

가상 용접부내의 결함으로부터 반사된 초음파의 지향성 해석

남 영현
한국표준과학연구원

요약 초음파검사는 초음파 펄스가 한 방향으로 진행한다고 하는 지향성을 이용하고 있다. 초음파의 지향성은 전파 방향과 음압 분포의 관계를 나타내고 있으며 탐촉자의 배치, 탐상 감도 및 주사 간격, 결함의 위치 및 특성의 결정에 밀접한 관계가 있다. 본 논문은 초음파가시화법을 이용하여 pyrex glass로 만든 가상 맞대기 용접부내의 용접 금속부에 위치한 인공 결함으로부터 산란한 반사 횡파의 지향성을 측정하였다. 2 MHz와 4 MHz의 사각탐촉자가 인공 결함에서의 반사파의 지향성 조사에 사용되었다. 인공 결함으로부터 반사된 횡파의 지향성은 사각탐촉자의 위치 및 가상 용접부의 형상에 따라 달랐으며 2 MHz와 4 MHz의 사각탐촉자에 따라 반사파의 지향성은 큰 차이를 나타내고 있었다. 또한 가상 용접부의 높이가 커짐에 따라 반사각과 입사각은 비슷하게 되었다.

1. 서론

건축 철골, 교량, 압력 용기, 배관, 해양 구조물 등의 강 구조물은 대부분 용접 구조이며 이러한 구조물의 건전성을 평가할 목적으로 초음파탐상시험이 행하여 지고 있다. 초음파펄스(pulse)반사법을 이용한 탐상 시험은 시험편내에 초음파를 입사하였을 때 음향적 불연속 부분(결함)으로부터의 반사 에코를 이용하여 결함을 검출하는 방법이다. 그러나 시험편의 형상이 복잡하게 되어짐에 따라 초음파의 모드(mode) 변환 등의 영향으로 방해 에코가 발생하는 경우도 많으며 이 방해 에코와 결함 에코를 구별하는 일은 탐상의 정밀도 및 신뢰도의 향상을 위하여 매우 중요하다. 고체내를 전파하는 초음파의 거동(擧動)에 대한 연구는 초음파가시화법을 이용하여 실제 초음파의 전파 및 반사 특성을 관찰하는 방법¹⁾⁻³⁾과 컴퓨터 simulation에 의한 방법⁴⁾⁻¹¹⁾이 이용되고 있으나 용접부와 같은 복잡한 형상을 가지는 시험편에 가시화법을 적용한 경우는 매우 적다.

본 연구에서는 정량적인 음압 해석이 가능하게 하기 위하여 응력해석법에 따른 화상 처리를 실시하여 음압에 비례한 초음파의 가시화상을 제작함과 동시에 화상 해석 프로그램을 이용하여 반사파의 지향성을 조사하였다.

가시화 실험에서는 굴절각이 60°의 2 MHz와 4 MHz의 사각탐촉자를 이용하여 맞대기 용접부를 모형화한 pyrex glass 시험편내에 인공 결함을 만들어 그곳으로부터의 초음파의 반사 특성 및 반사 지향성을 연구하였다. 또, 사각탐촉자의 방향 및 가상 맞대기 용접부의 형상이 반사 지향성에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다.

2. 광탄성화상합성법

광탄성법을 이용한 초음파 펄스의 가시화 장치는 원편광(circularly polarized light)을 이용하는 방법과 평면 편광(plane polarized light)을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 원편광을 이용하는 방법은 음

압에 비례한 가시화상을 얻을 수 있어 정량적인 측정이 가능한 반면 감도는 낮고 미소한 음압의 초음파 펄스는 가시화할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이에 대하여, 평면 편광을 이용하는 방법은 가시화 감도는 높으나 음압에 비례한 가시화상을 얻을 수 없어 정량적인 음압 측정이 불가능하다.

