

## 회절초음파를 이용한 노치 피로균열의 균열깊이 평가

### Depth Sizing of Notch Fatigue Crack Using Diffracted Ultrasonic Wave

김미령\*, 이태훈\*, 박병준\*, 장경영\*\*†

Mei-Ling Jin\*, Tae-Hun Lee\*, Byung-Jun Park\* and Kyung-Young Jhang\*\*†

**초 록** 이 논문에서는 표면으로부터 내부로 진전된 CT피로시험편의 노치 피로균열을 대상으로 회절초음파를 이용하여 균열깊이를 평가하기 위한 방법을 제안하고 그 타당성을 실험에 의해 검증하였다. 특히 균열선단 이외에 노치와 같은 또 다른 회절과 발생요소가 존재하는 상황에서 회절과 성분들을 정확하게 규명하기 위해 탐촉자 스캔에 의한 영상화 및 전파경로 분석을 실시하였다. 실험은 균열이 없는 시험편과 균열이 있는 시험편에 적용하였다. 실험 및 분석의 결과 주파수가 클수록 그리고 탐촉자의 굴절각이 클수록 정확한 측정이 가능했고, 4MHz의 60°-60° 탐촉자 조합의 경우 오차 0.38 mm 이내로 균열깊이가 측정되었다. 제안 기법은 균열 선단부가 미세하여 회절과 세기가 미약하더라도 적용이 가능하다는 특징을 가지므로 미세 균열의 검사 및 깊이 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요용어:** 초음파 회절, 균열깊이, 피로균열

**Abstract** This paper proposed a methodology based on ultrasonic diffraction technique to inspect the depth of a crack initiated from a notch of CT specimen by fatigue test, and its usefulness was verified by experiments. Especially, in order to identify accurately the diffractive waves from the crack tip in the situation where there are extra diffractive elements such as a notch, we have tried imaging by transducer scan and analyzed the propagation path of diffracted wave. Two specimens with and without a crack were experimented. Higher frequency and larger refractive angle of transducer showed a tendency to decrease the error in the measurements, and the measured crack depth showed an error less than 0.38 mm in case of 4 MHz 60°-60°. The proposed methodology is applicable to weak diffractive sources, and so that it would be useful to inspect micro cracks and for their depth sizing.

**Keywords:** Ultrasonic Diffraction, Crack Depth, Fatigue Crack

#### 1. 서 론

부품이나 재료의 수명예측 및 건전성평가에 있어서 균열 깊이에 대한 정보는 매우 중요하며, 정확하고도 신속한 검출기술이 요구되고 있다. 현재 고정밀도 결함깊이 탐상기술로 사용되고 있는 방법 중에 팁에코법(tip echo method), TOFD(time

of flight diffraction)법, phased array method 등이 있는데 단독으로 또는 병용하여 사용되고 있다[1].

그 중에서도 특히 TOFD(time of flight diffraction) 기법은 현재 정밀도가 높은 결함 깊이 탐상 기술로 인정되고 있으며, 압력용기 용접부 검사 등에 활용되고 있다[2-6].

이 연구에서는 CT 피로시험편의 노치 피로균열에서 회절 초음파를 이용한 균열깊이 평가의 가능성을 검증하고자 하였다.

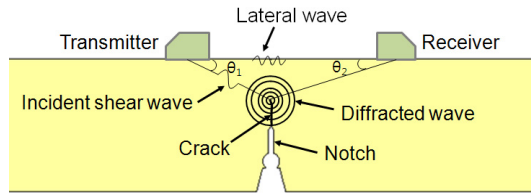
노치 피로균열의 경우 외부로 열린 균열이기 때문에 고전적인 TOFD법에서와 같이 내재한 균열 양 끝 단에서의 회절을 이용하는 방법과 다르게 한 쪽 끝 단에서의 회절만을 이용해야 한다. 그리고 피로균열의 경우 선단부가 미세하여 회절과 성분이 매우 미약할 것으로 예상되고, 또 균열선단 이외에 노치와 같은 또 다른 회절과 발생요소가 존재하는 상황이어서 회절 성분을 고감도로 수신하기 위한 방안과 균열 선단에서의 회절성분을 판정하기 위한 기술적 검토가 필요하다.

본 논문에서는 단일 회절 성분으로부터 균열깊이를 평가하기 위해 기존 TOFD기법에서와 같이 송수신 탐촉자간 거리를 고정하지 않고 변화시키는 방법을 적용하였으며, 이를 노치 피로균열에 적용하여 적용성을 검증하였다. 특히 제안 기법에 의해 측정되는 균열깊이가 입사각과 수신각의 변화에 무관하게 측정되는지를 검증하기 위해 서로 다른 입사각-수신각 조합으로 실험하였다. 또한 미약한 회절 신호 성분을 쉽게 찾아내기 위해 탐촉자 스캔에 의한 영상화를 실시하였으며, 주파수의 변화에 따른 차이도 검토하였다.

