〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.9.796

초음파 사각 트랜스듀서의 최적설계를 위한 지향성 해석

남 영 현†

(2008년 6월 10일 접수, 2008년 7월 24일 수정, 2008년 7월 28일 심사완료)

Directivity Analysis for Optimal Design of Ultrasonic Angle Beam Transducer

Young Hyun Nam

Key Words: 사각 트랜스듀서(Angle Beam Transducer), 가시화법(Visualization Method), 지향성(Directivity), 설계(Design)

Abstract

Ultrasonic testing uses the directivity of the ultrasonic wave, which propagates in on direction. The directivity is expressed as the relationship between the propagate direction and its sound pressure. The directivity of an ultrasonic wave is related to the choice of probe arrangement, testing sensitivity and scanning pitch and correct measurement of defect size and location. This paper describes on the directivity measurement of ultrasonic wave using the visualization method. The directivity of shear wave emitted from the angle beam transducer were constant during propagation. The difference of directivity was existed between 2 ㎒ and 4 ㎒ angle beam transducers. When these experimental results were compared with the theory which was based on the continuous wave, it showed good agreement with theoretical directivity on the principal lobe.

1. 서 론

초음파검사는 초음파 펄스가 한 방향으로 진행한다고 하는 지향성을 이용한 것으로, 초음파 트랜스듀서가 가지는 초음파의 음압분포 및 지향특성을 아는 일은 트랜스듀서를 최적설계하고 제작하는 데 있어서 중요한 인자가 되고 있다. 송신과 수신을 한 개의 진동자로 검사하는 표준형 초음파 트랜스듀서의 경우, 트랜스듀서가 가지는 지향성은 초음파검사의 감도, 주사간격, 최적의 검사방법, 정확한 결함의 크기 및 위치 측정에 기준이 되고 있다.[1,2] 또한 결함에서의 반사지향성은 결함의 형상 및 방향에 따라 변하기 때문에 결함의 반사지향성을 아는 일은 검사의 신뢰도를 높이고, 검사결과를 해석하는데 있어서 중요한 정보를 제공한다.

종래에 초음파 사각 트랜스듀서(Angle beam transducer)의 지향성은 반원형의 판상시험편의 중심에 트랜스듀서를 올려놓고, 원주방향으로 초음파를 방사(Emission)하여 방사된 신호를 Electrodynamic sensor를 사용하여 판상시험편 주위를 주사(Scanning)하는 방법으로 사각 트랜스듀서의 지향성을 측정하였다. 이와 같은 지향성 측정법은 Electrodynamic sensor의 작은 변화에도 수신감도가 크게 변하고, 사용하는 Electrodynamic sensor의 특성이 검사결과에 큰 영향을 미치며, 제한된 위치에서 지향성을 측정함으로서 상세한 지향성 조사가 어려웠었다. 또한 최근에는 새로운 특성을 가진 초음파 트랜스듀서가 개발됨에

† 책임저자, 회원, 하기소닉
E-mail : namyh@hagisonic.com
TEL : (042)936-7740 FAX : (042)936-7742

따라 과거이론으로는 해석할 수 없는 많은 결과들이 얻어지고 있으므로, 검사결과의 정밀도 및 신뢰성 향상을 위해서 고체 내를 전파하는 초음파 펄스의 지향성을 정량적으로 측정하는 일은 중요하다.

본 논문에서는 초음파 사각 트랜스듀서를 최적설계하는데 있어서 중요한 인자인 지향성을 조사하기 위하여, 초음파 펄스의 음압을 정량적으로 측정하는 "광탄성화상합성법(Photoelastic picture synthesizing method)"을 적용하여 음압분포를 가시화함과 동시에 가시화된 초음파를 정량적으로 해석하기 위해 "지향성 해석법(Directivity analysis method)"을 개발하였다.[3~7] 개발한 지향성 해석법을 이용하여 사각 트랜스듀서로부터 방사된 횡파의 지향성을 측정하였고, 이를 이론계산식에 의해 구한 지향성과 서로 비교하였다. 또 이론계산에서 나타나는 부극(Side lobe)들이 가시화 실험에서 나타나지 않는 원인에 대해서도 고찰하였다.

