

레이저 초음파와 Wavelet변환을 이용한 재료표면균열 평가

Evaluation of Surface-Breaking Crack Based on Laser-Generated Ultrasonics and Wavelet Transform

이민래*, 최상우*, 이준현**

Min-Rae Lee*, Sang-Woo Choi* and Joon-Hyun Lee**

초 록 비파괴 평가 기술들 중의 하나인 레이저 초음파 응용 기술은 각종 구조물에 존재하는 표면결함에 의한 신호를 통해 건전성을 평가하는 기법이다. 따라서 결함의 신뢰성 높은 정량적 평가를 위해서는 결함으로부터의 레이저 초음파 신호특성에 대한 기본적 이해가 필수적이며 따라서 이를 위한 신호해석 연구가 요구된다. 본 연구에서는 레이저 유도 초음파에 의한 one-sided 기법을 이용하여 표면균열을 평가하고자 하였다. 하지만 레이저를 이용한 평가방법들은 수신된 신호의 해석이 까다로우며 또한 상당한 전문적인 지식이 요구된다. 웨이블릿 변환(wavelet transform, WT) 기법은 신호처리 분야에서 하나의 새로운 방법으로서 다양한 분야에 적용되고 있으며 특히 한 시점에 대한 주파수 분해가 가능한 신호처리 방법으로서 시간-주파수 분석에 아주 유용하게 이용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 레이저 유도 초음파를 이용하여 재료의 표면 결함신호들에 대한 웨이블릿 변환기법을 적용하여 보다 정량적인 결함 크기를 예측하고 그 타당성을 평가하고자 하였다.

주요용어: 레이저 유도 초음파 기법, One-Sided 기법, 표면균열, 펄스 레이저, 웨이블릿 변환

Abstract Laser-generated ultrasonic technique which is one of the reliable nondestructive evaluation techniques has been applied to evaluate the integrity of structures by analyzing the characteristics of signal obtained from surface crack. Therefore, the signal analysis of the laser-generated ultrasonics is absolutely necessary for the accurate and quantitative estimation of the surface defects. In this study, one-sided measurement by laser-generated ultrasonic has been applied to evaluate the depth of the surface-breaking crack in the materials. However, since the ultrasonic waveform excited by pulse laser is very difficult to distinguish the defect signals, it is necessary to consider the signal analyses of the transient waveform. Wavelet Transform(WT) is a powerful tool for processing transient signals with temporally varying spectra that helps to resolve high and low frequency transient components effectively. In this paper, the analyses of the surface-breaking crack of the ultrasonic signal excited by pulse laser are presented by employing the WT analyses.

Keywords: laser-generated ultrasonic technique, one-sided measurement, surface-breaking crack, pulse laser, wavelet transform

1. 서 론

광학기술과 관련하여 레이저의 응용범위가 확대됨에

따라 최근 국내에서도 레이저 응용기술에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 구조물의 안전성평가와 관련하여 비파괴 평가방법 중에서 비접촉 방법의 평가기술

에 대한 관심이 고조되면서 레이저를 이용한 평가방법의 필요성이 증대되고 있다. 즉 피검체가 고온의 상태이거나 직접적인 접근이 불가능한 구조물의 경우 비접촉식의 평가 방법은 필수적이다[1-3]. 그러나 비접촉식 방법의 경우 접촉식에 비해 수신감도가 상당히 떨어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 레이저 유도초음파(laser-generated ultrasonics)[4]를 이용한 one-sided 기법을 통하여 레이저 유도 초음파 발생부의 비접촉식 발생원과 수신부의 감도를 높이기 위하여 접촉식 PZT 트랜스듀스를 이용하여 재료의 표면균열[5](surface-breaking crack) 크기를 평가하고자 하였다.

한편 대부분의 경우 재료에 작용하는 응력은 재료의 표면에서 최대로 작용하기 때문에 재료의 표면균열 및 성장거동은 실제로 파단을 유발시키는 가장 큰 요인이 된다. 특히 고강도 재료나 취성이 강한 세라믹재료의 경우 표면결함에 매우 취약하며, 따라서 재료가 파단에 이르기 전에 이러한 표면균열을 조기에 검출하는 것이 필수적이다. 일반적으로 재료의 균열진전 및 크기 측정에는 초음파 기법[6]이 주로 이용되고 있지만 트랜스듀스와 피검체 사이의 커플런트(couplant) 문제나 재료가 고온인 경우에는 실제 적용하기 많은 제약이 따른다. 이를 위하여 본 연구에서는 레이저 유도 초음파 기법을 이용하여 재료의 표면균열크기 등을 평가하고자 하였다. 한편, 레이저 유도 초음파 기법은 레이저 펄스를 재료의 표면에 조사시켜 이때 발생하는 열팽창 즉 열원(thermal elastic source)에 의해 발생하는 초음파현상을 이용하여 결합해석 뿐만 아니라 재료의 열적, 광학적, 탄성적인 특성들을 평가하는 방법으로서, 검사체의 한쪽면에 비접촉으로 레이저를 조사하여 재료내부에 초음파를 발생시키고 레이저 간섭계 및 PZT 트랜스듀스를 이용하여 초음파 신호를 수신함으로써 재료 특성을 규명하는 평가방법이다. 이러한 레이저를 이용한 one-sided 기법[7]은 검사대상면의 반대쪽으로는 접근이 곤란한 구조물이나 검사 대상물 이외의 표면형상이 불규칙하고 재료내부에서의 전파되는 초음파 감쇠가 심하여 초음파 투과법(through transmission)이나 펄스-에코(pulse-echo)법을 적용할 수 없는 경우에 매우 유용하며 특히 기존의 슬레노이드나 강철구 낙하(steel ball drop)을 이용한 one-sided 기법[8]에 비해서 일정한 강도의 탄성파를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 레이저 발생장치의 Q-switch 트리거(trigger)에 의해서 신호의 동기시점을 잡을 수 있으므로 보다 정확한 표면종파(creeeping wave) 및 표면파(rayleigh wave) 신호를 획득 할 수 있다.

