

## 초음파를 이용한 경사진 반사체의 검출 능력 및 크기 평가에 관한 연구

홍 순 신   곽 경 진   박 종 현   박 대 영  
한국에너지 연구소 비파괴 시험 연구실

1986년 3월 13일 접수

### Study on Detectability and Sizing for Inclined Planar Reflectors by Ultrasonic Testing

S. S. Hong, K. J. Kwak, J. H. Park, D. Y. Park

## ABSTRACT

The ultrasonical characteristics of inclined planar reflectors is investigated by the maximum amplitude method. The reflected ultrasound is varied by the reflector size, shape, inclination and using transducers.

It was found that the detecting ability for planar reflectors was decreased with increasing transducer size and misorientation angle and increased with decreasing ultrasonic frequency, also the misorientation angle of planar reflectors affected significantly for the measurement of reflector size.

### 1. 서 론

국내의 원자력 발전소의 수가 점차 증가함에 따라 원자력 발전소의 주요 구성 요소인 각종 압력용기 및 배관들의 용접부에 대한 건전성 확보는 원자력 발전소의 안전성 측면에서 고려할 때 매우 중요하다.

이러한 주요 부품들의 건전성 및 안전성을 확보하기 위하여 가동전 검사와 가동중 검사를 수행하고 있다. 국내의 가압 경수로형 원자력 발전소에 대한 가동중, 전 검사는 ASME Code

Section V 및 Section XI의 요구 조건에 따라 비파괴검사를 하고 있는데, 여러가지 비파괴 검사 방법중에서 초음파 탐상 방법은 용접부 내부의 균열, 융합 불량(lack of fusion) 기공등의 결함을 검출함에 있어서 가장 중요한 검사 방법이다.

초음파 탐상이라 함은 첫째로 검사체 내부의 결함 유무를 판정하는 결함 검출의 의미와 둘째로 검출된 결함의 크기, 모양, 방향, 위치등을 파악하는 결함 평가 분석등 두가지로 분류할 수 있겠다.

이러한 결합의 검출 및 평가 분석을 위하여 거리 증폭 곡선(DAC curve)를 이용한 최대 진폭크기법<sup>1)2)</sup>, DGS (Distance-Gain-Size) 선도를 이용한 방법<sup>3)</sup>, ultrasonic spectroscopic technique<sup>4)5)6)</sup>, Delta법<sup>7)</sup> 및 imaging<sup>10)</sup> 방법 등 여러가지가 있다. 위와같은 여러가지 방법중에서 현재 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 방법은 최대진폭 크기법이다.<sup>8)9)</sup>

따라서 본 연구는 용접중에 발생 가능성이 있는 융합 불량과 같은 평판형 결함의 검출 능력 및 결합 평가 분석을 위하여 최대 진폭 크기법을 이용하여 평판형 결함의 크기 및 기울기에 따른 결합 검출 능력과 결합크기 측정의 정확성에 대하여 조사 하였고, 이론적 계산치와 실험치를 비교 검토하였다.

## 2. 이론적 배경

반사체로부터 얻어지는 초음파 신호의 크기는 기본적으로 반사체와 초음파 탐촉자의 크기 및 모양, 초음파 빔의 특성에 대한 반사체의 방향성, 초음파가 진행되는 재료의 감쇄상수, 초

음파의 진행 거리등에 따라서 결정된다.<sup>8)</sup>

그림 1은 수직탐촉자 및 사각 탐촉자에서 방사되는 초음파의 지향특성 및 반사체에서 반사되는 초음파의 지향 특성의 상호 관계를 나타낸 것이다.

여기서  $\eta$ 는 반사체의 기울기,  $\rho$ 는 탐촉자의 사용 굴절각,  $\theta_r$ 는  $\rho$ ,  $\theta$ 에 의해 결정되는 각,  $\theta_r$ 은  $\eta$ 와  $\theta$ 에 의해 결정되는 각이다.

