

# 超音波의 垂直探傷法에 의한 傾斜를 갖는 圓形平面缺陷의 크기 評價에 관한 研究

한응교, 김기중, 이국환

漢陽大學校

1984年 5月 19日 接受

## A Study on the Size Evaluation of Circular Flat Flaw with Indication by Straight Beam Inspection of Ultrasonic Wave

Eungkyo Han, Ki Joong Kim, Kookhwan Lee

### ABSTRACT

In the straight beam inspection of ultrasonic wave, the method for evaluating flaw size by AVG diagram is useful as a method for the quantitative evaluation of results of ultrasonic flaw detection.

This study was carried out the measure the size of circular flat flaw with the inclination by straight beam inspection and could be decreased the error of application due to the inclination of flaw by AVG diagram in consideration of correction coefficient.

From the result of the experiment, the error by means of the application of experimental values to AVG diagram was increased as the inclination angle grows.

Also, it was increased the error of application as the detecting frequency and diameter of flaw grows in the same inclination angle. In case of diameter of flaw 6mm, AVG diagram could be applied to the inclination angle  $3^\circ$  for 5 MHz,  $7^\circ$  for 2.25 MHz,  $15^\circ$  for 1 MHz in the range of 20% error and the theory was concided with the experiment to  $5^\circ$  for 5 MHz,  $10^\circ$  for 2.25 MHz,  $15^\circ$  for 1 MHz in the range of 10% error by correction eq. (45) due to the inclination angle.

Therefore, it is considered that the results obtained from this study will be somewhat helpful informations for the size evaluation of circular flat flaw with the inclination.

### NOMENCLATURE

$B_0$  : First bottom echo height of the very thin test plate

$D, d$  : Diameter of transducer and flaw, respectively

F : Flaw echo height of fest piece

G : Normalized diameter ( $= d/D$ )

H : Wave number ( $= 2\pi/\lambda$ )

$m_1, m_2$  : Proportional coefficient determined by distribution of strength of the sound pressure and the phase on the surface of flaw and at metal part in contact with fransducer, respectively

n : Normalized distance of flaw ( $= \frac{4x\lambda}{D^2}$ )

P,  $P_F$  : Sound pressure generated on the infinifesimal area of flaw and fransducer, respctirely

$P_0$  : Meah fransmitting sound pressure radiated from transducer

F,  $F_F$  : Mean sound pressure generated on the flaw and transducer by reflection of sound wave on the whole area of flaw, respectively

$x, x_0$  : Distance from the cenfer of transducer to the center of flaw and near sound field distance, respctirely

$F/B_0$  : Ratio of F to  $B_0$  ( $= 1F_F/P_0$ )

$n_1, n_2$  : Coefficient determined by electro-acoustic efficiency, damping of transducer and contact conditions

$\lambda$  : Wave length

$\Phi$  : Velocity potential of composite sound wave

$\phi$  : Inclination angle of flaw

## 1. 序 論

펄스 에코우법을 이용한 초음파探傷의 垂直探傷法에 있어 缺陷의 크기를 定量的으로 評價하는 方法이 초음파 탐상의 폭넓은 사용과 더불어 요구되어져 왔다. Saneyoshi<sup>(1)</sup>는 音波가 같은 點音源에서 送信, 受信된다고 취급하여 同一距離에 있는 無限으로 큰 面에서 反射된 音壓에 대해서 音源으로부터 다른 거리에 있는 여러 형태의 缺陷에서 反射된 音壓의 比를 理論的으로 解析하였다. 또한 Ta-kaoki<sup>(2)(3)</sup>는 模型缺陷으로 實驗을 성공적으로 수행하였다. 그 결과 편평한 底面을 갖는 드릴 구멍 (flat bottomed drill hole) 과 같은 圓形平面缺陷 (circular flat flaw) 을 펄스 에코우트法으로 探傷할 때 缺陷에코우 높이는 缺陷의 크기, 探傷距離, 周波數, 振動子の 크기에 따라 변한다는 사실이 발견되었다.

1959年 Krautkramer<sup>(4)</sup>는 「圓形平面缺陷에 초음파가 닿으면 圓形平面缺陷은 그 面上에 대한 平均音壓으로 振動하는 音源으로 된다」라는 假定하에서 基準化 지름 및 거리를 사용하여 A(Abstand 距離), V (Vergrößerung, 增幅), G (Größe, 크기) 의 3가지 相互關係로서 圓形平面缺陷의 크기를 定量的으로 評價하는 새로운 方法인 AVG diagram에 의한 評價法을 도입하였다. 1961年 Kimura<sup>(5)</sup>는 Krautkrämer<sup>(4)</sup>의 理論을 발전시켜 近距離 및 遠距離音場에서도 적용될 수 있는 缺陷에코우 높이의 近似計算法을 行하여 AVG diagram에 의한 평가법을 한층 確立하였다. 초음波의 垂直探傷에 있어 探傷距離가 멀어지면 같은 크기의 결함에도 에코우 높이는 적어진다. 에코우 높이만에 의해 缺陷의 크기를 평가할 때 큰 오차가 發生하므로 距離의 影響을 고려하여 缺陷의 크기를 推定하는 AVG diagram이 이용되며 探傷결과를 定量的

으로 표시하는데 有效한 手段이므로 鑄鍛鋼品 등의 缺陷크기 평가에 널리 적용이 된다.

本 研究에서는 圓形平面缺陷이 探傷面에 대해서 傾斜져 있을 때의 實驗한 값들을 計算된 Krautk-rámer<sup>(4)</sup> 및 Kimura<sup>(5)</sup>의 AVG diagram과 比較하여 傾斜角의 變化에 따른 傾向과 精度를 밝히고 그에 따른 誤差를 補正하는데 主目的을 두었다.

