

구조물 손상 탐지를 위한 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서 개발

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

김동영¹⁾ · 노용래²⁾

Kim, Dong-Young · Roh, Yong-Rae

국문 요약 >> 본 논문에서는 사회기반시설의 손상탐지를 위한 경 방향 모드 압전 오실레이터의 가능성을 연구하였다. 경 방향 모드 오실레이터 센서는 구조물의 주요부에 부착된 경 방향 모드 압전소자와 피드백 오실레이터 회로로 구성되어있다. 구조물의 손상은 구조물의 임피던스를 변화를 야기 시키며, 그 결과로 구조물의 공진 주파수가 변화하게 된다. 오실레이터 센서는 간단한 방법으로 이 공진 주파수 변화를 연속적으로 관측할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 시편에 크랙의 크기와 개수를 인위적으로 변화 시키면서, FEM해석과 실험을 통해 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 적용 가능성을 증명 하였다.

주요어 압전 센서, 오실레이터, 사회기반시설, 임피던스, FEM

ABSTRACT >> This paper presents the feasibility of a lateral mode piezoelectric oscillator to detect damages in civil infrastructures. The lateral mode oscillator sensor is composed of an electronic feedback oscillator circuit and a piezoelectric lateral 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 sensors can instantly detect the frequency change in a very simple manner. Feasibility of the piezoelectric oscillator sensor was verified in this work 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

1. 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 구조 부재를 이루고 있는 재료의 결함 등에 의하여 사용 기간 중 손상이 발생할 수 있다. 구조물의 일부분에서 국부적으로 발생한 손상이라 할지라도 조기에 발견하여 적절한 보수를 수행하지 않으면 국부적인 손상이 전파되어 구조물 전체의 파괴를 초래할 수 있다.

전 국민의 일상생활 및 경제 활동의 기초가 되는 사회기반시설의 경제적이고 안전한 유지 보수를 위하여 이론적으로 잘 정립된 손상 진단 기법이 필수적이다.

여러 가지 손상 진단 기법 중에 압전 센서를 이용하여 사회기반시설의 상시 진단(health monitoring)에 대한 연구들이 많이 발표되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 대부분의 연구자들은 구조물의 내부에 발생한 손상을 압전 센서의 임피던스 변화를 측정함으로써 진단하였다. 대표적인 예로 Ayres 등은 임피던스 기반 측정법으로 간단한 트러스 구조물(truss structure)과 트러스 접합부분에 손상 진단을 하기 위하여 PZT 트랜스듀서를 사용하였다.⁽⁴⁾ 또한 콘크리트와 구조물에 임피던스 측정법을 적용하였고, 구조물의 크랙과 느슨해진 볼트에 대한 임피던스 측정법의 연구 등이 활발히 이루어지고 있다.^(5,6) 그러나 임피던스 측정법은 고가의 복잡한 장비와 해석을 요구한다. 이러한 임피던스 측정법의 한계를 극복하기 위해서,

¹⁾ 경북대학교, 센서 및 디스플레이공학과, 석사과정

²⁾ 경북대학교, 기계공학과, 교수

(대표저자: yryong@knu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 9. 26 / 심사종료일 : 2006. 11. 28)

이전 연구에서는 좀더 일반적이고 광범위한 적용이 가능하면서 측정 장비의 소형화와 저가의 구현이 가능한 두께 모드 압전 오실레이터 센서를 제안하였다.⁽⁷⁾ 두께 방향 모드 압전 오실레이터는 피드백 오실레이터 회로와 두께 방향 압전 진동자로 구성 되어 있다. 또한 주변 환경적인 요인에 의한 공진주파수 변화에 대한 보상으로 두께 방향 모드 압전 오실레이터 센서 시스템은 측정채널과 기준채널의 두 개의 센서로 구성되어 있다. 두께 모드 압전 오실레이터 센서에 대한 유한요소 해석과 시험을 통해 구조물에서 두께 모드 압전 오실레이터 센서의 손상탐지 가능성을 입증한 바 있다. 두께 모드 압전 오실레이터 센서 시스템은 고감도의 저가형 센서이며, 간단한 방법으로 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 이 센서는 손상탐지 가능 범위가 센서 주변으로 국한되어 있다는 단점이 있었다.