본 연구의 주안점은 탐촉자 사용 굴절각( $\rho$ )와 반사체 기울기( $\eta$ )에 의한 차이각도, 즉, misorientation ( $\phi = \eta - \rho$ , 이하 경사각이라 함)이다.

여기서 탐촉자와 반사체와의 거리는 음압 특성이 양호한 원거리 영역에서 수행하는 것으로 가정하고 탐촉자 및 반사체의 모양은 원형 평판, 반사체 표면 거칠기에 따른 신호크기 영향을 최소로 하는 것으로 가정한다.

그림 1에서와 같이 반사체의 크기, 방향성 등이 동일한 경우 반사체에서 반사되어 탐촉자에 수신되는 초음파 신호의 크기는 각도  $\theta$ 에 따라 변하게 된다. 이는 그림 1의 (b)와 (c)의 경우와 같이 탐촉자의 위치를 이동시키면 각도  $\theta$ 가

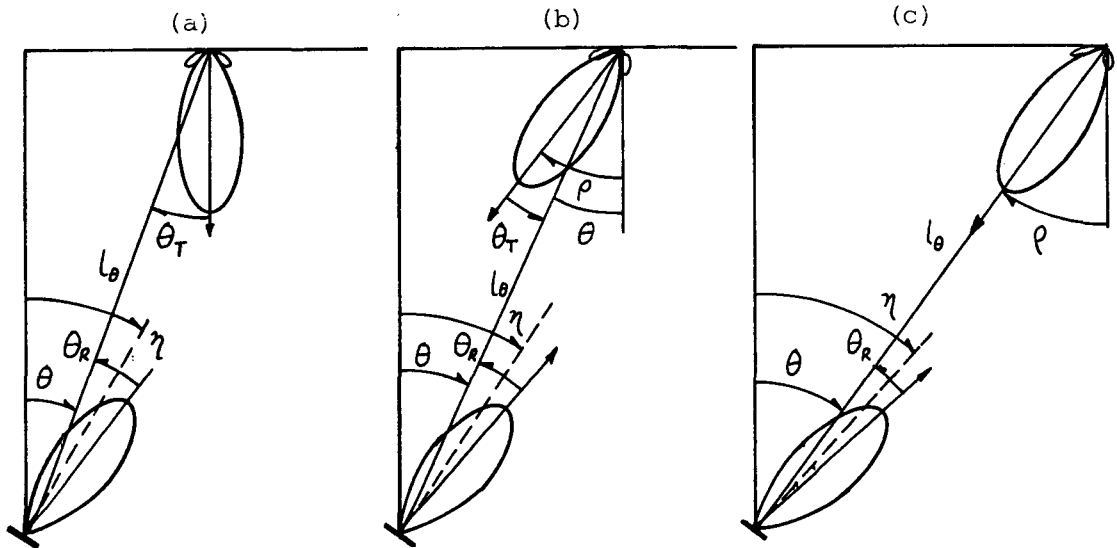


그림 1. 탐촉자와 반사체에서의 초음파 지향 특성

변하게 되고 이에 따라 각도  $\theta_T$ 와  $\theta_R$ 이 변하게 되어 초음파 탐촉자에서 방사되는 초음파의 지향 함수(directionality fuction)  $D_T(\theta_T)$ 와 반사체에서 형성되는 반사파의 지향함수  $D_R(\theta_R)$ 의 값이 식(1) 및 (2)와 같이 표시된다.

$$D_T(\theta_T) = \frac{2 J_1(m)}{m} \quad m = \frac{\pi \omega}{\lambda} \sin \theta_T \dots\dots\dots (1)$$

$$D_R(\theta_R) = \frac{2 J_1(n)}{n} \quad n = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta_R \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $J_1$ 은 1차 Bessel 함수,  $\omega$ 는 탐촉자의 크기,  $\lambda$ 는 초음파의 파장  $d$ 는 반사체의 크기이다.

