

## 레이저 유도 초음파 및 자기보상 기법을 이용한 재료의 표면균열 깊이 비파괴 평가

이준현<sup>†</sup> · 최상우<sup>\*</sup> · 하상봉<sup>\*</sup>  
(2001년 8월 20일 접수, 2002년 1월 28일 심사완료)

### Evaluation of Depth of Surface-breaking Slit by Nondestructive Self-calibrating Technique Using Laser Based Ultrasound

Joon-Hyun Lee, Sang-Woo Choi and Sang-Bong Ha

**Key Words:** Self-Calibrating Technique(자기보상법), Nondestructive Evaluation(비파괴평가), Laser Based Ultrasound(레이저유도초음파), Surface-Breaking Crack(표면균열), One-sided Technique(단일면측정기법)

#### Abstract

It is required to evaluate nondestructively the crack depth of surface-breaking cracks for the assurance of safety of structure. Optical generation of ultrasound produces well defined pulses with a repeatable frequency content, that are free of any mechanical resonances; they are broad band and are ideal for the measurement of attenuation and scattering over a wide frequency range. Self-calibrating surface signal transmission measurement is very sensitive and practical tool for surface-breaking crack depth. In this paper, the self-calibrating technique by laser-based ultrasound is used to evaluate the depth of surface-breaking crack of material. It is suggested that the relationship between the signal transmission and crack depth can be used as a practical model for predicting the surface-breaking crack depths from the signal transmission measured in structure.

#### 1. 서론

최근 여러 가지 대형사고의 발생으로 인하여 구조물의 유지보수 및 안정성 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있다. 구조물 구성 재료의 기계적인 파괴현상은 작은 균열(crack)의 발생으로부터 시작되며 균열이 생성되면 외부 응력에 의하여 성장하고 재료의 파괴가 일어나게 된다. 이때 균열과 결함에 대한 검출 및 그 특성평가는 구조물 안전성평가의 중요한 수단이 된다. 이러한 균열

에 대하여 다양한 비파괴 방법중 탄성파(elastic wave) 즉 초음파(ultrasonic wave)를 이용한 평가방법이 표면균열의 진전 및 크기 측정에 이용되어지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 기존의 초음파 기술에는 트랜스듀서와 시험편 사이의 접촉(coupling)문제나, 재료가 고온의 경우에는 적용할 수 없는 어려움이 있다. 최근에 연구되고 있는 레이저를 이용한 초음파 발생기법은 이러한 문제를 극복할 수 있는 방법으로, 레이저 펄스를 재료 표면에 조사시킬 때 발생하는 열팽창에 의하여 초음파가 발생되는 현상을 이용한 것이다.<sup>(3,4)</sup> 이러한 레이저 유도 초음파(laser-based ultrasound)는 기존의 PZT 트랜스듀서에서와 달리 레이저 펄스의 조사시간과 형태에 따라서 주파수와 지향성을 변화시킬 수 있는 특징이 있으며, 결함해석 뿐만 아니라 재료

---

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : johlee@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835  
<sup>\*</sup> 부산대학교 대학원

---

의 열적, 광학적, 탄성적인 특성에 대한 정보를 획득할 수 있어 다양한 활용이 기대되어지고 있다. 본 연구에서는 레이저조사에 의한 초음파 발생기법을 이용한 레이저 유도 초음파 기법을 단일면측정기법(one-sided technique)<sup>(5~8)</sup>과 자기보상(self-calibrating)기법<sup>(9)</sup>에 접목시켜 재료의 표면균열 크기 예측 가능성을 찾고자 하였다. 단일면측정기법은 비교적 최근에 그 연구가 활성화되고 있고, 주로 콘크리트 포장도로와 같은 검사대상체의 한 면만이 접근 가능한 콘크리트 구조물에서 비파괴 평가를 위한 표면종파(creeping wave)와 표면횡파(Rayleigh wave)를 동시에 측정하는 방법이다. 검사대상면의 반대쪽으로부터 접근이 용이하지 않은 구조물, 또는 검사대상면 이외의 면의 형상이 불규칙하거나 재료내부에서 전파되는 초음파의 감쇠가 심하여 초음파 투과법이나 펄스 에코(pulse-echo)법을 적용할 수 없는 경우 단일면측정기법은 비교적 신뢰성 있는 탄성파 속도의 측정을 가능하게 한다. 기존의 단일면측정기법은 강철구(steel ball)를 이용하는 방법으로, 강철구를 일정높이에서 시험대상체의 표면에 자유낙하시켜 탄성파를 발생시키는 방법이다. 이러한 방법은 탄성파의 발생원이 되는 충격(impact)을 일정하게 제공하지 못하는 단점으로 인하여 강철구의 낙하 대신 솔레노이드(solenoid)를 이용한 충격봉의 타격을 적용하는 방법이 개발되었으나, 솔레노이드 작동 스위칭의 전기적 접점에서 노이즈(noise)가 발생되는 문제가 있었다. 또한 솔레노이드를 이용할 경우, 수신된 탄성파 신호를 오실로스코프를 통하여 관측하면서 솔레노이드의 작동시 발생하는 스위칭의 노이즈가 아닌 정상적인 신호만을 선택하여 PC에 전송하여야 하였다. 하지만 레이저에 조사에 의한 탄성파 발생은 항상 일정한 강도의 탄성파가 제공되고, 솔레노이드의 스위칭에 의한 전기적 노이즈가 발생하지 않으며 레이저 발생장치의 Q-스위치트리거(Q-switch trigger)에 의한 신호의 동기시점을 잡을 수 있으므로 표면종파와 표면횡파의 도달시점을 놓치지 않고 신호를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 레이저 유도 초음파를 이용하여 단일면측정기법과 자기보상기법을 적용하여 표면을 따라 전파하는 표면파 전파계수(signal transmission)값을 구하여 표면균열의 크기를 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

