

Satellite -Pulse Technique(SPT)를 이용한 결함의 크기 측정

곽경진, 정용무, 이연필, 안희성

한국에너지연구소
(1981년 6월 22일 접수)

Defect Sizing by Ultrasonic Satellite-Pulse Technique

Kyung-Jin Kwak, Yong-Moo Jeong, Yun-Peel Lee and Hee-Sung Ahn

Korea Advanced Energy Research Institute
(Received; June 22, 1981)

초 록

소위 Satellite-Pulse Technique(SPT)을 이용하여 인공결함의 크기를 측정하였다. 측정치와 실제치를 비교하였는바 오차는 무시할 정도이었다.

Abstract

Sizing of artificial flaws is accomplished by ultrasonic Satellite-Pulse Technique(SPT). Negligible error is found.

1. 서 론

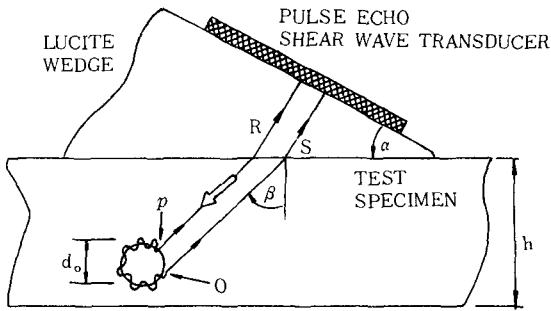
최근에 초음파탐상기술개발분야의 세계적인 추세는 결함의 모양과 크기를 어떻게 정밀하게 측정하는가에 대한 것이다.

여기서 얻어진 결함에 대한 정보, 결함의 위치 및 검사대상부위의 재료특성들을 종합하여 부품의 잔류 사용기간을 예측할 수 있는 것이다. 그러나 자연발생적인 결함의 크기측정에 대한 기술은 현재까지 완성되지 못했으며 단순한 모델을 설정하여 이의 결함 크기 측정기술을 개발하는 단계이다. 본 연구에서는 최근에 개발된 결함크기 측정기술의 일종인 Satellite

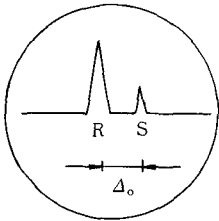
- Pulse Technique(SPT)을 이용하여 이미 그 크기와 모양을 알고 있는 결함에 대해 그 크기를 측정하는 실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

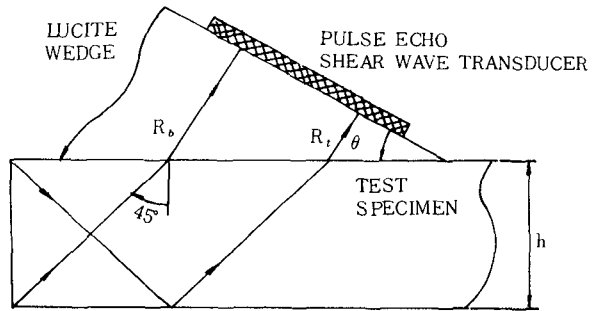
재료 내부에 존재할 수 있는 결함의 형태는 매우 복잡하다. 그러나 모든 결함의 모양을 대별하면 균열과 같은 2차원적인 평면결함(crack-like defect)과 기공(porosity) 및 개재물(inclusion)과 같은 3차원적인 구형결함(inclusion-like defect)로 분류할 수 있다.



