

<기술노트>

# 구조 건전성 감시를 위한 스마트 가속도계의 성능 평가

## Performance Evaluation of Smart Accelerometers for Structural Health Monitoring

이진학\* · 오혜선\*\* · 윤정방\*\*\*

Yi, Jin-Hak · O, Hye-Sun · Yun, Chung-Bang

### Abstract

In this study, two kinds of smart accelerometers are investigated for the application of smart sensors to the structural health monitoring of infrastructures. Smart optical Fiber Bragg Grating (FBG) type and Micro-Electo-Mechanical System (MEMS) type accelerometers are selected for this study and the high sensitive ICP type accelerometer is used for the reference sensor. Small size shaking table tests were performed with 3-story shear building model using random input ground motions. The output only modal identification was carried out using stochastic subspace identification and the performances of sensors are compared in modal domain indirectly. The modal sensitivity method was applied to update the story stiffness of numerical model and the updated results were verified using the additional experiments for the same structure with additional mass.

**Keywords :** smart sensor, fiber bragg grating, micro-electo-mechanical system, icp, experimental modal analysis

### 요 지

이 연구에서는 최근 사회기반시설물의 스마트 모니터링을 위하여 많은 관심을 받고 있는 광섬유 FBG형 가속도계와 MEMS형 가속도계의 적용성을 평가하고자 하였다. 이들의 성능을 비교하기 위하여 저주파수 영역에서 높은 민감도와 신뢰성을 가지고 있는 ICP형 가속도계를 스마트 센서와 동시에 모형구조물에 부착하여 소규모 진동대 실험을 수행하였으며, 계측된 응답을 이용하여 모드해석을 수행함으로써 간접적으로 계측자료의 신뢰성을 비교하였다. 계측자료로부터 구한 모드자료를 이용하여 진단법정의 층간 강성을 추정하였다. 추정된 강성의 신뢰성을 검증하기 위하여 기지의 질량을 추가하여 구조물의 특성을 변경시킨 후, 다시 진동대 실험을 수행하여 구한 실험모드해석 결과를 수치해석결과와 비교하였다.

**핵심용어 :** 스마트 센서, Fiber Bragg Grating, Micro-Electo-Mechanical System, ICP, 실험모드해석

### 1. 서 론

최근 교량 및 터널 등 사회기반시설물의 최적유지관리와 관련하여, 기존의 계측시스템이 가지고 있는 비효율의 문제와 계측시스템 자체의 유지관리의 문제 등을 개선시킬 수 있을 것으로 기대되고 있는 스마트 센서 및 이를 활용한 계측시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 스마트 센서 가운데 특히 광섬유센서(Optical Fiber Sensor, OFS), 압전 센서(Piezoelectric Sensor), MEMS(Micro-Electo-Mechanical Systems) 센서 등에 관한 관심과 연구가 활발하다(Na and Kundu 2002; Acar and Shkel 2003; Li 등 2004). 국내에서도 많이 연구되고 있는 광섬유센서는 국부적인 계측을 주로 수행하는 Feby Perrot 방식, 다중화에 유리한 브레그 격자(Bragg Grating)를 이용하는 Fiber Bragg Grating(FBG) 방식, 분포형 계측에 유리한 OTDR(optical time domain

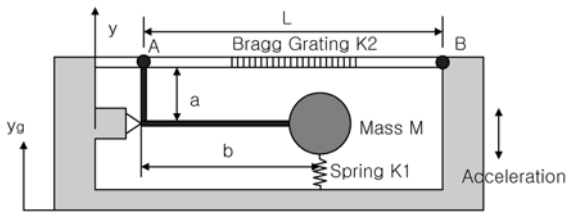
reflectometry), BOTDR(Brillouin OTDR) 등 다양한 성능의 여러 형태의 센서가 있으나, 현재로서는 다중화에 유리하고, 여러 물리량을 하나의 시스템으로 계측할 수 있는 장점으로 인하여 FBG형 센서에 대한 연구 및 적용이 가장 활발하다고 할 수 있다. 한편 MEMS 센서의 경우, 기존 센서의 크기를 마이크로 단위로 최소화하고, 이를 대량 생산함으로써 가격이 기존 센서에 비하여 매우 저렴하고, 전력소모량이 기존 센서에 비하여 매우 작기 때문에 향후 개발될 자가발전형(Energy Harvesting) 시스템의 구축에 필수적인 센서라 할 수 있다. 다만 현재의 MEMS 센서는 분해능이나 S/N(Signal to Noise) 비 등이 기존 센서에 비하여 불리하기 때문에, 이러한 단점만 개선된다면 기존의 센서를 충분히 대체할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 구조물의 건전성 평가와 관련하여 구조물의 진동을 계측하고, 계측된 결과를 이용하여 구조물의 동특성

