

후방산란신호에 의한 Rayleigh 파의 속도측정 및 비파괴검사

(The Measurements of Rayleigh Velocity and the Non-Destructive Evaluation by Using Backscattering Signal)

潘 千 植,* 金 長 權,* 田 啓 石*

(Cheon Sik Ban, Jang Kwon Kim and Kye Suk Jun)

要 約

본 연구에서는 Rayleigh 임계각 근처에서 발생하는 후방산란신호를 검출 함으로써 탄성매질에서 Rayleigh 파의 속도를 측정하였다.

Rayleigh 각을 측정하기 위한 회전시스템을 제작하였으며 스테인레스, 황동, 알루미늄, 구리샘플에 대해서 측정된 속도는 이론값과 좋은 일치율을 보였다.

후방산란신호에 의한 비파괴검사 방법을 제시하였으며 IC 샘플내부에 대한 c-scan 음향이미지를 나타내었다.

Abstract

In this paper, Rayleigh wave velocity has been measured by detecting the backscattered signal generating near the Rayleigh critical angle in the elastic medium.

The rotating system has been made for the measurement of Rayleigh angle. It has been shown that the measured velocity for the stainless steel, brass aluminum, copper has been good agreement with the theoretical value.

The method of non-destructive evaluation using backscattering signal has been presented and the c-scan acoustic image for internal of IC sample has been displayed.

I. 서 론

탄성표면파는 1885년 Rayleigh 경에 의해서 그 특성이 연구된 이후 전자산업분야에서 지연선, 기억소자, 필터, 변조기 등과 고도의 정밀성과 안전성이 요구되는 반도체, 우주, 항공, 원자로 등의 비파괴분야 등에서 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[1][2]}

본 연구에서는 탄성매질에서 Rayleigh 파의 속도측정과 비파괴검사에 응용하기 위하여 먼저 등방성매질에서 Rayleigh 파의 성질을 고찰하였으며 입사각의 함수로서 반사계수를 시뮬레이션하여 이론적으로 Rayleigh 파의 속도를 결정하고 실험실에서의 측정값과 비교하였다.^{[4][5][11]}

Rayleigh 파의 속도측정방법은 여러가지가 있으며 본 연구에서는 한개의 음향변환기를 사용하여 고체-액체경계면에 Rayleigh 파를 여기하였으며 물로 재방사되는 후방산란신호를 회전시스템에 의해서 검출함으로써 Rayleigh 파의 속도를 측정하였다.^{[7][8]}

*正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)
接受日字: 1988年 10月 14日

초음파를 이용한 비파괴검사는 불투명물질의 내부 결함 등을 검출하는데 널리 이용되며 결함의 위치와 종류 및 진행 등에 따라서 음향 현미경시스템, 음향 홀로그래피, acoustic emission 등의 방법이 있으나 본 연구에서는 표면 가까이 존재하는 결함을 검출하기 위하여 Rayleigh 파를 샘플표면에 여기하고 이때 발생하는 후방산란신호를 이용하여 c-scan 음향 이미지를 구성하였다.^{9,10)}

II. 액체-고체경계에서 음파의 반사계수와 그의 위상

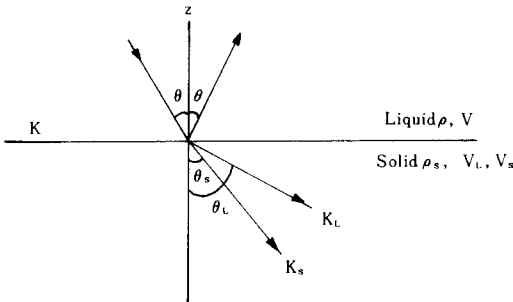


그림 1. 액체-고체경계에서 음파의 반사와 굴절
Fig. 1. The reflection and refraction of acoustic wave in the liquid-solid interface.

