

압전소자를 이용한 판의 진동평가

Estimation using PZT for Vibration of Plates

김 이 성*
Kim, Ie-sung

박 강 근**
Park, Kang-geun

김 화 중***
Kim, Wha-jung

요 약

구조물의 모니터링과 손상 및 진동예측에 많은 센서들이 사용되고 있으며, 압전소자 및 변형계이지는 재료 및 구조물의 손상에 사용되고 있다. 그러나 진동에 대한 실험은 미진한 실정이다. 압전소자는 구조물의 변형되었을 때 로드셀의 경우에서처럼 작용되는 외력을 전기적인 신호로 바꾸어주는 센서이다. 이를 이용하여, 철근 콘크리트 판에서 진동예측을 압전소자의 전압변화로 사용하였다.

본 연구는 판에서 압전소자를 사용하여 진동을 예측하기 위한 기초적 연구이다.

Abstract

Various monitoring sensors have been used for the monitoring, damage and vibration prediction of structures. They have been used for sensing damage in a variety of materials and structures such as piezoelectric materials (PZT) and electric strain gauges. But, many experiments of vibration were not performed. The PZT changes physical force if load cell to electrical signal due to deformation of structure. The voltage change of piezoelectric sensors for plates are used for vibration prediction.

In this study, a fundamental study for vibration prediction using piezoelectric sensors are discussed in plates.

키워드 : 압전소자, 푸리에변환, 진동

Keywords : PZT, FFT, Vibration

1. 서 론

국내에서 진동에 의한 영향평가 연구를 많이 하고 있으며, 이러한 연구는 진동에 대한 응답자료와 수치해석에 의한 진동응답의 비교를 통해 구조물의 진동응답예측을 하고 있다.

철근콘크리트 슬래브의 진동해석이론은 모우드 중첩법에 의한 시간 이력해석을 주로 사용하고 있으며, 측정장비는 소음 및 진동을 측정하는 고가의 외산장비를 주로 사용하고 있다. 이러한 측정장비의 진동소자는 압전소자이며, 이는 물리적인 힘을 전기

적인 값으로 나타내어주는 소자이다.

압전현상은 1880년에 프랑스의 J. 퀴리·P. 퀴리 형제가 발견했는데 구소련의 과학자에 의해 상용화 되는데 성공하였다. 일본에서 지진을 예측하기 위해 시험적으로 사용하였으나 실패하여 그 후 연구가 중단되었다가 최근 임피던스를 이용한 손상예측의 방법으로 꾸준히 연구되고 있는 센서이다. 압전효과는 변형력에 의해 요소(Element)의 변화로 내부의 분자간의 결합상태가 변화되어 그 힘에 비례하는 전하가 생기고 역으로 전압을 공급하여 주면 요소가 변형되지만 일정 상태가 되면 공급된 전압이 소모되어 원래의 상태를 회복하게 되는 소자이다. 따라서 사용되는 결정의 절단방식, 치수, 모양 및 가해지는 전압 등에 따라 여러 가지의 변환소자와 공진자를 만들 수 있다. 이들을 이용하여 제품화한 것

* 정회원, 경북대학교, 건축학부 시간강사, 공학박사

** 정회원, 부산대학교 산업건축공학과 교수, 공학박사

*** 정회원, 경북대학교 건축학부 교수, 공학박사

Tel: 053-950-4766 E-mail:kimwj@knu.ac.kr

이 압전가스 점화장치·소나(SONAR), 어군탐지기, 초음파단층상촬상장치, 초음파현미경, 초음파용접기, 가속도계·유량계 등 다방면에 걸쳐 있다.¹⁾

압전소자의 재료로는 수정과 로셀염, 티탄산바륨 등이지만 이들 중 수정을 고온으로 압축하여 만든 것이 고가이며 민감도(Sensitive)가 높다.

압전소자는 주로 임피던스에 의한 손상측정방법에 주로 사용되어 왔으며, 최근 이를 이용하여 진동 응답에 대한 연구를 하고 있으나 아직 초기 연구에 불과하다.

따라서 이러한 압전소자를 이용하여 저비용으로 철근콘크리트 바닥판에서의 진동영향에 대해 평가하는 것이 연구의 목적이다.