2. 초음파 사각 트랜스듀서 구조

압전소자를 이용하는 압전형 초음파 사각 트랜스듀서는 초음파의 종류(종파, 횡파, 표면파, 판파), 주파수, 굴절각, 크기 등 여러 가지 변수에 따라 다양하지만 기본적으로는 Fig. 1과 같이 압전소자(PZT), 쐐기(Wedge), 댐핑재(Damper), Housing, 흡음재(Acoustic absorbent), 동축선(Cable) 등으로 구성되어 진다.[1,2]

압전현상은 어떤 종류의 결정판에 일정한 방향에서 압력을 가하면 그 외력에 비례해서 전하 또는 전장이 나타나는 현상을 말한다. 결정성 고체는 원자의 격자 배열이 3차원 상에서 32가지의 가능한 다른 형태로 존재할 수 있으며, 이중 20종이 대칭 중심의 결여에 의한 압전현상을 나타낸다. 이런 압전효과를 이용하여 초음파를 발생하고 수신하게 되는데 압전소자는 크게 결정성 물질과 결정성 세라믹 물질로 분류된다. 결정성 물질에는 수정, 황옥(Topaz), 로셀염(Rochelle salts), $LiNbO_3$(니오비옴산 리튬) 등이 있으며, 결정성 세라믹 물질에는 유전율이 보통 결정보다

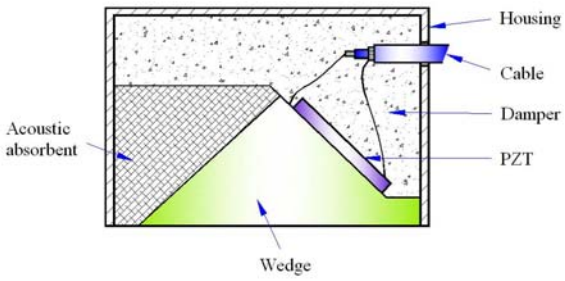


Fig. 1 Construction of angle beam transducer

100배 정도 높은 강유전체 계열의 PZT(Pb[Zr, Ti]O_3)계열과 $BaTiO_3$(티탄산 바륨), $PbNb_2O_3$(니오비옴산 납) 등이 있다. 최근에는 음향 임피던스(Acoustic impedance)가 인체나 물과 유사한 PVDF(Polyvinylidence fluoride)계열의 압전 폴리머(polymer)가 고주파수의 초음파 발생, 인체검사, 수중검사 등을 위하여 사용되고 있다. 또 압전세라믹과 에폭시(Epoxy) 수지를 일정 비율로 혼합한 복합재료가 광대역 초음파 발생, 의료용 초음파 진단기의 압전소자로 개발되어 일부는 사용되고 있다.

쐐기는 사각 트랜스듀서 특유의 부재로 초음파 펄스를 검사체에 경사로 입사시키는 역할을 한다. 일반적으로 쐐기 재료로는 아크릴 수지(Acrylic resin)를 사용하고 있으며, 온도가 올라가면 종파의 음속이 늦어지기 때문에 굴절각은 커지게 된다. 따라서 음향결합이 변하므로 장치의 측정이나 조정은 사용 환경에서 할 필요가 있다.

댐핑재는 압전소자로부터 뒤쪽 방향으로 전달되는 초음파를 흡수 및 산란시키는 역할을 하며, 주로 여러 종류의 분말에 에폭시를 혼합하여 굳혀 사용하거나 고무계통의 물질이 사용된다.

Housing은 전자파 차단을 위하여 금속재료가 사용되고 압전소자와의 사이에 절연 및 방음 재료가 이용되기도 한다.

흡음재는 쐐기 내의 반사에 의해 생기는 반사파를 감소시키기 위하여 사용되며, 쐐기 전면에 부착하고 있다. 흡음재의 흡음 효과를 높이기 위하여 음향임피던스는 쐐기 재와 비슷한 값의 재료를 사용하고, 흡음재 내부는 초음파의 감쇠가 큰 재료를 이용하고 있다.

