

# 이동 가진원에 따른 철근 콘크리트 판에서의 진동평가

## Estimation of Vibration Plate due to Moving Oscillator in Reinforcement Concrete

김 이 성\*                      윤 승 현\*\*                      박 강 근\*\*\*  
Kim, Ie-Sung                  Yoon, Seoung-Hyun                  Park, Kang-Geun

### 요 약

철근 콘크리트 구조물에서 발생하는 진동 가진원과 영향에 대하여 많은 연구가 진행 중에 있다. 이러한 진동 가진원은 주로 거주자가 보행할 때 발생하는 하중이며, 발생한 가진원은 철근 콘크리트 판을 통하여 다른 거주자에게 전달된다. 이러한 전달원은 탄성파의 형태로 전달되는데 판의 표면으로 전달되는 표면파(Ram Wave)와 판의 내부로 전달되는 체적파(Primary Wave, Secondary Wave)의 형태로 전달된다. 현재 이러한 파를 분석하는 연구는 압전소자(PZT)센서를 주로 사용하고 있으나, 콘크리트 부재에서 3축 형태로 전달되는 탄성파를 분석하기에는 여러 가지 어려운 부분이 많다. 따라서 이를 해결하기 위해 마이크로 가속도센서(Micro Accelerometer)를 이용하여 이동하중으로 발생하는 가진원에 대하여 평가하였다.

### Abstract

Today, many studies are progressed about source of vibration oscillator in reinforcement concrete structures. Source of vibration oscillator is load when it is happen from walking inhabitant. It is transmitted to another inhabitant through reinforcement concrete plate, and it is type of elastic wave. Those descriptions are ram wave and primary wave, secondary wave, and they are through the surface and inside plate. Analysis studies of those waves are used to piezoelectric materials. But, they are difficult to 3 axial type of transmitting elastic wave in concrete element.

In this study, a fundamental study for source estimations of vibration oscillator using micro accelerometer are discussed.

**키워드 :** 가속도계, 이동하중, 압전소자

**Keywords :** Accelerometer, Moving Load, PZT

## 1. 서 론

최근 센서 기술은 비약적으로 발전하고 있으며, 이를 이용한 비파괴 시험방법(Nondestructive Test Method)의 발전이 두드러지고 있다. 또한, 시험방법의 발전에 따라 검사 후 분석하는 방법도 증가 발전하고 있어 측정 결과값에 대한 신뢰성에 많은 관심이 증대되고 있는 실정이다.

이동 보행하중으로 인하여 전파되는 철근콘크리트 슬래브 판 내부의 파는 상하 경계면과 손상면으

로 반사되어 많은 종류의 파로 분리된다. 이러한 원인으로 인하여 고주파수 대역의 센서를 주로 사용하게 되는데 이러한 대표적인 센서가 압전소자(PZT)이다. 압전소자는 기전력형(起電力型) 센서로 입력값으로 물리적인 힘을 가진하게 되면, 외부값으로 전압을 발생한다. 가진량이 증가되면 증가 될수록 진폭이 증가하지만 주파수 대역은 일정하게 유지되기 때문에 손상평가에 주로 사용하게 되었다.

그러나, 높은 주파수 대역으로 인하여 가진원에 의하여 판 내부에 발생한 여러 가지의 파(Wave)가 중첩되기 때문에 이러한 부분에 대한 분석 연구가 필요하게 되었다. 압전소자는 기전력형 센서이기 때문에 이와 유사한 특성의 센서는 가속도계이다. 가속도계는 지진파의 분석 등에 많은 이용이 되고 있

\* 교신저자, 정희원 · 경북대학교 건설공학부 연구교수, 공학박사  
Tel : 053-950-4766 Fax : 053-950-6590  
E-mail : macgang@knu.ac.kr

\*\* 정희원 · 부산대학교 산업건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 정희원 · 부산대학교 산업건축공학과 교수, 공학박사

으나 기존의 가속도계는 1축 측정용으로 가진원에 의해 판으로 전달되는 파를 분석하기에는 미진한 부분이 많다. 또한, 부가적으로 데이터로거(Data Logger)와 센서를 구매하기엔 가격이 고가이다.

하지만 센서기술의 발전으로 기능의 다양화와 크기의 축소, 자이로를 이용한 보정기능 등이 포함되고 가격은 낮아지고 있다.

따라서, 이러한 저가의 마이크로 가속도계(Micro Accelerometer)를 이용하여 이동 가진원에 따른 철근 콘크리트 판에서의 진동평가를 하는 것이 연구의 목적이다.

