

# 무선 MEMS 시스템을 이용한 구조물 식별

## System Identification of a Building Structure Using Wireless MEMS System

김 홍 진†  
Hongjin Kim

(2008년 2월 15일 접수 ; 2008년 3월 26일 심사완료)

**Key Words** : System Identification(시스템 식별), MEMS, Finite Element Model Updating(유한요소 모델수정), Health Monitoring(건전도평가)

### ABSTRACT

The structural health monitoring has been gaining more importance in civil engineering areas such as earthquake and wind engineering. The use of health monitoring system can also provide tools for the validation of structural analytical model. However, only few structures such as historical buildings and some important long bridges have been instrumented with structural monitoring system due to high cost of installation, long and complicated installation of system wires. In this paper, the structural monitoring system based on cheap and wireless monitoring system is investigated. The use of advanced technology of micro-electro-mechanical system(MEMS) and wireless communication can reduce system cost and simplify the installation. Further the application of wireless MEMS system can provide enhanced system functionality and due to low noise densities. Identification results are compared to ones using data measured from traditional accelerometers and results indicate that the system identification using wireless MEMS system estimates system parameters accurately.

### 1. 서 론

시스템 식별 및 건전도 평가는 건축, 토목공학분야에서 구조물의 효과적인 유지관리와 안정성 확보를 위하여 관심이 집중되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 시스템식별은 구조물에 가해지는 하중과 이로 인한 구조물의 거동을 예측하고 예측치로부터 구조물의 동적특성을 표현하는 수학적인 모델을 만드는 과정이며, 건전도 평가는 구조적 손상의 결과로서 나타나는 강성 등의 변화를 시스템식별로부터 얻어진 모델의 동특성으로부터 추정하는 것이다. 건전도 평가는 구조물의 시

스템 식별 기술은 또한 구조해석모델의 검증을 위한 도구를 제공하기도 한다. 그러나 센서의 높은 가격과 복잡한 유선 시스템의 설치로 인하여 역사적인 건물 몇몇과 중요한 긴 스패의 다리구조물에만 구조물 건전도 평가 시스템이 설치되어있다<sup>(3)</sup>.

이 논문에서는 저렴한 무선측정시스템을 기초로 하는 구조물 건전도 평가 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 최근, MEMS(micro-electro-mechanical system)는 구조물 건전도 평가분야에서 빠르게 적용되고 있는 기술 중의 하나이다<sup>(4-6)</sup>. MEMS는 전기적인 요소와 기계적 요소가 결합한 작은 복합체의 장비나 시스템으로 그 크기는 sub micrometer 레벨에서 millimeter 레벨까지이다. MEMS에서 micro는 작은 시스템, electro는 전기와 전자, 그리고 mechanical은 물체의 움직임을 의

† 교신저자: 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 건축공학전공  
E-mail : hjk@knu.ac.kr  
Tel : (053)950-7539, Fax : (053)950-6590

미한다<sup>(7)</sup>. MEMS 센서는 에어백 시스템, 미니 로봇, 마이크로엔진, 관성 센서 및 화학 물질, 압력 및 유량 센서 등에 응용되며, micro-scale에서 센서, 제어, 그리고 액추에이터 기술 등에 이용된다<sup>(8,9)</sup>. MEMS 가속도계는 작은 크기, 저렴한 가격 그리고 낮은 전력 소모의 장점을 갖고 있어 무선 모니터링에 적합하다<sup>(10)</sup>. 따라서 MEMS와 무선통신 첨단기술의 사용은 시스템 비용을 줄일 수 있고, 견전도 평가에서 설치를 단순화 할 수 있다. 또한 무선 MEMS의 낮은 소음 밀도는 시스템 식별 기능을 강화한다<sup>(11,12)</sup>.

무선 MEMS 시스템을 이용한 구조물의 시스템 식별을 위하여 측정데이터에 기반한 유한요소 모델수정기법(finite element model updating)을 이용하였다. 유한요소 모델수정기법은 모드데이터를 이용하여, 등방성 및 모델의 한정성 같은 구속조건을 만족하면서 강성행렬의 변화를 최소화하여 해설모델을 수정하는 방법이다. 유한요소 모델수정기법은 측정된 고유진동수와 모드형상을 기반으로 하기 때문에 제한된 정보를 이용하여 시스템식별을 할 수 있는 이점이 있다<sup>(13)</sup>. 무선 MEMS를 이용한 시스템 식별의 검증을 위하여 전단축소건물의 진동대 실험을 수행하였으며 전통적인 가속도계를 사용하여 측정된 결과와 비교하였다.

## 2. 무선 MEMS 시스템

무선 MEMS 시스템은 1) MEMS 가속도계, 2) 무선송신기, 3) 무선수신기의 세 부분으로 구성된다. 수신기와 PC 또는 노트북 사이의 인터페이스는 일반적인 랜 포트를 사용하여 TCP/IP 통신을 한다. 최대 7개의 무선 송신기는 1대의 수신기에 연결될 수 있으며, 그리고 여러 개의 수신기를 사용하는 허브 시스템으로 PC에 연결된다.

### 2.1 MEMS 가속도계

이 연구에서 사용된 MEMS 가속도 센서는 Analog Device사 ADXL103이다<sup>(14)</sup>. ADXL103은 일축 가속도계이며 측정범위는  $\pm 1.7g$ 이고, 정적 및 동적인 가속도를 측정한다. 출력신호인 아날로그 전압에 대하여 가속도는 비례하며, 센서의 치수는  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 이다. MEMS 가속도 센서의 자

Table 1 ADXL103 accelerometer specification

Parameter	Typical values
SENSOR INPUT Measurement range Nonlinearity	$\pm 1.7\text{ g}$ $\pm 0.2\%$
SENSITIVITY Sensitivity ( $V_s = 5V$ ) Sensitivity change due to temperature resolution	$1000\text{ mV/g}$ $\pm 0.3\%$ $1\text{ mg at } 60\text{ Hz}$
ZERO g BIAS LEVEL 0g Voltage Initial 0g Output deviation from ideal 0g offset vs. temperature	$2.5\text{ V}$ $\pm 25\text{ mg}$ $\pm 0.1\text{ mg/}^\circ\text{C}$
NOISE PERFORMANCE Output noise Noise density	$1\text{ mV rms}$ $110\text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}\text{ rms}$
FREQUENCY RESPONSE Sensor resonant frequency	$5.5\text{ kHz}$

세한 사양은 Table 1에 정리하였다.

