

압전센서를 이용한 구조물 국부/광역 손상 진단 시스템

Local/Global Structural Health Monitoring System Using Piezoelectric Sensors

김 병 수*, 권 혁 상*, 김 진 옥*, 노 용 래*
(Byungsoo Kim*, Hyeoksang Kwon*, Jinwook Kim*, Yongrae Roh*)

*경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2009년 2월 16일; 수정일자: 2009년 3월 13일; 채택일자: 2009년 4월 1일)

본 논문에서는 오실레이터 센서와 램파 센서를 결합하여 구조물 손상 진단을 위한 통합된 압전 센서 시스템을 제안한다. 구조물 손상으로 인한 공진주파수 변화를 관측 할 수 있는 오실레이터 센서는 손상 정도에 민감하게 반응하고 구조가 단순한 장치이지만 측정 범위가 센서 주위로 제한되는 특성을 가진다. 반면에 램파를 이용한 진단 시스템은 원거리에 위치한 구조물의 손상부를 감지하기에 유용하다. 본 논문에서는 오실레이터 센서를 이용한 취약 지점의 국부적인 손상 진단 방식과 램파를 이용한 광역적인 손상 진단 방식을 결합하여 각 시스템의 장점들을 활용할 수 있는 센서 시스템의 적용가능성을 연구하였다. PZT소자를 알루미늄 판에 적용하여, 알루미늄 판의 손상 정도에 따른 오실레이터 공진주파수의 변화와 램파 신호의 Time of flight 그리고 진폭의 변화를 이용하여 크랙의 위치와 크기, 개수의 판별 가능성을 제시하고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

핵심용어: 오실레이터, 램파, PZT

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.4)

In the present work, a sensor system composed of an oscillator sensor and a Lamb wave sensor is proposed for the purpose of structural health monitoring. The oscillator sensing system detecting the shift of a structural resonant frequency in proportion to the amount of defects in the structure is a pretty sensitive and simple device, but its detectable range is limited to its local zone. The Lamb wave sensor system, however, is applicable to global detection of the defects. This study is aimed at investigating the feasible combination of the two systems to exploits their merits simultaneously. The scheme to use PZT patches as the oscillator sensor as well as the Lamb wave sensor was proposed to identify the position, length and number of cracks by means of TOF and amplitude of signals, and its validity was confirmed through experiments.

Keywords: Oscillator, Lamb waves, PZT

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.4)

I. 서론

지난 수십 년간 구조물의 안정성에 대한 사회적 관심과 함께 구조물의 건전성 진단에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그리고 최근에는 기계, 항공 및 토목 분야에 있어서 구조물 건전성 진단 시스템 구현을 위한 지능형 센서와 통합 센서 시스템의 발전이 두드러진다 [1-3]. 특히, PZT와 같은 압전 소자는 액츄에이터와 센서로 각광을 받고 있으며, 국부적인 구조물 손상 진단을 위한

응용 연구들이 활발히 진행되어 왔다 [4-6]. 이러한 연구들은 대부분 구조물 손상에 따른 압전 센서의 임피던스 변화 측정을 기반으로 한다. 즉, 손상시 발생하는 구조물의 특성변화에 따른 PZT 소자와 구조물 전체의 임피던스 변화를 관찰함으로써 손상여부 및 정도를 판단하는데, 대표적인 예로 Ayres 등은 임피던스 기반 측정법으로 간단한 트러스 구조물의 접합부분의 손상을 진단하기 위하여 PZT 소자를 사용하였다 [2]. 그러나 임피던스 측정법은 고가의 장비와 복잡한 해석 기술을 요구하게 된다.

이러한 기존의 구조물 손상진단을 위한 임피던스 측정법의 문제점을 해결하기 위해 본 연구진은 좀 더 일반적이고 광범위한 적용이 가능하면서 측정 장비의 소형화를

이룰 수 있는 압전 오실레이터 센서를 제안하였다 [7, 8]. 압전 오실레이터는 피드백 오실레이터 회로와 진동자로 구성되며, 오실레이터 회로는 압전소자의 두께 모드 혹은 경 방향 모드 같은 특정 공진 주파수에 일치되도록 하였고, 압전소자의 공진신호를 피드백 하도록 설계하였다. 즉, 구조물 취약부에 부착된 압전소자에 오실레이터 회로를 이용해 발생시킨 공진 신호를 주파수 카운터를 이용하여 관찰함으로써 예상되는 취약부의 손상 유무를 탐지하고자 하였다. 이 오실레이터 센서는 간단한 구조 이면서도 손상 여부에 매우 민감하게 반응하는 고감도 특성을 나타내어 구조물 손상 탐지에 충분히 적용할 수 있는 가능성은 확인되었으나, 손상을 탐지 할 수 있는 범위가 센서 주변으로 국한된다는 단점 또한 확인 되었다.

일반적으로 광범위한 손상부에 대한 탐지 기법으로는 초음파 기법이 널리 사용되어져 왔다 [9-13]. 특히, 램파를 이용한 검사는 최근 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다 [12, 13]. 그 이유는 램파가 상대적으로 넓은 범위에서 판의 전두계 방향으로 진행하며, 비교적 에너지 손실 없이 원거리를 전파할 수 있기 때문이다. 반면에 램파는 발생이후 파동이 안정된 전파 상태에 도달하기까지 일정 구간에 걸친 천이 상태를 나타내어 파의 송수신자 주위에서 정확한 측정이 어려운 문제점이 있다.

그러나 구조물 손상 진단에서 각각으로서는 이상과 같은 한계를 가지는 오실레이터 센서와 램파 센서라는 두 진단 수단을 결합하면, 램파의 천이 상태가 나타나는 센서 주위의 국부적인 영역에서는 오실레이터 센서를 이용해 정확히 진단할 수 있고, 반대로 오실레이터 센서가 제대로 진단하지 못하는 원거리 영역은 램파 센서를 이용하여 진단할 수 있을 것이다. 즉, 오실레이터 센서와 램파 센서를 결합하여 구조물 전체에 걸친 광역적인 그리고 특히 우려가 되는 취약부에 대한 국부적인 손상탐지를 동시에 이룰 수 있는 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 기존의 구조물 내의 국부적 손상을 측정하기 위한 경 방향 오실레이터 센서를 활용함과 동시에, 오실레이터 센서에 사용된 PZT 소자를 사용하여 광역적 손상 탐지를 위한 램파를 발생시켜 구조물 내의 국부적인 손상뿐 아니라 광역적인 손상을 동시에 진단하는 시스템을 제안하고, 그 가능성을 실험적으로 검증하였다. 실험에서는 두께 1 mm의 알루미늄 판에 크랙의 위치와 길이 그리고 개수를 변화시켰으며, 이에 대응하는 오실레이터 센서의 공진 주파수 변화, 그리고 램파의 TOF (time of flight), 진폭 등의 변화를 관찰함으로써 인가된 크랙의 형상을 판별하였다.

