

유도초음파를 이용한 박판에서의 결함의 검출에 관한 연구

정희돈*, 신현재**, Joseph L. Rose**

*포항산업과학연구원 설비기술연구팀

**Ultrasonic Laboratory, Pennsylvania State University

초 록 본 연구는 박판 용접부 결함 검출 기법의 확립을 위해서 실시된 기초 연구로서, 전기강판 소재의 모재에 인위적인 결함을 작성하고, 이론 및 시험적 결과를 이용하여 결함을 검출하기 위한 최적의 조건과 임계 검출 결함 크기를 조사한 것이다. 이를 위해서 소재의 dispersion curve를 구하고, 두께 2.4mm의 박판에 대해서 tone burst방식에 의한 초음파 탐상을 실시하였다. 실험적 검토를 행한 결과 840kHz의 가진 주파수와 30도 그리고 85도의 입사각이 최적의 탐상 조건임을 알았다. 한편, 초음파의 속도와 dispersion커브를 비교 검토하여 본 바, 30도의 입사각에서 발생하여 전파하는 초음파는 symmetric mode이고 85도의 입사각에서는 antisymmetric mode의 파가 전파하고 있었다. 결함의 위치와 형상에 따라 반사파의 특성이 다르게 나타나고 있었으며, 특히 표면 결함의 경우에는 antisymmetric 모드의 초음파가 symmetric 모드 보다 높은 반사파 에너지를 나타내고 있었다. 또한 이러한 초음파 모드의 종류와 결함 검출과의 관계에 대해서는 유도파의 구조에 의해서 설명이 가능했다.

1. 서론

철강제품의 생산공정에 있어서의 각종 비파괴검사법의 적용은 눈부신 발전을 거듭하여 왔으며, 특히 후판 품질에 대한 최종 검사법으로서 초음파의 적용은 필수 불가결한 수단으로 자리잡고 있다. 한편, 최근에 들어 품질과 생산성 향상의 관점에서, 초음파의 파장과 비교하여 상대적으로 두께가 얇은 박판에 대한 비파괴검사의 필요성이 대두되고 있다. 한 예로 박판의 생산 공정 중에는 박판의 용접과 압연 공정이 포함되어 있다. 만약 용접공정중에 생긴 결함을 내포한 상태에서 압연을 하게 되면, 제품의 신뢰성 저하는 물론, 최악의 경우 판 파단이 발생하여 막대한 경제적 및 시간적 손실을 맞게 된다. 이

러한 사태를 방지하기 위해서는 용접공정 직후에 용접 품질을 정량적으로 판정할 수 있는 비파괴검사법의 응용에 대해서 고려해 볼 필요가 있다. 그러나 초음파의 발생과 전파의 복잡한 특성 때문에 박판에 대한 초음파의 적용에 대해서는, 지금까지의 일반적인 초음파의 적용과는 다른 별도의 관점에서 연구되어야 할 것으로 생각된다.

여기서 박판에 대한 초음파 탐상은 우선 판파(Lamb wave)를 이용해야 한다는 전제가 있게 된다. 판파의 전파는 통상의 종파나 횡파와는 근본적으로 다른 물리적 특성을 가지고 있기 때문에, 판파의 발생조건의 선택에 대해서는 신중한 검토가 있어야 될 것이다. 즉, 판파의 발생과 전파에는 초음파의 주파수와 입사각도 그리고 탄성계수와 같은 재료의 물성

치들이 복합적으로 작용함과 동시에, 조건에 따라서는 수많은 종류의 모드가 발생하게 된다^{1,3)} 때문에 결함으로부터 반사되는 충분한 가지적 결과를 얻기 위해서는 상기 인자들의 최적 조건을 찾는 것부터 연구가 선행되어야 할 것이다.

최근 들어 guided wave라 명명된 판파의 발생에 있어서 주파수와 피측정체의 두께가 파의 종류를 결정한다는 사실에 입각하여, 통상의 shock excitation법이 아닌 특정 주파수의 초음파를 인위적으로 피측정체에 입사시키는 소위 tone burst에 의한 방법^{4,7)}이 Rose 등을 중심으로 연구되어 왔다. 그들은 실험과 이론적인 연구 결과를 통하여, 피측정체의 조건에 적합한 탐상조건을 찾는 것에 의해서, 매우 작은 결함까지 정량적으로 검출할 수 있다고 결론짓고 있다.

본 연구는 이상의 관점과 연구결과 등에 입각하여, 박판 소재의 용접부 결함 검출 기법의 확립을 위해서 실시되었다. 구체적으로는 박판의 용접진 상태의 박판에 인위적인 결함을 작성하고, 이론 및 시험적 결과를 이용하여 결함을 검출하기 위한 최적의 조건을 도출함과 동시에 향후 박판 용접부 판정의 기반 기술을 수립하고자 한 것이다.