### 2.2 무선송신기

무선송신기는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 3가지의 기능을 수행한다. 계측부는 센서인터페이스부에서 입력되는  $-5\sim 5V$  사이의 전압 신호로 미리 설정된 증폭비로 증폭하고, 필터링하고 A/D컨버터를 이용하여 디지털 신호로 전환하는 기능을 수행한다. 증폭비는 1~3000배, low pass 필터링은  $10\sim 1000\text{ Hz}$ 를 지원하며, 모두 원격지의 노트북에서 무선으로 제어가 가능하도록 개발되었다. A/D컨버터는 기존 유선 계측시스템의 정밀도를 만족하기 위하여 16 Bit를 채택하였다. 이 연구에 사용된 안테나의 송수신 범위는  $120\text{ m}$ 이며, 필요시 송수신 범위를  $1000\text{ m}$ 까지 증가시킬 수 있다.

디지털화 되어진 데이터는 무선 통신 상태의 이상이나, 배터리 방전과 같은 이상상태의 경우 데이터를 복구할 수 있도록 마이크로컨트롤러에 의해서 내부 플래시 메모리에 저장되고, UART포트를 통하여 블루투스 모뎀으로 전송된다. 이 연구에서는 블루투스를 이용한 무선 전송 기술을 적용하였지만, 계측부의 인터페이스를 범용적인 UART를 사용함으로써, IEEE 802.11 또는  $900\text{ MHz}$ ,  $433\text{ MHz}$  대역을 지원하는 RF방식의 무선 전송기술을 선택적으로 적용 가능하도록 개발하였다. Fig. 2에는 개발되어진 무선 송수신기를 보인다.

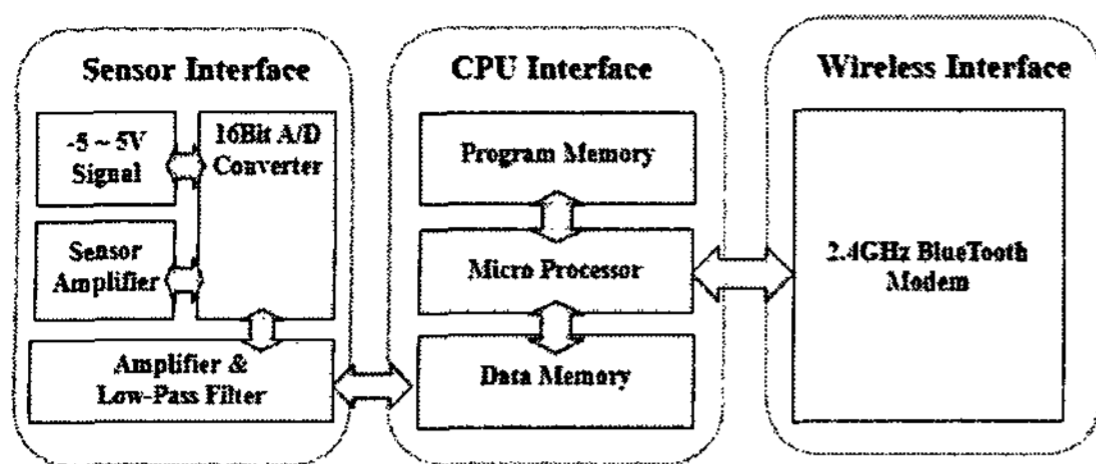


Fig. 1 Schematic layout of wireless transmitter

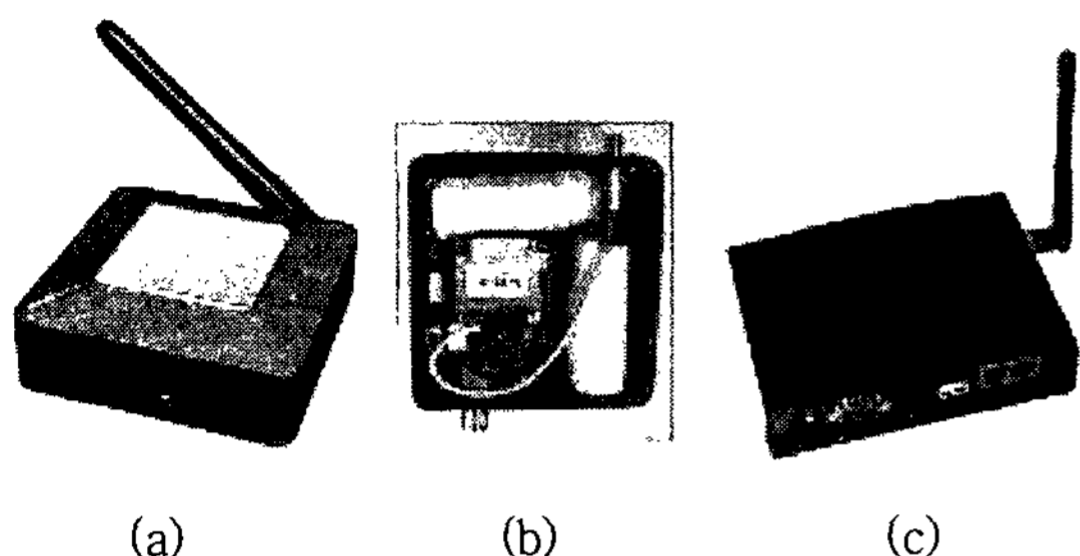


Fig. 2 Fully assembled wireless transmitter and receiver units, (a) Wireless transmitter (b) Wireless transmitter(inside) (c) Wireless receiver

### 3. MEMS 가속계를 이용한 시스템 식별

무선 MEMS 시스템을 이용한 건물의 시스템 식별의 실험적 검증을 위하여 전남대학교에서 전단축소 건물의 진동대 실험을 실행하였다. Fig. 3은 무선 MEMS 시스템을 설치한 3층 건물의 축소모형과 진동대의 개요를 나타내며, Fig. 4는 진동대 실험 전경을 보여준다. 축소건물의 각 층별 높이는 600 mm이며 기둥은 폭 50 mm, 두께 2 mm의 철판 (탄성계수 = 210 GPa)으로 약축방향으로 거동하게 설치하였다. 각 층의 바닥은 650 mm × 650 mm × 4 mm 철판으로 이루어졌고 바닥판 강성 증가를 위하여 50 mm × 4 mm 철판으로 둘레를 보강하였다.