II. 기본 이론

2.1. 오실레이터 센서

압전 오실레이터 센서의 기본적인 개념은 구조물에 부착되어있는 PZT소자의 구조물 내 손상 정도에 따른 기계-전기적 임피던스 변화를 관측하는 것이다. 즉, 구조물 내의 손상은 구조물의 강성 (c), 감쇠도 (rm) 그리고 질량 (m)에 영향을 주게 되어, 결국 구조물에 부착된 오실레이터의 진동 특성에 변화를 주게 된다. 이러한 구조물 손상에 대한 오실레이터와 구조물의 상호 작용 모델은 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

그림 1의 PZT 소자로 계측되는 전체 임피던스는 식 (1)-(3)과 같이 구조물의 임피던스와 PZT의 전기-기계적 임피던스로 나타낼 수 있다 [5,6].

$$Z_M(\omega) = \sqrt{r_m^2 + \left(\frac{m\omega^2 - c}{\omega}\right)^2} e^{j\theta}, \quad \tan\theta = \frac{m\omega^2 - c}{c\omega} \quad (1)$$

$$Z_A(\omega) = \frac{kw_A h_A Y_{11}^E}{i\omega \tan(kl_A)} \quad (2)$$

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (3)$$

$$\left(i\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left[(\epsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E) + \frac{Z_A}{Z_A + Z_M} d_{31}^2 Y_{11}^E \frac{\tan(kl_A)}{kl_A} \right] \right)^{-1}$$

식 (1)-(3)에서 V 는 전압, I 는 전류, ω 는 각주파수, d_{31} 은 압전상수, ϵ^T 는 응력에 독립적인 유전상수, E 는 전계, Y_{11}^E 는 일정한 전기장 하에서 PZT 경 방향 탄성계수, w_A, h_A, l_A 는 각각 압전소자의 폭, 높이, 길이를, k 는 파수를 나타낸다. PZT 소자에 나타나는 전체 임피던스는 식 (3)과 같이 나타 낼 수 있으며, 이 임피던스의 크기가 최소가 되는 지점에서 공진이 발생하게 된다. 구조물의 손상으로 인해 식 (1)의 질량, 감쇠도 및 강성에 변화가 나타나면 그에 따라 구조물 임피던스가 변화가 발생하고, 결국 식 (3)에서의 공진주파수가 변한다. 이때 공진주파수의 변화를 오실레이터 회로를 이용하여 측정하므로 구조물의 손상 정도를 알 수 있게 된다.

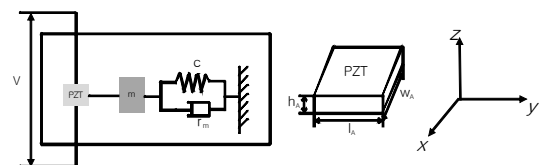


그림 1. PZT 오실레이터와 구조물의 상호 작용 모델
Fig. 1. Interaction model of a lateral mode PZT oscillator with a structure.

2.2. 램파 센서

양면이 자유면이고 두께가 얇은 균질한 탄성판에 있어서, 발생 가능한 모드는 아래의 Rayleigh-Lamb식에 의해 구할 수 있다 [14].

$$\frac{\tan(\alpha_n h/2)}{\tan(\beta_n h/2)} = - \left(\frac{(k_n^2 - \beta_n^2)^2}{4k_n^2 \alpha_n \beta_n} \right)^{\pm 1}$$

$$\alpha_n = \sqrt{(\omega/v_l)^2 - k_n^2}$$

$$\beta_n = \sqrt{(\omega/v_t)^2 - k_n^2}$$
(4)

여기서 f 는 주파수, k_n 은 n 차 모드 파수, v_l 은 종파의 속도, v_t 는 횡파의 속도, h 는 판의 두께를 나타내고, n 은 자연수로서 발생가능한 모든 파수들의 순번을 나타내며, 지수 +1과 -1은 각각 대칭모드와 비대칭모드를 의미한다. 대칭 모드와 비대칭 모드 중 파수의 형태가 실수인 모드를 기본모드라 하며 각각 기호로는 S_0 와 A_0 로 표시된다. 두께 1 mm 알루미늄에 대한 기본 램파 모드에 대한 군속도(group velocity)는 그림 2와 같이 나타난다.

그림 2에서 구조 진단용으로 널리 사용되는 PZT 소자의 경 방향 공진 주파수 범위인 100 - 600 kHz에서 S_0 모드는 거의 일정한 값을 유지하지만 A_0 모드는 주파수의 변화에 따라 군속도 값이 급격히 변함을 알 수 있다. 이러한 분산특성은 램파의 전파시 발생하는 중심 주파수의 변화에 따른 전파 속도의 변화로 인해 크랙에 대한 분석을 어렵게 한다. 그리고 S_0 모드의 속도가 A_0 모드의 속도 보다 빠르므로 S_0 모드가 센서로 먼저 수신된 이후 A_0 모드는 판의 경계면으로부터 반사된 파와 서로 간섭하여 수신되는 경향이 있다. 이러한 점 역시 A_0 모드의 분석을 어렵게 하므로, 본 논문에서는 분산특성이 거의 없고 속도가 빠른 S_0 램파 모드만을 고려하여 실험 및

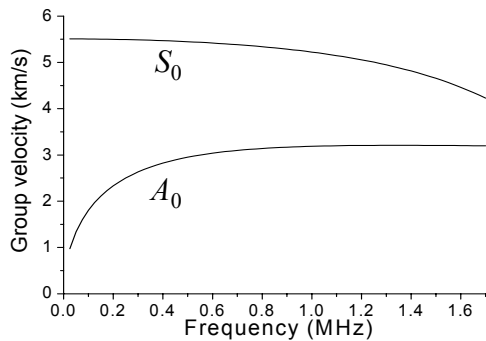


그림 2. 기본모드 램파의 분산곡선: 알루미늄 판 두께 = 1 mm
 Fig. 2. Dispersion curve of fundamental mode Lamb waves: aluminum plate thickness = 1 mm.

해석을 수행하였다. 램파의 전파거리는 식 (5)와 같이 군속도와 TOF의 곱으로 표현된다.

$$s = TOF \times v_g(f)$$
(5)

식 (5)에서, s 는 전파거리, $v_g(f)$ 는 군속도이다. 또한 TOF와 전파거리와 더불어 수신된 신호의 진폭과 중심 주파수를 활용하면 구조물내 결함에 대해 보다 정확한 정보를 구할 수 있다.