## 2. 단일면측정기법 자기보상기법 적용 원리

일반적인 단일면측정기법의 측정방법은 탄성체의 표면에 강철구의 낙하 또는 기계적인 장치 등으로 충격을 가하여 그때 탄성체에 발생, 전파하는 탄성파를 표면에 부착된 가속도센서로 수신하여 그 신호를 분석함으로써 탄성체의 종파속도와 표면파속도를 동시에 측정하는 방법이다. 그러나 본 연구에서는 기존의 낙하된 충격과 발생원을 대신하여 Nd:YAG 펄스 레이저를 시험편에 조사하여 탄성파를 발생시켰다. 단일면측정기법에서 표면을 따라 전파되는 탄성파는 수직변위를 센서가 검출함으로써 측정된다. 재료내부에서 종파와 횡파는 점원으로부터의 거리를  $r$ 이라 하면  $1/r$ 에 비례하여 빠르게 감쇠 되지만 표면파는  $1/\sqrt{r}$ 에 비례하여 감쇠 되므로 보다 먼 거리를 전파할 수 있다.<sup>(10)</sup>

재료 표면에 레이저빔이 조사되면 표면에 순간적인 열의 분포가 발생됨으로서 열영역이 발생하게 되고 이것이 열탄성파로 전파하게 된다. 본 논문에서는 여기된 탄성파를 발생원으로 하는 단일면측정기법과 자기보상기법을 동시에 적용하여 표면파 전파계수값을 구하였다.

일반적으로 초음파 탐상을 통한 결함형태분류나 크기산정은 결함에서의 초음파 반사나 투과 정도를 나타내는 반사계수( $R$  : reflection coefficient)와 전달계수( $T$  : transmission coefficient)를 측정하여 비교한다.<sup>(11)</sup> 그러나 접촉매질(couplant)의 상태, 탐촉자의 성능, 시험편 표면상태 및 탐촉자를 누르는 압력 등이 매 검사마다 변화함에 따라 안정적이고

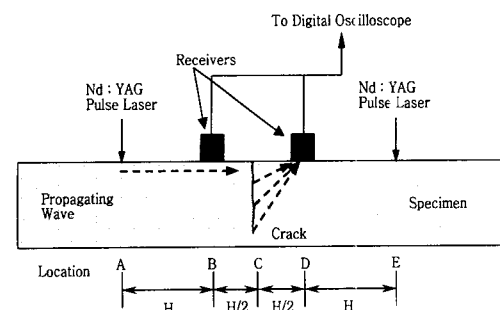


Fig. 1 One-sided, self-calibrating surface wave transmission measurement set-up

신뢰도 높은 반사계수(R)와 전달계수(T)를 측정하는 데 많은 어려움이 제기되어왔고 자기보상기법은 이 문제의 효과적인 해결책이 될 수 있다.

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 시험편의 표면에 표면균열, C로부터 동일한 거리에 일직선상으로 2개의 센서를 부착시키고 탄성파를 발생시키기 위하여 Nd:YAG 펄스 레이저를 A점에 조사하게 되면 표면에 부착되어 있는 지점 B와 D의 두 개의 센서에 의해 탄성파를 수신하게 된다. 이때 B점의 센서에 의해 수신된 탄성파는 아래의 식과 같이 주파수 영역 신호로 표시할 수 있다.

$$V_{AB} = S_A d_{AB} R_B \quad (1)$$

여기서,  $V_{AB}$ 는 푸리에 변환함수,  $S_A$ 는 표면파 발생 응답 항(generating response term)이고,  $R_B$ 는 수신 응답 항(receiving response term),  $d_{AB}$ 는 표면파 전파 함수를 나타낸다.