탐촉자가 그림 1과 같이 임의의 위치에서 반사체가 받는 초음파의 송신신호 크기  $A_{TR}$ 는 식(3)과 같이 된다.

$$A_{TR} = \frac{a_T D_T(\theta_T) \{a_R \cos(\theta_R/2)\} e^{-\alpha l_0}}{l_0} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $a_T$ 는 탐촉자의 면적,  $a_R$ 는 반사체의 면적,  $\alpha$ 는 초음파 감쇄상수,  $l_0$ 는 탐촉자와 반사체 사이의 거리이다.

다음 반사체에서 방사되는 초음파의 신호크기  $A_{RT}$ 는 송신되는 초음파 신호 크기  $A_{TR}$ 과 반사체의 지향함수  $D_R(\theta_R)$ 에 따라 식(4)와 같이 표시된다.

$$A_{RT} \simeq A_{TR} \cdot D_R(\theta_R) \dots\dots\dots (4)$$

따라서 탐촉자에서 발생된 초음파가 반사체에 의하여 반사되어 탐촉자에 수신되는 초음파 신호 크기  $A'(\theta)$ 는 식(3)과 (4)로부터 식(5)와 같이 된다.

$$A'(\theta) \simeq \frac{A_{RT} \cdot D_T(\theta_T) \cdot e^{-\alpha l_0}}{l_0} \\ \frac{A_{TR} D_R(\theta_R) D_T(\theta_T) \cdot e^{-\alpha l_0}}{l_0} \dots\dots\dots (5)$$

탐촉자의 직경을  $\omega$ , 반사체의 직경을  $d$ 라고 하면 식(5)를 식(6)으로 표시할 수 있다.

$$A'(\theta) \simeq \frac{\pi^2 \omega^2 d^2 D_T^2(\theta_T) D_R(\theta_R) \cos \frac{\theta_R}{2} \cdot e^{-2\alpha l_0}}{4 l_0^2} \dots\dots\dots (6)$$

표준 교정 시험편을 이용하여 탐촉자에서 방사되는 초음파 빔의 중심축과 반사체 면이 수직 한 경우에  $\theta_T = \theta_R = 0$ 이므로  $D_T(\theta_T) = D_R(\theta_R) = 1$ 이 되고  $\cos(\theta_R/2) = 1$ 이 된다. 여기서 표준교정시험편의 인공 결함 크기를  $d_0$  인공 결함과 탐촉자와의 거리를  $l_0$  초음파 감쇄 상수를  $\alpha_0$ 라고 하면 표준 교정 시험편의 인공 결함으로부터 반사되어 탐촉자에 수신된 초음파 신호크기  $A''(\theta)$ 는 식(7)과 같이 표시된다.

$$A''(\theta) = \frac{\pi^2 \omega^2 d_0^2 e^{-2\alpha_0 l_0}}{4 l_0^2} \dots\dots\dots (7)$$

식(6)과 (7)에서 표준 교정 시험편에서의 초음파 신호크기  $A''(\theta)$ 에 대한 시험하고자 하는 시험편의 반사체에서의 신호 크기  $A'(\theta)$ 의 신호 크기 비율  $A(\theta)$ 를 구하면 식(8)과 같다.

$$A(\theta) = \frac{A'(\theta)}{A''(\theta)} \\ = \underbrace{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2}_{F_1} \times \underbrace{D_T^2(\theta_T) D_R(\theta_R) \cos\left(\frac{\theta_R}{2}\right)}_{F_2} \\ \times \underbrace{\left(\frac{l_0}{l_0}\right)^2 e^{-2(\alpha_0 l_0 - \alpha l_0)}}_{F_3} \dots\dots\dots (8)$$

식(8)에서  $F_1$ 은 표준시험편의 인공 결함 면적과 시험편의 반사체 면적의 비,  $F_2$ 는 초음파빔의 방향성 즉, 경사각에 의한 영향,  $F_3$ 는 탐촉자에서부터 반사체까지의 거리에 대한 비율 및 초음파 감쇄 상수에 따라 결정된다.

만약, 검사체와 동일한 재질인 표준 교정 시험편을 이용하여 정확히 장비 교정을 하였다면

$F_3$ 에 대한 영향은 극소화 시킬수 있을 것이다.