## 2. 기존연구

진동 가진원에 대한 최근 국외 연구동향을 살펴보면, Lingmi Zhang과 Yukio Tamura(2002)의 연구는 도쿄(Tokyo) 높이 53.5m 오피스빌딩의 진동 환경 평가와 모드(Mode)에 대하여 연구를 하였다. 각각의 건축물 바닥판에서 가속도계를 이용하여 구조물의 거동에 의한 주파수 분석을 유한요소해석프로그램(The Finite Element Method Program)을 이용하여 시간이력해석을 한 후 결과값을 비교하는 연구였다.<sup>1)</sup>

S. A. Neild와 P. D. McFadden(2003)의 연구는 콘크리트 보에서 비선형 해석을 이용한 진동측정으로 손상평가를 제안하였다. 많은 연구자들이 선형해석을 이용하여 신호 분석을 통해 손상 전과 후에 대한 손상평가를 수행하고 있으나, 콘크리트 재료는 낮은 주파수 대역특성을 갖는 재료이기 때문에 비선형 해석인 시간 주파수 해석(Time-Frequency Analysis)을 통하여 콘크리트 보의 초기 균열에 대해 평가하는 연구였다.<sup>2)</sup>

Bijaya Jaishi 와 Wei-Xin Ren(2005)의 연구는 진동평가의 결과를 이용한 부재 유한 요소 모델의 발전에 대한 연구를 하였으며, 단순보에서 MAC(The Modal Assurance Criterion)과 FE(Finite Element)모델을 이용하여 손상을 입지 않은 보의 주파수와 손상을 입은 보의 주파수를 비교하였다. 또한 콘크리트로 피복된 합성교에 대해서도 비교한 연구였다.<sup>3)</sup>

Eric Larose와 Julien de Rosny(2006)의 연구는 콘크리트 구조물에서 kHz 대역의 진동에 대한 다축측정방법에 대한 연구였으며, 콘크리트 건축물에서

1kHz대역의 전달파에 대한 연구와 가속도 변화에 따른 파의 진행방향에 대한 연구를 하였다.<sup>4)</sup>

진동 가진원에 대한 국내의 연구로는, 전호민(2006)이 가진원에 따른 라멘 구조물의 수직진동 전달 동특성 변화에 대하여 연구를 하였다. 저층부에서 고층부로 전달되는 진동전달과 고층부에서 저층부로 전달되는 진동전달의 동특성을 임팩트 해머와 가속도계를 이용한 연구였다.<sup>5)</sup>

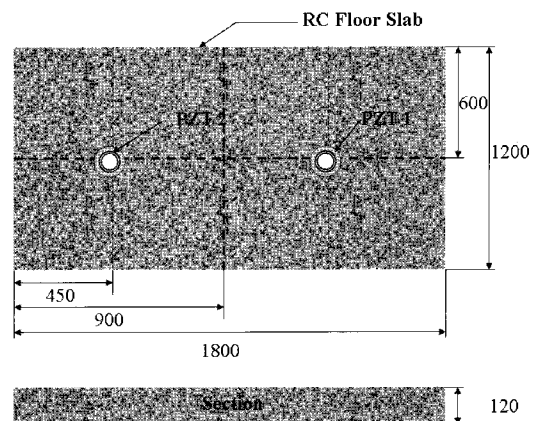
이성경과 민경원(2006)은 진동대를 이용한 구조물의 하이브리드 실험에 대한 연구를 하였다. 수치해석 방법과 가속도계, 진동대를 이용하여 명명가속도에 의해 진동대에서 측정된 가속도를 단자유도계와 다유도계로 나누어 분석하는 연구였다.<sup>6)</sup>

황재승과 아산 카림(2007)은 구조물 응답을 이용한 외부하중에 대한 역 추정 기법에 대해 연구를 하였다. 이 연구는 외부하중을 역추정하는 과정에 발생할 수 있는 여러가지 제약 조건과 이들이 역 추정된 외부하중에 주는 영향을 정량적으로 평가는 것이 주 목적이었다.<sup>7)</sup>

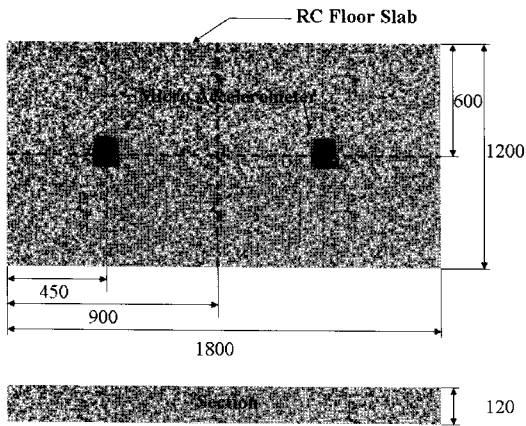
이동 가진원에 대한 대부분의 국내의 연구는 주로 수치해석과 가속도계를 이용하고 있으며, 판이나 부재 내부에 전달되어 발생하는 파에 대한 계측 및 평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