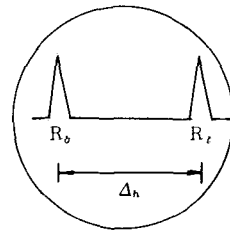
a) 직경이 d_0 인 구형 결함에 의한 반사파(R)와 분산파(S)의 분리



b) Oscilloscope에 나타나는 반사파(R)와 분산파(S)와의 시간차



a) 上, 下 모서리에 의한 입사파(R_b 및 R_t)의 분리



b) Oscilloscope에 나타난 R_b 및 R_t 의 시간차(Δ_h)

그림 1. 구형 결함에서의 초음파의 반사와 표면파의 발생

2.1 구형 결함

구형 결함에 입사된 초음파는 beam과 구의 표면이 수직되는 부분에서는 초음파가 반사되어 탐촉자에 되돌아오고 그밖의 표면에서는 초음파가 분산되어 반사파로서 탐촉자에 되돌아 오지 않는다. 또한 강탄성체인 고체와 탄성이 거의 없는 기체와의 경계면에 초음파가 입사되면 표면파가 발생되어 경계면을 진행한다. 결함의 형태가 구형일 경우에 표면파는 계속적으로 구의 표면을 돌면서 구의 접선방향으로 방사되기 때문에 초음파 에너지는 점차적으로 감쇄되어 소멸된다.

그림 1에서 구형결함과 입사된 초음파는 점P에서 반사되어 탐촉자로 되돌아가는 반사파(R)와 점P에서 표면파가 발생되어 원주위를 표면파로써 돌아 점Q에서 방사되어 탐촉자로 되돌아 가는 분산파(scattered satellite)의 두 개의 파를 CRT에서 잡아낼 수 있다.⁽¹⁾ 이 두개의 파는 그 진행경로가 다르므로 탐촉자에 되돌아가는 시간이 다르며 두 pulse 사이의

그림 2. 상, 하 모서리에 의한 입사파의 분리

시간차 Δ_0 는 다음과 같다.

$$\Delta_0 = \frac{3\pi d_0}{4V_{s,metal}} + \frac{d_0}{2V_{t,metal}}$$

d_0 : 구형 결함의 직경
 $V_{s,metal}$: 금속내의 표면파의 속도
 $V_{t,metal}$: 금속내의 횡파의 속도

$$\Delta_0 = Kd_0 \quad \text{단, } K = \frac{3\pi}{4V_{s,metal}} + \frac{1}{2V_{t,metal}} \quad \dots(1)$$

그림 2에서와 같이 시험편의 상하 모서리로부터 반사된 두개의 pulse(R_b 및 R_t)는 경로차에 의해서 CRT상에 시간차 Δ_h 로 나타난다. 재료가 알루미늄이고 45° 사각 탐촉자를 사용할 경우 시간차 Δ_h 는 다음과 같다.

그림 2에서 Lucite Wedge의 경사각 θ 는

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{V_{L,lucite}}{V_{s,metal}} \cdot \sin 45^\circ \right) \quad \dots(2)$$

$V_{L,lucite}$: Lucite 내의 종파 속도

따라서 R_b 와 R_t 간의 시간차 Δ_h 는

$$\Delta_h = \frac{\sqrt{2}h}{V_{t,metal}} - \frac{h \sin \theta}{V_{t,metal}} \quad \dots(3)$$

(3)식에 (2)식을 대입하면

$$\Delta_h = \left(\frac{\sqrt{2}}{V_{t,metal}} - \frac{\sin 45^\circ}{V_{t,metal}} \right) h \quad (4)$$

정리하면

$$\Delta h = \frac{0.707}{V_{t,metal}} h \quad \dots(5)$$

재료가 알루미늄이므로

$$\Delta h = 0.228h \quad \dots(6)$$

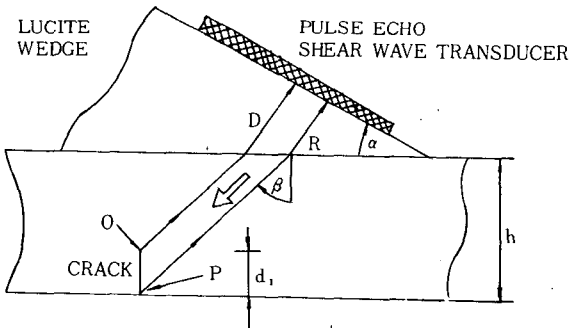
$$(1)식에서 \Delta_0 = 0.974 d_0 \quad \dots(7)$$

