

SWMAS의 성능 검증을 위한 구조물의 동특성 분석

Identifying Dynamic Characteristics of Structures to Estimate
the Performance of a Smart Wireless MA System

허 광 희*

이 우 상**

신 재 철***

Heo, Gwang-Hee

Lee, Woo-Sang

Shin, Jae-Chul

Abstract

In this paper, a smart wireless MEMS-based accelerometer(MA) system has been designed and experimented for smart monitoring system of civil structures. Various performance and experimental tests have been carried out to evaluate whether this system is suitable for monitoring system of civil structures. First, we examined its sensitivity, resolution, and noise, specifically to evaluate the performance of the smart wireless MA system. The results of experiments enabled us to estimate performance of the MA in SWMAS in comparison to the value of data sheet from MA. Second, characteristics of model structure were analyzed by the ambient vibration test based on the NExT combined with ERA. Finally, this analysis was compared to the one that was made by FE results, and the comparison proved that a smart wireless MA system was fitted in smart monitoring system effectively.

요 지

본 논문에서는 토목구조물의 스마트 모니터링 시스템을 위한 MEMS 형식의 가속도 센서를 부착한 스마트 무선 센서 장치를 설계하고 제작하였다. 그리고 다양한 성능 실험을 통하여 장치의 성능을 평가하였다. 첫째 장치에 부착한 가속도 센서의 민감도와 분해능, 잡음을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 실험의 결과는 센서의 데이터 쉬트의 값과 비교하여 센서의 성능을 평가 하였다. 두 번째로는 무선 센서 장치를 이용하여 상시 가진을 받는 모형구조물의 동특성을 NExT와 ERA 알고리즘을 사용하여 분석하였다. 이와 같이 분석된 동적 특성은 유한요소 해석 결과와 상호 비교하여 그 유용성을 입증하였고, 스마트 모니터링 시스템에 무선 센서 장치가 효과적으로 적용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Keywords : Smart Monitoring System, MEMS-based accelerometer(MA), NExT, ERA, MAC

핵심 용어 : 스마트 모니터링 시스템, 자연가진 기법, 성능실험, 무선 센서 시스템, 동특성분석

* 정회원, 건양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail: heo@konyang.ac.kr, 041-730-5392

•본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근에 고층 빌딩과 장대교량과 같은 대형 토목구조물이 증가함에 따라 구조물 상시 시스템(Structural Health Monitoring System: SHM)의 역할이 중요하게 되었다. 그러나 효과적인 SHM을 설계하는데 있어서는 많은 기술들을 필요로 한다. 특히, 구조물 손상 식별(Damage Identification) 기법과 데이터 획득 및 전송 기술들은 가장 중요하고 기본적인 요소들이다. 구조물의 장시간 유지관리를 위한 모니터링 시스템은 주로 동적 파라미터(고유주파수, 감쇠계수, 모드형상 등)의 변화를 이용하고 있다(Ewins, 2000). 이러한 시스템은 구조물을 가진시키기 위한 인위적인 가진력을 구조물에 발생시켜야하고, 이로 인한 많은 문제점으로 인해 조건부에 근거한 건전도 모니터링에 그치고 있다. 이러한 문제들을 해결하고 구조물의 건전도를 모니터링하기 위한 다양한 연구들이 보고 되고 있다(Doebing et al, 1996). 이 중에 많은 연구자들에 의해 자연가진 기법(NExT and ERA)이 연구되었으며, 특히, Farrar와 Caicedo 등은 실 구조물을 대상으로 실험한 결과 자연가진 기법이 토목구조물의 건전도를 모니터링하는데 효과적임을 입증하였다(James, 1993; Juang, 1985; Pappa, 1988). 따라서 본 연구에서는 적용 구조물의 동적특성을 분석하기 위하여 자연가진 기법을 사용하였다. SHM의 설계에 있어서 또 하나 중요한 요소는 데이터 획득 시스템에 관한 것이다. 오늘날 대부분의 모니터링 시스템에서는 유선에 의한 계측 시스템을 사용하고 있다. 그러나 이러한 유선 계측 시스템은 높은 초기 설치비용이 필요하고 계측 시스템의 변경과 추가에 있어서 많은 비용과 시간이 문제점으로 지적되고 있다(Straser, 1998). 그러므로 최근에는 많은 연구자들이 무선 센서 시스템에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 무선 센서 시스템은 모니터링 시스템의 비용 절감과 편리한 유지관리 때문에 유선에 기반을 둔 모니터링 시스템의 대안으로 제시되고 있다. 유선을 무선으로 전환하는 이론은 1996년 Straser가 처음으로 제안하였다. 그가 제안한 시스템은 구조물에 부착된 센서로부터 획득한 신호를 무선 모뎀을 이용하여 단순히 데이터 로거(logger)에