액체-고체경계에 입사한 음파의 포텐셜함수는 다음과 같이 표현된다.¹¹⁾

$$z > 0$$

$$\phi = \phi' e^{i\alpha z} + \phi'' e^{-i\alpha z}, \quad \alpha = (K^2 - \xi^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$z < 0$$

$$\phi = \phi_1 e^{i\alpha_1 z} + \phi_2 e^{-i\alpha_1 z}, \quad \alpha_1 = (K_L^2 - \xi^2)^{1/2}$$

$$\psi = \psi_1 e^{i\beta_1 z} + \psi_2 e^{-i\beta_1 z}, \quad \beta_1 = (K_S^2 - \xi^2)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 ϕ , K 는 액체에서 종파에 대한 포텐셜과 전파상수이고 ϕ_1 , K_L 와 ψ_1 , K_S 는 각각 고체에서 종파 및 횡파에 대한 포텐셜과 전파상수이며 ξ 는 수평방향의 전파상수를 나타낸다.

$z=0$ 에서 스트레스와 변위가 연속하다는 경계조건을 윗식에 적용하면

$$(K_S^2/2m\xi) (\phi + \phi'') + P_1(\phi_1' + \phi_2') - \beta (\psi_1' - \psi_2') = 0$$

$$\alpha_1 (\phi - \phi'') + P_1(\psi_1' + \psi_2') = 0, \quad [m = \rho_s/\rho]$$

$$\alpha (\phi - \phi'') - (K_S^2/2\xi) (\psi_1' + \psi_2') = 0 \quad (3)$$

여기서 $P = (\xi^2 - (K_S^2/2)\xi^{-1})$ 이다. $z < 0$ 에서는 $\phi = 0$, $\psi_1' = 0$ 이다.

경계조건으로부터 굴절의 법칙이 얻어지고, 임피던스의 항으로 표현하면

$$\sin \theta/V = \sin \theta_L/V_L = \sin \theta_s/V_s \quad (4)$$

$$Z = \rho V/\cos \theta, \quad Z_L = \rho_s V_L/\cos \theta_L,$$

$$Z_s = \rho_s V_s/\cos \theta_s \quad (5)$$

액체에서 반사계수와 고체에서 종파와 횡파에 대한 투과계수를 $R = \phi'/\phi''$, $T = \phi_1'/\phi''$, $T = \psi_1'/\phi''$ 라고 정의하고 θ_s 와 임피던스의 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$R = (Z_L \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s - Z) / (Z_L \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s + Z) \quad (6)$$

$$T_L = (2\rho/\rho_s) Z_L \cos 2\theta_s / (Z_L \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s + Z)$$

$$T_s = - (2\rho/\rho_s) Z_L \sin 2\theta_s / (Z_L \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s + Z) \quad (7)$$

반사계수와 투과계수가 Rayleigh 임계각에 대해서 무한대의 값을 나타내는데 이것은 입사파의 진폭이 영이됨을 의미하므로 입사파와 관계없이 표면파를 나타낼 수 있다.

그림 2 (a), (b)는 물-스테인레스, 황동과 물-알루미늄, 구리에 대한 반사계수의 크기와 그의 위상을 시뮬레이션한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 반사계수의 크기는 종파의 임계각에서 1이되며 Rayleigh 임계각에서 아주 큰 값을 가진다. 그리고 반사계수의 위상은 종파와 횡파의 임계각에서 변화가 거의 없으며 Rayleigh 각에서 180도 위상반전이 일어남을 보여주고 있다. 이러한 현상은 전반사조건 하에서도 빔이 고체로 침투하기 때문이며 위상이 상쇄되고 빔 변위가 일어난다.

III. 후방산란신호에 의한 Rayleigh 파의 속도측정

초음파빔이 Rayleigh 각으로 액체-고체경계에 입사하였을때 그림 3과 같이 null zone을 중심으로 기하학적으로 반사된 빔과 변위된 빔으로 나누어져서 물로 재방사가 일어나며 이때 후방산란이 일어남을 도식적으로 보여준다.

본 실험에서는 한개의 음향변환기를 사용하여 후방산란신호의 진폭이 최대가 되는 각을 회전시스템에 의하여 측정함으로써 $V_R = V_{LW}/\sin \theta_{CR}$ 에 의해서 Rayleigh 파의 속도를 결정하였다. 여기서 V_{LW} 은 물에서 종파속도이다.

