

## 대구경 초음파 탐촉자를 이용한 표면균열 평가

### Evaluation of the Surface Crack by a Large Aperture Ultrasonic Probe

조용상\*<sup>†</sup>, 김재훈\*\*

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

초 록 비금속 및 금속 재료에 존재하는 미소균열 검출에는 펄스-에코법으로 고주파수 집속형 수직 탐촉자를 사용하거나 표면파를 사용한 사각 탐상법을 주로 사용한다. 이러한 방법은 압연 롤, 세라믹 롤 등 대형 구조물의 표면에 존재하는 미소 균열의 존재 여부, 위치 및 깊이 측정을 위한 자동화 초음파 탐상장치를 개발하는 다량의 검사 데이터, 결합 위치정보의 불확실성 등 현실적으로 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 대구경 초음파 탐촉자를 사용하여 초음파 회절현상을 발생시킴으로써, 미세 균열의 존재 여부 및 위치 등의 검사결과를 실시간 A, B, C-Scan으로 표시할 수 있었다. 또한 기존의 방법보다 정량적으로 표면 균열의 깊이를 정확하게 측정 가능한 방법을 제시하였다. 초음파의 회절현상을 이용함으로써 기존의 방법보다 검사 속도 및 시간이 10배 이상으로 향상되고 균열의 깊이를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 실험적으로 검증하였다.

**주요용어:** 초음파 검사, 대구경 탐촉자, 초음파 회절, RF B-Scan

**Abstract** Conventional ultrasonic examination to detect micro and small surface cracks is based on the pulse-echo technique using a normal immersion focused transducer with high frequency, or an angle-beam transducer generating surface waves. It is difficult to make an automatic ultrasonic system that can detect micro and small surface cracks and position in a large structure like steel and ceramic rolls, because of the huge data of inspection and the ambiguous position data of the transducer. In this study, a high-precision scanning acoustic microscope with a 10 MHz large-aperture transducer has been used to assess the existence, position and depth of a surface crack from the real-time A, B, C scans obtained by exploiting the ultrasonic diffraction. The ultrasonic method with large aperture transducer has improved the accuracy of the crack depth assessment and also the scanning speed by ten times, compared with the conventional ultrasonic methods.

**Keywords:** ultrasonic testing, large aperture probe, ultrasonic diffraction, RF B-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 존재

하는 미세균열을 검출하기 위해 일반적으로 사용하는 방법은 펄스-에코법의 표면파를 이용한 방법과 고주파수의 집속형 탐촉자를 사용하는 방법이 일반적이다. 특히, 압연롤의 경우, 연삭작업을 통해 표면에 존재하는 균열을 제거하고 정확한 균열 깊이 정보가 필요하게 된다. 기존의 표면파를 사용하는

경우 결합의 위치를 쉽게 알 수 있는 c-scan 표시가 어려우며, 균열의 깊이 측정이 정확하지 않아 와전류탐상을 병행하고 있는 실정이다. 대구경 초음파 탐촉자를 사용한 defocusing 방법은 최근 세라믹 코팅 층의 건전성 및 금속재료의 경년열화 등의 재료 물성 평가 및 표면에 존재하는 균열의 깊이 측정을 위해 효과적으로 사용되어 왔다[1-5].

본 연구에서는 대구경 초음파 탐촉자를 사용하여 표면에 존재하는 미세 균열 검출을 위한 실시간 A, B, C-Scan 표시가 가능하며, 결합의 위치 및 검사 속도가 펄스-에코법에 비해 10배 이상 향상되고 균열의 팁부분에서 발생하는 초음파 회절 현상을 이용한 균열 깊이 측정 방법을 제안하고자 한다.