그럼에도 불구하고 여전히 레이저를 이용한 평가방법

들은 수신된 신호의 해석이 까다로우며 또한 상당한 전문적인 지식이 요구된다. 일반적으로 레이저 유도 초음파 결합신호는 레이저 간섭계 혹은 트랜스듀스의 중심 주파수에서 조절되는 광대역(broad band) 펄스이며 이때 전파되는 신호는 시간과 주파수에 의해서 제한된다.

일반적으로 이와 같은 펄스파형의 시간 영역의 데이터를 주파수 영역의 데이터로 변환하는 데는 고속 푸리에변환(fast-Fourier transform, FFT)[9]에 의한 신호처리 기법이 사용되고 있지만 이는 시간영역에서 국부적인 신호의 변화가 전체 주파수 영역으로 나타나기 때문에 국부적인 시간영역에서의 해석이 어려운 단점이 있다. 한편 시간-주파수 영역 해석은 파형 데이터를 분해하여 시간과 주파수의 2차원 평면상에 파형 에너지의 분포를 구하는 해석방법으로 단시간 푸리에변환(short-time Fourier transform, STFT)[9]이나 Wigner-Ville 분포[9] 등의 시간-주파수해석법이 주로 이용된다. 이들 기법들은 재료내의 초음파 결합신호의 시간과 주파수의 특성을 동시에 나타낼 수 있어 탄성파의 전파거동을 각 주파수성분마다 분해할 수 있기 때문에 분산관계를 용이하게 해석할 수가 있다. 그러나 STFT나 Wigner-Ville 분포의 경우는 광범위한 주파수 해석에 제한이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위한 새로운 신호처리방법으로서 웨이블릿 변환(wavelet transform, WT) 기법[9]이 시간-주파수 해석에 아주 유용하게 이용되고 있다[10].

본 연구에서는 이러한 레이저 유도 초음파를 이용하여 재료의 표면 결합신호들에 대한 웨이블릿 변환(WT) 기법을 적용하여 보다 정량적인 결합 크기를 예측하고 그 타당성을 평가하고자 하였다.

2. 기본이론

2.1. Wavelet 변환

웨이블릿 변환(WT)은 주파수 내의 창으로 변환하기 위한 시간 영역 내의 조정이 용이한 점이 단시간 푸리에 변환(STFT)와 유사하지만, 웨이블릿 변환은 주파수 내의 단일 함수를 판단하기 위해 시간 영역 내에서 스케일링(scaling)을 사용한다. 이 함수를 일반적으로 모더 웨이블릿(mother wavelet) $h(t)$ 라고 하며 함수(square integral signal) $s(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의된다[11].

$$w_s(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) h_{a,b}^*(t) dt \quad (1a)$$

그리고

$$h_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}k} \left[\frac{(t-b)}{a} \right] \quad (1b)$$

여기서, 기호 *는 공액 복소수를 의미하며, $a(>0)$ 와 b 는 각각 주파수의 자연 scale과 시간 변위를 나타낸다. 한편 R 는 기본 웨이블렛 함수(mother wavelet)로서 Gaussian 창함수를 씌운 복소수 사인(sine)형태의 함수로서 다음과 같다.

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{r} \exp \left[-\frac{(\omega_0/r)^2}{2} t^2 \right] \exp(i\omega_0 t) \quad (2)$$

여기서, ω_0 , r 는 양의 상수이며, 이때 웨이블렛 함수는 발산하지 않고 일정한 영역의 값을 가져야 하므로 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|h(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (3)$$

여기서, $w=2\pi f$ 는 각(angular)주파수이며, $h(w)$ 는 mother wavelet R 의 Fourier 변환이다. 한편 본 연구에서 사용한 Gabor함수 r 는 중심시간이 $t=0$ 이고 중심 주파수가 $w=\omega_0$ 이며 $h(\frac{t-b}{a})$ 는 중심시간이 $t=b$ 이고 중심 주파수가 $w=\omega_0/a$ 가 된다. 여기서, 이산화된 a 와 b 값은 다음 식 (4)와 같이 주어진다.

$$a = 2^{m/4}, \quad b = n\Delta T \quad (4)$$

여기서 m , n 는 정수이고 ΔT 는 시간 이동간격이다. 즉 주파수 분해간격은 2의 지수승으로 증가되며 주파수 분해간격을 줄이기 위해서는 4보다 큰 값으로 m 을 나누어주면 된다.

2.2. One-Sided 기법

One-sided 기법은 검사대상면의 반대쪽으로는 접근이 곤란한 구조물이나 검사 대상물 이외의 표면형상이 불규칙하고 재료내부에서의 전파되는 초음파 감쇠가 심하여 초음파 투과법(through transmission)이나 펄스-에코(pulse-echo)법을 적용할 수 없는 경우에 매우 유용한 방법이다. 기존의 one-sided 기법은 슬레노이드나 강철구 낙하(steel ball drop)를 이용하여 재료표면에 충격을 가하여 탄성파를 발생시키고 이때 재료의 표면을 따라서

전파하는 탄성파를 센서를 통해서 수신하여 그 신호를 분석함으로써 재료의 특성을 평가하였다. 그러나 이러한 기계적인 장치(슬레노이드, 강철구 낙하)들은 전기적인 노이즈 문제나 일정한 강도의 탄성파를 발생시키기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 기존의 탄성파 발생원 대신하여 Nd : YAG 펄스레이저를 재료표면에 조사하여 탄성파를 발생시켰다. 즉 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 재료표면에 레이저 빔이 조사되면 표면에 순간적으로 열팽창 즉 열응력이 발생하게 되고 이것이 열탄성(thermal elastic)파로 전파하게된다. 이러한 레이저를 이용한 one-sided 기법은 레이저 발생장치의 Q-switch 트리거(trigger)에 의해서 신호의 동기시점을 잡을 수 있으므로 보다 정확한 표면종파(creeping wave) 및 표면파(rayleigh wave)신호를 획득 할 수 있다.