4개의 MEMS 가속도계를 사용하여 기초 바닥판을 포함하여 각 층의 가속도를 측정하였으며, 추가적으로 4개의 Piezoelectric형 가속도계를 MEMS 데이터와 비교하기 위해 설치하였다(Fig. 4b). 가속도계 등을 포함한 각 층의 질량은 22.5 kg이다.

#### 3.1 시스템식별 및 유한요소 모델수정

무선 MEMS 시스템의 검증을 위한 유한요소모델수정기법은 모드데이터를 이용하여 등방성과 모델의

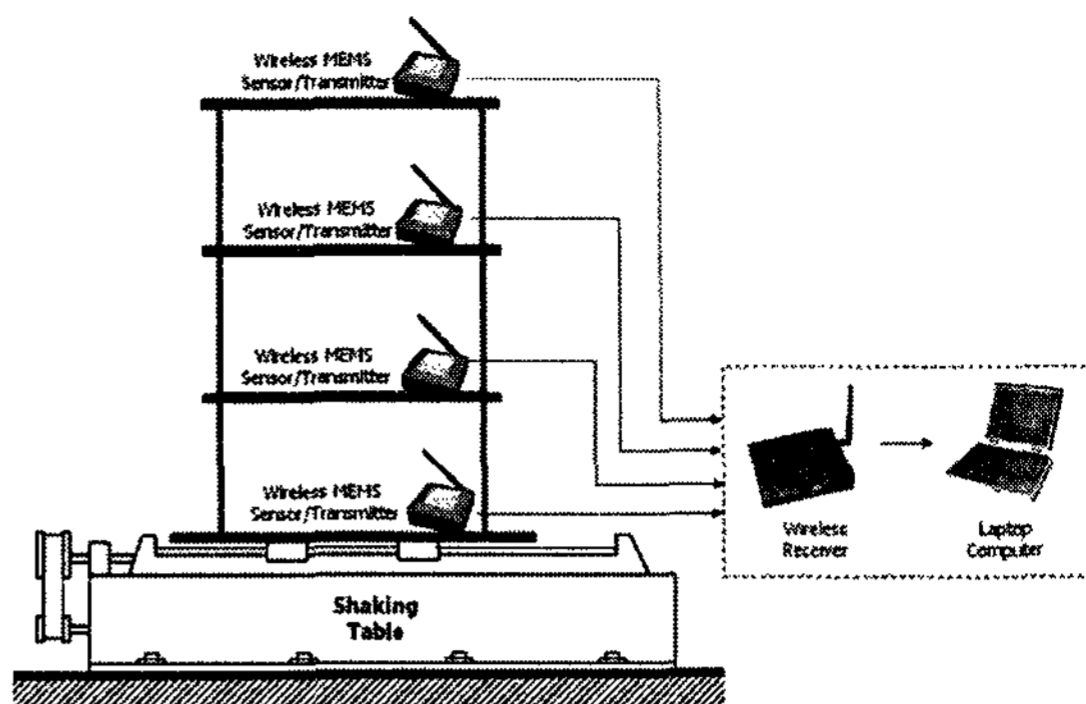
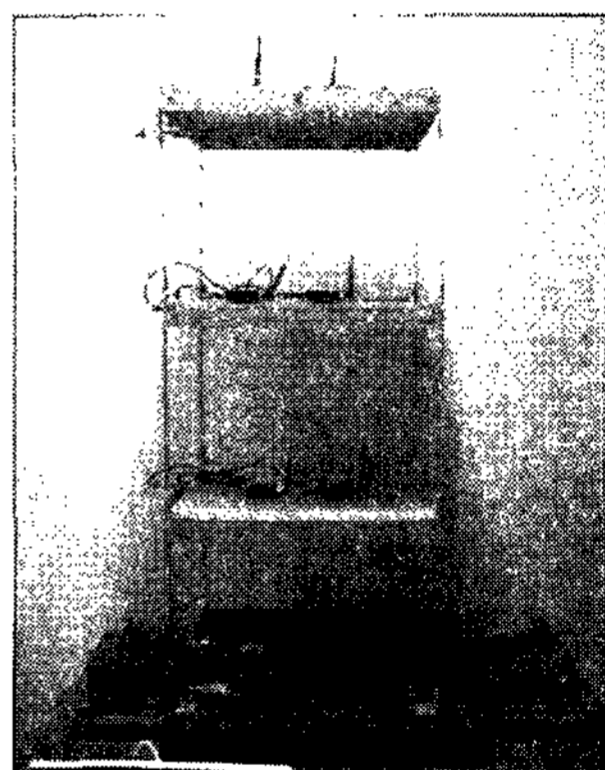
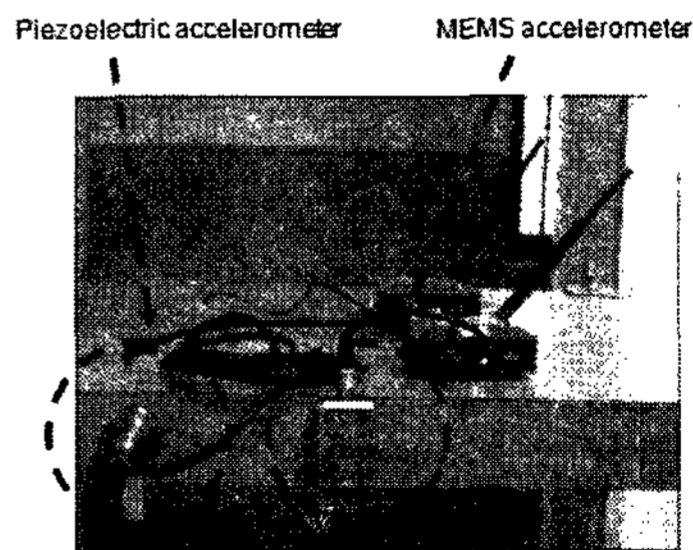