2. 理論

2-1 圓形平面缺陷의 에코우높이 計算

2-1-1 [I] 缺陷에코우 높이의 方程式

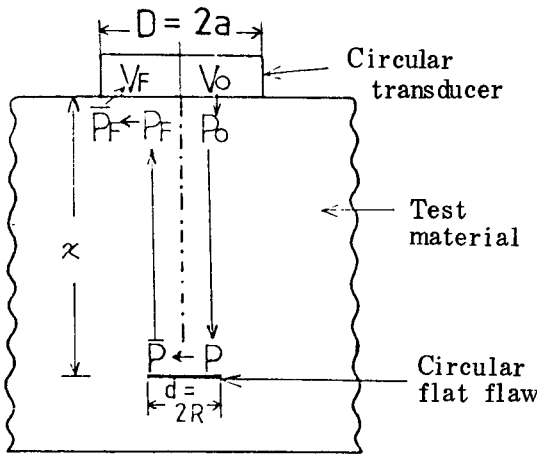


Fig. 1 Calculation order of flaw echo height

그림 1에서 振動子의 電壓  $V_0$ 에 의한 金屬部에서의 平均音壓은  $P_0 = \eta_1 V_0$  ..... (1)

振動子의 軸上에서 距離  $x$  만큼 떨어진 곳의 音壓은

$$P = 2P_0 \sin \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{a^2 + x^2} - x \right\} \right] \dots (2)$$

$n = \frac{x\lambda}{a^2}$ 을 사용하고  $x > 1.5a$ 의 조건에서 式(2)는

$$P \doteq 2P_0 \sin \left[ \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{a^2}{2x} \right] \doteq 2P_0 \sin \frac{\pi}{2n} \dots (3)$$

圓形平面缺陷에서 생기는 平均音壓은

$$\bar{P} = m_1 p \dots (4)$$

平均音壓  $\bar{P}$ 로 인한 金屬部에서 생긴 音壓은 式(3)과 같이

$$P_F = 2\bar{P} \sin \frac{\pi}{2n'}, \quad n' = \frac{x\lambda}{R^2} \dots (5)$$

$$G = \frac{R}{a} \text{에 의해 } P_F = 2\bar{P} \sin \frac{\pi G^2}{2n} \dots (6)$$

$n > \pi G^2$ 의 조건을 만족하면 式(6)은

$$P_F \doteq \bar{P} \frac{\pi G^2}{n} \dots (7)$$

金屬部에서 얻어진 平均音壓을 표시하면

$$\bar{P}_F = m_2 P_F \dots (8)$$

振動子에 생긴 電壓은

$$V_F = \eta_2 \bar{P}_F \dots (9)$$

送信 및 受信電壓과의 관계는 式(1)과 式(9)에서

$$\frac{V_F}{V_0} = 2 \eta_1 \eta_2 m_1 m_2 \frac{\pi G^2}{n} \sin \frac{\pi}{2n} \dots (10)$$

$P_0$  및  $\bar{P}_F$ 와의 관계는 式(8), 式(3) 및 式(4)에서

$$\bar{P}_F / P_0 = 2 m_1 m_2 \frac{\pi G^2}{n} \sin \frac{\pi}{2n} \dots (11)$$

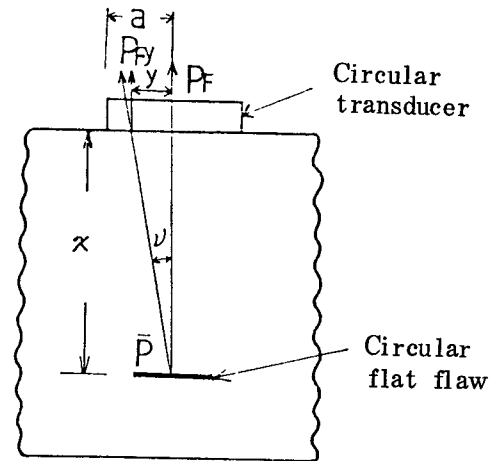


Fig. 2 Receipt of the reflected sound wave from flaw

2-1-1 [II]  $m_2$ 의 값

그림 2에서 位置  $y$ 까지의 거리에서 垂直한 音壓成分은  $P_{Fy}$ , 位置  $y=0$ 으로 부터의 位相差를  $\theta_1$ 이라 하면 平均音壓은

$$\bar{P}_F = \frac{1}{\pi a^2} \left[ \left\{ \int_0^a (P_{Fy} \cos \theta_1) 2\pi y dy \right\}^2 + \left\{ \int_0^a (P_{Fy} \sin \theta_1) 2\pi y dy \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots (12)$$

$P_{Fy}$ 의 값이 音軸에서의 거리  $y^2$ 에 비례하여 감소한다고 하면

$$P_{Fy} = P_F (1 - \mu \frac{y^2}{a^2}) \dots\dots\dots (13)$$

音波의 路程差와 位相差는  $\Delta$

$$\Delta = \sqrt{y^2 + x^2} - x \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta_1 = \frac{y^2}{2x} \times \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi y^2}{na^2} \dots\dots\dots (15)$$

式(13) 및 式(15)를 式(12)에 代入하면

$$\bar{P}_F = P_F \frac{2n}{\pi} (1 - \mu + \mu^2 M)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\pi}{2n} \dots\dots (16)$$

$$M = \frac{1}{4} \{ 1 + (\frac{2n}{\pi} - \cot \frac{\pi}{2n})^2 \} \dots\dots (17)$$

$a, \lambda, \nu$ 에 의해 정해지는 parameter는

$$Z = kR \sin \nu = \frac{2\pi Ga}{\lambda} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \dots\dots (18)$$

한편 振動子의 入射角 및 距離差로 인한 音壓의 감소가 있으므로 결과적으로

$$P_{Fy} = P_F \frac{2J_1(Z)}{Z} \frac{x^2}{x^2 + y^2} \dots\dots\dots (19)$$

$\frac{2J_1(Z)}{Z}$ 를 전개하면

$$\frac{2J_1(Z)}{Z} = 1 - \frac{z^2}{8} + \frac{z^4}{192} - \frac{z^6}{9216} + \dots\dots (20)$$

$Z < 2$ 일때  $n > \pi G$ 의 조건 및  $kan > 6\pi$ 에서 式(20)은

$$\frac{2J_1(Z)}{Z} = 1 - \frac{Z^2}{8} \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{x^2}{x^2 + y^2} = 1 \dots\dots\dots (22)$$