본 연구에서는 이러한 두께 모드 압전 오실레이터 센서의 손상탐지 가능 범위의 한계를 극복하기 위하여 경 방향 모드 압전 오실레이터를 제안하였다. 구조물에 부착된 경 방향 모드 압전소자는 변형 방향이 구조물에 부착된 면과 평행하여, 두께 모드 압전소자 보다 구조물의 특성 변화에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서는 두께 모드 센서보다 더 넓은 영역에 걸쳐 구조물에 발생하는 손상에 반응할 것이다.

경 방향 압전 오실레이터 센서는 구조물에 중대한 손상을 주는 주요부에 부착되는 경 방향 진동모드 압전소자와 피드백(feedback) 오실레이터 회로로 구성되어 있다. 그리고 오실레이터 회로는 압전소자의 특정 경 방향 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 경 방향 공진 주파수를 비교하면 손상 지수로 이용 할 수 있다. 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서에서 사용한 시편과 압전소자의 모양은 두께 모드 압전

오실레이터 센서에서 사용한 것과 동일하다.

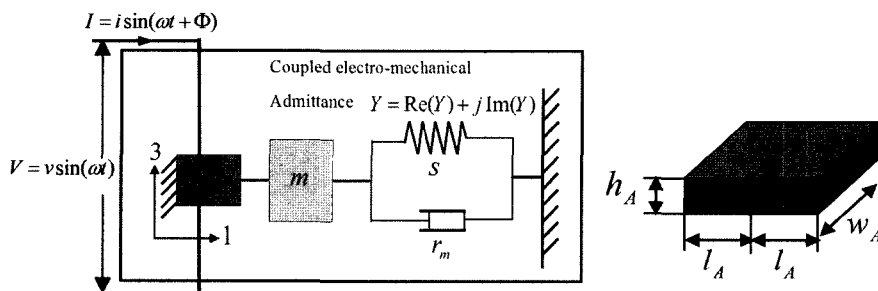
본 연구에서는 압전 오실레이터를 구조물에 적용하여 경 방향 모드 압전 오실레이터의 가능성을 검증하기 위하여 크랙의 유무, 크랙의 개수, 크랙의 길이에 대하여 유한요소 해석과 실험을 수행하였다.

진동특성을 이용한 기존의 방법들은 여러 요인들에 의하여 주로 수십 Hz 이내의 저차 진동모드를 활용하고 있다. 그러나 균열과 같이 강성변화에 크게 반응하지 않으면서, 붕괴를 유발할 수 있는 구조손상의 경우 수십 Hz 이내의 저주파 영역보다는 kHz 혹은 MHz 단위의 고주파 영역의 진동특성에서 그 영향이 더 민감하게 나타난다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 수백 kHz에서 수 MHz까지의 고주파에서 작동하는 압전 오실레이터 센서를 개발하여 균열과 같은 작은 손상에 대해서도 효과적인 손상탐지가 가능하도록 하였다.

2. 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 기계-전기적 임피던스 변화를 관측하는 것이다.

구조물에 부착되어 있는 PZT와 구조물과의 상호작용은 그림 1의 간단한 1-D 모델을 이용해 묘사 할 수 있다. 본 연구에서는 PZT의 경 방향 모드를 적용하였다. 경 방향 모드에 해당되는 압전 계수 d_{31} 는 전압을 3(z) 방향으로 인가해 주었을 때 1(x) 방향으로 변형이 발생한다. 경 방향 모드 PZT에서 전기-역학적 변화의 관계는 다음과 같이 압전 구성 방정식으로 표현 할 수 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾



〈그림 1〉 1-D 구조물-PZT센서의 상호작용 모델⁽³⁾

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, T_1 과 S_1 은 1 방향의 응력과 변형 율이고, D_3 은 3 방향의 전기적 변위이며, s_{11}^E 은 전기장에 독립적인 1 방향의 compliance이고, d_{31} 은 압전 상수이며, ε_{33}^T 은 응력에 독립적인 3방향의 유전 상수 이며, 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 임피던스는 각주파수 ω 에서 조화가진력 F_0 와 속도 v_0 의 비율로 나타낼 수 있다.^(10,11)

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

여기서, m , r_m , s 는 각각 구조물의 질량, 감쇠도, 강성을 의미한다.

그림 1에서의 압전소자의 운동 방정식은 다음과 같다.^(10,11)

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

여기서, u 는 1 방향의 변위, c 는 $(Y_{11}^E / \rho)^{1/2}$ 로 정의되는 파속(Wave speed)이다. Y_{11}^E 는 일정한 전기장 하에서 경 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.^(10,11)

$$Z_A(\omega) = \frac{k w_A h_A Y_{11}^E}{i \omega \tan(k l_A)} \quad (4)$$

여기서 k 는 파수(Wave number)이다.

