非破壞檢査 第 6 卷 第 2 號 47～57

超音波 탐촉자 特性이 板形缺陷의 크기 評價에 미치는 影響

이 종 포　　김 병 철　　임 형 택　　주 영 상

한국에너지연구소

1987년 2월 28일 접수

The effect of ultrasonic search units on the detectability and size evaluation of planar flaws

J. P. LEE,　　B. C. KIM,　　H. T. LIM,　　Y. S. JOO

ABSTRACT

The effect of ultrasonic search units on the detectability and size evaluation of planar flaws was studied for thicker ferritic material using the technique of the DAC curve and reference level.

Cylindrical holes were used as calibration reflectors. The planar flaws such as disc and band types were machined. They were detected and evaluated with different search units and sizing criteria. The value evaluated was compared with the actual dimension of planar flaws.

記号說明

C　：超音波速度

2d　：Through wall dimension of a flaw

D　：超音波 探觸子 직경

θ　：임의의 점과 빔의 굴절각이 이루는 각도.

f　：周波数 (frequency)

H(θ)：指向函数 (directivity function)

J_1　：first order Bessel function

k　：wave number (=w/c)

ℓ　：缺陷길이

R　：超音波 탐촉자 반경

S　：缺陷 끝단에서 表面까지 떨어진 距離

t　：재료 또는 용접부 두께

ν　：parameter ($=kR\sin\theta$)

ω　각 속도 ($=2\pi f$)

β　：入斜角

γ　：屈折角

η　：off angle (超音波 빔의 굴적각과 缺陷面의 수선과 이루는 각도)

ϕ : 빔의 퍼짐각
λ : 波長 ($\lambda = c/f$)

1. 序 論

高温, 高圧을 받는 圧力 容器와 配管은 高度의 安全性이 요구되고 있으며 母材및 熔接部에 존재하는 缺陷의 크기, 형태, 위치와 그 성장여부는 안정성에 미치는 影響이 매우크다. 따라서 이들 주요 압력용기 및 배관에 대해서는 生産製作段階에서 부터 稼動中에도 그 健全性을 확인하기 위해 여러가지 비파괴 검사법이 사용되고 있으며, 벽 두께가 두꺼운 재료 및 熔接部의 내부결함을 檢出, 評價하기 위해 放射線透過檢査와 超音波檢査法이 널리 이용되고 있다.

특히 치밀 (tight) 한 내부결함 중 傾斜진 龜裂 융합부족 등의 缺陷은 방사선투과검사시 쉽게 검출되지 않을 수도 있으며 [1, 2, 3] 이들 결함에 대한 超音波檢査法은 우수한 비파괴 검사법 중의 하나이다. [1, 3, 4] 超音波를 利用한 缺陷의 검출평가에는 여러가지 방법이 있으나 [5, 6, 7] 이중 거리 진폭 보정 곡선 (DAC Curve)을 利用한 基準感度法이 많이 쓰이고 있으며 [8, 9, 10] 이 경우 缺陷의 정확한 검출평가는 Calibration reflector, 探觸子의 周波数, 屈折角, 크기 缺陷의 特性, 결함 검출 평가 기준 % DAC 등의 많은 요소에 좌우된다. 본 연구에서는 Cylindrical hole을 reference reflector로 使用하고 거리진폭 보정곡선을 이용한 기준 감도법으로 결함을 검출평가할 경우 使用 探觸子의 周波数크기, 屈折角 및 결함검출 평가기준 % DAC 등이 缺陷檢出能力과 評價에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 理 論

2-1 指向函数 및 빔의 퍼짐

Cylindrical hole을 reference reflector 로 使用하고 거리 진폭 보정 곡선을 이용한 基準感度法으로 缺陷을 檢出評價할 경우 지향 함수와 빔의 퍼짐각은 缺陷의 評價에 密接한 影響을 미친다 (11, 12) 지향 함수 $H(\theta)$는 (12.13)

$$H(\theta) = \frac{2J_1(\theta)}{\nu}, \quad \nu = k R \cdot \sin\theta \quad \cdots\cdots (1)$$

위식에서 아래의 條件을 만족하는 θ_m에 따라 pressure mode 들이 存在하게 된다

$$kR \sin\theta_m = j_{1m} \quad \cdots\cdots (2)$$

단, J_{1m}은 $J_1(j_{1m}) = 0$

θ_m 중에서 m = 1인 θ_1을 통상 빔의 퍼짐각이라고 한다.

$$\theta_1 = \phi = \sin^{-1}\left[1.219\frac{\lambda}{D}\right] \quad \cdots\cdots (3)$$

실제 결함 검출 평가시 (3)식에서 표현되는 major lobe가 주로 사용된다.