탄성파가 두 센서 사이를 전파함에 따라서 약간의 에너지는 소실될 것이고 따라서 파의 진폭은 감소하게 될 것이다. 그러므로,  $d_{AB}$ 는 기하학적 감쇠를 포함한 성분이다. 동일한 방법으로 지점 D에서 수신된 탄성파의 주파수 영역 신호는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{AD} = S_A d_{AB} d_{BC} T_C d_{CD} R_D \quad (2)$$

여기서  $T_C(f)$ 는 주파수 함수로서 표면 균열상에 입사한 표면파의 투과계수이다. 마찬가지로 방법으로 E점의 레이저 펄스에 의해 발생한 탄성파의 주파수 도메인 신호인  $V_{ED}$ 와  $V_{EB}$ 도 마찬가지로 방법으로 표현할 수 있다.

$$V_{ED} = S_E d_{ED} R_D \quad (3)$$

$$V_{EB} = S_E d_{ED} d_{DC} T_C d_{CB} R_B \quad (4)$$

여기서, 시험 대상체가 균질한 재료라고 가정하면  $d_{BC}=d_{DC}$ ,  $d_{CD}=d_{CB}$ 가 되며, B와 D 사이의 표면파 전파 함수  $d_{BC}T_C d_{CD}=d_{BD}^I$ 는 다음식과 같이 표현된다.

$$|d_{BD}^{Cr}(f)| = \left| \sqrt{\frac{V_{AD}V_{EB}}{V_{AB}V_{ED}}} \right| \quad (5)$$

여기서  $d_{BD}^{Cr}$ 는 주파수 함수이며 센서와의 거리가 먼곳에서부터 발생된 신호의 진폭과 가까운곳에서 발생된 신호의 진폭비의 함수이다. 그러므로  $d_{BD}^{Cr}=1$ 은 지점 B, D사이에서 탄성파의 어떤 감쇠 성분도 없이 완전하게 전달되었음을 의미하고,  $d_{BD}^{Cr}=0$ 은 감쇠에 의해 모든 입사에너지가 손실되었다는 것을 의미한다. 그리고 식 (5)에 나타난 변수값은 초음파의 발생과 수신에 대해서 서로 독립적이다. 식 (5)에서 알수 있듯이 단지 측정된 각 신호의 진폭값 자체만으로 나타낸 전파 함수  $d_{BD}^{Cr}$ 를 이용하면 탐촉자와 검사체사이의 접촉 상태나 검사체 내부감쇠와 같은 인자가 자동소거되어  $d_{BD}^{Cr}$ 에 대해 실험적 측정이 자기보상된다.

### 3. 재료 및 실험방법

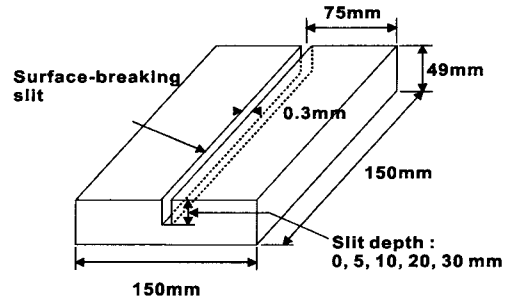


Fig. 2 Dimension of specimen

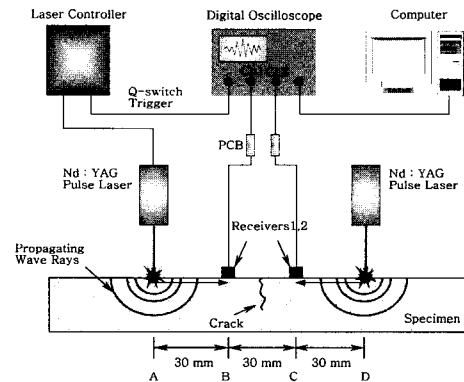


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

본 연구에 사용된 시험편은 일반적으로 산업현장에서 널리 사용되는 일반구조용강(SM400)으로 비교적 두꺼운 강판(steel plate)을 사용하였고 기계적 성질은 인장강도 41.9kg/mm<sup>2</sup>, 연신율 22%이고, 그 크기는 Fig. 2에서와 같이 가로×세로×두께가 150mm×150mm×49mm이다. 시험편은 강판의 한쪽면에 임의 균열을 가공하기 위하여 와이어커팅(wire cutting)으로 폭 0.3mm의 홈(slit)을 0mm, 5mm, 10mm, 20mm, 30mm의 깊이로 가공하였다.

Fig. 3은 레이저를 이용하여 탄성파를 발생시키는 단일면측정기법과 자기 보상기법을 접목시킨 실험장치도를 나타낸 것이다. 먼저 Nd:YAG 펄스 레이저를 시편에 조사하여 탄성파를 발생시킨다. 이때 적용된 펄스 레이저는 532nm의 파장에서 최대 140mJ의 에너지를 6~8nsec 동안 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 적용된 시험편의 표면에 손상을 발생시키지 않는 열탄성 영역에서 실험을 구현하고자 1000(140mJ)의 에너지 수준 중 100~200정도의 낮은 에너지에서 레이저빔의 집속 없이 실험을 수행하였고, 이보다 높은 300정도의 에너지 수준을 적용한 실험에서도 시험편 표면상의 손상이 발생되지 않음을 확인하였다. 발생된 탄성파는 시험편의 표면을 따라 모든 방향으로 전파되고, 이 탄성파의 수신을 위하여 공진주파수(nominal resonant frequency) 80kHz, 직경이 5.6mm인 두 개의 가속도센서(piezoelectric accelerometer)를 사용하였다. 수신센서와 시편 표면사이의 커플링 매개체로는 왁스를 사용하였고, 표면 균열은 각각의 센서에 동일한 15mm거리를 두었

으며 탄성파 발생지점 A, D와 각각의 센서와의 거리는 30mm로 정하였다 파형을 관찰하기 위하여, 두 수신 센서에서 수신된 신호는 증폭기(PCB)에서 증폭된 후 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310)에서 100MHz의 샘플링 주파수로 디지털화되고 노이즈를 감소시키기 위하여 100개(100sweep)의 파형을 동기화 평균(time averaging)하여 저장하였다. 오실로스코프에서 저장된 파형 데이터는 PC전송되어 FFT 처리되었다.

