

超音波TANDEM斜角法에 의한 圓形및 띠形缺陷의 크기 評價에 관한 研究

* 韓 應 教 ** 嚴 浩 燮 ** 金 在 重

1985년 12월 30일 접수

A Study on the Size Evaluation of Disc and Band Type Flaw by Ultrasonic Tandem Testing

E. K. Han, H. S. Eom, J. J. Kim

ABSTRACT

Generally, butt welds with plate thickness 30~40mm are welded with groove angle 45°, 60°, 70°, etc. In the detection of internal weld defects, oblique testing with single probe has been mainly used. But, recently, in accordance with enlargement of welded structure, thick plate with 100-200mm are frequently required. Thus I-groove welding method was lately developed and often used. In this case, most frequently generated defects are the lack of weld penetration and incomplete fusion between base metal and welding material. If we would detect by oblique testing with single probe, detecting flaw is occasionally impossible or very underestimated.

In this study, the limit for applying tandem method was studied in disc and band type flaws. The estimation of flaw size could be within 10% error compared to real flaws.

NOMENCLATURE

C	: Sound velocity of transverse wave in steel		rotation angle
C _w	: Sound velocity of longitudinal wedge	D ₂	: Echo height drop ratio caused by eccentric distance 4X
D ₁	: Echo height drop ratio caused by	d	: Depth location of flaw
		d ₀	: Depth location of flaw related to

* 한양대학교 정밀기계공학과

** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

	near field length		$P_R/P\ell_T$)
d_{01}, d_{02}	: Longitudinal and transverse half widths of crystal	γ_{C-B}	: Shape reflection coefficient of band type flaw
d_1, d_2	: Apparent Longitudinal and transverse half widths of crystal	γ_{C-D}	: Shape reflection coefficient of disc type flaw
F	: Size contraction ratio of longitudinal width	$\gamma_{C-\infty}$: Shape reflection coefficient of edge
H_B-H_∞	: Relative value of echo height in band type flaw to that of edge (= $20 \log_{10}(\gamma_{C-B}/\gamma_{C-\infty})$)	γ_{C-F}	: Shape reflection coefficient of flaw
H_D-H_∞	: Relative value of echo height in disc type flaw to that of edge (= $20 \log_{10}(\gamma_{C-D}/\gamma_{C-\infty})$)	γ_{C-S}	: Shape reflection coefficient of edge
K	: Wave number ($k=2\pi/\lambda$)	γ_I	: Interface reflection coefficient ($\gamma_I=P'\ell_T/P\ell_T$) coefficient
ℓ_{01}	: Near field length	γ_{I-F}	: Interface reflection coefficient of flaw
ℓ_T	: Beam path distance from transmission transducer to flaw	γ_{I-S}	: Interface reflection coefficient of edge
ℓ_R	: Beam path distance from flaw to receiving transducer	λ	: Wave length
\bar{P}_0	: Mean transmitting sound pressure	ϕ	: Rotation angle
P_{IT}	: Incident ultrasonic sound pressure to flaw	ϕ_1, ϕ_2	: Parameters
P'_{IT}	: Reflected ultrasonic sound pressure from flaw	σ	: Correction coefficient
P_R	: Sound pressure on the center of receiving transducer	θ	: Reflecting angle of probe.
\bar{P}_R	: Mean sound pressure on receiving transducer	ϕ	: Incident angle to flaw($\phi=90-\theta$)
P_{R-F}	: Receiving sound pressure of flaw		
P_{R-S}	: Receiving sound pressure of edge		
T	: Thickness of test specimen		
t_B	: Width of band type flaw		
t_D	: Diameter of disc type flaw		
t_{CR-B}	: Critical size of band type flaw		
t_{CR-D}	: Critical size of disc type flaw		
ΔX	: Eccentric distance		
γ_G	: Shape reflection coefficient ($\gamma_G=$		

1. 序 論

一般的으로 30~40mm 두께의 판의 맞대기熔接은 통상 45°, 60°의 Groove角을 가지고 熔接되며, 그 内部缺陷의 檢出은 주로 斜角-探觸子法(屈折角: 45°, 60°, 70°)으로 행해지고 있다.¹⁾²⁾³⁾ 그러나 근래에 와서 構造物이 大型化함에 따라서 두께 100~200mm의 두꺼운 판의 사용이 많아져, 이에 따른 熔接도 熔接의 能率을 向上시키기 위해 I-Groove 熔接法이 개발되어 그 사용이 증대되어 왔다. 이때 가장 빈번하게 發生되는 缺陷의 種類로는 Groove面에 沿한 内部 熔入不良, 母材와 熔接金屬間의 融合不良등이다. 이와같은 缺陷을 斜角-探觸子法으로 探傷하면, 缺陷의 檢出이 때로는 不可能하게 되거나 상당히 過小評價 하게되는 傾向이 있으며 이러한 傾向은 판의 두께가 두꺼워질수록 현저하게 된다.⁴⁾

탠덤(TANDEM) 법은 이와 같이 探傷面에 垂直한 平面缺陷의 檢出에 有利한 方法이며, 에코우(Echo) 높이로부터 缺陷의 크기를 推定할 수 있다. 그런 반면에 실제의 探傷을 행할 때에 두 탐촉자가 정확히 일직선상에 오게끔 走査用 가이드의 설계가 필요로 하는 등의 制限條件에 따라, 종래에는 별 연구가 진척되지 않다가 최근에 이르러 仙田, 廣瀬, 松本 등에 의해 研究^{9) 10)}가 거듭되고 있다.