III. 실험 과정

전체적인 실험과정은 그림 3과 같다. 실험의 목적은 오실레이터 센서와 램파 트랜스듀서로 크랙의 위치, 길이 및 개수 등을 센서 주위의 국부적인 영역과 판 전체에 걸친 광역적 영역에 대해 파악하고자 하는 것이다.

그림 3에서 알루미늄 판 우측에 부착된 PZT 소자는 광역 진단을 할 때는 램파를 수신하는 센서로 작용하고 국부 진단을 할 때에는 오실레이터 센서로 작용한다. 먼저 국부 진단용으로 사용되는 오실레이터 센서의 경우, 오실레이터 회로로 PZT 소자를 경 방향 공진 주파수로 가진다. 크랙이 알루미늄 판에 발생했을 때 야기되는 PZT 소자의 공진 주파수 변화는 다시 오실레이터 회로에 영향을 주게 되고, 이러한 공진 주파수의 변화는 주파수 카운터에 의해 실시간으로 모니터링 되며 컴퓨터에 기록된다.

그리고 광역 진단을 위해서는 알루미늄 판 좌측에 부착된 램파 발신자(transmitter)용 PZT소자와 위에서 설명한 우측의 PZT소자끼리의 through-transmission 혹은 발신자에 의한 pulse-echo에 의한 방식으로 신호를 측정한다. 먼저 pulser/receiver에서 구동 전압이 PZT 발신자

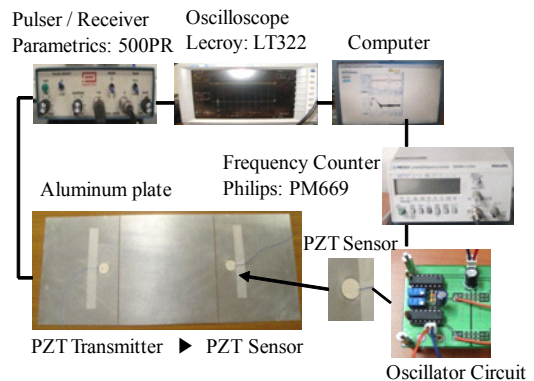


그림 3. 실험 장비
 Fig. 3. Experimental equipments.

에 보내지면 센서로부터 수신된 신호는 다시 pulser/receiver로 수신되어 오실로스코프로 신호를 출력하고 컴퓨터는 이를 기록한다. PZT 발신자 및 센서의 반경은 1 cm로 동일하며, 경 방향 공진주파수는 약 140 kHz이다. 이용된 알루미늄 판의 가로와 세로의 길이는 각각 50 cm와 20 cm이다.

실험 순서는 먼저 오실레이터에 의한 크랙 진단과 램파를 이용한 진단을 개별적으로 수행하여 각각의 특성을 독립적으로 분석한 뒤, 두 측정 시스템의 상호보완관계를 확인하기 위해 하나의 알루미늄 판에 두 시스템을 하나로 조합하여 실험하였다. 그림 4는 오실레이터 센서의 성능을 분석하기 위한 손상 시나리오이고, 그림 5는 램파 센서의 성능을 평가하기 위한 알루미늄 판의 손상 시나리오이다. 그림 4에서 case #O1과 #O2는 하나의 크랙 그리고 멀티 크랙에 대한 오실레이터 센서의 손상시나리오며, 크랙은 오실레이터의 중심에서 5 cm 이격된 지점에서부터 1 cm 간격으로 위치한다. Case #O1에서는 하나의 크랙에 대해 판의 폭 방향으로 크랙의 길이를 변화시켰으며, Case #O2에서는 크랙의 길이를 12 cm로 고정하여 크랙의 개수를 증가시켰다 [7,8]. 그림 5에서 Case #L1, #L2 그리고 #L3는 크랙 개수 1, 2 그리고 3개에 대한 램파를 이용한 측정 시스템용 손상 시나리오이다. PZT 발신자와 센서 중심까지의 거리는 24.5 cm이다.

그림 6은 오실레이터와 램파를 이용한 측정 시스템의 통합된 형태로서 case #G1은 크랙이 하나일 때, 크랙의 위치 (x)를 각각 3 cm 그리고 10 cm로 변화하면서 크랙의 위치에 따른 국부 손상 진단 시스템인 오실레이터와 광역 손상 진단 시스템인 램파를 이용한 측정 시스템간의 측정 범위에 따른 성능비교를 위해 설정되었다. 반면 case #G2는 크랙의 개수 증가에 따른 두 측정 시스템간의 성능비교를 위해 설정되었다. 그림 6에 사용된 알루미늄 판의 두께는 이전 실험에서와 같이 1 mm이다. 크랙은 폭이 1 mm인 쇠톱을 사용하여 알루미늄 판의 한쪽 면으로부터 절단해나가는 방식으로 형성하였으며, 발생된 크랙을 추가적으로 절단하는 방식으로 크랙의 길이를 증가시켰다.

IV. 실험 결과

4.1. 오실레이터 센서를 이용한 국부 손상 진단

오실레이터 실험 결과로서 크랙의 길이와 개수의 변화에 따른 PZT 소자의 경 방향 모드 공진 주파수의 변화를 그림 7에 나타내었다. 그림 7은 크랙의 길이와 개수의 변

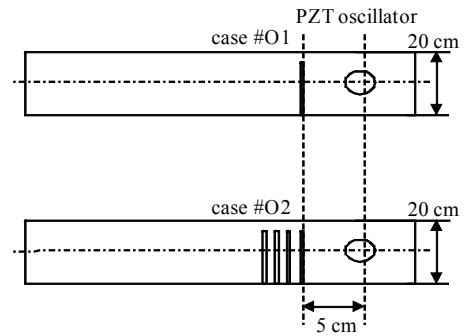


그림 4. 알루미늄 판의 오실레이터 센서용 손상 시나리오
Fig. 4. Damage scenario of the aluminum plate for the oscillator sensor.

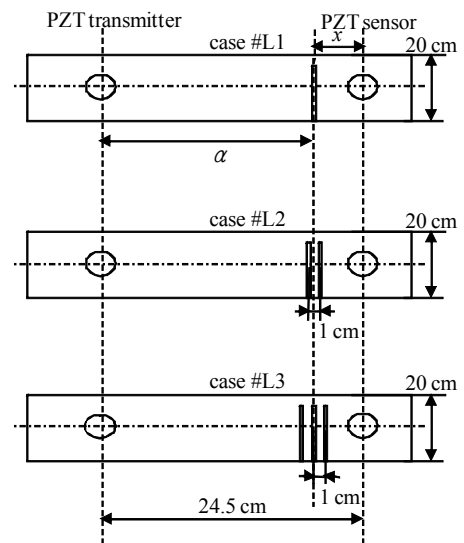


그림 5. 램파 센서용 손상 시나리오
Fig. 5. Damage scenario for the Lamb wave sensor.