이로부터 구조물의 영향을 포함한 압전소자에 전위를 인가하였을 때 나타나는 전류는 다음과 같다.^(10,11)

$$I(\omega) = i \omega E w_A l_A \left[\frac{d_{31}^2 Y_{11}^E Z_A \tan(k l_A)}{Z_A + Z} + \varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E \right] \quad (5)$$

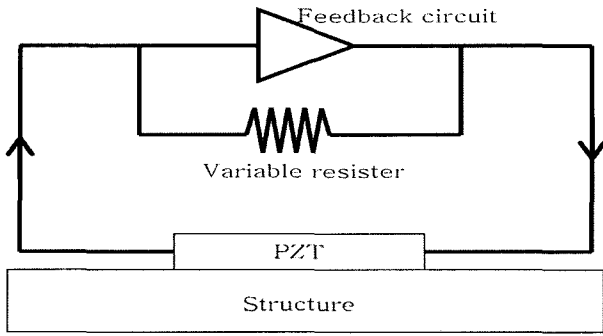
전기장은 $E=V/h_A$ 로 정의 되며, 전기-역학적 어드미턴스

는 전류 I 와 전압 V 의 비율로 나타낼 수 있다. 그러므로 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= \frac{I(\omega)}{V(\omega)} = i \omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left[(\varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E) \right. \\ &\quad \left. + \frac{Z_A}{Z_A + Z} d_{31}^2 Y_{11}^E \frac{\tan(k l_A)}{k l_A} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식들로부터 구조물-PZT센서 시스템의 전기-역학적 어드미턴스는 주파수 ω 의 함수로 주어지며, 어드미턴스 $|Y|$ 가 최대로 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 경 방향 공진 주파수의 변화가 나타나게 되고, 이러한 공진 주파수의 변화를 관찰하면 결국 구조물의 손상지수로 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 경 방향 공진 주파수가 어떻게 변화하는지를 비교 분석하였다.

경 방향 모드 압전 오실레이터 센서는 피드백 오실레이션 회로와 경 방향 진동 모드 압전소자로 구성되어 있다. 이러한 오실레이터 회로는 전압을 인가하였을 때 압전소자의 특정 공진신호를 피드백 하면서 오실레이션을 발생한다. 오실레이터는 저항과 인덕터, 캐패시터, 가변저항 그리고 압전소자에 해당되는 병렬 캐패시터로 구성되어 있다. 본 연구에서 오실레이터 회로에 압전소자를 적용함으로써 압전 오실레이터 센서를 구현 하였다. 오실레이터 회로에 있는 가변저항의 크기를 변화하면, 특정 주파수에서 주파수를 발생시킬 수 있도록 조절도 가능하다. 이렇게 구성된 오실레이터는 압전소자의 공진신호와 피드백에 의해서 증폭되는데 주파수의 sine 파가 되는 동안 지수적 특성을 가지며 커진다. 이 신호는 저항 성분에 의한 영향으로 계속 커지게 되고 인덕터와 리액턴스의 값이 가장 작을 때 정상상태에 도달하게 된다. 이를 공진주파수라고 한다. 이러한 공진주파수의 오실레이션 신호는 주파수 카운터(PM6669)에 의해서 검출되게 된다. 오실레이터의 출력신호의 범위는 수십 kHz에서 수 MHz까지 이다. 그림 2는 압전 오실레이터의 개략도 이다.



〈그림 2〉 압전 오실레이터 센서 구조 개략도

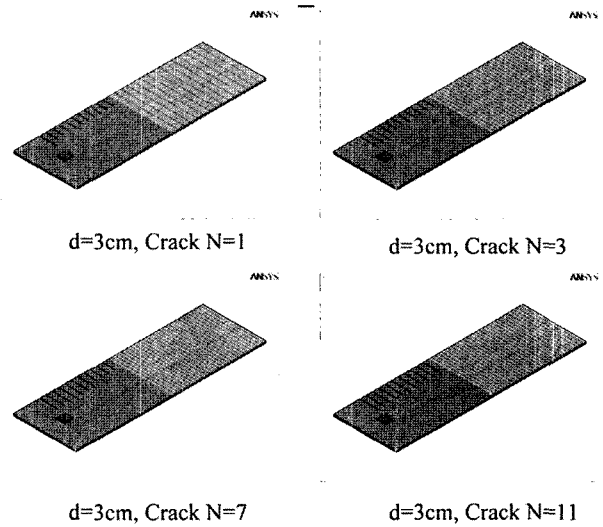
3. 유한요소 해석

2절의 이론이 적용된 경 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 경 방향 공진 주파수 변화를 분석하였다.