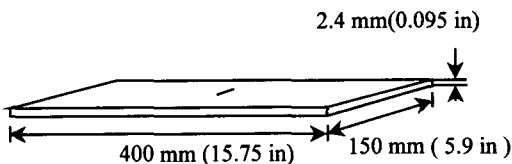
2. 시험 방법

2.1. 인공 결함 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 전기강판 소재로서, 2.4mm의 두께를 가지고 있다. 시험편은 400mm×150mm의 크기로 절단하였으며, 방전가공과 드릴링에 의해서 소정의 형상을 갖는 인공결함을 가공하였다. 여기서 방전 가공에 의해서 가공된 결함은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 비교적 큰 형상을 하고 있으며, tone burst 방법에 의한 결함검출에 있어서 최적 조건과 초음파의 모드에 따른 반사파의 에너지를 비교 검토하기 위하여 준비되었다. 한편, 본 연구에서 이용된 방법의 결함 검출 능력을 알아보기 위해서 드릴링에 의한 관통결함 시험편도 준비했다. 이들 시험편은 각각 0.8mm, 1.28mm, 1.58mm, 3.2mm 그리고 4mm의 직경을 가지도록 가공되었다.

2.2. 초음파 탐상 절차

Photo 1에 본 연구에서 사용된 초음파탐상장치(Matec사제, 모델명; EXP-2)를 나타낸다. 본 장치에는 가진 초음파의 발생(excitation)을 위해서 function generator가 포함되어 있으며, 주파수는 50kHz에서 20MHz(sine파)의 범위에서 연속적으로 가변시킬 수 있고 펄스 폭이나 반복횟수도 넓은 범위내에서 설정할 수 있다. function generator에서 발생된 펄스 전압은 증폭기에 의해서 최고 1000Volt로 증폭되어 attenuator를 거친 후, 탐촉자를 가진 시키게 된다.



Hole series	Description
#1	through hole of 0.8mm - 4.0mm dia. hole of 3mm dia. and depth of 1mm
#2	depth of 0.5mm and width of 30mm
#3	depth of 1mm and width of 30mm
#4	through elliptical hole width of 30mm
#5	depth of 1mm and width of 15mm
#6	depth of 1mm and width of 50mm

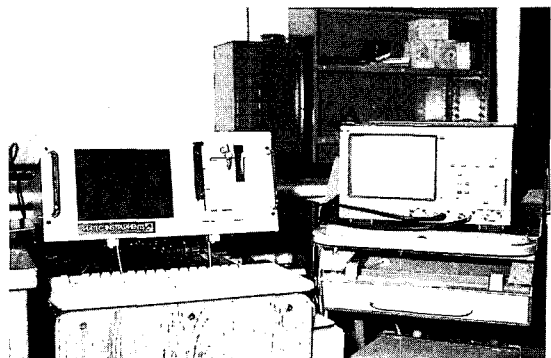


Photo 1 Equipment used in this study(Left one is Matec EXP-2 and right side shows the digital oscilloscope)

Fig. 1 Artificial defect specimens used in this study

초음파탐상은 pulse-echo방식에 의해서 실시되었고, 구체적인 pulse발생 조건은 Table 1에 보이는 바와 같다. 탐상은 타원형 결함의 경우 결함면과 직각인 방향에서 실시했으며, 판통원형 결함의 경우에도 중심축과 직각이 되도록 했다. 초음파탐상 결과는 장치에 포함되어 있는 디스크에 저장했으며, 한편으로는 디지털 오실로스코프상에서 파형의 시간 축과 진압의 절대값들을 구했다. 사용된 탐촉자는 500kHz, 800kHz, 1MHz, 1.5MHz 그리고 2.5MHz에서 중심주파수를 가지는 것을 사용했으며, 예비실험 이외의 실험에서는 주로 800kHz의 탐촉자를 사용했다. 사용된 탐촉자는 13×25mm의 사각형의 형상을 가지고 있다.

전술한 바와 같이 최적 탐상조건을 찾기 위해서 본 연구에서 주목한 측정 변수로는 주파수와 입사각을 들 수 있다. 먼저 탐상 주파수의 선정에 있어서는 dispersion curve를 이용했다. 즉 주파수와 시험편 두께의 곱($f \cdot d$)과 guided wave(이하 유도파라고 칭함)의 위상속도(group velocity)에 의해서 결정되는 dispersion curve들을 먼저 구하고, 되도록 적은 종류의 파가 발생하는 주파수를 시험 주파수로 선정했다. 한편 입사각은 각도를 연속적으로 변화시킬

수 있도록 Fig. 2에 보이는 바와 같은 투명 아크릴제의 가변 웨지(wedge)를 이용하여 변화시켰다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1. Dispersion Curves

어떤 특정 주파수의 초음파가 박판에 입사하게 되면 박판은 wave guide의 역할을 하게 된다. 또한 입사된 초음파는 전파매질의 경계면에서 모드의 변환을 일으키고 매질의 형상을 따라 유도파로서 전파하게 된다.