$$\Delta_0 = \Delta h \text{라는 조건에서} \\ d_0 = 0.234h \quad \dots(8)$$

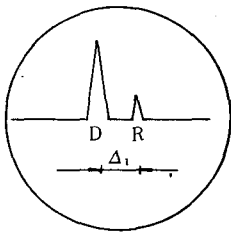
보정시험편의 두께 h는 이미 알고 있으므로 크기 측정시와 보정시에 CRT상에 같은 거리에 peak가 나타나다면 식(8)의 관계에 따라 0.234h로 크기가 측정된다.

2.2 평면형 결함

균열과 같은 평면형 결함에 초음파가 입사되면 회절(diffraction) 또는 반사(reflection) 현상이 일어난다. 그림 3-(a)에서와 같이 균열 모양의 결함에 초음파가 입사되면 점 Q에서 회절(diffracted satellite)되고 점 P에서 반사되어 탐촉자로 돌아간다. 이때 회



a) notch의 크기가 d_1 인 평면형 결함에 의한 회절과(D)와 반사파(R)의 분리



b) Oscilloscope에 나타나는 회절파(D)와 반사파(R) 사이의 시간差 Δt

그림 3. 평면형 결함에서의 회절과 반사

절과 (D)와 반사파(R)의 경로차에 의해 시간차가 발생하며 이 시간차가 CRT상에 그림 3-(b)와 같이 표시된다.

그림 3-(b)에서 시간차 Δ_1 은

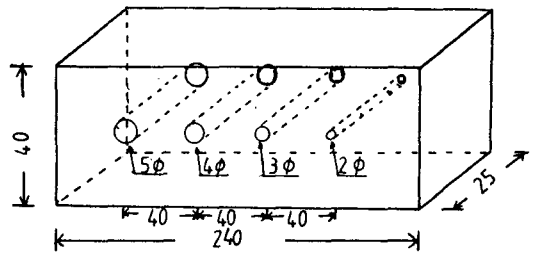
$$\Delta_1 = \frac{2d_1 \cos \beta}{V_{t,metal}} \quad \dots(9)$$

d_1 : 평면형 결함 크기

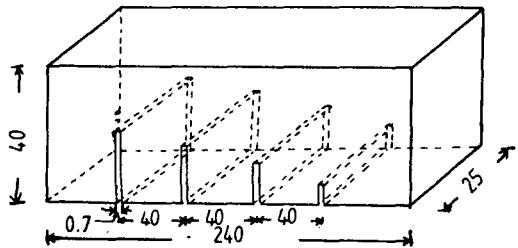
β : 초음파 탐촉자의 굴절각

식 (8)에서 굴절각이 45° 라면

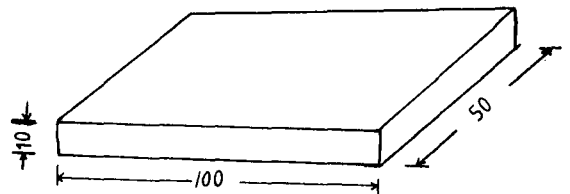
$$V_{t,metal} \Delta_1 = 1.414d_1 \quad \dots(10)$$



a) Side-drilled Hole



b) Notch



c) Distance Calibration block

그림 4. 試驗片 (단위 : mm)

알루미늄의 경우 $\Delta_1 = 0.456d_1$, ... (11)