本 論文에서는 一探觸子法의 探傷方程式을 TANDEM法에 확장시켜 Groove面에 해당되는 探傷面에 人工缺陷(원형 및 띠형)을 가공하여 焦點에서 에코우를 얻었을 때 에코우 높이와 缺陷의 크기 사이의 相關關係를 밝히고, 探傷의 限界가 되는 缺陷의 限界植數를 구하는데 주목적 을 두었다.

2. 理 論

2.1 二探觸子法의 探傷方程式

탠덤 斜角探傷法을 模式的으로 나타낸 것이 그림 1이다. 그림 2에서와 같이 試驗材内部에서 超音波의 進行方向으로 부터 逆으로 본 斜角探觸子의 겉보기 振動子치수를 구하면 垂直法과 等價로 다룰수 있다. 이 결과를 표 1에 나타내었다. 그림 3에서와 같은 방법으로 垂直法의 探傷方程式¹¹⁾을 탠덤法으로 바꿔쓰면 다음과 같다.

$$\bar{P}_R = \sigma P_R = \sigma \gamma_c P' \ell_T = \sigma \gamma_c \gamma P_{IT} \dots\dots\dots(1)$$

送信振動子로 부터 거리 ℓ_T 떨어져 있는 缺陷에 入射하는 超音波의 音壓 P_{IT} 는 다음과 같다.

^{11) 13)}

$$P_{IT} = \sqrt{2 \bar{P}_0 \sin \left(\frac{4d_1^2}{2\lambda \ell_T} \right)} \times \sqrt{2 \bar{P}_0 \sin \left(\frac{4d_2^2}{2\lambda \ell_T} \right)} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{단, } 2d_1 = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 - (Cw/C)^2 \sin^2 \theta}} \times 2d_{01}$$

$$2d_2 = 2d_{02}$$

이며, 이때 $2d_{01} \times 2d_{02}$ 는 實際의 振動子치수를 $2d_1 \times 2d_2$ 는 겉보기 振動子의 치수를 각각 나타낸다.

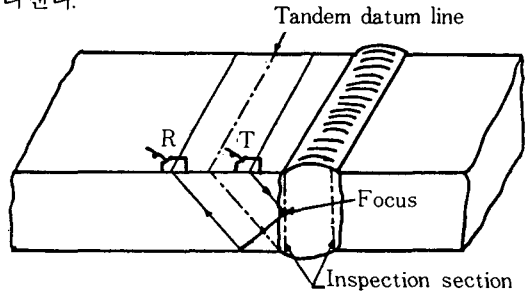


그림 1. Schematic diagram of tandem test

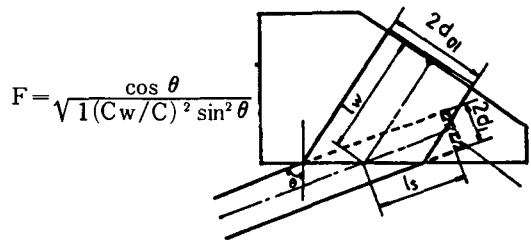


그림 2. Apparent crystal size of the ultrasonic oblique transducer

표 1. Size contraction ratio F

Reflecting angle	45°	60°	70°
F	0.882	0.734	0.563

斜角探觸子의 近距離 音場 限界距離는

$$\ell_{01} = 4d_1^2 / \pi \lambda \dots\dots\dots(3)$$

으로 表示되고, 鋼熔接部(音速: 3230m/sec)를 探傷할 때 5Z10×10A45의 경우는 $\ell_{01} = 38.33mm$, 5Z10×10A70일때는 15.62mm이다.

이 근거리 음장 한계거리에 해당되는 缺陷의 깊이 位置는

$$d_0 = \ell_{01} \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

이며, $\theta=45^\circ$ 때는 27.1mm, 70° 때는 5.3mm이다. 실제의 탐상과 이론전개의 대상은 (4)식으로 표시된 d_0 값보다 깊은 위치에 있는 결함만을 대상으로 한다.

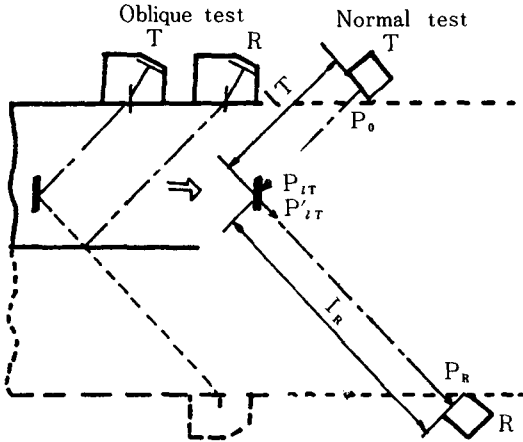


그림 3. Ultrasonic wave travelling in double probe method

2.2 缺陷의 形狀反射係數

각 缺陷의 形狀反射係數를 구하기 위해 그림 4에서와 같이 두 斷面으로 나누어 생각한다. 上下斷面은 振動子의 縱치수 $2d_1$ 을 實치수로 투영하는 面이고, 左右斷面은 振動子의 橫치수 $2d_2$ 를 實치수로 투영하는 面이다. 缺陷의 치수는 左右斷面에서는 實치수로 투영되고, 上下斷面에서는 缺陷에의 入射角 ϕ 에 의해 축소투영된다.