## 3. 연구방법

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

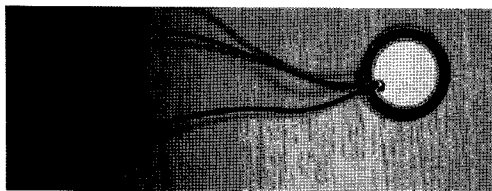


〈그림 1〉 판에서 압전소자의 배치

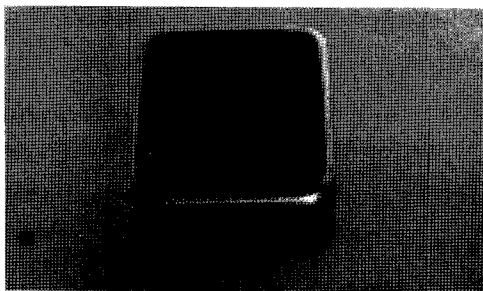


〈그림 2〉 판에서의 3축 가속도계의 배치

실험에 사용된 압전소자와 가속도계, 오실로스코프의 제원은 다음과 같다.



〈그림 3〉 압전소자



〈그림 4〉 3축 가속도계

〈표 1〉 압전소자의 제원

Resonant Frequency	6.5±0.5kHz
Resonant Impedance	250Ω max
Electric Capacity	12000±30%
Operating Temperature	-20°C ~ +70°C

압전소자의 전압측정은 독일의 Wittig Technology 사의 BenchScope을 이용하여 측정하였다.

〈표 2〉 3축 가속도계의 제원

Acceleration Range	± 19.6m/s <sup>2</sup> [±2G]
Rated Voltage	3.0 VDC
Supply Voltage (Vcc)	2.7 to 5.5 VDC
Frequency Response	DC to 15 Hz
Sensitivity (Vcc=3.0V)	10.2mV (m/s <sup>2</sup> ) [100mV/G]
Linearity	2.5 %
Transverse Sensitivity	4 %
Offset Voltage	1.5V (Vcc/2)
Current Consumption (Vcc=3.0V)	0.1 mA
Operating Temperature	-20 to +70degree C
Storage Temperature	-40 to +85degree C
Dimension (W×D×H)	9.0×9.0×7.0mm
Mass	1.3g

〈표 3〉 오실로스코프의 제원

Analog Bandwidth	DC: 0 - 20MHz, AC: 100Hz - 20MHz
Sampling Rate	100MSa/s Real-Time on each channel (200MS/s Single Channel Mode)
Sensitivity	0.5mV (10mV/div) to 4V/div
Coupling	AC/DC/GND
Input Impedance	1MW/60pF(1:1), 10MW/30pF(10:1)
Max. Input Voltage	Max. 400Vpk/DC
ADC Resolution	2x 8 Bit
Vertical Accuracy	±2%
Max. Vertical Move	±5 Divisions
Scope Modes	Normal, Single Shot or Scrolling Mode
True Sampling Rates	
• Normal mode	0.1μs/div (200MSa/s) to 0.2sec/div
• Single Shot mode	
Time Base Accuracy	> ±0.5%
Trigger	Free Run or Triggered
Trigger Source	±CH I, ±CH II
Memory Depth/ XY-Mode	XY-mode, 16K, 4K, 1K or 512 Samples/Channel
RS-232 Interface	Temperature Range

#### 4. 가속도계

가속도계는 기계적 충격이나 진동을 받았을 때 전기적 출력을 발생시키는 전기-기계적 변환기로 가속도는 뉴턴의 제2법칙인 다음 식을 이용하여 구한다.

$$F = m \cdot a \tag{1}$$

여기서, F: 힘, m: 질량, a: 가속도  
 주어진 힘과 가속도식에서 가해진 힘으로 대입하여 계산한다. 진자를 운동체에 매달아두면 운동체의 가속도의 영향을 받아 진자가 흔들리는데 이것이 가속도에 비례하는 성질을 이용하며, 측정하려는 방향과 주 감도축이 일치하도록 설치해야 한다. 주로 지진계나 기계의 운행 중 발생하는 미세한 진동을 측정할 때 사용되며, 가속도뿐만 아니라 충격, 진동 측정에 광범위하게 사용될 수 있다.

진동에는 진동 · 진폭(변위), 속도, 진동가속도의 3 요소 등이 있으므로 이를 측정하는 센서는 진동측정이 가능하다. 가속도 및 진동 측정기술은 질량-스프링-댐퍼 시스템 (Mass-Spring-Damper-System)을 이용하며, 질량 지지대에 대한 상대적 변위  $Z_r$ 은

$$Z_r = Z_m - Z_h \tag{2}$$

여기서,  $Z_m$  : 질량  $m$ 의 변위,  $Z_h$  : 지지대의 변위  
 질량  $m$ 의 운동에 대한 미분방정식은 식 (1)로부터

$$m\ddot{Z}_m + c(\dot{Z}_m - \dot{Z}_h) + k(Z_m - Z_h) = 0 \tag{3}$$

만약, 지지대가 다음과 같은 운동을 한다면,

$$Z_h = A \sin \omega t \tag{4}$$

여기서  $\omega$ 는 각 주파수

식 (3)의 정상상태 해(Steady-State Solution)는 다음과 같다.