구형 결함에서와 같은 방법으로 재료의 상하 모서리로부터 반사된 두개의 pulse(그림 2) 사이의 시간차 Δh 와 두께 h 와의 관계식 (6)과 식 (11)로부터 $\Delta_1 = \Delta h$ 라는 조건으로 정리하면

$$d_1 = 0.5h \quad \dots (12)$$

식 (12)를 이용하여 CRT의 시간축을 보정한다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 연구를 위해 Sonic Mark II (Pulse-echo, A-scan, Video mode)를 다음과 같이 A-scan, RF mode로 개조하였다. Video display 부분의 증폭단 끝에 나오는 full wave detector를 없애고 임피던스 변환용 emitter follower TR을 제거한 뒤 위상 분리용 TR에서 직접 차동 증폭 IC로 신호를 보낸 뒤 deflection 증폭기에서 증폭한 뒤 CRT에 보낸다. 이와 같이 RF mode로 개조한 Sonic Mark II와 video mode인 Tokyo Keiki SM-80을 실험장치로 사용하였다. 그밖에 탐촉자는 크기 10mm×10mm, 각도 45°를, 접촉매질로는 Ultragel을 사용하였다.

3.2 시험편

결함의 형태를 구형 결함 및 평면형 결함으로 대별하여 다음과 같이 알루미늄 재료에 인공결함을 만들었다. 구형 결함으로는 그림 4-(a)와 같이 2mmφ, 3mmφ, 4mmφ, 5mmφ인 side-drilled hole을 만들었으며, 평면형 결함은 그림 4-(b)와 같이 폭이 0.7mm이고 높이가 5mm, 10mm, 13mm, 16mm인 notch를 만들었다. 또한 거리 보정용 시험편은 동일 재료인 알루미늄으로 그림 4-(c)와 같이 두께가 10mm인 시험편을 제작하였다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 구형 결함의 직경 측정

거리보정 시험편을 사용하여 탐상기의 시간축 측정범위를 사진 1과 같이 조정하였다.

첫번째 pulse (Rb)와 두번째 pulse (Rt) 사이의 거리를 5 screen division으로 조정하고 구형 결함에

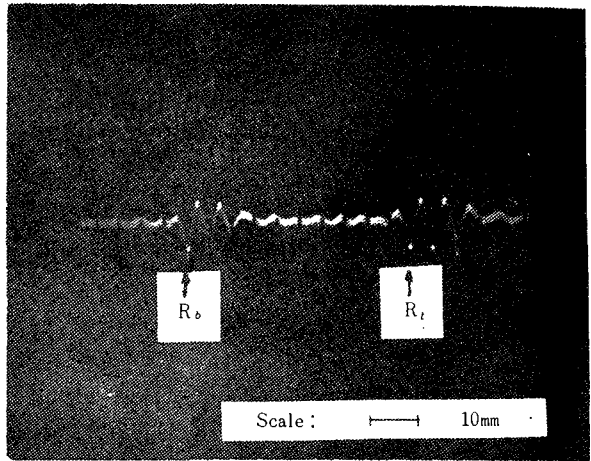


사진 1. 測定範圍의 調整 Rb Rt Scale: 10mm

대한 거리보정식 (8)을 이용하여 $\Delta h = 4.74\text{mm}$ 로부터 CRT 상의 시간축 1 division이 0.948mm임을 계산하였다.

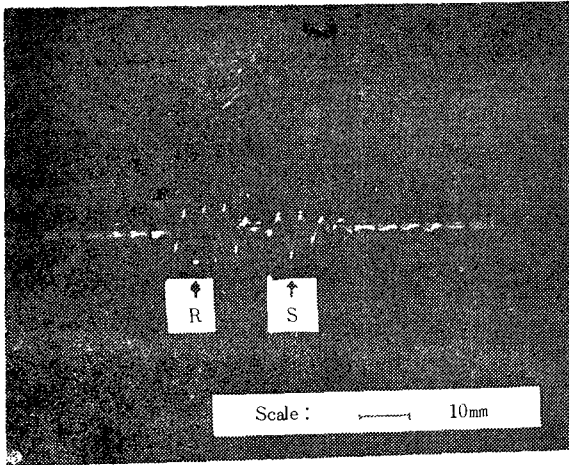
결함으로부터 탐촉자에 되돌아오는 두개의 pulse 높이가 최대가 되는 곳에 45° 탐촉자를 고정시켰다. 사진 2-(a), 2-(b), 2-(c), 2-(d)와 같이 결함 크기에 따라 CRT에 반사파(R)와 분산파(S) 사이의 거리가 다르게 나타났다.