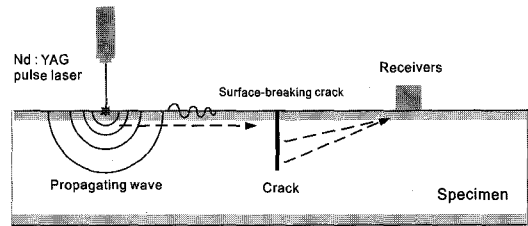


Fig. 1 The one-sided measurement arrangement

한편, 본 연구에서는 표면결함신호를 측정하기 위하여 신호도달시간차(time-of-flight) 기법을 이용하였다. Fig. 2(a)는 표면결함이 없는 경우에 일반적인 파의 전파경로를 나타낸 그림이다. 결함이 있는 경우는(Fig. 2(b)) 재료의 표면을 따라서 표면종파(surface-skimming, P)가 전파되며 또한 시험편의 저면 에코 반사 종파(reflected compression wave, PP)가 도달하기 전에 크랙선단을 통해서 회절종파(diffracted compression wave, dPP)가 전파된다. 만일 재료표면의 트랜스미터(transmitter)와 리시버(receiver) 사이에 표면균열(surface-breaking crack)이 존재할 경우에는 표면종파(surface-skimming wave)성분은 소멸되며, 이 경우에 크랙 선단의 위치를 정확히 평가하기 위해서 각 위치에서의 회절종파의 도달시간을 이용하여 평가하였다. 즉, 크랙선단에서의 회절종파 도달시간은 다음과 같은 식으로 주어진다.

회절종파(diffracted compression wave)도달시간, T_{dpp}

$$T_{dpp} = [(x^2 + z^2)^{1/2} + [(x_0 - x)^2 + z^2]^{1/2}] / c_1 \quad (5)$$

표면종파(surface-skimming compression wave)도달시간, T_b

$$T_b = x_0/c_1 \quad (6)$$

저면에코 반사종파(back-wall echo reflected compression wave)도달시간, T_{bb}

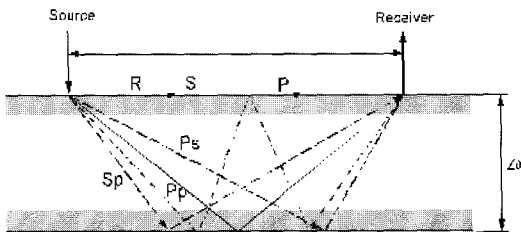
$$T_{bb} = [(x_0^2 + 4z_0^2)^{1/2}] / c_1 \quad (7)$$

여기서, c_1 은 종파속도(compression wave speed)

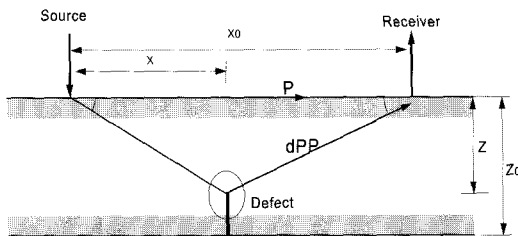
3. 재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 시험편은 일반구조용강(SM400)으로 비교적 두꺼운(50mm) 강판을 이용하였으며, 표면결함에 따른 레이저 유도 초음파 신호특성을 평가하기 위하여 시험편에 각각 0mm, 5mm, 10mm, 20mm, 30mm의 슬릿홈을 가공하였다.

Fig. 3은 레이저 유도 초음파를 이용한 one-sided 기법을 나타낸 전체적인 실험 개요도이다. 실험은 표면균열이 재료 표면에 내재되어 있는 경우와 재료 저면에 있는 경우에 대해서 각각 실험하였다. 먼저 재료 내부에 레이저가 조사되면 재료내부에 탄성파가 발생된다. 이때 레이저 열원에 의한 시험편의 표면손상을 최소화하기 위하여 레이저 발생에너지는 80mJ-150mJ의 범위 내에서 사용하였다.



(a) Wave arrivals in parallel plate



(b) Wave arrivals diffracted by tip of defect

Fig. 2 The wave propagation arrangement for the time-of-flight technique

레이저 조사지점과 첫 번째 수신센서간의 거리는 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 20mm로 고정하였으며 수신센서간의 거리는 60mm, 표면균열과 각 센서간의 거리는 30mm로 하여 실험을 수행하였다.

한편 유도 초음파 수신신호 측정은 PZT 타입의 AE센서를 사용하였으며 주파수 특성 및 수신민감도를 분석하기 위해서 공진 주파수가 각기 다른 4개의 AE센서(R6, R15, Micro 30, WD)를 이용하였다. AE측정은 시험편의 가장자리에 AE 센서를 부착하였으며, AE 센서의 수신감도를 높이기 위해서 시험편에 커플링(coupling agent, Krautkramer社)을 바른 후 접착테이프로 압착하였다. 그리고 기계적 잡음과 같은 불필요한 주변 잡음(background noise)을 제거시키기 위하여 프리앰프(1220A)에서 100-12000kHz의 대역필터 (band pass filter)를 사용하여 필터링 시켰으며 표면결함에 따른 AE신호에 대한 파형 분석을 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310)를 이용하여 100MHz로 샘플링한 후 모두 100개의 데이터를 값을 평균(time averaging)하여 각각의 결합신호를 측정하였다. Table 1은 사용된 AE센서의 재원 및 각 센서의 사용주파수를 나타낸 것이며, Table 2는 시험편의 재원 및 균열크기를 나타낸 것이다. Fig. 4는 시험편의 형상 및 크기를 나타내었다.