준 실 시간으로 전송하는 시스템이다(Spencer, 2003). 그의 연구 후에, 많은 연구자들에 의하여 무선 센서 시스템은 발전하게 되었다. 이러한 연구자들의 노력으로 실시간 데이터 획득이 가능하게 되었다. 그리고 각각의 무선 센서 장치 내에서 간단한 데이터 처리가 가능하게 되었다. 이와 같은 발전은 MEMS와 같은 다양한 센서 기술의 개발과 전자, 통신 기술의 도움으로 가능하였다(Lynch, 2000).

2002년에, Lynch등은 고성능의 마이크로컨트롤러(AT90S8515)와 MEMS형식의 가속도계(ADX1210)등을 이용하여 WiMMS(Wireless Modular Monitoring Systems)를 개발하였다. 이 시스템은 실시간 데이터 전송과 장치 내에서의 데이터 처리 기능, 데이터 저장 기능을 가지고 있다. Lynch(2003)은 이 시스템을 이용하여 강제 진동을 받는 모형구조물(Five-story structure)과 실 교량(Alamosa Canyon Bridge)의 FRF(Frequency Response Function)를 획득하는 실험을 통하여 무선 센서 시스템을 구조물의 모니터링에 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 최근에는 Spencer와 Kurata(2004)이 버클리 대학에서 상업용으로 개발 중에 있는 "MICA mote"을 이용하여 토목구조물의 위험(risk) 모니터링 실험을 실시하였다. 실험 결과, MICA mote는 그들의 의도한 목적에 적합한 성능을 보여 주었다.

하지만, 이들의 연구는 상시 가진이 아닌 강제 진동에 의한 것이다. 무선 센서 시스템을 토목 구조물의 모니터링에 효과적으로 적용하기 위해서는 상시 가진 상황에서의 동특성 분석 성능이 요구된다. 또한 이들 무선 센서 시스템들의 성능 실험은 대부분 실내 실험을 통한 것으로 실 구조물을 통한 성능 검증이 필요하다. 기존에 개발된 무선 센서 장치가 현장의 실 구조물의 모니터링 시스템에 적용되기 위해서는 센서의 민감도 성능의 개선과 무선 모뎀의 충분한 통신거리를 확보해야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 토목 구조물의 모니터링 시스템에 적합한 새로운 스마트 무선 센서 시스템(Smart Wireless MEMS-based on Accelerometer System: SWMAS)을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. SWMAS은 마이크로컨트롤러

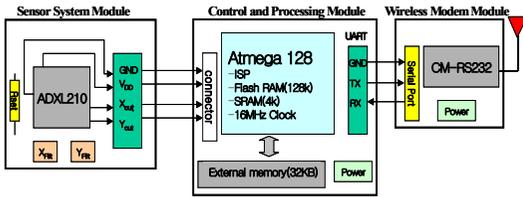


Fig. 1 SWMAS의 구성도

와 MEMS기반의 가속도계, 무선 모뎀, 외부 메모리를 사용하여 설계하고 제작하였다. 제작된 SWMAS의 센서 성능을 검증하기 위하여 민감도와 분해능, 잡음의 영향 실험을 실시하였다. 또한 SWMAS을 이용하여 상시 가진을 받는 캔틸레버 보의 동적 응답을 측정하여 동적특성 분석을 실시하였다. 알고리즘은 NEXt와 ERA를 사용하였다.

2. SWMAS의 설계

SWMAS을 실시간 모니터링 시스템에 적용하기 위하여 고성능의 무선 모뎀과 마이크로컨트롤러를 사용하여 설계하였다. 본 시스템은 센서 시스템 모듈과 제어 및 처리 모듈, 무선 모뎀 모듈로 구성하였다. 그리고 각각의 모듈들의 제어와 운영을 위하여 임베디드 프로그램을 개발하였다.