이 두개의 pulse가 결함의 어느 부분에서 나온 것인지 확인하기 위해 접촉매질을 사용하여 damping 현상을 이용하였다. beam이 반사되는 위치에서는 두 pulse가 모두 damping 되었고 그밖의 위치에서는 두 번째 pulse (satellite pulse)만이 damping되었다. 따라서 첫번째 pulse(R)은 hole의 정점에서 초음파가 반사된 pulse이고 두번째 pulse(S)는 정점으로 부터 hole주위를 돌아 분산파(scattered satellite pulse)로 탐촉자에 되돌아간 pulse임을 확인하였다.

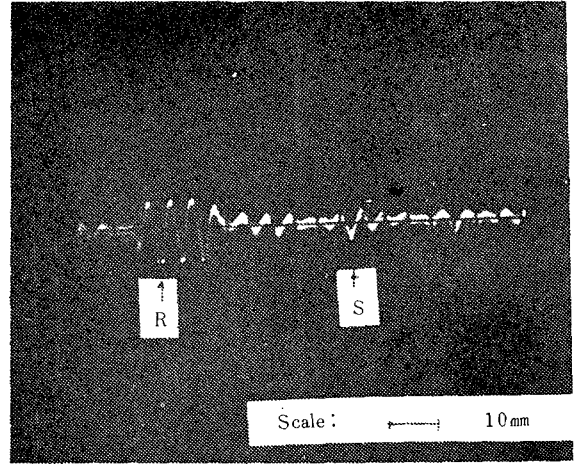
사진 2의 결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. Hole 직경의 측정치

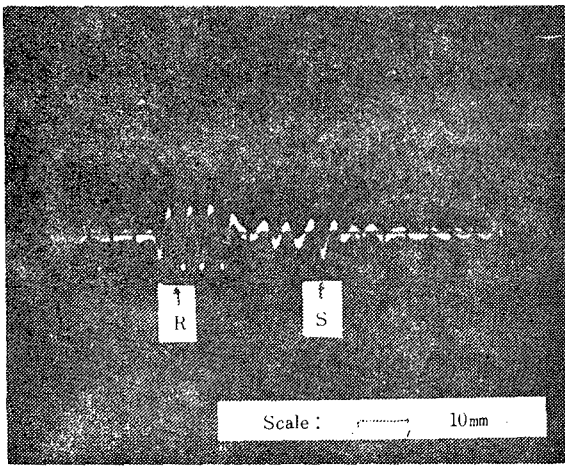
실제직경 (mm)	거리 (Screen Division)	측정치 (mm)
2	2.1	1.99
3	3.2	3.03
4	4.2	3.98
5	5.3	5.02



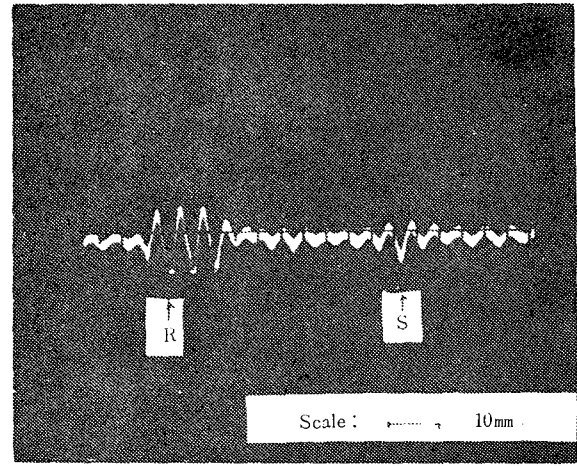
a) 2mm ϕ Side-drilled Hole



c) 4mm ϕ Side-drilled Hole



b) 3mm ϕ Side-drilled Hole



d) 5mm ϕ Side-drilled Hole

사진 2. 구형 결함의 탐상 결과

표 1에서 보는바와 같이 측정치의 오차는 ± 0.03 mm로써 실제치와 비교하여 볼 때, 상당히 적은 오차로써 정확한 값을 SPT에 의해서 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 평면형 결함의 크기 측정