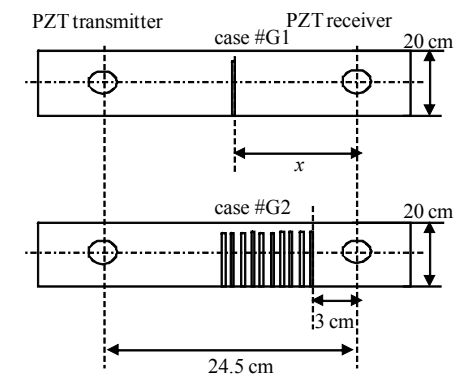


그림 6. 오실레이터와 램파를 이용한 통합 측정시스템용 손상 시나리오
Fig. 6. Damage scenario for the integrated sensing system using the oscillator and the Lamb wave sensors.

화에 따른 오실레이터의 공진 주파수 변화를 나타낸 것으로, 그림 4에서 설명한 손상시나리오 case #O1과 case #O2에 해당하는 경우에 대한 실험 결과를 그림 7 (a)와

7 (b)에 각각 나타내었다. 그림에서 크랙의 길이는 그림 4와 같이 알루미늄 판의 한쪽 끝 면에서부터 측정된 값이며, 길이가 10 cm라는 것은 크랙의 길이가 수직 방향으로 센서용 PZT 소자의 중심까지 도달했을 때를 나타낸다.

그림 4의 손상시나리오 case #O1에 해당하는 그림 7 (a)의 결과에서 크랙의 길이가 증가함에 따라서 오실레이터의 공진주파수가 지속적으로 감소됨을 알 수 있다. 그 이유는 알루미늄 판에 크랙이 발생하고 또 길이가 증가함에 따라 판의 물리적 성질에 변화가 생겼으며, 이는 식 (1)에 보인 알루미늄 판의 기계적 임피던스의 변화로 나타나고, 이 알루미늄 판의 임피던스 변화는 다시 식 (3)에 보인 압전소자를 포함하는 판 전체 임피던스의 변화를 초래하여, 결국 식 (3)의 크기가 최소가 되는 주파수, 즉 오실레이터의 공진 주파수의 변화를 가져오게 된다 [7,8]. 그림 7 (a)에서 크랙의 길이가 10 cm 라는 것은 크랙의 길이가 폭 20 cm인 판의 가운데까지 길어져서 PZT 소자의 중심 위치까지 도달했다는 것을 의미한다. 이는 PZT 소자에 가장 근접한 위치까지 크랙이 길어졌다는 것을 나타내므로, 이 위치에서의 크랙 길이의 변화는 PZT 소자에 큰 영향 미칠 것이고, 따라서 그림 7 (a)에서 크랙 길이가 8 cm에서 10 cm 로 증가하거나 10 cm에서 12 cm로 증가할 때 오실레이터의 공진 주파수에 큰 변화가 나타나는 것으로 확인되었다. 그러나 크랙의 길이가 PZT 소자의 중심에서 떨어진 위치인 6 cm 혹은 14 cm일 때에는 상대적으로 PZT 소자에 미치는 영향도 작아져서, 오실레이터의 공진 주파수의 변화도 상대적으로 작게 나타났다. 이상의 실험 결과와 그림 4의 실험상황에 따르면, 오실레이터 센서는 센서로부터 한정된 거리 내에 있는 크랙에 대해서만 민감하게 반응하므로, 결국 오실레이터 센서의 작동 범위는 자신 주위의 국부적인 영역에만 제한된다고 할 수 있다.

다음으로 그림 4의 손상시나리오 case #O2에 해당하는 그림 7 (b)에서 크랙이 없는 알루미늄 판에 부착된 오실레이터의 공진 주파수에 비해서, 길이가 12 cm인 크랙이 발생하고 그 개수가 증가함에 따라 오실레이터의 공진 주파수가 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 그림 7 (a)에 대한 해석에서와 마찬가지로 식 (1)~(3)에 보인 압전소자를 포함하는 판의 임피던스의 변화에 기인하는 것이다 [7,8]. 그러나 크랙의 개수에 따른 오실레이션 주파수의 변화량은 점차 감소하다가, 개수가 8개 이상일 때에는 감소량이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 그림 4에 보인 것처럼 개수를 증가시키기 위해 추가적으로 생성시킨 크랙일수록 PZT 소자에서 먼 위치에 순차

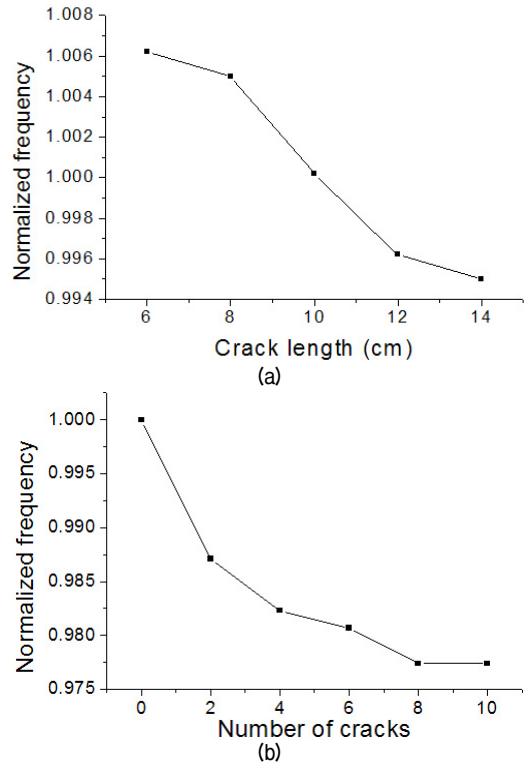


그림 7. 오실레이터 센서의 공진 주파수 변화: (a) 공진주파수 vs. 크랙의 길이, (b) 공진주파수 vs. 크랙의 개수
Fig. 7. Frequency change of the oscillator sensor: (a) resonant frequency vs. crack length, (b) resonant frequency vs. number of cracks.

적으로 위치하므로, 결국 PZT소자에 미치는 영향이 그만큼 작아지게 된다. 이상의 결과는 그림 7 (a)와 마찬가지로 오실레이터 센서의 작동 범위는 자신 주위의 국부적인 영역에만 제한된다는 것을 확인시켜주는 것이다.

4.2. 램파 센서를 이용한 광역 손상 진단

램파를 이용한 구조물 손상 진단 시스템의 측정결과 또한 오실레이터 센서에 의한 실험결과 같이 크랙의 위치, 길이 그리고 개수에 따른 램파 pulse-echo 및 through transmission 신호를 분석하였다 [15].