이렇게 발생한 초음파는 여러 개의 모드를 가지며, 각각의 모드와 주파수에 따른 개별적인 속도를 가지게 된다. 한편 이러한 초음파는 진동양식에 따라 두 가지로 대별되는데 Fig. 3에 보이는 바와 같이 antisymmetric과 symmetric 모드를 들 수 있다^{1,2,9)}. 이 두 가지의 모드는 소위 Rayleigh-Lamb frequency관계로서 잘 알려져 있는 다음 식에 의해서 정의 될 수 있다^{8,9)}. 즉,

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{(q^2 - x^2)^2}{4x^2pq}$$

Antisymmetric modes (1)

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{4x^2pq}{(q^2 - x^2)^2}$$

Symmetric modes (2)

여기서, $q^2 = \frac{\omega^2}{C_T^2} - x^2$, $p^2 = \frac{\omega^2}{C_L^2} - x^2$,

C_L = 종파속도(5670m/s), C_T = 횡파속도(3136m/s),
 h = 양 경계면 사이의 1/2거리(전파매질의 두께),
 $\omega = 2\pi f$, $x = 2\pi/\lambda$ (파수, wave number)
 그리고 λ = 파장을 나타낸다.

또한 식(1)과 (2)에 의해서 특정 주파수 값(주파수×매질 두께)의 조건하에서 전파하는 유도파의 속도를 계산할 수 있다. 이러한 식을 이용하여 계산된 결과를 Fig. 4에 나타낸다.

그림의 (a)는 각각의 초음파의 위상속도(phase velocity)를 나타낸 것이며, 그림 (b)는 군속도(group velocity)를 나타낸 것이다. 실험적으로 관찰할 수 있는 파형은 군속도로서 그림에서 보는 바와 같이 동일한 fd 값의 조건하에서도 여러 종류의 파가 존재함을 알 수 있다.

Table 1 Test conditions

Gain	from 0 to 20 dB
Frequency	from 600 kHz to 1200 kHz
Pulse Width	27 μ sec
Repetition rate	65msec
Sampling rate	6.25 MHz
LP filter	5 MHz
HP filter	100 kHz
Output level	100%
RxTx	pulse-echo

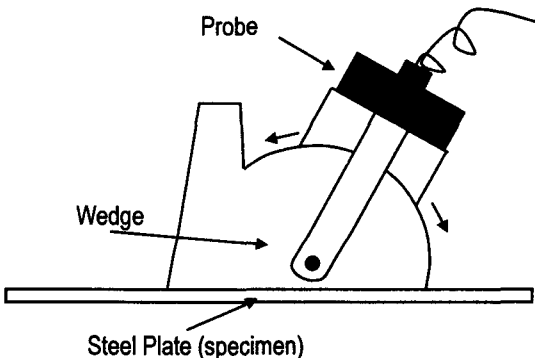


Fig. 2 Wedge used in this study

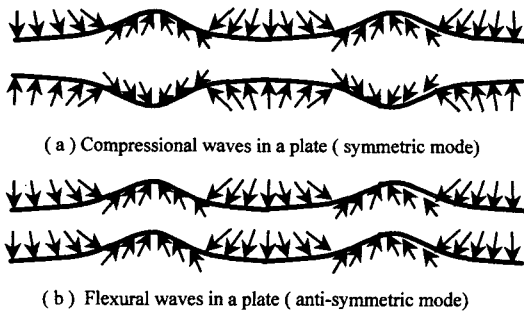


Fig. 3 Compressional (symmetric) and flexural (antisymmetric) wave particle displacement schematic(8)

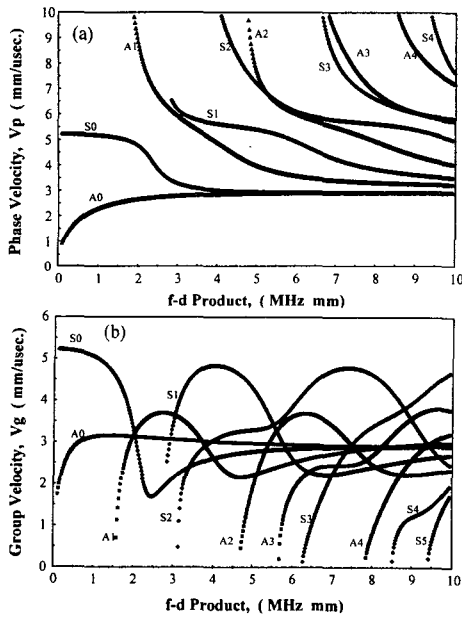


Fig. 4 Phase velocity (a) and group velocity (b) dispersion curves for the symmetric and antisymmetric mode for a thin silicon steel plate

3.2. 최적 탐상 조건과 유도파 Mode

전술한 바와 같이 박판의 결함을 검출하기 위한 유도파는, dispersion curve에서도 알 수 있듯이 발생조건에 따라서 여러 모드의 파가 존재할 수 있고 결함의 검출에 가장 적합한 모드를 선정하는 것이 중요하게 된다. 여기서 유도파의 발생에는 시험체의 두께와 시험 주파수 그리고 입사각이 중요한

변수로 작용하게 된다. 본 절에서는 유도파를 이용한 결함 검출의 기초 단계로서 최적의 탐상조건 도출에 대한 시험 결과와 탐상 조건에 따른 발생 모드에 대해서 설명하기로 한다.

