

## 대구경 탐촉자를 이용한 초음파 현미경 시스템 연구

### A Study of the Acoustic Microscope System by Large Aperture Probe

조용상\*<sup>†</sup>, 김재훈\*\*

Yong Sang Cho\*<sup>†</sup> and Jae Hoon Kim\*\*

**초 록** 재료에 존재하는 미세균열을 검출하기 위한 일반적인 초음파 탐상법은 고주파수 집속형 수직 초음파 탐촉자를 이용한 펄스-에코법을 사용하거나 표면파를 발생시키는 사각 탐상법을 사용한다. 이러한 방법들은 압연 롤, 세라믹 롤 등 대형 구조물의 표면에 존재하는 미소 크랙의 존재 여부 및 위치 측정을 위한 자동화 초음파 탐상장치를 구성하기에는 다량의 검사 데이터, 결합 위치정보의 불확실성 등 현실적으로 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 고정밀도 초음파 현미경(scanning acoustic microscope)에 비교적 저주파수의 대구경 초음파 탐촉자를 사용하여 미세 균열의 존재 여부 및 위치 등의 검사결과를 실시간 A, B, C-Scan으로 표시할 수 있으며, 기존의 방법보다 검사 속도 및 시간을 10배 이상으로 향상된 자동화 초음파 탐상법 및 초음파 현미경법의 실용성을 검증하였다.

**주요용어:** 초음파 검사, 대구경 탐촉자, 초음파 현미경, C-Scan

**Abstract** Traditional ultrasonic evaluation to detect micro/small surface cracks is the pulse-echo technique using the normal immersion transducer with high frequency, or the angle beam transducer with surface wave. It is difficult to make the automatic ultrasonic system that is to detect micro and small surface crack and position on the large structure like steel and ceramic rolls, because of the huge data of inspection and the ambiguous position data of transducer. The aim of this study using the high precision scanning acoustic microscope with 10MHz large aperture transducer was to display the real time A, B, C-scan for the automatic ultrasonic system in order to detect the existence and position of surface crack. The ultrasonic method with large aperture transducer was improved the scanning time and speed over 10 times faster than traditional methods.

**Keywords:** ultrasonic testing, large aperture probe, scanning acoustic microscope, C-scan

#### 1. 서 론

현재 산업 구조물중의 하나인 압연롤, 세라믹롤 등은 가동중에 따른 피로균열이 발생하고 이에 따른 생산 제품의 품질저하 방지를 위해 주기적인 검사 및 보수가 이루어지고 있다. 이때 표면에 존재하는 미세균열을 검출하기 위해 일반적으로 사용하는 방

법은 펄스-에코법의 표면파를 이용한 방법과 고주파수의 집속형 탐촉자를 사용하는 방법이 일반적이다. 표면파를 사용하는 경우 결합의 위치를 쉽게 알 수 있는 C-Scan 표시가 어려우며, 고주파수의 집속형 수직 탐촉자를 사용하는 경우 미세 균열검출을 위해서는 매우 느린 검사 속도 및 구조물의 크기가 큰 경우 검사 데이터의 증가로 현실적으로 C-Scan 표시

가 불가능한 단점을 갖고 있다. 대구경 초음파 탐촉자를 사용한 defocusing 방법은 최근 세라믹 코팅층의 진전성 및 금속재료의 경년열화 등의 재료 물성 평가 및 표면에 존재하는 크랙의 깊이 측정을 위해 효과적으로 사용되어 왔다[1-4].

대구경 초음파 탐촉자를 사용하여 표면에 존재하는 미세 균열 검출을 위한 실시간 A, B, C-Scan 표시가 가능하고 결함의 위치 및 검사 속도를 펄스에코법에 비해 10배 이상 향상된 검사 방법을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 압전 세라믹(PZT)과 PVDF를 이용한 대구경 초음파 탐촉자를 제작하여 각각의 특성 분석을 통한 미세 균열 검출에 적합한 탐촉자를 선정하고, 고정밀도 초음파 현미경(Scanning Acoustic Microscope, SAM)에 선택된 탐촉자를 사용하여 검출감도 및 검사속도 향상을 검증함으로써 산업 현장에 적용 가능성을 확보하고자 한다.