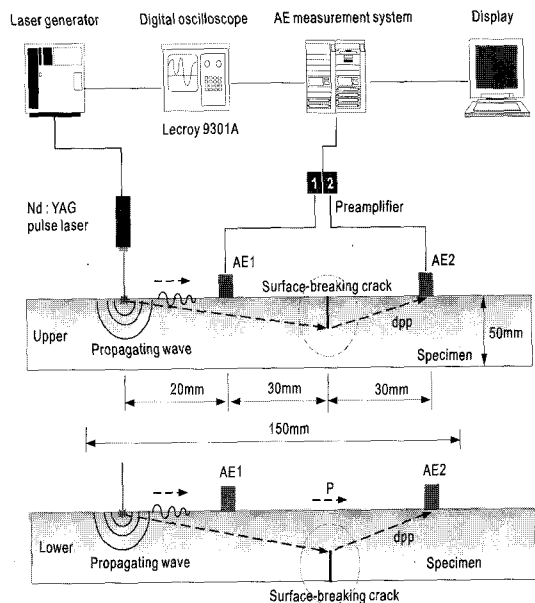


Fig. 3 Experimental set-up for one-sided measurement by the laser-generated ultrasonics

Table 1 Dimension and operating frequency of the AE sensors

Type	Center Frequency	Bandwidth	Dimension
R6	60kHz	30-100kHz	∅ 18mm
R15	150kHz	50-200kHz	∅ 18mm
Micro-30	25/225kHz	100-600kHz	∅ 5mm
WD	650kHz	100-1000kHz	∅ 18mm

Table 2 The specification of the test specimen

Specimen	일반구조용강(SM 400)			
Width	150 × × × 150mm			
Thickness	50mm			
Crack width	0.3mm			
Crack depth	5mm	10mm	20mm	30mm

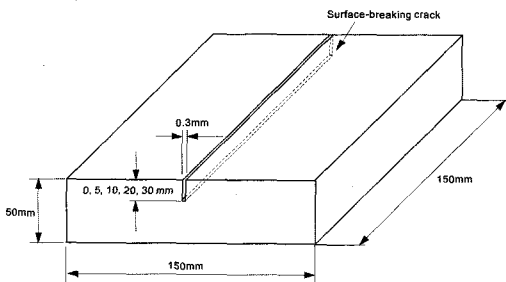


Fig. 4 The dimension of the specimen

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 레이저 초음파 적용 예

레이저 조사에 의해 발생된 탄성파는 시험편의 표면 및 내부에서 모든 방향으로 전파된다. Fig. 5는 AE센서로 측정된 시간영역에서의 레이저 조사에 의한 표면 균열이 없는 시험편인 경우에 대한 일반적인 파형을 나타내고 있다. 수신된 신호는 시험편의 저면에서의 반사파 성분을

줄이고 시편 경계면에서 발생되어지는 변이된 파형의 성분들을 줄이기 위하여 100MHz로 샘플링한 후 50μsec 구간만 모두 100개의 데이터 값을 취하여 평균(time averaging)하여 각각의 결합신호를 측정하였다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이, 가장 먼저 도달하는 신호는 레이저 발생기의 Q-switch trigger에서 발생한 신호이며 약 5Rsec 부근의 신호는 표면종파(surface-skimming P-wave or creeping wave)성분을 나타낸다. 그리고 10μsec 부근에서 표면파(rayleigh wave)성분이 나타나고 있다. 한편 Fig. 6은 동일 시험편에 대해서 5MHz 종파 탐촉자를 이용하여 펄스-에코법으로 속도를 측정할 파형을 나타내고 있다. one-sided기법을 이용한 표면종파 속도값(5943m/s)과 비교해 보면 펄스-에코법으로 측정된 종파속도 결과값(5907m/s)과 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 Fig. 7은 각 센서에 대한 신호의 수신감도를 측정

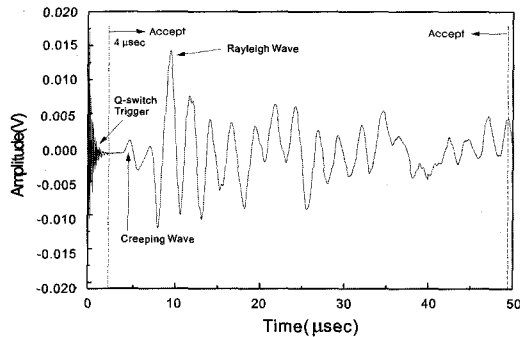


Fig. 5 Typical signals obtained by one-sided method using the laser generated ultrasonics(creeping wave: 5943m/s, rayleigh wave: 3035m/s)

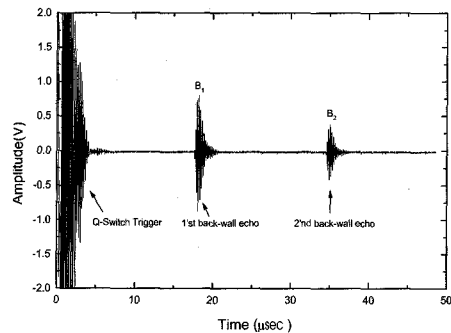


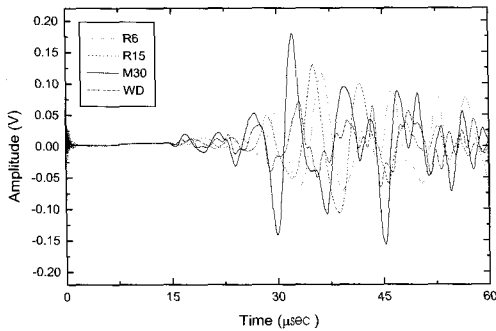
Fig. 6 Typical signals obtained by pulse-echo method using 5MHz longitudinal transducer (longitudinal wave: 5907m/s, surface wave: 3243m/s)

하기 위해서 표면균열크기가 5mm인 동일시편에서의 결합 수신 파형 및 주파수(FFT) 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이(Fig. 7 (a)), 센서의 중심주파수가 고주파일수록 수신감도가 떨어지는 경향이 나타남을 알 수 있으며 본 경우에 있어서는 4개의 센서 중 micro-30센서의 수신파형이 가장 민감하게 나타남을 알 수 있다. 주파수 진폭 또한 Fig. 7 (b)에서 보는 바와 같이 micro-30센서가 가장 민감하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 micro-30센서를 사용하여 실험을 수행하였다.