2. 기존연구

최근 국외 연구동향을 살펴보면, W. S. Galinaitis(2004)의 연구는 압전소자의 거동에 대한 히스테리시스 모델의 의존률에 대한 모델은 전형적인 Preisach Operator 독립률과 관련된 많은 기초적인 개념을 사용하여 Preisach Operator처럼, 의존률 접근은 기본적인 Operator의 설치의 누적적인 반응으로써 Actuator의 히스테리시스 행동으로 검토하였으며 새로운 모델로 표준적인 Relay Operator의 독립률과 대비하여 의존률 거동을 나타내는 기본적인 Operator를 사용하는 것에 의한 고전적인 접근과는 다른 방법을 연구하였다.

T. D. Usher(2004)의 연구는 전통적인 압전소자 Actuator는 정밀한 측정 시스템, 수중 음파탐지기와 초음파 이미징 의료기계와 같은 것에서 많이 적용되어져 왔지만 원자력 현미경(Atomic Force Microscopes, AFM)을 통해서 Piezodriven 캔틸레버에 대해 원래 개발된 비선형 이론에서 결과를 비교하여 팽창식 날개에 MFC Actuator의 항공학 적용에 대해서 언급하였다.

Y. Chen(2004)의 연구는 콘크리트에 Piezo-Ceramics을 넣은 Plate-Shape의 성능 전개를 연구하였으며 세라믹의 등가 전기의 특징 중 몇 가지를 보여주는 실험은 양생과정 혹은 이미 하중이 유지되는 동안 가해지는 다른 하중 조건아래에서 변화되는 것을 알게 되었다.

M. A. Demetriou와 T Moghani(2004)의 연구는 고정된 경계조건을 가진 세장한 플레이트에서 진동 제어에 사용된 압전장치 사이에서 바뀌는 실제의 시간제어방식의 증명하는 것을 연구하였다.

A. Yousefi-Koma와 D. Zimcik(2004)의 연구는 실제 시간에 유효한 제어 시스템은 압전의 PZT 장치를 가진 세장한 부재에 적용되고 발전되어 왔다. 연구된 스마트 핀의 유한요소 모델의 진동해석이 수행되었고, 그 결과 진동반응함수를 얻게 되었다. m 합성을 사용함으로써, 시스템의 이동함수가 FRF(진동반응함수)의 데이터로부터 유래되었다. FEM 데이터의 m 합성으로부터 가상의 모델을 얻었다.

G. N. Washington(2004)의 연구에서는 Smart Material 액츄에이터의 중요한 또는 덜 중요한 히스테리시스 Loop이 모두를 예상하는 효과적인 기술을 개발하는 것과 연결된 Preisach 모델과 신경망과 관련이 있다고 하였으며 신경망(neural network)은 입출력 관계를 일반화시킬 수 있으며 마지막으로, 방법론에서는 0.01에서 30Hz까지의 주파수 구간의 높은 영역에서 운전되는 PZT 액츄에이터의 "Real-Time"에서 실험적으로 유효하다고 하였다.

A. P. Weighman(2004)의 연구에서는 시뮬레이션 환경에서 동적인 시스템의 거동을 제어하고 조사하는 모델의 능력은 시간과 비용을 고려할 때 매우 바람직하였으며 새로운 기술은 동적 시뮬레이션과 제어에 대해서 SIMULINK를 완전하게 하는 유한요소 모델을 허용하도록 개발되어졌다. 그러한 기술은 PZT가 결속된 고정-지지의 캔틸레보 보의 모델링에 의해 나타난다. Loop 거동에 노출된 실험 시스템과 시뮬레이트 된 것의 비교를 하였다.

K. Takagi와 H. Sato, M. Saigo(2004)의 연구에서는 금속 중심의 강한 진동통제를 CFRP 합성물 안에 끼워 넣는 압전 섬유를 원조로 실험하였으며, CFRP 안에 복잡한 소질의 기능을 감지기와 발동기를 통하여 삽입하였다. 재료 중심에 중요하게 삽입하였으며, 센서와 발동기의 사용으로 세라믹의 깨지는 성질을 극복하며, 전극을 필요로 하지 않게 실험하였다.