2. 측정원리

대구경 초음파 탐촉자는 일반적으로 사용되는 초음파 탐촉자와 달리 Fig. 1과 같은 형태로 제작되며 Defocusing 법을 사용할 경우 초음파는 Fig. 1과 같이 전파한다.

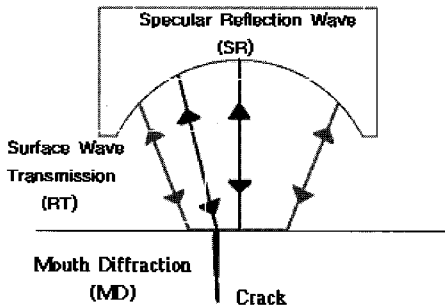


Fig. 1 Ray diagram of large aperture transducer

검사체 표면에서 탐촉자 중앙으로 수신되는 Specular Reflection wave(SR)의 전파시간,  $t_{SR}$  은 식 (1)과 같이 구해진다.

$$t_{SR} = \frac{2}{V_0}(q+z) \tag{1}$$

여기서  $V_0$  는 물에서의 음속,  $q$ 는 초점거리,  $z$ 은 defocusing된 거리로 통상 음수이다.

Crack mouth diffraction(MD)는 균열 위부분에서 회절된 신호가 탐촉자에 검출되며 나타나며, SR 신호보다 먼저 도달하게 된다. 탐촉자의 이동에 따라 RF B-Scan시 포물선형태로 나타나며, 전파시간  $t_{MD}$  는 식 (2)와 같다.

$$t_{MD} = \frac{2}{V_0}[q-(y^2+z^2)^{\frac{1}{2}}] \tag{2}$$

여기서  $y$ 는 탐촉자의 중심에서 균열 표면까지의 거리이다.

Surface wave transmission(RT)의 전파시간  $t_{RT}$  는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} t_{RT} &= \frac{2}{V_0}(q + \frac{z}{\cos\theta}) - \frac{2}{V_R}z\tan\theta \\ &= \frac{2}{V_0}(q + z\cos\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서  $\theta$ 는 제 2 임계각이며,  $V_R$ 은 Rayleigh wave의 음속이다.

Fig. 2는 RF B-Scan 상에 나타나는 SR, RT, MD의 궤적을 표시한다.

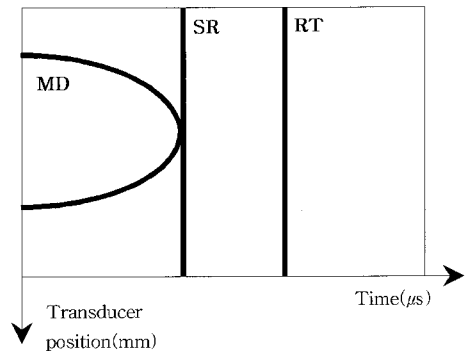


Fig. 2 Schematic image of MD, SR and RT

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치의 구성

실험장치는 Fig. 3과 같이 고정밀도 초음파현미경(scanning acoustic microscope, SAM)을 제작하여 사용하였고, 초음파 탐촉자는 최소  $1\mu m$ 로 미세 이동이 가능하다.

컴퓨터를 이용한 SAM은 초음파 펄서/리시버, 고속 A/D Converter, Motion Controller가 컴퓨터 내부에 포함되고 초음파 탐촉자를 이송 시키는 기계 장치인 Scanner 및 전기적 노이즈가 적게 설계된

Linear/Stepping Motor, Motor Driver 등이 외부장치로 구성된다.

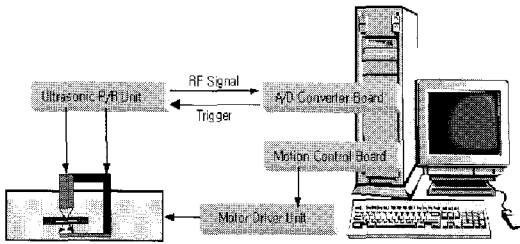


Fig. 3 A schematic diagram of SAM

또한, SAM 장치에는 이들 하드웨어를 동시에 제어하면서 초음파 신호를 수집하는 제어 계측용 Program이 중요한 역할을 하게 되며 검사결과를 A-Scan, B-Scan, C-Scan, 3차원 등을 표시하는 기능은 갖도록 제작하였고, 검사 속도는 초음파 RF 신호 파형을 초당 8000번을 수집할 수 있어 고속으로 검사결과를 표시할 수 있다.