2.1 센서 시스템 모듈

본 연구에서는 가속도 센서로 MEMS(Micro-Electro Mechanical System)에 기반을 둔 Analog Devices사의 ADXL210을 사용하였다. MEMS는 미소전기기계 시스템으로 저가 고성능, 초소형 초경량의 반도체 직접 회로의 장점을 지닌 센서 및 응용시스템이다. ADXL210은 완벽한 2축(X,Y)의 가속도신호를 디지털 형식의 Duty Cycle 신호로 출력한다. 그러므로 ADXL210은 마이크로컨트롤러에 별도의 A/D(Analog to Digital) 변환기를 통하지 않고 직접 연결하여 사용할 수 있는 장점이 있다. Table 1은 ADXL210의 일반적인 성능을 보여준다. ADXL210의 대역폭(Bandwidth)은 X_{FILT} 와 Y_{FILT} 단자에 연결된 캐패시터(Capacitor)의 용량에 의하여 조절할 수 있으며, Fig. 2에서의 펄스의 길

Table 1 ADXL210의 성능 요약

PARAMETER	ADXL210
Measurement Range	$\pm 10g$
Sensitivity (Duty Cycle per g)	100mV/g (4%/g)
Bandwidth	0~50Hz
Operating Voltage	5V
Operating current	0.6~1.0 mA

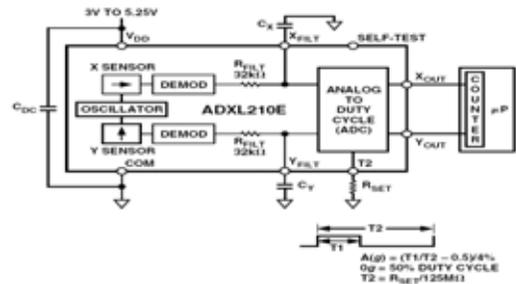


Fig. 2 FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM(ADXL210)

이 T2의 조절은 Rset단자에 연결되는 저항소자의 용량에 의하여 조절한다(Analog Devices, 1999).

2.2 제어 및 처리 모듈

SWMAS에서 마이크로컨트롤러 모듈의 역할은 대단히 중요하다. 왜냐하면, 이 모듈은 전체적인 시스템을 제어하는 역할을 수행한다. 이 기능은 센서 보드 모듈에서 계측된 데이터 수집과 샘플링 율과 획득시간, 획득방법을 조절하고, 데이터를 무선 모뎀 모듈에 전송하는 것이다. 이와 같은 기능은 마이크로컨트롤러에 내장된 플래쉬(Flash) 메모리에 덤프된 프로그램에 의해 이루어진다. 본 연구에서 사용한 마이크로컨트롤러는 Atmel사의 Atmega128이다. Atmega128은 총 128Kbytes의 플래시 메모리와 4000개의 명령어를 제공한다. 프로그램 실행에서 생성되거나 필요한 데이터는 마이크로컨트롤러의 4Kbyte 용량의 데이터 메모리(SRAM)에 저장된다(ATMEL Inc). 그러나 효과적인 임베디드 시스템을 구현하기에는 자체적으로 제공되는 데이터 메모리에 한계가 있었다. 그러므로 본 연구

Table 2 CM-RS232의 성능 요약

Modem Feature	Specification
Frequency Range	433.92MHz
Maximum Range (Open field)	200m
Output Power (standby/operate)	0.25/10mW
Interface	RS232
Power supply/Current	9Vdc/100mA
Serial Rate	9600~57600bps

에서는 데이터 메모리의 한계를 극복하기 위하여 32K byte용량의 외부 메모리를 모듈에 장착하였다.

2.3 무선 모듈 모듈

본 연구에서 설계한 무선 모듈 모듈은 계속한 데이터를 최종적으로 데이터 로거에 무선으로 전송하는 역할을 수행한다. SWMAS가 실 구조물에 효과적으로 적용되기 위해서는 충분한 통신거리와 실시간으로 데이터 전송이 가능한 통신 속도를 갖는 무선 모듈이 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 이 모듈을 전력 소모에 비하여 출력이 높고, 통신 속도가 빠른 모듈을 이용하여 설계하였다. 본 설계에서는 CM-RS232모듈을 사용하였다. CM-RS232모듈은 Table 2에서 보는 바와 같이 데이터 전송속도가 57600bps이고 최대 출력 10mW으로 송수신 거리는 약 200m정도이다. 작동 전압은 9V이고 RS232 통신포트를 이용하여 마이크로컨트롤러의 UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)에 연결하였다.