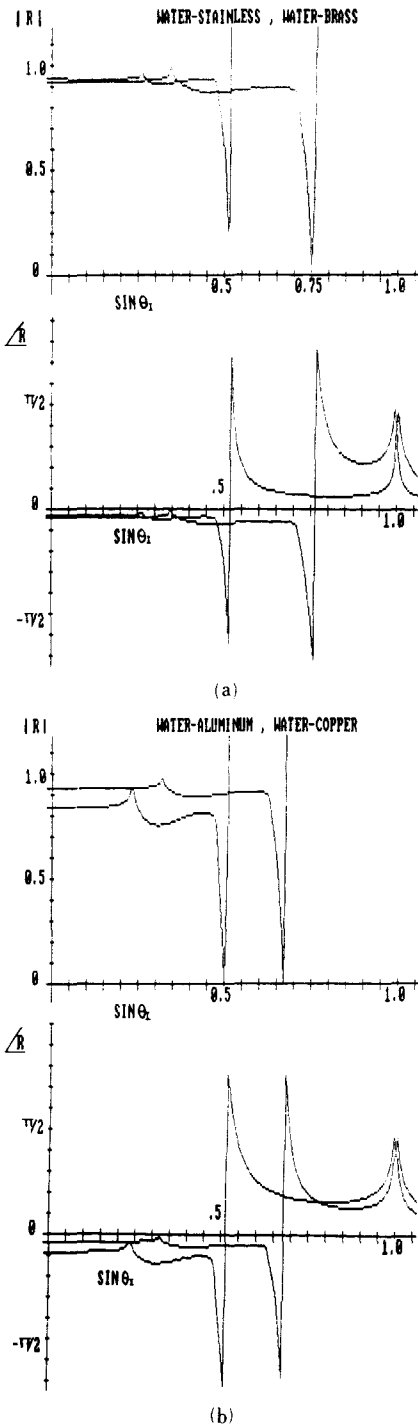


그림 2. 입사각의 변화에 대한 반사계수의 크기와 그의 위상
 Fig. 2. The magnitude and phase of reflection coefficient for the variation of incidence angle.
 (a) water-stainless, water-brass.
 (b) water-aluminum, water-copper.

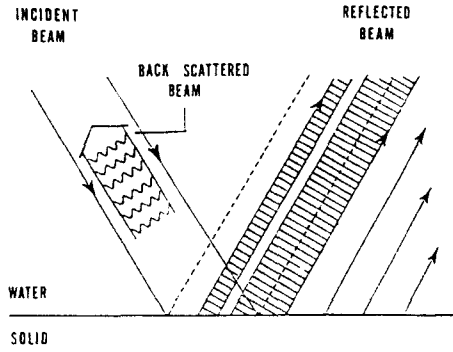


그림 3. Rayleigh 각에서 발생하는 후방산란신호를 설명하기 위한 도식
 Fig. 3. The schematic diagram to explain the backscattering signal generating in the Rayleigh angle.

Rayleigh 임계각을 측정하기 위해서 그림 4와 같이 물속에서 초음파 변환기와 샘플을 회전시키는 시스템이 장치되었다.¹²⁾

그림 4에서 보여주는 바와 같이 먼저 Wave Form Generator와 Pulse Generator에서 5μsec, 3V의 tone burst 신호를 변환기에 인가하고 스텝모터에 의해서 샘플을 회전시킨다. 샘플이 회전할때마다 샘플 표면에서 반사되는 신호가 다시 변환기로 되돌아오고 이 신호는 증폭된 다음 Oscilloscope에 나타나게 되며 반사된 신호의 진폭을 적당하도록 Manual Attenuator로 조정한다.

