

교량 모니터링을 위한 스마트 무선 계측 시스템 개발

Development of Smart Wireless Measurement System for Monitoring of Bridges

허 광 희¹⁾ 이 우 상^{2)*} 이 진 옥³⁾ 전 준 용⁴⁾ 손 동 진⁵⁾
Heo, Gwang Hee Lee, Woo Sang Lee, Chin Ok Jeon, Joon Ryong Sohn, Dong Jin

Abstract

In this paper, a research was performed to develop a wireless measurement system for bridge monitoring using MEMS sensor and bluetooth wireless communication module. First, in order to prove the suitability of MEMS sensor for the bridge measurement, its ranges of measuring acceleration and of frequency response were experimented. Also, the quality of wireless communication was tested by an experiment on long-distance communication for the knowledge of maximum communication distance, and also by an experiment on the data transmit-receive capability both inside and outside of a steel box bridge. Later, placing the wireless acceleration sensor system that had been developed in our lab on a bridge in public service, we acquired vibration data from the bridge under traffic load and analyzed its dynamic characteristics in realtime. For the analysis of the data, NEXt & ERA algorithm were employed. The result of analysis was compared to the FE analysis of the same bridge, and the comparison made it possible to evaluate the performance of wireless acceleration sensor system. As a result, it was proven that the wireless acceleration sensor system developed with the use of MEMS sensor and bluetooth wireless communication module could be effectively applied to the measurement of structure whose vibration feature was low frequency like a bridge.

Keywords : Monitoring, Wireless sensor system, MEMS sensor, Bluetooth communication, NEXt & ERA

1. 서론

현재 운용 중에 있는 상시 모니터링 시스템의 높은 초기 설치비용과 유지관리비용은 중소 규모 교량들에게 모니터링 시스템의 보급을 어렵게 만드는 가장 큰 요소이다(Bergbreiter et. al, 2003). 이러한 이유로 저비용 모니터링시스템에 대한 필요성이 전 세계적으로 요구되었고, 그 해결 방안으로 무선 데이터 통신(wireless data communication), 저가(low cost), 저전력(low power), 지능화(Intelligence)가 가능한 스마트 센서 장치에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Spencer, 2003). 유선에 기반을 둔 모니터링시스템의 높은 비용을 낮추기 위한 방안으로 유선을 무선으로 대체하는 주장이 Straser et. al(1998)에 의하여 처음으로 제안된 이후, Lynch et. al(2001)이 지속적인 연구를 통해 WiMMS (Wireless

Modular Monitoring System)를 개발하여 무선으로 데이터 획득하여 구조물의 동특성을 분석하는 실험을 성공적으로 수행하였다. Maser et. al(1997)은 교량의 상태와 성능을 원격 감시하기 위한 무선 전역적 교량 평가 및 감시 시스템(Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System)을 제안하였으며, Mitchell et. al(1999)은 스마트 구조물의 상시 감시를 위한 무선 데이터 획득 시스템을 연구 발표하였다. Agre et. al(1999)은 센서 장치와 양방향 통신 또는 P2P 통신을 지원하는 AWAIRS(Adaptive Wireless Arrays for Interactive Reconnaissance, Surveillance, and Target Aquisition in Small Unit Operation)라는 무선 센서 장치 시제품을 발표하였다. Kurata et. al(2003)은 MICA mote를 개선하여 2층 모형구조물을 이용한 자유진동 실험과 모니터링 실험을 실시하여 진폭이 작은 진동

1) 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수
2) 정회원, 스마트제어계측 이사, 공학박사
3) 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
4) 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정
5) 학생회원, 건양대학교 건설시스템공학과 석사과정

* Corresponding author : s_lws@daum.net 010-7751-0731
• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

에서는 구조물의 응답 검출에는 MICA의 성능이 문제가 되지만, 구조물이 붕괴가 될 정도의 위험 상황에서는 충분히 구조물의 손상 징후를 파악할 수 있는 응답을 획득할 수 있다는 결과를 발표하였다.

무선 계측 장치에 대한 연구 초기에는 현실적이지 못한 이상적인 개념으로만 여겨졌으나 센서, 무선통신, MEMS(Micro Electro-Mechanical System), 그리고 정보·전자기술들의 빠른 기술적 향상은 무선 계측 장치에 대한 연구를 점점 현실적으로 가능하게 하였다. 뿐만 아니라, 오늘날의 전자기술의 발전으로 인한 저가·소형·고성능의 CPU는 무선 센서 장치에 지능화를 가능하게 하였다. 이러한 무선 센서 장치의 지능화는 단순히 계측 데이터를 무선으로 송신하는 초기의 연구범위에서 센서 장치를 지능화하여 스마트 무선 센서 장치의 개발을 위한 연구로 범위를 확대시켰다. 또한 지능화된 센서 장치는 모니터링시스템에서 획득되어지는 막대한 양의 데이터들을 효율적으로 분산 처리하기 위한 데이터 처리기능을 비롯해, 자가진단(self-diagnosis), 자가 보정(self-calibration), 데이터 저장 및 센서 장치의 제어 기능 등을 내장 할 수 있어 분산화 된 모니터링시스템 구성을 가능케 하였다.