먼저 크랙 위치를 측정하기 위해 그림 5의 case #L1에 있어서 발신자 PZT 소자에 의해 발신된 램파의 pulse-echo 신호에 의해 손상부의 한쪽 측면의 위치를 식 (5)에 의해 계산할 수 있다. 일례로서 case #L1에 대해서 크랙의 위치 a 값을 10 cm, 15 cm 그리고 20 cm 로 5 cm 간격으로 변화시켰을 때 크랙에 의해 반사된 램파의 pulse-echo 응답을 그림 8에 나타내었다. 그림 8은 a 값이 10 cm, 15 cm 그리고 20 cm인 세 가지 경우 각각에 대해 측정된 pulse-echo 신호를 하나의 그래프로 중첩해서 나타낸 것이다. 이 결과로부터 식 (5)에 의해 계산한 a 는

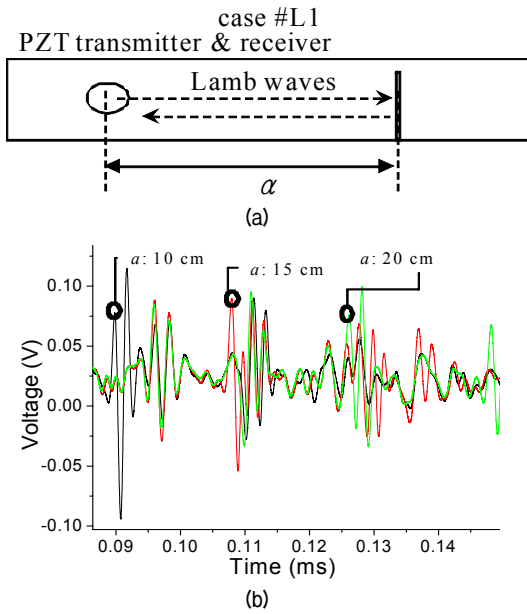


그림 8. Pulse-echo 측정에 의한 PZT 센서의 응답: (a) pulse-echo 실험 개략도, (b) pulse-echo 응답 신호
 Fig. 8. Responses of the PZT sensor by the pulse-echo measurement: (a) scheme of the pulse-echo experiment, (b) pulse-echo response signals.

표 1. Pulse-echo에 의한 PZT 소자의 응답
 Table 1. TOF and flight path of the ultrasonic transducer.

Exact a (cm)	10	15	20
TOF (ms)	0.0898	0.1079	0.1261
Flight path (cm)	19.95	30.02	39.99
Estimated crack distance (cm)	9.98	15.01	19.99

표 1과 같다. 표 1에서 계산된 a 값을 보면 실제 참값과 거의 일치함을 알 수 있다.

실험적으로 크랙의 길이 변화는 TOF 그리고 진폭과 같은 다양한 변수에 영향을 미친다. Pulse-echo에 의한 TOF는 크랙의 위치를 판별하는데 있어서는 우수하지만, 크랙의 길이나 개수와 같이 좀 더 세밀한 정보를 판독하는 데는 적합하지 않다. 그러나 through transmission에 의한 방식으로 측정된 신호의 TOF와 진폭은 크랙의 위치 뿐만 아니라 길이와 개수의 영향을 받게 된다. 그림 9는 그림 5에 나타낸 판에 의한 through transmission 측정법의 개략도를 나타낸다. 그리고 그림 5에서 x 가 10 cm 일 때 PZT 발신자에 의해 발신된 램파를 PZT 센서로 수신한 신호의 TOF와 진폭의 변화는 그림 10에 나타나 있다. 그림 10의 결과는 총 5회에 걸친 실험 측정치의 평균 값을 나타낸 것이다.

그림 10 (a)는 크랙의 길이 변화에 따른 램파의 TOF 변화를 나타내는데, 크랙의 길이가 10 cm, 즉 판 폭의

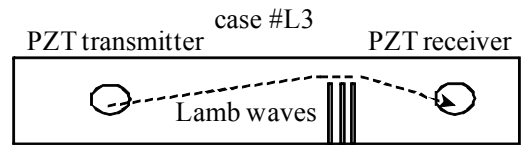


그림 9. Through-transmission 실험 개략도
 Fig. 9. Scheme of the through-transmission experiment.

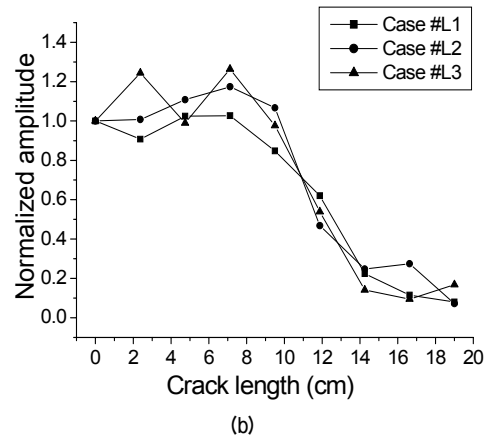
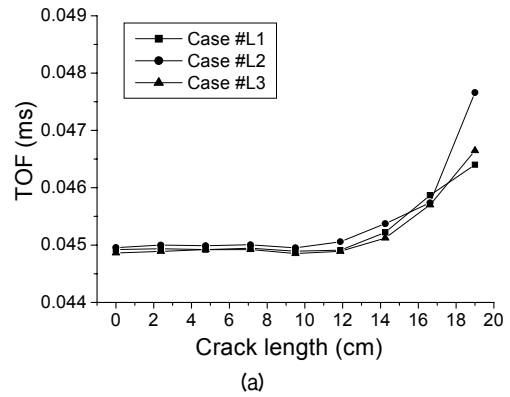


그림 10. Through-transmission에 의한 램파 신호 응답 ($x=10$ cm): (a) TOF, (b) 진폭

Fig. 10. Lamb wave signals from the through-transmission measurement ($x=10$ cm): (a) TOF, (b) amplitude.

중심을 넘어 증가할 때부터 지속적인 TOF의 증가가 관찰된다. Through transmission 측정법에서는 발신자에 의해 방사된 램파 중 최단 시간내에 수신자에 도달하는 파형을 측정하여 TOF를 구하므로, 크랙의 길이가 판의 중심까지 도달하는 10cm 이 전에는 TOF에 아무런 영향을 못 미치게 된다. 그리고 수신된 신호의 진폭의 변화를 나타내는 그림 10 (b)에서는 크랙 길이가 10 cm에 도달하기 이전과 14 cm 이상으로 증가되었을 때에는 진폭이 다소 불규칙적으로 변화되었으나 크랙 길이가 10 cm에서 14 cm 범위에 있을 때에는 진폭이 크랙의 길이 변화에 따라서 안정적으로 감소되는 경향이 관찰되었다.