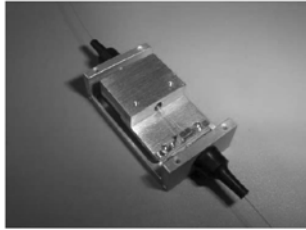
\*정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원(E-mail : yjih@kordi.re.kr)

\*\*Ecole Nationale des Ponts et Chausees, Transport and Sustainable Development 석사과정(E-mail : cherrypink80@hotmail.com)

\*\*\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수(E-mail : ycb@kaist.ac.kr)



(a) 개념도 (Mita et al. 2000)



(b) 가속도계의 내부 (<http://www.to-soku.co.jp>)

그림 1. 연구에 사용된 FBG형 가속도계

을 평가한 후, 이로부터 구조계를 추정하여 구조물의 건전성을 평가하는 일련의 절차에 있어 이러한 스마트 센서의 성능을 평가하고자 하였다. 기준이 되는 가속계로는 10V/g의 민감도를 가지는 저주파수 전용의 ICP형 가속도계를 사용하였으며(PCB 2004), FBG형 가속도계로는 Tokyo Sokushin에서 개발된 센서를 사용하였다(Tokyo Sokushin 2004). 또한 MEMS 센서로는 일반적으로 많이 이용되고 있는 4%/g의 Analog Device사의 ADXL2E를 사용하였다(Analog Device 2004).

## 2. 가속도 계측을 위한 스마트 센서


### 2.1. FBG형 가속도계

이 연구에서 사용된 FBG형 가속도계는 그림 1에서 제시된 것과 같이 Mita 등에 의하여 제안된 가속도계로써 이는 가속도에 의한 운동을 유발하기 위한 질량, 스프링과 질량의 운동을 광섬유의 변형률로 전달하기 위한 L형 강체보(rigid beam), 그리고 최종적으로 가속도에서 변환된 변형률을 계측하기 위한 브래그 격자(Bragg grating)로 구성된다(Mita and Yokoi 2000).

### 2.2 MEMS형 가속도계

MEMS형 가속도계는 Analog Devices, Endevco, Silicon Designs, Motorola 등 여러 회사에서 상용제품을 제공하고 있다(Acar and Shkel 2003). 이들 중 Analog Devices사의 ADXL계열 모델이 일반적으로 사용되고 있으며, 이 연구에

표 1. MEMS형 가속도계(ADXL 210E)의 상세

항목	값	ADXL210E
측정 가속도 레벨	$\pm 10$ g	 ADXL210E
분해능	60 Hz에서 2 mg	
작동 온도	-40°C ~ 85°C	
크기	5×5×2 mm	

서도 Analog Devices에서 개발한 ADXL210E 가속도계를 사용하여 성능을 평가하였다. 다음의 표 1은 사용된 ADXL210E의 규격이다.

