

구조물 손상 탐지를 위한 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서 개발

Development of a Thickness Mode Piezoelectric Oscillator Sensor to Detect Damages in a Structure

김 동 영*, 노 용 래**

(Dongyoung Kim*, Yongrae Roh**)

*경북대학교 센서공학과, **경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2006년 10월 20일, 수정일자: 2006년 11월 11일; 채택일자: 2007년 2월 5일)

본 논문에서는 구조물의 손상탐지를 위한 두께 방향 모드 압전 오실레이터의 가능성을 연구하였다. 두께 방향 모드 오실레이터 센서는 구조물의 주요부에 부착된 두께 방향 모드 압전소자와 피드백 오실레이터 회로로 구성되어있다. 구조물의 손상은 구조물의 임피던스를 변화를 야기시키며, 그 결과로 구조물의 공진 주파수가 변하게 된다. 오실레이터 센서는 간단한 방법으로 이 공진 주파수 변화를 연속적으로 관측할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 시편에 크랙의 크기와 개수를 인위적으로 변화시키면서, FEM해석과 실험을 통해 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 적용 가능성을 증명 하였다.

핵심용어: 압전 센서, 오실레이터, 사회기반시설, 임피던스, FEM

투고분야: 수중 음향 분야 (5.6)

This paper presents the feasibility of a thickness mode piezoelectric oscillator to detect damages in structures. The thickness mode oscillator sensor is composed of an electronic feedback oscillator circuit and a piezoelectric thickness mode vibrator to be attached to a structure of interest. Damage to the structure causes a change in the impedance spectrum of the structure, which results in a corresponding change of a resonant frequency of the structure. The oscillator sensor can instantly detect the frequency change in a very simple manner. Feasibility of the piezoelectric oscillator sensor was verified with a sample aluminum plate where artificial cracks of different lengths and number were imposed in sequence. Validity of the measurement was confirmed through comparison of the experimental data with the results of finite element analyses of a plate with cracks.

Key words: Piezoelectric sensor, Oscillator, Civil infrastructure, Impedance, FEM

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

노후구조물 및 장대, 고층구조물이 증가하면서 구조물의 안전성 확보를 위한 상태평가에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 각종 구조물은 설계 시 고려하지 못한 공학적 현상이나 과도한 하중 그리고 구조의 부재를 이루고 있는 재료의 결함 등에 의하여 사용 기간 중 손상이 발생할 수 있다. 구조물의 일부에서 국부적으로 발

생한 손상이라 할지라도 조기에 발견하여 적절한 보수를 하지 않으면 국부적인 손상이 전파되어 구조물 전체의 파괴를 초래할 수 있다. 일상 생활 및 경제 활동의 기초가 되는 사회 기반 시설의 경제적이고 안전한 유지 보수를 위하여 이론적으로 잘 정립된 손상 진단 기법이 필수적이다.

여러 가지 손상 진단 기법 중에 압전 센서를 이용하여 구조물의 상시 진단 (health monitoring)에 대한 연구들이 많이 발표되어 왔다 [1-5]. 대부분의 연구자들은 구조물의 내부에 발생한 손상을 구조물에 부착된 압전 센서의 임피던스 변화를 측정함으로써 진단하였다. 대표적

책임저자: 노 용 래 (yryong@knu.ac.kr)
대구광역시 북구 산격동 1370 경북대학교 기계공학과
(전화: 053-943-8716; 팩스: 053-956-9914)

인 예로 Ayres 등은 임피던스 기반 측정법으로 간단한 트리스 구조물 (truss structure)과 트리스 접합부분에 손상 진단을 하기 위하여 PZT 트랜스듀서를 사용하였다 [2]. 또한 콘크리트와 구조물에 임피던스 측정법을 적용하였고, 구조물의 크랙과 느슨해진 볼트에 대한 임피던스 측정법의 연구 등이 활발히 이루어진 바 있다 [4, 5]. 그러나 임피던스 측정법은 복잡한 장비와 해석 기술을 요구한다. 이러한 임피던스 측정법의 한계를 극복하기 위해서, 본 연구에서는 좀더 일반적이고 광범위한 적용이 가능하면서 측정장비의 소형화와 센서 구조의 단순화를 이룰 수 있는 두께 모드 압전 오실레이터 센서를 제안하였다.