원형결함의 투영치수는 左右斷面에서 t_D 상단면에서는 $t_D \cos \phi$ 로 각각 투영된다. 따라서 원형결함의 形狀反射係數는 (1)식을 참조하여 (5)식으로 표시할 수 있다.

$$r_{G-D} \frac{P_R}{P_{iT}} = \sqrt{2 \sin \left(\frac{\pi t_D^2 \cos^2 \phi}{8 \lambda \ell_R} \right)} \times \sqrt{2 \sin \left(\frac{\pi t_D^2}{8 \lambda \ell_R} \right)} \dots \dots \dots (5)$$

$$\doteq \frac{\pi t_D^2 \cos \phi}{4 \lambda \ell_R}$$

斷面의 경우는 超音波가 全反射된다고 하면, 受信音壓은 送信振動子로 부터 거리 $\ell_T + \ell_R$ 떨어져 있는 缺陷에의 入射音壓과 같으므로 形狀反射係數는 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$r_{G-\infty} = \frac{P_R}{P_{iT}} = \frac{P_{\ell_T + \ell_R}}{P_{iT}}$$

$$\frac{\sqrt{2 \sin \{4d_1^2 / 2\lambda (\ell_T + \ell_R)\}}}{\sqrt{2 \sin (4d_1^2 / 2\lambda \ell_T)}} \times \frac{\sqrt{2 \sin \{4d_2^2 / 2\lambda (\ell_T + \ell_R)\}}}{\sqrt{2 \sin (4d_2^2 / 2\lambda \ell_T)}}$$

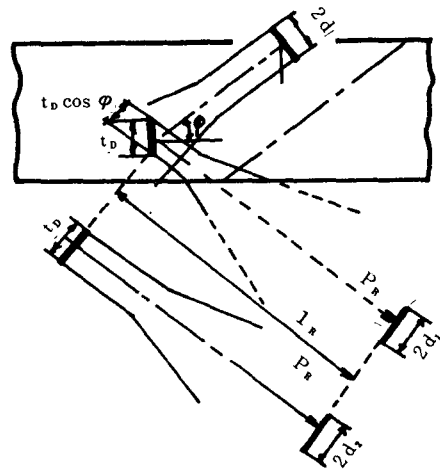
$$\doteq \frac{\ell_T}{\ell_T + \ell_R} \dots \dots \dots (6)$$

띠형결함(폭: t_B , 길이: 무한대)은 上下斷面은 원형결함과 같고 左右斷面은 端面과 같은 모양으로 표시되므로 形狀반사계수는 (7)식으로 표시된다.

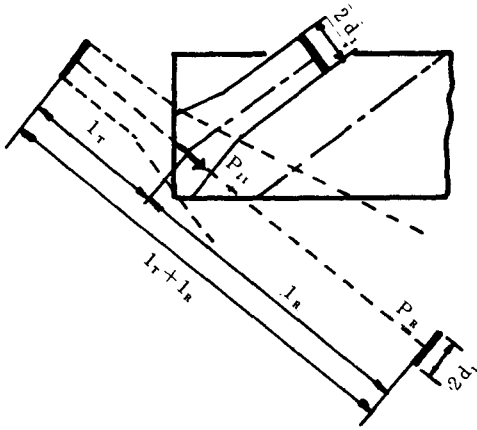
$$r_{G-B} = \sqrt{2 \sin \left(\frac{t_B^2 \cos^2 \phi}{2 \lambda \ell_R} \right)} \times \frac{\sqrt{2 \sin \{4d_2^2 / 2\lambda (\ell_T + \ell_R)\}}}{\sqrt{2 \sin (4d_2^2 / 2\lambda \ell_T)}}$$

$$\doteq \sqrt{\frac{t_B^2 \cos^2 \phi}{\lambda \ell_R}} \sqrt{\frac{\ell_T}{\ell_T + \ell_R}} \dots \dots \dots (7)$$

Upper and lower sides right and left sides



a) Disc type flaw



b) Very large flat flaw
 그림 4. Shape reflection coefficient

탠덤법에 있어서 缺陷의 크기가 어느 한계치 이상이 되면 端面으로 評價된다. 限界치수는 (5) 식과 (6), (7) 식을 각각 連립하여 풀면 원형결합 및 띠형결합의 한계치수는 (8), (9) 식으로 각각 표시된다.