그림 10을 보면 전체적으로 크랙의 길이 증가에 따라

TOF는 증가하고, 진폭은 감소하지만, 크랙의 특정 길이 구간에서 전체 경향과 다른 특성이 관찰되었다. 그 이유는 두 가지 형태의 램파의 간섭현상으로 설명되어질 수 있는데 첫 번째 경우로 크랙의 길이가 10 cm가 되기 이전에는 그림 11 (a)에서 램파를 발생시키는 PZT 소자로부터 센서까지 직접적으로 수신되는 램파 (W_i)와 크랙의 끝 지점에서 반사되어 센서로 수신되는 램파 (W_r)와의 간섭이 수신된 신호의 해석을 어렵게 한다. 즉, 센서에서의 신호는 W_i 와 W_r 의 중첩된 형태로 수신되는데, W_i 와 W_r 의 전파거리가 같더라도 크랙 틈에서의 반사로 인해 W_r 은 W_i 와 180°의 위상차를 가지게 된다. 여기에 크랙의 길이가 알루미늄 판 폭의 중심선까지 증가함에 따른 W_i 와 W_r 의 전파거리 차이에 의한 위상차가 더해져서, 결국 특정 크랙의 길이에서는 W_i 와 W_r 간에 위상차가 0°가 되어 서로 보강간섭을 일으키고, 또 다른 특정 크랙의 길이에 대해서는 위상차가 180°가 되어 상쇄간섭을 일으켜 수신된 신호의 크기가 감소하게 되는 것이다. 그리고 두 번째 경우로는 크랙의 길이가 14 cm 이상으로 성장 했을 때로써 그림 11(b)와 같이 판의 한쪽 측면에서 반사된 파 (W_e)와 W_r 의 간섭이 발생하는 것이다. W_e 와 W_r 의 간섭 또한 W_i 와 W_r 의 간섭 메커니즘과 유사하게 보강 및 상쇄 현상을 나타낸다. 이러한 램파의 간섭으로 인한 수신된 신호의 변동은 사용되는 램파의 파장과 판의 폭의 길이에 의존하며, 램파의 파장이 길수록 그리고 판의 폭이 작을수록 그림 10 (b)에 발생하는 불규칙적인 진폭의 변동구간 또한 확대된다. 즉 판의 폭을 크게 그리고 램파의 파장을 작게하면 이러한 램파의 간섭영향을 피할 수 있다. 그러나 램파의 파장이 작아지면 램파의 전파시 전파거리에 따른 에너지 손실이 커진다는 단점이 존재한다.

크랙의 개수는 TOF와 진폭에 모두 영향을 미치는데, 특히 크랙 개수의 증가에 따른 TOF의 변화는 결국 알루미늄 판 내를 진행하는 파의 전파거리 증가에서 기인하는 것이다. 전파거리는 수신된 신호의 TOF와 중심 주파수를 알면 식 (5)를 통하여 계산할 수 있다. Case #L1, #L2 그리고 #L3에 대한 램파의 through-transmission에 따른 TOF 측정 결과를 그림 12에 나타나 있다. 크랙이 있는 손상부와 센서사이의 거리는 5 cm로 고정되어 있다. 측정된 TOF는 크랙의 개수에 비례해서 증가하는 것으로 나타났으며, 서로 다른 크랙 길이에 대해서도 동일한 경향이 확인되었다. 즉, 이상의 결과는 through-transmission 된 램파의 TOF를 분석하면 크랙의 개수를 판별할 수 있음을 나타낸다.

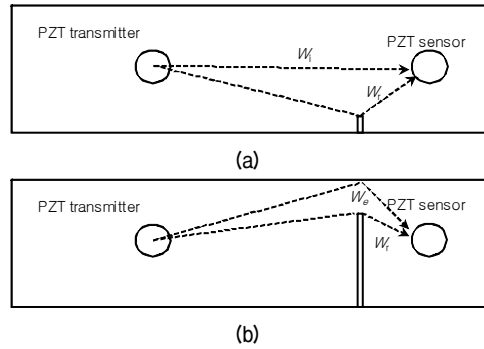


그림 11. 판내 램파의 간섭 메커니즘: (a) 판 폭의 중심 보다 짧은 크랙일 경우, (b) 판 폭의 중심 보다 긴 크랙일 경우
 Fig. 11. Interference mechanism of Lamb waves inside the plate: (a) when the crack is shorter than a half of the plate width (b) when the crack is longer than a half of the plate width.

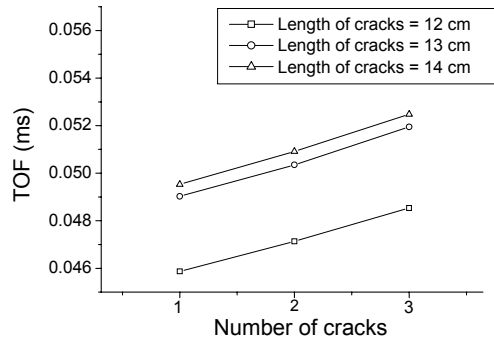


그림 12. 크랙 개수에 따른 TOF 변화 ($x=5$ cm)
 Fig. 12. Variation of the TOF in response to the number of cracks ($x=5$ cm).

V. 국부 및 광역 손상 진단 시스템의 결합

5.1. 국부 손상 측정

구조물의 내의 손상 시나리오 case #G1을 이용하여 국부 손상 진단용인 오실레이터 센서와 광역 손상 진단 시스템인 램파 센서를 하나로 조합하였을 때의 동작 방식과 크랙의 위치와 길이 그리고 개수 등과 같은 손상 정보를 파악하는데 있어서의 각 측정 시스템의 성능평가와 측정 범위 및 상호보완 관계를 분석하였다. 먼저 case #G1인 경우에 대하여는 크랙의 개수가 한 개일 때, 크랙의 위치 (x)를 3 cm로 고정시키고 크랙의 길이를 1 cm 씩 증가시켰다. Case #G1에 대한 오실레이터 및 램파를 이용한 through-transmission 기법에 의한 공진 주파수의 변화 및 수신된 신호의 진폭은 각각 그림 13의 (a)와 (b)에 나타내었다.