#### 4. 표면파 전파계수 측정방법

레이저의 조사에 의해 발생된 탄성파는 시험편의 표면을 따라 모든 방향으로 전파된다. Fig. 4는 시간 영역에서의 레이저 조사에 의한 균열이 없는 시험편에서 일반적인 신호를 가속도 센서에서 수신한 파형이다. 이 수신된 신호는 시험편의 저면에서 반사된 파 성분을 줄이고, 시험편 경계면에서 발생되어지는 변이된 파형의 성분의 진폭값이 더해지는 것을 피하기 위하여 50μsec 동안의 구간에 대해서 샘플링 한 것이다. 이때 Rayleigh wave 도달 후 비교적 긴 시간동안 여진이 수신되었으며 이것은 일반 초음파 센서에 비하여 센서내부 압전소자에 대한 감쇠효과가 적은 본 연구에서 적용된 수신센서의 응답특성이며 실제 시험편 표면에 전파하는 탄성파보다 파의 지속시간이 길게 나타난다. 이것은 자기보상기법의 수신 응답 항  $R_B$ ,  $R_D$  등에 포함된 성분이며 자기보상기법에 의하여 균열크기 평가에서 보상 가능한 성분이다.

맨 처음 나타나는 신호는 레이저 발생기의 Q-스위치 트리거에서 발생한 노이즈 성분이며 약 5μsec 부근의 신호는 표면종파이며 10μsec부근의 신호는 표면횡파에 의한 것이다.

표면파 자기보상기법을 적용하기 위하여, Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 레이저의 트리거(Trigger) 성분의 진폭의 영향을 피하기 위하여 4μsec 지점에서부터의 40μsec까지 구간의 시간영역 신호에 대해서만 FFT변환하여 표면파 전파계수값을 구하였다. 여기서 수신된 표면종파는 표면횡파의 진폭에 비해서 미약하며 균열이 있는 시편에서는 거의 나타나지 않는다. 따라서 레이저를 이용한 초음파 발생은 표면파 성분만을 포함하므로 이론적인 자기보상 표면파 기법에 벗어나지 않고 표

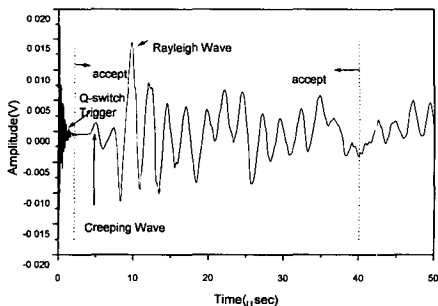


Fig. 4 Typical experimental waveform detected by R1(Signal excited at the location A,  $V_{AB}$  in time domain)

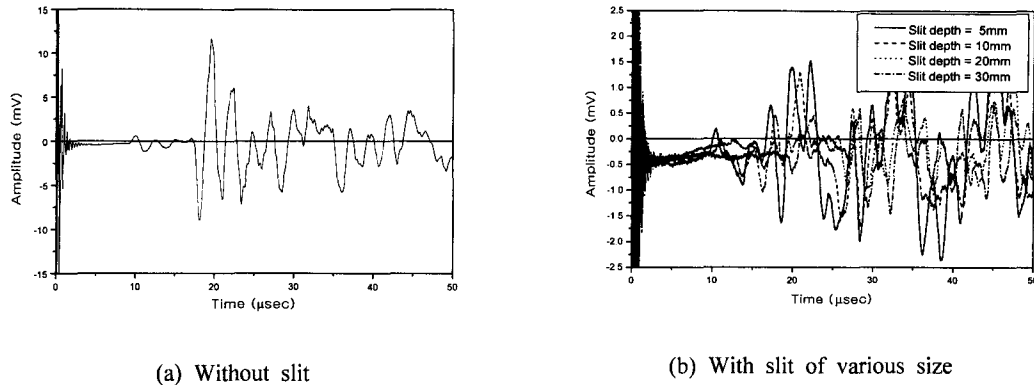


Fig. 5 The comparison of signals with respect to the variation of slit depth

면파 발생에 효과적인 실험방법이 된다.

이 획득된 신호는 해닝창(Hanning window)함수를 사용하여 시험편 저면의 반사에 의한 미소한 진폭이나 레이저 트리거에 의한 미소한 진폭의 변화에 대한 성분을 줄인 다음 FFT처리하여 주파수 영역으로 변환시켰다. 그러므로 획득된 신호는 표면파 성분만을 포함하므로 이론적인 자기보상 표면파 기법에 벗어나지 않는 양호한 표면파 전파계수값을 구할 수 있게된다.