2. 측정원리

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

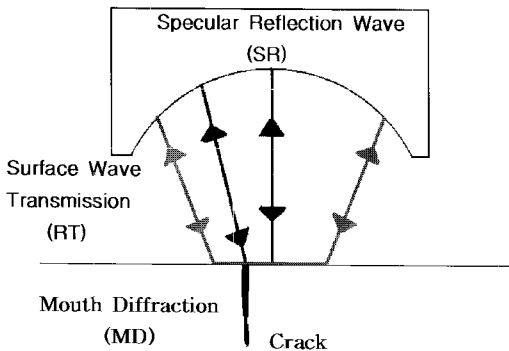


Fig. 1 Ray diagram of large aperture transducer

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 디포커싱된 거리이다.

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. 2와 같이 초음파 탐촉자의 중앙부가 균열의 위에 존재할 경우가 surface wave transmission 신호가 미약해지며, 균열의 팁(Tip)부분에서의 발생된 초음파 회절신호(diffraction signal from crack tip, DC)를 측정할 수 있다. 이 위치에서의 균열깊이 ( $d$ )는 식 (4)와 같다.

$$d = \frac{(t_{DC} - t_{SR})}{2} V_0 \tag{4}$$

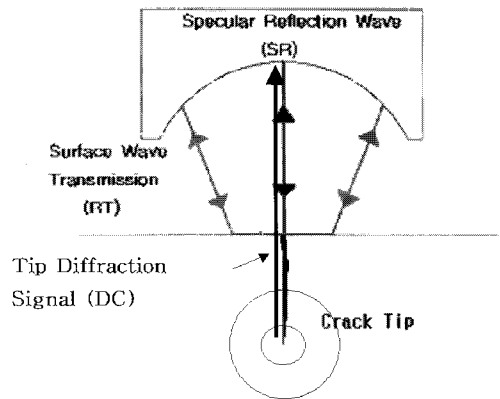


Fig. 2 Ray diagram of large aperture transducer at crack

Fig. 3은 RF B-Scan 상에 나타나는 SR, RT, MD, DC의 궤적을 표시한다.

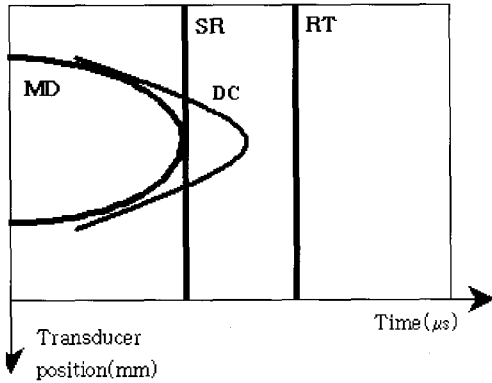


Fig. 3 Schematic image of MD, SR, DC and RT

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험장치의 구성

실험장치는 Fig. 4와 같이 고정밀도 초음파 현미경(scanning acoustic microscope, SAM)을 제작하여 사용하였고, 초음파 탐촉자는 최소 1 μm로 미세 이동이 가능하다.

컴퓨터로 구동이 가능한 SAM은 초음파 펄서/리시버, 고속 A/D 변환기, 위치제어기(motion controller)가 컴퓨터 내부에 포함되고 초음파 탐촉자를 이송 시키는 기계 장치인 scanner 및 전기적 노이즈가 적게 설계된 linear/stepping motor, motor driver 등이 외부장치로 구성된다.

또한, SAM 장치에는 이들 하드웨어를 동시에 제어하면서 초음파 신호를 수집하는 제어 계측용 프로그램이 중요한 역할을 하게 되며 검사결과를 A-Scan, B-Scan, C-Scan, 3차원 등을 표시하는 기능

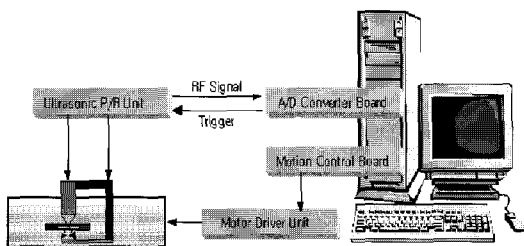


Fig. 4 Schematic diagram of SAM

을 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 PVDF 소재를 사용한 광대역 주파수 특성을 갖는 공칭주파수 10 MHz로 제작하였다. Fig. 5은 집속거리 25 mm, 유효 진동자 크기 30 x 12 mm<sup>2</sup>로 제작된 PVDF 대구경 탐촉자를 나타낸다. 대역폭(-6 dB) 130 %로 측정되었다.