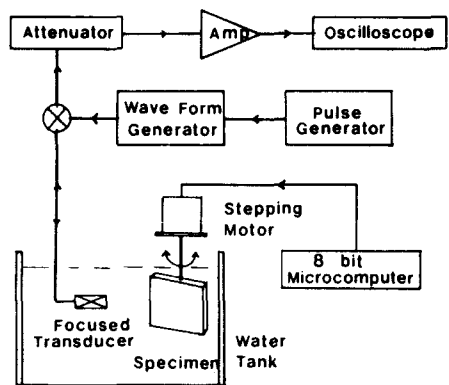


그림 4. Rayleigh 각을 측정하기 위한 블럭 다이어그램
 Fig. 4. Block diagram for the measurement of Rayleigh angle.

Rayleigh 파의 각도측정방법은 먼저 샘플표면과 음향변환기가 수직이 되었을때 반사신호의 진폭이 최대가 되므로 그 때의 각을 0도로 정하고 1스텝회전할때 마다 반사되는 진폭을 oscilloscope을 통하여 기록하였을때 어떤 각도에 대해서 후방산란신호의 진폭이 최대가 되는 각도가 바로 Rayleigh 각을 나타낸다. 실험에서 사용된 회전시스템의 각도분해능 0.72도/step이며 각도와 회전방향은 8-bit PC에 의해 제어하였다.

사용된 음향변환기는 중심주파수 5MHz, 쏘점거리 6.2cm, 직경 13mm인 curvature type이었다.

실험에 사용된 샘플은 가로×세로×두께가 각각 10×10×1cm인 스테인레스, 황동, 알루미늄, 구리이며 샘플표면에서의 불규칙적인 산란을 방지하기 위하여 표면을 polishing 하였다.

그림 5는 초음파빔이 입사각의 변화에 대한 후방산란신호의 진폭을 Oscilloscope로 측정한 값을 보여주고 있다.

알루미늄, 구리에 대해서 후방산란신호의 진폭이 최대가 되는 각도는 각각 30.24와 41.76도에 해당하며 스테인레스, 황동은 각각 30.96와 48.96도이다. 이러한 각도는 물질에 대한 Rayleigh 각이다. 그림에서 각 점은 0.72도에 해당되므로 점의 갯수가 각도를 나타낸다.

측정된 Rayleigh 임계각으로 부터 Rayleigh 파의 속도는 앞식에 의해서 계산되며 표 1에서 이론치와 비교하였다.

본 실험에서 사용한 방법으로 Rayleigh 파의 속도를 측정된 결과 약 1% 오차를 갖는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 후방산란신호를 이용한 비파괴검사

표면에서 한 파장 길이 이내에 한정되어 에너지가

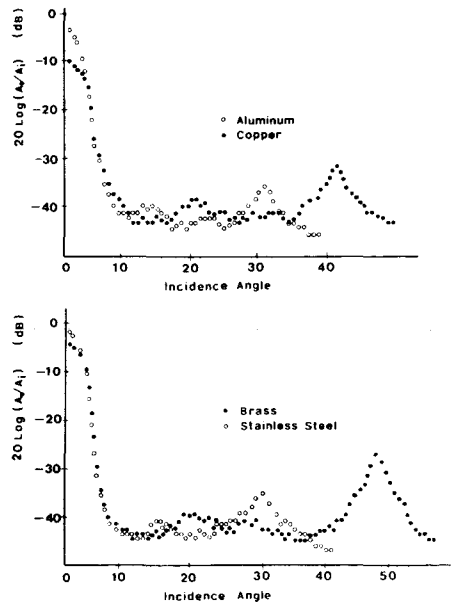


그림 5. 후방산란신호에 의한 Rayleigh 각의 측정
Fig. 5. The measurement of Rayleigh angle by backscattering signal.

전파되는 Rayleigh 파는 표면가까이에 존재하는 결함 등에 대해서 강하게 산란하는 성질을 갖는다.

그림 6 과 같이 샘플표면에 Rayleigh 파를 여기하였을때 발생하는 후방산란신호를 한개의 음향변환기에 의해서 검출하여 비파괴검사에 응용하였으며 IC샘플에 대하여 c-scan 음향이미지를 구성하였다.^{[9],[10]}

먼저 3V, 5μsec의 torn burst 신호를 음향변환기에 인가한 후 Oscilloscope를 보면서 후방산란신호가 되는 각에서 변환기를 고정시킨다.