동축선은 외부도체와 내부도체가 동심원을 이

루고 있어 전기신호를 전송할 수 있는 전송선로의 일종이다.

3. 고체 내 초음파의 가시화

가시화 실험에 이용한 음압해석시스템은"광탄성화상합성법"의 원리를 기초로 컴퓨터에서 화상처리를 행하여 합성화상을 얻었으며, 합성된 화상의 빛의 밝기 I로부터 음압 P의 분포를 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$P = A \cdot \sqrt{I} \quad (A: constant) \tag{1}$$

본 논문에서는 지향성을 구하는 것이 목적이므로, 식 (1)의 A에 대하여 특별히 보정하지 안하였고 가시화상에서는 상대적인 음압분포를 구하였다.

4. 지향성 해석법

초음파의 지향성은 한 점을 중심으로 전파하는 초음파의 방향과 강도의 관계를 표시한 것으로, 가시화법을 이용하여 지향성을 구하는 방법은 다음과 같다.

① Fig. 2와 같이 가시화상에서 초음파 펄스 파면의 곡률을 측정하고, 그 곡률의 중심을 지향성의 중심점(0)으로 정한다.

② 지향성을 조사하는 초음파가 모두 포함되도록 2개의 원(r_1, r_2)을 그린다.

③ 2개의 원(r_1, r_2)으로 둘러쌓인 영역 내에서 Θ 방향의 음압분포를 측정한다.

④ Θ방향의 최대음압과 그 위치를 정하고, 이를 극좌표(r, Θ)로 표시한다.

⑤ Θ를 변화시키면서 위와 같은 절차를 반복한다.

5. 지향성 이론계산

Fig. 3은 초음파 사각 트랜스듀서의 지향성에 대한 이론계산 모델을 보여주고 있다. 사각 트랜스듀서의 지향성은 木村가 제안한 이론식 (2)을 이용하여 계산하였다.[8~10]

식 (2)에서 sinE/E는 크기가 2d인 사각진동자의 쐐기 내에서의 종파의 지향성이며, cosβ는 쐐기가 고체이기 때문에 부가한 지향계수이고, cosΘ/cosα는 각도함수이며, t(Θ)는 쐐기로부터 시험편으로의 음압통과율이다. C_{1L}과 λ_{1L}은 쐐기 내

$$D(\Theta) = \frac{\sin E}{E} \cdot \cos\beta \cdot \frac{\cos\Theta}{\cos\alpha} \cdot t(\Theta) \tag{2}$$

$$E = K_{1L} \cdot d \cdot \sin\beta \tag{3}$$

$$K_{1L} = \frac{2\pi}{\lambda_{1L}} = \frac{2\pi f}{c_{1L}} \tag{4}$$

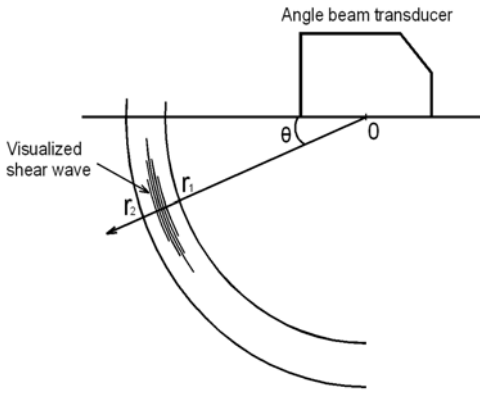


Fig. 2 Determination of directivity of ultrasonic wave

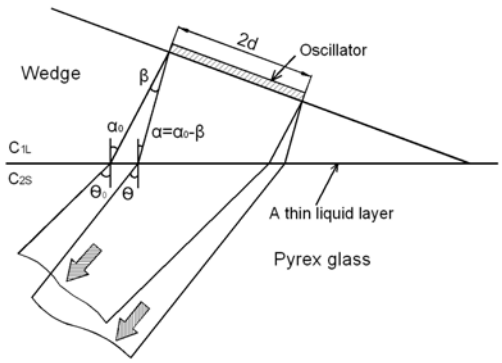


Fig. 3 Calculation model for the directivity of angle beam transducer

Table 1 Materials and material constants

Material	Sound velocity (m/s)		Density (kg/m³)
	Longitudinal wave	Shear wave	
Acrylic resin	2730	1430	1180
Pyrex glass	5490	3420	2119