Y. Wen와 Y. Chen(2004)의 연구에서는 밀판에 하중을 가하거나 정지된 경우에서도 같은 전자적 특성

을 보이고 있는 것을 알게 되었으며, 가장 중요한 것은 변위는 응력(양생이 되어지는 동안의 구조 응력)이 압전장치에서 일련의 저항과 같은 효력을 발생하는 것이었다. 그러나, 노출된 세라믹이 만약 적당하지 않게 덮혀 있거나 임피던스가 어울리지 않은 재료로 되어있다면 콘크리트 안에 매장된 전자기기의 영향이 약하게 읽혀지는 것을 밝혀냈다. 연구의 결과에 기초를 두고, 전자-음파(electro-acoustic) 능력을 계량하여 새로운 방법으로 이용하였다.

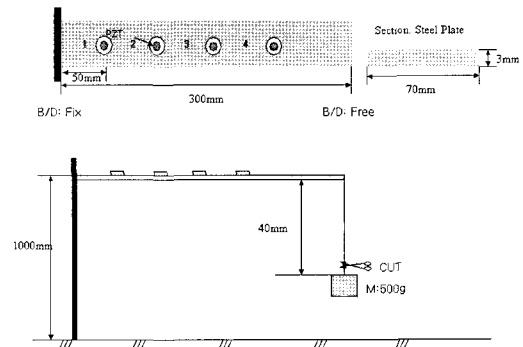
R. Russ와 M. N. Ghasemi Nejjhad(2004)의 연구에서는 능동적인 진동 억제를 위해 요구되는 전압을 산출하는데 더 빠르고 더 쉬운 방법을 위해 통제 디자인 도표를 대체하는 폐쇄 모양의 공식을 도입하였으며, 주제의 복잡성과 포괄적인 학문을 실행하여 3가지의 요소 모델(FEM)로 발전되었다. 첫 번째 FEM은 Piezoelectric을 같은 표면에 나란히 두지 않으며, 빔 두께의 변화를 주었다. 두 번째에서 FEM은 센서를 한 곳에 나란히 두지 않으며 빔의 두께변화를 주며, 강재의 층을 일정하게 준다. 이와 같은 방법은 한층 정도에 Piezoelectric Patch를 넣을 수 있도록 여유층을 두고, 절단되어진 층의 Piezoelectric Patch를 표면에서 비교하였다.⁶⁾

국내의 연구를 살펴보면, 노용래(2004)가 PZT센서의 두께 방향 임피던스를 이용하여 강구조물의 건전성 감시기법에 대한 연구를 하였다. 강철판에 노치를 주지 않은 경우와 노치를 준 경우를 임피던스의 변화로 측정하였으며, 성수대교의 붕괴를 야기한 부분 모델을 축소하여 균열이 발생한 부분에 대해 실험하였다.⁹⁾

압전소자에 대한 대부분의 국내외 연구는 임피던스측정에 의한 방법을 통한 손상예측 및 검증에 대한 연구를 위주로 수행하고 있으며, 전압측정의 방법으로는 많은 연구가 진행되지 않고 있는 실정이다.

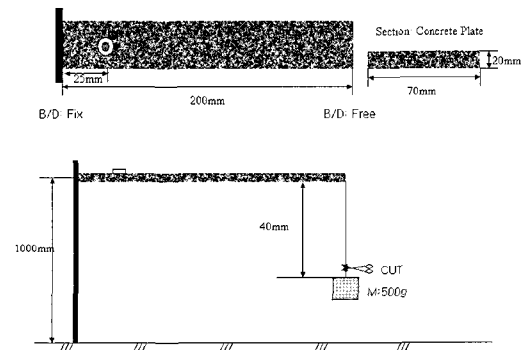
3. 연구방법

70×3×300mm의 철재 캔틸레버 보를 제작하여 고정단에서 50mm간격으로 압전소자를 배치하고 보의 단부에 500gf의 질량을 매단 후 실을 절단하였을 때의 전압을 비교하였다.