式(18), 式(21) 및 式(22)를 式(19)에 代入하면

$$P_{Fy} \doteq P_F (1 - \frac{\pi^2 G^2 y^2}{2n^2 a^2}) \dots\dots\dots (23)$$

따라서 式(13)과 式(23)을 비교하고 式(8)과 式(16)에서

$$\mu \doteq \frac{\pi^2 G^2}{2n^2} \dots\dots\dots (24)$$

$$m_2 = \frac{2n}{\pi} (\sin \frac{\pi}{2n}) (1 - \mu + \mu^2 M)^{\frac{1}{2}} \dots\dots (25)$$

變數  $m'_2$ 를 사용하면 式(25)는

$$m'_2 = (1 - \mu + \mu^2 M)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (26)$$

$$m_2 = \frac{2n}{\pi} m'_2 \sin \frac{\pi}{2n} \dots\dots\dots (27)$$

式(27)을 式(11)에 代入하면

$$\bar{P}_F/P_0 = 4 m_1 m'_2 G^2 \sin^2 \frac{\pi}{2n} \dots\dots\dots (28)$$

$m'_2$ 의 값은 式(17)과 式(24)로 계산되며 表 1에 주어진다.

Table 1 Values of  $m'_2$

$G \backslash n$	1.58	1.21	1.02	0.84	0.74
0.05	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
0.1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96
0.2	0.96	0.93	0.91	0.87	0.84
0.3	0.91	0.85	0.80	0.74	0.74
0.4	0.84	0.74	0.66	0.65	0.83
0.5	0.76	0.61	0.55	0.75	1.23

Table 2 Values of  $m_1$

$G \backslash n$	1.58	1.21	1.02	0.84	0.74
0.05	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
0.1	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96
0.2	0.96	0.93	0.91	0.86	0.82
0.3	0.91	0.85	0.79	0.69	0.60
0.4	0.84	0.73	0.62	0.44	0.29
0.5	0.75	0.58	0.41	0.18	0.24

2-1-1 (III)  $m_1$ 의 값

$m_1$  값을  $P_F$ 를 계산한 것과 똑같은 방법으로 계산하면

$$m_1 = \frac{2n}{\pi G^2} \{ 1 - \mu + \mu^2 N \}^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\pi G^2}{2n} \dots\dots (29)$$

$$N = \frac{1}{4} \{ 1 + (\frac{2n}{\pi G^2} - \cot \frac{\pi G^2}{2n})^2 \} \dots\dots (30)$$

$n > \pi G^2$ 의 조건에서는 式(29)는

$$m_1 = (1 - \mu + \mu^2 N)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (31)$$

$m_1$  값은 式(31), 式(30) 및 式(24)로 계산되고 表 2에 주어졌다.

表 1과 表 2를 비교해 보면 2%의 誤差 이내에서 일치하므로

$$m_1 = m_2' \dots\dots\dots (32)$$

따라서 式(32) 및 式(26), 式(28)로부터  $\bar{P}_F/P_0$ 의 計算式은

$$\frac{\bar{P}_F}{P_0} = 4 G^2 (1 - \mu + \mu^2 M) \sin^2 \frac{\pi}{2n} \dots\dots (33)$$

但,  $\mu = \frac{\pi^2 G^2}{2n^2}$

$$M = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \frac{2n}{\pi} - \cot \frac{\pi}{2n} \right\}^2$$

既知의 AVG diagram은 式(33)에 의해 그림 3에 圖示되었다.

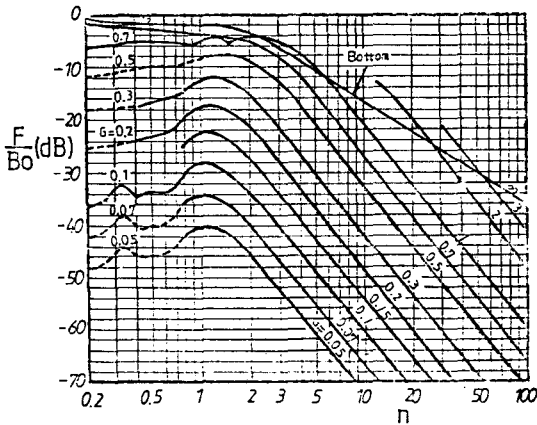


Fig. 3 AVG Diagram

2-2 傾斜를 갖는 圓形平面缺陷의 에코우 높이 近似計算

缺陷에서 反射된 音波의 合成波가 最大 에코우 높이를 나타내고, 그 音波는 모두가 縱波인 正弦波이며 反射波의 合成은 缺陷의 全面積에 대해 생각해야 되나 여기서는 傾斜를 갖는 缺陷에 있어 音軸에서 傾斜로 인한 距離差가 最大, 最小가 되는 두개의 音波만을 고려한다. 그림 4에서 振幅

B를 갖는 두 反射波의 合成波를 速度 potential

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = B \sin(\omega t - kx) + B \sin(\omega t - kx) =$$