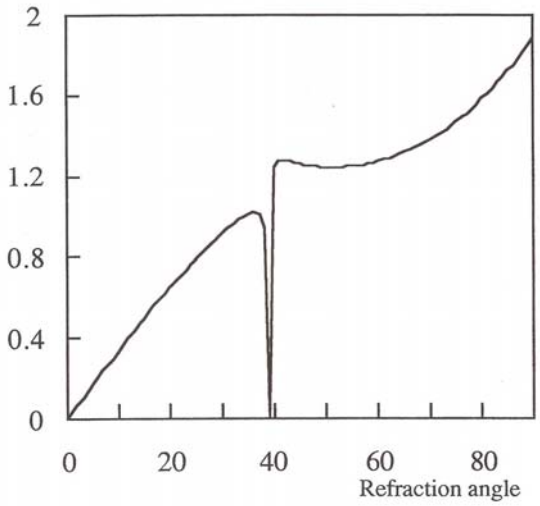


Fig. 4 Transmission coefficient of sound pressure from wedge to pyrex glass

종파의 음속과 파장이다.

Fig. 4는 쐐기로부터 시험편으로의 음압통과율을 나타난 것으로 종파의 임계각은 38.7°이었다. Table 1은 지향성 이론계산에 사용한 재료상수이다.

6. 실험방법

Fig. 5는 본 실험에서 사용한 시험편의 형상을 보여주고 있으며, 재질은 Pyrex glass이다. 실험에 사용한 초음파 사각 트랜스듀서는 MWB45-2, MWB45-4, MWB60-2, MWB60-4 (Krautkramer)등 4종류이다. 사각 트랜스듀서의 입사점은 가시화 실험에 사용한 Pyrex glass를 STB-A1 표준시험편과 같은 형상으로 제작하여 100R면으로부터 에코높이가 최대가 될 때, 100R면의 중심위치에 대응하는 점을 입사점으로 하였다.

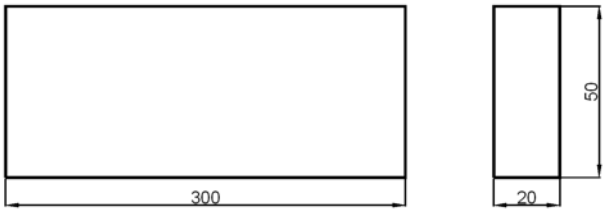


Fig. 5 Dimensions of test specimen

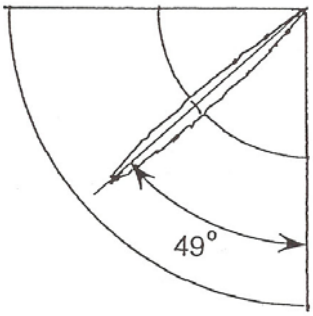
7. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 주파수 4 ㎒, 굴절각 45°의 사각 트랜스듀서로부터 나온 횡파의 가시화상과 지향성을 나타낸 것이다. 가시화상은 횡파의 전파거리가 트랜스듀서의 입사점 부근에서 15 ㎜가 되는 곳에서 얻었다. 49° 방향에 최고로 강한 횡파가 방사되고 있으므로 시험편 내에서 사각 트랜스듀서의 굴절각은 49° 이다. 이와 같이 사각 트랜스듀서의 굴절각(49°)이 공칭 굴절각(45°)과 다르게 나타내는 것은 시험편과 강(steel)의 음속의 차이 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 7(a)은 주파수 2 ㎒, 굴절각 60°의 사각 트랜스듀서로부터 나온 횡파의 가시화상을 보여주고 있다. 횡파와 동시에 시험편의 표면을 따라 진행하고 있는 표면파(Surface wave)도 관찰되고 있다. Fig. 7(b)은 Fig. 7(a)의 가시화상에서 구한 지향성으로 직선형태의 것은 표면파의 지향성을 나타내고 있으며, 트랜스듀서의 굴절각이 65°임을 알 수 있다.