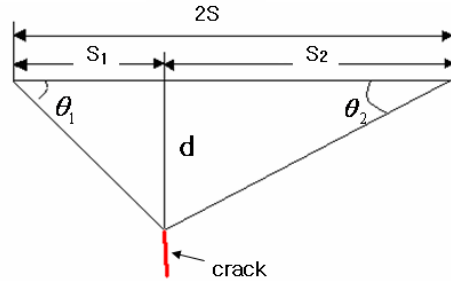
그리고 균열선단 이외에 노치와 같은 또 다른 회절과 발생요소가 존재하는 상황에서 균열선단부의 회절과 성분을 규명하기 위해 균열이 없는 순수 노치에 적용하여 노치부 회절과 성분을 실험과 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

2. 초음파 회절을 이용한 균열깊이 평가의 원리

이 연구에서 검사대상으로 한 균열은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 피로시험에 의해 CT시험편에 인위적으로 발생시킨 피로균열이다. 그리고 검사는 노치 가공 면의 반대 면에서 시행한다. 균열은 노치부에서 진전된 균열로서 선단부는 내부에 존재하고 균열깊이는 검사면으로부터 이 균열의 상단 선단부까지의 직하(直下)거리를 의미한다. 따라서 균열깊이 d는 Fig. 1(b)에 보인 것처럼 회절신호가 가장 크게 수신될 때의 탐촉자간 거리를 2S 라고 할 때 식 (1)로부터 구할 수 있다.



(a) probe arrangement



(b) geometrical model of ultrasonic beam path

Fig. 1 Principle of proposed method

$$2S = S_1 + S_2 = \frac{d}{\tan \theta_1} + \frac{d}{\tan \theta_2} \tag{1}$$

즉,

$$d = \frac{2S}{\frac{1}{\tan \theta_1} + \frac{1}{\tan \theta_2}} \tag{2}$$

여기서  $\theta_1, \theta_2$ 는 각각 초음파빔이 입사될 때와 수신될 때 탐상면과 이루는 각도를 나타내며 송·수신탐촉자의 굴절각으로부터 구한다. 즉, 회절신호가 가장 크게 수신되는 탐촉자 위치는 균열선단이 송·수신탐촉자 각각의 굴절각 방향에 위치할 때이므로, 예를 들어 송·수신탐촉자의 경사각 조합을 45°와 60°로 하고 시편 재질이 알루미늄인 경우 송·수신탐촉자의 굴절각은 각각 42.4°와 55.7°가 되고, 따라서  $\theta_1, \theta_2$ 는 각각 47.6°, 34.3°가 된다.

본 연구에서는 이와 같은 원리로부터 회절신호가 가장 크게 수신될 때의 탐촉자 간 거리 2S를 측정함으로써 균열깊이 d를 구하고자 하였다. 이 방법은 회절파의 세기가 가장 강한 송수신 위치를 이용하는 것으로 균열 선단부가 미세하여 회절파 세기가 미약하더라도 적용이 가능하다.

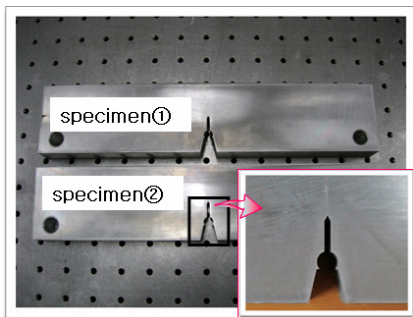
### 3. 시편 및 실험방법

#### 3.1. 시편

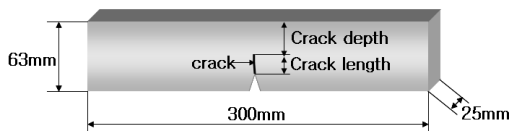
본 연구에 사용된 시편은 AL6061-T6로서 피로균열의 깊이가 다른 두 시편에 대해서 제시한 기법을

Table 1 Specification of specimen material  
(L: longitudinal wave, T: transverse wave, R: Rayleigh wave)

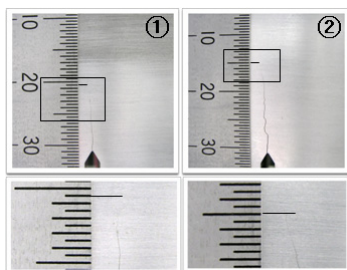
Specimen number		①	②
Material		AL6061-T6	
Ultimate strength		310 MPa	
Yield strength		276 MPa	
Crack length (mm)		10.5	15.5
Depth, d (mm)		20.5	15.5
Ultrasonic velocity (m/s)	L	6299	
	T	3150	
	R	2772	



(a) picture of crack on CT specimen (right side photo shows enlarged view around the crack)



(b) geometry of CT specimens



(c) enlarged picture of crack area

Fig. 2 CT specimen with a fatigue crack and its dimensions

적용하여 그 성능을 검증하고자 하였다. 시편의 세부사양은 Table 1과 같다. Fig. 2(a) 는 시편 사진을 나타내고, 시편의 크기는 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 300×63×25 mm이다. 그리고 인공균열길이는 Fig. 2(c)에 보인 바와 같이 시편①은 약 10.5 mm 이고 시편②는 약 15.5 mm이며, 따라서 균열 깊이 d는 각각 약 20.5 mm, 15.5 mm 이다. 이 수치들은 육안측정을 위해 균열이 열리는 방향으로 힘을 가한 상태에서 측정한 결과이며, 균열이 아주 미세하므로 실제 균열길이와는 약간의 차이가 있을 것으로 예상된다.

#### 3.2. 실험장치의 구성

Fig. 3에 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성을 나타낸다. 초음파의 송, 수신에는 펄서/리시버 (5077P/R)를 사용하였고, 수신신호는 신호 대 잡음 비율의 향상을 위해 20회 평균 처리하였다. 탐촉자는 45°/2 MHz, 60°/2 MHz, 45°/4 MHz, 60°/4 MHz인 횡파 사각탐촉자를 두 개씩 조합하여 사용하였다.

#### 3.3. 실험방법

입사빔의 중심부가 균열의 상부선단에 도달했을 때 발생하는 회절파가 수신탐촉자에 수신될 때 그 크기가 가장 클 것이다. 그리고 회절파가 전방향으로 전파할 경우 수신탐촉자에 의해 수신되는 신호의 크기가 가장 크려면 수신탐촉자의 굴절각 방향으로 수신될 때, 즉 균열선단이 수신탐촉자의 굴절각 방향에 위치해야만 한다.