Fig. 6은 제작된 탐촉자의 주파수 특성을 나타낸다.

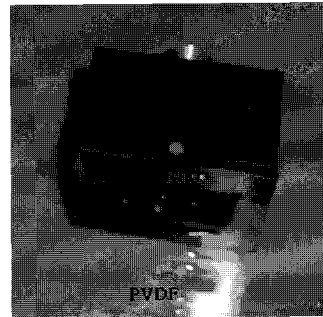


Fig. 5 PVDF type large aperture probe

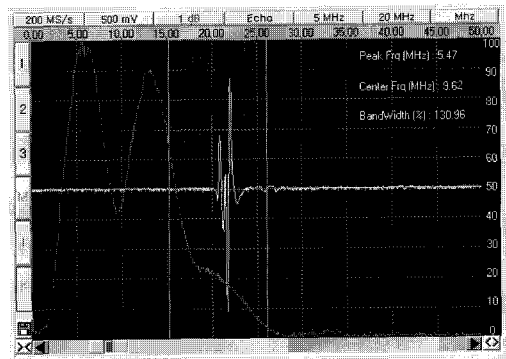


Fig. 6 Band-width of PVDF probe

#### 3.3. 시험편

시험편은 Fig. 7과 같이 크기 80 x 35 x 10 mm<sup>3</sup>의 스테인레스강으로 제작하였으며 표면에 폭 100 μm, 깊이 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm 3개의 사각노치 방전 가공하여 제작하였다.



Fig. 7 Specimen

3.4. 실험방법

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

- 1) 대구경 탐촉자를 사용하여 B, C-Scan한 후 0.2, 0.5, 1 mm 깊이의 균열 중앙부에 탐촉자를 위치시켜 초음파 RF-signal을 수집한다.
- 2) 검출된 RF-signal에서 specular reflection wave (SR)의 전파시간과 균열팁에서의 회절신호(DC)의 전파시간차를 구한다.

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

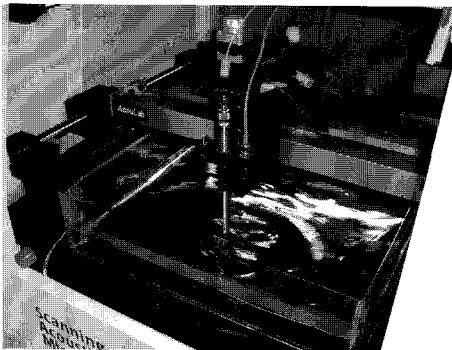


Fig. 8 Scanning for data acquisition

Fig. 9는 균열이 존재하지 않는 위치에서의 초음파 RF 신호이며 시험편 표면에서 반사된 신호인 specular reflection wave, SR(1), 산란 표면파 신호인 surface wave transmission, RT(2)를 나타내는 A-Scan 화면이다.

Fig. 10은 균열 위에 탐촉자의 중앙부를 위치시켰을때의 반사 신호로써 surface wave transmission, RT로부터의 신호는 사라지고 균열의 팁부분, 균열의 표면 개구면에서 RT 신호들이 중첩되어 해석하기 복잡한 형태의 RF신호가 측정되었다.

균열 팁에서 회절된 초음파신호는 TOFD법에서 관심 신호인 균열의 팁부분에서 회절된 초음파와 같은 원리이다[6].