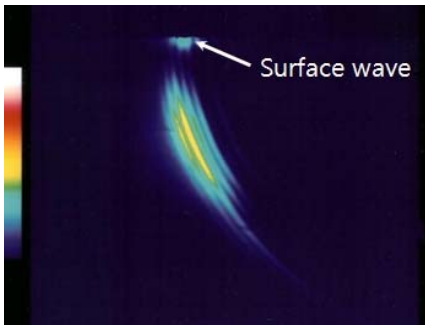
Fig. 8과 fig. 9는 주파수 4 ㎒, 굴절각 60°의 사각 트랜스듀서로부터 나온 횡파의 가시화상과 지향성을 보여주고 있다. 가시화상은 사각 트랜스듀서의 입사점 부근에서 32 ㎜, 50 ㎜, 68 ㎜, 86 ㎜가 되는 곳에서 얻었다. 가시화상의 관찰을 통하여 사각 트랜스듀서에서 방사된 횡파가 원통형으로 퍼져나가고 있음을 알 수 있다. 또한 지향성의 형태는 전파거리에 따라 크게 변하지 않았으나, 지향성의 강도는 전파거리에 따라 약해지고 있음을 알 수 있다. 또한 fig. 9(a)와 fig. 7(b)을 비교할 때, 주파수가 증가함에 따라 트랜스듀서의 지향성은 날카롭게 변하고 있었다.

(a) Visualized shear wave

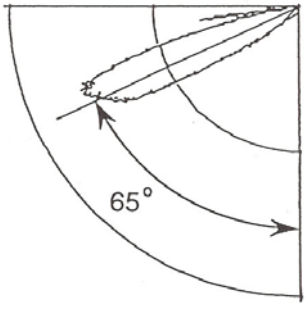


(b) Directivity

Fig. 6 Directivity of 4 ㎒, 45° transducer (r=15 ㎜)

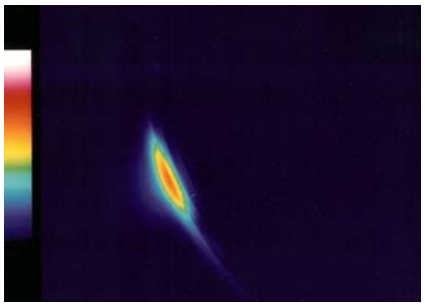


(a) Visualized shear wave

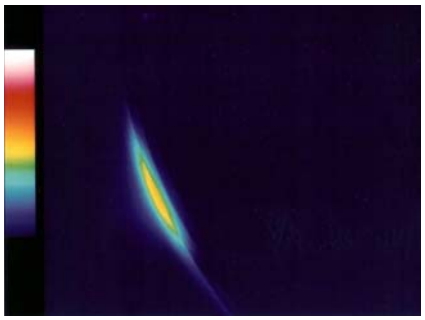


(b) Directivity

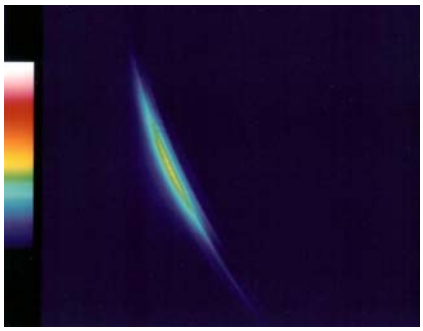
Fig. 7 Directivity of 2 ㎒, 60° transducer (r=32 ㎜)