$$2B \sin(\omega t - kx) \dots\dots\dots (34)$$

그림 5에서 缺陷의 傾斜로 인하여  $\theta$ 만큼의 位相差가 생긴다고 하면

$$\Phi_1 = B \sin(\omega t - kx),$$

$$\Phi_2 = B \sin(\omega t - kx + \theta) \dots\dots\dots (35)$$

傾斜角을 갖는 缺陷에서 反射된 合成波의 速度 potential

$$\Phi' = \Phi_1 + \Phi_2 = (B + B \cos \theta) \sin(\omega t - kx) +$$

$$B \sin \theta \cdot \omega s(\omega t - kx) \dots\dots\dots (36)$$

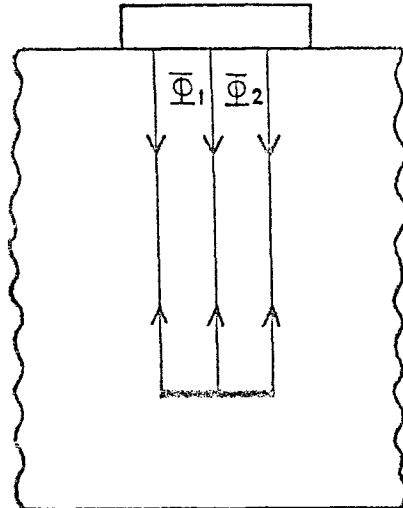


Fig 4 Schema of reflection from flaw

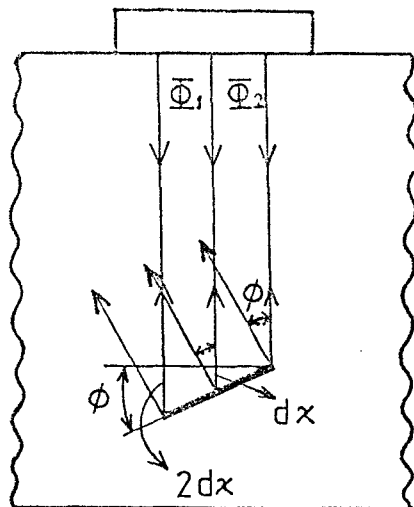


Fig. 5 Schema of reflection from flaw with inclination angle

式(36)을 合成하면

$$\Phi' = H \sin(\omega t - kx - \Psi) \dots\dots\dots (37)$$

合成波의 振幅  $H$ 는

$$H = \sqrt{2B^2(1 + \cos\theta)} \dots\dots\dots (38)$$

두 音波사이의 位相差  $\theta$ 는 路程길이에 의하여  $2\pi$  rad은 波長  $\lambda$ 의 路程差  $\Delta x$ 와 같으므로

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda} \dots\dots\dots (39)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2dx = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin\phi \dots\dots (40)$$

式(40)을 式(38)에 代入하면

$$H = \sqrt{2B^2 [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin\phi)]}$$

$$= 2B \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) \dots\dots\dots (41)$$

式(41)을 式(37)에 代入하면

$$\Phi' = 2B \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) \cdot \sin(\omega t - kx + \Psi) \dots\dots(42)$$

缺陷에서 反射된 缺陷에코우높이  $h_F$ 는 合成波의 振幅이기 때문에 式(34) 및 式(42)에서

$$h_{F1} = 2B, h_{F2} = H = 2B \cdot \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) \dots\dots (43)$$

이때 缺陷에서 反射되어 振動子와 접촉하는 금속부에서 생긴 平均音壓과의  $h_F \propto \bar{P}_F$ 의 關係로부터 缺陷의 傾斜角  $\phi$ 에 따른 補正係數는

$$\cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) \dots\dots\dots (44)$$

가 된다.

결과적으로  $\bar{P}_F/P_0$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$[\frac{\bar{P}_F}{P_0}]_{\phi} = \frac{\bar{P}_F}{P_0} \cdot \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) = 4G^2 (1 - \mu + \mu^2 M)$$

$$\sin^2 \frac{\pi}{2n} \cdot \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\phi) \dots\dots\dots (45)$$

但,  $\mu = \frac{\pi^2 G^2}{2n^2}, M = \frac{1}{4} \{ 1 + (\frac{2n}{\pi} - \cot \frac{\pi}{2n})^2 \}$

### 3. 實 驗

#### 3-1 實驗裝置

##### (1) 超音波探傷器

超音波探傷器는 東京計器製 SM80D 어테뉴에이더形을 사용했다.

##### (2) 垂直探觸子 (Normal Probe)

表 3은 使用된 探觸子の 示方이다.

Table 3 Specification of Normal Probe

Probe Model	Frequency (MHz)	Transducer Si ze (mmφ)	Material
1Z 20N-F	1	20	ceramic
2.25 Z 20N	2.25	20	ceramic
- F	5		
5Z 20N-F	5	20	ceramic

##### (3) 標準試驗片 STB - A1

##### (4) 接觸媒質 (Couplant) : 기계油

##### (5) 人工缺陷의 試驗片

1探觸子の 直接探傷法에 의해 底面에코우方式에 의한 實驗을 수행하기 위하여 SB41인 軟鋼材質의 丸棒試驗片의 探傷面과 底面을 平行이 되게 하였고 缺陷이 圓形平面을 갖도록 end mill로 드릴링 작업을 하였다. 작업은 丸棒試驗片의 中心과 圓形平面을 갖는 end mill의 구멍面上의 中心을 일치시켜 振動子の 중심과 人工缺陷의 중심이 音軸에 있게 하였다. 한편 垂直探傷에 편리하도록 探傷面과 底面을 그라인딩 研磨하였다. 表 4와 그림 6은 加工된 試驗片의 規格과 形狀이다.

Table 4. Specification of test piece

Unit: mm

d	x	T	φ (deg.)
6	100	120	0,3,5,7,10,15
	130	150	
10	100	120	0,3,5,7,10,15
	130	150	

그림 7 및 그림 8은 실험에 사용된 實驗裝置와 試驗片이다.