### 5. 표면파 전파 계수값에 의한 균열 평가

본 연구에서는 단일면측정기법과 자기보상기법을 동시에 사용하여 표면균열의 깊이 변화에 따른 표면파 전파 계수값과의 상관관계에 대하여 살펴보았다. 먼저 레이저에 의해 발생된 표면파가 균열을 따라 전파할 때 레이저 탄성과 발생원과 멀리 떨어진 센서에서 수신된 파형과 그 파형의 FFT 변환 결과에 대하여 살펴보았다. Fig. 5는 앞의 Fig. 3의 실험장치에서 나타난 A점에 레이저 초음파 발생원을 두었을 때, 균열 깊이가 증가에 따른 레이저 조사지점과 멀리 떨어진 C점에서의 센서에서 수신된 시간영역의 신호,  $V_{AC}$ 이다. Fig. 5 (a)의 균열이 없는 시험편의 신호의 진폭값과 Fig. 5 (b)의 균열 깊이가 5mm, 10mm, 20mm, 30mm로 증가할 때의 진폭값을 비교해 보면 그 진폭값이 급격하게 감소함을 관찰할 수 있다. 특히 균열깊이가 30mm일때의 신호의 진폭값 크기는 아주 미소하다. 이는 표면을 타고 전파되던 표면파는 균열을 만나면 균열선단에서 회

절되는 형상으로 균열 통과하여 전파하게되고, 표면파는 깊이가 증가할수록 그 강도가 급격히 감소하므로 균열깊이 증가에 따라 수신된 파형의 진폭값이 감소하게된다. 또한, 균열선단에서의 회절에 의하여 수신된 표면파의 에너지는 전파 거리가 길어짐에 따라 더 많이 감쇠하기 때문이다.

Fig. 6은 각각의 균열깊이에 따른 신호에 대해서 FFT변환한 그래프이다. Fig. 6의 (a)는 균열이 없는 시험편에서의 FFT 변환결과를 나타낸 것이다. 390kHz 부근에서 고주파 성분의 진폭값이 0-200kHz 성분의 진폭보다 크게 나타나고 있다. 그리고 균열의 깊이가 증가할수록 고주파 성분의 진폭값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편 상대적으로 균열이 없는 시험편과 균열의 크기가 증가함에 따른 0-200kHz주파수 진폭값의 감소는 390kHz부근의 주파수 부근에서의 진폭에 비해 상당히 완만한 감소를 보임을 알 수 있다. 200kHz 이상 고주파의 표면파 성분은 상대적으로 200kHz이하의 주파수 성분에 비하여 파장이 짧기 때문에, 390kHz 부근의 성분은 균열 선단과 표면에 수직한 균열면에서 반사되어지고 직접적으로 전파하지 못하므로 급격한 에너지 손실이 발생하여, FFT 변환 결과 그래프에서 보여주는 것처럼 진폭값의 감소 현상이 나타나게 된다고 볼 수 있다. 즉, 시험편 깊이가 증가에 따른 표면파의 세기는 파장길이의 증가에 따라 감소하게 되므로, 균열선단의 깊이까지 도달하는 표면파의 강도가 주파수 증가에 따라 감소하게 된다. 그러나 약 200kHz이하의 주파수 성분의 탄성파는 균열깊이까지 표면파의 강도저하가 적게 되므로 시