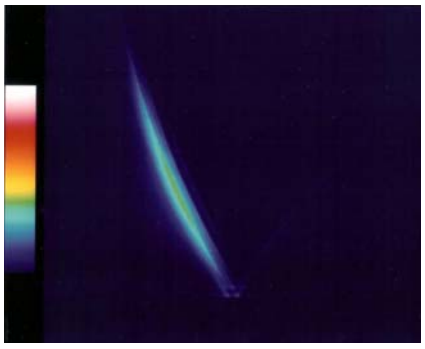
(a) r=32 ㎜



(b) r=50 ㎜

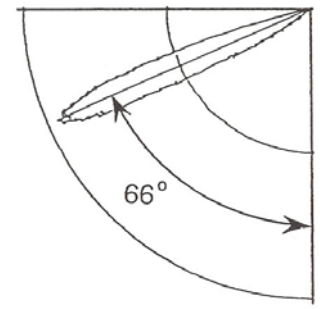


(c) r=68 ㎜

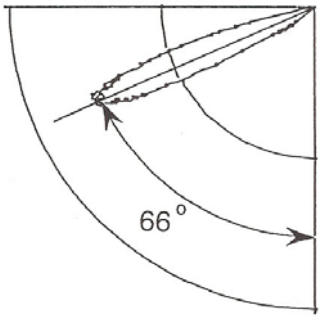


(d) r=86 ㎜

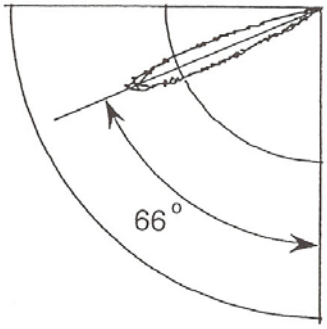
Fig. 8 Visualized shear wave of 4 ㎒, 60° transducer



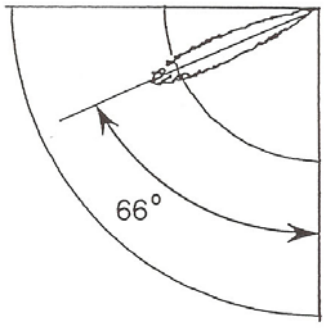
(a) r=32 ㎜



(b) r=50 ㎜



(c) r=68 ㎜



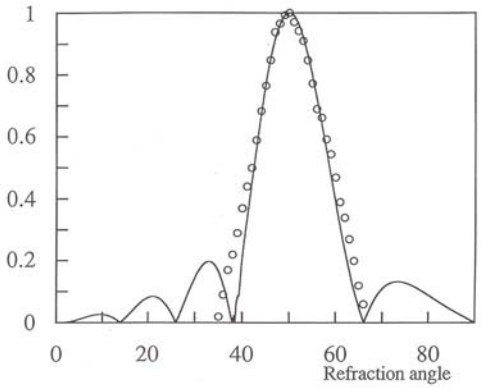
(d) r=86 ㎜

Fig. 9 Directivity of 4 ㎒, 60° transducer

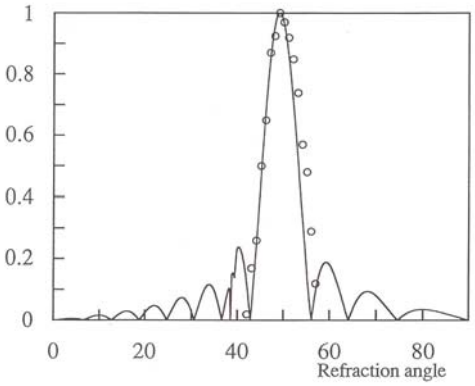
Fig. 10은 사각 트랜스듀서의 지향성에 관한 실험결과(○)와 계산결과(−)를 비교한 것 이다. 종축은 가시화법과 이론계산식으로부터 구한 각각의 최대음압에 대한 음압비를 표시하고, 횡축은 시험편에 대한 횡파의 굴절각을 표시하고 있다. 4 ㎒ 사각 트랜스듀서인 경우가 2 ㎒인 경우에 비하여 날카로운 지향성이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 지향성의 형태는 굴절각을 중심으로 한 주극(Principal lobe)의 영역에서는 잘 일치하고 있었으나, 이론계산에서 나타나고 있는 부극(Side lobe)은 가시화상에서 확인되지 않고 있다. Fig. 10(c)에서 실험결과와 이론결과가 잘 일치하지 않는 것과 같이 보이나, fig. 7(a)의 가시화상에서 보여주는 것과 같이 80～90°사이에 횡파가 표면파로 파동 모드변환이 발생하여, 시험편 표면을 따라 진행하는 표면파로 인하여 사각 트랜스듀서의 지향성이 좌측으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 그러나 지향성의 폭은 거의 일치하고 있다.

