

초음파현미경 시스템에 의한 B-스캔 영상처리 기술

(B-Scan Image Processing Technique by Using Ultrasonic Microscope System)

高 大 植* 田 啓 石**

(Dae Sik Ko and Kye Suk Jun)

要 約

본 연구에서는 small aperture형 렌즈를 이용하고 각도제어기가 추가된 초음파현미경 시스템을 구성하여 새로운 형태의 B-스캔 영상처리 기법을 연구분석 하였다.

Small aperture형 렌즈를 사용할 경우 한파장 이상의 깊은 곳에 대한 탐상이 가능하고 이때 고체내부에서의 분해능은 샘플의 벌크파의 한파장 정도이었으며 각도제어기를 이용하면 탄성표면파와 횡파등을 임의로 여기시킬 수 있었다. 고체의 내부에 존재하는 결함에 대한 B-스캔 영상을 얻기 위하여 횡파를 여기시키고 사각입사된 초음파가 결함으로부터 후방산란되는 것을 영상처리 하였다. 실험결과 여러가지 형태의 결함에 대한 B-스캔 영상을 얻을 수 있었으며 이 영상을 통하여 측정된 결함의 크기는 10% 오차범위내에서 잘 일치하였다.

Abstract

In this paper, ultrasonic microscope system has been constructed with the small aperture acoustic lens and the angle controller, and the new type of B-scanultrasonic imaging has been analyzed.

The system with small aperture lens was used to detect flaw existing within the thick specimen and its resolution was in the range of one wavelength at interior plane of sample. The angle controller was used to excited surface acoustic wave or shear wave.

In order to obtain B-scan image of the flaw existing at interior of solids, shear wave has been excited and backscattering signals from the flaw have been processed. In experimental results, B-scan ultrasonic images have been obtain from the flaws of variable shape and measured flaw size from the images has been in good agreement with practical size in the range of 10% error.

I. 서 론

1970년대 Quate에 의하여 개발된 초음파현미경

(ultrasonic microscope) 시스템은 분해능의 향상과 응용분야의 확대를 위한 연구가 계속되고 있다.^[1]

*正會員, 牧園大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Mokwon Univ.)

**正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

接受日字: 1990年 10月 3日

초음파현미경은 광학적으로 불투명한 고체의 표면이나 내부의 결함을 탐상할 수 있기 때문에 비파괴 검사 분야에서는 광학현미경이나 전자현미경과 상호 보완적인 유용한 시스템이다. 고체물질의 표면에 발생한 crack이나 내부에 존재하는 결함의 3차원적인

정보(crack의 깊이)를 측정하는 기술은 비파괴검사 분야에 있어서 매우 중요한 기술이다. 기존의 초음파 현미경은 C-스캔영상처리를 통하여 고체의 표면과 내부를 탐상할 수 있는 유용한 비파괴검사 장비이지만 실제적인 crack의 형태는 대부분 폭이 없고 깊이만 커다란 즉 line-crack이기 때문에 3차원적 정보인 crack의 깊이를 측정하는 기술이 요구되었다. 일반적으로 small aperture형 시스템은 두꺼운 재료나 다층 구조물 등의 탐상에는 적합하지만 이것은 탄성표면파나 횡파를 여기서시키는 데는 어려운 단점이 있었다.^{1,3,8}

만약 small aperture형 초음파현미경으로서 탄성표면파나 횡파를 여기서시킬 수 있고 이것에 의한 B-스캔 영상처리와 기존의 C-스캔 영상처리를 병행한다면 crack의 깊이를 비롯한 결함의 3차원적 정보를 탐상할 수 있을 것이다.

그러므로 본 연구에서는 기존의 초음파현미경 시스템에서는 불가능하였던 B-스캔 영상처리 방법을 연구분석하였다. 횡파의 여기방법과 분해능을 고찰하고 결함의 edge로부터의 후방산란과 2차원 스캔방법을 이용한 B-스캔 영상처리 방법을 연구하였으며 이 영상으로부터 결함의 크기를 측정하는 방법을 제시하였다. 실험을 위하여 알루미늄 판에 half-penny 형을 비롯한 여러가지 형태의 결함을 제작하였으며 본 연구에서 제안된 영상처리 기법에 의하여 얻어진 B-스캔 영상을 비교 분석하였다.