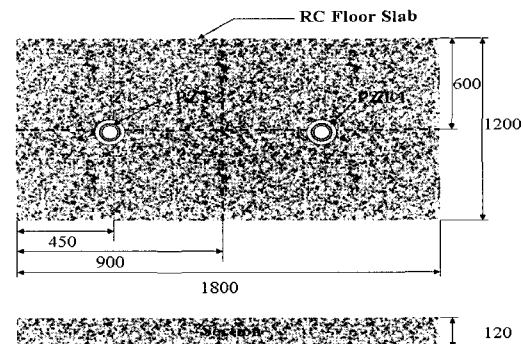
〈그림 1〉 압전소자의 배치에 따른 전압비교

70×20×200mm와 100×30×400mm의 콘크리트판을 제작하여 고정단에서 50mm간격으로 압전소자를 배치하고 보의 단부에 500gf의 질량을 매단 후 실을 절단하였을 때의 전압을 비교하였다.



〈그림 2〉 70×20×200mm의 콘크리트판에서의 전압측정

1200×12×1800mm의 철근 콘크리트 판에 압전소자를 부착하여 70kgf의 보행자가 계단으로 보행하였을 때의 전압을 비교하였다.



〈그림 3〉 판에서 압전소자의 배치

실험에 사용된 압전소자의 제원은 다음과 같다.



〈그림 4〉 압전소자

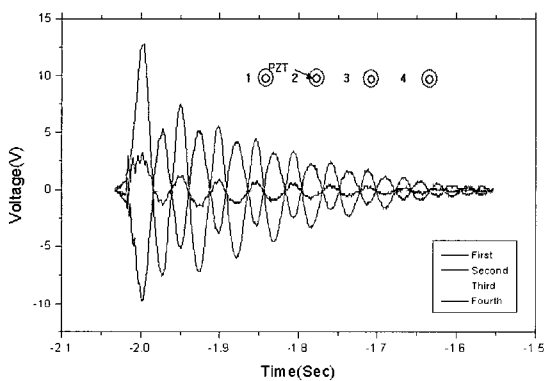
〈표 1〉 압전소자의 특성

Resonant frequency	6.5±0.5kHz
Resonant impedance	250Ω max
Electric capacity	12000±30%
Operating temperature	-20℃ ~ +70℃

압전소자의 전압측정은 Fluke사의 Scopemeter 123을 이용하여 측정하였다.

4. 철재 켄틸레버 보에서의 전압변화

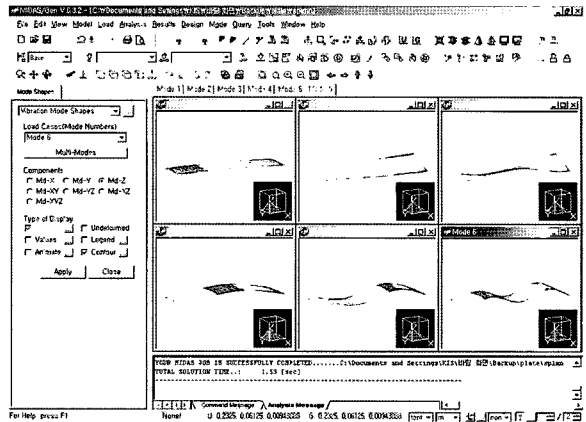
70×3×300mm의 켄틸레버 보를 제작하여 보의 단부에 500gf의 질량을 매단 후 실을 절단하였을 때의 압전소자에서 발생된 전압을 비교하였다.



〈그림 5〉 70×3×300mm의 켄틸레버 보에서 전압측정

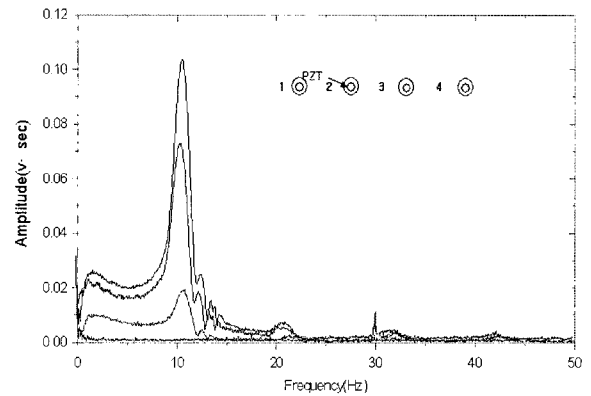
70×3×300mm 켄틸레버 보에서 압전소자의 발생 전압을 측정한 결과 400mm의 실에 500gf의 추를 달고 이를 절단했을 때 PZT 3의 발생전압은 변화가 거의 없었으며, 이는 모우드 변화에 영향을 받지 않는 부분으로 나타났다.