본 연구에서는 평면편광을 이용한 경우와 같은 높은 감도를 가지며 원편광을 이용한 경우와 같은 음압에 비례한 가시화상이 얻어지는 방법 「광탄성 화상합성법」을 적용하였다. 이 방법은 2차원적인 음장(音場)의 퍼짐을 가정해 해석한 것으로 특징으로는 고체중의 초음파 펄스를 높은 감도로 가시화할 수 있으며, 음압에 비례한 가시화상이 얻어지는 것과 음압의 절대치를 구할 수 있다는 것이다.

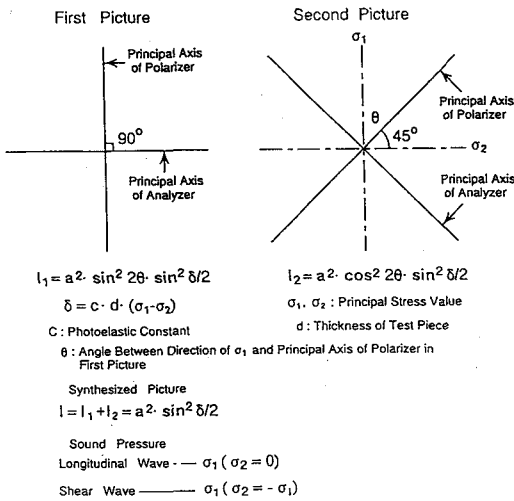


Fig. 1. Synthesized photoelastic method.

Fig. 1은 평면 편광을 이용한 광탄성 장치에서 얻어지는 2개의 화상에서 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 주축 방향이 일치하고 있는 경우로 빛의 밝기 I_1 은 광탄성법칙으로부터 다음식과 같이 표시할 수 있다.

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

$$\delta = cd(\sigma_1 - \sigma_2)$$

식(1)에서 c는 광탄성 계수, d는 시험편 두께, σ_1, σ_2 는 주응력(음압), θ 는 주응력 σ_1 방향과 편광자의 주축 방향이 이루는 각도, a는 상수이다.

제 2화상은 주응력 (σ_1)방향과 편광자의 주축 방향이 이루는 각도가 45° 되도록 같은 응력장을 편광자와 검광자의 직각 상태에서 45° 회전했을 때 얻어지는 I_2 는 다음식으로 된다.

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

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

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

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

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

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

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

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

3. 지향성 해석법

초음파 펄스의 지향성은 한점을 중심으로 방사하는 초음파의 방향과 강도의 관계를 표시한 것으로 가시화법을 이용하여 초음파의 지향성을 구하는 경우에는 그 중심점을 최초로 결정할 필요가 있다. 음압의 가시화상에서 지향성의 중심점을 구하는 경우 가시화시킨 초음파의 펄스 파면의 곡률을 측정하여 그 곡률의 중심을 지향성의 중심점으로 하였다.

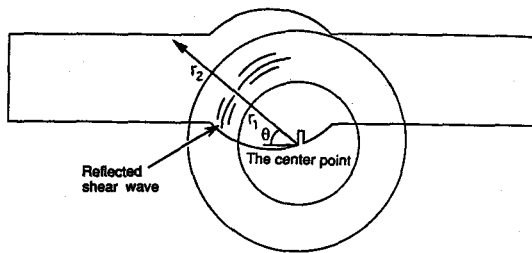


Fig. 2. Determination of directivity of ultrasonic wave.

지향성을 구하는 방법은 Fig. 2와 같이 인공 결함의 개구부(開口部)를 반사 지향성의 중심점으로 하여 지향성을 조사하는 초음파가 포함되도록 2개의 원(r_1, r_2)을 그린 후 2개의 원에 둘러 쌓인 영역 내의 θ 방향의 최대 음압과 그 위치 관계를 구하여 인공 결함의 반사 지향성으로 하였다¹²⁾.

4. 실험 방법

Fig. 3은 본 논문에서 이용한 음압 해석 시스템의 모형도이다. 이 시스템은 광탄성화상합성법의 원리를 기초로 하고 있으며 컴퓨터로 화상의 가산처리(加算處理)를 수행하여 합성 화상을 만들도록 되어 있다.