이와 같은 원리에 기초하여 우선 Fig. 4에서처럼 송신탐촉자의 굴절각(45° 탐촉자일 경우 42.4°, 60° 탐촉자일 경우 55.7°) 방향으로 입사하는 초음파 빔 중심이 균열의 상부선단을 지나도록 송신탐촉자를 고정하고, 수신탐촉자를 1 mm간격으로 두 탐촉자가 멀어지는 방향으로 스캐닝한다. 스캐닝 거리는 균열선단 회절 신호의 규명에 충분한 거리로 하였으며, 따라서 스캐닝의 시작점과 끝점은 탐촉자 조합에 따라 상이하다.

균열깊이는 스캐닝 결과 회절 신호의 진폭이 가장 크게 수신된 수신탐촉자의 위치로부터 송, 수신 탐촉자간 거리 2S를 구하여 식 (2)에 의해 구한다. 단, 이 연구에서는 대략적인 균열의 위치를 이미

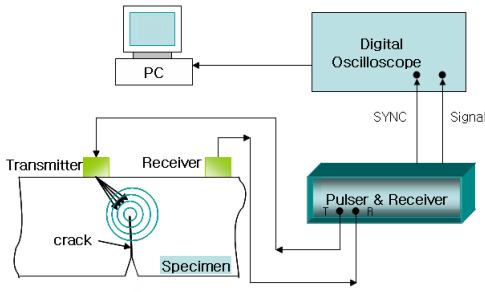


Fig. 3 Block diagram of experimental system

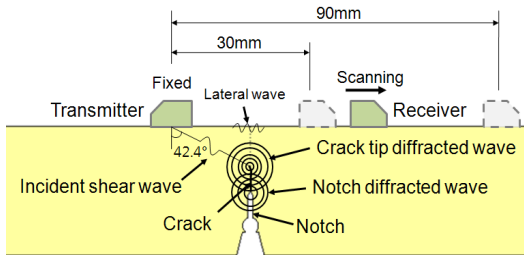


Fig. 4 Scanning method in experiment

알고 있는 상태이므로 최대 회절신호가 얻어지는 송신탐촉자의 위치를 쉽게 찾아 고정시킬 수 있지만 실제 상황에서는 그렇지 않을 수 있다. 본 연구는 현재 시점에서 노치 피로균열을 대상으로 한 적용성 검증에 목적이 있기 때문에 실제 상황에의 적용에 대한 검토는 충분하지 않다. 다만 균열의 위치를 전혀 모르는 경우라면 수신탐촉자를 임의의 위치에 고정하고 송신탐촉자를 이동시키면서 최대진폭의 회절신호가 수신되는 송신탐촉자의 위치를 찾는 과정이 선행되어야 할 것이다. 또한 회절파에 방향성이 존재한다면 이를 고려하여 수신각을 선택해야 할 것이다.

#### 4. 노치 피로균열에 대한 실험결과

##### 4.1. 실험결과

Fig. 5 - Fig. 8은 시편①에 대하여 앞서 설명한 실험방법으로 탐촉자의 주파수와 굴절각 조합을 달리하여 실험한 결과를 영상화하여 나타낸 것이다. 단일 시계열 신호에서는 신호 성분들의 규명이 쉽지 않지만 이와 같은 영상화를 통하여 탐촉자 이동에 따른 신호 성분들의 전파시간 변화를 쉽게 파악할 수 있고, 결과적으로 신호군의 식별이 용이해진다.

검출된 신호 성분들에는 균열 선단부 회절파 이외에도 Lateral wave, 노치 회절파, 저면반사파가 포함되어 있다. 각 파의 성분들은 전파속도와 전파거리로부터 확인한 것이며, 노치 회절파는 입사파가 균열선단부에 도달한 후 균열을 따라 표면파로 진행하다 노치 선단에서 회절된 것이다. 노치 회절파는 본 연구에서 사용된 노치의 형상(Fig. 2참조)이 특수하므로 보다 정확한 분석을 위해 추가적인 실험과 시뮬레이션을 실시하여 규명하였으며, 그 결과는 5장에서 기술한다.

한편 2 MHz보다 4 MHz에서 균열 회절파가 두드러지게 관측되었는데, 이는 주파수가 높을수록 지향성이 좋기 때문으로 사료된다. 또한 60°-60° / 2 MHz 조합의 경우 회절신호의 크기가 매우 작고 저면 반사파의 크기가 상대적으로 매우 커서 영상처리 과정에서 균열 회절파가 잘 나타나지 않았으며, 결과적으로 균열길이 평가에는 사용할 수 없었다.

Fig. 9는 45°-60°/2 MHz 탐촉자 조합으로 실험한 스캔에 따른 균열선단 회절신호의 피크 크기 변화를 별도로 나타낸 것이다. 균열선단에서의 회절신호는 탐촉자간 거리가 52 mm에서 가장 크게 수신되었다. 이 위치가 실험원리에서도 언급했듯이 균열선단이 송, 수신탐촉자의 굴절각 방향에 놓이는 위치에 해당하며, 2S=52 mm가 된다. 따라서 식 (2)를 이용하여 균열길이 d를 구하면 다음과 같다.

$$d = \frac{52}{\frac{1}{\tan 47.6^\circ} + \frac{1}{\tan 34.3^\circ}} = 21.88mm \quad (3)$$