$$t_{CR-D} \doteq \sqrt{\frac{4 \lambda l_T l_R}{\pi \cos \phi (l_T + l_R)}} \dots\dots\dots (8)$$

$$t_{CR-B} \doteq \frac{1}{\cos \phi} \sqrt{\frac{\lambda l_T l_R}{l_T l_R}} \dots\dots\dots (9)$$

여기에 $l_T = d / \cos \theta$, $l_R = (2T - d) / \cos \theta$, $\cos \phi = \sin \theta$ 를 代入하면, (8), (9) 식은 (10), (11) 식으로 표시된다.

$$t_{CR-D} \doteq \sqrt{\frac{4 \lambda}{\pi \sin \theta \cos \theta}} \times \sqrt{\frac{d(2T-d)}{2T}} \dots\dots\dots (10)$$

$$t_{CR-B} \doteq \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{2 \lambda}{\cos \theta}} \times \sqrt{\frac{d(2T-d)}{4T}} \dots\dots\dots (11)$$

식(10), (11)를 보면 缺陷에코우 높이는 限界치수 以下에서는 결함에 대한 入射角 ϕ ($\phi = 90^\circ - \theta$) 의 영향을 받으나 限界植數 以上이 되면 ϕ

에 무관함을 알 수 있다. 이를 정리하여 표 2에 나타내었다.

표 2. Shape reflection coefficient of artificial flaw

Shape of flaw	$\lambda / 2 < t_{cr}$	$t \geq t_{cr}$
Disc type	$\frac{\pi t_D^2 \sin \theta}{4 \lambda l_R}$	$\frac{l_T}{l_T + l_R}$
Band type	$\sqrt{\frac{t_B^2 \sin^2 \theta}{\lambda l_R} \frac{l_T}{l_T + l_R}}$	$\frac{l_T}{l_T + l_R}$

2.3 焦點에 있는 缺陷의 에코우 높이

焦點에 있는 결함의 相對 에코우 높이는 相對音壓으로 表示되므로 形狀反射係數와 界面反射係數로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{P_{R-F}}{P_{R-S}} = \frac{T_{G-F}}{T_{G-S}} \times \frac{T_{1-F}}{T_{1-S}} \dots\dots\dots (12)$$

缺陷의 面이 平滑하다고 하면 $T_{1-F} = T_{1-S} = 1$ 이므로 (13) 식과 같이 된다.

$$\frac{P_{R-F}}{P_{R-S}} = \frac{T_{G-F}}{T_{G-S}} \dots\dots\dots (13)$$

원형결합의 에코우 높이는 데시벨(dB)로 표시하면 식(5), (6)로부터

$$\begin{aligned} \frac{P_{R-F}}{P_{R-S}} = & 20 \log \frac{\pi}{4} + 20 \log (\sin \theta \cos \theta) + 20 \\ & \log \left\{ \frac{T}{d(2T-d)} \right\} + 40 \log t_D + 20 \log f \\ & - 20 \log C \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

띠형평면결합의 경우 식(6), (7)로부터

$$\begin{aligned} \frac{P_{R-F}}{P_{R-S}} = & 10 \log 2 + 20 \log (\sin^2 \theta \cos \theta) + 10 \log \\ & \left\{ \frac{T}{d(2T-d)} \right\} + 20 \log t_B + 10 \log f - 10 \log C \\ & \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

로 表示된다. 식(14), (15)에서 알 수 있듯이 에코우 높이는 缺陷의 깊이 위치, 接傷周波數, 材質 등에 의해 變化한다.

3. 實 驗

3.1 實驗裝置

- (1) 超音波 探傷器 : SM 80 RA (Attenuator type), 東京計器製
- (2) 斜角探觸子 :
5 Z 10×10 A 45 (實測屈折角 : 45.3°, 45.8°)
5 Z 10×10 A 70 (實測屈折角 : 70.2°, 70.6°)
- (3) 標準試驗片 : STB A-1
- (4) 接觸媒質 : 機械油
- (5) 人工缺陷 試驗片
SM20 C의 연강재질의 角棒 試驗片의 製作

에 있어 缺陷面이 熔接 Groove面에 해당되게끔 탐상면과 直角을 이루도록 하였다. 원형결합의 가공은 드릴링머시인을 사용하여 $\phi 2$, $\phi 3$ (깊이 : 5mm), $\phi 4$, $\phi 6$, $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 20$ (깊이 : 10mm) 로 가공한 후 결합면이 탐상면과 直角을 이루도록 엔드밀로 가공하였다. 吋形결합의 가공은 가공면의 측면으로부터 가공하므로 폭 2mm, 3mm 때는 절삭 저항이 커서 0.5mm 씩 수회에 걸쳐 가공하였으며, 4, 6, 8, 10, 20mm 때는 절삭 깊이를 2mm/1회로 가공하였다.

시험편을 가공한 후 초음파의 전달과 반사를 좋게하기 위해 탐상면과 裏面을 연마하였다. 가공된 시험편의 形狀과 치수는 그림 5와 같다.