4.2.1 측정 범위의 조정

구형 결함의 거리보정 방법과 마찬가지로 방법으로 평면형 결함의 측정 범위를 조정하였다. 즉 사진 3과 같이 첫번째 pulse(Rb)와 두번째 pulse(Rt) 사이의 거리를 4 screen division으로 조정하고 평면형 결함에 대한 거리보정식을 이용하여 $\Delta h = 10.12\text{mm}$ 로

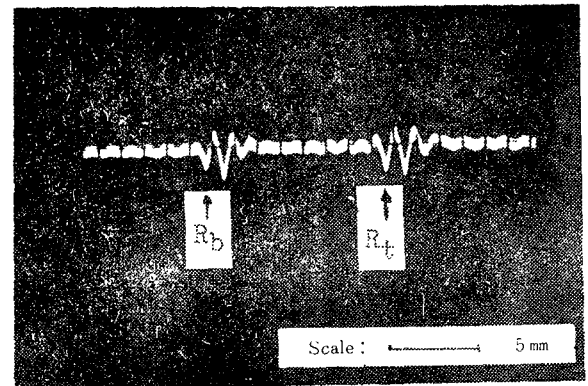
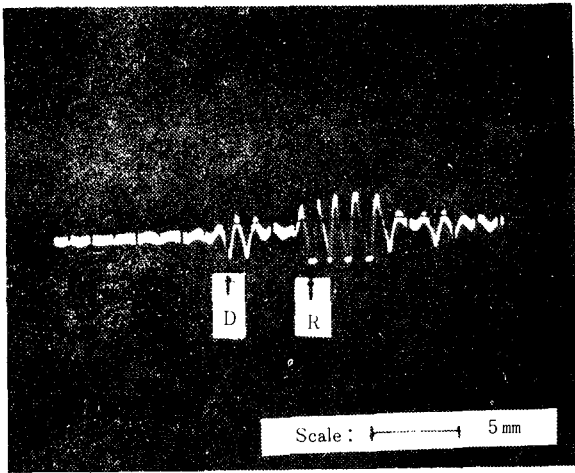
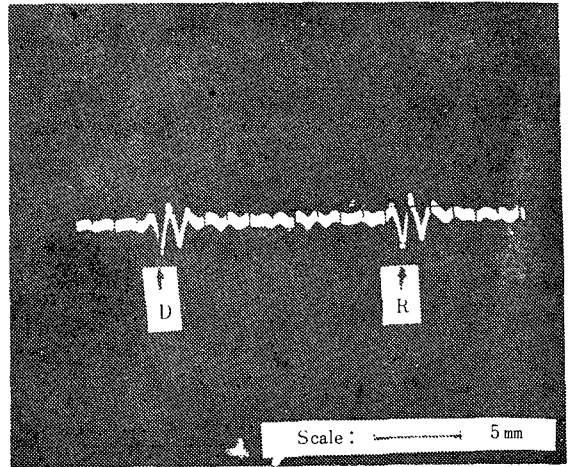