음압 해석을 위하여 사용한 컴퓨터는 PC-9801이며 음압 분포 측정 결과는 printer 및 plotter에 출력할 수 있다. Interface controller는 시험편내를 전파하는 초음파 펄스를 정지 상태로 가시화하기 위하여 컴퓨터로부터 신호를 받아 stroboscope의 발광, 초음파의 송신, CCD 카메라의 화상 입력 등의 작동

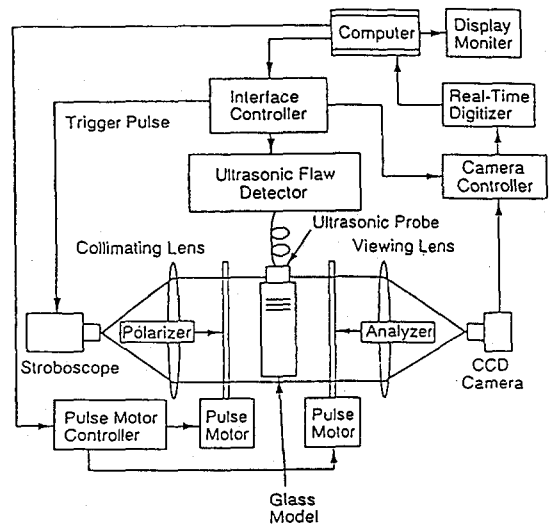


Fig. 3. Diagram of the visualization and evaluation system.

시간을 10 ns 단위로 설정하여 trigger 펄스를 보내는 장치이다. Real-time digitizer는 가시화상의 입력, 입력화상의 합성 등의 신호를 보내 실제 화상 처리를 행한다. 초음파탐상기는 USIP-11(Kraut Kamer)을 이용하였으며 시험편에 초음파 펄스의 입사와 동시에 일정한 지연 시간을 가한 trigger 펄스를 stroboscope에 보내어 stroboscope를 발광시킨다. stroboscope의 발광 시간이 시험편내를 전파하는 초음파 펄스의 속도에 비해 대단히 짧기 때문에 CCD 카메라를 통한 초음파 펄스는 정지 상태로 관찰할 수 있다. 본 실험에서는 발광 시간이 20 ns의 stroboscope(菅原研究所, NP-10)를 이용하였으며, 발광 시간중의 초음파 펄스의 이동량은 종파가 0.11 mm, 횡파가 0.07 mm이다. 펄스 모터는 합성 화상을 만들기 위하여 편광자와 결광자의 편광 방향을 바꾸기 위한 것으로 컴퓨터 프로그램에 의한 편광판을 회전시킨다.

본 실험에서 사용한 사각탐촉자는 MWB60-N2(공칭주파수: 2 MHz, 전동자크기: 8×9 mm, 공칭굴절각: 60°)와 MWB60-N4(공칭주파수: 4 MHz 전동자 크기: 8×9 mm, 공칭굴절각: 60°)이고 사각탐촉자의 실측 굴절각은 가시화법에 의한 지향성 해석 결과로부터 측정하였다.

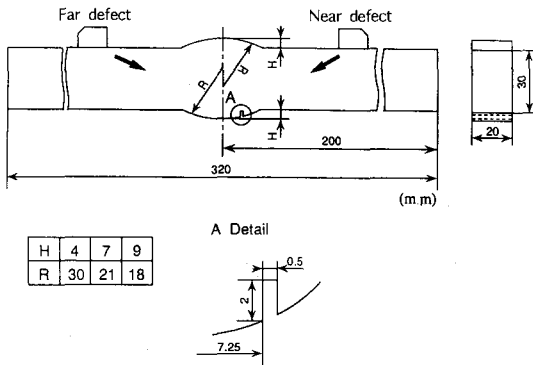


Fig. 4. Dimensions of test specimen.