FEM을 통한 모우드 변화는 다음 그림과 같다.



〈그림 6〉 70×3×300mm 켄틸레버 보의 고유치해석

이를 푸리에 변환(FFT)를 이용하여 진폭과 주파수 영역으로 나타내었다.



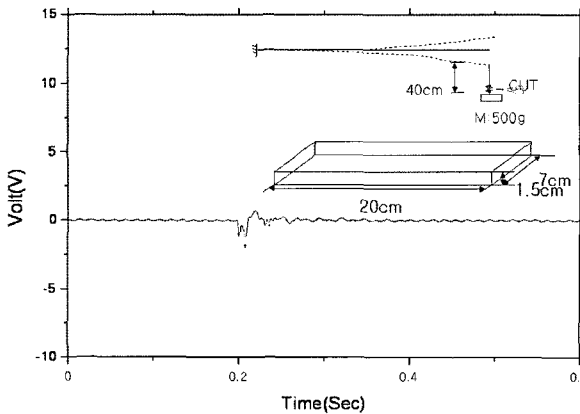
〈그림 7〉 70×3×300mm의 켄틸레버 보에서 주파수 응답

변환 결과 12.5Hz에서 진폭이 PZT 4에서 PZT 2의 위치로 갈수록 4배 증가하였으며, 고정단에 가까운 위치에 있는 PZT 1은 6배 진폭이 증가하는 것으로 나타났다.

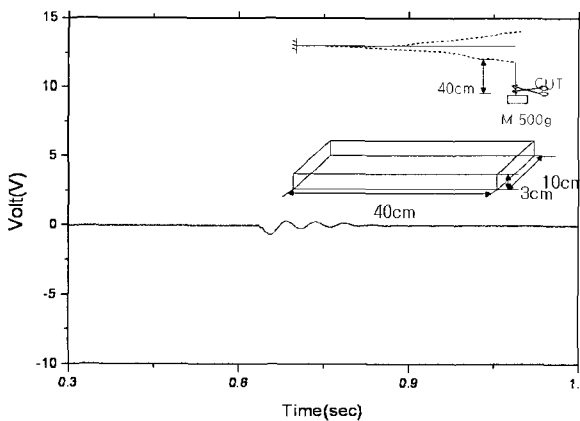
실험결과 고정단에 가까울수록 압전소자의 전압과 12.5Hz에서의 진폭이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 400mm의 실에 500gf의 추를 달고 이를 절단했을 때의 진동 모우드가 단부에서 50mm 간격으로 부착된 압전소자에 영향을 주어 부착된 위치에 따라 진동의 영향을 나타내는 것으로 사료된다.

5. 무근 콘크리트판에서의 전압변화

70×20×200mm와 100×30×400mm 무근 콘크리트 판을 제작하여 보의 단부에 500gf의 질량을 매단 후 실을 절단하였을 때의 압전소자에서 발생된 전압을 비교하였다.