3. SWMAS의 성능 실험

3.1 성능 설계

무선 센서 장치가 구조물의 모니터링 시스템에 사용되기 위해서는 분해능(resolution), 대역폭(bandwidth), 획득 시간(frame time)과 같은 기본적으로 요구되는 성능을 만족시켜야한다. 이러한 요구조건은 무선 센서 시스템을 설계하는데 있어서 가속도계의 대역폭이나

마이크로컨트롤러의 클럭(clock) 속도, T2의 주기를 결정하는데 도움을 준다. 가속도계의 대역폭 설정은 측정되어지는 분해능을 결정한다. 필터링(filtering)은 잡음 층(noise floor)의 감소와 가속도계의 분해능 개선을 위하여 필요하다. 가속도계의 분해능은 X_{FILT} , Y_{FILT} 의 아날로그 필터 대역폭과 마이크로컨트롤러의 Timer/Counter의 속도, T2의 길이에 의하여 결정된다. ADXL210의 Duty cycle 변환기는 가속도계의 분해능보다 더 높은 14bit의 분해능을 가진다. 그러나 실질적인 가속도 신호의 대역폭은 Duty cycle을 해독(decode)하기 위해 사용되는 카운팅 장치에 의하여 결정된다. 가속도계의 분해능이 X_{FILT} , Y_{FILT} 에 의하여 설정된 상태에서도 마이크로컨트롤러의 카운터 클럭을 빨리하면 할수록, 분해능은 향상이 되며, T2의 주기를 작게 설정할 수 있다. 본 설계에서는 가속도 센서의 성능을 X_{FILT} 와 Y_{FILT} 에 0.10F, Rset에는 1.25MHz으로 설정을 하여 샘플링 주기를 10msec, 즉 샘플링 율을 100Hz, 대역폭은 50Hz을 갖도록 설계하였다. 또한 분해능은 4.3mg_{ms}로 설계하였다.

3.2 센서 성능 실험

본 실험의 목적은 마이크로컨트롤러와 무선모듈으로 구성된 센서장치가 가속도계의 본래의 성능을 충분히 발휘 하는지를 검토하기 위한 것이다. 무선 센서 시스템에 부착된 가속도계의 민감도와 분해능을 실험결과 값과 Data sheet의 값을 비교하여 성능을 평가 하였다. ADXL210 가속도계는 기울기 센서를 포함하고 있다. 즉, 지면과 수평으로 가속도 센서를 위치시키면 0g와 같고, 지면과 수직이 되면 +1g, 이 상태에서 180회전을 시키면 -1g가 된다. 이와 같은 ADXL210 가속도계의 특성을 이용하면 가속도계의 민감도와 분해능을 쉽게 구할 수가 있다.

또한, 정상 상태(steady state)의 시간이력 가속도 신호를 획득하여 잡음의 분포경향을 분석하였다. 0g일 때의 가속도 신호를 실시간으로 100Hz의 샘플링 율로 20초 동안 획득하여 실험하였다. Fig. 3과 Table 3에서 나타내는 바와 같이 본 연구에서 설계한 무선 센서 시스템의 가속도계의 민감도는 실험 결과, 4.49%/g,

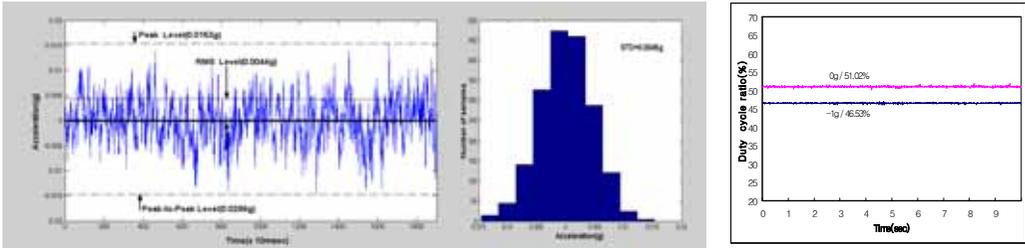


Fig. 3 가속도계의 성능 실험 결과(분해능과 민감도)

Table 3 실험 결과 값과 Data sheet 값과의 비교

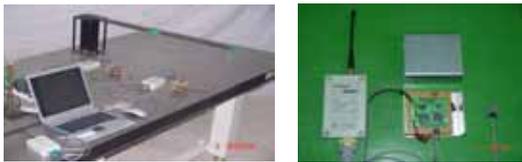
	Resolution (RMS)	Peak-to-Peak Noise	Sensitivity
Test	4.4mg	18.0mg	4.49%/g
Data sheet	4.3mg	17.2mg	4.0±0.8%/g

분해능은 4.4mg_{rms}로 Data sheet의 민감도 4.0±0.8%/g, 분해능 4.3mg_{rms}과 비교해볼 때, 거의 일치함을 보였다.