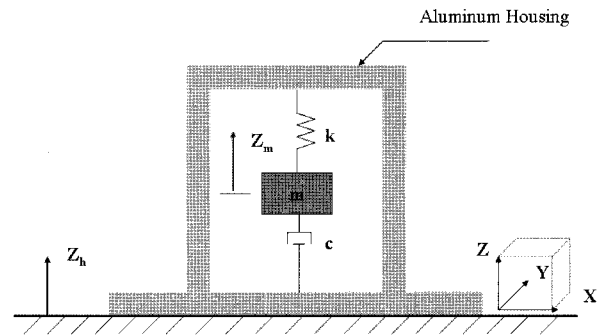
$$Z_r = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} A \sin(\omega t - \phi) \tag{5}$$

여기서,  $k$  : 강성

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad : \text{Natural Frequency}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad : \text{Damping Ratio}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad : \text{Angle of Phase}$$



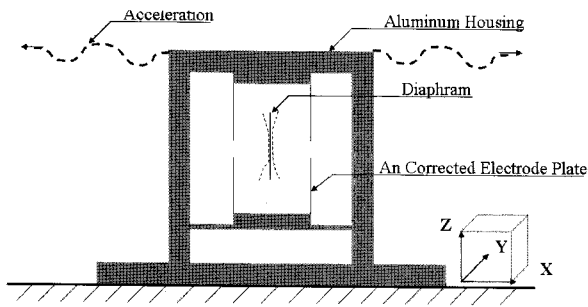
〈그림 5〉 질량 - 스프링 - 댐퍼 시스템

식 (5)에서 이 시스템의 특성을 결정하는 중요한 매개변수는 주파수 비와 댐핑계수임을 알 수 있으며, 센서(Sensor)의 형태는 측정하고자 하는 주파수 ( $\omega$ )와 공진 주파수( $\omega_n$ )의 관계에 의해 결정됨을 알 수 있다.

가속도 센서는 질량  $m$ 의 변위를 검출하는 방식에 따라 변위 게이지 (Strain Gauge - Type Accelerometer), 압전기형 (Piezoelectric Accelerometer), 압저항형 (Piezoresistive Accelerometer), 정전용량형 (Capacitive Accelerometer) 등이 있으며, 각각의 검출방식의 장점과 단점이 있기 때문에 용도에 따라 이용되고 있다.

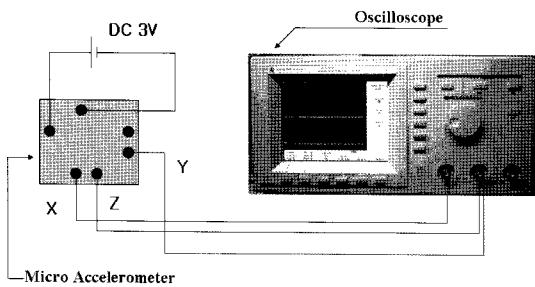
가속도계 센서로 주로 사용하고 있는 1축형 가속도계는 탄성파에 의한 가진에 대하여 분석의 한계 문제가 있음으로, 1개의 검출소자로 가속도  $a$ 의 3축 성분 ( $a_x, a_y, a_z$ )를 검출할 수 있는 3축 가속도계를 이용하였다. 실험에 이용된 가속도계는 정전용량형 (靜電容量型) 가속도 센서로 가동전류를 인가함으로써 센서 내부의 가동 전극판의 변위차에 의해 가동전극과 두 고정 전극간의 정전용량이 변화함을 이용한다.

정전용량형 가속도계는 검출부 자체만으로는 잡음이 존재함으로 센서 자체 내에 신호처리회로가 내장되어 있는 것이 특징이다. 정전용량형 3축가속도계는 전극부를 실리콘 마이크로머시닝 기술(Silicon Micromachining Technology)을 이용하여 제작하며, 이러한 기술로 인하여 저 가격, 소형(Mems), 고 신뢰성의 특징과 온도특성 및 분해능이 우수한 센서이다.<sup>8)</sup> 본 연구에서는 일본 Star Micronics사의 ACB302 가속도계를 이용하여 이동보행하중이 작용할 때의



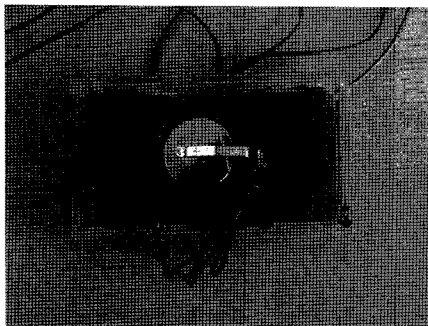
〈그림 6〉 정전용량형 가속도 센서

전압을 측정하였으며, 이를 압전소자의 주파수와 비교하였다.