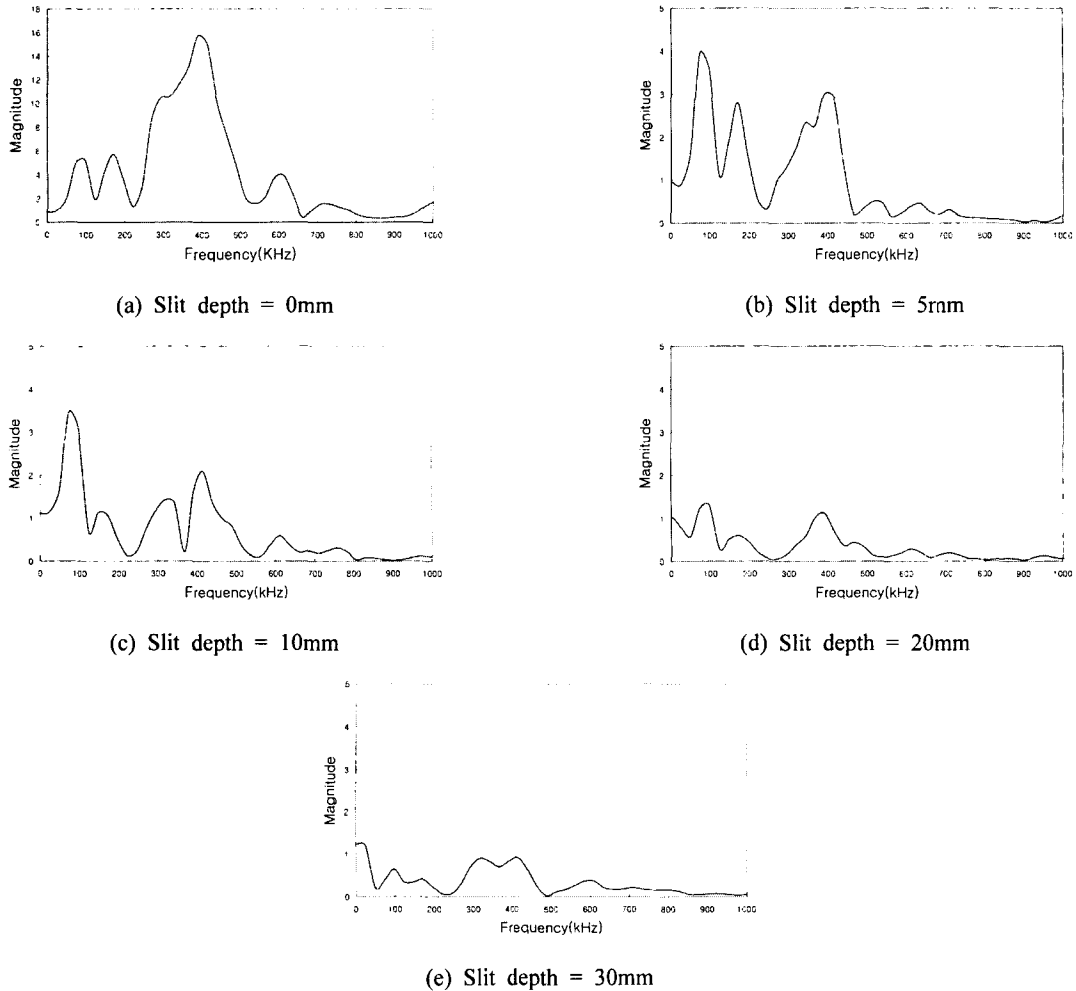


Fig. 6 Comparison of the frequency response due to the variation of the crack depth

간지연에 따른 에너지 감소의 영향 외의 균열 선단과 균열면에 대한 영향을 고주파 성분에 비해 훨씬 적게 받는다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 균열크기에 따라서, 자기보상기법을 적용하여 A, D점을 각각 레이저 발생원으로 하였을 때, 식 (5)에 표기된 레이저 초음파 발생원에 가까운 거리의 센서에서 수신된 신호의 FFT변환값  $V_{AB} \cdot V_{DC}$ 와 상대적으로 먼 거리의 센서에서 수신된 신호의 FFT변환값  $V_{AC} \cdot V_{DB}$ 을 나타내는 그래프이다. Fig. 7 (a)의 균열이 없는 시험편의 경우 약 170kHz 이상의 주파수성분에서는 진폭 크기값의 변화가 논리적이지만 없다는 것을 관찰할 수 있다. 일반적인 입사파가 시간지연에 따른 에너지 손실로 인해 진폭값이 감소해야 함에도 불구하고

고, 시험편에서 먼 거리에 떨어져 있는 센서에서 수신된 신호의 FFT 진폭값이 더 크게 나타나고 있다. 이 영역, 즉 170kHz 이상에서의 영역에서의 진폭값의 불일정성은 일부 고주파 강도의 증가로 유발되며 이것은 표면파의 전파시의 발생하는 고주파 성분의 탄성파의 산란에 의한 산란잡음신호 및 전기적 노이즈 성분의 증가로 사료된다. 표면파의 신호측정에서 노이즈 감소를 위하여 필터링 기법을 수행하였지만 제거되지 못한 성분이다. 따라서 본 연구에서는 자기보상기법이 합리적으로 적용될 수 있는 170kHz 이하의 주파수 성분에 대하여서만 표면파 전파 계수값을 구하였다. 이는 자기보상기법의 표면파전파 계수값은 균열부를 통과하여 전파하는 신호의 전달계수를 나타내