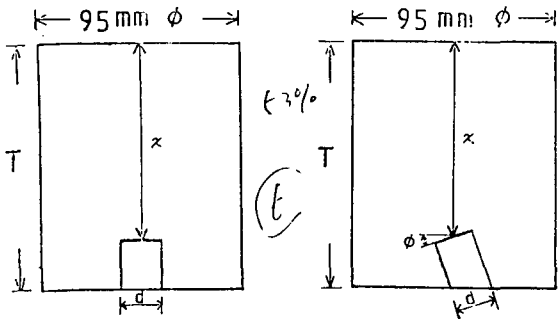


Fig. 6 Dimension of test piece

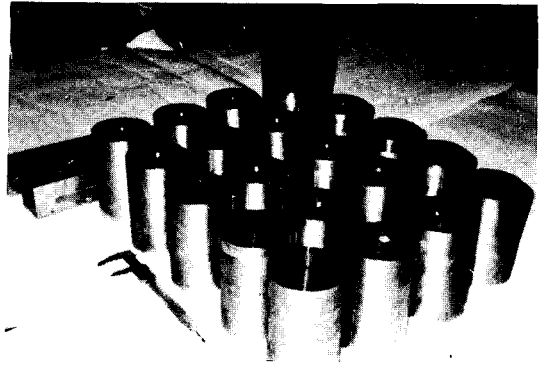


Fig. 8 Test pieces

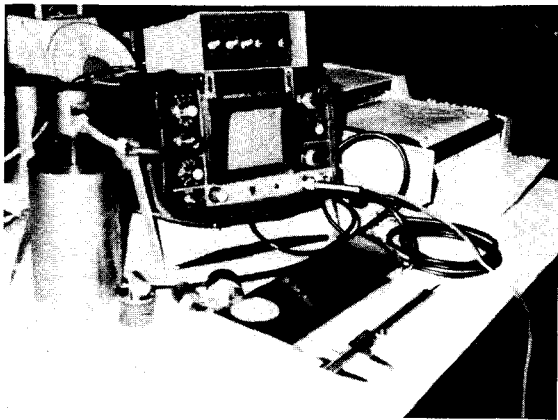


Fig. 7 Experimental apparatus

3-2 實驗方法

3-2-1 缺陷의 크기 測定

STB - A1 시험편을 이용하여 探傷裝置를 校正 하였으며 測定誤差를 줄이기 위해 探觸子위에 holder를 채운 후 그 위에 錐를 올려 놓아 약 2.0 kgf의 均일한 荷重을 加하였다. 缺陷에 코우높이 및 健全部의 第1回 底면에 코우 높이가 50%가 되도록 探傷感度를 調整하고, 探觸子の 周波數를 1 MHz, 2.25 MHz, 5MHz 등으로 달리해 測定하여 相對比較함으로써 얻은 값을 AVG diagram에 適用하여 精度를 究明하였으며 式(44) 및 式(45)에서 提示한 傾斜의 影響에 따른 補正係數에도 적용하여 式(33)과 式(45)를 比較하였다. 위의 적용에 사용된 探觸子에 의한 計算條件은 表 5와 같다.

Table 5 Calculation conditions of straight beam

Probe Model	f (MHz)	λ (mm)	x <sub>0</sub> (mm)	n		n <sub>B</sub>	
				x=100mm	x=130mm	T=120mm	T=150mm
5Z 20N	5	1.18	84.7	1.2	1.5	1.4	1.8
2.25Z 20N	2.25	2.62	38.2	2.6	3.4	3.1	3.9
1Z 20N	1	5.90	16.9	5.9	7.7	7.1	8.9

그림 9는 펄스反射法에 의한 探傷實驗의 概略圖이다.

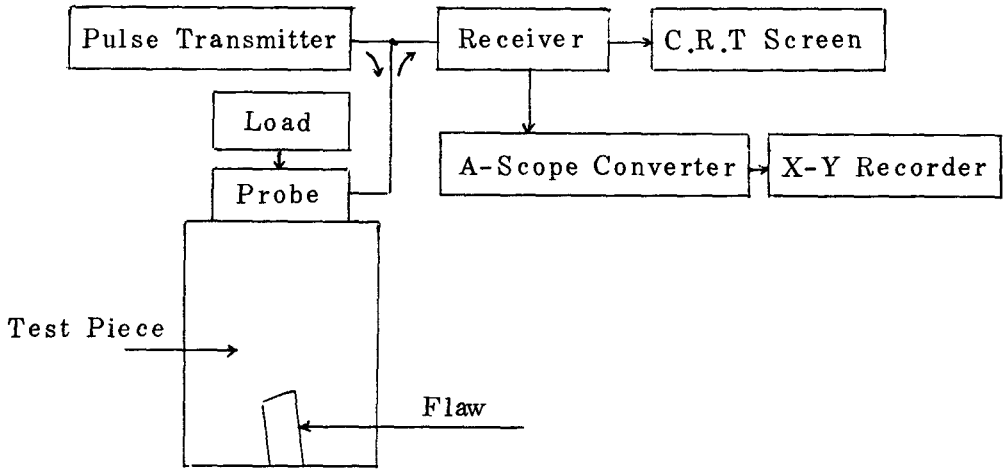


Fig. 9 Schematic diagram of experiment by pulse echo method

3-2-2 振動子の音軸上に 있는 圓形平面缺陷의 反射率

그림 10에서 超音波 비임의 音軸上에 中心이 있는 圓形平面缺陷이  $\phi$ 만큼 기울어져 있을 때의 反射指向性係數는 다음과 같다. (6)

$$D(\phi) = \cos \phi \cdot \frac{2 J_1(2kR \sin \phi)}{2kR \sin \phi} \dots\dots (46)$$

한편, 音波의 進行方向에 수직인 圓形平面缺陷의 反射率은

$$r_1 = 2 \sin \frac{\pi R^2}{\lambda x} \dots\dots\dots (47)$$

따라서 缺陷의 反射指向性에 의해 反射率의 低下가 생기므로, 式(46), 式(47)에서 傾斜진 圓形平面缺陷의 反射率은

$$r = r_1 \cdot D(\phi) = 2 \sin \frac{\pi R^2}{\lambda x} \cdot \cos \phi \frac{2 J_1(2kR \sin \phi)}{2kR \sin \phi} \dots\dots\dots (48)$$

또한 垂直探觸子를 音軸에서 左, 右方向으로 5 mm 간격씩 位置를 變化시켜 缺陷에 코우 높이의 影響을 조사하였다.