본 논문에서는 구조물에서 두께 모드 압전 오실레이터 센서의 손상탐지 가능성을 연구하였다. 압전 오실레이터 센서는 구조물에 중대한 손상을 주는 주요부에 부착되는 두께 방향의 진동모드 형 압전소자와 피드백 (feedback) 오실레이터 회로로 구성되어 있다. 오실레이터 회로는 두께 모드 압전소자의 특정 공진 주파수에 일치되도록 하였고, 압전소자의 공진신호를 피드백 하도록 설계하였다. 구조물에 부착된 압전소자에 오실레이터 회로를 이용해 발생시킨 공진 신호를 주파수 카운터를 이용하여 관찰함으로써 구조물의 손상을 탐지하고자 하였다. 구조물의 손상전과 손상후의 두께 방향 공진 주파수를 비교하면 손상 지수로 이용 할 수 있다.

II. 이론

압전 재료는 외부 응력 혹은 변형 등을 주었을 때 압전 재료의 전극 면에 전기 신호가 발생하며, 그 역으로 압전소자의 양 전극 면에 전압 혹은 전계를 인가하면 압전소자가 기계적인 변형을 발생시킨다. 압전 오실레이터 센서의 기본적인 개념은 구조물에 부착되어 있는 압전소자 (PZT)의 구조물 내 손상 유무로 인한 공진 주파수의 변화를 관측하는 것이다.

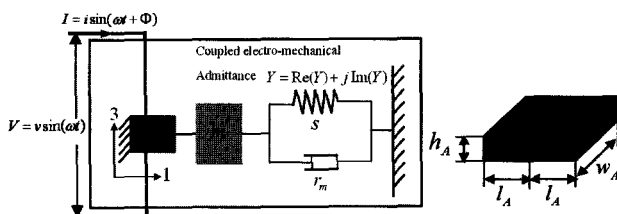


그림 1. 1-D 구조물-PZT센서의 상호작용 모델 [3]
Fig. 1. 1-D Model of a PZT with its Host Structure [3].

구조물에 부착되어 있는 PZT와 구조물과의 상호작용은 그림 1의 간단한 1-D 모델을 이용해 묘사 할 수 있다. 본 연구에서는 PZT의 두께 방향 모드를 적용하였다. 두께 방향 모드에 해당되는 압전 계수 d_{33} 은 전압을 3 (z) 방향으로 인가 해 주었을 때 3 (z) 방향으로 변형이 발생한다. 두께 방향 모드 PZT에서 전기-역학적 변화의 관계는 식 (1)과 같이 압전 구조 방정식으로 표현 할 수 있다 [6-9].

$$\begin{aligned} S_3 &= s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \\ D_3 &= d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, T_3 과 S_3 은 3 방향의 응력과 변형율이고, D_3 은 3 방향의 전기적 변위이며, s_{33}^E 은 전기장에 독립적인 3 방향의 compliance이고, d_{33} 은 압전 상수이며, ϵ_{33}^T 은 응력에 독립적인 3방향의 유전 상수이며, 그리고 E 는 3 방향의 전계이다.

PZT 센서가 구조물에 부착되어 있는 그림 1과 같은 상태에서, PZT 센서로부터 측정되는 임피던스는 구조물의 역학적 임피던스와 PZT센서로부터 측정되는 전기적 임피던스가 연계된 전기-역학적 임피던스 (Electro-Mechanical impedance)이다. 그림 1의 자유도계에서 구조물의 역학적 임피던스 $Z(\omega)$ 는 각주파수 ω 에서 조화가진력 F_0 와 속도 v_0 의 비율로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 [8, 9].

$$Z(\omega) = \frac{F_0}{v_0} = \sqrt{r_m^2 + \left(\frac{m\omega^2 - s}{\omega}\right)^2} e^{i\theta}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{m\omega^2 - s}{r_m \omega} \quad (2)$$

여기서, m , r_m , s 는 각각 구조물의 질량, 감쇠도, 강성을 의미한다. 그림 1에서의 압전소자의 운동 방정식은 다음과 같다 [8, 9].