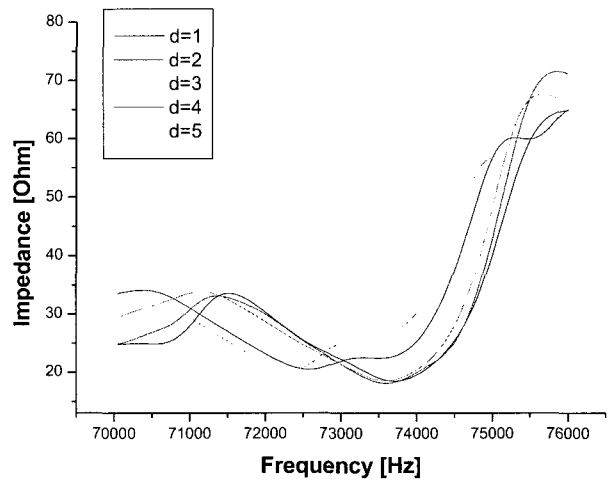
압전소자는 가로 13mm, 세로 13mm, 두께 0.44mm의 크기를 가지고, 압전소자를 부착하는 알루미늄 판은 길이 500mm, 폭 100mm, 두께 5mm 크기를 가지도록 제작하였다. 그림 3은 알루미늄 판에 크랙이 주어진 모델을 예시하고 있다. 유한요소 해석에서 사용된 모델의 엘리먼트(element)의 개수는 37436개이며, 노드(node)는 33254개로 구성되어 있다. 모델에서 압전소자는 알루미늄 판 위의 길이 방향의 가장 자리에서 25mm 떨어진 곳에 그리고 폭 방향으로 50mm 떨어진 곳에 부착하였다. 압전소자와 알루미늄 판 사이의 본드층은 무시할 만큼 작기 때문에 생략하였다. 그림에서 d 는 크랙의 길이를 의미하고, N 은 압전소자 중심에서 오른쪽으로 1cm 간격으로 주어진 크랙의 개수이다. 먼저, 알루미늄 평판에 일정한 크랙의 길이에서 크랙의 개수를 늘려가면서 모델을 제작하였다. 그리고 압전소자와 수직거리 1cm 떨어진 지점에서 크랙의 길이를 늘려가면서 모델을 제작하였다. 이러한 모델들은 구조물에 크랙의 개수와 길이에 따라 구조물-PZT의 전체 임피던스 변화와 경 방향 공진 주파수의 변화를 조사하기 위해 만들었다. 즉, 크랙의 개수와 길이에 따른 경 방향 공진 주파수의 변화와 센서의 유효 반응 범위를 알아보았다.

해석 결과들은 그림 4, 5와 6에 나타나 있다. 해석 결과에서 나온 값들은 손상이 없는 모델의 결과값을 기준 값으로 취해서 표준화(normalization) 하였다.

그림 4는 크랙의 길이를 변형시켰을 때, 각각의 경우에 해당되는 임피던스 스펙트럼을 나타낸 것이다. 임피던스가 가장 낮은 지점이 공진의 발생 지점이다. 그림 4의 임피던스