4. 시스템의 성능 평가 실험

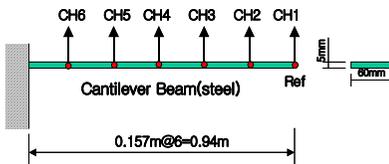
4.1 실험장비

본 연구에서는 해석 및 측정, 그리고 분석이 용이하고, 구조물의 주축 방향의 휨 모드에 의해 구조물의



(a) 실험 장비 구성

(b) SWMAS



(c) 측정 위치

Fig. 4 측정 위치 및 실험 장비

전체적인 거동 특성이 결정되도록 캔틸레버 보를 제작하였다.

이와 같은 캔틸레버 보를 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 SWMAS가 토목구조물의 실시간 모니터링에 적용 가능한지를 평가하기 위하여 상시 가진에 의한 동특성 분석을 실시하였다. 캔틸레버 보의 구조용 강재를 이용하여 제작되었으며, Fig. 4(c)에 나타난 것과 같이, 모형 구조물의 총 길이는 0.94m으로 제작되었다. 보의 폭과 두께는 6cm와 0.5cm로 하여 휨 방향의 동적 응답이 주축 방향으로 발생하는 동적 응답에 영향을 받지 않도록 하였다.

4.2 자유진동 실험

SWMAS의 데이터 획득방법에는 실시간 모드(Real Time Mode)와 준 실시간 모드(Near Real Time Mode)가 있다. 준 실시간 모드는 데이터의 획득이 완료되고 메모리에 저장이 되면, 센서 장치는 데이터 로거에 축적된 데이터를 송신하게 된다. 준 실시간 시스템에서는 센서장치의 메모리용량에 따라 한번에 획득할 수 있는 데이터 프레임의 크기가 제한된다. 그러나 샘플링 율에는 거의 제한이 없다. SWMAS는 32Kbyte 용량의 외부메모리를 장착하여 준 실시간 모드에서의 프레임 크기의 제한을 개선하였다. SWMAS를 실시간 시스템으로 사용하기 위해서는 데이터를 전송하는데 걸리는 시간들을 모두 고려하여 최적의 샘플링 율과 한번에 전송하는 데이터 량을 결정하여 프로그램을 하여야 한다. 본 연구에서 제안한 무선 센서 시스템의 최대 실시간 샘플링 율은 일대일 통신인 경우 100Hz으로 나타났다. 만약 100Hz이상의 데이터 샘플링

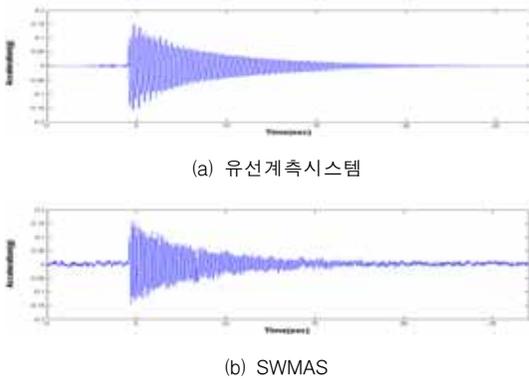


Fig. 5 자유진동 실험 결과

플링 울에 의하여 데이터를 획득할 경우에는 데이터가 전송 중에 손실될 수도 있다. 본 연구에서는 SWMAS의 성능을 조사하기 위하여 자유진동 상태에서 캔틸레버 보의 가속도 신호를 획득하는 실험을 실시하였다. 자유진동 실험은 Fig. 4(c)의 캔틸레버 보의 끝단에 SWMAS과 유선 계측 시스템(HP-VXI)에 연결된 상용 가속도계(Dytran 3134D)를 설치하여 실행하였다. Fig. 5는 실험을 통하여 캔틸레버 보의 끝단에서 SWMAS와 Dytran 3134D로 획득한 데이터를 보여주고 있다. SWMAS에 의한 데이터 획득은 실시간 모드에서 100Hz 샘플링 율로 총 30초 동안 이루어졌다. 실험 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이, SWMAS에 의해 획득된 응답은 기준 가속도계로 측정된 응답과 상당히 우수한 일치치를 보였다.