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

여기서, u 는 3 방향의 변위, c 는 $(Y_{33}^E / \rho)^{1/2}$ 로 정의 되는 파속 (Wave speed)이다. Y_{33}^E 는 일정한 전기장 하에서 두께 방향으로의 탄성계수이고 ρ 는 압전소자의 밀도이다. 그리고 폭 w_A , 높이 h_A , 그리고 길이가 $2l_A$ 인 직육면체 형태의 PZT의 역학적 임피던스 (Z_A)는 식 (1), (3)에서 다음과 같이 구할 수 있다 [8, 9].

$$Z_A(\omega) = \frac{k w_A h_A Y_{33}^E}{i \omega \tan(k l_A)} \quad (4)$$

여기서 k 는 파수 (Wave number)이다. 이로부터 구조물의 영향을 포함한 압전소자에 전위를 인가하였을 때 나타나는 전류는 다음과 같다 [8, 9].

$$I(\omega) = i \omega E w_A l_A \left[\frac{d_{33}^2 Y_{33}^E Z_A \tan(k l_A)}{Z_A + Z} + \epsilon_{33}^T - d_{33}^2 Y_{33}^E \right] \quad (5)$$

전기장은 $E = V/h_A$ 로 정의 되므로, 전기-역학적 어드미턴스는 전류 I 와 전압 V 의 비율로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$Y(\omega) = \frac{I(\omega)}{V(\omega)} = i \omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left[(\epsilon_{33}^T - d_{33}^2 Y_{33}^E) + \frac{Z_A}{Z_A + Z} d_{33}^2 Y_{33}^E \frac{\tan(k l_A)}{k l_A} \right] \quad (6)$$

위의 식들로부터 구조물-PZT센서 시스템의 전기-역학적 어드미턴스는 주파수 ω 의 함수로 주어지며, 어드미턴스 $|Y|$ 가 최대가 되는 주파수에서 공진 현상이 발생한다. 이러한 공진 주파수는 식 (6)에서 $Z_A(\omega) + Z(\omega) = 0$ 으로 될 때 성립된다. 식 (2)에서처럼 구조물의 임피던스 $Z(\omega)$ 는 구조물의 질량, 감쇠도, 및 강성과 관계되어 있으므로 손상으로 인해 구조물의 질량, 감쇠 및 강성에 변화가 나타나면 그에 따라 구조물 임피던스가 변하게 되고, 따라서 $Y(\omega)$ 가 최대가 되는 공진 주파수의 값 또한 달라진다. 즉, 구조물 내 손상에 따라 구조물-PZT계의 두께 방향 공진 주파수에 변화가 나타나게 되고, 이러한 공진 주파수의 변화를 관찰하면 결국 구조물의 손

상지수로 사용할 수 있게 된다. 본 연구에서는 이러한 이론을 바탕으로 유한요소 해석 도구인 ANSYS와 간단한 구조물의 실험을 통해서 크랙의 크기와 위치에 따라 구조물-PZT의 전체 임피던스가 어떻게 변화하고 그에 따른 두께 방향 공진 주파수가 어떻게 변화하는지를 비교 분석하였다.