〈그림 3〉 크랙이 주어진 알루미늄 판의 유한요소 모델

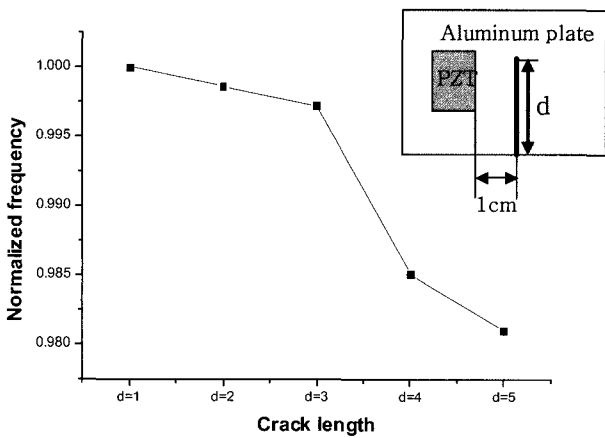


〈그림 4〉 크랙의 길이에 따른 임피던스 변화곡선

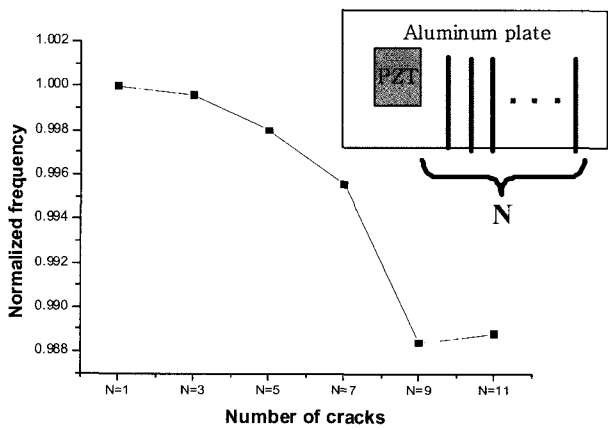
의 변화곡선을 보면 크랙 길이 1cm에서 3cm까지의 공진은 근소한 차이로 공진 주파수가 점점 낮아진다는 것을 볼 수 있다. 그리고 4cm와 5cm의 공진은 상당히 감소한 것을 보여주고 있다. 이러한 지점들을 그림 5에서 나타내었다.

그림 5는 압전소자와 수직 거리로 1cm 떨어진 지점에서의 크랙의 길이가 변함에 따른 공진 주파수 변화를 보이고 있는데, 크랙 길이 1~3cm까지는 주파수의 변화가 작지만, 압전소자의 부근인 4~5cm에서 더 많은 주파수의 변화를 볼 수가 있다. 이러한 결과를 볼 때 길이에 대해서는 크랙의 길이 1~5cm까지 센서의 유효 범위에 있으며, 압전소자에서 가까운 부근인 4~5cm부근에서 손상 감지도가 비교적 높다는 것을 알 수 있다. 즉 본 센서는 크랙의 길이 변화에 민감하게 반응하며, 역으로 센서의 오실레이션 주파수를 관찰하면 크랙의 길이를 파악할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6에서는 연속된 크랙의 개수가 늘어감에 따라 경 방향 공진 주파수가 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 압



〈그림 5〉 크랙의 길이에 따른 경 방향 압전 센서의 오실레이션 주파수 변화



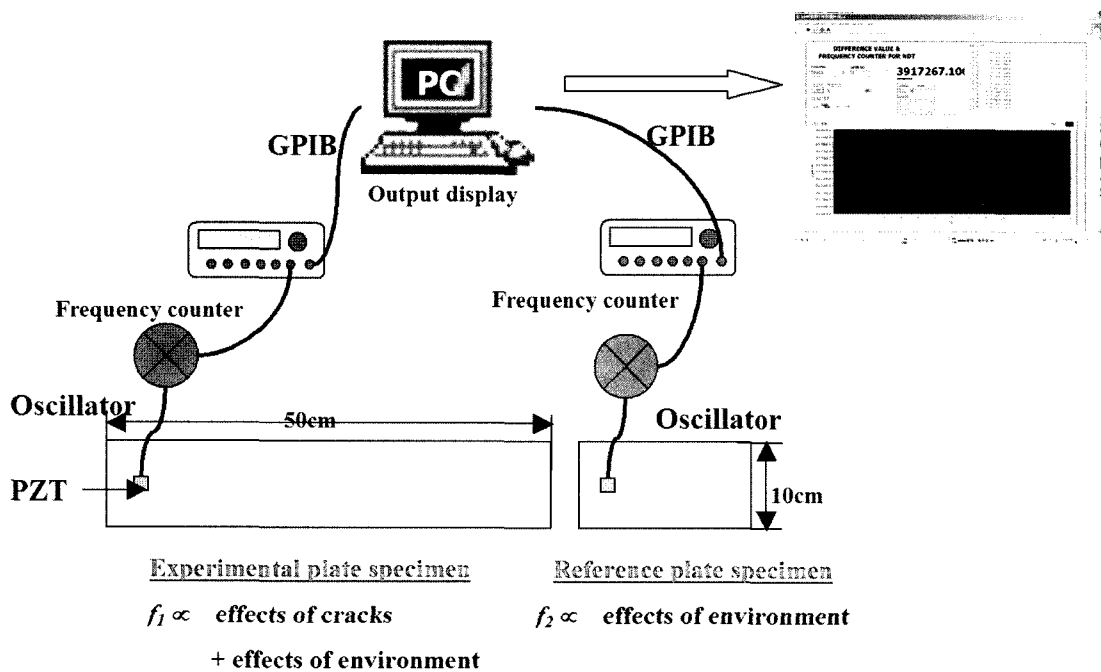
〈그림 6〉 크랙의 개수에 따른 경 방향 압전 센서의 오실레이션 주파수 변화