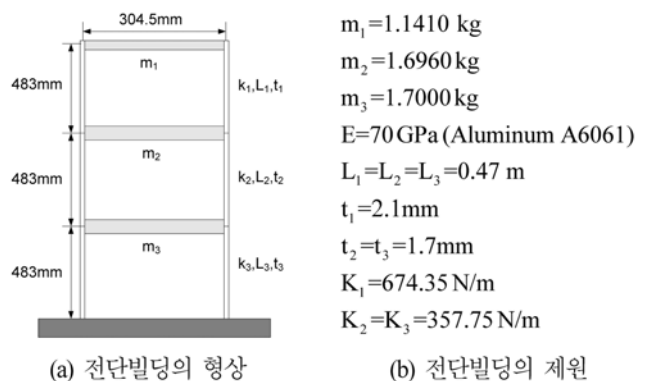
## 3. 가속도계 성능 평가를 위한 실험

### 3.1. 사용된 가속도계 및 실험장치 구성

이 연구에서는 10V/g의 민감도를 갖는 ICP형 가속도계(PCB Inc., 모델명 393B12)를 기준으로 하여, Mita 등이 제안한 FBG형 가속도계(Tokyo Sokushin 제조, 모델명 BPS-700), 그리고 MEMS형 가속도계로 MICA 등에서 채택된 바 있는 가속도계(Analog Device 제조, 모델명: ADXL210E)를 이용하여 3층 전단빌딩의 소형진동대 실험에 의한 가속도를 계측하였고, 각각의 가속도계로부터 나온 계측신호의 시계열과 함께, 이를 이용한 실험 모드해석을 수행함으로써 계측신호의 신뢰성을 평가하였다. 소형진동대 실험을 위하여 사용된 3층 전단빌딩의 구조물 제원은 다음의 그림 2와 같고, 해석을 위한 전단빌딩의 등가강성은  $K=12EI/L^3$ 의 관계를 이용하여 산정하였다. 진동대의 입력신호로는 랜덤신호를 사용하였고, 각 층마다 설치된 ICP형 가속도계, FBG형 가속도계, MEMS형 가속도계로부터 계측된 신호를 비교하였으며, 또한 이 과정을 초기 구조(Case I)과 1층에 추가적인 중량 1054 g과 2800 g을 가한 경우(Case II, Case III)에 대하여 실험을 추가 수행하였다. 현재까지 개발된 광섬유 FBG 계측장비의 계측주파수가 200~250 Hz로 제한적이어서, 이 연구에서는 250 Hz로 가속도를 계측하였다(도남시스템, MicronOptics). 한편, MEMS형과 일반 압전형의 경우 수십 kHz까지 계측할 수 있고, 특히 MEMS형 가속도계의 계측잡음비가 다른 가속도계에 비하여 높기 때문에 이를 완화하기 위하여 MEMS 가속도계는 1000 Hz로 신호를 측정하여 이동평균을 구하여 실험모드해석에 사용하였다.

### 3.2 계측신호의 비교

다음의 그림 3은 초기 모델, 즉 Case I에 대하여 다섯 번의 계측 Set 중 첫번째 계측 Set에 있어 여러 가속도계로부터 계측된 신호를 보여주고 있으며(3층의 경우), 파형만을 비교할 때 대체로 일치하지만 FBG형 가속도계가 일반 ICP형 가속도계에 좀 더 일치하는 경향을 보여주고 있다. 각각 다른 계측시스템을 이용하였기 때문에 동기화(synchronization)가 어려워 시계열 자체의 비교는 큰 의미가 없으므로, 실험모드



(a) 전단빌딩의 형상

(b) 전단빌딩의 제원

그림 2. 전단빌딩의 형상 및 제원

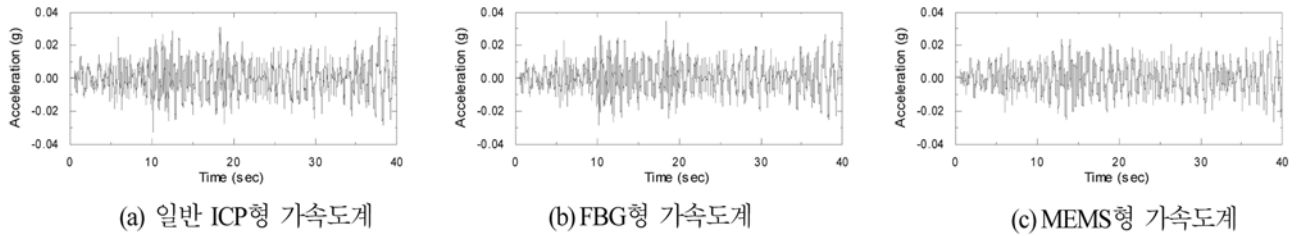


그림 3. 3층에서 계측된 가속도 (Case I, Set 1)