2-2 DAC 曲線과 缺陷의 크기評價

Cylindrical hole을 이용하여 DAC曲線을設定하고 缺陷의 檢出과 評價에 있어 缺陷 信號의 peak amplitude 軌跡을 그림 1과 같이 나타낼 경우 缺陷의 두께방향의 크기 (through wall dimension)는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$2d = (MPj_2 - MPj_1) \times \cos\gamma \quad \cdots\cdots (4)$$

단, j : 결함의 끝단을 定하기 위한 %DAC 의 基準
MPj_2 : 결함의 下端部까지의 빔 路程
MPj_1 : 결함의 上端部 까지의 빔路程
2d : 결함의 높이 (through wall dimension)

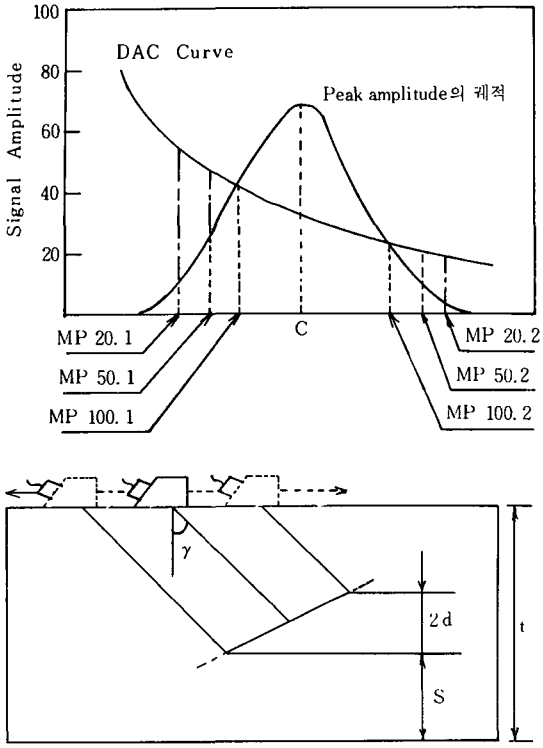

그림 1. 결함크기의 측정

결함의 길이는 紙面에 수직인 방향으로 탐촉자를 移動시켜 결정하게 된다.

$$\ell = |\ell j_2 - \ell j_1| \quad \cdots\cdots (5)$$

단, ℓj_2 및 ℓj_1은 결함의 길이를 測定하기 위해 基準點에서 결함의 끝점까지의 距離를 나타낸다.

여기서 j의 값을 몇 %DAC로 할때 실제의 결함크기에 가장 近接한 값을 주는가는 使用屈折角, 周波数, 探觸子 크기, reference reflector hole의 크기, 缺陷의 특성 등에 좌우되며 缺陷크기 評價를 위한 %DAC는 여러가지 実驗을 통해 결정함이 바람직하다.

현재 ASME Section V, article 4(14)에서는 through wall dimension측정 평가시 50%DAC 또는 $\frac{1}{2}$max 법을, 缺陷길이 測定 評價時 50% DAC을 사용하고 있다.

3. 実 驗

3-1 試驗片및 超音波探觸子 쐐기

試驗片 材料는 SCM 4鋼 을使用 하였으며 Cylindrical hole과 notch를 갖는 보정 試驗片을 ASME Section V article 4(14)에 따라 製作하였다. (그림 2)결함검출평가 대상 반사체는 ϕ 2, ϕ 3.15, ϕ 4.76, ϕ 6.35, ϕ 12.7, 9.5×20 6.4×40 (㎜) 크기의 경사진 판형 반사체 (disc 및 band types)를 표면에 50°의 기울기를 갖도록 $\frac{3}{4}$t깊이에 EDM 또는 end mill로 加工하였다. (그림-3, 4). 탐촉자 쐐기는 SCM 4鋼에 대해 40°, 45°, 50°, 55°, 60°의 횡파 굴절각을 갖도록 製作하였다.

3-2 實 驗

다른 크기의 초음파 탐촉자 ($\frac{1}{4}$″R, $\frac{1}{2}$″R, 1″R) 주파수 (2.25 MHz, 3.5 MHz, 5.0 MHz), 屈折角 (횡파 40°, 45°, 50°, 55°, 60°)을 조합해 가며 보정 시험편으로 DAC 曲線을 設定 하고 결함에서 검출되는 信號의 最大振幅과 20% DAC, 50% DAC, $\frac{1}{2}$Max DAC, 100%DAC 등으로 결정되는 결함의 길이 방향의 끝점 위치. 결함 두께 방향 兩端까지의 빔 路程 그때의 탐촉자의 位置등을 측정하였다. 장비는 실제 현장 초음파 검사시 많이 쓰는 sonic mark-I을, 탐촉자는 AEROTECH, SONIC, SwRI 제품 등을 사용하였다.