〈그림 8〉 70×20×200mm 무근 콘크리트 판에서의 전압변화

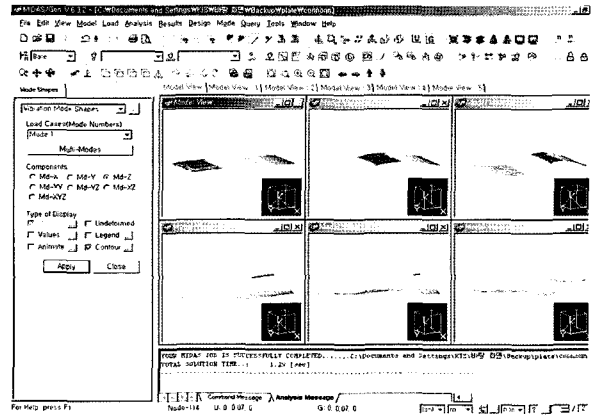


〈그림 9〉 100×30×400mm 무근 콘크리트 판에서의 전압변화

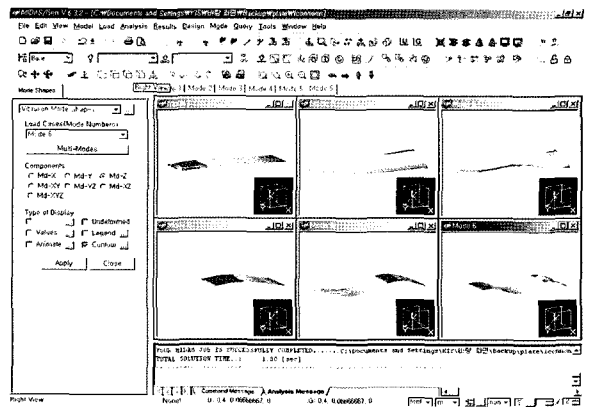
70×20×200mm와 100×30×400mm 콘크리트 판에서 압전소자의 발생전압을 측정한 결과 길이와 판 두께가 큰 100×30×400mm 콘크리트 판에서 발생한 압전소자의 전압이 1.5배 감소되는 것으로 나타났다. FEM을 통한 모드 변화는 다음 그림과 같다.

이를 푸리에 변환(FFT)를 이용하여 진폭과 주파수영역으로 나타내었다.

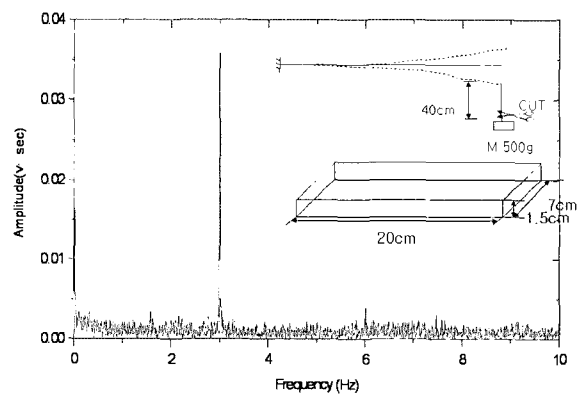
변환결과 70×20×200mm 무근 콘크리트 판에서는



〈그림 10〉 70×20×200mm 콘크리트판의 노치가 없을 때 고유치해석

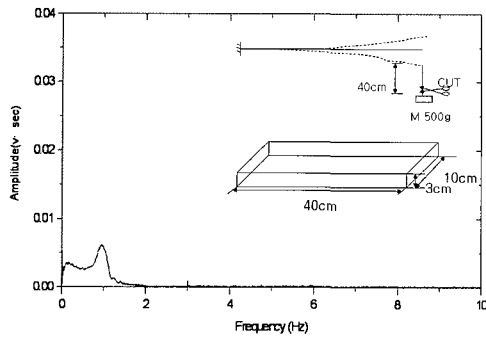


〈그림 11〉 100×30×400mm의 무근 콘크리트판에 노치가 없을 때 고유치해석



〈그림 12〉 70×20×200mm 무근 콘크리트 판에서의 주파수응답

3Hz에서 진폭이 $3.5 \times 10^{-2} (V \cdot sec)$ 였으며, 100×30×400mm 콘크리트 판에서는 0.4Hz에서 $0.7 \times 10^{-2} (V \cdot sec)$ 로 5배 저감되었다. 이러한 이유는 주파수는 강성이 작을수록 감소되기 때문에 주파수대역이 이동된 것으로 사료