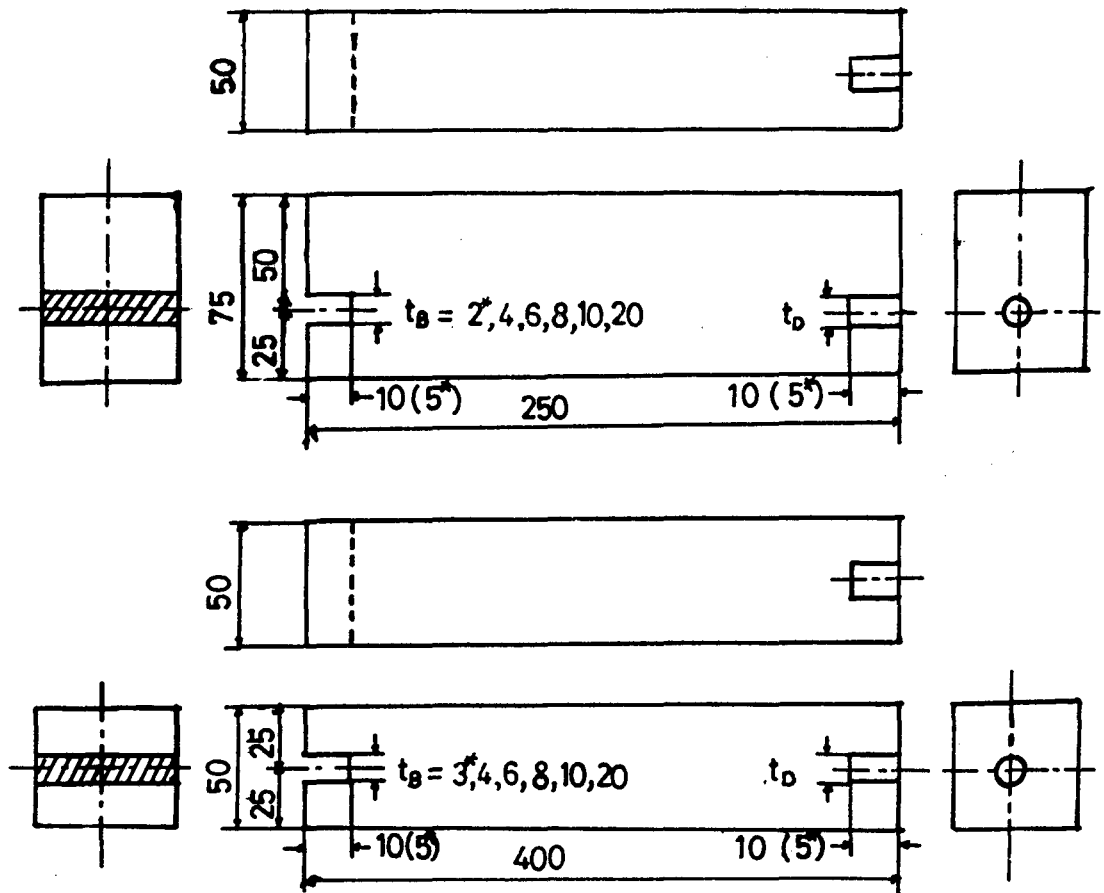
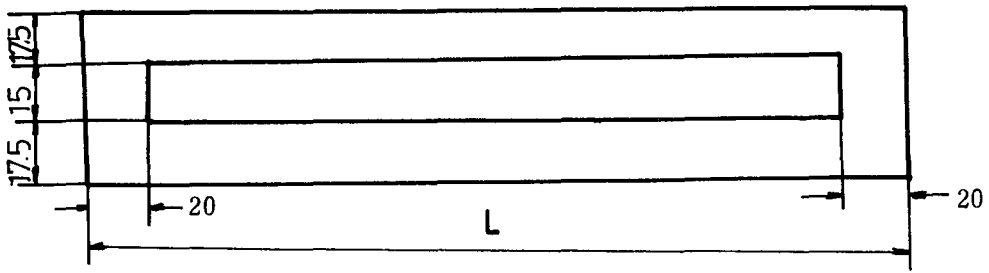


그림 5. Shape and dimension of Specimens



$$L = 140, 240, 340, 440$$

그림 6. Guide for scanning

(6) 走査用 가이드 (Guide for scanning)

送信 및 受信探觸子の 偏心, 回轉等を 방지하기 위해 그림 6 과 같은 가이드를 사용하였다.

本 實驗에 使用된 裝置와 試驗片, 走査用 가이드를 사진 1, 2, 3 에 나타내었다.