이상을 종합해보면 초음파 탐상방법을 이용하여 시험체 내부에 존재하는 평판형 결함을 검출함에 있어서 초음파 빔의 중심축과 결함 평면의 수직선과 이루는 각도 즉 경사각(misorientation)은 결함의 검출 능력에 상당한 영향을 주며, 따라서 결함의 크기 평가에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 시험편

실험용 시험편의 재질은 기계 구조용 강인 SCM4 강을 이용하여 그림 2 와 같이 시험편 표면에 대하여 기울기가 25° 에서부터 각각 5° 씩 증가시켜 65° 가 되게끔 하였다.

편저공의 크기는 직경이 1/4inch, 1/2inch, 3/4inch 인 세 종류의 시험편을 제작하였으며 편저공의 면의 거칠기를 약  $12\mu m$  로 균일하게 하기 위하여 방전 가공 방법을 이용하였다.

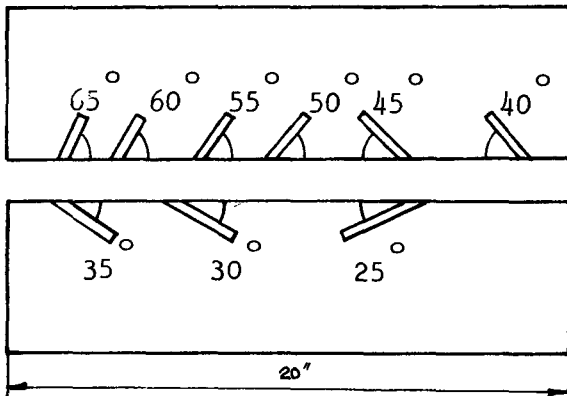


그림 2. 시험편

#### 3.2 실험

##### 1) 검출능력 측정

경사진 반사체의 검출능력을 고찰하기 위하여 직경 1/4inch, 주파수 2.25MHz, 굴절각

45° 인 사각 탐촉자를 사용하였다. 반사체의 직경이 1/4inch이고 기울기가 45° 인 반사체에서 측정되는 최대 진폭 크기를 기준으로 기울기가 각각 5° 씩 증가되는 다른 반사체에 대한 최대 진폭 크기를 측정하였다.

위와같은 방법으로 직경이 각각 1/2inch, 3/4inch인 반사체에 대하여도 최대 진폭 크기를 측정하였고, 직경이 1/2inch, 주파수 1.5 MHz, 굴절각 45° 인 사각 탐촉자를 이용하여 주파수 및 탐촉자 크기 변화에 따른 검출 능력을 고찰하였다.

##### 2) 결함의 크기 측정

경사진 반사체의 실제 크기와 초음파를 이용하여 측정되는 반사체 크기를 비교하기 위하여 직경 1/4inch, 주파수 2.25MHz, 굴절각 45° 인 탐촉자로 직경 1/4inch 반사체를 이용하였다. 기울기가 45° 인 반사체에서 최대 진폭 크기를 측정하고 그때의 탐촉자 위치에서  $\theta$ 의 값이  $\pm 1^\circ$  씩 증가 또는 감소 되게끔 탐촉자의 위치를 이동시키면서 진폭 크기를 측정하였다. 위와같은 방법으로 반사체의 기울기가 30°, 35°, 40° 인 반사체에 대하여도 탐촉자 위치 이동에 따른 진폭 크기를 측정하였다.

##### 3) 진폭크기의 이론적 계산

원형 반사체의 크기 및 경사도에 따른 검출능력을 이론적으로 분석하기 위하여 식(8)을 프로그래밍하여 Cyber 174 컴퓨터를 이용하여 신호 크기  $A(\theta)$ 를 산출하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 결함의 검출 능력

그림 3(a)는 탐촉자의 직경이 1/4inch인 경우에 반사체와의 경사각에 따른 최대 진폭 크기를 나타낸 것이고 그림 3 (b)는 탐촉자의 직경이 1/2

inch 경우 그림 3 (c)는 탐촉자의 직경이 1/4 inch 인 경우에 반사체와의 경사각에 따른 최대 진폭 크기를 나타낸 것이다.