전소자에서 거리 1~9cm까지는 공진 주파수가 점차 감소하지만, 11cm 떨어진 곳에서는 공진 주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 오실레이션 주파수가 감소하는 이유는 식 (2)와 (6)에서 볼 수 있듯이 알루미늄 판의 강성이 감소하여 나타나는 현상에 기인한다. 반면에 크랙의 개수가 계속 많아진다면 크랙이 압전소자에서 멀어지면서 강성보다는 질량에 더 많은 영향을 받아서 오실레이션 주파수가 증가하는 것으로 판단된다. 이는 인위적인 크랙의 발생에 의한 질량의 감소가 강성보다 더 많은 영향력을 가지기 때문이다. 이러한 결과를 통해 본 센서는 압전소자를 중심으로 1~9cm까지의 범위에서 사용 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉, 본 압전 센서는 센서 주위의 일정 범위내의 크랙 개수에도 민감하게 반응하며, 역으로 센서의 오실레이션 주파수를 관찰하면 크랙의 개수를 파악할 수 있음을 알 수 있다.

4. 실험

유한요소해석을 통한 해석 결과를 실험적으로 검증하기 위한 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 동작 및 감지 신호를 획득 할 수 있는 측정 시스템을 그림 7과 같이 구성하였다.

압전소자는 초전특성(pyroelectricity)을 가지고 있는 재료이다. 그래서 온도에 대한 영향이 있기 때문에 정확한 계측이 힘들다. 이러한 초전특성에 대한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 그림 7과 같이 두 개의 알루미늄 시편

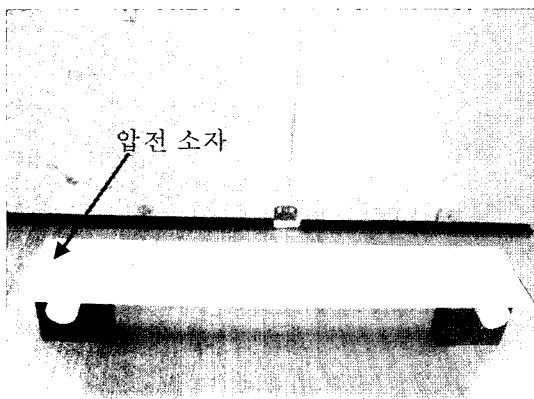


〈그림 7〉 경 방향 압전 오실레이터 센서 계측 시스템

에 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서를 설치하여 한쪽은 기준 센서로서 구조물에 손상을 가하지 않고 측정하여 주변 환경적 요인인 온도에만 반응하도록 계속하였다. 그리고 나머지 한쪽은 측정 센서로서 구조물에 손상을 가하면서 계속하여 주변 환경적인 요인과 구조물 손상에 대한 변화에 모두 반응하도록 계속하였다. 계속된 이 두 주파수의 차이는 주변 환경적인 요인인 온도의 영향을 배제한 구조물의 손상만을 계속한 결과가 된다. 이러한 측정 센서와 기준 센서는 본딩 조건과 시편의 크기에 의한 초기 공진주파수가 달라진다. 각각의 오실레이터 센서에서 카운터 되는 공진주파수의 차 값을 기준 주파수로 설정하여 구조물에 손상 후의 공진주파수 차 값과 비교하여 손상 정도를 계속할 수 있다.

그림 7에서는 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서 측정 시스템은 두 개의 알루미늄 시편에 부착되어 있는 각각의 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서, 주파수 카운터(PM6669), PC 그리고 윈도우 기반의 프로그램인 LabVIEW(National Instrument Co.)로 구성되어 있다. 알루미늄 판에 부착되는 압전소자는 전도성 에폭시(epoxy)를 이용하여 접착하였다. 그리고 오실레이터 회로에 압전소자를 연결하여 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서를 구성하게 된다. 각각의 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서에서 출력된 신호는 디지털화 및 인터페이스를 위하여 주파수 카운터를 사용하여 측정 채널과 기준 채널에서 각각 공진된 주파수를 카운터 한다. GPIB 카드 송수신기를 이용하여 데이터를 PC로 전송하며, 이렇게 전송된 데이터는 윈도우 기반의 프로그램인 LabVIEW를 이용하여 데이터를 기록 분석하게 되며, 측정채널과 기준채널의 차 값을 실시간으로 모니터링 할 수 있게 하여, 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서 측정 시스템을 구성하였다. 그림 8과 그림 9는 압전소자가 부착되어 있는 알루미늄 시편과 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 사진이다.