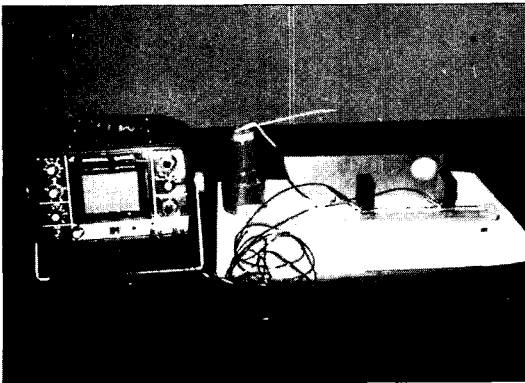


사진 1. Experimental apparatus

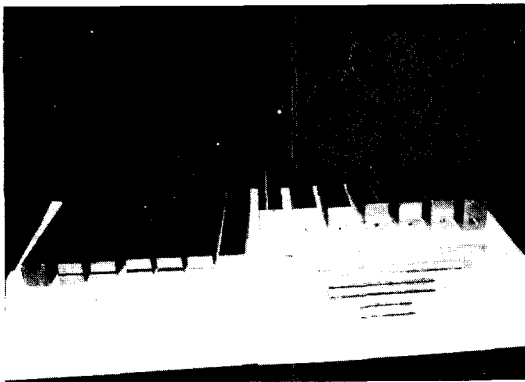


사진 2 Test specimens

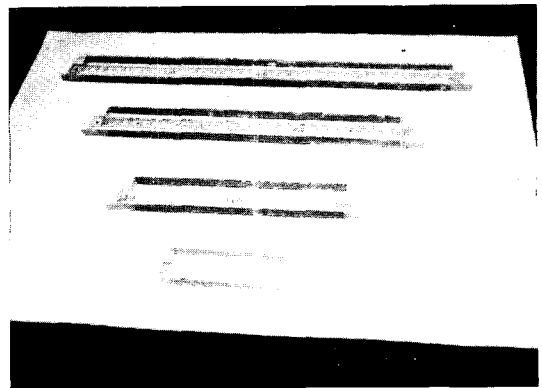


사진 3. Guides for scanning

3.2 實驗方法

送信 에코우의 영향을 받지 않도록 STB-A1 을 사용하여 계기의 측정범위를 250mm에 設定하고 R100 面의 제 1, 제 2 에코우를 각각 20, 40 에 맞춰 한 눈금당 5mm로 하였다. 또 노이즈를 제거하기 위해 리젝션(Rejection)을 5%로 하였다.

校正后 Pulse/Power 조정스위치를 2 탐촉자 법으로 바꾼 후 V 부과 펄스 에코우를 C. R. T 상의 40%에 맞추었으며, 실제 탐상시에는 10 dB 높여 探傷感度로 하였으며, 走査方法은 탠덤 基準線을 중심으로 縱方向으로 2mm씩 대칭적으로 움직여 最大에코우를 잡아 낸 후, 음향 커플링이 안정하도록 약 1분이 경과한 후 감쇄기 (Attenuator)를 0.5dB 단위로 조정하여 測定하

었다.

실험방법의 개략도를 그림 7 에, 결함에코우, 端面에코우, V투과펄스의 측정방법을 그림 8 에 각각 나타내었다.

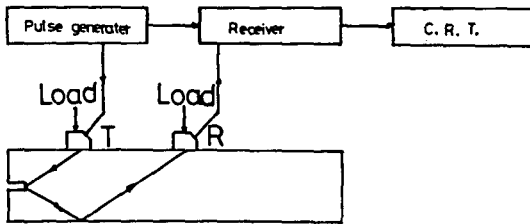


그림 7. Block diagram of tandem test

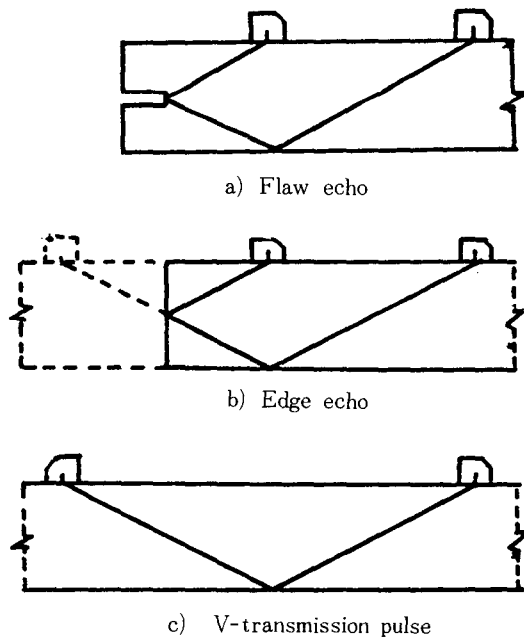


그림 8. Flaw echo and reference echo

4. 實驗結果 및 考察

그림 9 는 판두께 75mm, 缺陷깊이위치 50mm의 원형결함을 屈折角 45° 로 探傷한 結果로 限界치수 7.40mm이하에서 이론치의 92%로 비교적 잘 一致하고 있다.

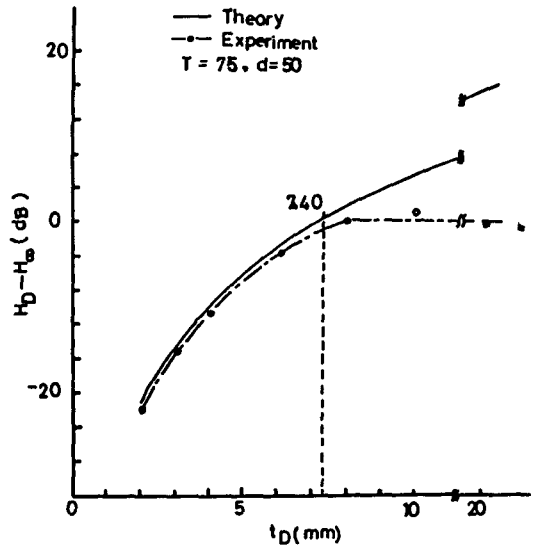


그림 9. Relations between echo height and flaw size of disc type in case $\theta = 45^\circ$

그림 10은 판두께 50mm, 缺陷깊이위치 25mm의 원형결함을 屈折角 70° 로 探傷한 結果로 限界치수 6.93mm이하에서는 理論値의 94%를 보이고 있다.