4. 実驗結果 및 考察

4-1 使用 超音波探觸子의 屈折角과 周波数에 따른 影響

결함 크기 評價時 ASME Code (9, 14) 방법대로 결함 길이를 50% DAC, 결함의 through wall dimension을 50% DAC or $\frac{1}{2}$max로 결정

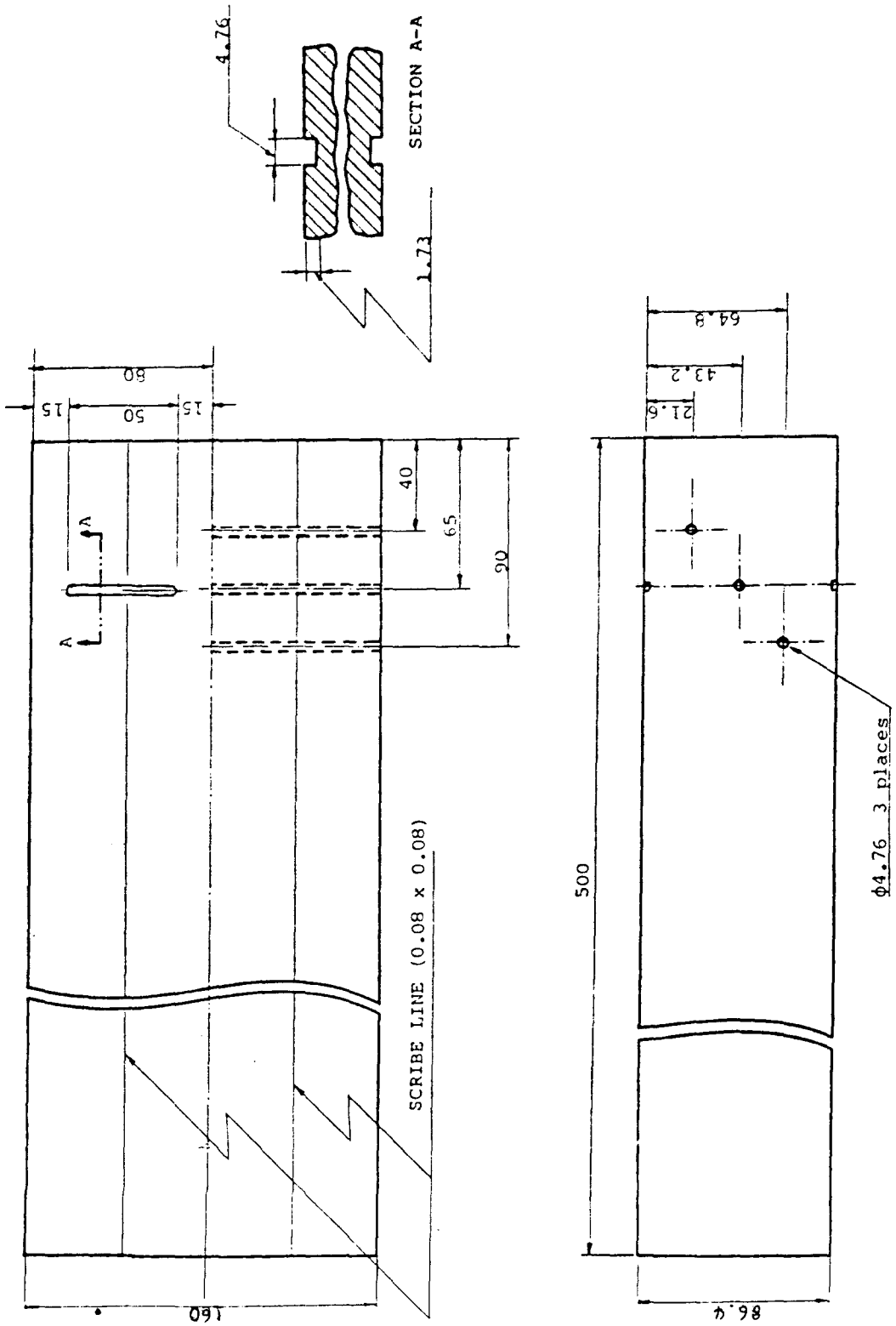

그림 2. 교정시험편 (Calibration block) 도면