사각 트랜스듀서의 지향성이 주극의 영역에서는 실험결과와 이론결과가 잘 일치하였으나, 부극의 영역에서는 실험결과가 얻어지지 않는 이유에 대해서 연속파의 파동이론으로 설명할 수 있다. 초음파의 음원을 미소한 요소로 분할하여 생각하면 fig. 11과 같이 진동자의 좌 단면으로부터 x의 거리에 있는 미소음원과 이 음원으로부터 d만큼 떨어진 음원을 고려할 때, 이 2음원에 의한 θ방향의 간섭을 생각할 수 있다. 2개의 음원으로부터 발생되는 초음파는 경로차(Δ)가 ½파장(λ/2)인 경우 간섭은 상쇄되나, 그 경로차가 1파장(λ)인 경우 합성파의 진폭은 극대화 된다. 이 2개의 미소음원에 의한 θ방향의 간섭현상이 $0 \le x \le d$ 영역에서는 변하지 않고 생기므로 이론계산에서는 부극이 나타나고 있다.

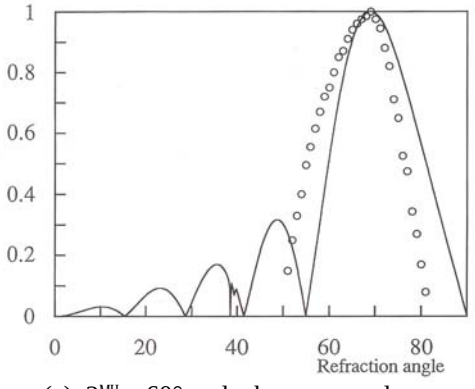
Fig. 12는 2 ㎒, 45° 사각 트랜스듀서로부터 입사된 횡파의 음압분포를 나타낸 것이다. 가시화법의 원리로부터 각각의 피크치(peak value)는 음압의 절대치를 표시하고, 그 피크치의 간격은 ½파장(λ/2)에 대응하고 있다. 본 가시화 실험의 경우, 가시화 배율이 크지 않고 Stroboscope의 발광시간이 매우 짧으므로 이상적인 산과 골 형태의 파형을 얻을 수 없었다. 따라서 음원의 최대 피크치가 1파장(λ)의 배수만큼 어긋나 중첩되었



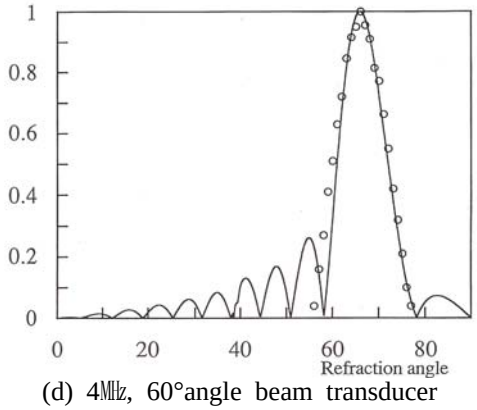
(a) 2㎒, 45°angle beam transducer



(b) 4㎒, 45°angle beam transducer



(c) 2㎒, 60°angle beam transducer



(d) 4㎒, 60°angle beam transducer

Fig. 10 Comparison of the experimental with calculated results for the directivity of angle beam transducer