III. 유한요소 해석

2절의 이론이 적용된 두께 방향 압전 오실레이터 센서가 알루미늄 평판에 부착된 모델에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에는 상용 유한요소 해석 도구인 ANSYS를 이용하였으며, 여러 가지 형태의 손상에 대한 압전소자의 두께 방향 공진 주파수 변화를 분석하였다. 압전소자는 가로 13 mm, 세로 13 mm, 두께 0.44 mm의 크기를 가지고, 압전소자를 부착하는 알루미늄 판은 길이 300 mm, 폭 100 mm, 두께 4 mm 크기를 가지도록 제작하였다. 그림 2는 크랙이 주어진 알루미늄 판 위에 부착된 두께 방향 압전소자의 유한요소 모델을 예시하고 있다. 폭 방향으로 50 mm, 길이 방향으로 가장자리에서 25 mm 떨어진 곳에 압전소자를 부착하였다. 그림에서 d 는 크랙의 길이를 의미하고, N 은 압전소자 중심에서 알루미늄 판의 길이 방향으로 1 cm 떨어진 거리에서부터 1 cm 간격으로 주어진 크랙의 개수이다. 유한요소 해석을 위한 모델은 크랙의 길이와 크랙의 개수를 알루미늄 판의 길이 방향으로 압전소자에서 1 cm 떨어진 거리에서부터 순차적으로 늘려가면서 제작하였다. 먼저, 알루미늄 평판에 일정한 크랙 길이에서 크랙의 개수를

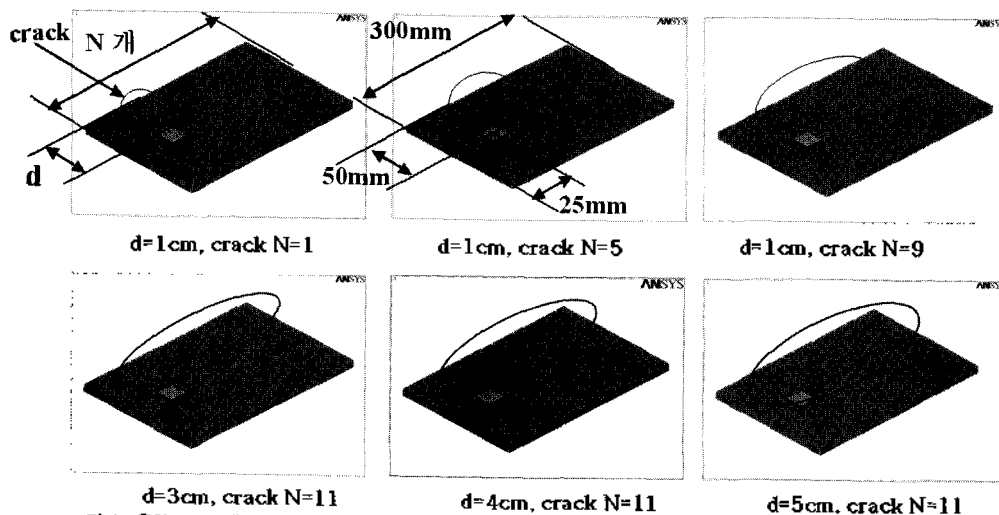


그림 2. 유한요소 모델
Fig. 2. Finite element models.

늘려가면서 모델을 제작하였다. 그리고 알루미늄 판의 길이 방향으로 압전소자에서 1 cm 떨어진 지점에서 크랙의 길이를 늘려가면서 모델을 제작하였다. 이러한 모델들은 구조물에 크랙의 개수와 길이에 따라 구조물-PZT의 전체 임피던스 변화와 두께 방향 공진 주파수의 변화를 조사하기 위해 만든 것이다. 즉, 크랙의 개수와 길이에 따른 두께 방향 공진 주파수의 변화와 센서의 유효 반응 범위를 알아보기 위한 것이다.

해석 결과들은 그림 3, 4와 5에 나타나 있다. 해석 결과에서 나온 값들은 손상이 없는 모델의 결과값을 기준값으로 취해서 표준화한 것들이다. 그림 3은 길이가 3 cm인 크랙의 개수를 늘렸을 때, 각각의 경우에 해당되는 임피던스 스펙트럼을 나타낸 것이다. 임피던스 스펙트럼을 보면 크랙의 개수가 0개에서 11개까지 늘어 따라 근소한 차이로 공진 주파수가 바뀌고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 공진점의 변화를 그림 4에 정량적으로 나타내었다. 그림 4에서 크랙의 개수 0 ~ 7 개까지는 공진 주파수가 점차 감소하지만, 크랙의 개수가 9개인 경우에 공진 주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 공진 주파수가 감소하는 이유는 식 (2)와 (6)에서 볼 수 있듯이 크랙이 많아짐에 따라 알루미늄 판의 강성이 감소하여 나타나는 현상으로 보이고, 반면에 크랙의 개수가 계속 많아진다면 크랙이 판의 질량에 더 많은 영향을 미쳐서 오실레이션 주파수가 증가 하는 것으로 판단된다. 유한요소 해석결과에서 압전소자를 중심으로 크랙의 개수가 7 개 이상인 경우에 공진주파수가 증가하는 것은 센서의 측정범위가 크랙의 개수가 7개까지라는 것이다. 즉, 각 크랙은 압전 소자로부터 1 cm 간격으로 멀어지면서 설치되었으므로, 본 센서는 압전소자를 중심으로 7 cm 떨어진 범위 내에서 사용 가능하다는 것을 알 수 있다. 따