4.3 동특성 분석 실험

본 실험에서는 SWMAS의 성능을 평가하기 위하여 NExt와 ERA를 이용하여 상시 진동으로부터 구조물의 동적특성을 분석하였다. 준 실시간 모드로 설정된 SWMAS을 이용하여 총 6개의 계측 점에서 캔틸레버 보에서 발생하는 출력 신호를 약 10sec동안 1024개의 데이터를 10회 평균하여 획득 하였으며, 참조(reference) 채널은 보의 끝단인 CH1로 설정하였다. 데이터의 분석은 DAIMOND(Modal Analysis Software Package Developed at Los Alamos National Lab)을 이용하였다. Fig. 6은 이와 같이 분석된 교차 파워

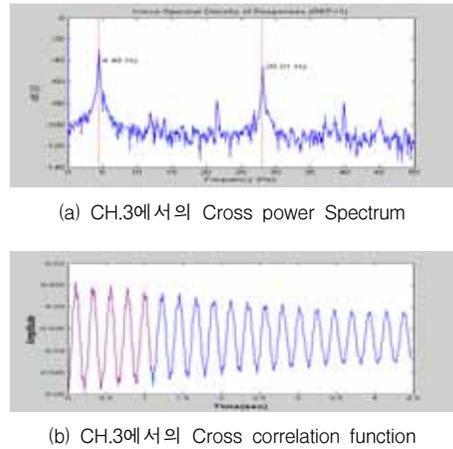


Fig. 6 CH. 3에서 획득한 데이터의 교차 파워 스펙트럼과 상호 상관 함수

Table 4 고유 진동수의 비교

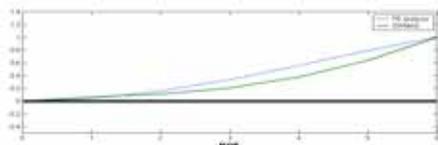
Method	1 st mode(Hz)	2 nd mode(Hz)
Analytical	4.700	29.470
Experimental	4.482	28.002
error(%)	4.64	4.98

스펙트럼(Cross power Spectrum)으로부터 상호 상관 함수(cross correlation function)로 변환된 대표적인 신호처리 결과를 나타낸 것이다. 본 구조물의 응답의 처음 두개의 모드들은 4.482Hz,와 28.002Hz으로 Fig. 6(a)에서 쉽게 식별할 수 있다. 또한 본 실험의 결과는 Table 4에서와 같이 FE 모델에 의한 수치적인 계산 값과 비교하기 하였다. FE 해석은 범용 프로그램인 IDEAS을 이용하여 6개의 보(beam) 요소로 모델링 하였다. Table 4에서 보는 바와 같이, 실험에 의해 분석된 구조물의 고유진동수는 수치적으로 계산된 값과 5%이내에서 일치함을 보였다.

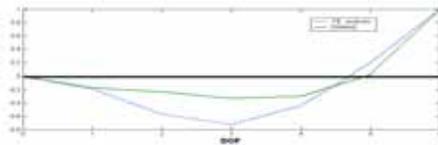
Fig. 7은 실험에 의하여 추출한 캔틸레버 보의 모드 형상을 해석에 의해 구한 결과와 같이 나타낸 것이다. 이와 같이 두 가지 방법에 의해 획득한 모드 형상의 상관관계를 수치적으로 분석하기 위하여 MAC(Modal Assurance Criterion)을 이용하였다. Ewins등의 연구 결과에 의하면 MAC의 지표 값이 0.9이상이면 상관관계가 우수하다고 판단하게 된다. 그렇지만, 상관

Table 5 MAC 분석 결과

Experimental	Analytical	1st mode	2nd mode
	1st mode		0.9752
2nd mode		0.1897	0.8747