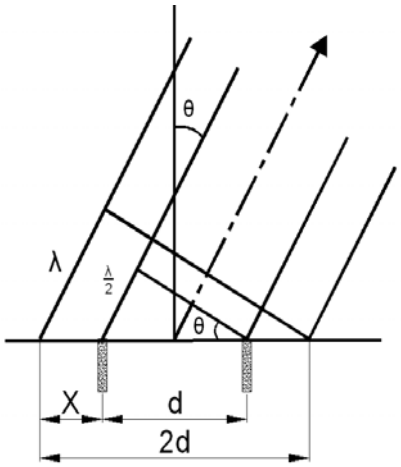


Fig. 11 Describe the interference pattern arising from two point sources

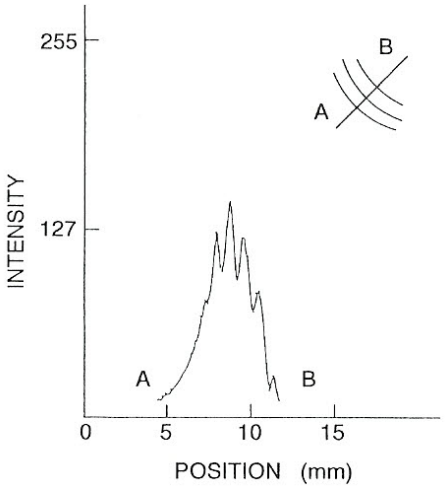


Fig. 12 Intensity distribution of the visualized wave on the A-B line

을 때에도 합성파의 진폭은 연속파의 경우에 비해 작았으므로 가시화 실험에서는 부극이 발생하지 안하였다고 사료된다.

상기와 같이 피검사체 내을 전파하는 초음파의 지향특성을 충분히 고려하여 진동자의 크기, 굴절각, 주파수, 감도 등을 선정한다면 초음파 사각 트랜스듀서를 최적설계 하는데 크게 기여할 것으로 생각된다.

8. 결 론

고체 내를 전파하는 미소한 초음파 펄스의 음

압을 정량적으로 측정하는 “광탄성화상합성법”을 적용하여 초음파의 음압분포를 가시화함과 동시에 지향성 해석법을 개발하여 초음파 사각 트랜스듀서에서 방사된 횡파의 지향성을 구하였다.

사각 트랜스듀서로부터 방사되는 횡파는 원통형의 퍼짐을 하고 있었으며(원통파), 전파거리가 멀어져도 지향성은 크게 변하지 않았다. 주파수가 4 ㎒ 인 경우가 2 ㎒인 경우에 비해 날카로운 지향성을 가지고 있었으며, 지향성의 형상은 굴절각을 중심으로 대칭하고 있었다. 또한 2 ㎒, 60° 트랜스듀서의 경우는 횡파와 동시에 시험편의 표면을 따라 진행하고 있는 표면파도 관찰되었다.

참고문헌

(1) J and H KrautKramer, 1990, "Ultrasonic Testing of materials" *Springer-Verlag*, pp. 160~221.

(2) Albert S. Birks, 1991, "Ultrasonic Testing," *American Society for Nondestructive Testing*, pp. 267~309.

(3) Hall, K. G., 1977, "A Qualitative Evaluation of Variable-angle Ultrasonic Transducers by the Photoelastic Visualization Method," *Ultrasonics*, Vol. 15, pp. 245~252.

(4) Light, G. M., A. Singh and T. Rudwick, 1982, "Ultrasonic Transducer Characterization using the Combined Schlieren, Photoelastic, and Raman Nath System," *Materials Evaluation*, Vol. 40, pp. 783~790.

(5) Erhard, A., Fuchs, H., Mohrle, W. and Matscholl, P., 1985, "Characterization of Sound Field Parameters of Ultrasonic Probes using a Computer Acquisition System," *NDT & E International*, Vol. 18, pp. 359~362.

(6) Nam, Y. H., 1999, "Directivity Analysis of Ultrasonic Waves on Surface Defects using a Visualization Method," *KSME International Journal*, Vol. 13, pp. 158~167.

(7) Nam, Y. H., 2001, "Modeling of Ultrasonic Testing in Butt Joint by Ray Tracing," *KSME International Journal*, Vol. 15, pp. 441~447.

(8) 日本學術振興會編, 1974, “超音波探傷の理論と基礎に關する研究報告書(そのⅠ)," pp. 95~130.

(9) 日本學術振興會編, 1978, “超音波探傷器用探觸子の音場に關する研究報告書(そのⅡ)," pp. 1~51.

(10) Ammirato, F. V., 1977, "A Calculational Model for Shear Wave Echo from Subsurface Planar Flaws," *Material Evaluation*, Vol. 35, pp. 46~50.