4. 實驗結果 및 考察

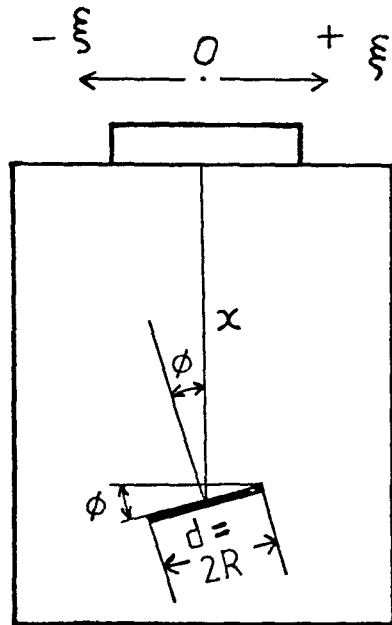


Fig. 10 Calculation of divergence coefficient on the sound axis and measurement of echo height for flaw with inclination angle  $\phi$



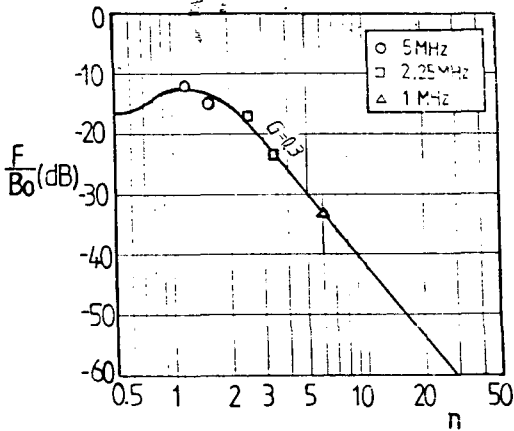


Fig. 11 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=0^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

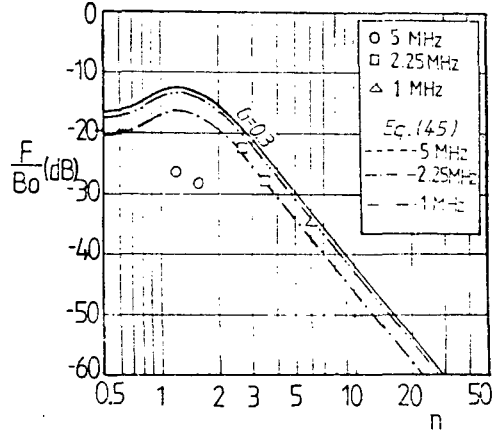


Fig. 14 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=7^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

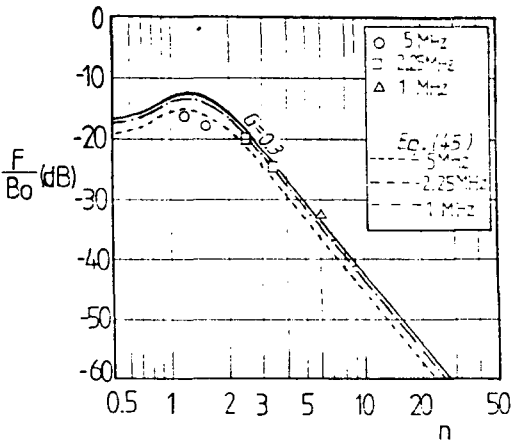


Fig. 12 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=3^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

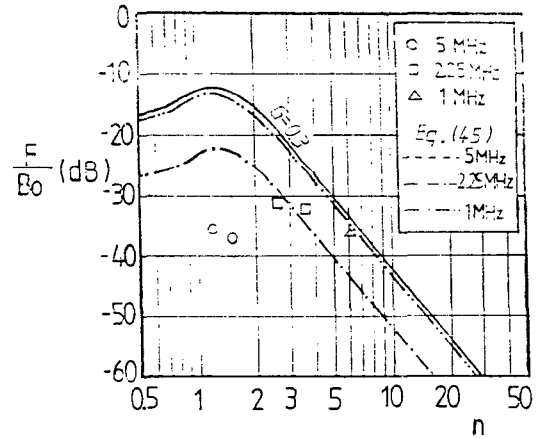


Fig. 15 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=10^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

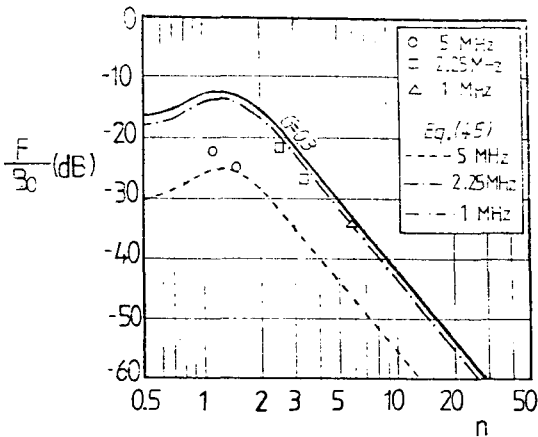


Fig. 13 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=5^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

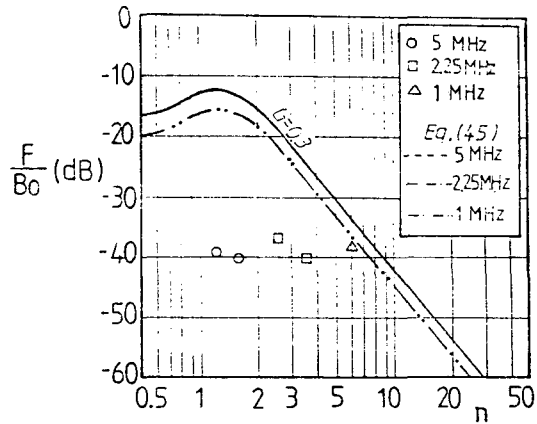


Fig. 16 Application of experimental value to AVG diagram ( $\phi=15^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ )

以上の 그림에서 傾斜角이 커짐에 따라서 缺陷 크기의 評價에 있어 既存의 AVG diagram 에의 적용에 따른 오차는 증가되며, 探傷周波數가 높을수록 결함의 지름이 클수록 결함의 경사로 인한 影響이 크고 探傷 周波數中 1MHz가 경사를 갖는 결함의 檢出能力이 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. 한편 補正係數를 적용함으로써 경사로 인한 오차를 補正할 수 있었으며 경사각에 대한 보정범위에 있어서도 1MHz의 探傷周波數가 가장 그 범위가 컸다. 式(44)에 의한 결함의 傾斜角  $\phi$  에 따른 補正係數는 表 6과 같다.