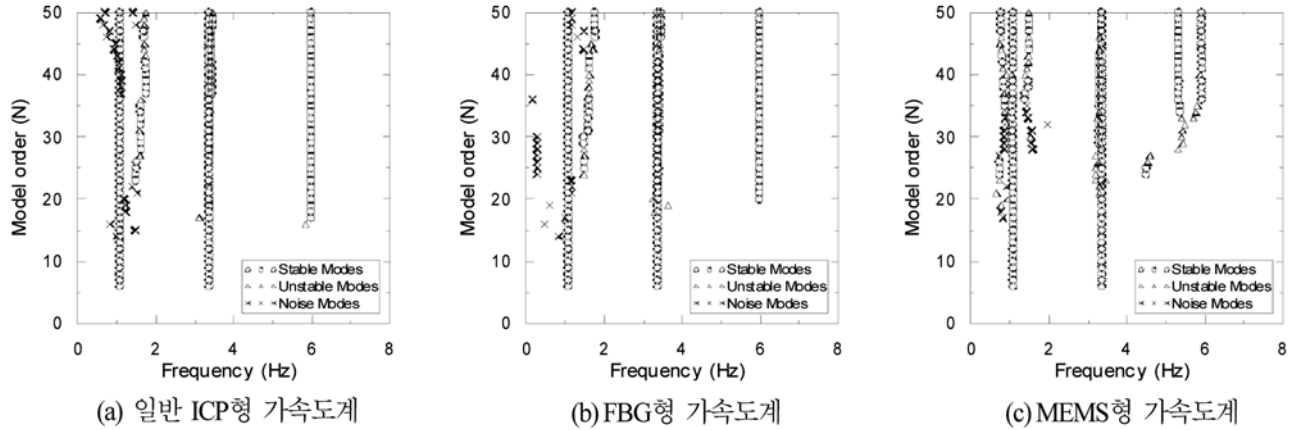


그림 4. 가속도계에 따른 안정화도의 비교 (Case I)

해석을 통하여 간접적으로 각 가속도계의 성능을 비교하고자 하였다.

엄밀한 실험모드해석을 위하여 추계론적 부공간 규명법 (Stochastic Subspace Identification, Peeters and De Roeck 1999)에 의한 모드해석을 수행하였다. 다음의 그림 4는 모드 해석 과정에서 구할 수 있는 안정화도(Stabilization Chart)를 비교한 것으로, 일반 ICP형 가속도계와 FBG형 가속도계의 경우 안정된 모드를 정확하게 구분해 낼 수 있는 반면, MEMS형 가속도계는 3차 모드가 분리되어 추정되는 오류를 가져옴을 알 수 있었다. 한편, FBG형 가속도계로 계측한 경우 0.5 Hz 미만의 저주파 신호에서 계측잡음이 일반 ICP형 가속도계보다는 많이 존재하는 것을 안정화도로부터 유추해낼 수 있다.

다음의 표 2와 3은 각각 고유주파수와 모드감쇠비의 추정 결과를 정리한 것이다. 1차 모드의 고유주파수 추정 결과는 압전형, FBG형, MEMS형 모두 0.1% 정도의 상대오차를 가지고 있어 매우 정확한 추정이 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 특히 FBG형 가속도계의 경우 5번 반복실험에 의한 고유주파수 값의 분산계수(Coefficient of Variation, COV)가 0.6% 정도로 가장 작았으며, 2차 모드의 경우 FBG형 가속도계와 ICP형 가속도계의 고유주파수 추정 결과는 3.360 Hz로 일치하였고, 또한 COV값도 0.2~0.3%로 매우 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, MEMS형 가속도계에 의한 추정 결과는 다른 가속도계에서 구한 결과보다 0.3%정도 작은 3.351 Hz로 추정되었다. 한편 3차 모드의 경우에 있어서도 FBG형 가속도계와 ICP형 가속도계로 구한 고유주파수가 5.993 Hz와 5.992 Hz로 0.02% 정도의 상대오차가 발생하여 두 센서에 의한 값이 매우 일치함을 알 수 있었다. 그러나, MEMS형 가속도계의 경우, 총 5회의 실험 가운데 2회의 실험에서는 3차 모드의 고유주파수를 5.63 Hz와 5.70 Hz로 추정하여, 일관성이 다른 결과보다 낮음을 알 수 있다. 이러한 오류를 배제한 경우에도 그 값이