그림 3에서 볼 수 있는바와 같이 사용 탐촉자 굴절각과 반사체와의 경사각이 증가할수록 최대 진폭 크기는 감소하였다. 초음파 빔이 반사체면에 수직으로 입사될때 즉, 경사각이 0° 일 경우와 비교하여 경사각이 10° 일 경우의 최대 진폭 크기의 감소는 6 dB 이상임을 알 수 있다.

식(8)에서 보여준 것과 같이 반사체의 크기에 관련된 함수  $F_1$ 과 탐촉자에서 반사체까지의 거리 및 검사체의 초음파 감쇄 상수에 관련된 함수  $F_3$ 가 동일하면, 탐촉자에서 발생한 초음파 빔의 주축과 경사진 반사체 면의 수직과 이루는 각도 즉, 경사각이 최대 진폭 크기를 감소시켜 주는 주된 원인이 됨을 알 수 있다.

만약, 반사체의 경사면과 초음파 빔의 주축이 서로 수직되어 있다면,  $m=0$ ,  $n=0$ 이므로  $D_T(\theta_T)$  및  $D_R(\theta_R)$ 가 최대값인 1이 되며 측정되는 최대 진폭 크기  $A(\theta)$ 는 최대가 된다.

또한, 경사각의 형성에 의하여  $m$ 혹은  $n$  값이 증가되므로  $D_T(\theta_T)$  및  $D_R(\theta_R)$  값이 감소된다. 따라서 측정되는 최대 진폭 크기는 감소하게 된다.

그림 3에서 보여준 것과 같이 식(8)에 의한 이론적 계산치와 실험치를 비교하여 보면, 경사각의 증가에 따른 최대 진폭 크기의 감소 경향이 정상적으로 일치함을 알 수 있다.

다음 그림 3의 (a), (b) 및 (c)를 각각 비교하여 보면 사용된 탐촉자의 크기가 증가될수록 경사각에 의한 최대 진폭 크기는 더욱 급격히 감소됨을 알 수 있다. 식(8)에 의하여 고찰해보면 탐촉자 크기  $\omega$ 가 증가할 때  $m$ 의 값이 증가되고  $m$ 값의 증가로  $D_T(\theta_T)$ 의 값은 감소된다.

따라서 탐촉자 크기가 커질수록 반사체와의 경사각에 의한 최대 진폭 크기의 감소율은 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

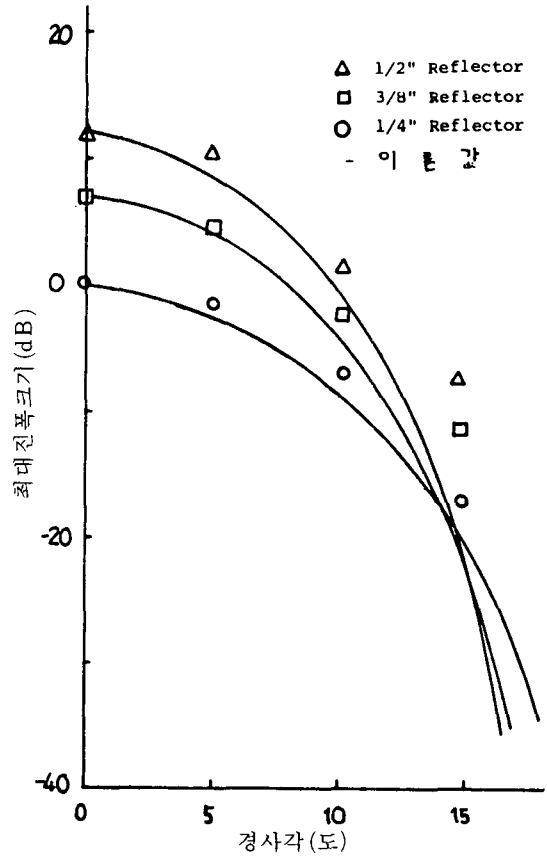
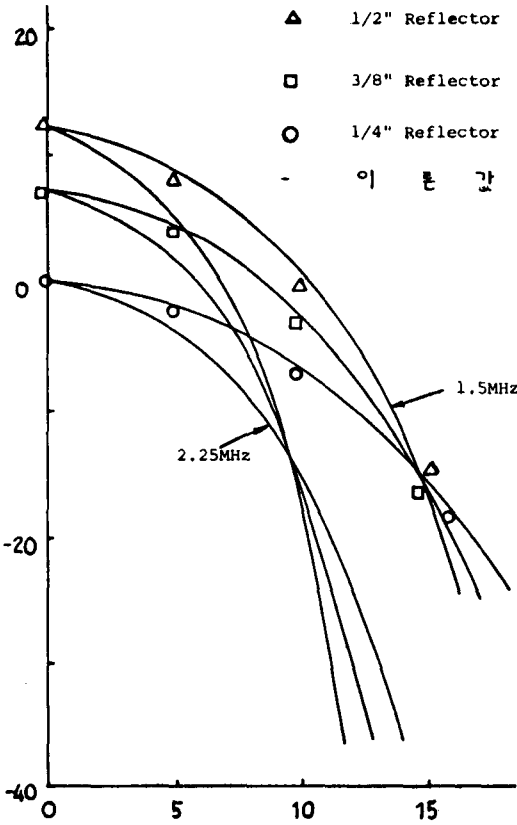