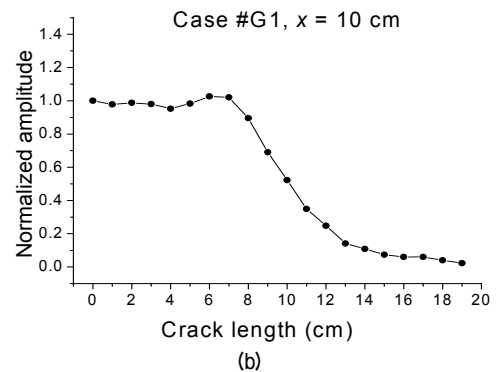
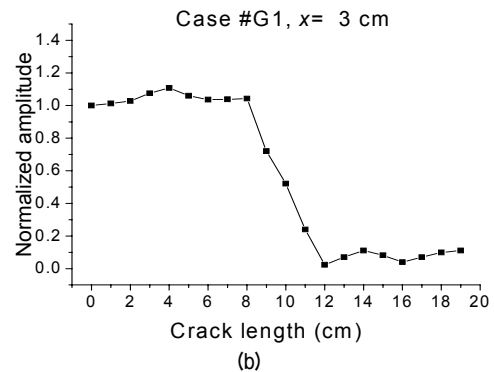
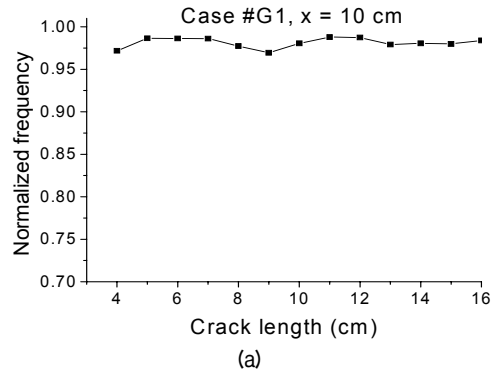
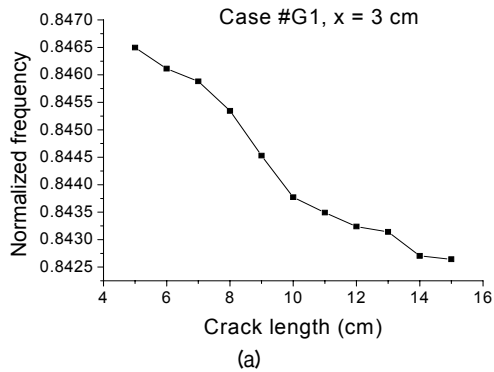


그림 13. $x=3$ cm에서 크랙의 길이에 따른 PZT 센서의 응답 신호 변화: (a) 오실레이터 센서의 공진 주파수, (b) through transmission된 램파의 진폭

Fig. 13. Variation of the responses of the PZT sensors in relation to crack length when $x=3$ cm: (a) resonant frequency of the PZT oscillator, (b) amplitude of the through transmitted Lamb wave.

그림 14. $x=10$ cm에서 크랙 길이에 따른 PZT 센서의 응답 신호 변화: (a) 오실레이터 센서의 공진 주파수, (b) through transmission된 램파의 진폭

Fig. 14. Variation of the responses of the PZT sensors in relation to crack length when $x=10$ cm: (a) resonant frequency of the PZT oscillator, (b) amplitude of the through transmitted Lamb wave.

그림 13의 (a)를 보면 크랙의 위치가 오실레이터로부터 3 cm 떨어진 지점에서 크랙의 길이가 증가했을 때 확연한 공진 주파수의 감소가 확인 된다. 이것은 PZT 오실레이터에서 손상부의 위치가 구조물에 부착된 오실레이터로부터 근거리에서 위치하였기 때문에 오실레이터 센서가 크랙에 민감하게 반응하기 때문이다. 반면에, 램파를 사용한 through transmission에 의한 응답신호의 진폭을 나타내는 그림 13의 (b)에서는 크랙의 위치가 센서로부터 3 cm 떨어져 있을 때 크랙의 길이가 판 폭의 중간선을 넘어서면서부터 신호의 진폭이 급격히 떨어지면서 다소 불규칙적인 형태로 변화하였다. 그 이유는 크랙이 PZT 센서 주위에서 성장해감에 따라 크랙이 PZT 발신자로부터 전파되는 음파를 가로막기 때문이다. 이상의 실험결과로 볼 때 PZT 오실레이터가 램파 측정기법 보다 구조물 국부 손상에 대해서 우수한 성능을 보인다고 할 수 있다.

키고 크랙의 길이를 1 cm 씩 증가시키고 오실레이터 및 램파를 이용한 through-transmission 기법에 의한 공진 주파수의 변화 및 수신된 신호의 진폭은 각각 그림 14의 (a)와 (b)에 나타내었다.

그림 14의 (a)를 보면 크랙의 위치가 오실레이터로부터 10 cm 떨어진 지점에서 크랙의 길이가 증가했을 때 공진 주파수의 변화가 미미하다. 이것은 PZT 오실레이터에서 손상부의 위치가 구조물에 부착된 오실레이터로부터 원거리에서 위치하였기 때문에 오실레이터 센서가 크랙에 민감하게 반응하지 않기 때문이다. 반면에, 램파를 사용한 through transmission에 의한 응답신호의 진폭을 나타내는 그림 14의 (b)에서는 크랙의 위치가 센서로부터 10 cm 떨어져 있을 때 크랙의 길이가 판 폭의 중간선에 근접하면서부터 신호의 진폭이 지속적으로 감소하는 형태를 보였다. 이상의 실험결과로 볼 때 램파 측정기법이 PZT 오실레이터 보다 구조물 광역 손상에 대해서 우수한 성능을 보인다고 할 수 있다.

5.2. 광역 손상 측정

Case #G1인 경우에 크랙의 위치 (x)를 10 cm로 고정시

5.3. 크랙의 개수 변화에 대한 국부 및 광역 진단 시스템의 성능평가

크랙의 개수의 변화에 따른 오실레이터 회로의 공진 주파수 변화와 램파를 이용한 through-transmission에 의해 수신된 신호의 전파거리의 변화를 관찰하기위해 손상 시나리오 case #G2에서 크랙의 길이를 11 cm로 고정하고, 첫 크랙의 위치를 3 cm로 설정하고 차례로 1 cm 씩 왼쪽으로 이격시켜 크랙의 개수를 증가시켰다. 그림 15는 이에 해당되는 각 측정 시스템의 응답 신호를 나타낸다.

그림 15의 (a)를 보면 오실레이터의 공진 주파수가 크랙의 개수 5개까지는 크랙의 개수증가에 따라 거의 선형적으로 감소되었으나 그 이후부터는 다시 증가하였다. 이러한 현상은 크랙의 개수가 국부영역에 국한되어 있을 때에는 오실레이터가 구조물의 손상에 민감하게 반응하지만 크랙의 개수가 광역적인 범위로 확장됨에 따라 오실레이터의 크랙에 대한 감도가 부정확해지기 때문이다. 그리고 그림 15의 (b)에는 크랙의 개수 변화에 따른 수신된 램파신호의 TOF를 나타내었는데, 크랙의 개수가 5개

로 증가할 때까지는 그림 13의 (b)에서 확인된 것과 같은 램파 신호의 불안정으로 인해 크랙에 개수에 대한 감도가 낮은 반면, 크랙의 개수가 5개 이상으로 확장된 경우에는 안정적이면서 고감도로 TOF가 증가하는 현상이 나타났다. 그러므로 구조물 내의 취약한 국부적 부위에 대해서는 국부손상에 대해 감도가 높은 오실레이터 센서를 사용하고, 광역적으로 발생하는 일반적인 크랙의 개수에 대해서는 램파를 사용하여 전체적인 손상의 형태를 측정하는 통합 측정 시스템이 유용하다고 할 수 있다.