5.902 Hz로 1.5% 정도의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 고유주파수 추정결과를 볼 때, FBG형 가속도계는 기존의 ICP형 가속도계를 대체할 수 있을 정도의 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 한편, 모드감쇠비의 경우에는 세 가지 형태의 센서로부터 구한 값들이 대체로 일치하였다. 모드감쇠비의 경우에는 일반적으로 고유주파수에 비하여 추정 정확도가 상대적으로 떨어지기 때문에 이 값들로부터 상대적인 성능을 비교하기는 어려우나, 정성적인 평가를 할 때 1차 모드의 경우 3% 내외의 감쇠비를 가지고, 2차 모드의 경우 1% 내외의 감쇠비를 가지며, 3차 모드의 경우에는 1.5% 정도의 모드감쇠비를 가지고 있음을 알 수 있다. 역시

표 2. 가속도계에 따른 고유주파수 추정 결과 (Case I)

	1차 모드		2차 모드		3차 모드	
	평균(Hz)	COV (%)	평균 (Hz)	COV (%)	평균 (Hz)	COV (%)
ICP형	1.078	0.725	3.360	0.186	5.993	0.382
FBG형	1.077	0.591	3.360	0.258	5.992	0.339
MEMS형	1.076	1.195	3.351	0.145	5.822 (5.902)	2.549 (0.983)

주: ( )안의 값은 3번째와 5번째 세트에서 구한 값을 제외한 값들의 평균 및 COV임

표 3. 가속도계에 따른 모드감쇠비 추정 결과(감쇠비%, Case I)

	1차 모드		2차 모드		3차 모드	
	평균	COV(%)	평균	COV(%)	평균	COV(%)
ICP형	2.96	55.6	0.94	62.5	1.37	28.5
FBG형	3.08	54.9	0.72	30.5	1.34	29.5
MEMS형	2.98	40.3	0.93	43.9	2.78 (1.93)	72.8 (45.4)

주: ( )안의 값은 3번째와 5번째 세트에서 구한 값을 제외한 값들의 평균 및 COV임

표 4. 실험 및 초기해석모델을 이용하여 구한 고유주파수의 비교 (고유주파수 Hz, Case I)

모드	계산값	실험에 의하여 추정된 고유주파수(Hz)		
		ICP형 가속도계	FBG형 가속도계	MEMS형 가속도계
1	1.435	1.078 (33.1)	1.077 (33.2)	1.076 (33.4)
2	4.250	3.360 (26.5)	3.360 (26.4)	3.351 (26.8)
3	6.642	5.993 (10.8)	5.992 (10.8)	5.822 (14.0)

\*: ( )안의 값은 실험값과 개선후 고유주파수 사이의 오차(%)

표 5. 층간 강성의 수정결과

$\Delta\alpha$	압전형	FBG	MEMS
1 (3층)	-0.158	-0.158	-0.187
2 (2층)	-0.336	-0.336	-0.336
3 (1층)	-0.487	-0.487	-0.489

이 경우에도 MEMS 센서에 의한 3차 모드의 모드감쇠비 추정결과가 다른 가속도계에 의한 추정결과보다 상대적으로 큰 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 민감도법에 의한 모델 개선 결과