본 논문에서는 MEMS 센서와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 교량 모니터링을 위한 무선 계측 시스템 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 MEMS 센서의 가속도 측정 범위 및 주파수 응답 범위 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하여 교량 계측에 적합성 여부를 판단하였다. 또한, 무선 통신 품질을 검증하기 위한 실험으로서 최대 통신 거리 측정을 위한 원거리 통신 실험과 현장에서의 통신 성능 검증을 위해 강 상자형 교량 내·외부에서의 데이터 송수신 시험을 수행하였다. 마지막으로 개발된 무선 가속도 센서 시스템을 공용중인 교량에 설치한 후, 교통하중에 의한 진동데이터를 획득하여 교량의 동특성을 실시간 분석하였다. 이때, 데이터 분석은 NExT(Natural Excitation Technique) & ERA(Eigensystem Realization Algorithm) 알고리즘을 사용하였으며, 분석결과는 대상교량의 FE 해석결과와 비교를 통해 무선 가속도 센서 시스템의 성능을 평가하였다.

2. 무선 가속도 계측 시스템

2.1 시스템 구성

본 무선 가속도 로거 장치는 블루투스 통신 모듈과

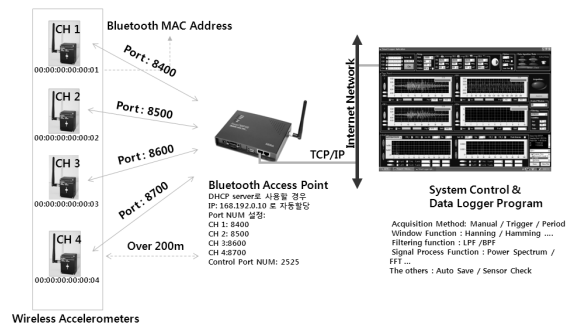


Fig. 1 Configuration of the Wireless Measurement System

MEMS형 가속도 센서를 이용하여 제작한 4개의 무선 센서 장치들과 블루투스 송수신 장치, 데이터 획득 및 분석 프로그램으로 구성하였다. 데이터 획득은 4개의 센서 장치로부터 동시에 가능하며, 데이터 저장은 PC에 있는 데이터 취득 프로그램을 통해 가능하다. 센서 장치와 블루투스 송수신 장치 센서 장치 사이의 데이터 송수신 방법은 2.4GHz 블루투스 통신방식 시리얼 통신을 사용하고, 블루투스 송수신 장치와 PC의 데이터 송수신은 LAN 케이블에 의한 TCP/IP 방식을 사용하였다. 센서장치의 구분은 블루투스 송수신 장치에 설정된 블루투스 통신 모듈의 MAC 주소로 할당되는 Port 번호에 의해 구분된다. 데이터 획득 관련 제어는 PC 프로그램에서 설정한 후 무선 통신을 통하여 센서 장치에 전달하는 방식으로 획득데이터의 개수 및 샘플링 율(sampling rate)을 설정할 수 있다. 데이터 획득 방식은 직접적인 방식과 트리거 방식, 주기적인 자동 획득 방식을 선택하여 사용할 수 있다. 획득된 데이터 처리는 PC 로거 프로그램에서 데이터 획득과 동시에 수행이 가능하다. 데이터 처리 알고리즘으로는 저주파 통과 필터(LPF)와 대역 통과 필터(BPF)가 내장되어 있다. 또한, 데이터 분석 기능으로는 FFT, 교차 파워 스펙트럼, 교차 상관 함수 등을 이용하여 데이터를 분석하여 저장할 수 있도록 개발하였다. Fig. 1는 본 연구에서 개발한 무선 가속도 계측 시스템의 기본 구성도를 나타낸 것이다.

기본 무선계측시스템을 이용하여 Fig. 2와 같이 채널 확장 및 원격 측정이 가능한 시스템으로 구축할 수 있다.