II. 초음파현미경에 의한 B-스캔 영상처리 기술

1. 횡파의 여기와 특성

고체의 표면이나 내부에 대한 고분해능의 C-스캔 영상은 기존의 초음파현미경으로 가능하고 3차원적인 정보의 크기만을 측정할 때는 주파수 스펙트럼분석을 이용할 수도 있지만 결함에 대한 3차원적인 정보의 형태(shape) 즉 B-스캔 영상을 얻을수는 없었다. 본 연구에서는 횡파를 여기서시키고 결함으로부터 발생하는 후방산란신호를 이용하여 결함의 3차원 정보에 대한 형태를 영상처리할 수 있는 새로운 형태의 영상처리 기법을 제시하고자 한다. 탄성표면파나 횡파(shear wave)등을 여기서시키는 가장 일반적인 방법은 wedge를 이용하는 것이지만 이 방법의 경우 샘플의 종류에 따라 wedge형태를 다르게 제작하여야 하는 번거로움이 있었다. 그러나 수정된 초음파현미경 시스템은 초음파의 송수신 각도를 임의로 조절할 수 있기 때문에 샘플의 종류에 따라 적절한 입사각도를 유지시켜 표면파나 횡파등을 여기서시킬 수 있으

며 고체내부에 존재하는 결함의 3차원적 정보에 대한 영상처리를 위하여 횡파가 적절히 이용될 수 있다. 고체의 내부에서 횡파의 유용성을 좀 더 고찰하기 위하여 초음파 빔이 고체샘플에 입사될 때 입사각도의 변화에 따른 반사계수와 투과계수를 구해보면 식(1), (2), (3)과 같다.¹²

$$R_L = \frac{z_L \cos^2 2\theta_s + z_t \sin^2 2\theta_s - z}{z_L \cos^2 2\theta_s + z_t \sin^2 2\theta_s + z} \quad (1)$$

$$T_L = \frac{\rho_2}{\rho_3} \frac{2 z_L \cos 2\theta_s}{z_L \cos^2 2\theta_s + z_t \sin^2 2\theta_s + z} \quad (2)$$

$$T_s = -\frac{\rho_2}{\rho_3} \frac{2 z_L \sin 2\theta_s}{z_L \cos^2 2\theta_s + z_t \sin^2 2\theta_s + z} \quad (3)$$

윗식에서

$$z = (\rho_2 c_2 / \cos \phi), z_L = (\rho_3 c_{3L} / \cos \theta_L), z_t = (\rho_3 c_{3S} / \cos \theta_s) \quad (4)$$

그리고 snell의 법칙에 의하여

$$(c_2 / \sin \phi) = (c_{3L} / \sin \theta_L) = (c_{3S} / \sin \theta_s) \quad (5)$$

여기서 c_{3L}, c_{3S} 는 매질의 종파, 횡파속도이고 ϕ 는 입사각도이며 θ_L, θ_s 는 종파 및 횡파 임계각도이다. 그림 1은 결함용액이 물이고 샘플이 알루미늄인 경우, 입사각도의 변화에 따른 종파, 횡파의 반사계수와 투과계수를 시뮬레이션한 것이다.

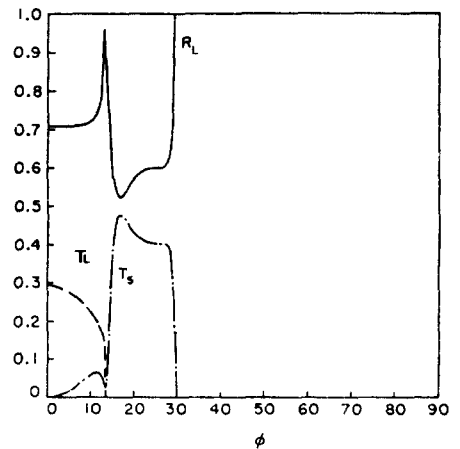


그림 1. 입사각도의 변화에 따른 반사 및 투과계수
Fig. 1. Reflection and transmission coefficients by variation of incident angle.

그림 1에서 결함용액이 물이고 샘플이 알루미늄이라면 반사는 60% 이상이 종파에 의한 것이며 15도 미

만의 작은 각도에서 종파의 투과는 30% 정도 뿐이다. 그리고 종파 임계각도인 13.5도 이상에서는 투과가 전혀 발생하지 않는 반면에 17도에서 25도 정도의 범위에서는 횡파에 의한 투과가 50% 이상 발생하는 것을 볼 수 있으며 이러한 결과는 알루미늄에 17도로 초음파를 입사시킨다면 알루미늄의 내부에 횡파를 여기시킬 수 있으며 횡파는 종파에 비하여 고체 내부의 신호처리에 적합하다는 것을 알 수 있다. 아울러 초음파 영상의 분해능은 파장에 의하여 좌우되므로 동일한 동작주파수일 경우 횡파를 이용하면 분해능도 개선시킬 수 있을 것이다. 왜냐하면 횡파의 파장은 대부분의 샘플에서 종파의 1/2배 정도이므로 횡파를 사용할 경우 분해능이 종파에 비하여 거의 두배정도 개선될 수 있음을 알 수 있다.