Fig. 3 Schematic of the shaking table experiment of a three story building with wireless MEMS



(a) Three story test building



(b) MEMS and traditional accelerometers

Fig. 4 Experimental setup for the system identification using wireless MEMS system

한정성의 구속조건을 만족하면서 강성행렬의 변화를 최소화하는 직접 모델수정법을 사용하였다<sup>(15)</sup>. 구조물의 질량행렬은 유한요소 모델에 의해 정의 되어질 때, 강성행렬은 측정된 모드 데이터를 재현할 수 있고 고(식(1)) 대칭행렬(식(2))이라는 두 가지 구속 조건을 적용할 수 있다<sup>(16)</sup>.

$$K_{up} \Phi_{up} = M_a \Phi_{up} \Lambda \quad (1)$$

$$K_{up}^T = K_{up} \quad (2)$$

여기서  $M_a$ 는 해석모델의 질량행렬,  $K_{up}$ 은 수정된 강성행렬,  $\Lambda$ 는 측정된 고유진동수의 제곱으로 이루어진 대각행렬이고,  $\Phi_{up}$ 는 측정된 고유벡터를 이용하여 식(3)에 의해 수정된 고유벡터이다.

$$\Phi_{up} = \Phi_m [\Phi_m^T M_a \Phi_m]^{-1/2} \quad (3)$$

여기서  $\Phi_m$ 은 측정된 고유벡터이다. 구속조건 (1)과 (2)를 만족하는 강성행렬은 식(4)에서 정의된 해석모델의 강성행렬과 수정된 강성행렬의 차이가 최소화되도록 수정된다.

$$J = \frac{1}{2} \|N^{-1}(K_{up} - K_a)N^{-1}\| \quad (4)$$

식(4)로부터 유도한 강성행렬의 수정식은 식(5)와 같다.

$$K_{up} = K_a - K_a \Phi_{up} \Phi_{up}^T M_a - M_a \Phi_{up} \Phi_{up}^T K_a + M_a \Phi_{up} \Phi_{up}^T K_a \Phi_{up} \Phi_{up}^T M_a + M_a \Phi_{up} \Lambda \Phi_{up}^T M_a \quad (5)$$

### 3.2 자유진동실험

무선 MEMS 가속도계의 성능을 확인하기 위하여 자유진동실험을 수행하였으며, Fig. 5는 3층에서 최초 5초간의 가속도 시간이력을 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 MEMS 가속도계의 노이즈레벨이 Piezoelectric형 가속도계의 노이즈레벨에 비해 현저히 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 각 층의 자유진동 시간이력을 나타내었고, Fig. 7에는 주파수응답을 나타내었다. 주파수응답은 Matlab 내장함수를 이용하여 구하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 자유진동실험의 경우 1차모드 진동이 지배적이기 때문에 모드형상과 감쇠비의 식별은 1차모드에 한정하여 구하였다. 모드형상은 전달함수 최대 값의 비를 이용하여 구하였고, 감쇠비는 대수감소비를 이용하여 구하였다<sup>(17,18)</sup>. 식별된 1차모드의 진동수는 0.900 Hz, 모드벡터는  $\phi^T = [0.5180 \ 0.8453 \ 1.0]$ , 감쇠비는 0.5%이다.

각 층의 층강성이 동일하다는 가정할 때, 앞 절에서 주어진 층 질량과 자유진동 실험을 통해 구해진 1차 고유진동수를 갖는 강성행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_a = \begin{bmatrix} 7348 & -3674 & 0 \\ -3674 & 7348 & -3674 \\ 0 & -3674 & 3674 \end{bmatrix} N/m \quad (6)$$

이 논문에서는 식(6)에 주어진 강성행렬을 초기 해석모델의 강성행렬로 가정하고 백색잡음 실험의 결과를 바탕으로 하여 유한요소 모델수정법을 적용하였다.

식(6)과 앞 절에서 주어진 전단건물의 제원으로부터 구한 초기 해석모델의 각 모드별 동적특성을 표 2에 정리하여 나타내었다. 모드별 감쇠비는 층강성과 같이 동일한 층감쇠를 갖는다는 가정하에 측정된