3.2. 대구경 초음파 탐촉자

대구경 초음파 탐촉자의 제작은 일반적으로 압전소자로 사용되는 PZT 와 PVDF 소재를 사용한 2가지 종류로 공칭 주파수 10 MHz로 제작하였다. 기존 형태의 탐촉자에 비해 압전소자의 유효면적이 매우 크기 때문에 PZT 소재를 이용한 탐촉자의 제작은 매우 어렵다. 그 이유는 크기에 비해 두께가 얇아 쉽게 파손되며 곡률반경이 정확하지 않으면 초음파가 한 지점에 집중되지 않게 되기 때문이다. 또한 거리 분해능을 높이기 위해 broad-band 형태로 제작하였다.

반면, PVDF를 사용한 대구경 초음파 탐촉자는 상대적으로 높은 분해능을 갖고 대구경 탐촉자의 제작이 용이하나, 압전소자의 작은 접촉에도 쉽게 파손되는 단점이 있다. Fig. 4은 접촉거리 25 mm, 유효 진동자 크기  $30 \times 12 \text{ mm}^2$ 로 제작된 대구경 탐촉자를 나타낸다.

제작된 2종류의 탐촉자의 주파수 특성 평가를 통해 높은 broad-band 특성으로 거리 분해능이 우수한 PVDF 탐촉자를 본 실험에 사용하였다. 측정결과는 band-width(-6dB)는 PZT 탐촉자가 12%, PVDF 탐촉자는 130%로 측정되었다. Fig. 5와 Fig. 6은 제작된 탐촉자의 주파수 특성을 나타낸다. Broad-band 용으로 제작된 PZT 탐촉자가 narrow-band 특성을

갖는 이유는 유효진동자 크기가 커짐으로 focal spot 을 작게 제작하기가 어렵고, 이에 따라 펄스의 증폭이 발생되기 때문이다.

탐촉자의 주파수 특성은 각각 탐촉자의 초점거리에 위치한 평판에서 반사된 초음파 RF 신호를 FFT 하여 band-width를 구하였다.

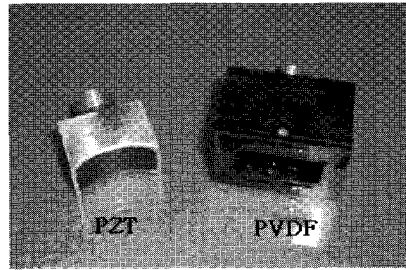


Fig. 4 PZT and PVDF type large aperture probe

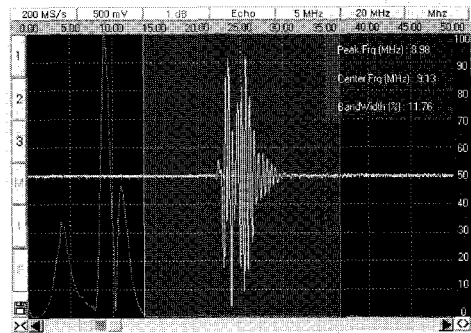


Fig. 5 Band-width of PZT probe

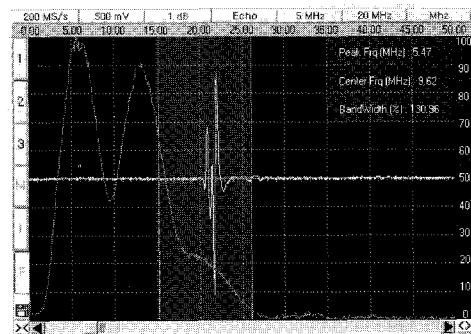


Fig. 6 Band-width of PVDF probe

3.3. 시험편

시험편은 Fig. 7과 같이 크기  $80 \times 35 \times 10 \text{ mm}^3$ 의 스테인레스강으로 제작하였으며 표면에 폭  $100 \mu\text{m}$ , 깊이 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm 3개의 사각노치를 방전 가공하여 제작하였다.