마찬가지 방법으로 다른 탐촉자 조합의 실험결과로부터 균열길이를 구할 수 있으며, 시편②에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다. 각 탐촉자 조합에 대하여 두 시편의 균열길이를 모두 구한 결과를 Table 2에 나타내었다. 60°-60°/2 MHz 조합의 경우 시편②에서도 회절성분의 크기가 매우 약하게 나타나서 균열길이 평가에는 사용하지 않았다. 측정 결과는 육안으로 측정된 결과와 비교하여 2 MHz보다는 4 MHz에서 적은 차이를 보였으며, 60°-60°/4 MHz 조합의 경우 차이가 시편①에서 0.38 mm, 시편②에서 0.2 mm로 가장 적었다. 한편 육안으로 관찰한 균열길이보다 실험으로 구한 균열길이가 더 큰 경우가 있는데 이는 균열선단부가 닫혀있어서 회절이 실제 균열선단에서 발생하지 않고 균열선단의 약간 아래쪽에서 발생한 때문으로 사료된다.

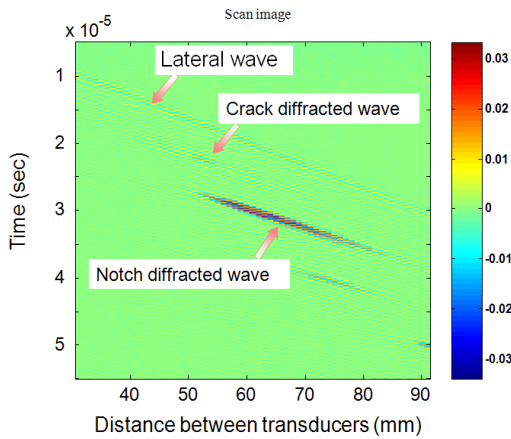


Fig. 5 Scan results obtained by using combination of 45°-60°/2 MHz probes (specimen ①)

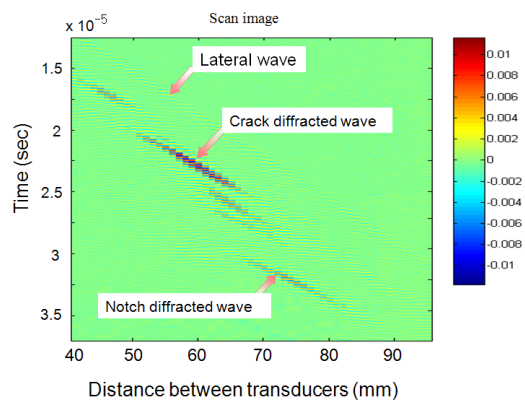


Fig. 8 Scan results obtained by using combination of 60°-60°/4 MHz probes (specimen ①)

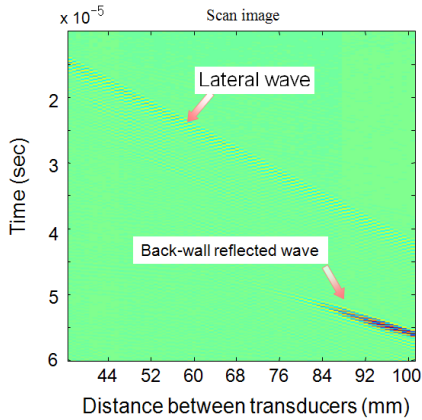


Fig. 6 Scan results obtained by using combination of 60°-60°/2 MHz probes (specimen ①)

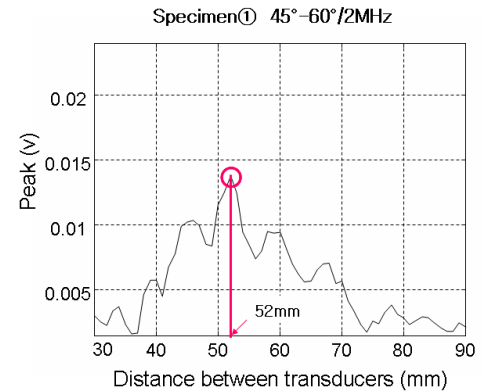


Fig. 9 Peak magnitude of crack tip diffraction measured along the scan direction (45°-60°/2 MHz probes, specimen ①)

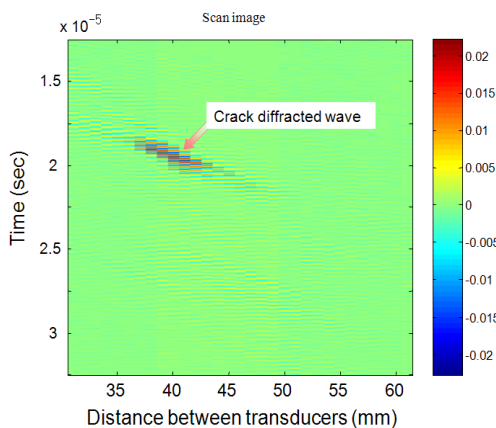


Fig. 7 Scan results obtained by using combination of 45°-45°/4 MHz probes (specimen ①)

Table 2 Measurement results of crack depth

Pair of probes	Crack Depth (mm)	
	①	②
Visual Inspection	20.5	15.5
45°-60°/2MHz	21.88	13.5
60°-60°/2MHz	-	-
45°-45°/4MHz	21.35	15.3
60°-60°/4MHz	20.12	15.7

#### 4.2. 오차 분석

제안한 기법은 회절신호의 크기정보를 이용하는 것으로 최대 회절신호가 수신된 지점을 얼마나 잘 찾느냐가 중요하다. 따라서 회절신호의 크기에 영향을 미치는 요인들은 모두 오차의 원인이 될 수 있다. 즉, 측정의 신뢰도를 높이려면 스캔 과정에서

탐촉자와 시편의 접촉조건을 일정하게 유지하여야 하고, 또 이런 조건이 만족되더라도 스캔의 정밀도가 영향을 미칠 수 있다. 본 실험에서는 수신탐촉자의 위치를 시편에 새긴 스케일을 이용하여 확인하였으며, 최대 크기의 회절신호가 수신되는 위치에서의 탐촉자 중심간 거리를 2S로 구하였다.