Fig. 4는 평판의 맞대기 용접부를 모형화한 pyrex glass로 만든 시험편의 형상을 나타내고 있다. 시험편은 가상 맞대기 용접부의 형상이 다른 3 종류의 시험편을 이용하였으며 깊이 2 mm 폭 0.5 mm의 수직 결함을 가공하였다. 시험편으로 pyrex glass를 이용한 이유는 음속(종파: 5490 m/s, 횡파: 3420 m/s)이 철강(종파: 5900 m/s, 횡파: 3230 m/s)과 비슷하고, 초음파의 감쇠가 적으며 광탄성 감도가 높기 때문이다.

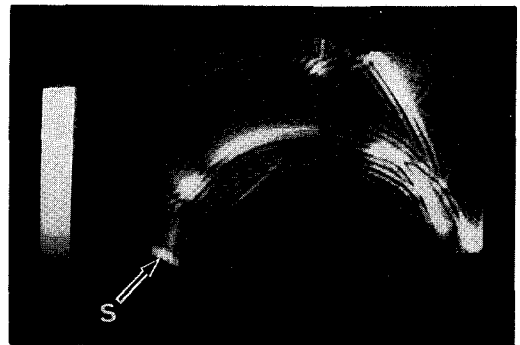
가상 맞대기 용접부내의 인공 결함으로부터 반사된 횡파의 지향성은 직사법으로 결함이 탐촉자로부터 볼때 용접 금속의 중앙보다 멀리 있는 경우(Far defect)와 가깝게 있는 경우(Near defect)를 구별 하였으며 에코 높이가 최대로 되는 위치에서 가시화상의 제작과 지향성 해석을 행하였다. 반사 횡파의 가시화상은 지향성의 중심점으로부터 전파 거리 R이 약 10 mm와 18 mm되는 곳에서 얻었다.

사각탐촉자와 pyrex glass 사이의 접촉 매질은 기계유를 사용하였다.

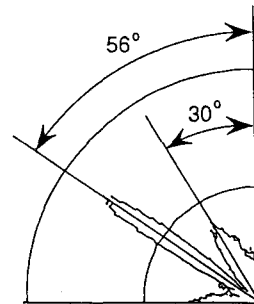
5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5(a)는 인공 결함이 멀리 있는 경우로 반사파의 가시화상을 나타낸 것이다. 사각탐촉자는 4 MHz로 에코 높이가 최대로 되는 위치에 놓고 입사파는 左上로부터 右下방향으로 전파하여 인공 결함으로부터 반사한 것이다. 사각탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선이 표면과 이루는 각도는 27°이다. 반사 횡파는 지향성의 중심점으로부터 약 18 mm 전

파한 곳에서 얻었으며, 그림에서와 같이 사각탐촉자 방향으로 돌아가는 2개의 반사횡파와 가상 맞대기 용접부의 표면을 따라 전파 하고 있는 표면파(S)가 관찰되고 있다. 사각탐촉자의 입사각은 64°이고 가상 맞대기 용접부의 높이는 H = 4 mm 이다.



(a) visualized shear waves



(b) directivity

Fig. 5. Directivity of 4 MHz shear waves reflected from far defect(H=4 mm).

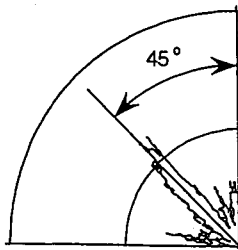
Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 가시화상으로부터 구한 반사 횡파의 지향성을 나타낸 것이다. 반사 횡파의 각도는 30°와 56° 이다.