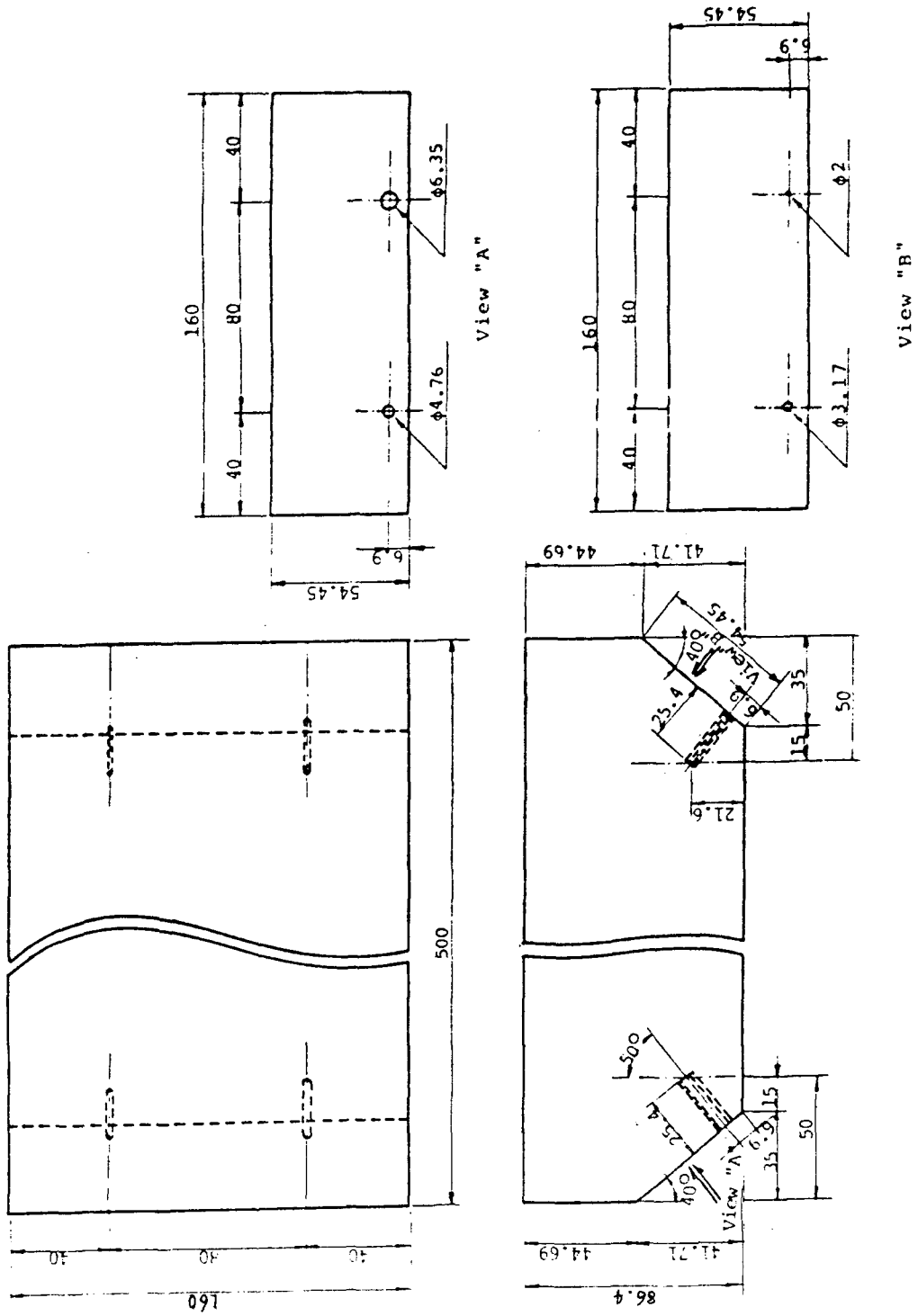
160
40
80
40
φ6.35
φ4.76
54.45
6.9
View "A"
160
40
80
40
φ2
φ3.17
54.45
6.9
View "B"
500
160
40
40
40
41.71
44.69
4.45
40°
View "B"
25.4
6.9
35
50
15
21.6
500
25.4
6.9
15
35
50
40°
View "A"
41.71
44.69
86.4

그림 3. 시험편 도면 (I)