여기서는 이런 2S 측정의 오차가 균열 깊이 측정 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 민감도를 분석하였다. 이를 위해 식 (1)의 2S에 ΔS만큼의 변동이 있을 때 d에 나타나는 변동의 크기를 Δd라고 하고, Δd와 ΔS의 관계를 구해보면 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$\Delta d = \frac{\Delta S}{\left( \frac{1}{\tan \theta_1} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right)} \quad (4)$$

즉, Δd는 ΔS와 비례적인 관계를 가지며, 비례상수는  $\theta_1, \theta_2$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이는 동일한 ΔS에 대해  $\theta_1, \theta_2$ 가 작을수록 Δd가 작아진다는 것을 의미한다. 따라서 탐촉자 굴절각이 클수록 2S 측정에서의 오차가 균열깊이 측정의 오차에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다.

예를 들어, ΔS가 1 mm일 때 Δd를 45°-45° 조합의 경우에 대해 구해보면 0.55 mm, 45°-60°의 경우는 0.42 mm, 60°-60°의 경우는 0.34 mm이다.

이상의 분석으로부터 본 연구에서 제안한 기법은 45°탐촉자에 비해 60°탐촉자를 사용하는 것이 탐상 오차를 줄이는데 유리하다고 할 수 있다. 앞선 실험결과에서 60°-60°조합의 경우가 다른 경우에 비해 육안측정결과와 차이가 적은 것은 이와 같은 이유 때문으로 사료된다.

### 5. 순수 노치에 대한 실험결과

#### 5.1. 실험결과

본 연구에서 사용한 시편은 균열 외에 노치와 같은 또 다른 회절과 발생요소가 존재한다. 여기서는 균열시편에서 노치에 의한 회절거동을 이해하기 위해 균열이 없는 순수 노치시편에 대하여 앞에서와 동일한 방법으로 실험을 진행하고 시뮬레이션을 통하여 분석결과를 검증하였다. 또한 앞에서 제안한 균열깊이 측정원리를 노치에 적용하여 제안 기법의 유효성을 재검증하고자 하였다. 시편의 형상은 앞

의 균열시편과 동일하다.

Fig. 10 ~ Fig. 12는 각각 탐촉자조합 45°-60°/2MHz, 45°-45°/4MHz, 60°-60°/4MHz로 실험한 결과를 나타내고 있다. 각 그림에서 신호②가 노치에서 회절된 횡파임을 그 전파속도를 계산해 봄으로써 알 수 있다. 신호①은 Lateral wave이고 신호

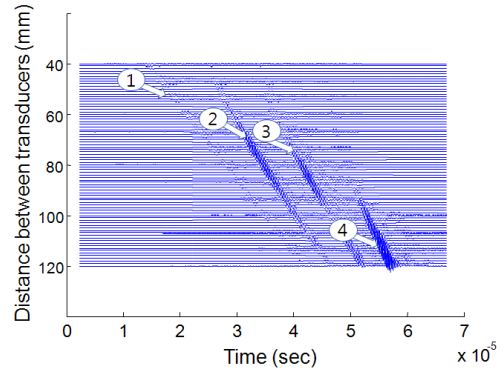


Fig. 10 Received signals obtained by scan of 45°-60°/2 MHz probes (no-crack specimen)

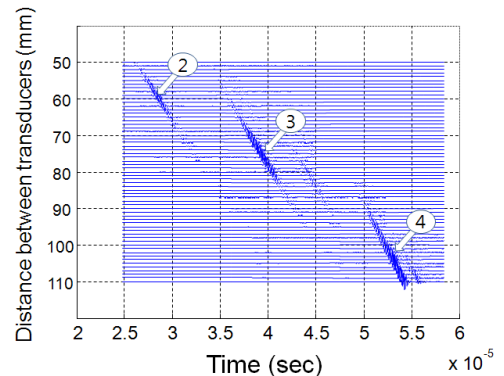


Fig. 11 Received signals obtained by scan of 45°-45°/4 MHz probes (no-crack specimen)

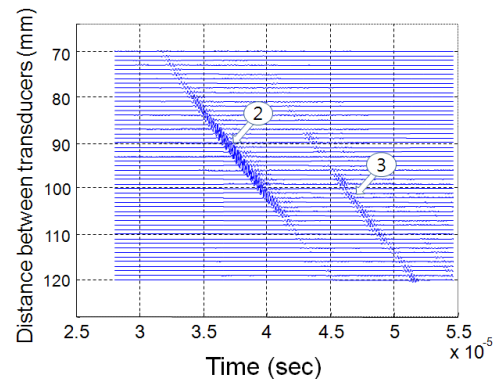


Fig. 12 Received signals obtained by scan of 60°-60°/4 MHz probes (no-crack specimen)

④는 저면 반사신호이다. 다만 신호③은 그 성분이 분명하지 않다. 이 신호의 성분규명을 위해 다음 절에서 별도로 신호의 크기와 전파시간을 이용하여 분석한다.