〈그림 7〉 3축 가속도계의 계측기간의 연결도

철근 콘크리트 바닥판과의 부착과 간단한 측정을 위하여 별도의 하우징 (Housing)과 저전력이 필요함으로 코인형 리튬형 (Type of Lithium) DC 3V전지를 이용하였다.

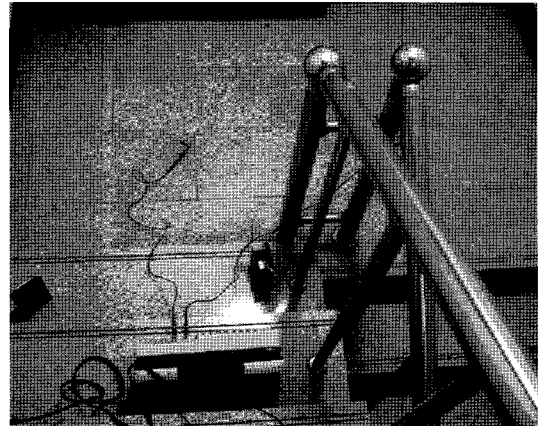


〈그림 8〉 3축 가속도계의 하우징

## 5. 철근콘크리트 판에서의 진동 평가

진동측정 및 손상검증 센서로 많이 연구되고 있는 압전소자와 마이크로 가속도계를 비교하기 위해, 1200×12×1800mm의 철근 콘크리트 판에 2개의 압

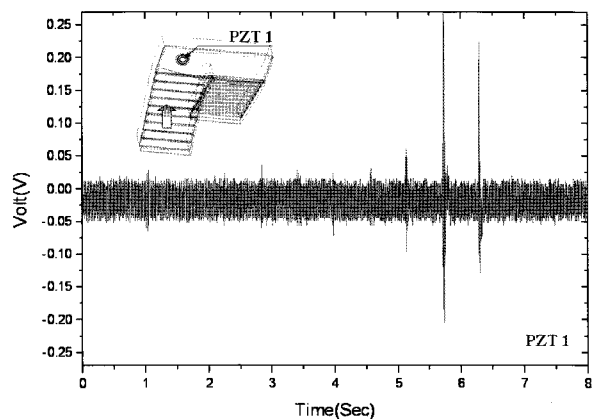
전소자를 부착하여 70kgf의 보행자가 계단을 상하로 보행하였을 때의 전압을 비교하였다.



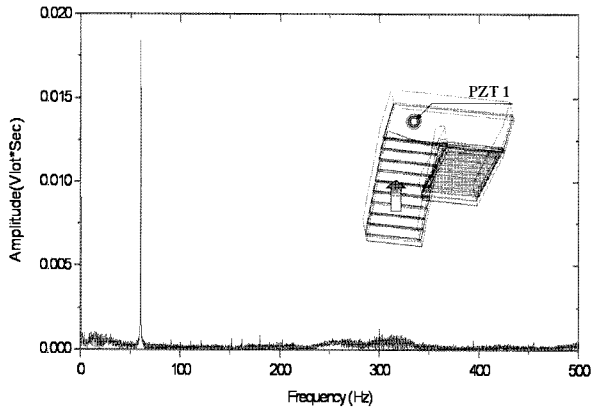
〈그림 9〉 압전소자를 이용한 판의 진동평가

〈그림 10〉은 70kgf의 보행자가 보행하였을 때의 이동 하중에 대한 압전소자 1 (PZT 1)의 시간당 발생 전압을 나타내고 있으며, 이를 고속 푸리에 변환 (FFT)를 하게 되면 다음과 같다.

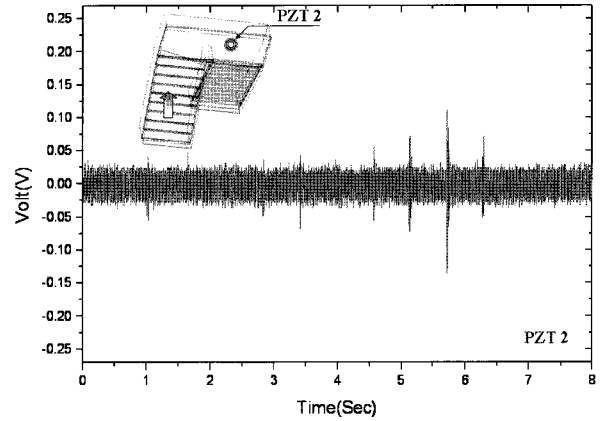
PZT 1에서의 주파수 응답 결과, 60Hz 대역에서 진폭이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 오실로스코프가 전원의 60Hz를 이용하여 자동 트리거 동작하게 함으로 발생하는 잡음(Noise)이므로 이러한 잡음이 중첩될 경우, 고유진동 모우드를 평가하기 어려움으로, 60Hz의 변조폭을 제거하는 BBF (Band Block Filter)를 적용하였으며, 〈그림 10〉과 〈그림 11〉은 다음과 같이 된다.<sup>9,10,11)</sup>