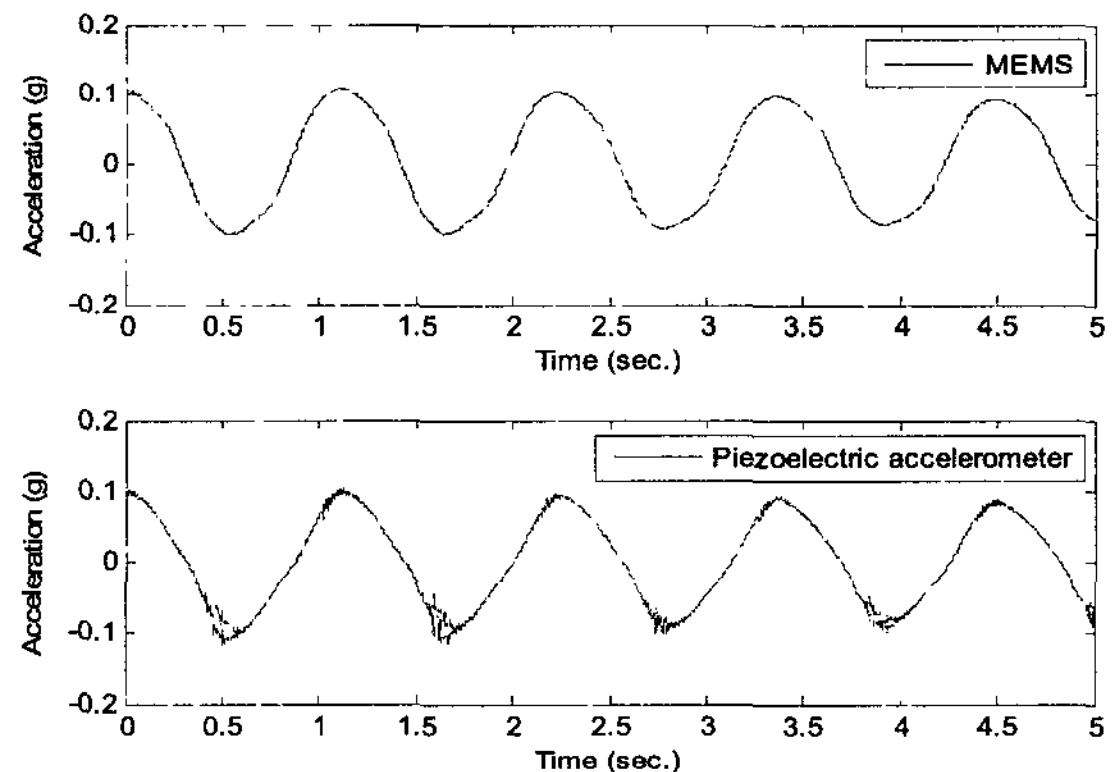


Fig. 5 Comparison of acceleration time history of the third floor

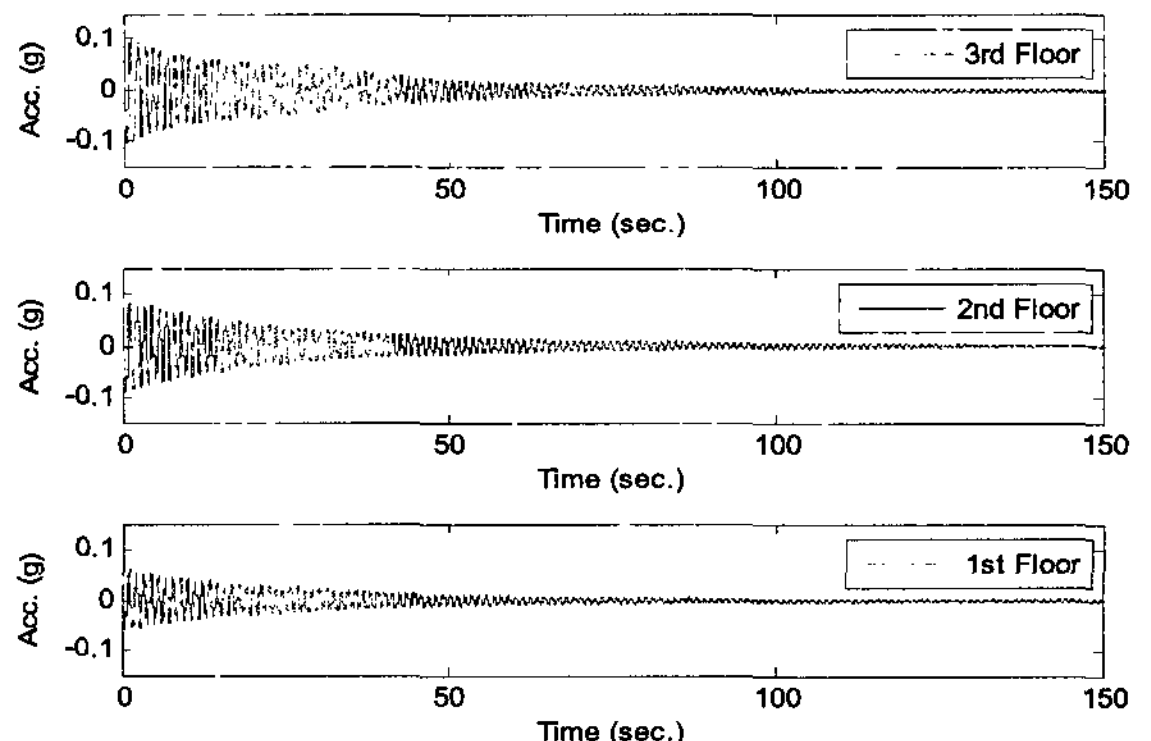


Fig. 6 Acceleration time history of the free vibration

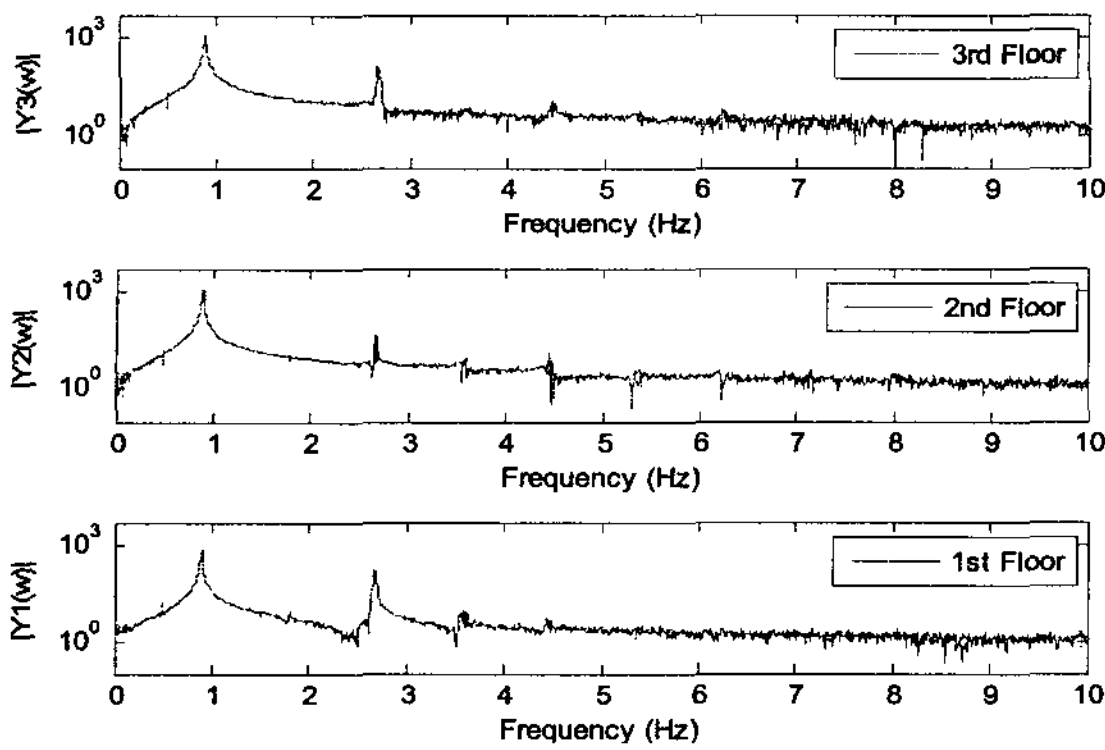


Fig. 7 Frequency responses of the free vibration

Table 2 Modal characteristics of the initial FEM model

		1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode vector	1st floor	0.445	-1.247	1.802
	2nd floor	0.802	-0.555	-2.247
	3rd floor	1.000	1.000	1.000
Damping ratio(%)		0.500	1.402	2.025
Frequency(Hz)		0.900	2.522	3.644

1차모드 감쇠비를 갖도록 감쇠행렬을 구성하여 구하였다.

### 3.3 백색잡음실험

모든 모드의 고유벡터와 감쇠비를 구하기 위하여 백색잡음실험을 수행하였으며, 계측된 고유진동수는 0.902 Hz, 2.684 Hz, 3.960 Hz이다. 백색잡음 실험 결과를 이용한 시스템 식별을 위하여 N4SID(state space subspace system identification) 기법을 이용하였다<sup>(19)</sup>. N4SID는 주어진 입력데이터로부터 최적의 상태방정식을 추출하므로 각 모드별 모드벡터와 감쇠비는 이 상태방정식으로부터 구하였다. 식별 결과 얻어진 고유벡터는 식(7)과 같으며, 각 모드별 감쇠비는 0.68%, 0.75%, 0.87%이다.