Fig. 6은 인공 결함이 가깝게 있는 경우로 Fig. 5에서 이용한 4 MHz의 사각탐촉자를 최대 에코의 위치에 놓고 얻은 음압의 가시화상과 그 지향성을 나타낸 것이다. 사각탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선이 표면과 이루는 각도는 30°이다. 사각탐촉자의 입사각은 64°이며 가시화상에서 나타난

바와 같이 인공 결함이 사각탐촉자에서 볼 때 멀리 있는 경우에는 반사 횡파의 강도가 높고, 가깝게 있는 경우에는 반사 횡파의 강도가 낮음을 알 수 있다. 이는 입사파에 대한 반사 면적이 인공 결함이 멀리 있는 경우가 가깝게 있는 경우에 비해 넓기 때문에 반사 횡파의 강도가 높다고 생각된다. 반사 횡파의 각도는 45° 이며 Fig. 5의 멀리 있는 경우와 비교하여 반사 횡파의 지향성이 크게 변하고 있다.



(a) visualized shear waves

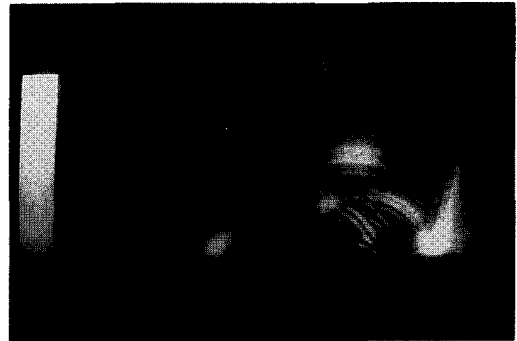


(b) directivity

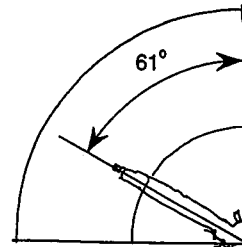
Fig. 6. Directivity of 4 MHz shear waves reflected from near defect(H=4 mm).

Fig. 7은 인공 결함이 멀리 있는 경우로 4 MHz의 사각탐촉자를 최대 에코의 위치에 놓고 얻은 음압의 가시화상과 그 지향성을 나타낸 것이다. 사각탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선의 표면과 이루는 각도는 30° 이다. 가상 맞대기 용접부의 높이는 $H=7\text{ mm}$ 이며 반사 횡파의 각도는 61° 이다. 반사 횡파의 방향은 거의 입사해운 방향(입사각: 64°)으로 반사하고 있음을 알 수 있으며 가상 맞대기 용접부의 높이가 $H=4\text{ mm}$ 인 경우와는 다른 결과

가 얻어지고 있다.



(a) visualized shear waves



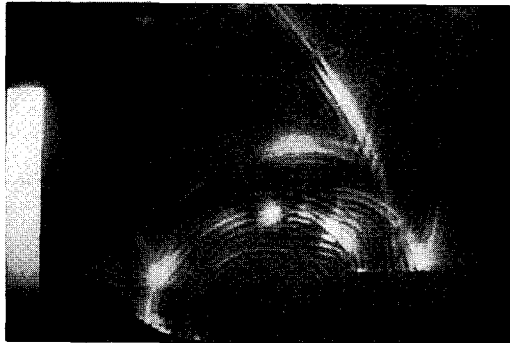
(b) directivity

Fig. 7. Directivity of 4 MHz shear waves reflected from far defect(H=7 mm).

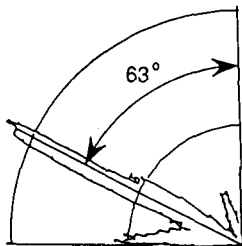
Fig. 8은 인공 결함이 멀리 있는 경우로 4 MHz의 사각탐촉자를 최대 에코의 위치에 놓고 얻은 음압의 가시화상과 그 지향성을 나타낸 것이다. 사각탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선이 표면과 이루는 각도는 32° 이다. 사각탐촉자의 입사각은 64° 이고 가상 맞대기 용접부의 높이는 $H=9\text{ mm}$ 이다. 인공 결함으로부터 산란한 반사 횡파의 각도는 63° 이며 반사 횡파의 거동은 가상 맞대기 용접부의 형상에 따라 전혀 다름을 알 수 있다. 이는 인공 결함에 의한 산란 현상에서 가상 맞대기 용접부의 높이가 증가함에 따라 결함 개구부에서의 반사가 방향상 반사(이중반사)로 가기 때문에 이와 같은 현상이 일어난다고 사료된다.