2. 횡파를 이용한 B-스캔 영상처리 기법

만약 샘플의 이면이나 내부에 결함이 존재할 때 샘플재료의 횡파임계각도로 초음파를 입사시킨다면 횡파가 여기되어 전파되고 결함으로부터 후방산란하게 된다. 그림 2(a)는 고체내부에 횡파를 여기시키기 위한 초음파 입사방법을 도식한 것이며 2(b)는 영상으로부터 결함의 깊이를 결정하기 위하여 제시된 기하학적 모델이다.¹⁸⁾

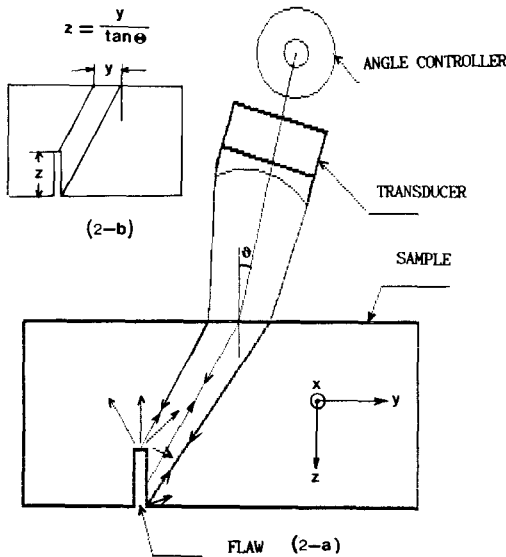


그림 2. 결함으로부터의 횡파의 반사와 결함의 크기 결정

Fig. 2. Reflection of shear wave from the flaw and determination of flaw size.

표면결합의 구조는 일반적으로 표면과 수직하게 발생하며 그림 2에서 대부분의 결합 형태는 x, y방향의 크기가 한파장 이상이고 y방향은 한파장 이하인 경우이므로 wedge 변환기나 원판형 변환기와 같이 빔폭이 커다란 초음파를 이용한다면 z축, 즉 깊이에 대한 3차원적인 정보는 반사신호의 진폭을 이용하여 측정할 수 있을 것이다. 이것은 결합의 깊이가 입사 초음파의 빔폭에 비하여 매우 작은 경우에 한한 것으로 결합의 깊이가 작다면 빔의 작은 부분만이 반사에 작용하게 되므로 재생된 영상에서 매우 약하게 나타날 것이며 깊은 부분은 밝은 영상으로 나타날 것이다. 물론 빔이 결합과 교차되지 않는다면 입사 각도에 따라 정상적으로 반사를 일으킬 것이며 이 신호는 전파경로를 고려할 때 수신되지 않을 것이다. 그러나 이러한 방법은 샘플에 따라 항상 반사신호의 기준을 설정해야 하는 과정이 요구되며 오차가 매우 큰 제한이 있다.^{14,6)}

한편 focussing된 횡파 빔이 결합에 입사되었을 때는 강하게 산란을 일으켜 후방산란신호를 검출할 수 있을 것이고 그 이외의 부분에서는 정상적인 반사각도로 반사되어 후방의 focussed형 초음파변환기에서는 거의 수신할 수 없을 것이다.

이와같은 방법으로 x-y평면에 대한 스캔을 행하면 x-z평면에 대한 영상데이터를 얻을 수 있으며 이 데이터를 디지털 영상처리하면 결함의 형태가 현저히 구별되는 B-스캔 영상을 얻을 수 있다. 이러한 원리에 의하여 기존의 법선입사형 반사모드나 pitch-catch형 반사모드와는 전혀 다른 형태의 반사모드 동작이 가능한 것이다. 아울러 그림 2(b)와 같은 기하학적 원리를 이용하면 영상을 통하여 결함의 3차원적 정보에 대한 크기를 결정할 수 있을 것이다.

II. 실험 및 고찰

1. 시스템의 구성과 동작원리

Small aperture형 음향렌즈가 부착되어 있고 송수신 각도를 임의로 조절할 수 있는 각도제어기가 추가로 구성된 초음파현미경 시스템의 기본 구성은 그림 3과 같다.