3.2.1. 가진 주파수의 영향

Fig.5에는 후술하는 바와 같이 여러 주파수 범위에서 높은 반사파 에너지를 나타내었던 입사각 30도의 조건하에서 탐상 주파수를 변화시켜 가면서 파형의 변화 양상을 비교 검토한 일례이다.

그림중의 (a)는 시험편의 길이 방향에 대해서 380mm 떨어진 곳의 무결함 시험편의 끝단을 탐상한 것으로, 650kHz의 가진 주파수를 입사시켰을 때의 결과를 나타낸다. 결과를 보면 화살표로 표시된 반사파가 시험편의 끝단에서 처음 반사되어온 것임을 알 수 있었다. 한편 그림 (b)는 동일 조건하에서 750kHz의 주파수를 입사시켰을 때의 결과로서 그림 (a)와 비교하여 반사파의 에너지는 더욱 크게 나타나고 있다. 이러한 에너지 증가의 경향은 약 840kHz까지의 주파수 범위에서 똑같이 나타나고 있었다. 그림 (c)는 반사파의 에너지가 크게 나타났던 840kHz의 결과이다. 그러나 900kHz를 넘게 되면 반사파의 에너지는 감소하면서 파의 형상은 복잡하게 나타나게 된다. 그림 (d)는 1000kHz의 결과를 나타낸다. 이 결과에서도 알 수 있듯이 주파수와 함께 fd값이 증가함에 따라 여러 종류의 파가 발생되고 있으며, 이러한 현상은 Fig.4의 dispersion curve가 잘 대변해 주고 있다. 이상의 실험적 결과를 살펴보면 반사파 에너지가 큰 점과 발생하는 유도파의 종류가 적게 나타나는 점으로부터, 840kHz의 주파수가 본 연구에서 사용된 시험체의 유도파 발생 조건으로 만족하고 있음을 알 수 있다.

한편 이보다 높은 주파수에 대해서도 검토를 해보았으나 반사파의 에너지가 미약하거나, 수많은 종류의 모드가 함께 존재하기 때문에 실용상 문제가 있으므로 구체적인 검토는 생략했다.

3.2.2. 입사각도의 영향

Fig.6에 입사각도의 영향을 조사한 결과를 나타낸다. 그림은 전 절에 설명한 대로 반사파의 형태가 간단하며 모드의 수가 적고 에너지가 가장 높게 나

타고 있었던 840kHz의 가진 주파수 조건하에서 입사각도를 변화시키면서 얻은 결과의 일례이다. 우선 그림중의 (a)는 입사각 25도일 때의 것으로서 판파의 발생은 전혀 없는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 입사각 0도에서 25도의 범위에서 동일하게 나타나고 있으며 30도와 37도 정도의 범위에서 그림 (b)와 같이 반사파가 나타나고 있다. 한편 40도와 70도 사이에서는 전혀 반사파가 관찰되지 않으며 80도를 넘는 각도부터 그림 (c)에 보이는 바와 같은 반사파가 보이고 있다. 여기서 그림 (c)와 (b)를 살펴보면 에너지의 차이와 함께 파의 전파시간도 다를 수 있고, 이로부터 두 개의 파는 서로 모드를 달리하고 있음을 알 수 있다. 이러한 모드의 설명에 대해서는 다음절에서 설명하기로 한다.

3.2.3. 입사각에 따른 모드의 변화

본 실험 조건에서 굴절각이 90도임을 감안하면,
 $V_{1, \text{wedge}} / \sin \theta_1 = V_p$ (3)
 의 식에 의해서 30도와 85도의 입사각에 있어서의 위상속도를 구할 수 있다. 이 계산에 의해서 85도의 입사각의 경우 위상속도는 약 2700m/sec 그리고 30도에서는 약 5420mm/sec의 값을 가지게 된다. 이러한 결과와 Fig. 4(a)의 dispersion 커브를 비교하여 보면 입사각 30도의 경우에 나타나는 초음파는 symmetric mode(그림에서 So모드)이며 85도의 경우에는 antisymmetric mode(Ao모드)임을 알 수 있다. 한편, 전절에서 언급하였듯이 최적 탐상 조건으로는 840kHz의 주파수와 30도의 입사각을 들 수 있다. 이러한 조건하에서 전파거리의 변화에 따른 반사파의 거동을 Fig. 7에 나타낸다. 이같은 결과를 토대로 판파의 전파속도(군속도)를 구하여 보면 약 4100m/sec의 값을 가진다. 여기서 $fd \approx 2.0(\text{MHz mm})$ 이므로 Fig. 4의 (a)와 (b)에 보인 dispersion curve와 비교하여 보면, 어느 정도의 편차를 감안할 때, So모드(symmetric)에 해당된다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있다. 한편 입사각 85도에서 발생된 파도 상기와 같은 과정을 통하여 얻은 전파속도는 약 3200mm/sec로서 그림(b)의 Ao 모드(antisymmetric)의 유도파임을 알 수 있었다. Table 2는 이상의 실험 조건과 측정된 군속도를 이룬 결과와 비교 요약한 것으로서 So와 Ao 모드를 확인할 수 있는 표이다.