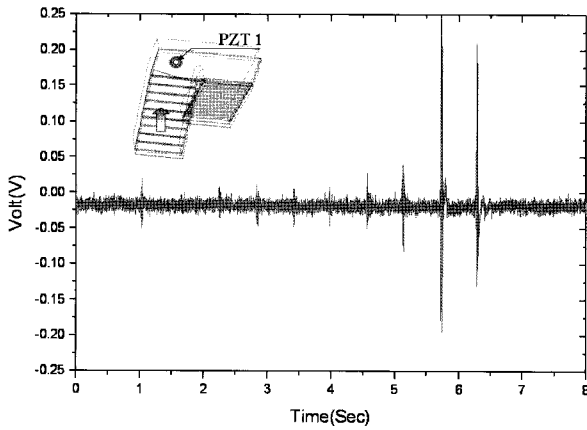
〈그림 10〉 보행에 따른 PZT 1에서의 전압변화



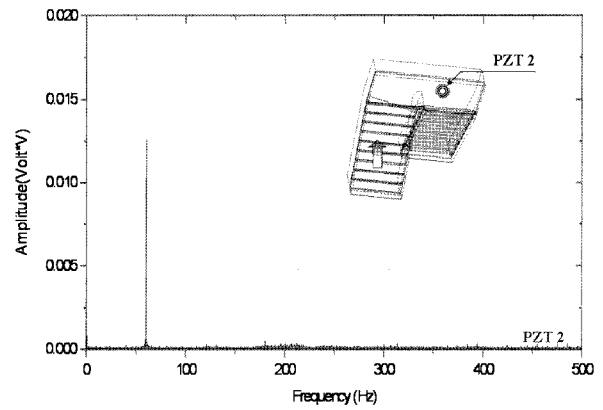
〈그림 11〉 보행에 따른 PZT 1에서의 주파수응답



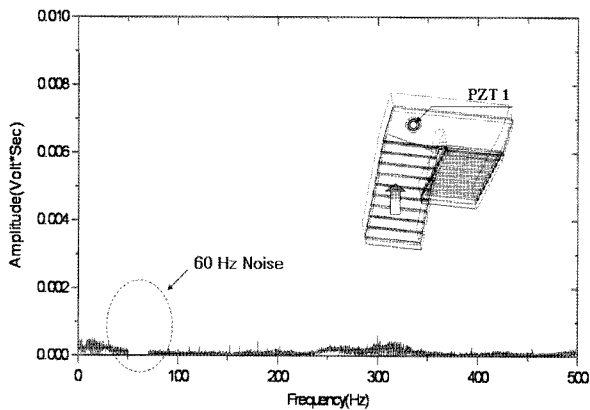
〈그림 14〉 보행에 따른 PZT 1에서의 전압변화



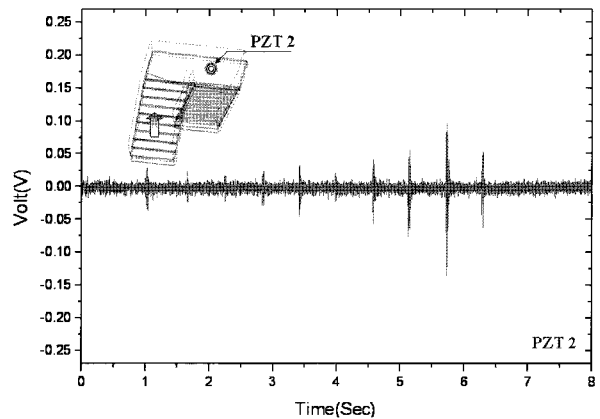
〈그림 12〉 PZT 1에서 BBF를 이용한 60 Hz 잡음제거



〈그림 15〉 보행에 따른 PZT 1에서의 주파수응답



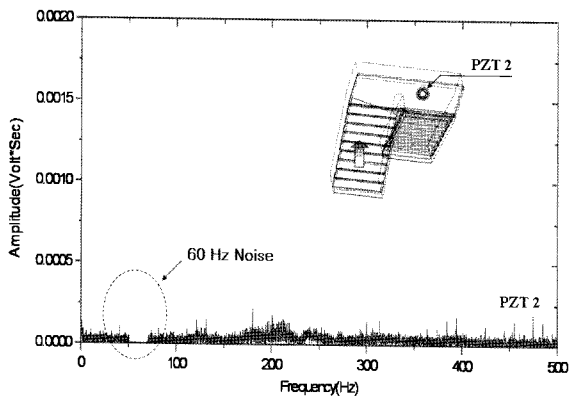
〈그림 13〉 주파수 응답에서의 BBF를 이용한 60 Hz 잡음제거



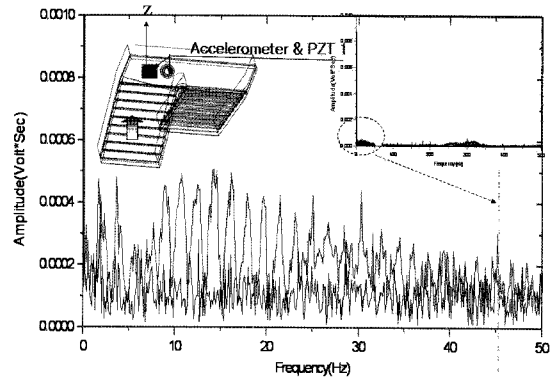