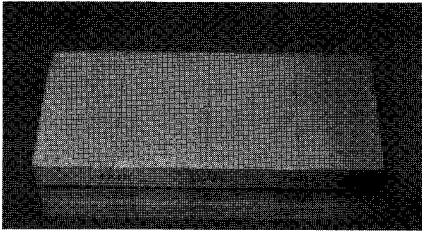


Fig. 7 Specimen

3.4. 실험방법

실험은 다음과 같은 방법을 통하여 대구경 탐촉자를 사용한 결함검출의 유용함을 검증하고자 하였다.

- 1) 시험편에 존재하는 인공결함을 이용해 집속형 수직 탐촉자 35 MHz를 사용하여 결함검출에 필요한 주파수, 탐상조건을 설정하고 검사시간을 측정한다.
- 2) 10 MHz 대구경 초음파 탐촉자를 이용하였을 때 표면 결함의 검출 감도 및 탐상조건 등을 설정하고 결함 위치정보를 쉽게 알 수 있는 B, C-Scan 표시에 적합한 방법을 제시한다.

Fig. 8은 대구경 PVDF 탐촉자를 사용하여 데이터를 수집하는 상태를 나타낸다



Fig. 8 Scanning for data acquisition

Fig. 9는 노치표면에서 회절된 초음파신호(1), 시험편 표면에서 반사된 신호(2), 산란 표면파 신호(3)를 나타내는 A-Scan 화면이다. 노치표면에서 회절된 초음파신호는 TOFD법에서 관심 신호인 크랙의 팁부분에서 회절된 초음파와 같은 원리이다[5,6].

실제 결함의 검출 및 위치 정보를 표시하기 위해 노치표면에서 회절된 초음파 신호에 gate를 설정하여 검사를 수행하며, 검사체와 탐촉자간의 거리변화에 의해 신호측정이 곤란해지는 것을 방지하기 위해 초당 8000번의 속도로 위치변화를 검출하는 Surface Follower Gate를 사용한다.

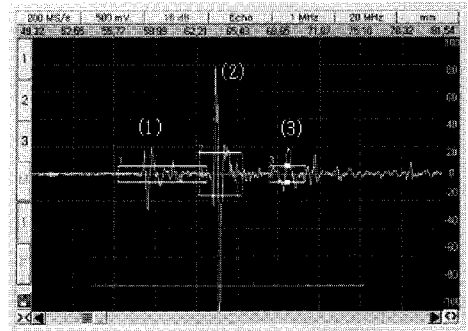


Fig. 9 RF signal from surface crack

4. 결과 및 고찰

Fig. 10은 35MHz 집속형 PVDF 탐촉자를 사용하여 거리 분해능 0.1mm, 검사 속도 750mm/sec 로 검사한 결과로 표면의 인공노치가 선명하게 나타남을 볼 수 있다. B-Scan의 표시는 TOFD법에서 주로 사용하는 RF-B-Scan을 구현하였다.

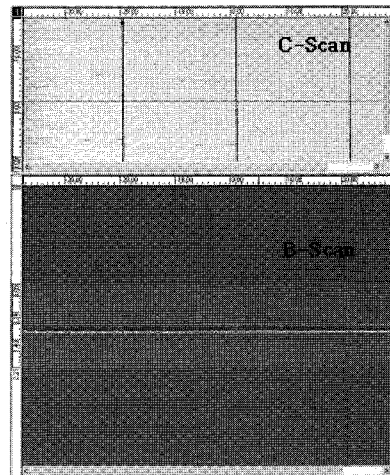


Fig. 10 B, C-Scan image using point focusing 35MHz probe

시험편의 크기가 85 x 35mm<sup>2</sup> 인 경우 C-Scan 화면의 크기는 850 x 350 Pixel 로 작으나, 실제 검사체가 3000 x 8000mm<sup>2</sup> 인 경우 C-Scan 이미지의 크기는 30000 x 80000 pixel 로 C-Scan 적용이 불가능하게 되고 수십  $\mu$ m 결함의 검출은 더욱 불가능하게 된다. 또한, RF-B-Scan의 경우도 표면의 결함에서 회절된 초음파 신호를 거의 관찰할 수 없었다.

Fig. 11은 10 MHz 대구경 PVDF 탐촉자를 사용하여 얻어진 B, C-Scan 결과이다.