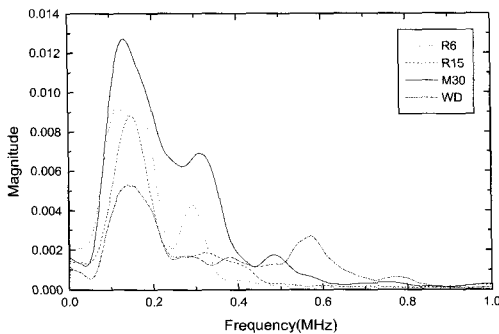
한편 Fig. 8은 표면균열이 있는 경우에 대한 시간영역에서의 표면균열 신호를 나타낸 결과이다. Fig. 8(a)는 표면균열이 시험편 상부표면(upper crack)에 있는 경우에 균열깊이 5mm에 대한 신호 측정결과이다. 그림에 나타난 바와 같이, 각 센서(S1, S2)에서의 수신된 파형의 첫 번째 피크(peak)는 레이저 조사에 의해서 균열 선단으로부터 수신된 종파성분으로서 회절종파(diffracted P-wave) 성분이 가장 먼저 도달되고 이후에 따라오는 표면파

(rayleigh wave) 성분이 수신됨을 알 수 있다. 한편, 이 경우에 있어서는 표면 개구균열에 의해서 표면종파(surface-skimming P-wave)성분은 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 앞선 경우(Fig. 8(a))와 동일시편에 대해서 표면균열이 시험편 저면(lower crack)에 있는 경우에 수신된 파형을 나타내고 있다. 이 경우에는 앞선 결과(Fig. 8(a))와는 달리 레이저 조사에 의해서 표면을 따라서 표면종파(surface-skimming P-wave)성분이 가장 먼저 도달하고 그 다음 시편 내부의 균열 선단으로부터 회절종파가 도달하며 마지막으로 표면파(rayleigh wave)가 도달함을 알 수 있다.

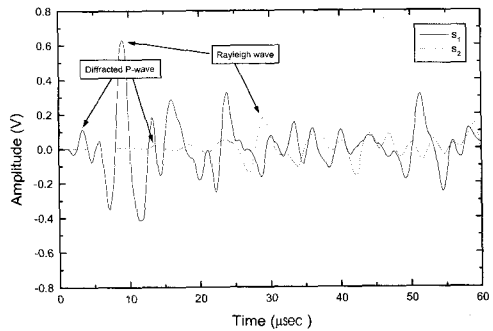
Fig. 9는 동일한 레이저 조사지점으로부터 균열깊이가 다른 각각의 상부균열 및 하부균열시험편에서 수신한 파형을 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 균열이 없는 시험편에서 수신된 파형과 균열깊이가 5, 10, 20, 30mm로 증가할 때 수신된 각각의 신호를 비교해 보면 하부균열시험편보다 상부균열시험편의 경우에 균열깊이



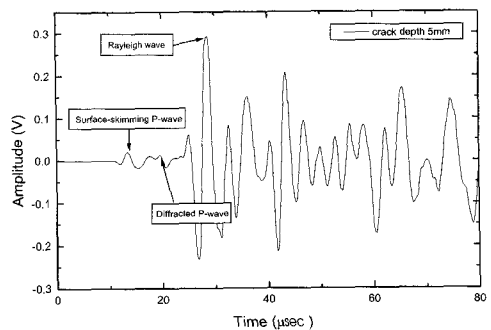
(a) Waveforms for each sensors



(b) FFT



(a) Typical waveform collected from upper crack



(b) Typical waveform collected from lower crack

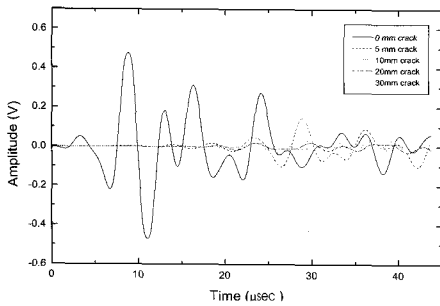
Fig. 7 The result of sensitivity for each AE sensors

Fig. 8 Typical waveforms collected from each receiver

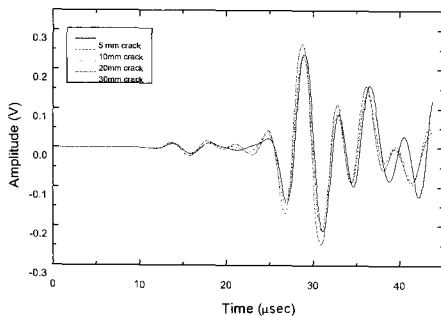
에 따른 회절종파성분이 더 명확하게 나타남을 알 수 있다. 또한 실제로 상부균열시험편이 하부균열시험편보다 동일 균열깊이에 대한 오차가 더 낮게 나타났다. 이는 레이저 조사에 의한 열탄성파가 일반 솔레노이드나 타격봉에 의한 충격파와는 달리 재료 저면직하보다는 표면에서 일정한 각도의 지향성을 가지고 전파된다는 사실에 기인함을 확인할 수 가 있다. 본 경우에 있어서는 레이저 초음파에 의한 균열측정의 경우 균열이 재료 저면이나 내부에 내재되어 있는 것보다 재료 표면에 존재하는 경우에 더 유용함을 알 수 있다.