〈그림 16〉 PZT 2에서 BBF를 이용한 60 Hz 잡음제거

이동 하중에 대한 압전소자 2 (PZT 2)의 시간당 발생 전압과 주파수 응답을 BBF를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

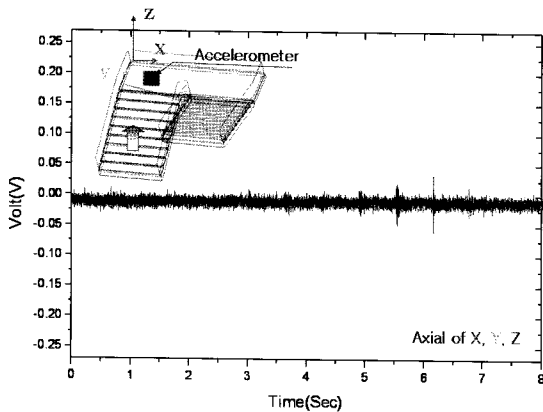
압전소자를 이용한 판의 진동 영향 평가의 결과 가진원의 영향에 대한 분석이 어려움으로 자동차와 항공기 등에서 활용하고 있는 정전용량형 3축 가속도계의 출력 전압 결과값을 비교하였다.



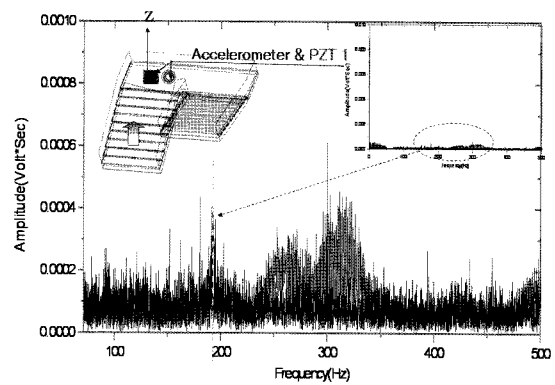
〈그림 17〉 주파수 응답에서의 BBF를 이용한 60 Hz 잡음제거



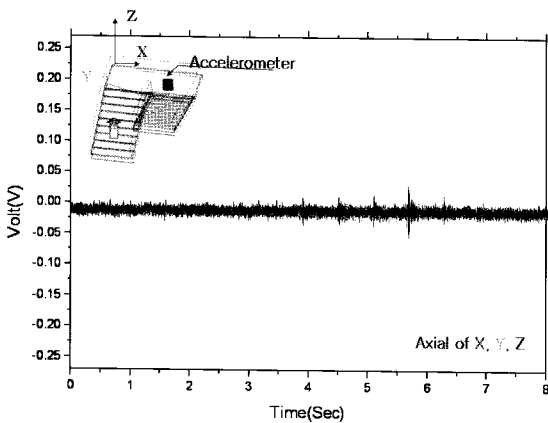
〈그림 20〉 50Hz 대역 내의 가속도계 1과 PZT 1의 주파수 응답 비교