가상 맞대기 용접부내의 인공 결함으로부터 산란한 반사 횡파의 강도는 결함이 멀리 있는 경우가 가깝게 있는 경우에 비해 높음을 알 수 있으며, 맞

대기 용접부의 높이가 $H = 4, 7, 9 \text{ mm}$ 로 증가함에 따라 반사 지향성이 원주(圓柱)에 가깝게 되어 입사각과 반사각이 비슷하게 되었음을 알 수 있다.



(a) visualized shear waves

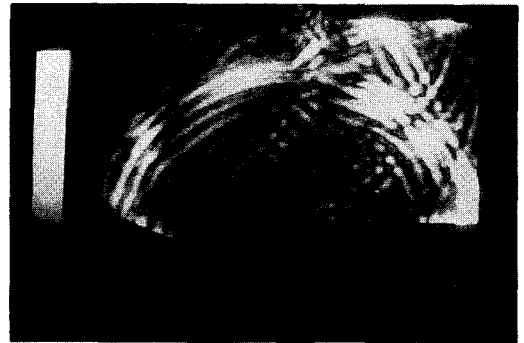


(b) directivity

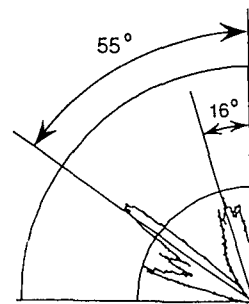
Fig. 8. Directivity of 4 MHz shear waves reflected from far defect($H=9 \text{ mm}$).

Fig. 9는 인공 결함이 멀리 있는 경우로 2 MHz의 탐촉자를 최대 에코의 위치에 놓고 얻은 음압의 가시화상과 그 지향성을 나타낸 것이다. 사각 탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선이 표면과 이루는 각도는 30° 이다. 사각탐촉자의 입사각은 64° 이고 가상 맞대기 용접부의 높이는 $H = 4 \text{ mm}$ 이다. 반사 횡파의 각도는 16° 와 55° 이며 인공 결함으로부터 초음파의 반사 거동은 4 MHz의 결과와 전혀 다른 결과가 얻어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 인공 결함이 멀리 있는 경우로 2 MHz의 사각탐촉자를 최대 에코의 위치에 놓고 얻은 음압의 가시화상과 그 지향성을 나타낸 것이다. 사각탐촉자의 입사점과 인공 결함과의 연결선이 표면과 이루는 각도는 34° 이다. 사각탐촉자의 입사각은 64° 이



(a) visualized shear waves



(b) directivity

Fig. 9. Directivity of 2 MHz shear waves reflected from far defect($H=4 \text{ mm}$).

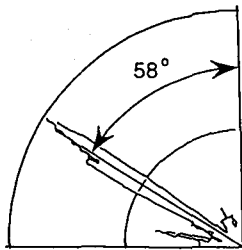
고 가상 맞대기 용접부의 높이는 $H = 9 \text{ mm}$ 이다. 반사 횡파의 각도는 58° 이며 가상 용접부내의 인공 결함으로부터 반사한 반사 횡파의 지향성은 사각탐촉자의 주파수(2 MHz, 4 MHz)에 따라 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 2 MHz 사각탐촉자의 경우 파장이 1.7 mm로 4 MHz 사각탐촉자의 파장 0.85 mm에 비해 2배가 되므로 상대적으로 인공 결함의 크기가 반감되는 효과가 나타나기 때문에 사각탐촉자의 주파수에 따라 반사 지향성이 차이를 보인다고 생각된다.