Table 6 Correction coefficient due to inclination angle  $\phi : \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \phi)$

(a)  $d = 6mm$  Unit = dB

$f(\text{MHz})$ $\phi(\text{deg.})$	5	2.25	1
3	- 3.3	- 0.6	- 0.1
5	- 13.9	- 1.9	- 0.4
7	-	- 4.0	- 0.7
10	-	- 10.3	- 1.4
15	-	-	- 3.4

(b)  $d = 10mm$  Unit : dB

$f(\text{MHz})$ $\phi(\text{deg.})$	5	2.25	1
3	-14.0	- 1.9	- 0.4
5	-	- 6.1	- 1.0
7	-	- 20.2	- 2.0
10	-	-	- 4.4
15	-	-	-14.4

表 7은 결함의 지름 6mm, 10mm의 경우 補正係數가 적용되는 경사각의 범위를 式(49)로 계산한 값이다.

$$0 < \cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \phi) \leq 1 \quad \dots\dots (49-a)$$

$$0 \leq \frac{d}{\lambda} \sin \phi < \frac{1}{2} \quad \dots\dots (49-b)$$

Table 7 Range of inclination angle necessary for application of correction coefficient,  $\cos(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \phi)$

(a)  $d = 6mm$

Unit : deg.

	range of inclination angle (deg.)
5 MHz	$0 \leq \phi < 5.7$
2.25 MHz	$0 \leq \phi < 12.5$
1 MHz	$0 \leq \phi < 29.4$

(b)  $d = 10mm$

Unit = deg.

	range of inclination angle (deg.)
5MHz	$0 \leq \phi < 3.4$
2.25 MHz	$0 \leq \phi < 7.5$
1 MHz	$0 \leq \phi < 17.2$

表 8은 補正係數가 적용되는 결함의 지름의 적용한계범위를 계산한 값이다.

Table 8 Applicable minimum diameter of circular flat flaw by means of correction coefficient

$f \backslash d$	range of flaw diameter (mm)
5 MHz	$d > 0.6$
2.25 MHz	$d > 1.3$
1 MHz	$d > 2.95$

한편 결함의 지름이 작을수록 경사각의 보정범위도 커진다고 생각되며 경사를 갖는 결함의 크기 평가에 대해서 경사로 인한 오차를 줄이는 近似 補正式으로 결함의 지름 6mm, 10mm ( $G = 0.3 \sim 0.5$ ) 두 경우에 적용한 것을 제시하였으며 試驗片의 材質, 결함의 지름, 경사각, 探傷距離를 變化시킨 더 많은 實驗을 통한 연구가 요구된다.

그림 17에서 최대결함 에코우 높이는 探觸子の 위치가 音軸에서  $-\xi$ 方向으로 약간 벗어난 위치 ( $-\xi$ 方向 5mm)에서 나타났고 音軸으로부터 探觸子の 이동 위치에 따른 결함에코우 높이의 저하比率은 探傷周波數가 낮을수록 완만하고  $-\xi$ 方向이  $+\xi$ 方向에 비해 작게 감소하는 傾向을 보였다.

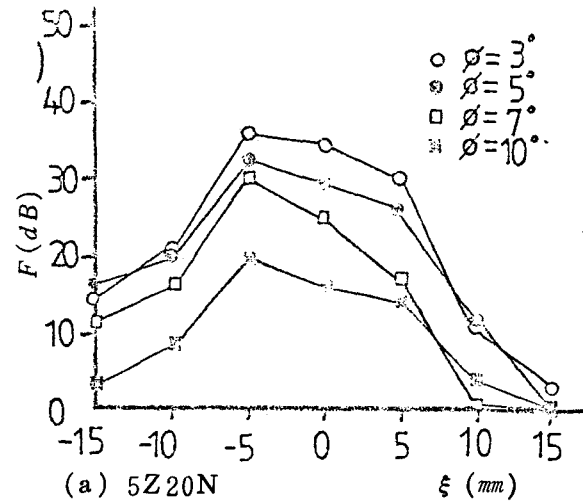


그림 18은 式(48)로 부터 계산된 값을 그래프로 圖示한 것이다.

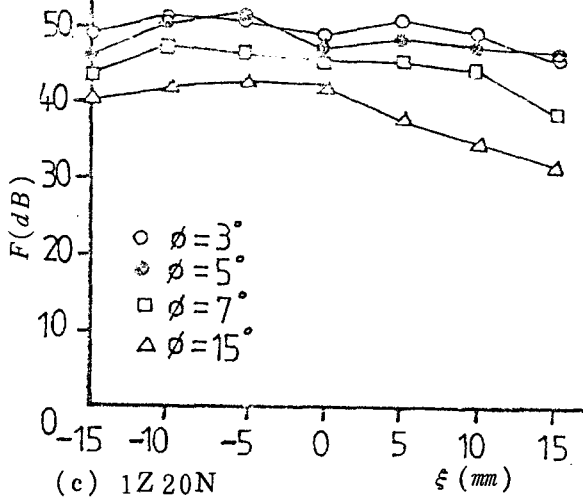
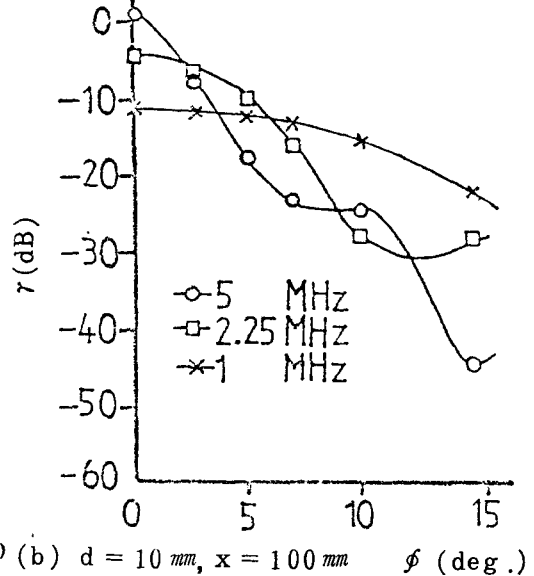
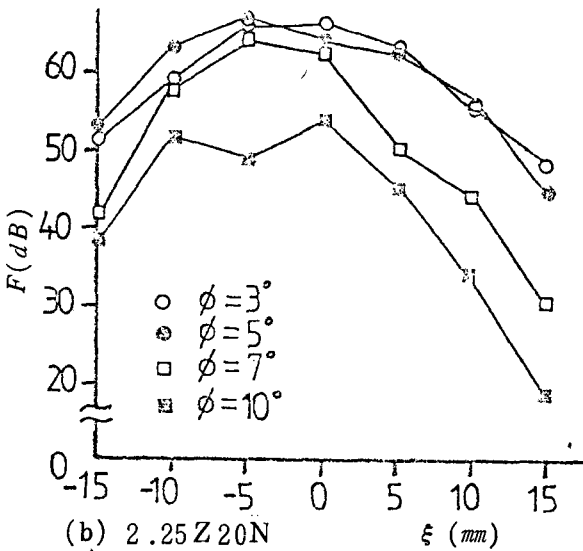
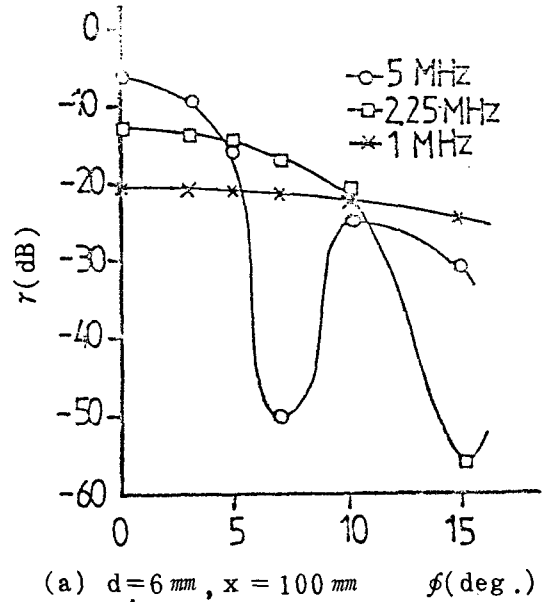