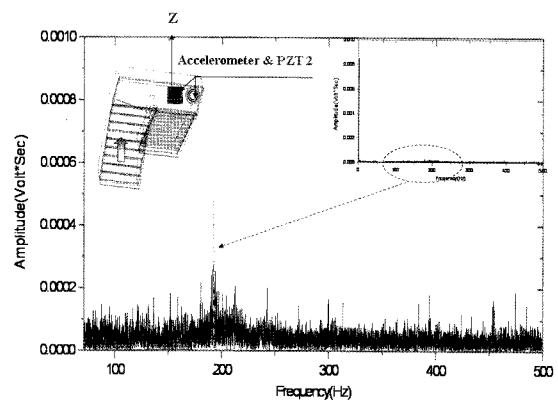
〈그림 18〉 보행에 따른 가속도계 1에서의 전압변화



〈그림 21〉 90~500Hz 대역 내의 가속도계 1과 PZT 1의 주파수 응답 비교



〈그림 19〉 보행에 따른 가속도계 2에서의 전압변화



〈그림 22〉 가속도계 2과 PZT 2의 주파수 응답 비교

BBF를 이용하여 보행에 따른 3축 가속도계의 전압 측정결과 판의 두께 방향인 Z축에 대하여 이동 보행에 따른 전압이 발생되는 것으로 나타났으며, 이는 체적파에 대한 영향으로 나타났다. 이동보행에 따른 압전소자(PZT)의 발생전압과 3축 가속도계의 발생전압을 고속 푸리에 변환을 통하여 비교하였다.

실험결과, 이동가진에 대한 압전소자의 발생전압을 BBF를 이용하여 60Hz의 잡음 대역을 제거한 후 주파수응답을 측정된 결과, 상용 주파수 60Hz의 기본파 교류전압에 대한 정수배인 주파수의 정현파가 발생되는 것으로 나타났다. 이를 고조파(Harmonics Wave)라 하는데, 이는 기본주파수에 n배인 것을 의미한다<sup>10)</sup>.

반면, 이동가진에 대한 가속도계의 발생전압을 비교한 결과 45Hz대역에서 주파수 응답이 발생하였다. 이동하중에 대한 주파수 응답은 180Hz 대역에서 영향이 크게 나타났으며, 60Hz의 고조파 영향은 발생하지 않았다.

## 6. 결 론

이동 가진원에 따른 철근 콘크리트 판에서의 진동평가에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 바닥판에서 압전소자를 이용하여 이동 하중에 따른 진동영향을 평가한 결과, 판 두께 방향인 Z축에 대한 영향으로 나타났다.
- 2) 이동하중에 따른 철근 콘크리트 바닥판에 부착된 3축가속도계의 발생전압은 이동하중의 영향에 따라 판의 축에 대하여 다르게 나타났으며, 이로 인하여 진동원과 전달매체에 대한 예측 및 분석을 할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 이동보행하중에 대한 압전소자와 3축 가속도계의 비교실험결과, 압전소자의 발생전압에 대한 주파수 응답 결과로 상용 주파수 60Hz의 기본과 교류전압에 대한 정수배인 고조파가 발생하였으며, 이를 저감하기 위한 회로 처리 및 보완 필터처리가 필요한 것으로 나타났다.
- 4) 압전소자는 물리적 충격을 전압으로 나타내어 주는 센서로 출력 전압은 높지만 에너지 소산이 큰 센서로 별도의 하우징(Housing)없이 공기 중에 노출시 부식과 온도 등의 영향을 받게 되지만, 마이크로 3축 가속도계는 저전력, 신호 안정성, 내구성 등으로 이동하중에 대한 영향을 3축 방향에 대해 분석할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었습니다.

## 참고문헌

1. Lingmi Zhang, Yukio Tamura, "Ambinnt

Vibration Testing & Modal Identification of an Office Building", Proc. of the 20th IMAC, Los Angeles, USA, Feb. 2-5, 2002.

2. S.A. Neild, P.D. McFadden, M.S. Williams, "Damage Assessment in Concrete Beams using Non-linear analysis of Vibration Measurements", Key Engineering Materials, Vol. 245-246, 2003, pp.557-564.
3. Bijaya Jaishi, Wei-Xin Ren, "Structural Finite Element Model Updating Using Ambient Vibration Test Results", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 4, 2005, pp.617-628.
4. Eric Larose, Julien de Rosny, Ludovic Margerin, Domitille Anache, Pierre Gouedard, Michel Campillo, Bart van Tiggelen, "Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes", The American Physical Society, Vol. 73, No. 1, 2006, pp.1-7.
5. 전호민, "가진원에 따른 라멘 구조물의 수직진동 전달 동특성 변화에 관한 실험 연구", 대한건축학회 논문집, Vol. 22, No. 4, 2006, pp.3-10.
6. 이성경, 민경원, 박은천, "진동대를 이용한 구조물의 하이브리드 실험", 대한건축학회 논문집, Vol. 22, No. 5, 2006, pp.57-63.
7. 황재승, 아산 카림, "구조물 응답을 이용한 외부하중 역 추정 기법에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, Vol. 23, No. 1, 2007, pp.51-61.
8. 민남기, "센서 전자공학", 동일출판사, 2005, pp.325-341.
9. Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing using MATLAB", BookWare Companion Series, 2000, pp.182-364.
10. Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jervis, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 2002, pp.317-341.
11. MATLAB (Version 6) Users Manual. The MathWorks, 2006.