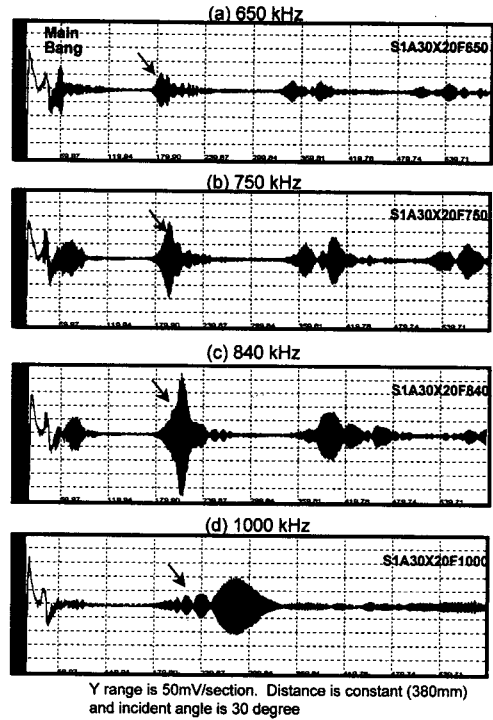


Fig. 5 Effects of tuning ultrasonic tone burst frequency on wave reflection

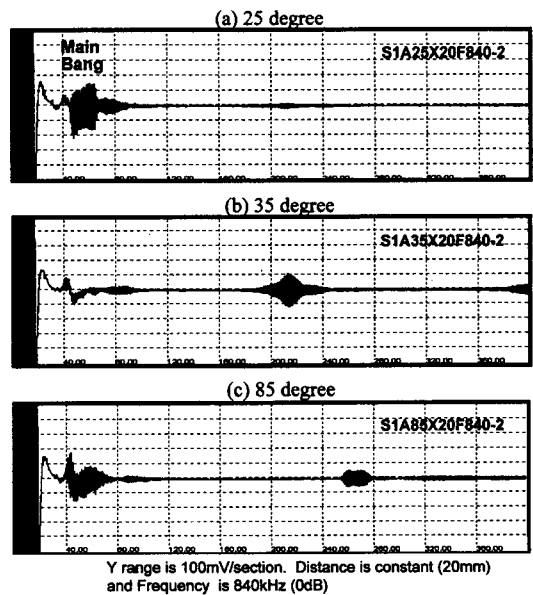


Fig. 6 Effects of tuning incident angle on the generation of guided waves

Table 2 Comparison of So and Ao mode for the mode identification

Mode	Angle	Frequency	Phase Velocity (theoretical)	Group Velocity (theoretical)	Group Velocity (Experimental)
So	30	840kHz	5420m/s	3500m/s	4100m/s
Ao	85	840kHz	2700m/s	3100m/s	3200m/s

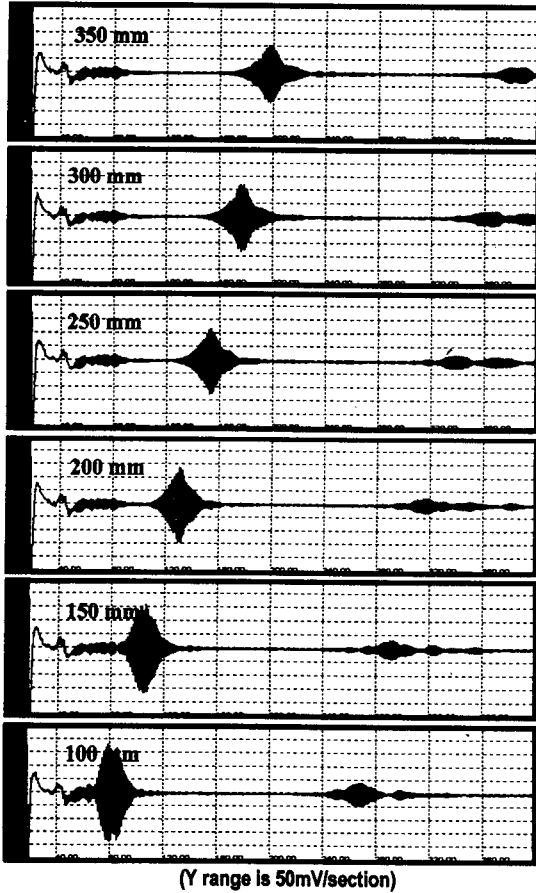


Fig. 7 Relation between wave propagation distance and time

3.3. 결함 탐상과 모드의 영향

Fig. 8의 결과들은 타원형 결함에 대해서 30도의 입사각과 동일한 증폭도(12dB)조건하에서 얻어진 결과로서, 결함의 폭은 같으나(30mm) 깊이가 다를 때의 결과를 함께 비교한 것이다. 그림중의 (a)는 깊이 0.5mm일 때의 결과이며, 그림 (b)와 (c)는 각각 깊

이 1mm와 2.4mm(관통)의 결합에 해당된다. 그림을 보면 균열 깊이의 증가에 따라 반사파의 에너지는 비례적으로 증가하고 있으며 결합의 면적과 반사파 에너지의 크기가 비례하고 있음을 잘 알 수 있다.