VI. 결론

종래의 연구들은 센서 주변의 국부적인 손상 진단이나, 램파를 이용한 일반적인 비파괴 검사 기법에 관한 것들이 많았으나, 본 논문에서는 압전센서를 이용하여 구조물 내에서 발생하는 손상이 센서가 부착된 지점에서 국부적으로 혹은 구조물 전체에 걸친 광역적으로 발생할 때 통합적으로 적용될 수 있는 건전성 진단 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 국부적인 손상에 대해서는 압전 오실레이터 센서를 이용하여 저렴하고 부피가 작으면서도 크랙과 같은 손상에 대하여 민감하게 작용하는 측정시스템을 이용하고, 광범위하게 위치한 손상에 대해서는 램파 센서를 이용하여 측정할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다. 더 나아가, PZT 소자를 오실레이터 센서로 혹은 램파를 발생 및 수신하는 트랜스듀서로 활용함으로써 서로 다른 국부 혹은 광역의 측정시스템을 하나의 통합된 시스템으로 구현하여 실험을 통해 실험을 통해 검증함으로써 구조물 내에 발생하는 국부 및 광역적인 손상에 대하여 구조물의 건전성을 모니터링 할 수 있는 새로운 시스템을 개발하였다.

감사의 글

본 연구는 Smart Infra-Structure Technology Center (SISTeC)과 한국과학재단 (KOSEF)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. J. W. Ayres, Z. Chaudhry and C. A. Rogers, "Localized

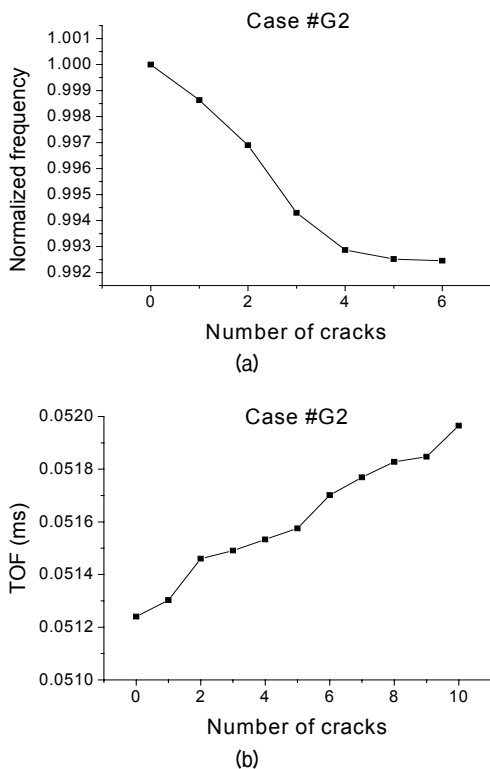


그림 15. 크랙의 개수에 따른 PZT 센서의 응답신호 변화: (a) 오실레이터 센서의 공진 주파수, (b) through transmission된 램파의 TOF

Fig. 15. Variation of the responses of the PZT sensors in relation to the number of cracks : (a) resonant frequency of the PZT oscillator, (b) TOF of the through transmitted Lamb wave.

Health Monitoring of Civil Infrastructure via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, SPIE*, vol. 2946, pp. 123-131, 1996.

2. J. W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry and C. A. Rogers, "Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures," *Smart material and Structures*, vol. 7, no. 5, pp. 599-605, 1998.
3. V. Giurgiutiu, A. Zagrai, J. Bao, J. Redmond, D. Roach and K. Rackow, "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structure," *International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, SPIE*, vol. 6, no. 1, pp. 3-21, 2003.
4. S. H. Park, Y. R. Roh, J. H. Yi, C. B. Yun, H. K. Kwak and S. H. Lee, "Impedance-based damage detection for civil infrastructures," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, SPIE*, vol. 5391, pp. 705-716, 2004.
5. C. Ling, F. Sun, and C. A. Rogers "Electro-mechanical impedance modeling of active material system," *Smart material and Structures*, vol. 5, no. 1, pp. 171-186, 1996.
6. S. Bhalla and C. K. Soh, "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 32, no. 12, pp. 1897-1916, 2003.
7. 김동영, 노용래, "구조물 손상 탐지를 위한 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서 개발," *한국지진공학회 논문집*, 10권, 6호, 1-8쪽, 2006.
8. 김동영, 노용래, "구조물 손상 탐지를 위한 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서 개발," *한국음향학회지*, 26권, 2호, 95-101쪽, 2007.
9. C. Valle, M. Niethammer, J. Qu and L. J. Jacobs "Crack characterization using guided circumferential waves", *Journal of the Acoustical Society of America* vol. 110, no. 3, pp. 1282-1290, 2001.
10. A. Lhémy, "Impulse-response method to predict echo responses from defects in solids. Part I. Theory," *Journal of the Acoustical Society of America* vol. 98, no. 4, pp. 2197-2208, 1995.
11. J. Takatsubo, B. Wang, H. Tsuda, N. Toyama and K. Urabe "Ultrasonic Spectroscopy for the Identification of Defects and Environmental Disturbances," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 1, no. 12, pp. 1397-1404, 2007.
12. S. Grondel, J. Assaad and C. Delebarre "Study of Fatigue Crack in Riveted Plate by Acoustic Emission and Lamb Wave Analysis," *IEEE Ultrasonic Symposium*, pp. 805-808, 2000.
13. Y. Lu, L. Ye and Z. Su, "Crack identification in aluminium plates using Lamb wave signals of a PZT network," *Smart material and Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 839-849, 2006.
14. X. M. Wang and C. F. Ying, "Scattering of Lamb waves by a circular cylinder," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 4, pp. 1752-1763, 2001.
15. 김병수, 노용래, "사각형 노치에 대한 램파의 다중 모드 반사와 투과 계수 해석", *한국음향학회지*, 27권, 3호, 129-139쪽, 2008.

저자 약력

• 김 병 수 (Byungsoo Kim)

한국음향학회지 제27권 제3호 참조

• 권 혁 상 (Hyeoksang Kwon)



2008년 2월: 안동대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
2008년 3월~ 현재: 경북대학교 기계공학과 석사과정

• 김 진 옥 (Jinwook Kim)

2002년 3월~ 현재: 경북대학교 기계공학과 학사과정



• 노 용 래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제26권 제2호 참조