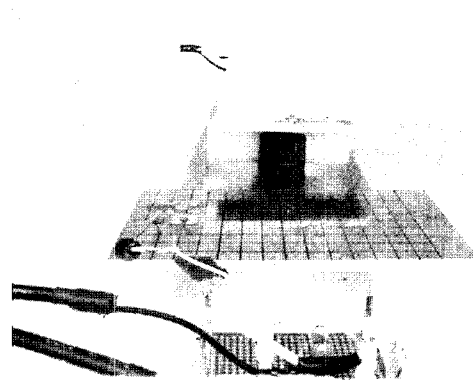
그림 10은 일정한 길이에서 크랙의 개수에 따른 경 방향



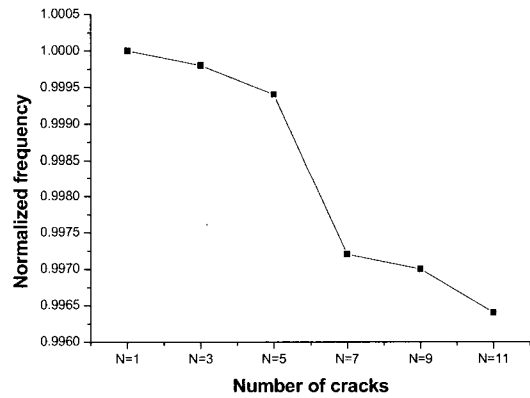
〈그림 8〉 압전소자가 부착되어 있는 모형 교량 시편

모드 압전 오실레이터 주파수의 변화를, 그리고 그림 11은 크랙의 길이 변화에 따른 주파수 변화를 보이고 있다. 그림의 값들은 모형시편에 손상이 없을 때의 값을 기준 값으로 취해서 표준화한 것이다.

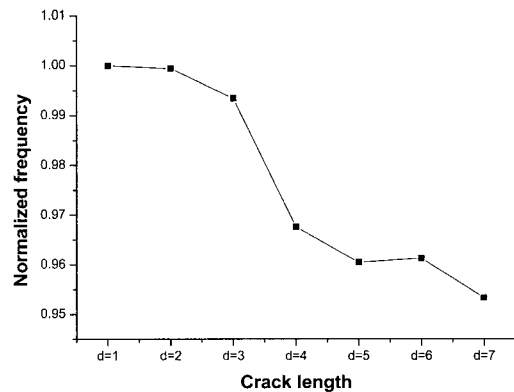
실험 결과로 손상탐지를 위한 주파수 변화 그래프들은 그림 5와 6에 나타낸 유한요소 해석도구인 ANSYS로 해석한 결과 값들과 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과들은 이론적 및 유한요소 해석에서 수립한 경 방향 모드 압전 오



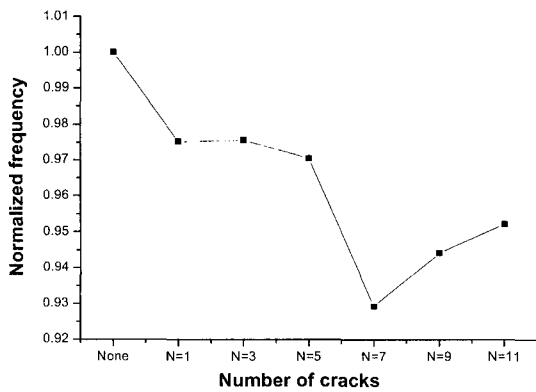
〈그림 9〉 압전 오실레이터 센서



〈그림 10〉 크랙 개수에 따른 경 방향 모드 압전 오실레이션 주파수 변화



〈그림 11〉 크랙의 길이에 따른 경 방향 모드 압전 오실레이션 주파수 변화



〈그림 12〉 크랙 개수에 따른 두께 모드 압전 오실레이터 주파수 변화

실레이터 센서의 작동원리를 실험적으로 확인하는 것이며, 본 센서는 구조물 내의 크랙의 길이와 개수를 측정하기에 적합한 시스템이라고 판단할 수 있다.