Fig. 10은 각각의 균열깊이에 따른 에코신호에 대해서 FFT변환한 결과를 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 상부균열시험편에서 수신된 신호의 FFT결과이다. 균열 깊이가 5, 10, 20, 30mm로 증가할 때 수신된 각각의 신호의 진폭값은 균열이 증가할수록 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이는 입사레이저 회절종파 성분이 균열 깊이가 깊어질수록 입사된 표면과 에너지가 균열 선단과 표면에 수직인 균열면에 의해 거의 소실되고 또한 전파거리가

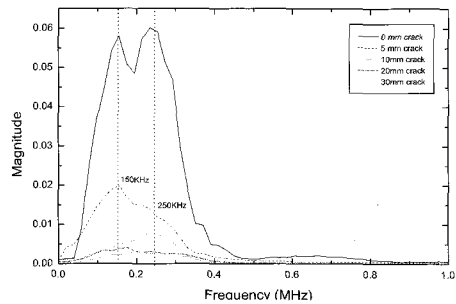
길어짐에 따라 에너지 손실이 훨씬 더 증가하기 때문이다. 또한 Fig. 10(b)의 하부균열시험편에서 수신된 신호의 진폭값을 살펴보면, 균열깊이가 감소할수록 전파거리는 증가하게 되므로 상부균열시험편에서와 마찬가지로 전파거리가 증가할수록 전파에너지가 역시 감소함을 알 수 있다. 한편 표면균열깊이에 따른 주파수 특성을 살펴보면, Fig. 10(a)와 같이 상부균열시험편에서 표면균열이 없는 경우는 주파수 특성이 중심주파수가 150kHz와 250kHz의 특성을 나타내고 있으며 균열깊이가 증가할수록 즉 전파거리가 증가할수록 저주파수에 비해 고주파수 성분(250kHz)이 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이는 250kHz 부근의 고주파수 성분은 상대적으로 150kHz이하의 주파수 성분에 비하여 파장이 짧기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 균열 선단과 표면에 수직한 균열면에서 반사되는 부분이 발생되어진다. 따라서 균열을 통해서 탄성파가 직접적으로 전파하는 부분이 저주파수 성분에 비해서 줄어들게 되면서 전파에너지가 저주파수 성분에 비해서 훨씬 더 많은 손실이 유발됨을 알 수 있다. 한편 하부균열시험



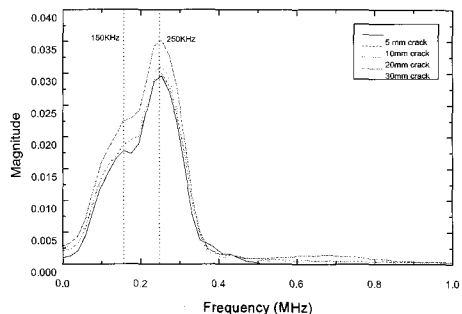
(a) Typical signals resulting from upper crack



(b) Typical signals resulting from lower crack



(a) FFT spectrums of the each upper crack



(b) FFT spectrums of the each lower crack

Fig. 9 The resulting waveforms collected from each receiver

Fig. 10 The FFT spectrums of the each crack

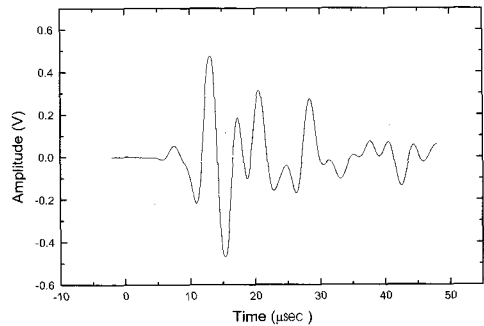
편의 경우(Fig. 10(b))는 150kHz 보다 250kHz에서 뚜렷한 주파수 특성을 나타내고 있다. 하지만 이 경우에는 표면균열이 감소할수록 회절종파 전파거리가 증가하면서 고주파수 성분(250kHz)은 감소하고 저주파수 성분(150kHz)은 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 표면균열이 시험편 저면에 있기 때문에 회절종파 성분이 균열 선단에서 소실되는 부분이 상부표면 균열시험편 보다 균열선단과 균열면에 대한 영향을 훨씬 적게 받기 때문인 것으로 사료된다.

4.2. 웨이블릿 변환기법 적용 예

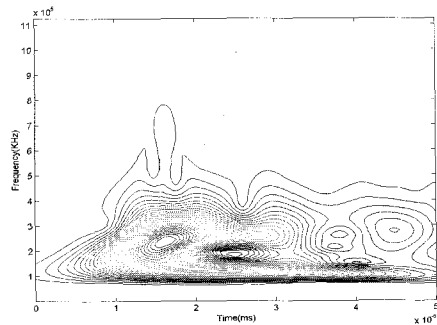
레이저 초음파를 이용한 one-sided기법은 일정한 강도의 탄성파를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 레이저 발생 장치의 Q-switch trigger에 의해서 신호의 동기시점을 잡을 수 있으므로 보다 정확한 표면종파 및 표면파 신호를 획득 할 수 있음에도 불구하고 수신된 신호의 해석이 까다로우며 또한 상당한 전문적인 지식이 요구된다. 일반적으로 레이저 유도 초음파 결합신호는 레이저 간섭계 혹은 트랜스듀스의 중심 주파수에서 조절되는 광대역(broad band) 펄스이다. 그러므로 이때 전파되는 신호는 시간과 주파수에 의해서 제한되므로 결국 시간-주파수 영역 해석은 재료내의 초음파 결합신호의 시간과 주파수의 특성을 동시에 나타낼 수 있다. 웨이블릿 변환기법은 한 시점에 대한 주파수 분해가 가능한 신호처리 방법으로 이러한 시간-주파수 분석에 아주 유용하게 이용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 레이저 유도 초음파를 이용하여 재료의 표면 결함신호들에 대한 웨이블릿 변환기법을 적용하여 보다 정량적인 결함 크기를 예측하고 그 타당성을 평가하고자 하였다. Fig. 11(a)는 균열이 없는 건전재의 경우에 레이저 초음파에 의한 전형적인 에코 파형을 나타내고 있으며, Fig. 11(b)는 시간영역의 파형을 웨이블릿 변환에 의한 시간축과 주파수축에 대한 contour plot 및 Fig. 11(c)는 웨이블릿 변환결과를 나타내고 있다. 한편 각 각의 균열깊이에 따라 검출된 파형은 앞서 언급한 바와 같이 특정 주파수(150kHz, 250kHz)성분에 대해서 각 각 웨이블릿 계산을 수행하였으며 이들 결과들을 이용하여 초음파 전파속도를 구한 결과값과 앞의 웨이블릿을 적용하지 않은 에코 파형을 이용한 경우의 회절종파속도 분산성과 비교하였다.