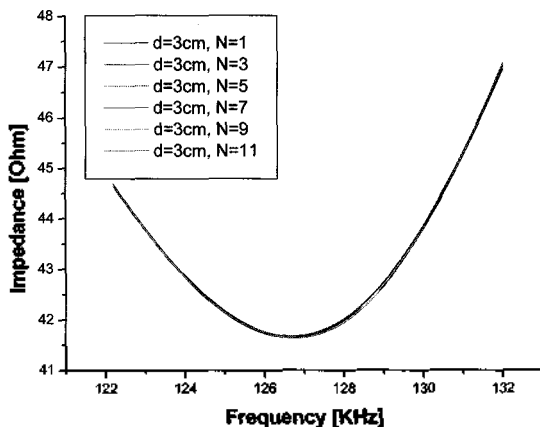


그림 3. 크랙의 개수에 따른 임피던스 스펙트럼
Fig. 3. Impedance spectrum change in relation to the number of cracks.

라서 본 압전 센서는 센서 주위의 일정 범위내의 크랙 개수에 민감하게 반응하며, 역으로 센서의 오실레이션 주파수를 관찰하면 크랙의 개수를 파악할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 7 cm 이후의 크랙에 대해서는 측정 범위의 한계로 인해 정확한 손상탐지가 어렵다는 의미가 된다.

그림 5에서는 알루미늄 판의 길이 방향으로 압전소자에서 1 cm 떨어진 지점에서의 크랙의 길이가 달라짐에 따른 공진주파수 변화를 보이고 있는데, 전반적으로 크랙의 길이가 증가함에 따라 공진주파수는 감소함을 보이고 있다. 그러나 크랙의 길이가 1 cm 일 때 공진주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 인위적으로 발생 시킨 크랙의 길이가 강성 보다는 질량의 변화에 더 많은 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 압전소자가 알루미늄 판의 폭 방향으로 중심에 위치해 있으므로 크랙의 길이 5 cm 이상의 경우에 대해서는 크랙의 길이 5 cm중심으로 대칭이 된다. 이러한 결과를 볼 때 본 센서는 주변에 존재하는 크랙의 길이 변화를 감지할 수 있으며, 특히 압전소자에서 반경 1~5 cm 영역에서 손상 감

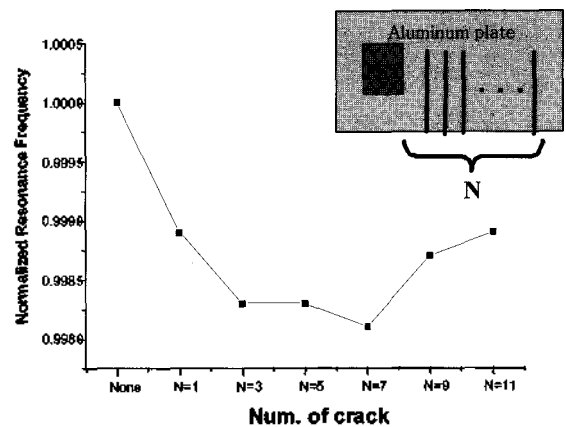


그림 4. 크랙의 개수에 따른 주파수 변화
Fig. 4. Oscillation frequency change in relation to the number of cracks.