더구나 그림 (c)의 경우 모든 유도파는 결합에서 반사되고 있으며 시험편의 끝단 경계면에서의 반사는 거의 없음을 알 수 있다. 한편 동일한 타원형 시험편에 대해서 85도의 입사각(Ao 모드)과 동일한 증폭도를 가지고 실시한 탐상 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 그림을 보면 결합의 깊이가 0.5mm와 1mm일 경우, 결합으로부터의 반사파 에너지는, 그림 (a)와 (b)에 나타나듯이 결합 크기와 비례하고 있다. 그러나 가장 큰 결함(관통 결함)에 해당되는 (c)의 결과는 의외로 작은 에너지의 반사파가 관찰되고 있다. 즉, So 모드의 유도파는 결함의 크기와 비례하는 경향이 있으나, Ao 모드의 경우에는 어느 깊이를 초과하면 반대로 낮은 에너지의 반사파가 돌아오고 있음을 말해 주고 있다. 더구나 Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 보면 깊이가 작은 결함일수록 Ao 모드의 반사파 에너지가 So 모드의 그것 보다 높다는 것도 특징적이라 할 수 있다.

이상과 같은 현상은 각 모드의 전파 및 반사 특성을 결정 짓는 wave structure를 연구함으로써 부분적인 설명이 가능하며, 모드 변환과 결합의 크기 그리고 형상을 고려함으로써 보다 정확한 현상 규명이 가능하리라 생각된다, 여기서는 판파의 wave structure를 간단히 설명하면서 실험결과에 대해서 고찰해 보기로 한다.

일반적으로 박판에서의 유도파의 변위의 크기는 판의 두께 방향과 길이 방향으로의 구배를 가지게 된다. 또한 그러한 변위의 크기와 분포 거동은 주파수와 직접적인 관계를 가지게 된다. 문헌들에 의하면, $f*d=2$ 에서의 변위 분포를 개략적으로 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾. 그림중의 “out”는 판의 두께 방향으로 작용하는 파의 변위 분포를 그리고 “in”은 판의 길이 방향으로 존재하는 변위 분포를 나타내고 있다. 그림 (a)의 symmetric 모드의 경우, 판의 길이 방향에서의 변위는 표면보다는 중앙에서 큰 값을 나타내고 있고, 두께 방향의 파는 반대의 경향을 나타내고 있다. 한편 그림 (b)의 antisymmetric 모드의 경우에는 두께 방향으로 작용하는 파의 변위는 큰 변화가 없는 반면에 길이 방향으로서는 표면에서 최대를 그리고 중앙에서 최소 값을 나타내고 있다. 그림

에서 변위의 크기는 절대값이 아니기 때문에 상대적인 비교를 할 수는 없다. 그러나 판의 두께상에서 나타나는 변위의 분포 거동만을 생각할 때, 판의 표면에 존재하는 결함에 대해서는 antisymmetric 모드의 유도파가 보다 높은 에너지의 반사파를 발생시키리라는 것을 예상할 수 있다. 물론 실제적인 유도파의 전파에 있어서는 Fig. 10에 보인 바와 같이 판의 길이방향과 두께 방향으로 작용하는 파가 따로 있는 것이 아니고, 두 개의 성분이 중복된 파가 발생한다. 이 때문에 결함의 위치와 크기에 관련하여 어떠한 모드의 유도파가 더 유효하다는 본질적인 분석에 대해서는 향후 심도 깊은 해석이 있어야 할 것으로 여겨진다.

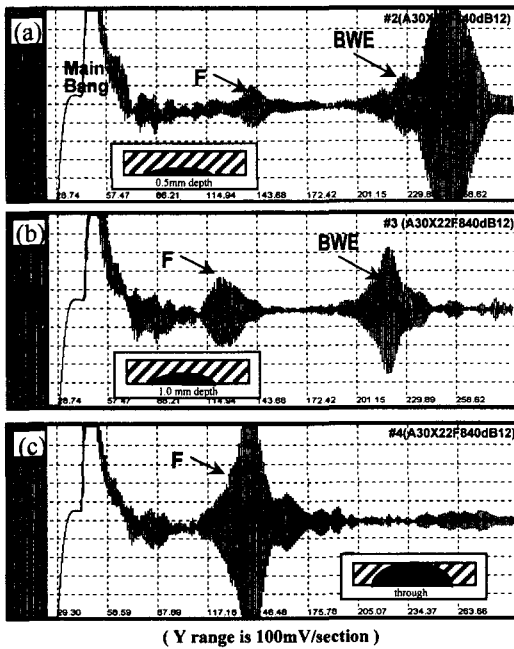


Fig. 8 Ultrasonic test results for the elliptical defects with the symmetric mode