Fig. 12는 time-of-flight기법을 사용하여 레이저 조사에 의한 조사점(source)과 표면 균열 및 센서간의 측정된 에코 신호를 이용하여 측정된 시험편의 회절종파속도를 나

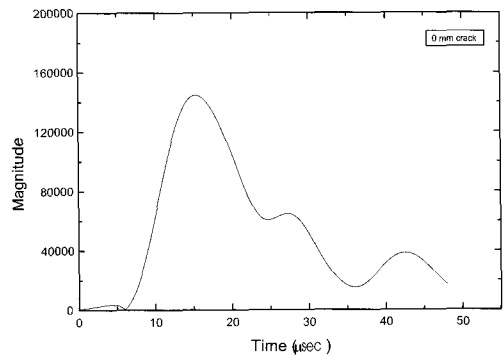
타낸 결과이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 상부 표면 균열시험편의 경우와 하부 표면균열시험편의 경우에 있어서 모두 회절종파 속도값이 전파경로가 증가함에 따라서 속도도 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 균열깊이에 따라서 레이저 조사에 의한 초음파 경로가 증가함에



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 (a) laser-generated ultrasonic echo waveform (b) contour plot and (c) wavelet transform

따라서 속도 역시 증가하였으며 이는 실제 종파성분이 균열선단에서 회절되어 전파되는 경우는 전파속도가 전파경로(거리)에 따라서 분산성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 레이저 초음파를 이용한 표면균열크기(깊이) 평가시 회절종파성분을 이용하여 균열평가가 유용함에도 불구하고 여전히 이와 같은 재료의 두께에 따른 분산성을 배제할 수 없으며 이러한 현상에 대해서 추후 보완적인 연구 검토가 필요하다.

한편 Fig. 13은 각 시편(상부균열 및 하부균열시편)에 대해서 시간영역의 결합 예코 신호를 시간-주파수 영역의 웨이블릿 변환을 이용하여 계산된 회절종파속도를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 앞선 Fig. 12의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있지만 표면균열깊이 즉 전파경로에 따른 회절종파속도의 분산성은 웨이블릿을 이용하여 측정된 결과값의 분산이 다소 적게 나타남을 알 수 있다. 그리고 Fig. 14에서 균열깊이에 따른 상,하부

표면균열 시편에 대해서 실제로 평가된 균열크기 오차를 살펴보면, 웨이블릿을 이용한 균열평가 결과값이 시간영역의 예코 파형을 이용한 결과값보다 오차가 적게 나타났다. 또한 상부 표면 균열 시편의 경우에 하부 표면균열 시편의 경우보다 오차가 더 적었다. 이는 특정 주파수 성분(150, 250kHz)에 대한 웨이블릿을 통하여 보다 정확한 균열평가가 가능함을 알 수 있다. Table 3, 4에 각 시편에서의 균열크기에 대한 실제 평가된 오차를 나타내었다.

따라서 본 연구에서는 재료 내부의 레이저 초음파 전파거리가 동일하더라도 표면균열이 레이저 조사와 반대 표면에 있는 경우보다 레이저 조사 표면에 있는 경우에 회절종파성분이 보다 정확하게 측정되었다. 이는 레이저 조사에 의한 열탄성파가 일반 충격파와는 달리 표면 부근에서 일정한 각도의 지향성을 가지고 전파된다는 사실에 기인함을 확인할 수 가 있었다. 따라서 접근이 어려운 어떠한 대상체 표면에서 표면균열진단을 위한 한 방법으로서

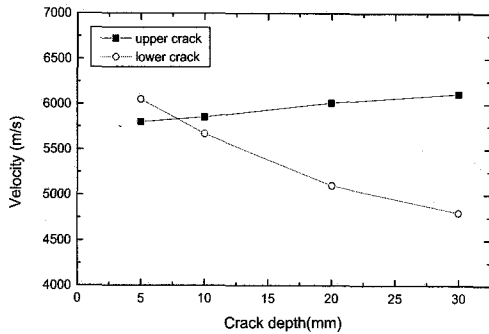


Fig. 12 The diffracted P-wave velocity variation following to the crack depth by echo waveform

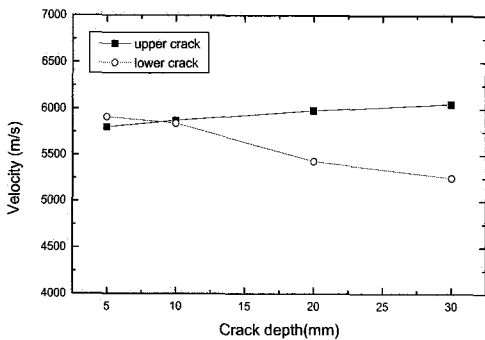
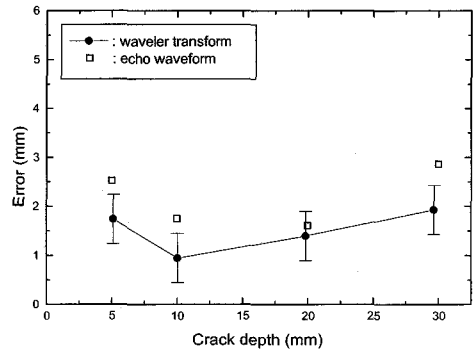
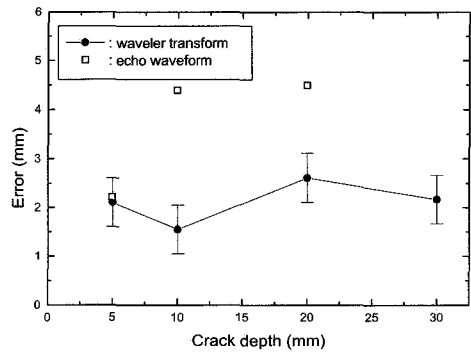