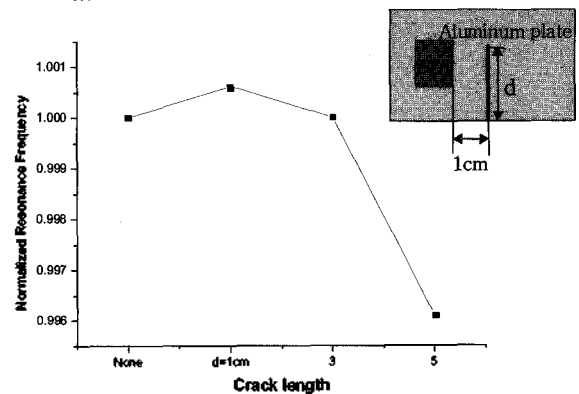


그림 5. 크랙의 길이에 따른 주파수 변화
Fig. 5. Oscillation frequency change in relation to the length of cracks.

지도가 높다는 것을 알 수 있다. 역으로 센서의 오실레이션 주파수를 관찰하면 크랙의 길이를 파악할 수 있을 것을 알 수 있다.

IV. 실험

유한요소 해석을 통해 분석한 결과를 실험적으로 검증하기 위한 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 동작 및 감지 신호를 획득 할 수 있는 센서 시스템을 그림 6과 같이 구성하였다. 압전 오실레이터 센서 시스템은 알루미늄 시편에 부착되어 있는 두 개의 압전소자와 두 개의 피드백 오실레이터 회로로 구성되어 있다. 압전소자는 초전 특성 (pyroelectricity)도 동시에 가지고 있는 재료이다 [6]. 즉, 주위의 온도 변화에 따라서도 전하를 동시에 발생시키므로, 측정된 신호로부터 구조물 손상에 의한 영향만을 정확히 추출하기가 어렵다. 이러한 초전특성에 따른 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서 그림 6과 같이 두 개의 알루미늄 시편에 압전 오실레이터 센서를 각각 설치하여, 한쪽은 기준 센서로서 구조물에 손상을 가하지 않고 측정하여 온도 등의 주변 환경적 요인에만 반응하도록 하였다. 그리고 나머지 한쪽은 측정 센서로서 구조물에 손상을 가하면서 계측하여 주변 환경적 요인과 구조물 손상에 대한 변화에 모두 반응하도록 하였다. 계측된 이 두 센서 신호의 차이는 주변의 환경적 요인을 배제한 구조물의 손상만을 계측한 결과가 된다.

각각의 오실레이터에서 출력된 신호는 주파수 카운터 (PM6669)를 사용하여 측정 채널과 기준 채널에서 각각 오실레이션된 주파수를 카운터 한다. GPIB 송수신기를

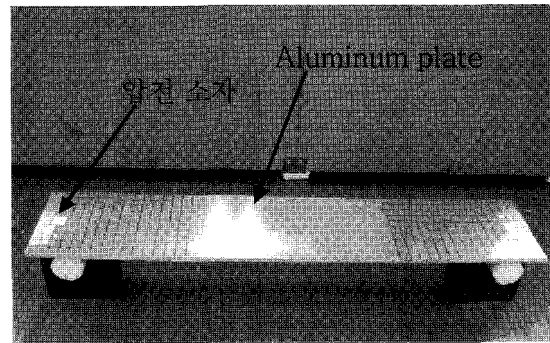


그림 7. 압전소자가 부착되어 있는 판 시편
Fig. 7. Experimental plate with a piezoceramic patch attached.

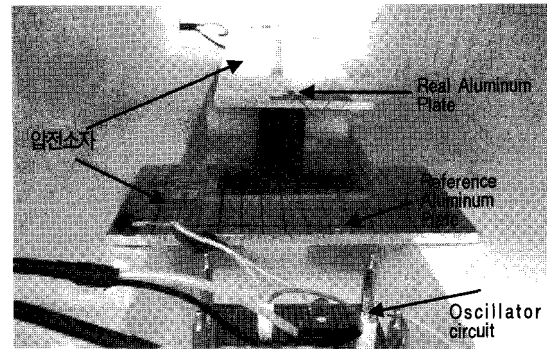


그림 8. 압전 오실레이터
Fig. 8. Piezoelectric oscillator.