X-Y scanner로 scan했을때 샘플에서 반사되는 후방산란신호만을 게이트하고 증폭한 후에 선형검파한

표 1. 측정된 Rayleigh 임계각으로 부터 계산된 속도와 이론값과의 비교

Table 1. The comparison of calculated velocity from the measured Rayleigh critical angle and theretical value.

Material	Measured Longitudinal and Rayleigh Wave Critical Angle θ_{CR}	Experimental Value V_R (m/sec)	Theoretical Value			
			ρ (g/cm ³)	V_L	V_s	V_R
Stainless Steel	30.96	2915	7.8	5740	3126	2891
Brass	48.96	1989	8.6	4350	2102	1965
Aluminum	30.24	2978	2.7	6455	3125	2906
Copper	41.76	2252	8.8	4700	2371	2250

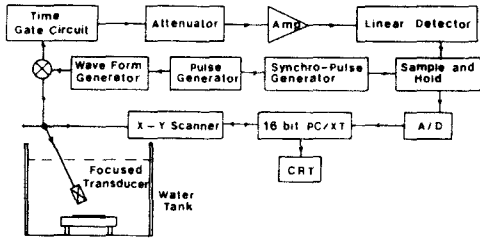


그림 6. 음향이미지를 구성하기 위한 블럭 다이어그램

Fig. 6. Block diagram for the construction of acoustic image.

다. 사용된 샘플에 대해서 256×256 으로 sampling 하였으며 A/D변환한 데이터를 메모리에 저장하고 CRT에 이미지를 구성하였다.

실험에서 사용된 샘플은 IC를 선택하였으며 Rayleigh 파의 한파장이내가 되도록 IC 패키지를 배선에서 약 0.3mm 두께로 갈아낸 다음 표면을 매끄럽게 polishing 하였다.

그림 7은 IC 샘플에 대한 후방산란신호를 c-scan하여 얻은 음향이미지이다.



그림 7. 후방산란신호를 이용한 음향이미지의 구성
Fig. 7. The construction of acoustic image using of backscattering signal.

그림 7은 IC 샘플을 c-scan한 데이터를 16bit PC/XT에 저장하고 이것을 2 gray level로 이미지 처리한 것인데 비교적 좋은 음향이미지를 구성할 수 있음을 보여주고 있다.

종래의 curvature type 음향변환기를 샘플에 대해서 수직하게 입사한 경우의 이미지는 초점거리가 긴 것일수록 더 깊은 영역에 존재하는 결함을 검출하는

데 유용한 반면 표면가까이에 있는 결함검출에는 부적합하다.

후방산란신호를 이용한 기술은 샘플표면에 Rayleigh 파를 여기함으로써 표면가까이에 존재하는 결함에 대해서 강하게 산란하는 성질을 이용함으로써 상당히 좋은 이미지를 제공해 준다.

V. 결 론

본 연구에서는 후방산란신호를 이용하여 탄성매질에 대한 Rayleigh 파의 속도측정 방법을 제시하였고 이것을 비파괴검사에 응용하였다.

Rayleigh 파의 속도측정을 위한 회전시스템을 제작하였으며 알루미늄, 구리, 황동, 스테인레스 등에 대해서 측정된 Rayleigh 파의 속도는 이론값과 비교하였을때 약 1%의 오차를 갖는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

후방산란신호에 의한 음향이미지 시스템을 구성하였고 IC 샘플에 적용하여 그 내부부를 c-scan 음향이미지로 나타내었다.

Rayleigh 파는 표면가까이에 존재하는 결함에 대해서 강한산란을 일으키므로 후방산란신호를 이용한 비파괴검사는 contrast가 분명한 음향이미지를 얻을 수 있다.