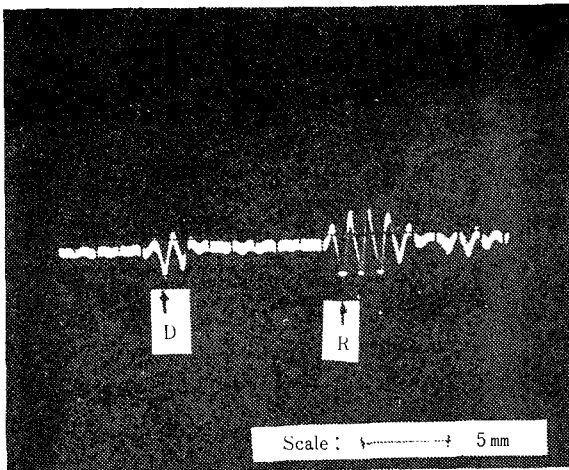
사진 3. 測定範圍의 調整



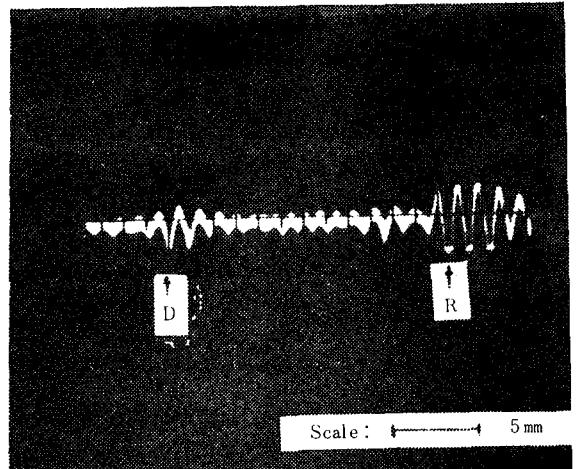
a) 5 mm Notch



c) 13mm Notch

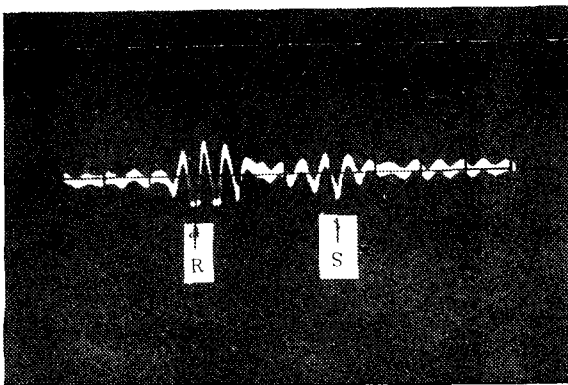


b) 10mm Notch

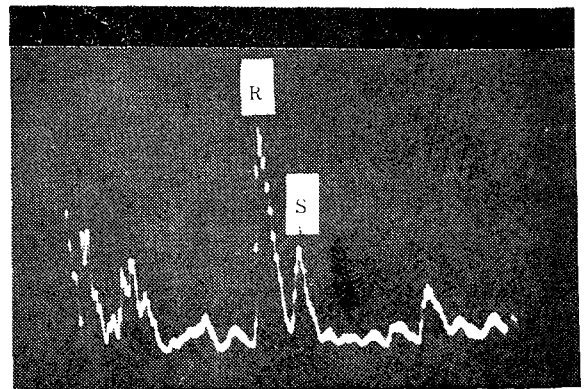


d) 16mm Notch

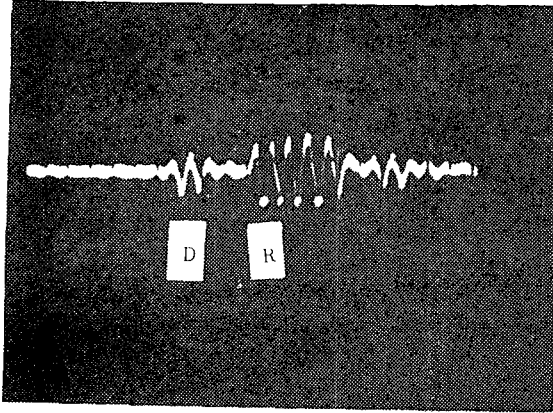
사진 4. 平面形 缺陷의 探傷 結果



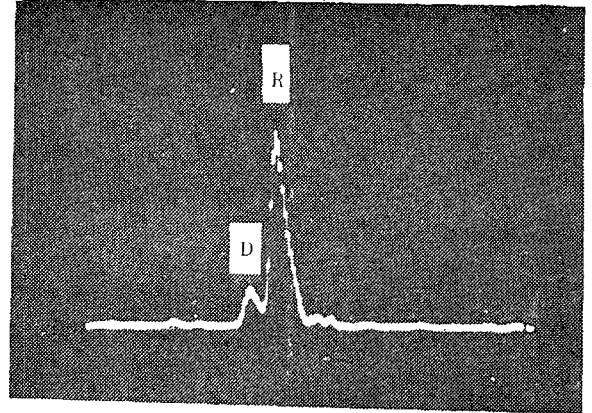
a) 3 mm ϕ 의 R-F mode



b) 3 mm ϕ 의 Video mode



c) 5 mm Notch의 RF mode



d) 5 mm Notch의 Video mode

사진 5. RF mode와 Video mode의 비교

부터 CRT 시간축의 1 screen division이 2.53mm임을 계산하였다.

4.2.2 Notch의 크기 측정 및 검토

입사되는 초음파가 tip 부분에서는 회절되고 밀부분에서는 반사되기 때문에 회절파가 최대인 위치에 45° 사각 탐촉자를 고정시켰다. 크기가 다른 각각의 notch를 탐상한 결과 사진 4와 같이 notch크기에 따라 CRT에 나타나는 회절파(D)와 반사파(R) 사이의 거리가 다르게 나타났다. 이 두개의 pulse 중에서 반사파와 회절파를 확인하기 위하여 damping 현상을 이용하였다. notch 밀부분에서의 damping은 두번째 pulse(R)만이 damping 되었고 tip 부분에서의 damping은 첫번째 pulse만이 damping 되었으므로 첫번째 pulse(D)는 tip에서의 회절파이고 두번째 pulse(R)은 밀부분에서의 반사파임을 확인하였다.

사진 4의 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. Notch 크기의 측정치