실험구조물의 해석모델을 3층 전단빌딩으로 단순화하고, 각

층의 질량 및 기둥의 강성을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있으며, 이로부터 계산된 계산된 고유주파수와 실험으로부터 구한 고유주파수 사이에는 표 4에서 볼 수 있듯이 10~30%의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 전단 빌딩 모형에서 층간 강성을 구할 때 알루미늄 판의 양단을 고정단으로 고려할 때의 강성계산식을 이용하였기 때문이며, 실제 볼트로 접합되어 있는 부분에서 어느 정도의 구속이 해제된 상태를 강성을 조절해 줌으로써 고려할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 이러한 차이를 줄이기 위하여, 민감도법(Wang 등 2001)을 이용하여 해석모델의 층간 강성을 수정하였다(표 5). 층간 강성의 변화량  $\Delta\alpha$ 는 ICP형 가속도계와 FBG형 가속도계로부터 구한 값은 소수점 셋째자리까지 일치하였고, MEMS형 가속도계로부터 구한 값은 3층에 대하여 24%의 차이를 보였다. 강성행렬의 변화량  $\Delta\alpha$ 를 적용하여 강성을 감소시킨 후 다시 고유주파수를 구하면, 표 6과 같고, 개선후의 고유주파수는 실험값과 모두 1% 미만의 상대오차를 가지고 있다.

### 3.4 추가질량을 이용한 모델 개선 결과의 검증

실험모드해석 결과를 이용하여 층간 강성을 조절한 후 이를 Case II와 Case III에 대한 수치해석모델의 강성으로 사용하여 이로부터 고유주파수를 계산하여 그 결과를 Case II

표 6. 개선된 모델에서의 고유주파수의 비교

모드	ICP형 가속도계		FBG형 가속도계		MEMS형 가속도계	
	실험값(Hz)	개선후(Hz)	실험값(Hz)	개선후(Hz)	실험값(Hz)	개선후(Hz)
1	1.078	1.078(0.004)*	1.077	1.077(0.004)	1.076	1.076(0.002)
2	3.360	3.360(0.001)	3.360	3.360(0.001)	3.351	3.351(0.001)
3	5.993	5.993(0.000)	5.992	5.992(0.001)	5.822	5.902(1.346)

\*: ( )안의 값은 실험값과 개선후 고유주파수 사이의 오차(%)

표 7. Case II에 대한 초기모델과 개선된 모델을 사용하였을 경우에 대한 고유주파수(Hz)의 비교

모드	ICP형 가속도계			FBG형 가속도계			MEMS형 가속도계		
	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)
1	1.001	1.382 (-38.1)	1.030 (2.9)	1.006	1.382 (-37.4)	1.030 (2.4)	1.003	1.382 (-37.8)	1.028 (2.5)
2	2.850	3.637 (-27.6)	2.889 (1.4)	2.848	3.637 (-27.7)	2.889 (1.4)	2.837	3.637 (-28.2)	2.882 (1.6)
3	5.925	6.599 (-11.4)	5.974 (0.8)	5.915	6.599 (-11.6)	5.974 (1.0)	6.117	6.599 (-7.9)	5.881 (-3.9)

\*: ( )안의 값은 실험값과 개선후 고유주파수 사이의 오차(%)

표 8. Case III에 대한 초기모델과 개선된 모델을 사용하였을 경우에 대한 고유주파수(Hz)의 비교

모드	일반형 가속도계			FBG형 가속도계			MEMS형 가속도계		
	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)	실험값	초기모델 (상대오차)	개선모델 (상대오차)
1	0.891	1.299 (-45.8)	0.958 (7.5)	0.892	1.299 (-45.6)	0.958 (7.3)	0.888	1.299 (-46.2)	0.955 (7.6)
2	2.436	3.124 (-28.3)	2.504 (2.8)	2.435	3.124 (-28.3)	2.504 (2.8)	2.430	3.124 (-28.5)	2.499 (2.8)
3	5.967	6.575 (-10.2)	5.963 (-0.1)	5.965	6.575 (-10.2)	5.963 (0.0)	6.006	6.575 (-9.5)	5.869 (-2.3)

\*: ( )안의 값은 실험값과 개선후 고유주파수 사이의 오차(%)