Fig. 11에는 원형 관통 결함들을, S_0 와 A_0 모드를 이용하여 탐상한 결과의 일례를 나타낸다. 그림중의 (a)와 (b)는 0.8mm와 4mm의 직경을 가지는 원형 결함에 대해서 S_0 모드에 의한 결과를 나타내고, (c)와 (b)는 동일한 시험편에 대해서 A_0 모드를 이용한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 S_0 모드의 경우 직경의 크기와 반사파의 에너지가 비례하지만, A_0 모드 경우에는 그러한 관계가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 관계를 Fig. 12에 나타낸다. 이 같은

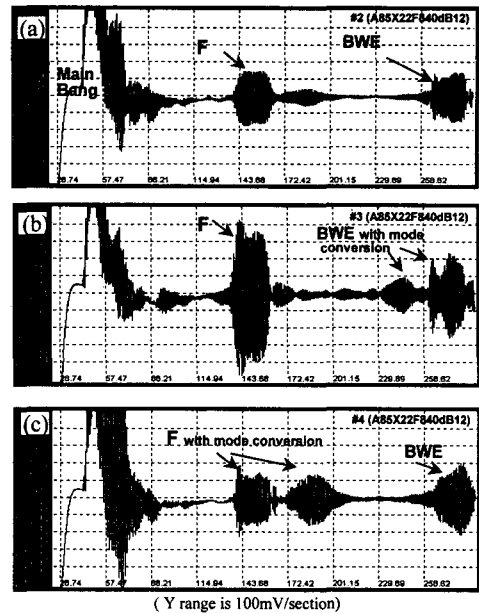


Fig. 9 Ultrasonic test results for the elliptical defects with the antisymmetric mode

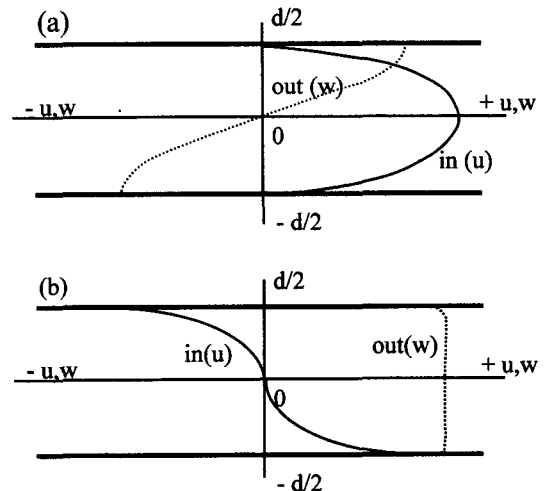


Fig. 10 Schematic diagrams of the wave structure for various points on the S_0 (a) and A_0 (b) mode (in the case of $f \cdot d = 0$)

결과에서도 알 수 있듯이 A_0 모드의 유도파는 판의 표면 부근에서만 최대 에너지를 나타내며 표면 결함에 대해서 효과적이고 판의 중앙에 존재하는 결함에 대해서는 S_0 모드가 효과적인 것을 나타낸다. 또한

So 모드의 유도파는, 결함이 어느 위치에 있더라도 검출이 가능하지만, 표면에 존재하는 결함에 대해서는 감도(sensitivity)의 저하를 고려해야 할 것이다.

한편 Fig. 11의 결과를 통하여, 최소한 0.8mm의 원형 결함까지도 검출이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림에 나타난 명확한 반사파의 형상으로부터 검출 가능한 결함의 크기는 더욱 작아질 수 있다고 여겨진다.

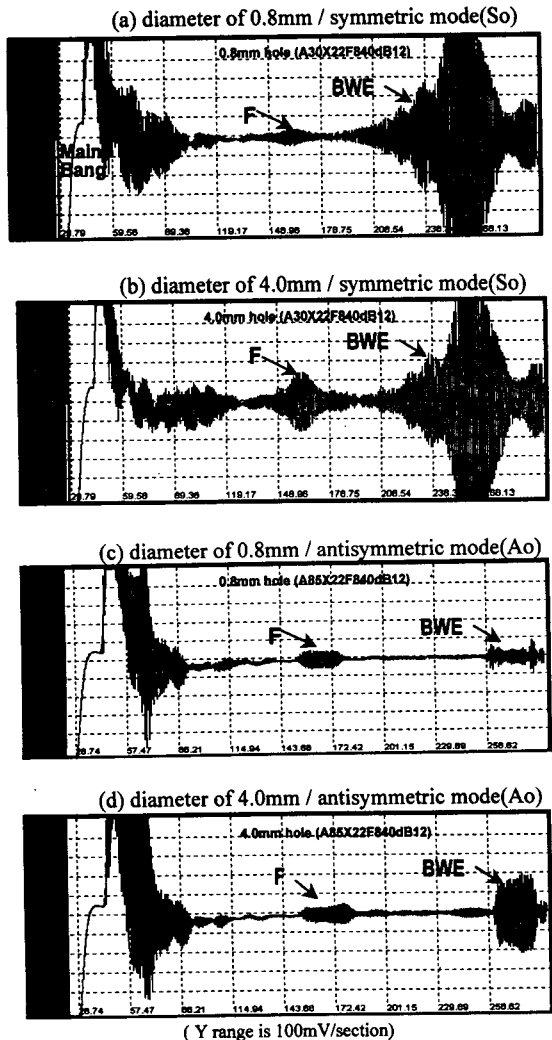


Fig. 11 Ultrasonic test results on the through hole defects with both the symmetric and antisymmetric modes(note So improved sensitivity because of wave structure with large amplitude at the center of the thickness of the structure)