5.2. 신호의 성분분석

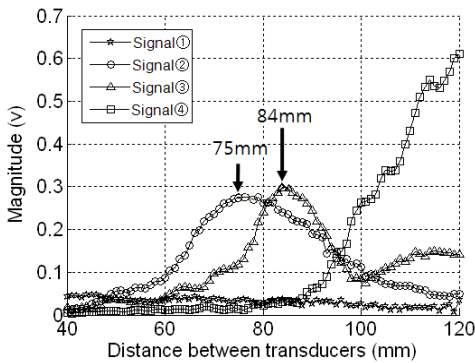
Fig. 13 ~ Fig. 15는 탐촉자 조합 45°-60°/2 MHz, 45°-45°/4 MHz, 60°-60°/4 MHz으로 실험했을 때 각 신호성분에서의 최대진폭과 그 전파시간의 변화를 나타내고 있다. 신호②, ③에 주목해보면 둘 다 뚜렷한 피크를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 60°-60°/4 MHz의 경우에는 신호③의 피크는 스캔 범위 밖에 존재한다. 그리고 신호③의 크기가 일정한 변화 추세를 나타내지 못한 것은 신호가 너무 작아서 거의 잡음레벨에 가깝기 때문이다.

한편 전파시간은 전파속도와 전파거리에 의해 달라지는데 신호②와 ③의 시간차는 약간 감소하는

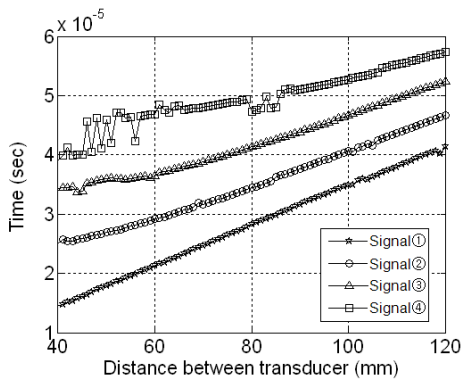
것처럼 보인다. 이를 보다 명확히 분석하기 위해 Fig. 16에 세 탐촉자 조합의 경우에 대해 신호②와 신호③의 전파시간 차이를 나타내었다. 굴절각 조합이 바뀌어도 전파시간 차이의 변화 경향과 변화량이 유사함을 알 수 있다.

이로부터 신호③은 신호②에서 일정한 거리 떨어진 회절과 발생 요소임을 예상할 수 있다. 가장 가능성이 높은 요소는 Fig. 17에 나타난 슬릿노치 밀단 b의 위치에서의 회절이다. 즉, 신호②가 슬릿노치 선단 a에서 회절된 성분이고, 신호③이 슬릿을 따라 전파한 후 슬릿노치 밀단 b에서 회절된 성분이다. 이를 확인하기 위해 다음과 같은 경로 분석을 실시하였다.

45°-45°/4 MHz조합으로 실험한 경우를 예를 들면 신호②는 탐촉자간 거리가 60 mm에서 가장 크고 신호③은 74 mm에서 가장 크게 수신되었다. 그리고 이들 피크점에서 신호②와 신호③의 시간차는 Fig. 16에서 각각 7.514  $\mu$ s, 7.015  $\mu$ s로 측정되었다.

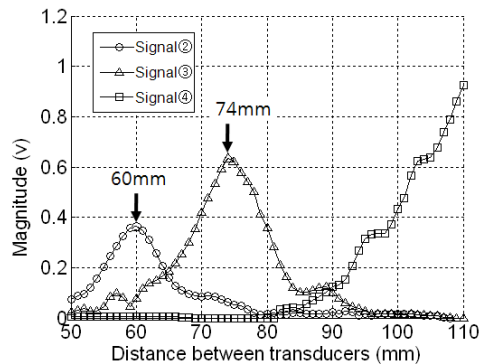


(a) magnitude

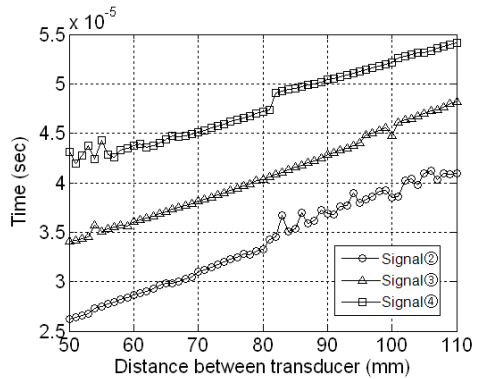


(b) arrival time

Fig. 13 Magnitude and arrival time of maximum amplitude for each signal shown in Fig. 10

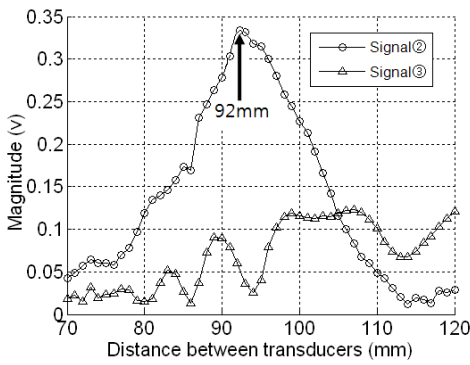


(a) magnitude

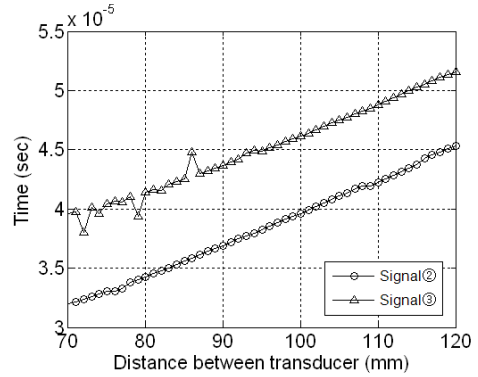


(b) arrival time

Fig. 14 Magnitude and arrival time of maximum amplitude for each signal shown in Fig. 11