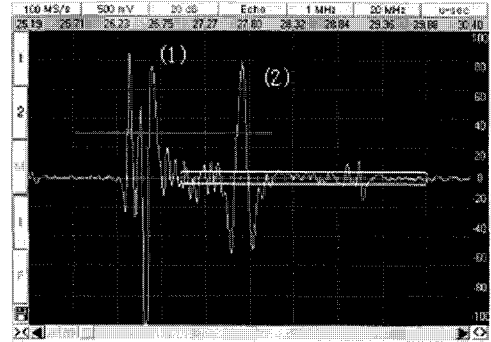


Fig. 9 RF signal without crack

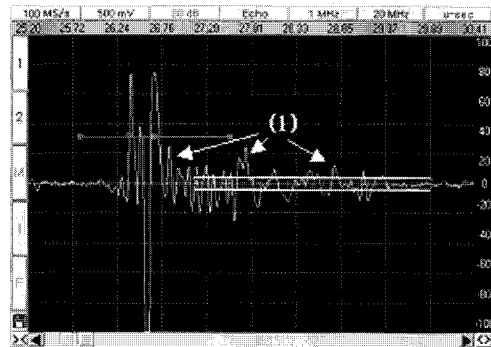


Fig. 10 RF signal with crack

4. 결과 및 고찰

균열깊이 0.2, 0.5, 1 mm 깊이의 표면 균열에서 측정된 초음파 RF신호는 Fig. 12, 13, 14와 같다.

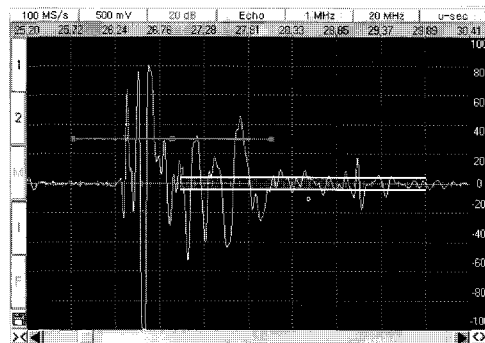


Fig. 11 RF signal for 0.2 mm deep crack

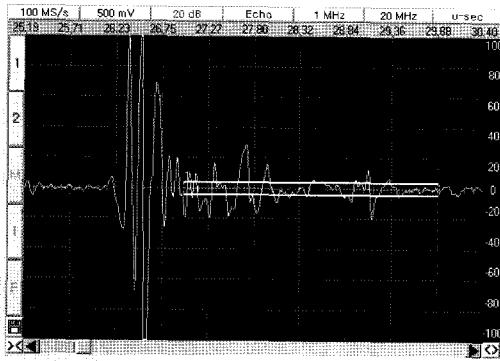


Fig. 12 RF signal for 0.5 mm deep crack

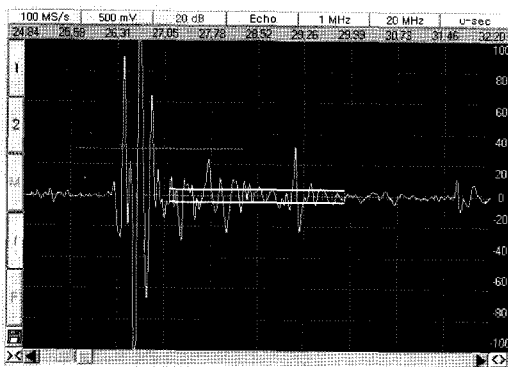


Fig. 13 RF signal for 1 mm deep crack

Fig. 12, 13, 14에서 보는바 같이 0.2 - 1 mm의 미소균열의 깊이에서 발생하는 균열팁 부분에서의 회절신호는 specular reflection 신호와의 전파시간차는 매우 미소하여, 여러 경로로 수신된 초음파 신호의 중첩으로 인해 A-Scan 상에서의 관찰이 용이하지 않음을 알 수 있다.