$$\Phi_m = \begin{bmatrix} 0.514 & -1.319 & 1.098 \\ 0.842 & -0.298 & -1.740 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Table 3에는 백색잡음 실험데이터를 이용하여 N4SID 기법에 의하여 식별된 모델의 모드별 동적특성을 정리하였다. Table 2의 초기 해석모델과 비교하여 보았을 때, 1차모드의 모드특성만이 유사하고 2차,

Table 3 Modal characteristics of the identified model

		1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode vector	1st floor	0.514	-1.319	1.098
	2nd floor	0.842	-0.298	-1.740
	3rd floor	1.000	1.000	1.000
Damping ratio(%)		0.710	0.783	0.924
Frequency(Hz)		0.902	2.684	3.960

Table 4 Modal characteristics of the updated FEM model

		1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode vector	1st floor	0.531	-1.369	1.143
	2nd floor	0.881	-0.309	-1.835
	3rd floor	1.000	1.000	1.000
Damping ratio(%)		0.679	0.750	0.869
Frequency(Hz)		0.902	2.684	3.960

3차모드의 특성은 차이가 나는 것을 알 수 있다.

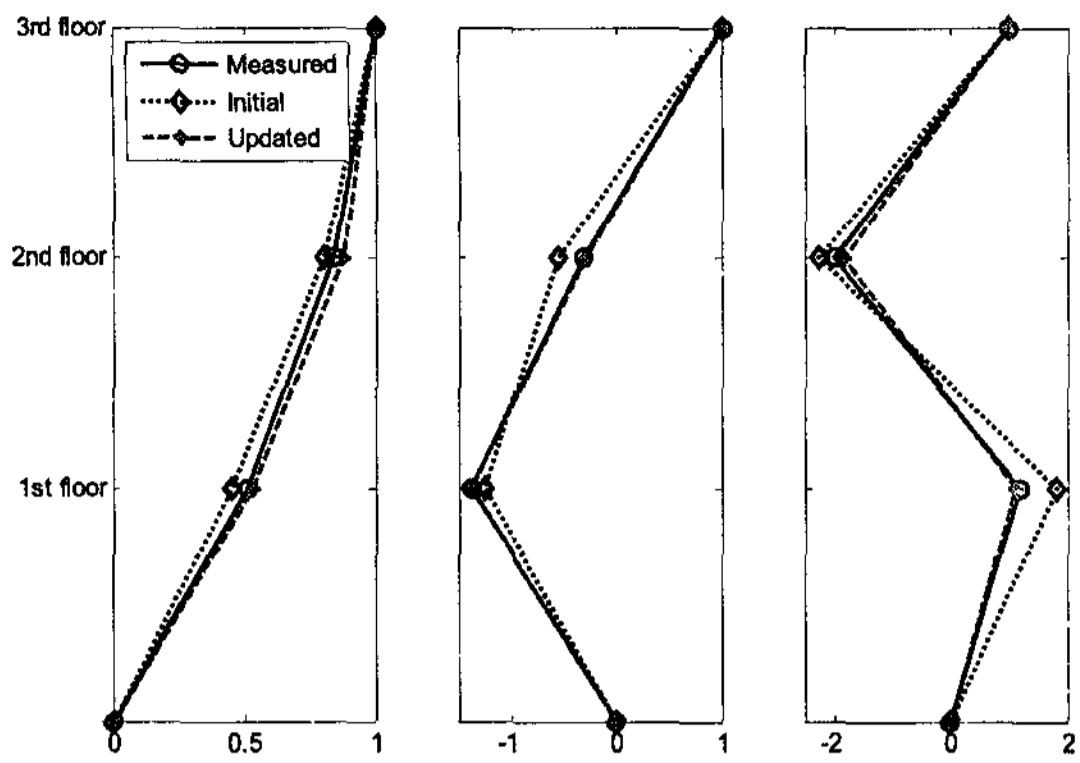
식별된 고유벡터를 이용하여 식(6)에 주어진 초기 해석모델의 강성행렬을 식(5)에 의해 수정하였다. 유한요소 모델수정을 통해 구해진 고유벡터 및 강성행렬은 식(8), (9)와 같다.