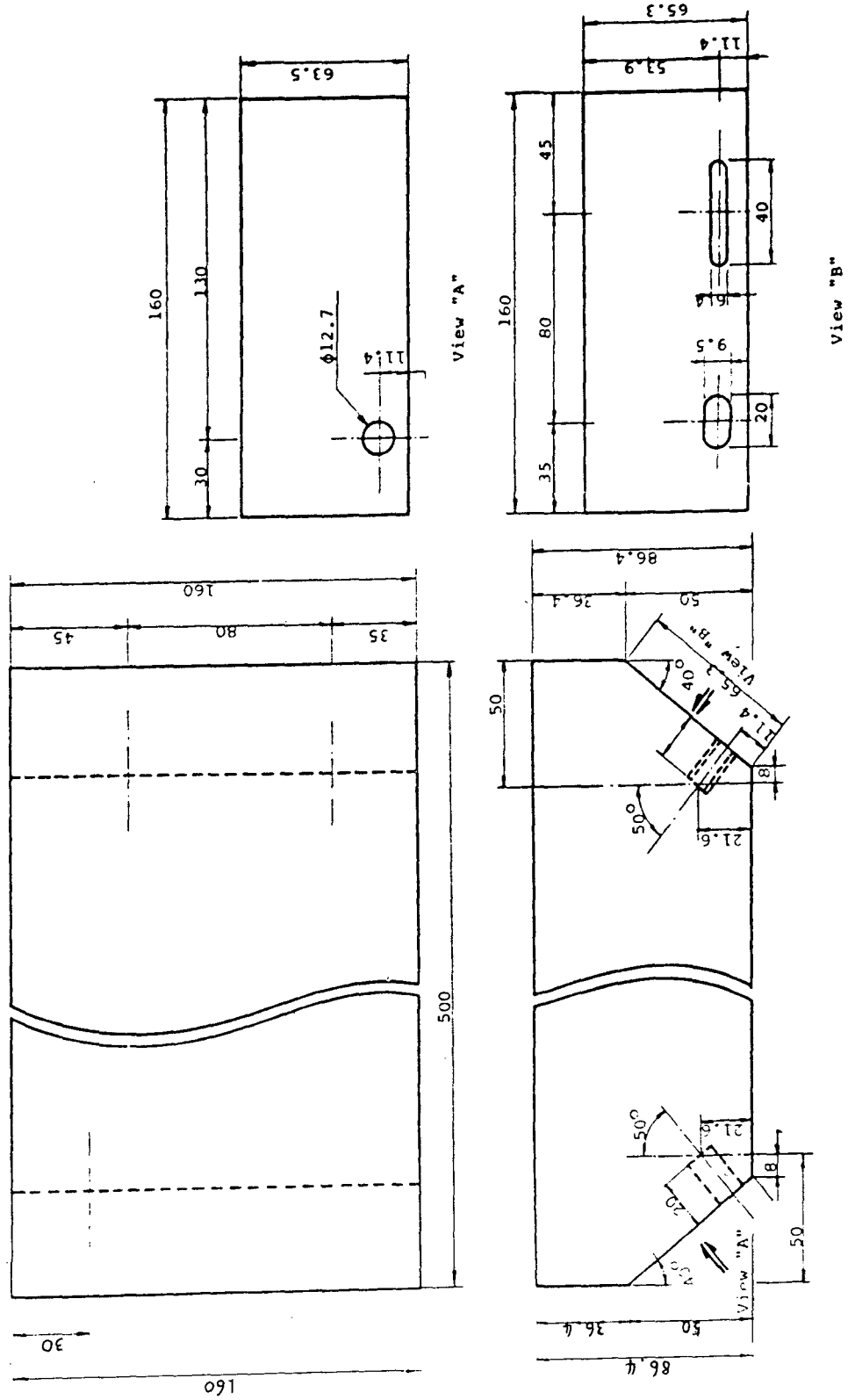
63.5
160
130
30
φ12.7
11.4
View "A"
65.3
11.4
53.9
45
40
160
80
35
16.4
9.5
20
View "B"
160
45
80
35
500
30
160
86.4
36.4
50
50
40°
65.3
11.4
View "B"
8
50°
21.6
50°
21.6
8
20
50
View "A"
50
36.4
86.4

그림 4. 시험편 도면 (II)

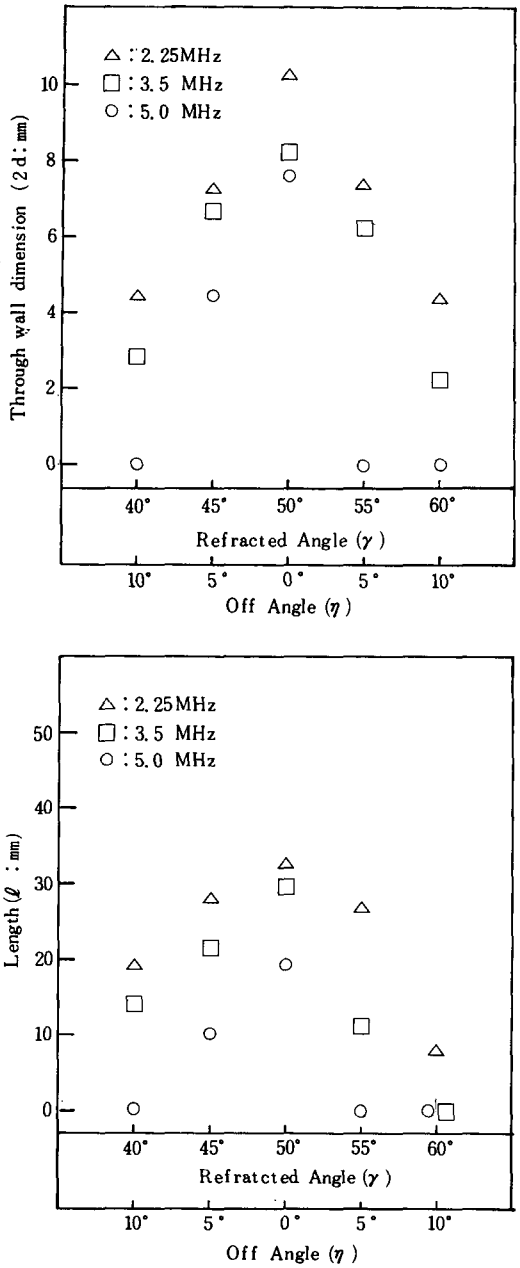

그림 5 굴절각과 주파수에 따른 결함크기 평가

Sizing Criteria Length-50%DAC, through wall -50% DAC or 1/2max. DAC.
탐촉자크기 : 1/2″R,
실제결함크기 : 2d=7.28mm,
ℓ =20mm