다음으로 이러한 경 방향 오실레이터 센서의 성능을 비교 분석하기 위하여 기 발표된 두께 모드 오실레이터의 실험 결과의 일례를 그림 12에 나타내었다.⁽⁶⁾ 먼저 연속된 크랙의 경우 두께 모드의 오실레이션 주파수는 압전소자에서 7cm 떨어진 지점에서부터 증가한다. 반면에 경 방향 모드의 오실레이션 주파수는 그림 10에서 11cm의 크랙에서도 감소한다. 11cm이후에서 어느 지점까지 감소하다가 임의의 지점에서 오실레이션 주파수가 증가 할 것이라 예상된다. 그러나 주파수의 변화는 두께 모드의 경우가 더 많은 변화를 보인다.

이러한 실험 결과와 유한요소 해석에서 알 수 있듯이 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서는 두께 모드 압전 오실레이터 센서 시스템보다 더 넓은 범위에 걸쳐 크랙을 감지 할 수 있다는 것을 확인하였으나, 연속된 크랙의 경우 감도가 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 압전소자를 이용한 구조물 손상 탐지기법들의 단점을 극복하기 위하여 새로운 압전 오실레이터 센서 시스템을 제안 하였다. 즉, 임피던스 측정법이 가지는 고가의 장비소요와 복잡한 측정법 등의 문제를 해결하고, 두께 모드 센서가 가지는 매우 좁은 측정범위의 한계를 극복하기 위해서, 간단한 구조로 상대적으로 넓은 범위에서 구조물의 손상을 탐지할 수 있는 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서 시스템을 개발하였다. 개발된 센서의 효용성은 유한요소 해석 결과와 모형 교량 시편의 실험 결과를 비교함으로써 확인하였다. 그 결과 경 방향 모드 압전 오실레이

터 센서 시스템은 매우 간단한 구조와 작동원리를 가지며 두께 모드 압전 오실레이터에 비해 더 넓은 영역을 감지 할 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 경 방향 모드 압전 오실레이터 센서의 구조물 손상 탐지용 적용 가능성을 검증 하였으며, 이는 사회기반시설의 상시 진단을 위한 시스템으로 활용 될 것으로 기대된다. 단, 본 논문에서는 구조물 내 손상의 종류로 크랙의 길이와 개수를 서로 독립적으로 증가시키며 인가하였는데, 향후 연구 내용으로는 보다 정밀한 신호처리 기법을 활용하여 이들 크랙의 길이와 개수가 복합적으로 변할 때의 센서 활용 가능성을 밝히는 것을 들 수 있다.

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 감사 드립니다.

참고 문헌

- Giurgiutiu, V., Redmond, J., Roach, D. and Rackow, K., "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, SPIE, Vol. 3985, 2000, pp. 294-305.
- 윤정방, 이진학, M. Q. Feng, 노용래, 박승희, "구조물의 모니터링을 위한 계측 - 평가 및 스마트센서의 활용," 한국진진공학회 workshop, 2003. 9.
- Ayres, J. W., Chaudhry, Z. and Rogers, C. A., "Localized Health Monitoring of Civil Infrastructure via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, SPIE, Vol. 2719, 1996, pp. 123-131.
- Ayres, J. W., Lalonde, F., Chaudhry, Z. and Rogers, C. A., "Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures," *Smart material and Structures*, Vol. 7, 1998, pp. 599-605.
- Tseng, K. K. H., Soh, C. K., Gupta, A. and Bhalla, S., "Health monitoring of civil infrastructure using smart piezoceramic transducers," *Proceedings of 2nd International Conference on Computational Methods for Smart Structures and Materials*, 2000, pp. 153-62.
- Park, S. H., Roh, Y. R., Yi, J. H., Yun, C. B., Kwak, H. K. and Lee, S. H., "Impedance-based Damage Detection for civil Infrastructures," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, SPIE, Vol. 5391, 2004, pp. 705-716.

7. Roh, Y. R., Kim, D. Y., Park, S. H. and Yun, C. H., "Damage detection for civil infrastructures with piezoelectric oscillator sensors," *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, SPIE, Vol. 6174, 2006, pp. 172-180.
8. Nye, J. F., *Physical Properties of Crystals*, Clarendon Press, Oxford University, 1985.
9. IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-31, No. 2, 1984.
10. Bhalla, S. and Soh, C. K., "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 12, 2003, pp. 1897-1916.
11. Liang, C., Sun, F. P. and Rogers, C. A., "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems," *Smart Material and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 171-186.