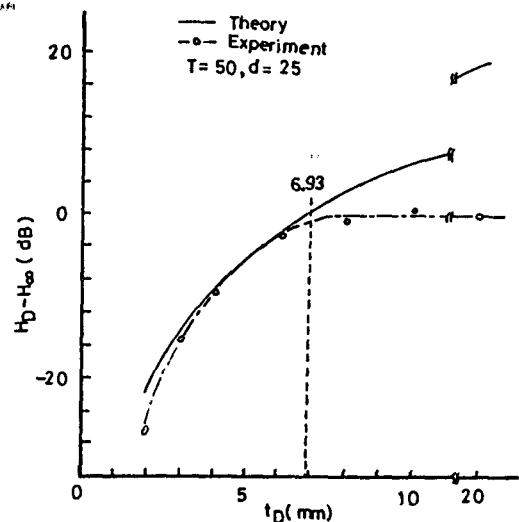


그림 10. Relations between echo height and flaw size of disc type in case $\theta = 70^\circ$

그림 11은 판두께 75mm, 결함깊이위치 50mm의 띠형결함을 屈折角 45° 로 탐상한 결과로 한계치수

7.80mm이하에서는 이론치의 96%를 보이고 있다.

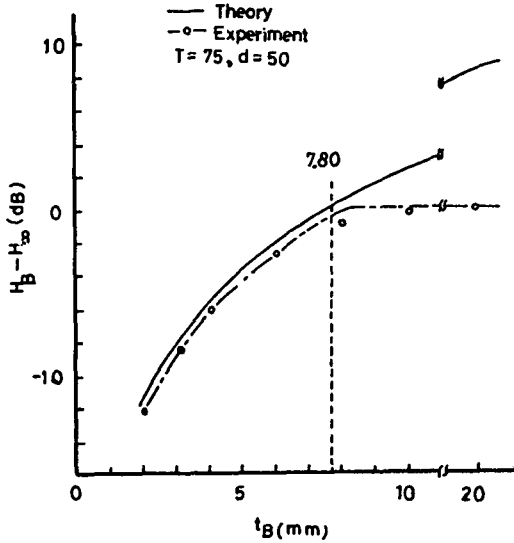


그림 11. Relations between echo height and flaw size of band type in case $\theta = 45^\circ$

그림12는 판두께 50mm, 결함깊이위치 25mm의 락형결함을 屈折角 70° 로 探傷한 한계치수 6.11mm이하에서는 이론치의 94%를 보이고 있다.

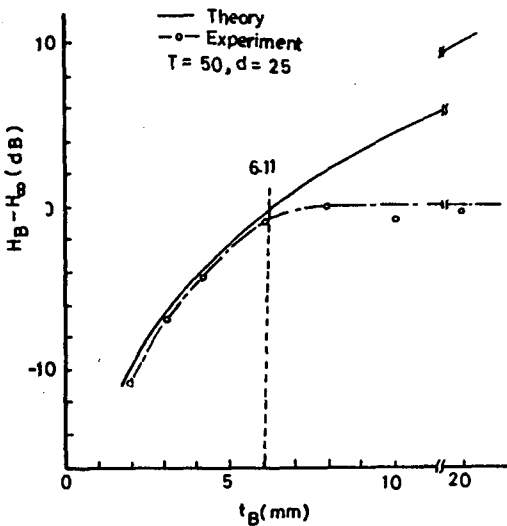


그림 12. Relations between echo height and flaw size of band type in case $\theta = 70^\circ$

이상의 그림에서 나타난 實驗값은 表3 및 4에 나타내었다.

표 3. Test results from disc type flaw

t_D (mm)	2	3	4	6	8	10	20	
$H_D - H_\infty$ (dB)	45°	-21.5	-15.5	-11.0	-4.5	0	0.5	-0.5
	70°	-27.5	-14.5	-9.5	-2.5	-1.0	0.5	0

표 4. Test result from band type flaw

t_B (mm)	2	3	4	6	8	10	20	
$H_B - H_\infty$ (dB)	45°	-12.0	-8.5	-6.0	-2.5	-1.0	-0.5	0
	70°	-12.0	-6.5	-4.0	-0.5	0	-1.0	-0.5