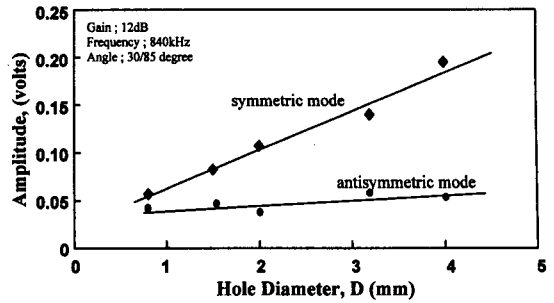


Fig. 12 Relation between amplitude of reflected signals and hole diameter

4. 결론

박판의 용접부에 존재하는 결함의 검출을 위한 기초단계로서, 유도파와 tone burst 방식에 의한 초음파 탐상을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2.4mm의 두께를 가지는 전기강판의 경우 840kHz의 주파수와 30도 그리고 85도의 입사각이 최적의 탐상 조건임을 알았다.
- 2) Guided wave의 속도와 dispersion 커브를 비교 검토하여 본 바, 30도의 입사각에서 발생하여 전파하는 초음파는 symmetric mode(So)를 그리고 85도의 입사각에서는 antisymmetric mode(Ao)의 파임을 알았다.
- 3) 표면 타원 결함의 면과 직각방향으로 탐상한 결과, 결함의 깊이가 얇을 때는 Ao 모드에 의한 탐상에서 높은 결함 반사 에너지가 나타나고 있다. 반면, 결함이 깊어짐에 따라 So 모드에 의한 에너지가 높게 나타남을 알았고 이러한 현상은 유도파의 구조(wave structure)에 의해서 설명 가능했다.
- 4) 관통 원형 결함의 경우, So 모드의 유도파는 결함의 직경과 비례하는 결함 반사파 에너지를 나타내는 반면에 Ao 모드파는 직경에 관계없이 거의 일정한 에너지의 값을 나타내고 있다.

참고 문헌

- 1) K. F. Graff, "Wave motion in elastic solids", Dover Publications, Inc., (1973)
- 2) B. A. Auld, "Acoustic fields and waves in solids", 2nd Edition, Krieger Publishing Co.

- (1994)
- 3) H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided wave tuning principles for defect detection in tubing", J. of NDE, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36, (1998)
 - 4) M. Brook, T. D. Hgoc and J. Eder, "Ultrasonic inspection of steam generator tubing by cylindrical guided waves", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 9, pp. 243-249, (1990)
 - 5) J. J. Ditre and J. L. Rose, "Excitation of guided wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions", J. app. Phys., Vol. 72(7), pp. 2589-2597, (1992)
 - 6) Y. Cho, D. D. Hongerholt and J. L. Rose, "The lamb wave scattering analysis for reflector characterization", The IEEE Transaction, Vol. 44, No. 1, pp. 44-52, Jan., (1997)
 - 7) H. J. Shin, "Non-axisymmetric ultrasonic guided waves for tubing inspection", Thesis for Ph. D, Pennsylvania State Univ. (1997)
 - 8) A. E. Armenakas and D. E. Gazis, "Free vibrations of circular cylindrical shells", Pergamon Press, (1969)
 - 9) J. L. Rose, "Waves in solid media: a focus on ultrasound", to be published.

Detection of Defects in a Thin Steel Plate Using Ultrasonic Guided Wave

Hee Don Jeong*, Hyeon Jae Shin** and Joseph L. Rose**

* Maintenance Technology Lab., Research Institute of Industrial Science
and Technology(RIST), Pohang 790-330

** Ultrasonic Laboratory, Pennsylvania State University
114 Hallowell Building, University Park, PA 16802 USA

Abstract In order to establish a technical concept for the detection of defects in weldments in thin steel plate, an experimental and theoretical investigation was carried out for artificial defects in a steel plate having a thickness of 2.4mm by using the guided wave technique. In particular the goal was to find the most effective testing parameters paying attention to the relationship between the excitation frequency by a tone burst system and various incident angles. It was found that the test conditions that worked best was for a frequency of 840kHz and an incident angle of 30 or 85 degrees, most of the defects were detected with these conditions. Also, it was clear that a guided wave mode generated under an incident angle of 30 degrees was a symmetric mode, S_0 , and that of 85 degrees corresponded to an antisymmetric mode, A_0 . By using the two modes, most of all of the defects could be detected. Furthermore, it was shown that the antisymmetric mode was more sensitive to defects near the surface than the symmetric mode. Theoretical predictions confirmed this sensitivity improvement with A_0 for surface defects because of wave structure variation and energy concentration near the surface.