(a) magnitude



(b) arrival time

Fig. 15 Magnitude and arrival time of maximum amplitude for each signal shown in Fig. 12

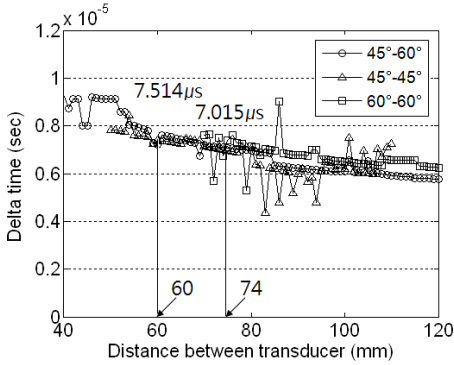


Fig. 16 Arrival time difference of maximum amplitudes in signal ② and ③ shown in Figs. 10—12

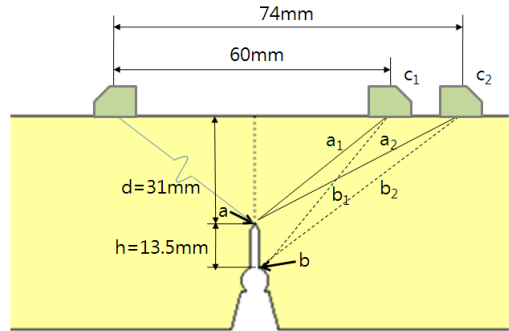


Fig. 17 Beam path of ultrasonic wave diffracted by slit notch tip (a) and end (b)

한편 Fig. 17에서 위치 a에서  $c_1$ 까지의 전파거리를  $\bar{a}_1$ ,  $c_2$ 까지의 전파거리를  $\bar{a}_2$ , 위치 b에서  $c_1$ 까지의 전파거리를  $\bar{b}_1$ ,  $c_2$ 까지의 전파거리를  $\bar{b}_2$ 라고 하고, a와 b사이의 거리를 h라고 하면, 60 mm지점에서 신호②와 신호③의 전파시간차는  $\bar{a}_1$ ,  $\bar{b}_1$ 의 경로차와 h 구간에서의 표면파 전파에 의해 발생하므로 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\frac{|\bar{a}_1 - \bar{b}_1|}{C_T} + \frac{h}{C_R} = 7.514\mu s \quad (5)$$

여기서  $C_T$ ,  $C_R$ 는 각각 횡파와 표면파의 전파속도를 나타낸다.

마찬가지로 74 mm지점에서는 식 (6)이 성립되어야 한다.

$$\frac{|\bar{a}_2 - \bar{b}_2|}{C_T} + \frac{h}{C_R} = 7.015\mu s \quad (6)$$

식 (5)와 (6)의 차는 다시 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\bar{a}_1 - \bar{b}_1| - |\bar{a}_2 - \bar{b}_2| \approx 1.57\text{mm} \quad (7)$$

여기서 횡파속도는 3150 m/s이다.

한편 Fig. 17의 기하학적 수치를 이용하여 식 (7)의 전파경로차를 직접 계산하면 약 1.77 mm가 된다. 이는 실험결과 1.57 mm와 잘 일치하는 것이며, 이로부터 신호③이 위치 b에서 회절된 성분임을 확인할 수 있다.

다음은 이와 같은 분석의 정당성을 확인하기 위해 상용 패키지 WavePro2000을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 18에 그 결과를 나타낸다. 상부에 나타난 경사 직선은 각각 송신탐촉자와 수신탐촉자의 위치를 나타낸다. 그림에서 (a)는 입사 횡파가 슬릿노치 선단(Fig. 17의 a점)에 도달하는 순간이고, (b)는 회절파의 진행과 진행파가 슬릿노