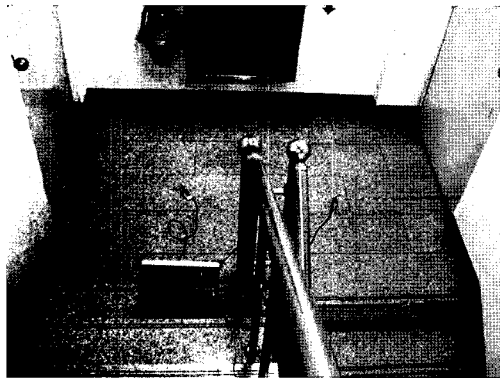


〈그림 13〉 100×30×400mm 무근 콘크리트 판에서의 주파수응답

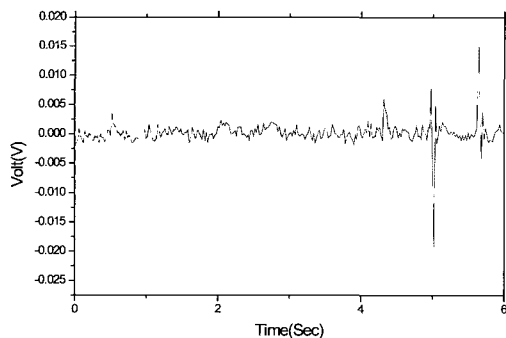
되며, 길이가 짧은 경우보다 긴 경우 진동에 의한 전압변화가 감소하는 것으로 나타났다.

6. 철근콘크리트 판에서의 진동 평가

1200×12×1800mm의 철근 콘크리트 판에 압전소자를 부착하여 70kgf의 보행자가 계단으로 보행하였을 때의 전압을 비교하였다.

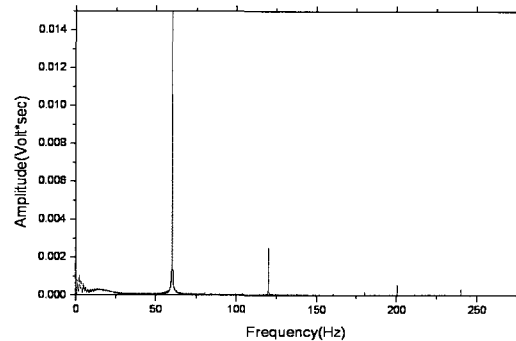


〈그림 14〉 판에서의 전압측정



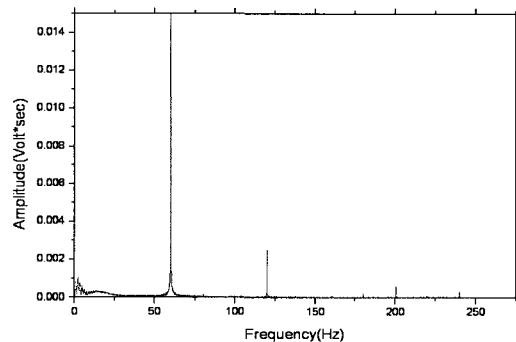
〈그림 15〉 판에서의 전압측정

9개의 계단을 6초간 보행하여 압전소자에서 발생한 전압을 측정한 결과, 0.67초인 첫 번째 계단에서의 전압이 4.7×10^{-3} Volt였으며, 일곱 번째 계단에서 5.5×10^{-3} Volt, 여덟 번째 계단에서 9.0×10^{-3} Volt, 아홉 번째 계단에서 15×10^{-3} Volt로 전압이 증가되는 것으로 나타났다.



〈그림 16〉 보행에 따른 PZT 1에서의 주파수응답

주파수 응답비교에서 52Hz에서의 진폭이 1.4×10^{-3} 으로 가장 크게 나타났다.

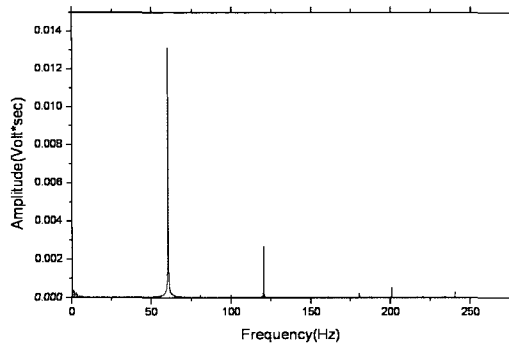


〈그림 17〉 보행에 따른 PZT 2에서의 전압변화

PZT 2는 PZT 1에서 900mm 떨어진 위치에 부착되어 있으며, 9개의 계단을 6초간 보행하여 압전소자에서 발생한 전압을 측정한 결과, 0.67초인 첫 번째 계단에서의 전압이 2.0×10^{-3} Volt였으며, 일곱 번째 계단과 여덟 번째 계단에서는 0.8×10^{-3} Volt, 아홉 번째 계단에서 9×10^{-3} Volt로 전압이 증가되는 것으로 나타났다.