2.2 무선 센서 장치

가속도 센서는 다양한 성능 특성을 가진 여러 종류의 센서가 존재한다. 이 중에서 구조물의 모니터링에 주로 사용되는 가속도 센서는 측정 가능한 주파수 범위가 넓고 선형

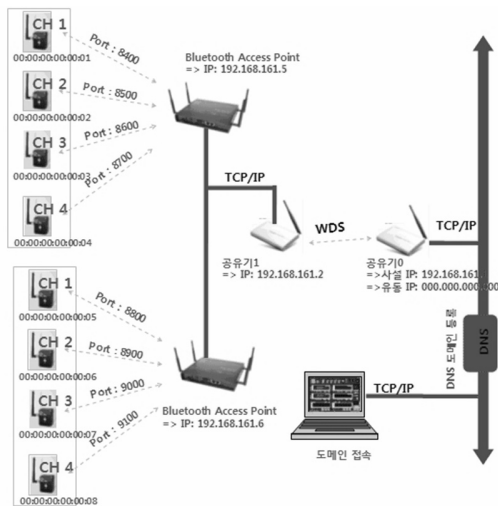


Fig. 2 Configuration of Remote Network System



Sensor Property	Value
Measurement Range	$\pm 1.2g$
Sensitivity	1000mV/g
Bandwidth	50Hz
RMS Resolution	1.0mg
Operating Voltage	5V

Fig. 3 MEMS Sensor(ADXL203)

성이 우수한 서보형(servo-type) 또는 압전형(piezoelectric type) 가속도 센서이다. 그러나 압전형 가속도 센서는 기계적 변환시스템을 사용하여 제조됨으로 고가이며 크기를 소형화하는 데는 한계가 있어 무선 센서 장치와 같은 저전력과 저가의 특성을 가진 장치에는 부적합하다. 반면, MEMS의 장점으로는 반도체 제작 공정을 이용하므로 초소형으로 제작 할 수 있으며, 일괄 공정에 의한 대량생산이 가능하여 가격 및 소비 전력을 크게 낮출 수 있다는 것이다(Lynch et. al, 2003). 이러한 MEMS 기술로 만들어지는 반도체 가속도 센서의 원리는 탄성 빔에 지지된 질량이 인가되는 가속도에 비례하여 변위가 변하는 구조로 되어 있으며, 변위량을 정전용량으로 변환하여 가속도를 측정한다. 그러므로 본 연구에서는 무선 센서 장치에 다양한 MEMS형 가속도 센서 중에서 측정 범위와 민감도, 분해능, 측정 주파수 대역, 크기등의 성능이 교량 모니터링에 적합하다고 판단된 Fig. 3와 같은 Analog Device 사의 ADXL302 가속도 센서를 내장하였다.

ADXL 가속도 센서는 MEMS 기술을 바탕으로 개발된 반도체 정전용량형(Capacitive) 가속도 센서로써 저가이며 초소형(5mm×5mm×2mm)의 저 가속도(Low g) 측정용 센서이다. Fig. 4은 무선 통신 주파수에 따른

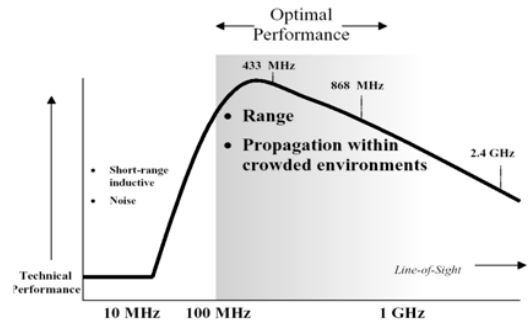


Fig. 4 Performance of Wireless Communication with RF Frequency

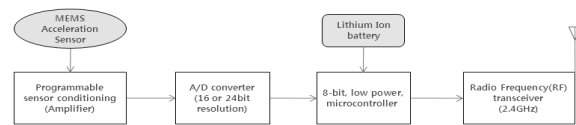


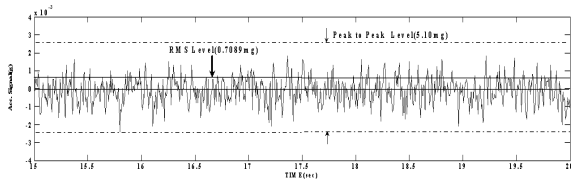
Fig. 5 The Composition of Wireless Acceleration Unit

- Resolution : 16Bit
- Sampling Rate : 150~800Hz
- Programmable LPF : Possibility
- Memory : 32Kbyte
- Range : up to 1.2km
- Size : 52x74x49 mm
- Power saving : Wake/Sleep
- Internal Sensor : Accelerometer (X-Y)
- Measurement Accuracy : 1.0mg
- Accelerometer Range : + 1.2g
- Battery Life : 10hr