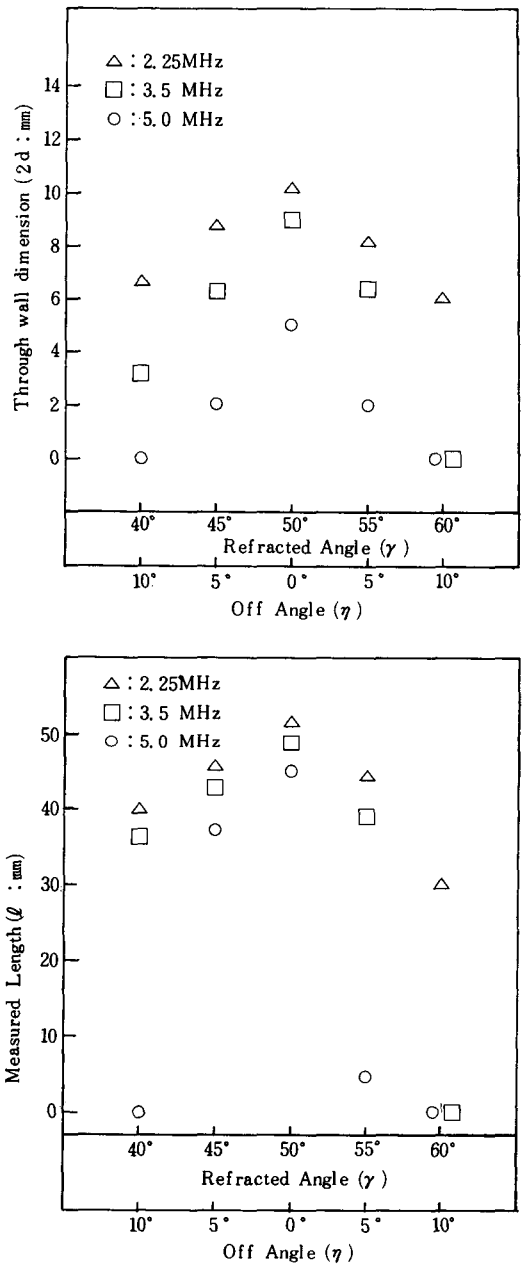

그림 6 굴절각과 주파수에 따른 결함크기 평가

Sizing Criteria : Length-50%DAC, Through wall-50%DAC or 1/2max. DAC.
탐촉자 1/2″R,
실제결함크기 : 2d=4.9mm,
ℓ =40mm)

했을 때 사용 초음파 탐촉자의 굴절각 및 주파수에 따른 影響은 그림－5 및 그림－6과 같다. 그림에서 결함의 through wall dimension은 式(4), 결함의 길이는 式(5)에 의해 계산하였다. 결함은 使用 탐촉자의 周波数가 낮고(2.25MHz) off angle (缺陷面의 垂直線과 빔의 굴절각과의 差)이 0°, 즉 굴절각이 50° 일때 缺陷이 최대의 크기로 評價되었으며 周波数와 off angle이 커질수록 결함의 評價値는 감소하였다. 또한 주파수 및 off angle이 증가함에 따라 그 영향은 현저하였으며 이는 式(1), 式(2)의 指向函数와 빔의 퍼짐 영향이 크게 작용하기 때문이다. 상기 결과는 S. Serabiam[11][12]의 最大振幅法에 의한 実驗 및 이론치와 잘 일치함을 알 수 있다.

실제 초음파 검사시 판형결함의 각도는 未知(unknown)이고 여러 굴절각을 모두 적용하는 것은 어려우므로 초기 주사시 缺陷의 검출능력이 좋은, 낮은 주파수의 탐촉자를 使用함이 바람직하다.

현재 ASME Code (10, 14)에서는 경사각 검사시 45° 와 60° 횡파 굴절각을 사용하도록 하고 있으나 주파수에 대한 구체적 언급이 없으므로 실제 검사시 결함의 각도와 사용탐촉자의 굴절각과의 차이 (off angle)가 크고 주파수마저 높을 경우 결함은 실제 결함크기보다 현저히 작게 評價된다. 따라서 檢出된 주요 결함에 대해서는 여러 굴절각을 사용하여 실제 결함의 각도를 결정하여 결함을 評價함[15, 16, 17]이 바람직하다.

그림 5.6의 실제 2d/t가 0.02가 넘는 planar flaws의 경우 ($\frac{1}{2}$″R 사용), off angle 0° 시는 5.0MHz가, off angle이 5° 이내에서는 3.5MHz가 실제 결함 크기에 가장 가깝게 평가 됨을 보여준다.

그러나 실제 熔接缺陷(planar flaw)일 경우는 결함이 완전한 單一平面(single plane)을 이루기 힘들고, 缺陷의 표면 거칠기도 缺陷에 따라 많이 다를것이 예상되므로 off angle에 따른 영향이 매우 크고 높은 周波数의 探觸子 使用에는 주의해야 할 필요가 있다.