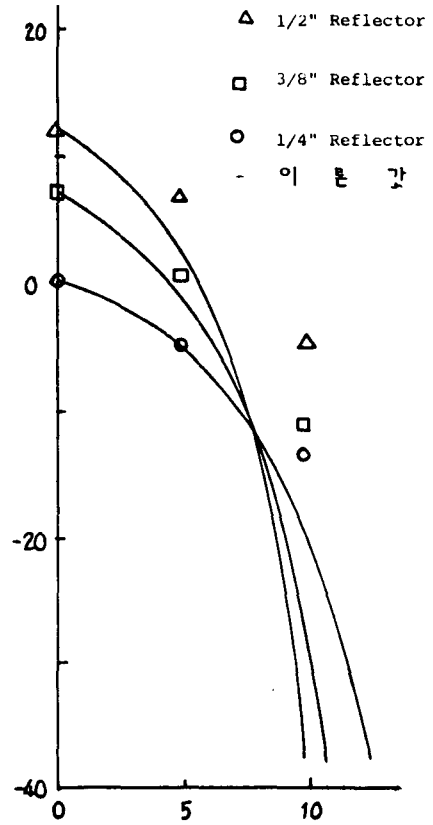
그림 3. (a) 경사각에 따른 최대진폭 크기의 변화 (탐촉자 크기 1/4 inch 주파수 2.25 MHz)

그리고 반사체 크기에 따른 최대 진폭 크기를 비교하여 보면 반사체와의 경사각과 무관하게 반사체의 크기가 증가되면 최대 진폭 크기가 증가됨을 볼 수 있다.

또한, 그림 3의 (B)에서 보는바와 같이 이론치는 동일한 크기의 탐촉자이나 주파수가 1.5MHz로 감소하였을 경우, 반사체의 경사각에 따른 최대 진폭 크기의 감소는 2.25MHz인 경우보다 적게 나타났으며 실험치는 주파수 1.5MHz에 대한 값이다. 이를 식(8)에 의하여 고찰해 보면 탐촉자의 주파수 감소로 인하여  $m$  및  $n$  값의 감소를 가져왔고 결과적으로  $D_T(\theta_T)$  및  $D_R(\theta_R)$ 의 값이 2.25MHz의 경우보다 커지므로 경사각의 증가에 따른 최대 진폭 크기의 감소율은 저하된다.