Fig. 17 Change of flaw echo height due to position of normal probe ( $d = 6 \text{ mm}, x = 100 \text{ mm}$ )

Fig. 18 Reflection rate of circular flat flaw with inclination angle

受信音壓이 傾斜角에 따라 달라지는 이유는 바꾸어 말해서 音의 波動性에 의해서 구해지는 指向係數의 影響에 의한 것으로 고려된다. 探觸子에 가하는 荷重을 2.0 kgf에서 1.5 kgf로 變化시켰을 때 두 경우 최대 2.5 dB의 차이가 있는 경우가 있었으나 거의 결함에코우높이는 일치하고 있다.

均一한 음響커플링을 유지하기 위하여 均一한 荷重의 적용이 必要하나 手荷重의 경우 놀러서 均 일한 하중이 금속면과 探觸子사이에서 分布되기까지는 接觸媒質에 의해 받는 影響이 크다. 이를 시정하기 위하여 holder를 사용하여 測定誤差를 줄일 수 있었다. 한편으로 인공 결함에서 반사된 음의 波動性에 있어 경사로 인한 결함의 側面的 작용도 관계되리라 생각된다.

## 5. 結 論

(1) 경사각이 커짐에 따라 AVG diagram에 의한 결함크기 평가의 오차는 增加되며 결함의 지름 6mm의 경우 5 MHz에서는 3°, 2.25 MHz에서는 7°, 1 MHz에서는 15°까지 오차의 20% 범위에서 AVG diagram에 따른 결함크기 평가에 적용할 수 있다.

(2) 같은 경사각에 있어서는 探傷 周波數가 높을수록 결함의 지름이 클수록 적용오차는 커진다.

(3) 경사각의 變化에 따른 補正式 Eq.(45)는 결함의 지름 6mm의 경우 5 MHz는 5°, 2.25 MHz는 10°, 1 MHz는 15°까지 測定값과 계산값이 오차의 10% 범위에서 잘 일치하고 있으며, 결함의 지름 10mm의 경우 2.25 MHz는 5°, 1 MHz는 15°까지 일치하고 있으나 5 MHz는 3°에서도 9.5 dB의 상당한 차이를 보이고 있다.

以上으로부터 既存의 AVG diagram에 의한 缺陷 評價法에 있어 傾斜를 갖는 결함에 대해서 探傷條件을 變化시킨 더 많은 實驗的인 연구가 계속 必要하다고 생각된다.

## 參 考 文 獻

1. J. Saneyoshi : J. Acoust. Soc. Jap., Vol. 4, No. 12, 1943, pp. 1 - 7
2. A. Takaoki : Trans. Jap. Soc. Mech. Eng., Vol. 24, No. 147, 1958, pp. 778 - 783
3. A. Takaoki : J.N.D.I., 9, 1960, pp. 102 - 106
4. J. Krautkrämer : "Determination of the size of defects by the ultr-

asonic impulse echo method", British Journal of Applied Physics, Vol. 10, 1959, pp. 240 - 245

5. K. Kimura : Trans. Nat. Res. Inst. Metals, Vol. 4, No. 2, 1961, pp. 104 - 108
6. 加藤, 米村 : 日本音響學會講演 要旨, 第 10 番 1949.
7. J. Krautkramer, H. Krautkramer : "Ultrasonic Testing of Materials" 2nd edition, 1977, pp. 62 - 75, 91 - 96
8. 西山靜男 : "音響振動工學," ユロナ社, 1979 pp. 53 - 64
9. P.N.T Wells : "Physical Principles of Ultrasonic Diagnosis", Academic Press, 1969, pp. 53 - 58
10. I.N. Ermolov : "Application of the theory of a scalar sound field for the analysis of the acoustic path of an ultrasonic flaw detector", Soviet Phys. Acoust., 5, 1959, pp. 248 - 250
11. 木村 : 日本 非破壞檢査學會誌, 第 27 卷, 第 10 號, 1978, pp. 667 - 671
12. NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Volume II, ASNT, edited by Robert C. McMaster, 1977, Section 45, pp. 22 - 23
13. 非破壞檢査便覽, 日刊工業新聞社, 2nd edition, 1968, pp. 452 - 453