이용하여 데이터를 PC로 전송하며, 전송된 데이터는 PC 상의 프로그램인 LabVIEW (National Instrument Co.)를 이용하여 기록 분석하게 되며, 화면에 측정 채널과 기준채널의 차 값을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 압전 오실레이터 센서 시스템을 구성하였다. 그림 7과 그림 8은 실험에 사용한 압전소자가 부착되어 있는 알루미늄 시편과 압전 오실레이터 센서의 사진이다.

그림 9는 일정한 길이의 크랙 개수에 따른 압전 센서의 오실레이션 주파수의 변화를, 그리고 그림 10은 크랙

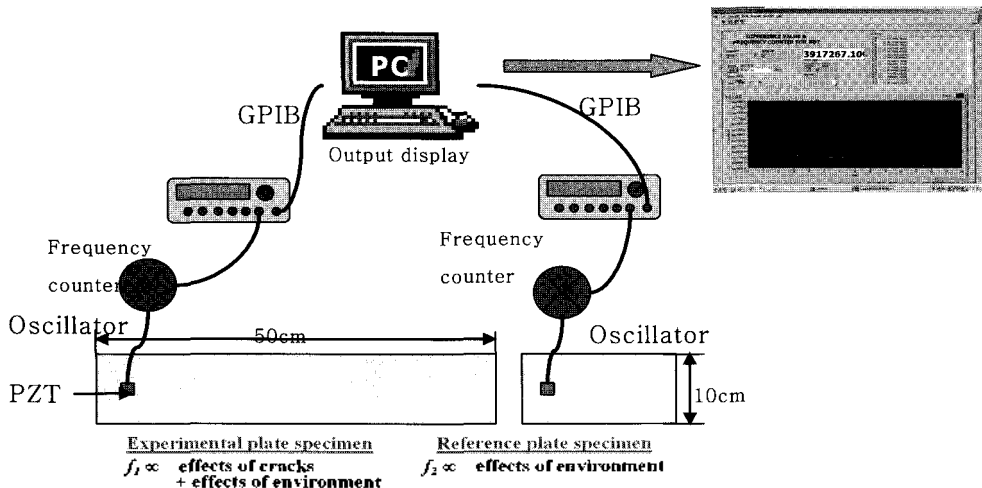


그림 6. 압전 오실레이터의 측정 시스템
Fig. 6. Measurement system of the piezoelectric oscillators.

의 길이 변화에 따른 오실레이션 주파수 변화를 보이고 있다. 그림의 값들은 모형시편에 손상이 없을 때의 값을 기준으로 표준화한 것이다.

실험 결과로 손상탐지를 위한 주파수 변화 그래프들은 그림 5와 6에 나타난 유한요소 해석 결과와 거의 유사한 것을 알 수 있다. 이러한 결과들은 이론적 및 유한요소 해석에서 수립한 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 작동원리를 실험적으로 확인하는 것이며, 본 센서가 구조물 내의 크랙의 길이와 개수를 측정하기에 적합한 시스템임을 검증하는 것이다. 그러나 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서가 주위의 가까운 손상에는 잘 반응하지만 그 이상의 거리에서는 손상탐지에 한계가 있다는 것도 동시에 확인되었다. 이상의 실험 결과와 유한요소 해석으로부터 본 연구에서 개발된 두께 진동 모드 압전 오실레이터 센서는 제한된 거리 범위 안에서 크랙의 개수와 길이에 민감하게 반응하여, 구조물내의 손상 탐지에 효율적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

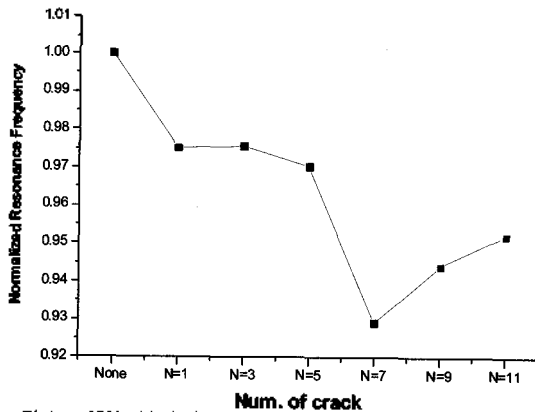


그림 9. 크랙의 개수에 따른 오실레이션 주파수 변화
Fig. 9. Oscillation frequency change in relation to the number of cracks.