(b) 경사각에 따른 최대진폭 크기의 변화 (탐촉자 크기 1/2 inch, 주파수 2.25MHz 및 1.5 MHz)



(c) 경사각에 따른 최대진폭 크기의 변화 (탐촉자 크기 1/2 inch, 주파수 2.25MHz)

ASME Code Section V, Article 4 에서 규정하는 결함 판정 조건은 side drilled hole 을 이용하여 결정된 거리 증폭 곡선(DAC) 와 비교하여, 결함 신호의 최대 진폭 크기가 50% DAC 이상일 경우 결함 신호로써 간주하고 있다. 만약 용합 불량과 같은 평판형 결함이 시험체 내부에 존재하고 있다면 그림 3에서 알 수 있는 것과 같이 경사각이 약 5° 에서 7° 이상일 경우 경사각에 의한 최대 진폭 크기의 저하로 결함으로써 간주되지 않을 경우가 있을 것이다.

Wustenberg<sup>11)</sup> 등은 직경 1/4 inch 탐촉자를 사용하고 결함 측정 기준을 -20dB로 하였을때, 결함의 경사각이 10° ~15° 이상이면 검출 불가능이라 하였다. 따라서 경사각은 결함의 검출에

상당한 영향을 준다.

#### 4.2 결함의 크기 분석

그림 4는 탐촉자의 직경이 1/4 inch, 주파수 2.25 MHz 굴절각 45° 이고 반사체의 직경이 1/4 inch 인 경우에, 각각의 경사진 반사체에 대하여 탐촉자의 위치 이동에 따른 진폭 크기 변화를 나타낸 것이다.

최대 진폭 크기에서 진폭 크기가 6 dB 저하되는 부분에 대한 scanning parameter 의 각도  $\theta$  폭을 측정하여 보면 반사체의 기울기가 45° 즉 초음파 빔과 반사체 면과 수직인 경우의 각도 변화 폭은 5.5° 이고, 경사각이 5° 인 경우의 각도 변화폭은 5°, 경사각이 10° 인 경우의 각도

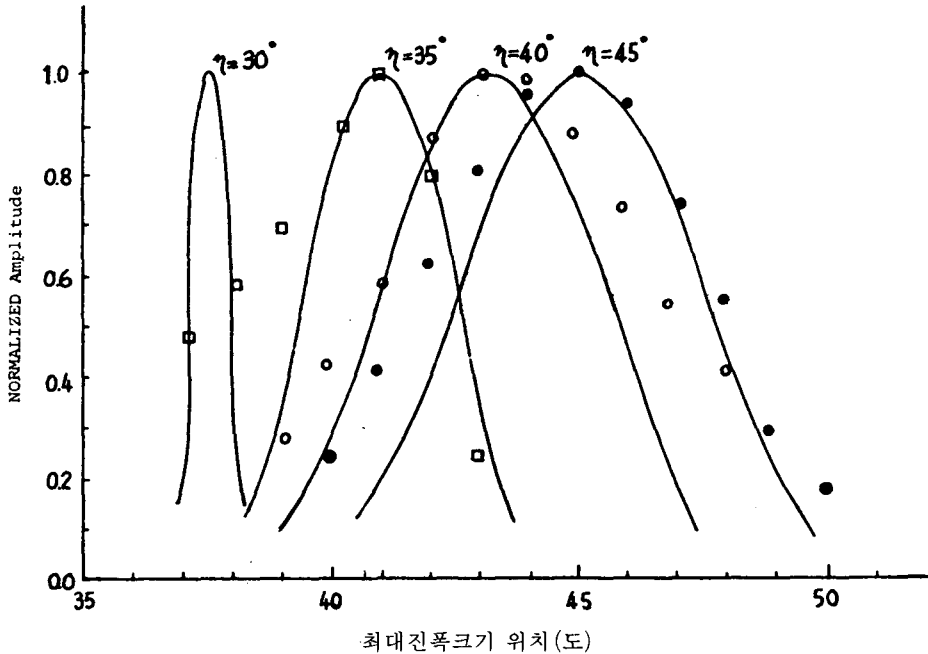


그림 4. 경사각에 의한 Amplitude Response Envelope  
(탐촉자 크기직경 1/2 inch, 주파수 2.25 MHz, 굴절각 45°)

변화 폭은 3.5°; 경사각이 15° 인 경우의 각도 변화 폭은 1° 이다.