와 Case III에 대한 실험모드해석결과와 비교하였다. 표 7과 8은 각각 Case II와 Case III에 대한 초기 모델과 개선된 모델에서 구한 고유주파수와 실험값과의 차이이다. Case II의 경우, MEMS 가속도계로부터 구한 세 번째 고유 주파수 값의 오차 외에는 모두 고유주파수의 차이가 3% 미만으로 일치하였고, Case III에 대해서는 Case II의 경우보다 상대적으로 큰 오차가 발생함을 알 수 있다. 즉, Case I에 대한 실험모드해석결과를 이용하여 모델을 개선한 결과를 이용하여, Case II에 적용하였을 때 실험값과의 상대오차가 10~40%에서 0.8~4% 정도로 감소되었으며, Case III의 경우에도 10~45%의 오차가 0~8%로 감소되었음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 시설물의 유지관리 및 안전성 확보를 위하여 많은 관심을 받고 있는 스마트 센서들 가운데 진동계측에 있어 매우 중요한 스마트 가속도계에 대한 현재의 기술 수준 및 스마트 가속도계의 성능평가를 위한 실내실험 결과를 제시하였다. 스마트 가속도계로는 광섬유 FBG형 가속도계와 MEMS형 가속도계를 사용하였으며, 기준으로 사용할 기존 가속도계로는 ICP형 가속도계 가운데 저주파수 영역에서 민감도와 신뢰성이 높은 가속도계를 사용하였다. 이들 가속도계를 3층 전단빌딩모형에 적용하여, 소형 진동대 실험을 수행하였고, 계측된 가속도 신호를 이용하여 시간영역 모드 해석기법인 추계론적 부공간 규명기법을 이용하여 구조물의 고유주파수, 모드형상 및 모드감쇠비를 추정하였으며, 추정된 모드해석 결과를 이용하여 계측자료의 신뢰성을 확인하였다. 우선 파형만을 비교할 때 FBG형 가속도계가 일반 ICP형 가속도계에 좀 더 일치하였으며, 또한 일반 ICP형 가속도계와 FBG형 가속도계는 안정된 모드를 정확하게 구분해 낼 수 있는 반면, MEMS형 가속도계는 3차 모드가 분리되어 추정오차가 있음을 알 수 있었다. 현재 사용된 FBG형 가속도계는 기존의 ICP형 가속도계를 대체할 수 있을 정도의 성능을 가지고 있음을 알 수 있었다.

또한 실험모드해석 결과를 이용하여 3층 전단빌딩 구조물의 층간 강성을 민감도법을 이용하여 실험모드해석에 의한 고유주파수와 해석모델로부터 구한 고유주파수가 일치될 수 있도록 하였으며, 그 결과를 검증하기 위하여 3층 전단빌딩

에 기지의 질량을 추가하여 시스템을 변화시킨 후 실험을 반복 수행하여 질량이 추가된 시스템의 고유주파수 및 모드형상이 개선된 해석모델에 해당 질량을 추가하여 구한 값들과 일치함을 보였다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 스마트사회기반시설연구센터의 연구비 지원 및 2004년도 과학기술부 기초과학연구사업 연구비 지원으로 이루어졌으며, 저자들은 이에 감사드립니다. 또한, (주)ICES와 (주)도남시스템, 미국 MicronOptics사로부터의 기술지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Analog Devices Inc. (2005) <http://www.analog.com/>  
 Fiberpro Inc. <http://www.fiberpro.com/>  
 ICES(주), <http://www.ices.co.kr/>  
 MicronOptics Inc. <http://www.micronoptics.com/>  
 PCB Piezotronics Inc. <http://www.pcb.com/>  
 Tokyo Sokushin Co. Ltd. <http://www.to-soku.co.jp/>  
 Acar, C. and Shkel, A.M. (2003) Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 634-645.  
 Li, H.-N., Li, D.-S., and Song, G.-B. (2004) Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*. Vol. 26, pp. 1647-1657.  
 Mita, A. and Yokoi, I. (2000) Fiber bragg grating accelerometer for structural health monitoring. *Proceedings of the Sixth International Conference on Motion and Vibration Control*, Sydney, Australia, pp. 631-636.  
 Na, W.-B. and Kundu, T. (2002) A combination of PZT and EMAT transducers for interface inspection. *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 111, No. 5, Part 1, pp. 2128-2139.  
 Peeters, B. and De Roeck, G. (1999) Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 13, No. 6, pp. 855-878.  
 Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H., and Yao, Z.H. (2001) Structural damage identification using static test data and changes in frequencies. *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 610-621.

(접수일: 2005.9.13/심사일: 2006.3.6/심사완료일: 2006.4.22)