Waves by Surface Cracks And Notch-Shaped Reference Defects-Consequences for Practice," Materialpruf. 13, Nr. 9(Sep. 1971), pp. 298-300

- 3) S. Serabian "Ultrasonic Probanbility of Detection of Subsurface Flaws", Materials Evaluation (March 1982), pp. 294-298
- 4) S. Serabian "Pulsed Ultrasonic Flaw Detection Model", Materials Evaluation (June 1985), pp. 873-878
- 5) F. V. Ammirato "A Calculational Model for the Shear Wave Echo from Subsurface Planar Flaws", Materials Evaluation (Jan 1977), pp. 46-50
- 6) 伊達和博, 島田平人 "固體內超音波の光彈性可視化法による定量評價" 日本非破壊検査學會誌, Vol. 36, No. 9(1987), pp. 605-612
- 7) 南榮鉉, 伊達和博, 高橋秀明 "可視化法による超音波の指向性解析" 日本非破壊検査學會誌, Vol. 42, No. 1(1993), pp. 17-22
- 8) Y. H. Nam, K. Date, H. Takahashi "Evaluation of Ultrasonic Wave Directivity by Visualization Method" Proceedings of International Symposium(NDT & SSM, FENDT 92), pp. 29-36
- 9) 日本學術振興會編; 超音波探傷の理論と基礎に関する研究報告書 (1974), pp. 95-130
- 10) 日本學術振興會編; 超音波探傷器用探觸子の音場に関する研究報告書 (1978), pp. 1-517
- 11) G. J. Kuhn and A. Lutsch "Elastic Wave Mode Conversion at a Solid-Solid Boundary with Transverse Slip", JASA, Vol. 33 (July 1961), pp. 949-954

Numerical Simulation of Directivity for Probe and Surface Defect

Young-Hyun Nam

Korea Research Institute of Standards and Science,
Materials Evaluation Center

Abstract An ultrasonic testing uses the directivity of the ultrasonic wave which propagates in one direction. The directivity is expressed as the relationship between the propagate direction and its sound pressure. This paper studied the directivity of shear waves emitted from angle probes and scattered from surface defects by using visualization method. These experimental results were compared with the theory which was based on the continuous wave. The applicability of continuous wave theory was discussed in terms of the parameter d/λ ; where d is transducer or defect size and λ is the wavelength. In the case of angle probes, the experimental results show good agreement with theoretical directivity on the principal lobe. When defect size was smaller than the wavelengths, clear directivity in the reflected wave was observed. In the case of the same ratio of defect size to wavelength, the directivity of reflected waves from the defect show almost the same directivity in spite of frequency differences. When the d/λ is greater than 1.5, measured directivities almost agreed with the theoretical one.

(Received: December 16, 1995)