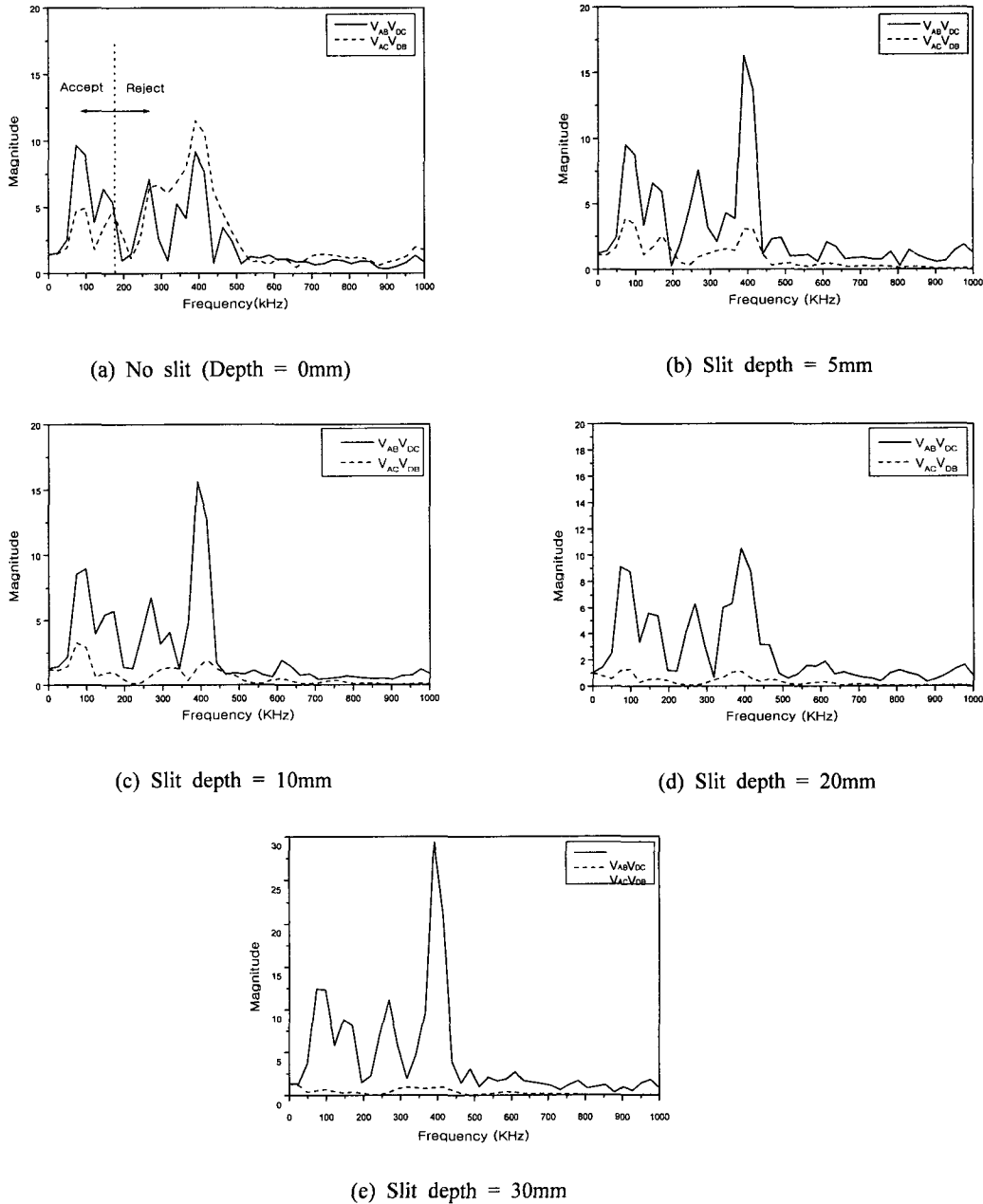


Fig. 7 Frequency response by self-calibrating technique

는 것으로 항상 1이하의 값이어야 하는 기본 원리에 때문이다. 즉,  $V_{AC}V_{DB}$ 의 크기가  $V_{AB}V_{DC}$ 보다 큰 경우는 식 (5)에 의하여 계수값이 1을 넘게 되므로 자기보상기법에 적합하지 않게 되기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 균열의 깊이변화에 따른 표면파 전파 계수값의 크기값을 170kHz 이하의 주파수 성분에서 나타낸 것이다. 균열이 없는 시편의 경우에도 표면파 전파 계수값  $d_{BC}^{Cr}$ 는 시간 지연에 의한 에너지 손실 때문에 1이하의 값을

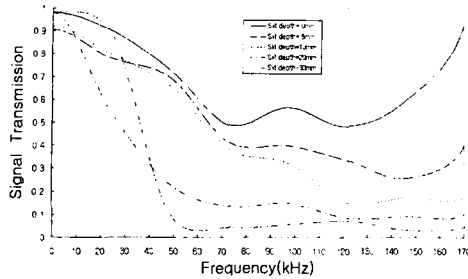


Fig. 8 Signal transmission as a function of frequency

가지며 균열이 있는 시험편에서의 값과 비교할 때 전체적으로 높은 값을 가짐을 볼 수 있다. 이것은 균열이 없는 시험편인 경우의 표면파 전파 계수값은 표면파가 약간의 거리를 전파해감에 따른 에너지 손실 이외의 감소도 없다는 것을 잘 보여주는 것이다. Fig. 8을 살펴보면 표면 균열의 깊이가 증가함에 따라 약 40kHz 이하의 주파수 영역에서의 표면파 전파 계수값의 변화는 불일정하나, 그 이상의 주파수 영역에 대해서는 표면파 전파 계수값이 균열 깊이가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 볼 수 있다. 즉, 40kHz 이상의 주파수영역에서 자기보상기법이 합리적으로 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9는 Fig. 7에서 주파수 성분의 피크(peak)에서와 골부분에서의 주파수에 대하여 균열 깊이 변화에 따른 표면파 전파 계수값의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 구해진 표면파 전파계수값을 특정 주파수에 대하여 균열 깊이 변화와 비교해보면 특히 저주파수인 97kHz의 표면파 전파 계수값은 균열 깊이 변화에 따라 선형적인 변화를 나타내고 있으며, 고주파수인 170kHz에서는 균열 깊이 10mm까지 변하는 동안 급격한 표면파 전파 계수값의 변화를 나타내고 있다. 즉, 자기보상기법에서 고주파성분의 표면파 전파 계수값은 미소균열에 대하여 민감한 변화를 나타내고, 저주파성분의 표면파 전파 계수값은 그 균열의 정량적인 평가에 유용하게 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