(a) 1st mode shape



(b) 2nd mode shape

Fig. 7 모드 형상의 비교

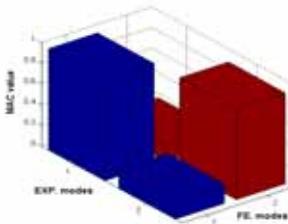


Fig. 8 MAC plot

관계 지표가 절점(계측 점)의 수에 많은 영향을 받기 때문에 실험 등과 같이 계측 점의 수에 제약을 받게 되는 경우에는 0.8까지도 허용하고 있다. 다음의 Table 5과 Fig. 8은 캔틸레버 보의 실험에 의해 획득한 모드와 해석에 의해 획득한 모드 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 1차 모드의 상관관계는 지표가 0.9752로 상당히 높게 나타났으며, 2차 모드의 상관관계 지표는 0.8747로 양호한 값을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 MEMS 형식의 가속도 센서와 AVR

마이크로컨트롤러, 무선 모뎀을 사용하여 토목 구조물의 스마트 모니터링 시스템에 적용하기 위한 새로운 무선 센서 시스템인 SWMAS를 개발하였다. 그리고 SWMAS의 성능 특성을 평가하기 위하여 다양한 검증 실험을 실시하였다. 첫 째로, SWMAS의 센서 성능을 평가하기 위한 센서 성능 실험을 실시하였다. 두 번째로는 SWMAS의 전체적인 성능을 평가하기 위한 실시간 자유진동 데이터 획득 실험과 준 실시간에 서의 상시 진동시험을 실시하였다. 센서 성능 평가 실험 결과, SWMAS의 센서 민감도는 4.49%/g, 분해능은 4.4mg_{rms}로 나타나 data sheet의 값, 4.00±8%/g와 4.3mg_{rms}들과 거의 일치함을 보였다. 또한 자유진동 실험 결과 획득한 데이터는 유선계측 시스템으로부터 획득한 데이터와의 비교에서도 우수한 결과를 얻었다. 상시 가진 실험에 의한 캔틸레버 보의 고유진동 분석에서도 FE 고유치해석에 해석된 값과 약 5%이내에서 일치함을 보였다. 그리고 구조물의 모드 형상 또한 우수한 상관관계를 얻을 수 있었다. 이상의 결과들로부터, 본 연구에서 개발된 SWMAS을 이용한 구조물의 동특성 분석이 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 연구되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국과학재단(과제번호 : R01-2005-000-10423-0(2005))에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. Ewins, D. J., Modal Testing : Practice and Application, R. S. P., 200.
2. Doebbling S. W., Farrar C. R., Prome, M. B. and Shevitz, D. W. (1996), "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS.
3. James III G. H., Came T. G., Lauffer J. P. (1993), "The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind

- Turbines," Sandia Report, SAND92-1666. UC-261.
4. Juang J. N., Pappa R. S. (1985), "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction," J. Guidance, vol 8, No. 3, p.620~627.
 5. Pappa R. S., Juang J. N. (1988), "Some Experiences with the Eigensystem Realization Algorithm," Journal of Sound and Vibration, p.30~34.
 6. Straser, E. G., Kiremidjian, A. S., Meng, T. H., and Redlfsen, L. (1998) Modular, wireless network platform for monitoring structures, Proceeding of the International Modal analysis Conference-IMAC, pp.450-456.
 7. Spencer, B. F., (2003) Opportunities and Challenges for smart sensing Technology. First International Conference on structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan.
 8. Straser, E. G., and Kiremidjian, A. S., (1998) A modular wireless damage monitoring system for structures. Report No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
 9. Lynch, J. P., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S. and Carryer, Ed., (2003) Design of a Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with a Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring, Journal of Aerospace Engineering, ASCE, 16(3), 108-114.
 10. Lynch, J. P., Law, K. H., Straser, E. G., Kiremidjian, A. S., and Kenny, T. W., (2000) The Development of a Wireless Modular Health Monitoring System for Civil Structures, Proceedings of the MCEER Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies (MEDAT-2) Workshop, Las Vegas, NV, USA, November 30-31.
 11. Kurata, N., Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M., Miyamoto, Y., Sako, Y., (2003), A Study on Building Risk Monitoring Using Wireless Sensor Network MICA-Mote, Proceedings of First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure. Tokyo, Japan.
 12. Analog Devices, Inc., "ADXL202/ADXL210:Low Cost 2g/10g Dual Axis iMEMS Accelerometers with Digital output data Sheet." Analog Devices, Inc., Norwood, MA 1999.
 13. ATMEL Inc., "Atmega128 data sheet." ATMEL Inc.

(접수일자 : 2005년 6월 15일)