주파수 응답비교에서 52Hz에서의 진폭이 1.35×10^{-3} 으로 가장 크게 나타났다.

실험결과 보행자 하중이 작용하는 PZT 1에서의



〈그림 18〉 보행에 따른 PZT 2에서의 주파수응답

전압변화는 0.67간격으로 시간이 증가됨에 따라 바닥판에 부착된 압전소자의 위치에 가까울수록 증가되는 것으로 나타났으며, 900mm 떨어진 위치에 부착되어 있는 PZT 2에서의 전압은 아홉번째 계단에 보행자 하중이 작용할 때만 최대 전압을 나타내었다.

주파수 응답에 대한 비교에서는 52Hz에서의 진폭이 PZT 1에 비해 PZT 2에서 1배 감소되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

압전소자를 이용한 판에서의 진동평가에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 판에서 압전소자를 이용하여 위치에 따른 이동하중의 영향을 압전소자의 발생전압으로 예측할 수 있다.
- 2) 철근콘크리트 판에 부착된 압전소자는 이동하중이 근접할수록 전압이 증가됨으로 진동문제를 야기하는 진동원과 전달매체에 대한 예측 및 분석을 할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 철근 콘크리트 판에 부착된 압전소자의 발생전압은 이동하중의 가진 위치에 따라 다르게 나타났으나 주파수 응답분석에서는 같은 주파수영역에서 진폭의 변화가 나타났다. 따라서 부착된 압전소자의 위치에 따른 주파수 응답 비교로 진동원과 전달매체에 대한 예측 및 분석을 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2006년 과학 재단 지정, 스마트 사회기

반 연구센터의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참고문헌

1. Gautschi, G., "Piezoelectric Sensorics", Springer, 2002, pp.1-45.
2. KWOK, H. L., "Electronic Materials", THOMSON, 1997, pp.158-173.
3. Lemanov, V. V., "Piezo-, Pyro-, and Ferroelectricity in Biological Materials, Piezoelectric Materials in Science, Technology and Application, Vol. 76, No.3, 1999, pp.24-27.
4. MIDAS Gen Users Manual. POSCO Engineering & Construction Co. Ltd, 2000.
5. Fritz Engineering Laboratory Department of Civil Engineering Lehigh University, "Plastic Design of Multi-story Frames", 1965.
6. SPIE, "Smart Structures and Materials", SPIE 9th International Symposium, March, 2004 pp.1-221
7. Kim, Ie-Sung, "Development of Self-Diagnostic Smart Concrete", Kyungpook National University, Department of Architecture Doctor of Engineering Graduate, December 2005.
8. Newland, D.E., "An introduction to random vibration and spectral analysis", Longman, 1984.
9. 윤정방, 박승희, 노용래, 이진학, "PZT센서의 두께 방향 임피던스를 이용한 강구조물의 건진성감시기법", 2004년도 정기총회 및 춘계학술발표대회, 2004, pp.16-20
10. 김상범, 이영학, "계단실 철골배치의 진동 사용성에 관한 실물대 실험", 대한건축학회논문집 구조계 21권, 11호, 2005, pp.103-110.
11. 이진학, 윤정방, "구조물의 응답자료만을 이용한 모드계수 추정법에 관한 비교연구", 대한토목학회논문집, 제23권, 제2A호, 2003, pp.187-201.
12. 김정태, 윤정방, 이진학, "구조건전성평가를 위한 주파수영역 신호처리기술", 제4회 스마트 사회기반시설 연구센터 기술강습회, 스마트 사회기반시설 연구센터, 2005, pp.3-7.