Fig. 13 The diffracted P-wave velocity variations for each crack depth by wavelet transform



(a) upper crack



(b) lower crack

Fig. 14 The error value variation following to the crack depth by echo waveform and wavelet transform

Table 3 The summary of error value and arrival time different form each crack depth by each waveform

	distance S(mm)	arrival time $\Delta t_{pp}(\mu\text{sec})$	error(mm)
upper crack			
c5 mm	80.66	14.01	2.52
c10mm	82.61	14.20	1.75
c20mm	89.91	14.86	1.61
c30mm	100.74	16.48	2.86
lower crack			
c5 mm	121.35	20.04	2.29
c10mm	114.03	19.97	4.47
c20mm	100.74	19.54	4.57
c30mm	89.91		

Table 4 The summary of error value and arrival time different form each crack depth by wavelet transform

	distance S(mm)	arrival time $\Delta t_{pp}(\mu\text{sec})$	error(mm)
upper crack			
c5 mm	80.66	13.9	1.92
c10mm	82.61	14.1	1.13
c20mm	89.91	15.4	1.58
c30mm	100.74	16.6	2.11
lower crack			
c5 mm	121.35	21.25	2.11
c10mm	114.03	19.45	1.55
c20mm	100.74	17.4	2.61
c30mm	89.91	15.5	2.17

레이저를 이용한 one-sided 기법을 표면균열평가를 위해서는 레이저 조사점과 센서와의 수신거리에 따른 회절종파성분을 이용함으로써 평가가 가능함을 확인하였다. 또한 보다 정확한 평가를 위해서는 회절종파성분의 분산성을 고려하여 레이저 조사점과 센서와의 거리를 최적화함으로써 보다 정량적인 측정이 가능하리라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 레이저 유도 초음파를 이용한 one-sided 기법을 통하여 표면균열깊이에 따른 자유표면에서의 재료 내부균열 검출 가능성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 재료의 상부 표면 및 저면으로부터 균열깊이가 증가함에 따라서 균열 선단으로부터 종파(회절종파)의 성분이 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있었으며, 표면균열이 레이저 조사와 반대표면에 있는 경우보다 레이저 조사 표면에 있는 경우에 회절종파성분이 보다 정확하게 측정되었다. 이는 레이저 조사에 의한 열탄성파가 일반 충격파와는 달리 표면 부근에서 일정한 각도의 지향성을 가지고 전파된다는 사실에 기인함을 확인할 수 가 있었다. 이러한 열탄성파의 지향성은 재료표면에서 보다 민감하게 나타남을 알 수 있었으며 이는 재료 표층부 결합평가에 아주 유용한 방법으로 판단된다.

본 연구에서 특히 웨이블렛 변환을 이용한 시간-주파수해석결과 즉, 150kHz와 250kHz에 대한 주파수해석결과 표면균열이 저면에 있는 경우에 있어서 균열크기를 보다 정량적으로 평가할 수 있었으며 이는 향후 레이저 간섭계를 이용한 복잡한 신호특성을 평가하는데 유용하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-041-E00044).

참고문헌

- [1] 최상우, 이준현, "레이저 유도 표면 탄성파를 이용한 비파괴 평가", 비파괴검사학회 2000년도 춘계학술발표회, pp. 332-341, (2000)
- [2] 김경조, 장영영, "마이켈슨 간섭계를 이용한 레이저 여기 초음파의 검출", 비파괴검사학회지 제20권 제1호, pp. 27-32, (2000)
- [3] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins and S. B. Palmer "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals," *J. Appl. Phys*, Vol. 51, No. 12, pp. 6210-6216, (1980)

- [4] T. T. Wu, J. Fang, and P. L. Liu " Detection of the depth of a surface-breaking crack using transient elastic waves," *J. of Acoustic Society of America*, Vol. 97, No. 3, pp. 1678-1685, (1995)
- [5] Nondestructive Testing Handbook Vol. 7 "Ultrasonic testing," pp. 189-195, *J. American Society for Nondestructive Testing*, (1991)
- [6] C. B. Scruby and L. e. Drain, "Laser Ultrasonics Techniques and Applications," Bristol, Philadelphia and New York press, pp. 325-354, (1992)
- [7] J. S. Popovics, J. H. Lee, W. J. Song and J. D. Achenbach, "One-sided Stress Wave Measurement in Concrete," *J. of Eng. Mechanics*, Vol. 124, No. 12, pp.1346-1353, (1998)
- [8] J. D. Aussel and J. C. Badboux, "Generating Acoustic Waves by Laser: Theoretical and Experimental Study of Emission Souece," *Ultrasonics*, Vol. 26, (1998)
- [9] D.E. Newland, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis," Longman Science & Technical, pp. 21-29, (1993)
- [10] 정현조, 권일범, 최만용, "시간-주파수 신호처리를 이용한 구조용 부재에서의 충격하중에 의한 분석 파동의 해석", 비파괴검사학회지 제20권, 제6호, pp. 501-510, (2000)
- [11] 장영수, 정현조 "Wavelet 변환을 이용한 분산성 판파의 군속도 측정과 음원 위치결정에 관한 연구", 비파괴검사학회 1998년도 추계학술대회, pp. 279-289, (1998)