Rayleigh 각의 측정은 회전시스템의 각도분해기능을 향상시키면 더욱 정확한 Rayleigh 파의 속도를 측정할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

- [1] I.A. Victorove, "Rayleigh and lame wave," Plenum Press, 1967.
- [2] G.S. Kino, "Acoustic wave: device, imaging, analog signal processing," Prentice-Hall Signal Processing Series Alan V. Oppenheim, Series Editor, 1987.
- [3] T. Nomura, T. Yasuda, S. Shiokawa, T. Moriizumi "Precise measurement of SAW velocity with an interdigital transducer," Ultrasonics Symposium pp. 225-228, 1986.
- [4] M.A. Breazela, L. Adler, G.W. Scott, "Interaction of ultrasonic waves incident at the Rayleigh angle onto a liquid-solid interface," J. Appl. Phy. vol. 48, no. 2, pp. 530-537, Feb. 1977.
- [5] A. Adler, "Acoustic reflection microscope," Ph. D. Stanford Univ. pp. 21-55, May 1978.
- [6] R.L. Richardson, "A new technique for measuring metal surface properties at the critical angle," Ultraonic Symposium, pp.

895-898, 1983.

[7] M. De Billy, A. Csakany, L. Adler, G. Quentin, "Excitation of backward ultrasonic leaky rayleigh and leaky lamp wave," Ultrasonic Symposium.

[8] L. Adler, K. Bolland, "The review of progress in quantitative NDE," pp. 883-895, 1984.

[9] B. Nongaillard, M. Ourak, J.M. Rouvaen, M. Houze, E. Bridoux, "A new focusing method for nondestructive evaluation by surface acoustic wave," *J. Appl. Phys.* 55(1), 1 pp. 75-79, January 1984.

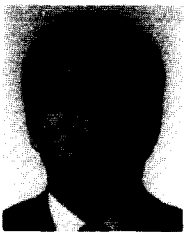
[10] J.A. Fahr, S. Johar, M.K. Murthy, "Surface acoustic wave studies of surface cracks in ceramics," *The Review of Quantitative NDE*, pp. 239-248, 1984.

[11] L.M. Brekhovskikh, "Waves in layered media," 2nd Ed, Academic Press pp. 1-117, 1980.

[12] 반천식, 김장권, 전계석, "후방산란신호에 의한 rayleigh파의 속도측정 및 비파괴 검사," 전기, 전자공학 학술대회, 1988. 7. 1.

[13] L.E. Pitts, T.J. Plona, W.G. Mayer, "Theoretical similarities of rayleigh and lamb modes of vibration," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 60, no. 2, Aug. 1976. *

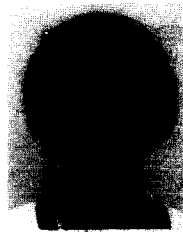
著 者 紹 介



田 啓 石(正會員)

1946年 9月 30日生. 1969年 연세대학교 전기공학과 공학사학위 취득. 1973年 연세대학교 대학원 공학석사학위 취득. 1983年 연세대학교 대학원 공학박사학위 취득. 1984年 1月~1985年 1月 미국 스탠포드 대학교 W. W. HAN SEN LAB. 현재 경희대학교 전자공학과 교수. 주관심분야는 초음파 영상 처리 및 비파괴검사 등임.

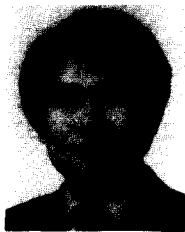
현재 경희대학교 전자공학과 교수. 주관심분야는 초음파 영상 처리 및 비파괴검사 등임.



潘 千 植(正會員)

1964年 3月 15日生. 1986年 경희대학교 물리학과 이학사학위 취득. 1988年 8月 경희대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 현재 석사 장교 근무중. 주관심분야는 초음파 영상 이미지 및 비파괴검사 등임.

괴검사 등임.



金 長 權(正會員)

1949年 12月 16日生. 1977年 광운대학 무선통신공학과 공학사학위 취득. 1980年 연세대학교 산업대학원 전자전공 공학석사학위 취득. 1987年 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 현재 경희대학교 전자공학과 강사. 주관심분야는 초음파 변환기 및 비파괴검사 등임.

현재 경희대학교 전자공학과 강사. 주관심분야는 초음파 변환기 및 비파괴검사 등임.