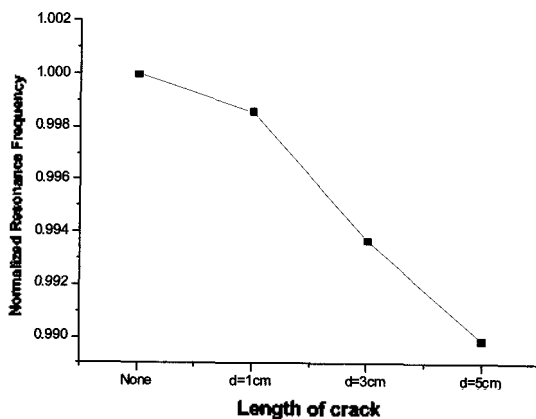


그림 10. 크랙의 길이에 따른 오실레이터 주파수 변화
Fig. 10. Oscillation frequency change in relation to the length of cracks.

V. 결론

본 연구에서는 기존의 구조물 손상탐지용 임피던스 기반 측정법의 단점을 극복하기 위하여 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서 시스템을 제안하였다. 개발된 센서는 두께 진동 모드형 압전 소자와 피드백 오실레이터 구동 회로로 구성되며, 손상 여부에 따른 압전 소자의 공진 주파수 변화를 관찰하는 작동원리를 가진다. 센서의 효용성은 유한요소 해석과 모형 교량 시편의 실험을 통해 크랙의 길이와 개수 등에 대한 반응도와 감도 특성을 평가함으로써 검증하였다. 평가 결과 개발된 센서는 간단한 구조에 고감도 특성을 나타내어 구조물 손상 탐지에 적용할 수 있는 가능성을 입증하였으나, 손상을 탐지할 수 있는 범위가 센서 주변으로 국한된다는 단점도 확인 되었다. 향후 본 센서의 감도는 유지하면서 감지 범위를 확장하기 위한 연구가 계속될 필요가 있으며, 이는 사회기반시설의 상시 진단을 위한 시스템으로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 Smart Infra-Structure Technology Center (SISTeC)과 Science and Technology (MOST)와 Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF)의 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. V. Giurgiutiu, J. Redmond, D. Roach and K. Rackow, "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures," Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, SPIE, 3985, 294-305, 2000
2. J. W. Ayres, Z. Chaudhry and C. A. Rogers, "Localized Health Monitoring of Civil Infrastructure via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches," Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, SPIE, 2719, 123-131, 1996
3. J. W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry and C. A. Rogers, "Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures," Smart material and Structures, 7, 599-605, 1998
4. K. K. H. Tseng, C. K. Soh, A. Gupta and S. Bhalla, "Health monitoring of civil infrastructure using smart piezoceramic transducers," Proceedings of 2nd International Conference on Computational Methods for Smart Structures and Materials, 153-62, 2000

5. 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, 5391, 705-716, 2004
6. J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals*, (Clarendon Press, Oxford University, 1985) chapter.1-9, pp. 7-169
7. IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE Transactionson Sonics and Ultrasonics, SU-31, 2, 1984
8. S. Bhalla and C. K. Soh, "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32 (2), 1897-1916, 2003
9. C. Liang, F. P. Sun and C. A. Rogers, "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems," Smart Material and Structures, 5, 171-186, 1996

저자 약력

- 김 동 영 (Dongyoung Kim)

2004년 8월: 경북대학교 생물산업기계공학과 졸업 (공학사)

2005년 3월 ~ 현재: 경북대학교 센서공학과 석사과정

* 주관심분야: 비파괴검사

- 노 용 래 (Yongrae Roh)

한국물향학회지 제 20권 제4호 참조