그림 3에서 초음파변환기에 입사된 전기적인 신호는 초음파변환기를 통하여 초음파로 변환되고 음향렌즈와 결합용액 사이의 커다란 속도 차이에 의하여 매우 예리하게 집중된다. 집중된 초음파 비임은 음향임피던스 차이가 발생하는 불연속면에서 강한 반사를 일으키며 초음파변환기로 되돌아온 반사신호는

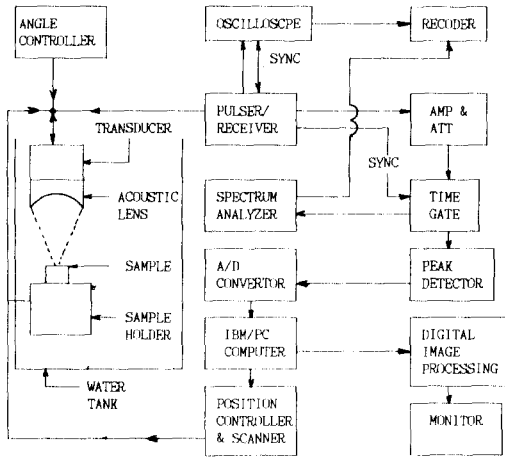
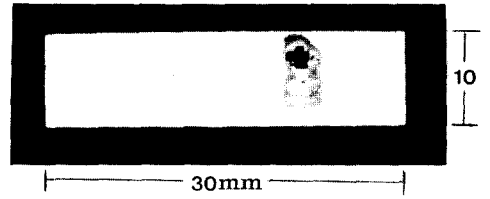


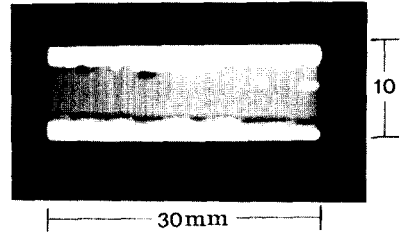
그림 3. 초음파현미경 시스템의 블럭선도
 Fig. 3. Block diagram of the ultrasonic microscope system.

전기적인 신호로 변환된 후 디지털 영상처리를 위하여 A/D 변환된다. 이때 주의할 것은 결함의 크기에 따라 후방산란신호의 지연시간이 서로 다르므로 time-gating을 넓은 범위에 걸쳐 수행하여야 하며 샘플링 펄스의 지연시간이 고정된 점을 고려한다면 포락선 검파가 아닌 peak-detector를 사용해야 하는 것이다. 2차원적 영상은 기계적인 C-스캔 방식에 의해 구성되고 스캔 면적은 X-Y 스캐너가 컴퓨터로 제어되므로 샘플에 따라 쉽게 조정될 수 있으며 각 지점마다 발생하는 반사신호의 미소한 변화는 모니터에서 명도(brightness)나 의사칼라로 대응되어 현저한 콘트라스트를 나타낸다.⁵⁾ 초음파변환기를 샘플에 더욱 근접시키면 초음파의 초점은 샘플 내부에 형성되며(defocused mode 동작) 만약, 내부에 형성된 초점 평면에 결함이 존재한다면 다른 다중 반사신호보다 강한 반사신호를 일으키므로 이를 영상처리하여 타 도구에서는 얻기 어려운 고체내부의 영상을 얻을 수 있는 것이다.

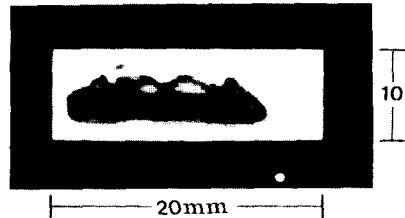
각도제어기(angle controller)는 초음파의 송수신 각도를 정확하게 제어하기 위하여 필요하며 이것은 스펙트럼 분석과 3차원적인 정보에 대한 영상처리에 요긴하게 사용된다. 본 연구에서는 이와같은 각도제어기를 철과 아크릴 등의 재료를 사용하여 정밀하게 제작하였으며 특히 pitch-catch모드 동작시킬 경우를 위하여 두개를 동일하게 제작하여 대칭적으로 설치하였다.



(a) 구형 결함



(b) line-crack형 결함



(c) half-penny형 결함



(d) line-crack형 결함(결함이 x축에 대하여 5도 정도 기울 경우)

그림 4. 여러가지 형태의 결함에 대한 B-스캔 영상
 Fig. 4. B-scan image for flaws of variable type.

2. 실험결과 고찰

그림 4는 각도제어기에 의하여 횡파를 여기시키고 C-스캔시키면서 여러가지 형태의 결함으로부터 수신된 후방산란신호를 영상처리한 B-스캔 영상이다. 그림 4(a)는 깊이가 8mm이고 깊이가 3.5mm인 구형 결함을 알루미늄 판의 이면에 제작하고 x-y평면에 대하여 30mm×10mm 면적을 스캔하였을 때 얻어진 영상이고 4(b)는 line-crack형 결함, 4(c)는 half-penny형 결함으로부터 얻어진 B-스캔 영상이며 결함의 실

표 1. B-스캔 영상으로부터 산출된 결함의 크기와 오차

Table 1. Flaw size evaluated from B-scan image and measured error.