6. 결론

고체내를 전파하는 미소한 초음파 펄스의 음압을 정량적으로 측정하는 광탄성화상형성법을 적용하여, 가상 맞대기 용접부를 모형화한 시험편을 사용하여 용접부내의 인공 결함으로부터 산란한 초음파의 반



(a) visualized shear waves



(b) directivity

Fig. 10. Directivity of 2 MHz shear waves reflected from far defect(H=9 mm).

사 거동 및 반사 지향성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사각탐촉자로부터 인공 결함이 가상 용접부 중앙보다 멀리 있는 경우(Far defect)가 가깝게 있는 경우(Near defect)에 비해 반사 횡파의 강도는 높았다.
2. 가상 맞대기 용접부의 높이가 H=4, 7, 9 mm로 증가함에 따라 반사 지향성은 원주(圓柱)에 가깝게 되어 입사각과 반사각이 비슷하게 되었다.
3. 인공 결함으로부터 반사 지향성은 사각탐촉자의 주파수(2 MHz, 4 MHz)에 따라 큰 차이를 보였다.

참고 문헌

- 1) K. G. Hall, "A Qualitative Evaluation of Variable-angle Ultrasonic Transducer by the Photoelastic Visualization Method" Ultrasonics, November(1977), pp. 245-252.
- 2) K. G. Hall, "Observing Ultrasonic Wave

- Propagation by Stroboscopic Visualization Method" Ultrasonics, July(1982), pp. 159-167.
- 3) K. G. Hall, "Visualization Technique for the Study of Ultrasonic Wave Propagation in the Railway Industry" Materials Evaluation, June (1984), pp. 922-929.
- 4) S. Serabian, "Influence of Attenuation upon the Weld Interrogation Distance-Amplitude Curve" Material Evaluation, December(1976), pp. 265-274.
- 5) J. A. Ogilvy, "Theoretical Comparison of Ultrasonic Signal Amplitudes from Smooth and Rough Defects" NDT International, December (1986), pp. 371-385.
- 6) J. A. Ogilvy, "Ultrasonic Beam Profiles and Beam Propagation in an Austenitic Weld using a Theoretical Ray Tracing Model" Ultrasonics, November(1986), pp. 337-347.
- 7) R. Ludwig and W. Lord "Development in the Finite Element Modeling of Ultrasonic NDT Phenomena" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 5A, (1986), pp. 73-81.
- 8) J. A. Ogilvy, "On The Use of Focused Beams in Austenitic Welds" British Journal of NDT, July(1987), pp. 238-246.
- 9) Z. You and W. Lord "Finite Element Study of Elastic Wave Interaction with Cracks" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 8A, (1989), pp. 109-116.
- 10) D. Heinrich, H. J. Meyer and W. Prested "Evaluation of Ultrasonic Measurements in Forgings" NDT International. February(1990), pp. 19-31.
- 11) J. A. Ogilvy, "An Interactive Ray Tracing Model for Ultrasonic Nondestructive Testing" NDT International, February(1992), pp. 3-10.
- 12) 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. 42-1, (1993), pp. 17-22.

Directivity Analysis of Ultrasonic Wave Reflected from the Artificial Defect in Simulated Butt Welded Joint

Young-Hyun Nam

Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract The ultrasonic non-destructive testing uses the directivity of the ultrasonic pulse wave which propagates in one direction. The directivity is expressed as the relationship between the propagate direction and its sound pressure. The directivity of ultrasonic wave is closely related to determination of probe arrangement, testing sensitivity, scanning pitch and defect location and characterization.

The paper measured the directivity of shear wave, which reflected from artificial defect located in weld metal zone in butt welded joint similar model made of pyrex glass by using visualization method. 2 MHz and 4 MHz angle probes were used to measure the directivity of reflection wave at the artificial defect. The directivity of shear waves reflected from the defect was different according to the probe position and the shape of butt welded joint. The difference of directivity of reflection wave was existed between 2 MHz and 4 MHz angle probes. The angle of reflection wave became equal to angle of incidence as increase of the height of excess metal.

(Received: February 15, 1995.)