4－2 缺陷의 檢出能力

ϕ 2, ϕ 3.15(㎜)인 원형평판 결함에서의 최대 반사 신호 크기는 사용한 모든 탐촉자군(search units)에서 50% DAC 이하였다. 현재ASME section XI[10] 및 Section V article 4[14]에서는 결함의 기록 기준을 50% DAC으로 잡고 있는 바 이 기준을 적용할 경우 ϕ3㎜ 이하인 單一缺陷은 기록 기준에 미치지 못하므로 기록될 수가 없다. 이는 합부판정기준(10)을 감안해 볼 때 거의 무시할 수 있는 결함이나 보다 엄격한 판정기준을 적용하려면 기록 기준을 50% DAC 이하로 낮추는 것이 바람직하다. 이는 4－1절에서 보았던 바와 같이 결함의 最大反射信號는 使用屈折角 및 주파수 등에 아주 예민하기 때문이다.[11][12][15] 즉 높은 주파수 또는 off angle이 큰 굴절각을 (결함의 각도는 未知이므로) 사용하였을 경우 이들 영향 때문에 실제 합부판정 근방의 결함이라 할지라도 초기 주사시 50% DAC 이하의 결함으로 檢出될 가능성이 높기 때문이다. 물론 缺陷이 낮은 주파수와 off angle 0° 근방인 탐촉자로 信號振幅이 50% DAC 이하인 것이 규명될 경우는 기록 기준에 따라 무시할 수도 있을 것이다.

4－3 缺陷길이 評價

그림 7과 그림 8은 결함길이 評價時 使用探觸子의 크기와 周波数에 따른 영향을 나타내며 굴절각은 50° (off angle : 0°) 결함길이 평가 기준은 50% DAC일 때이다. $\frac{1}{2}$″R 사용시는 5.0 MHz가, 1″R 사용시는 3.5MHz 일때가 실제 결

함 길이에 근접하였고, 실제 결함 길이가 큰 것일수록 결함 평가치의 오차도 적었다. 이들 結果는 사용 굴절각을 off angle이 0° 되게, sizing criteria를 50%DAC, calibration reflector (cylindrical hole)를 一定하게 할 경우, 실제 결함 크기에 가장 근접한 評價値를 주는 탐촉자 크기와 周波数가 존재함을 의미하며 이는 식(3)의 一定 빔 퍼짐각을 의미한다.

상기 周波数, 探觸子크기에 따라 실제 결함에 근접한 평가치를 주는 λ/D는 $(4\sim6)\times10^{-2}$ 였으며 기존 [16) 17)]의 結果와 일치한다. 이는 DAC曲線에 의한 基準感度法으로 판형결함을 평가할 경우 calibration reflector, 사용 초음파 탐촉자의 크기, 주파수, 굴절각, 결함 결정기준 %DAC에 따라 정확한 결함 評價値를 주는 條件을 결정해야 할 필요가 있음을 의미한다.

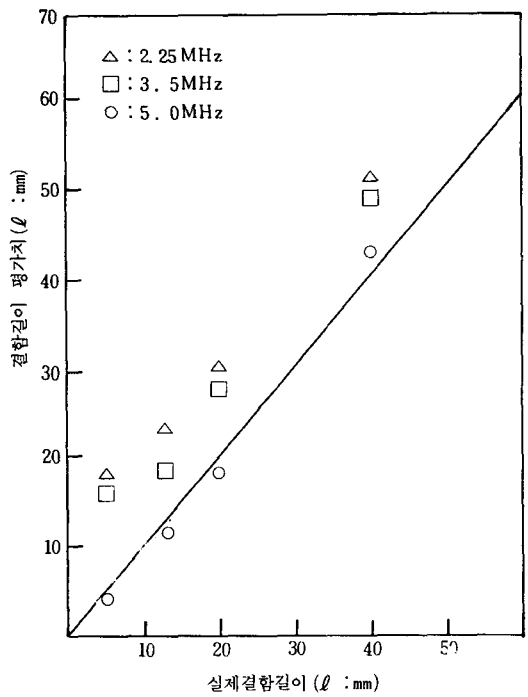

그림 7 주파수에 따른 측정결함의 크기변화
(탐촉자 : 1/2" R, 50 - deg., 50% DAC Sizing)

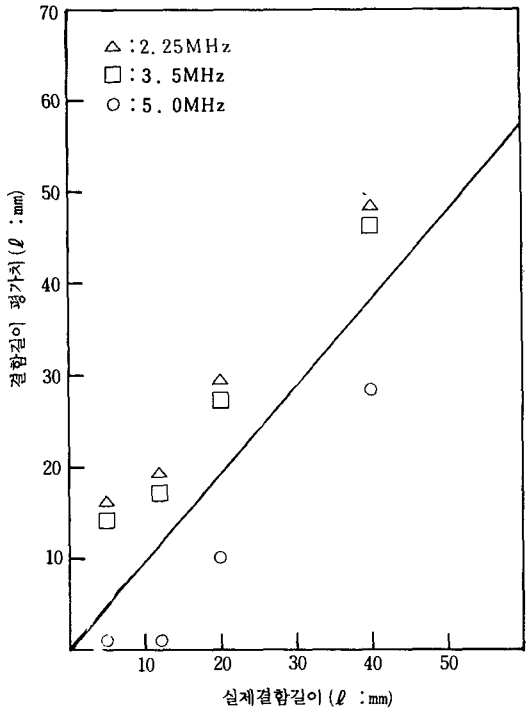

그림 8 주파수에 따른 측정결함의 크기변화
(탐촉자 : 1"R, 50 - deg., 50% DAC Sizing)