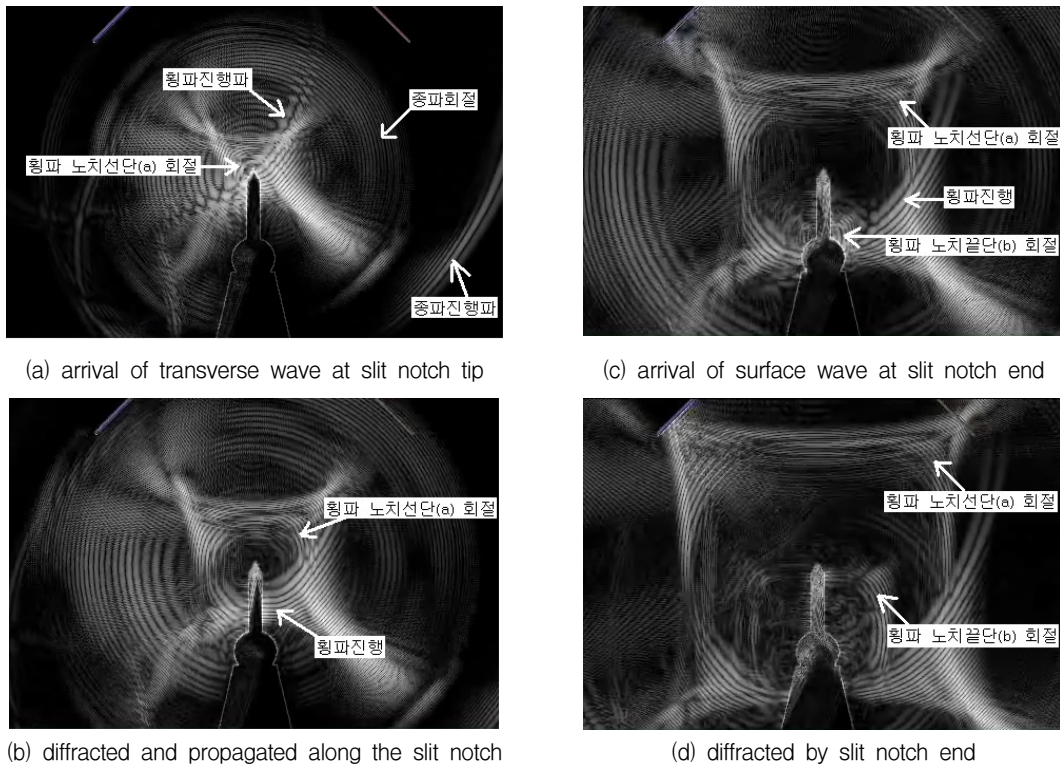


Fig. 18 Simulation results for ultrasonic wave propagation at notch used in this study

치를 따라 전파하는 과정을 보여준다. (c)는 슬릿노치 끝단 (Fig. 17의 b점)에서 다시 회절이 발생하는 것을 보여주고, (d)는 a와 b에서 발생한 회절파가 전파하는 과정을 보여준다.

이로부터 앞선 노치회절 성분에 대한 분석이 정당함을 확인할 수 있다. 아울러 균열에 대한 실험에서 노치 회절파라고 규정한 성분은 균열선단에서 균열을 따라 진행한 후 슬릿노치 선단에서 회절된 성분이라는 것도 간접적으로 확인할 수 있다.

### 5.3. 노치 깊이 평가

여기서는 노치를 균열이라고 간주하고 앞에서 제안한 균열깊이 측정원리를 적용하여 노치선단까지의 깊이를 구해 보았다.

식 (2)의 2S값은 Fig. 13~Fig. 15의 신호크기 그래프에서 슬릿노치 선단 회절파인 신호②의 피크 위치로부터 얻을 수 있는데, 세 탐촉자조합 45°-60°/2 MHz, 45°-45°/4 MHz, 60°-60°/4 MHz의 각각에 대해 75, 60, 92 mm이다. 이를 이용하여 깊이 d를

구하면 각각 31.52, 32.85, 31.38 mm가 된다. 이는 실제 탐상면으로부터 노치선단까지의 깊이 31 mm와 매우 유사한 값이며, 제안기법의 정당성을 재확인해 주는 결과라고 할 수 있다. 특히 2S 측정의 오차에 대한 민감도 측면에서 유리할 것으로 판정했던 60°-60°/4 MHz 탐촉자 조합의 경우 오차가 0.38 mm로 가장 정확하게 측정되었다.

### 6. 결론

본 연구에서는 초음파의 회절특성을 이용하여 노치 피로균열의 균열깊이를 평가하는 방법에 대해 검토하였으며, 알루미늄 CT피로시험편에 적용하여 그 타당성을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제안하는 방법은 균열선단이 송, 수신 탐촉자의 굴절각 방향에 위치할 때 회절파의 세기가 가장 강하다는 특징을 이용한 것으로 균열 선단부가 미세하여 회절파 세기가 미약하더라도 적용이 가능하다는 특징이 있다.

- 2) 실험에 사용된 시편은 균열 이외에 노치와 같은 또 다른 회절 요소가 존재하며 이들 성분을 경로분석을 통하여 규명할 수 있었다.
- 3) 미약한 회절신호의 성분규명을 위해 탐촉자 스캔결과의 영상화 처리가 효과적이었다.
- 4) 주파수가 클수록 그리고 탐촉자의 굴절각이 클수록 측정 오차가 적었고, 실험에서 사용된 4 MHz 60°-60° 탐촉자 조합의 경우 오차 0.38 mm 이내로 균열깊이가 측정되었다.

이상으로부터 제안한 기법의 유용성을 검증할 수 있었으며, 미세균열의 검사 및 깊이 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 제안한 기법은 궁극적으로 신호의 크기를 이용하는 것이기 때문에 측정의 정밀도를 높이려면 탐촉자와 시편 사이의 접촉조건을 일정하게 유지하여야 하고, 탐촉자 스캔의 정밀도가 높아야 한다. 실용화를 위해서는 이런 부분을 극복할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00496)

## 참고문헌

- [1] H. D. K. Tanaka, "Detection and measurement of cracks by UT techniques," JSNDI, Vol. 57, No. 3, pp. 119-123 (2008)
- [2] W. B. Kim, Y. H. Lee, Y. X. Moon and C. S. Kim, "Reactor vessel head penetration J-groove welds inspection by TOFD technique," Proceedings of the KWS Conference, June 23, pp. 185-187 (2005)
- [3] H. D. K. Chikuri, M. R. H. R. Fukushima, N. R. Y. K. Nagahama, Y. K. Nishiaki and T. D. S. Ishigaki, "Industrial applied techniques of ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) for various field targets," R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 57, No. 3, pp. 38-42 (2007)
- [4] H. S. Back, C. H. Jung, C. X. Kang, Y. H. Lee, B. X. Yon and Y. X. Kim, "A study on flaw detection for thick weldment using phased array TOFD technique," Proceedings of the KWS Conference, Oct 19, PP. 286-288 (2006)
- [5] C. J. Kim, J. G. Jeon and J. T. Kim, "Comparison of TOFD and radiographic testing for a mock-up specimen," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 1, pp. 64-69 (2008)
- [6] B. S. Yoon, Y. S. Kim, H. J. Lee and Y. H. Lee, "A study on TOFD inspection using phased array ultrasonic technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 25, No. 4, pp. 304-310 (2005)