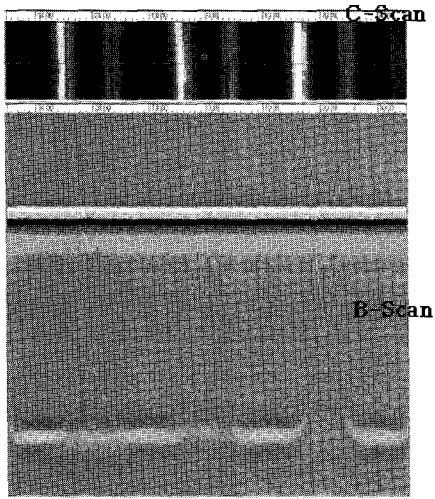


Fig. 11 B, C-Scan using 10 MHz large aperture probe

각각의 노치 표면에서 회절된 초음파 신호가 매우 선명하게 나타나며 이 표면 균열에서 회절된 신호는 균열위치에서 5 mm 정도 탐촉자 중심과 거리가 떨어져 있어도 측정 가능하였다. 이 현상을 이용할 경우 탐촉자 이동 스텝을 수 mm로 설정하여도 A, B, C-Scan 상에서 모두 검출될 수 있으며, 이에 따라 검사 속도가 수십배 빠르게 검사가 가능하며 검사결과 파일 용량은 지수적으로 감소하게 된다.

즉, 같은 시험편을 거리분해능 1 mm로 설정하였을 경우 검사 속도는 10배, 저장데이터의 양은 100배 작게 되는 결과를 가져올 수 있는 획기적인 방법으로 대형 구조물의 초음파 자동화 기법에 적용할 수 있다. 또한 대구경 탐촉자를 사용한 RF-B-Scan을 적용할 경우 수직 펄스-에코법으로 측정하기 어려운 표면 크랙의 깊이 측정, 산란 표면파의 전파시간 변화 등을 비교적 쉽게 측정할 수 있다.

## 5. 결 론

대구경 초음파 탐촉자를 사용한 표면 균열검출 방법에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PZT, PVDF 두 종류의 대구경 초음파 탐촉자 제작하고, 특성을 비교한 결과 PVDF를 사용한 탐촉자가 대구경 초음파 탐촉자로 적합함을 알 수 있었다.
- 2) 펄스-에코법을 이용한 기존의 수직탐상법과 비교하여 볼 때 비교적 낮은 주파수의 대구경 초음파 탐촉자를 사용한 방법이 10배 이상의 검사 속

도 향상 및 결함 위치를 알 수 있으며, 자동화에 따른 A, B, C-Scan 표시를 쉽게 할 수 있었다.

- 3) 본 시스템에서 초음파 현미경 기능으로 미소 결함의 검사가 가능 하였으며 검사 속도의 향상도 가능하였다
- 4) RF-B-Scan을 적용할 경우 수직 펄스-에코법으로 측정하기 어려운 표면 크랙의 깊이 측정, 산란 표면파의 전파시간 변화 등을 쉽게 측정 가능하며, 이를 이용한 재료의 물성평가에 사용될 수 있다.

본 연구를 통해 PVDF 대구경 초음파 탐촉자를 사용하면 대형 압연 롤 및 세라믹 롤 등의 가동중. 전 검사에서 표면에 존재하는 미세 균열을 검출 하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 초음파 현미경에 적용이 가능할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] D. Xiang, N. N. Hsu and G. V. Blessing "A Simplified Ultrasonic Immersion Technique for Materials Evaluation", *Material Evaluation*, pp. 854-859 (July, 1998)
- [2] Andrew Briggs, *Advances in Acoustic Microscopy*, Plenum Press, Vol. 1 pp. 49-77
- [3] D. E. Chimenti and R. W. Martin, "Nondestructive Evaluation of Composite Laminates by Leaky Lamb Waves", *Ultrasonics*, Vol. 29, pp. 12-21, (1991)
- [4] N. N. Hsu and D. Xiang, "Time and Polarization Resolved Ultrasonic Measurements Using a Lensless Line-Focus Transducer", *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 867-871, (1991)
- [5] M. G. Silk, "The Interpretation of TOFD data in the light of ASME XI and similar rules", *British Journal of NDT*, (May, 1989)
- [6] M. G. Silk and P. E. Kear, "The Time of Flight Diffraction Technique Theoretical Aspects and Practical Application", *L'informatica nelle technigie nondestructive*, (Feb. 1993)