5. 結 論

벽 두께가 두꺼운 ferritic material에 대한 초음파 검사시 cylindrical hole을 Calibration reflector를 使用하고, DAC 곡선에 의한 기준감도법으로 경사진 평판형 결함을 평가 할 때 초음파 탐촉자의 굴절각 크기, 주파수에 따른 결함의 검출능력 및 평가에 미치는 영향은 다음과 같다.

1. 결함의 評價値 (through wall dimension은 $\frac{1}{2}$max or 50% DAC, 길이는 50% DAC 기준)는 탐촉자의 off angle과 주파수가 낮을수록 실제 결함보다 크게 평가되며, 탐촉자의 off angle과 주파수가 증가할수록 작게 평가된다. 특히, off angle이 5°이상이고 주파수가 높을 경우 (3.5MHz 이상) 결

함은 실제 크기보다 현저히 작게 평가된다.

2. ϕ 3㎜이하인 원형 缺陷에 대한 最大반사 신호는 사용 모든 탐촉자($\frac{1}{2}$″R, 1″R, $\frac{3}{8}$″R, 2.25MHz, 3.5MHz, 5.0MHz)에서 50% DAC이 하였다. 이는 초기 주사시 off angle에 기인하여 신호진폭이 낮을 가능성이 있으므로 rocording level를 낮춤이 바람직하다.
3. 단일 반사체에 対해 DAC곡선과 기준감도(50% DAC)법으로 결함길이를 評價할 때 $\lambda/D=(4\sim6)\times10^{-2}$일때 실제 결함길이에 가장 근접한 평가치를 주었다.

참고문헌

1. J. F. Lovelace and L. A. Luini, "A Correlation Study Between Ultrasonic, Radiographic and Visual Examination of Heavy Steel Plate Weldments.", Materials Evaluation, 1967. pp. 1～7.
2. Neil Sinclair, "Considerations for Establishing Ultrasonic Test Acceptance Standards.", Materials Evaluation, 1967. pp. 118～125
3. 박대영, 이종포, "Detection Evaluation and Repair of the Code Rejectable UT Indications on the Pressurizer C-4 Weld of the Ko-Ri Nuclear Plant, Unit 6." (Vol. I-Ⅳ). KAERI, Dec. 1985.
4. 이종포, 김병철, 임형택, 주영상 "1984～1985 Preservice Examination of Class 1, Class 2 and Class 3 Components of the Ko-Ri Nuclear Plant, Unit 6.", Vol. 6, KAERI, Dec. 1985.
5. Laszlo Adler and D. K. Lewis, "Diffraction Model for Ultrasonic Frequency Analysis and Flaw Characterization," Materials Evaluation, Jan. 1077, pp. 51～56.
6. J. Frohly, C. Brunnel, B. Bisiaux, J. Lefebvre, "Acoustical Imaging Focalization Under Oblique Incidence Through an Interface-Application to NDT.", Acoustical Imaging, Vol. 11, 1982, Plenum Press. NEW YORK
7. Onodera, Y. Ohkubo, M. Takeya and M. Wataya, "Defects and Their Inspectablity by UT in Current Heavy Section Steels for Nuclear Power Plants." Nuclear Engineering and Design, 81 (1984), pp. 334～336
8. Steven Serabian, "Influence of attenuation upon the weld interrogation distance amplitude curve," Materials Evaluation, December 1976. pp. 265～274.
9. "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components." Section Ⅲ of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, the American Society of Mechanical Engineers, New York (1983 edition).
10. "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components." Section Ⅺ of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, the American Society of Mechanical Engineers, New York. (1983 edition).
11. S. Serabian, "An Assessment of the Detecting Ability of the Angle Beam Interrogation Method." Materials

Evaluation, 39. pp. 1243~1249.
Dec. 1981
12. S. Serabian, "Ultrasonic Probubility of Detection of Subsurface Flaws." Materials Evaluation, 40, pp. 294~298, March 1982.
13. Lawrence E. Kinsler. Austin R. Frey, Alan B. Coppens and James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics." John Wiley & Sans. New York (1982)
14. "Nondestructive examination," Section V of ASME B & PV Code, the American Society of Mechanical Engineers, New York (1983)
15. "Ultrasonic Testing-Flaw Detection and Versus Evaluation.", Welding Design and Fabrication Vol. 51, No. 2, pp. 86~88. Feb. 1978.
16. 박종현, "초음파검사 조건이 반사체 크기에 미치는 영향", 한국에너지연구소 1986, 6
17. 이종포, "초음파탐촉자 특성이 판형결함의 크기 평가에 미치는 영향," 한국에너지연구소, 1986. 6