## 6. 결론

본 연구의 레이저 유도 초음파를 이용한 비파괴 평가에서는 기존의 낙후된 강철구 또는 스테

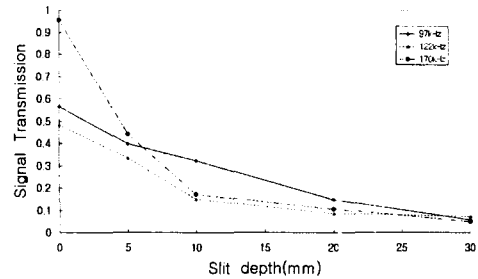


Fig. 9 Signal transmission as a function of slit depth

노이드로 구동되는 충격봉의 타격을 대신하여 펄스 레이저를 초음파 발생도구로 사용함으로써 일정한 강도의 초음파성분인 표면파를 발생시킬 수 있었다. 따라서 레이저를 이용한 초음파 발생은 이론적인 자기보상 표면파 기법에 벗어나지 않고 표면파 발생에 효과적인 실험방법이 됨을 알 수 있었다. 단일면측정기법과 자기보상기법을 접목 시킴으로써 양호한 표면파 전파 계수값을 구할 수 있었고, 이 표면파 전파 계수값은 표면균열의 크기가 변화함에 따라 상당히 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 40kHz~170kHz 사이의 주파수 범위에서 양호한 표면파 전파 계수값을 얻을 수 있었으며, 이들중 170kHz와 같은 고주파 성분의 표면파 전파 계수값은 작은 균열크기에도 민감한 변화를 나타내었다. 97kHz와 같이 낮은 주파수에서의 표면파 전파 계수값은 균열크기 변화에 대하여 일관성있는 변화를 나타내어 정량적인 표면균열 크기평가에 유용하게 적용될 수 있음을 보여 주었다.

따라서 콘크리트 구조물과 같은 한쪽 면에 대해서 접근 가능한 구조물에서 표면균열의 크기값의 추정하는데 있어, 레이저를 이용한 표면파 전파 계수값을 구함으로써 표면의 균열의 크기값을 예측하는데 유용한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

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



## 참고문헌

- (1) Wu, T. T., Fang, J. S. and Liu, P. L., 1995, "Detection of the Depth of a Surface-Breaking Crack Using Transient Elastic Waves," *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 97, No. 3, pp. 1678~1685.
- (2) 이준현, 최상우, 2000, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정," 대한기계학회논문집A권, 제24권, 제1호, pp. 52~61.
- (3) Scruby, C. B., Dewhurst, R. J., Hutchins, D. A. and Palmer, S. B., 1980, "Quantitative Studies of Thermally Generated Elastic Waves in Laser-Irradiated Metals," *J. Appl. Phys.*, Vol. 51, No. 12, pp. 6210~6216.
- (4) 이민래, 최상우, 이준현, 2001, "레이저 초음파와 Wavelet변환을 이용한 재료표면균열 평가," 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 152~162.
- (5) Lee, J. H., Song, W. J., Popovics, J. S. and Achenbach, J. D., 1997, "An Automated Method for the One-Sided Measurement of Longitudinal and Surface Wave Velocities in Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 9, No. 1, pp. 537~543.
- (6) 박원수, 1998, "One-sided Technique에 의해 발생된 응력파를 이용한 재료 내부 균열평가," 부산대학교 대학원 기계설계공학과 석사학위 논문.
- (7) Popovics, J. S., Lee, J. H., Song, W. J. and Achenbach, J. D., 1998, "One-sided Stress Wave Measurement in Concrete," *J. of Eng. Mechanics*, Vol. 124, No. 12, pp. 1346~1353.
- (8) Lee, J. H., Park, W. S., Popovics, J. S. and Achenbach, J. D., 1999, "Application of One-sided Stress Wave Velocity Measurement Technique to Evaluate Freeze-Thaw Damage in Concrete," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 18, pp. 1935~1942.
- (9) Achenbach, J. D., Komsky, I. N., Lee, Y. C. and Angel, Y. C., 1992, "Self-Calibrating Ultrasonic Technique for Crack Depth Measurement," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, No. 2, pp. 103~108.
- (10) Achenbach, J. D., 1973, "Wave Propagation in Elastic Solids," Northholland, New York, pp. 187~194.
- (11) Angel, Y. C. and Achenbach, J. D., 1984, "Reflection and Transmission of Obliquely Incident Rayleigh Waves by a Surface-Breaking Crack," *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 75, No. 2, pp. 313~319.