결함의 크기(mm)	결함의 크기(mm)		측정값(mm)		오차(%)	
	형 태	길이	깊이	길이	깊이	깊이
rectangular	3.6	8.0	3.4	7.6	5.56	6.0
half-penny	16.7	2.5	15.2	3.2	10.0	26.3
line-crack	80.0	6.0	-	5.7	-	5.0

재 크기는 표 1에 제시하였다.

그림 4의 실험 결과에서 여러가지 결함에 대하여 형태가 현저하게 구별되는 B-스캔영상이 얻어진 것을 볼수 있다. 구형결함의 경우 작은 길이로 깊게 흡을 제작할 때 발생한 결함 형태의 변화가 현저하게 나타났으며 모든 형태의 결함에서 나타난 결과중 하나는 결함의 edge에서도 커다란 반사신호가 수신되어 결함의 완전한 테두리를 형성하고 있다는 점이다. 특히 4(d)의 경우는 4(b)에서 사용한 결함을 x축에 대하여 5도 정도 기울게 위치시키고 동일한 방법으로 영상처리한 결과로써 법선입사된 경우에 비하여 결함의 형태가 다소 왜곡되었지만 기울어진 영상을 쉽게 관찰할 수 있다. 표 1은 그림 4의 영상으로부터 구한 결함의 크기와 오차를 보여준다.

IV. 결 론

본 연구에서는 small aperture형 렌즈와 각도제어기를 이용한 초음파현미경 시스템을 구성하고 새로운 형태의 B-스캔을 이용한 3차원적 정보의 검출방법을 연구분석 하였다.

초음파현미경의 특성을 연구분석한 결과, small aperture형 시스템은 샘플의 표면뿐만 아니라 한파장 이상의 깊은 곳에 대한 탐상이 가능하고 이때 고체내부에서의 분해능은 샘플의 벌크파장과 음향렌즈의 형태에 좌우되었다. 각도제어기를 이용하여 고체내부에 횡파를 여기시킬 수 있고 이를 x-y평면에 대하여 스캔하면서 x-z평면에 대한 영상을 처리하는

새로운 형태의 B-스캔 방법을 실험한 결과, 3차원적 정보에 대한 초음파 영상을 얻을 수 있었으며 이 영상을 통하여 측정된 결함의 크기는 10% 오차범위내에서 잘 일치하였다.

이와같이 수정된 초음파현미경 시스템은 large aperture형 시스템에 비하여 두꺼운 샘플이나 다층 구조물등의 탐상에 이용할 수 있는 장점이 있으며 특히 본 연구에서 제시된 3차원적 정보에 대한 영상 처리 기법은 기존의 시스템으로서는 불가능하였던 것으로 앞으로 여러 산업분야의 유용한 비파괴 검사 기술이 될 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] 고대식, 문건, 전계석, 황금찬, "저주파대 음향현미경의 구성과 그 응용에 관한 연구," 대한 전자공학회 논문집, 제25권 5호, 1988. 5
- [2] G.S. Kino, "Acoustic waves: Devices, Imaging, & Analog signal processing," Prentice Hall Inc. 1987.
- [3] 고대식, 전계석, "초음파현미경을 이용한 다층구조물의 해석" 한국음향학회 논문집, 9권 2호, 1990. 6
- [4] D.A. Mendelsohn, "Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack," wave motion 2, pp. 277-292, 1980.
- [5] Frank Pino, "Digital image processing for scanning acoustic microscopy," IEEE sonic & ultra. vol. SU-31, no. 4, 1984. 7
- [6] B.T. Khuri-Yakub, "Characterization of edge cracks using near-field acoustic displacement amplitude," Ultrasonic symposium, pp. 945-947, 1983.
- [7] V.B. Jipson, "Acoustic microscopy at optical wavelengths," Dissertation of Ph. D, stanford Univ. 1979.
- [8] 전계석, "초음파현미경의 구성과 그 응용에 관한 연구" 한국과학재단 목적기초 연구 제1, 2차 중간보고서, 1988. 10, 1989. 10

著 者 紹 介

高 大 植 (正會員) 第25卷 第5號 參照
현재 목원대학교 전자
공학과 교수

田 啓 石 (正會員) 第25卷 第5號 參照
현재 경희대학교 전자공학과
교수