탠덤法에 있어서 缺陷의 크기가 限界치수 以上으로 되면 端面으로 評價되어 그 크기의 평가가 불가능하게 되므로 다른 방법을 사용해야 한다. 탠덤法의 적용시 가장 주의할 사항은 송신, 수신 두 탐촉자가 一直線上에 있어야 한다. 그렇지 않으면 오차를 발생시켜 평가가 곤란하게 된다. 수신탐촉자가 송신탐촉자에 대해 φ 만큼 기울어져 있을 때의 에코우 높이의 저하율은

$$D_1 = \left| \frac{\sin(kd_2 \sin \varphi_1)}{kd_2 \sin \varphi_1} \right| \dots\dots\dots (16)$$

단, $\varphi_1 = \tan^{-1}(\sin \theta \tan \varphi)$

$$k = 2\pi/\lambda$$

이며, 수신탐촉자가 송신탐촉자에 대해 ΔX 만큼 편심되어 있을 때의 에코우 높이의 저하율은

$$D_2 = \left\{ \frac{\sin(kd_2 \sin \varphi_2)}{kd_2 \sin \varphi_2} \right\}^2$$

단, $\varphi_2 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos \theta}{2} \cdot \frac{\Delta X}{T} \right\}$

$$k = 2\pi/\lambda$$

이다. 탐촉자의 배치 잘못으로 인한 에코우 높이의 저하율을 0.5dB 이내로 억제하려면 $\varphi = 1^\circ$, $\Delta X/T = 2.4\%$ 이내로 하여야 한다.

5. 結 論

- 1) 軟鋼의 경우에 있어서 탠덤法의 適用限界가 되는 缺陷의 限界치수는 판두께, 缺陷의 깊이 위치, 屈折角에 의해 決定된다.

圓形缺陷의 경우

$$t_{CR-D} = 7.40\text{mm} : T = 75\text{mm}, d = 50\text{mm}, \theta = 45^\circ$$

$$t_{CR-D} = 6.93\text{mm} : T = 50\text{mm}, d = 25\text{mm}, \theta = 70^\circ$$

ㄷ形缺陷의 경우

$$t_{CR-B} = 7.80\text{mm} : T = 75\text{mm}, d = 50\text{mm}, \theta = 45^\circ$$

$$t_{CR-B} = 6.11\text{mm} : T = 50\text{mm}, d = 25\text{mm}, \theta = 70^\circ$$

- 2) 探傷面에 垂直한 缺陷의 評價에 탠덤法을 적용한 결과 限界植數內에서 實際 缺陷크기와 비교하여 10% 오차내에서 평가 할 수 있었다.

6. REFERENCE

1. 田渊, 横野: “一探触子斜角探傷による 内部 溶込不良の檢出について”非破壊檢査に關する 研究發表會 講演概要, 1983, qq. 19~22
2. 溶接部の超音波接傷試驗ハンドブック, 日本 溶接學會 技術資料 No.5, 1979, pp. 46~47
3. 仙田, 横野: 溶接部の非破檢査に關するシンポジウム 講演概要, 1983, pp. 116~123
4. 仙田, 広瀬: “開先面の融合不良の超音波探傷 エコー高さに及ぼす反射面の 傾きの 影響”, 日本非破壊檢査協會 關西支部研究發表會 講演概要, 1975, pp 5~8.
5. 仙田, 広瀬: “タンDEM斜角探傷法にする 内部溶込み不良の檢出 1 欠陥の檢出域”, 溶接部の非破壊檢査に關する シンポジウム講演概要, 1983, qq. 170~171.
6. 仙田, 広瀬: “タンDEM 斜角探傷法による内部溶込み不良の檢出 2 - 探触子の 配置と探傷手順”, 溶接部の 非破壊檢査に關するシンポジウム講演概要, 1983, 172~175.
7. 仙田, 広瀬: “タンDEM斜角探傷法による 溶込不良の位置推定方法”, 溶接部の非破壊檢査に 關すシンポジウム講演概要, 1983, pp. 164~169
8. 仙田, 広瀬: “タンDEM法にとる 内部溶込み不良の檢出方法(第2報) - 探触子のセッティングミスが エコー高さにぼす影響”, Journal of N. D. I. Vol. 25, No.9., 1976, pp.606~607
9. 松木, 二村: “タンDEM式超音波探傷試驗法に 關する研究(第2報)”, Journal of N. D. I. Vol. 25, No.9, 1976, pp. 608~609
10. 仙田, 広瀬: “タンDEM探傷の エコー高さに及ぼす内部溶込不良の 密着度の影響”Journal of N. D. I. Vol. 25, No.9, 1976 pp. 604~605.
11. 仙田, 広瀬: “一探触子法における 模型欠陥 エコー高さ計算法 1”, 日本非破壊檢査協會 關西支部研究發表會 講演概要, 1980, pp. 19~26
12. 仙田, 広瀬: “一探触子法における 模型欠陥 エコー高さ計算法 2,” 日本非破壊檢査協會 關西支部研究發表會 講演概要, 1980, pp.27~36.
13. A. Freedman: “Sound Field of Rectangular Piston”, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 32, No.2, 1960, pp. 197~209.
14. KSB 0896-1977 鋼溶接部の 超音波探傷試驗 및 試驗結果의 等級分類方法.
15. NDIS 2410-1979 鋼溶接部の超音波 タンDEM探傷試驗及び試驗結果の 等級分類方法