$$\Phi_{up} = \begin{bmatrix} 0.531 & -1.369 & 1.143 \\ 0.881 & -0.309 & -1.825 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (8)$$

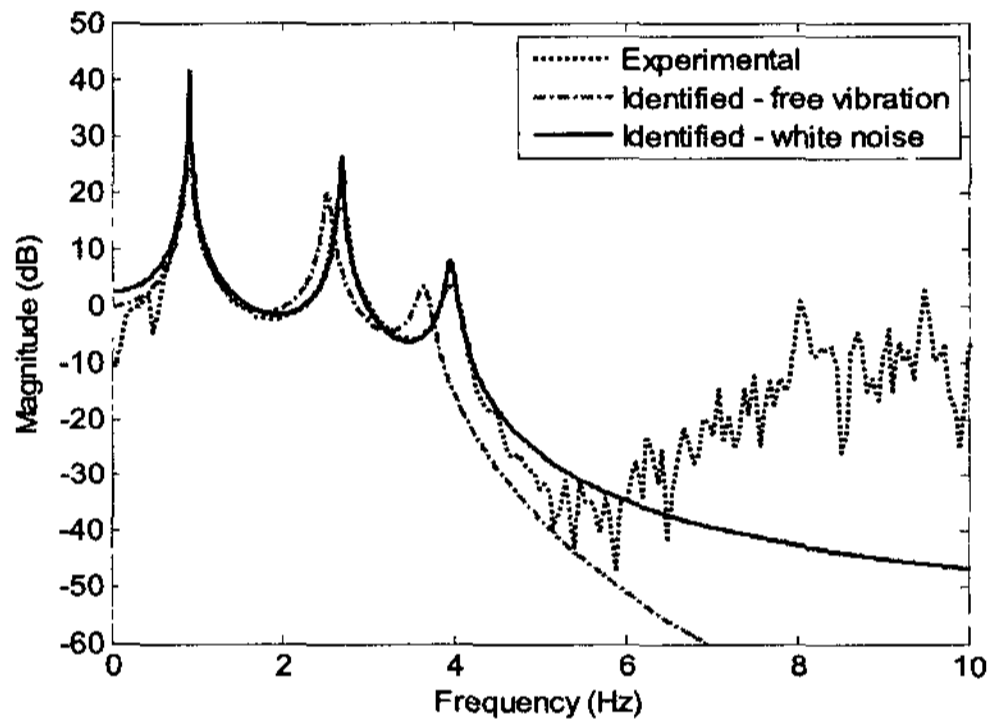
$$\mathbf{K}_{up} = \begin{bmatrix} 7450 & -4125 & 63 \\ -4125 & 8808 & -4923 \\ 63 & -4923 & 5034 \end{bmatrix} N/m \quad (9)$$

Table 4에는 유한요소 수정모델에 의하여 구해진 수정모델의 모드별 동적특성을 정리하였다. Table 3의 백색잡음 실험결과와 비교하여 보았을 때, 모든 모드에서 유사한 동적특성을 보임을 알 수 있다. 이는 유한요소 수정모델이 백색잡음 실험을 통하여 식별된 동적특성에 기반한 것이기 때문이다. 특히 고유진동수는 실험에 의해 식별된 고유진동수와 동일한 것 알 수 있는데 이는 식(1)과 (5)에서 유한요소 모델수정에 가정된 제한조건이 수정된 모델과 식별된 모델이 동일한 고유진동수를 갖는 것에 기반하였기 때문이다.

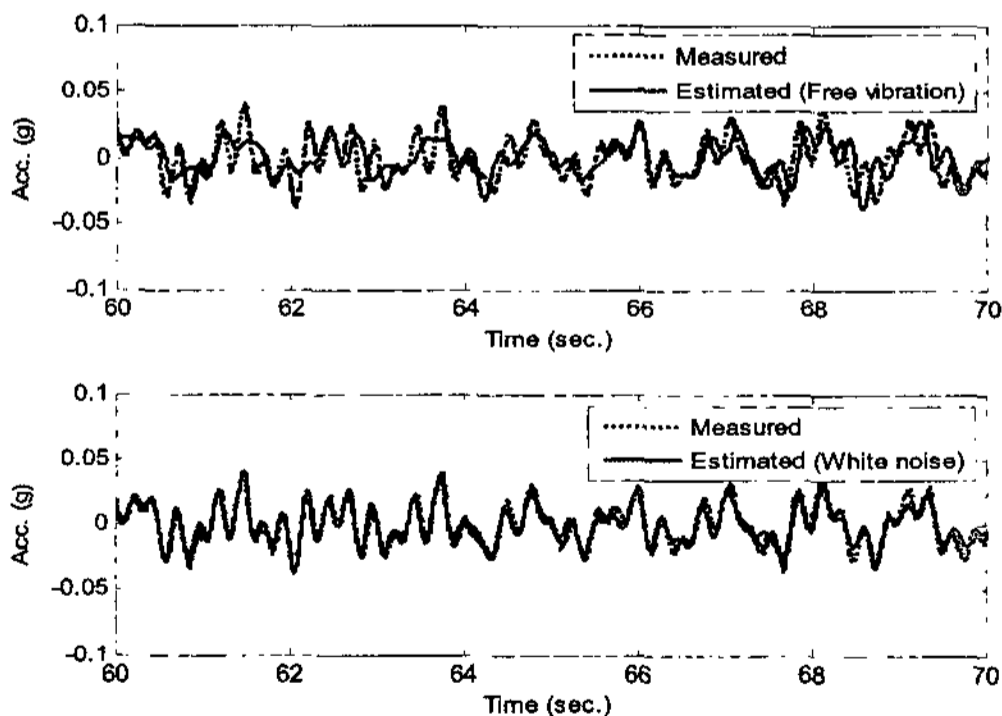
Fig. 8은 예측된 모드형상과 측정된 모드형상을 비교한 것이다. 그림으로부터 초기 해석모델에 비해