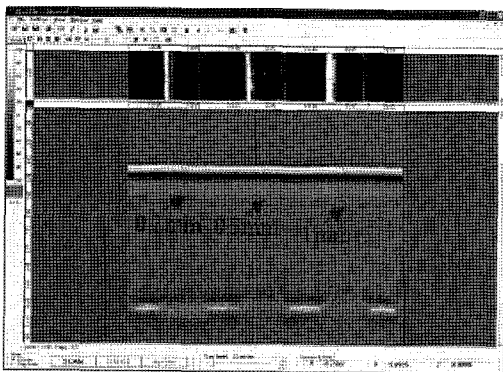


Fig. 14 RF-B, C-Scan using 10 MHz large aperture probe

그러나 Fig. 14에서와 같이 B-Scan 결과 균열 팁으로부터 회절된 초음파 신호가 해석이 가능하게 나타나며 균열의 깊이와 비례적으로 시간차를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 비교적 저주파수인 10 MHz의 대구경 초음파 탐촉자를 사용함으로써 표면 균열의 위치 및 검출을 기존의 초음파 탐상방법에 비해 10배 이상 향상시킬 뿐만 아니라[1], 미소 균열의 깊이 측정이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 15에서와 같이 0.2, 0.5, 1 mm 균열 깊이 사이의 회절된 초음파 전파 시간차는 0.2 mm와 0.5 mm 깊이사이에서  $\Delta t_{12}$ 은 104 nsec, 0.2 mm와 1 mm 깊이 사이에서  $\Delta t_{13}$ 는 259 nsec로 측정되었다. 즉, 0.2 mm 깊이의 균열과의 깊이차는 시험편에서의 음속 5,660 m/sec로 계산하면 0.29 mm과 0.73 mm 이다. 즉, 실제 균열깊이와 매우 근접된 0.49 mm 와 0.93 mm로 측정됨을 알 수 있다. 다만, 각각의 균열의 절대적인 깊이 측정을 위해서는 시험편 표면에서 반사된 신호인 Specular Reflection wave, SR 신호 안에 존재하는 깊이 측정의 기준점  $t_0$  을 설정하면 측정 가능함을 알 수 있다.

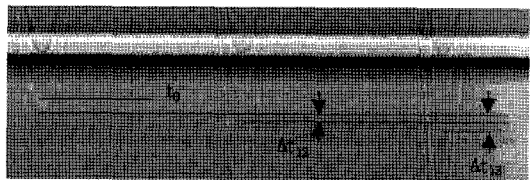


Fig. 15 Time difference between each crack

또한, 보다 높은 주파수 즉 고분해능의 대구경 탐촉자를 사용하는 경우 보다 해석이 용의하며, 정밀한 균열깊이 측정이 가능함을 알 수 있다.

### 5. 결론

대구경 초음파 탐촉자를 사용한 표면 균열 깊이 측정 방법에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 펄스 에코법을 이용한 기존의 수직탐상법과 비교하여 볼 때 비교적 저 주파수의 대구경 초음파 탐촉자를 사용함으로써 매우 정확하게 균열의 깊이 측정이 가능하였다.
- 2) A-Scan 상에서의 복잡한 초음파 중첩신호를 해석하는 것 보다 RF-B-Scan을 적용할 경우 보다 쉽게 균열의 깊이를 측정할 수 있었다.

본 연구에 통해 PVDF 대구경 초음파 탐촉자를 사용하면 대형 압연 롤 및 세라믹 롤 등 금속, 비금속 소재의 산업 주요 구조물에 존재하는 미세 균열의 깊이를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] Y. S. Cho and J. H. Kim "A Study of the Acoustic Microscope System by Large Aperture Probe," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 23, No. 5, pp. 475-479 (2003)
- [2] D. Xiang, N. N. Hsu and G. V. Blessing "A Simplified Ultrasonic Immersion Technique for Materials Evaluation," Material Evaluation, Vol. 56, No. 7, pp. 854-859 (1998)
- [3] Andrew Briggs, "Advances in Acoustic Microscopy," Vol. 1, pp. 49-77, Plenum Press, New York, (1995)
- [4] D. E. Chimenti and R. W. Martin, "Nondestructive Evaluation of Composite Laminates by Leaky Lamb Waves," Ultrasonics, Vol. 29, pp. 12-21 (1991)
- [5] 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)
- [6] M. G. Silk, "The Interpretation of TOFD data in the light of ASME XI and similar rules," British Journal of NDT, Vol. 31, No. 5, pp. 242-251, (1989)