이러한 것을 볼 때 반사체와 사용탐촉자간의 경사각이 증가할수록 각도 변화폭은 감소됨을 알 수 있다.

ASME Section V, Article 4에서 규정하는 결함 크기 평가 기준을 살펴보면, 결함으로부터 얻어지는 최대 진폭 크기가 100% DAC 이상일 경우에 결함 크기 측정 기준은 최대 진폭 크기에 대하여 6 dB 적은 부분의 탐촉자 위치를 기준으로 결함 크기 측정을 하고 최대 진폭 크기가 50% DAC에서 100% DAC사이일 경우에는 50% DAC를 기준으로 결함 크기를 측정하게끔 되어 있다. 그러나 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 크기의 반사체라 할지라도 반사체의 경사각에 따라서 측정되는 결함의 크기는 실제보다 상당히 작게 측정 평가된다는 것을 알 수 있다.

따라서, 용접불량과 같은 평판형 결함의 크기를 정확히 측정하기 위해서는 사용되는 초음파 빔과 결함면이 수직으로 되도록 즉, 경사각을 최소로 하여야 된다고 사료된다.

## 5. 결 론

용접중에 용접부 내부에 형성될 수 있는 결함 중에서 용접불량과 같은 평판형 결함의 성공적 검출 및 정확한 결함 크기의 측정은 용접부의 건전성 및 안전성 측면에서 고려할 때 매우 중요하다. 따라서 경사진 평판형 반사체들로부터 측정되는 진폭 크기의 변화를 연구하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 경사진 평판형 반사체에 대한 검출 능력은 초음파 탐촉자의 크기와 사용탐촉자 굴절각과 반사체 면의 수직축과 이루는 경사각이 커질수록 저하된다.

- 2) 동일한 초음파 탐촉자 크기로 결함 검출 능력을 높이기 위해서는 비교적 낮은 주파수의 탐촉자를 선택하여야 한다.
- 3) ASME Section V의 결함 판정 기준을 적용하여 초음파 탐상을 할 경우 결함과 탐촉자 사용각도와 이루는 경사각이 5°에서 10° 이상이면 결함 검출 능력은 저하되어 검출 불가능일 수도 있다.
- 4) 평판형 결함의 misorientation(경사각)은 정확한 크기 측정에 큰 영향을 준다.

## 6 참고문헌

1. "Nondestructive Examination," Section V of ASME code 1980 Ed
2. "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant," Section XI of ASME code 1980 Ed.
3. J. Krautkramer," Determination of the size of Defects by the Ultrasonic Impulse Echo Method," British Journal of Applied Physics, 10, 9, 240 (1959)
4. O. R. Gerike, "Determination of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing," J. Acoust. soc. Amer. 35, pp. 364 (1963)
5. W. L. Whaley and L. Alder, "Flaw Characterization by Ultrasonic Frequency Analysis," Material Evaluation, 24 pp. 182 (1971)
6. R. S Gilmore and G. J. Czerw," the use of Radiation Field Theory to Determine the size and shape of Unknown Reflections by ultrasonic Spectroscopy," Material Evaluation, 35. pp. 37 (1977)
7. B. T. Cross, et al., "Delta Technique Extends the Capabilities of weld Quality Assurance," British Journal of NDT, 11 pp. 62 (1969)
8. S. Serabian, "Ultrasonic Probability of Detection of Subsurface Flaws," Material Material Evaluation 40, pp. 294 (1982)
9. S. Serabian,"an Assessment of Detection Ability of Angle Beam Interrogation Method," Material Evaluation 39. pp. 1243 (1981)
10. B. Watkine, "Periodic Inspection of Light water Reactor Pressure Vessel," British Journal of NDT 15. 11 (1973)
11. H. Wustenberg and J. Kutzner," Dependence of Echo Amplitude on defect Orientation In Ultrasonic Examinations" 8 th world Conference on NDT. Cannes, France (1976)