(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode  
**Fig. 8** Mode shape comparison



**Fig. 9** Comparison of the FRF for absolute acceleration of the third floor from ground acceleration



**Fig. 10** Acceleration time history of second floor subjected to white noise ground motion

유한요소 모델수정에 의해 식별된 모델에 근접하게 모드벡터를 수정한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 3층 가속도의 지반가속도에 대한 전달함

수를 실험결과와 비교하였다. 점선으로 표시된 전달함수가 백색잡음 실험을 통해 구해진 전달함수이고, 일점쇄선으로 표시된 전달함수는 자유진동실험에 기반하여 구한 초기 해석모델의 전달함수이다. 그리고 실선으로 표시된 전달함수는 백색잡음 실험에서 얻어진 모드별 특성을 바탕으로 초기 해석모델을 유한요소 모델수정 기법을 적용하여 수정한 모델의 전달함수이다. 자유진동실험에 의하여 구해진 초기 해석모델의 전달함수의 경우 1차 모드만 일치하고 2차와 3차 모드 계측결과와 상당히 다른 것을 알 수 있다. 이는 자유진동에 의해 1차 모드 특성만이 식별되었고, 2차와 3차 모드는 층강성이 동일하다는 가정 하에 1차 모드만을 맞추도록 강성행렬을 구성하여 구한 값이기 때문이다. 백색잡음을 이용한 수정 유한요소모델의 경우 전달함수가 3차 모드까지 실험결과와 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 자유진동실험을 통해 구해진 초기 해석모델과 백색잡음실험을 통해 수정된 유한요소 모델의 백색잡음하중에 대한 2층 바닥판의 가속도 시간이력을 계산하여 측정된 시간이력과 비교한 것이다. 전달함수의 비교에서와 마찬가지로 수정된 강성행렬을 이용하여 구한 가속도 응답이 자유진동실험으로부터 구한 초기 해석모델의 강성행렬을 이용한 것보다 측정된 값에 더 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 구조물의 건전도 평가 및 식별을 위한 저렴한 무선 모니터링 시스템의 개발에 관해 연구를 하였다. 무선 MEMS 시스템의 적용성을 검증하기 위하여 전단축소건물의 진동대실험을 수행하였으며 전통적인 가속도계를 사용하여 측정된 결과와 비교함으로써 무선 MEMS를 사용한 시스템 식별 결과를 검증하였다.

자유진동 실험 및 백색잡음실험을 통하여 시스템 식별을 수행하였으며, MEMS 가속도계의 노이즈레벨이 Piezoelectric형 가속도계의 노이즈레벨에 비해 현저히 작은 것을 알 수 있었다. 또한 유한요소 모델수정기법을 이용한 시스템 식별결과 3차 모드까지의 동적특성이 정확하게 추정이 되었다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 경북대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Yoon, J. G., Lee, J. W. and Kim, J.-I., 2004, "FVT Signal Processing for Structural Identification of Cable-stayed Bridge", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 923~929.
- (2) Kang, K.-S., Lee, S.-H. and Min, K.-W., 2004. "System Identification of a Three-story Test Structure based on Finite Element Model", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 416~423.
- (3) Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S. and Carryer, E., 2003, "Design of piezoresistive MEMS-based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 108~114.
- (4) Obadat, M., Lee, H., Bhatti, M. A. and Maclean, B., 2003, "Full-scale Field Evaluation of Microelectromechanical System-based Biaxial Strain Transducer and Its Application in Fatigue Analysis", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 100~107
- (5) Staszewski, W. Boller, C. and Tomlinson, G. R., 2004, Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing, John Wiley and Sons, England.
- (6) Zhang, Y., Cheng, L. and Naito, C., 2005, "A Study of Wireless MEMS Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring", Technical Report LU-CSE-05-015, Department of Computer Science and Engineering, Lehigh University.
- (7) Lin, R. M. and Wang, W. J., 2006, "Structural Dynamics of Microsystems - Current State of Research and Future Directions", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp. 1015~1043.
- (8) Vittorio, S. A., 2001, "MicroElectroMechanical Systems (MEMS)", Cambridge Scientific Abstracts, October, pp 1~11.
- (9) Hierold, C., 2004, "From Micro- to Nanosystems: Mechanical Sensors Go Nano", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. S1~S11.
- (10) Shinozuka, M., Feng, M. Q., Chou, P., Chen, Y. and, Park, C., 2003, "MEMS-based Wireless Real-time Health Monitoring of Bridges", Proceedings of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering, Nanjing, China, October.
- (11) Kinawi, H. Taha, M. M. R. and El-Sheimy N., 2002, "Structural Health Monitoring Using the Semantic Wireless: a Novel Application for Wireless Networking", Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, Tampa, Florida, November.
- (12) Krüger, M., Große, C. U. and Marrón. P. J., 2005, "Wireless Structural Health Monitoring Using MEMS", Key Engineering Materials, Vol. 293~295, pp. 625~634.
- (13) Friswell, M. I. and Mottershead, J. E., 1995, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- (14) Analog Devices, ADXL103 Data Sheets, <http://analog.com>
- (15) Baruch, M. and Bar-Itzhack, I. Y., 1978, "Optimal Weighted Orthogonalization of Measured Modes", AIAA Journal, Vol. 16, No. 11, pp. 346~351.
- (16) Baruch, M., 1978, "Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibration Tests", AIAA Journal, Vol. 16, No. 11, pp. 1208~1210.
- (17) Kang, K.-S., 2004, "Identification of Stiffness and Damping Matrix of Building Structures Using Modal Characteristics", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 8, No. 2, pp. 45~53.
- (18) Chopra, A. K., 2000, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, NJ.
- (19) Ljung, L., 2007, System Identification Toolbox User's Guide, Mathworks.