실제깊이 (mm)	거리(Screen Division)	측정치 (mm)
5	1.9	4.80
10	3.9	9.87
13	5.3	13.41
16	6.3	15.94

표 2에서 보는 바와 같이 측정치의 오차는 ±0.4 mm로써 실제치와 비교하여 볼 때 비교적 정확한 값을 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.3 Video display에 의한 크기 측정

동일한 모양과 크기의 결함을 video mode로 탐상한 결과를 RF mode 결과와 비교하였다. 3mm ϕ side-drilled hole과 5mm notch를 각각 video mode 및 RF mode로 탐상하여 사진 5와 같은 결과를 얻었다.

사진 5의 (a) 및 (b)와 (c) 및 (d)를 비교하여 보면 RF mode인 (a)와 (c)는 분리된 두개의 pulse의 구분이 확실하여 두개의 pulse 사이의 거리를 정확히 측정할 수 있으나 video mode인 (b)와 (d)는 두 pulse 사이의 거리를 정확히 잴 수 없다. 이것은 video mode와 RF mode와의 CRT 표시방식의 차이때문으로; video mode는 radio frequency로 나오는 파동을 덩어리 형태로 정류하여 각각의 파를 RF mode처럼 직접 볼 수 없기 때문에 결함의 유무판정과 비교적 큰 결함의 크기 측정에는 적합하나, 크기가 비교적 작은 결함을 측정할 때는 RF mode를 이용하는 것이 훨씬 정확한 결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. G. J. Gruber, SwRI Nuclear Power Educational Seminar, 1978, p. 1~23
2. 日本 非破壊検査 協會, "超音波探傷試驗 A" 1976, p. 19~24
3. M. G. Silk, Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 3 (Edited by R. S. Sharpe), p. 51~100, 1977, Academic Press.