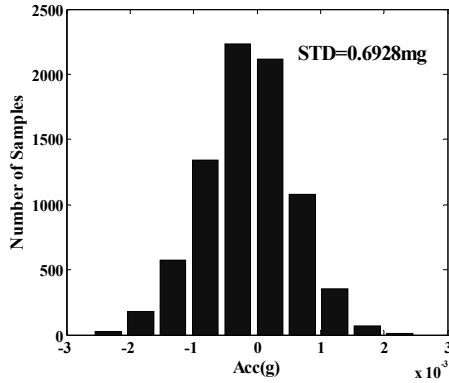


Fig. 6 The Prototype and Specifications of Wireless Acceleration Unit

통신 성능을 보여주는 그래프이다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 통신 성능이 우수한 대역은 900MHz 대역이다. 그러나 국내에서는 국내 무선 법규상 900MHz 대역은 음성전송 및 RFID용으로만 허가되어 센서 장치에는 사용이 불가하다. 400MHz 대역은 통신 전파 영역이 넓어 데이터 송수신 성능이 좋으나, 통신 속도가 낮아 빠른 데이터 전송 속도가 요구되는 가속도 센서 장치로는 부적합하다. 2.4GHz 대역 무선 통신은 전파의 직진성이 우수하여 통신 속도가 우수하나 장애물에 취약하다는 단점이 있다. 2.4GHz 대역의 무선 통신 방식에는 블루투스 방식과 지그비(Zigbee) 방식이 대표적이다. 블루투스는 일정 용량의 데이터(음성, 파일 등) 전송 용도에 적합한 반면, 지그비는 저용량의 데이터로 네트워크상의 기기를 통합·제어하는 용도에 적합하다. 그러므로 본 연구에서는 대용량의 가속도 센서 데이터 송수신에 적합한 블루투스 통신방법을 적용하였다. 무선 센서 장치는 Fig. 5와 같이 2축 MEMS형 가속도 센서와 16Bit A/D 컨버터, 8bit 마이크



(a) Time History Plot of Acquired Data



(b) Histogram of Acquired Data

Fig. 7 Result of Analysis of acquired data at 200Hz

로컨트롤러, 블루투스 통신모듈, Li-ion 충전모듈로 구성하였다. Fig. 6는 본 연구를 통하여 개발한 무선 가속도 센서 장치의 시제품 사진과 일반적인 성능 사양을 정리하여 나타낸 것이다.

3. 데이터 분석 실험

3.1 센서 성능 분석

무선 센서 장치의 획득 데이터의 품질을 평가하기 위한 실험으로, 무선 센서 장치의 샘플링 변화에 따른 획득 데이터의 실질적인 분해능인 RMS 값과 Peak to Peak 값, 표준 편차 값을 분석하였다. 실험 방법은 센서 장치를 정상 상태(steady state)로 설치한 후, 샘플링 율을 50Hz~800Hz 까지 변경하여 20초간 데이터를 각각 획득한 후, Fig. 7와 같이 시간이력 그래프와 히스토그램을 이용하여 분석하였다. 샘플링 주파수에 따른 획득 데이터 품질의 변화는 무선 센서 장치에 사용한 MEMS 센서와 A/D컨버터, CPU의 자체적인 성능 특성을 종합적으로 반영하는 것으로 개발 된 무선 센서 장치의 기본적인 성능을 알 수 있는 중요한 특성값이다.

실험 결과는 Table 1에 정리하였다. 실험 결과 가속도 신호의 RMS 값과 Peak to Peak 값, 표준편차 값 모두

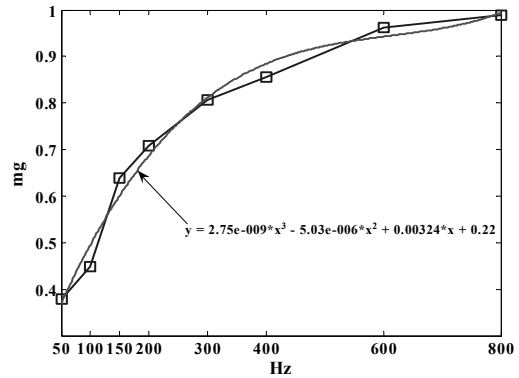


Fig. 8 Change of RMS Values with Sampling Rate

Table 1 Values of RMS, Peak to Peak, Std with Change of Sampling Rate

Sampling Rate (Hz)	Resolution RMS* (mg)	Peak-to-Peak Noise (mg)	Std** (mg)
50	0.1785	1.000	0.1770
100	0.2486	1.700	0.2446
150	0.6391	4.900	0.6285
200	0.7089	5.100	0.6928
300	0.8058	5.500	0.7925
400	0.8557	5.800	0.8501
600	0.9617	6.800	0.9578
800	0.9888	7.200	0.9824

* RMS: Root Mean Square(실효치)

** Std: Standard deviation(편준편차)

샘플링 주파수에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 샘플링 주파수가 증가 할수록 신호에 잡음성분이 많이 포함된 것으로 분석할 수 있다. Fig. 8은 샘플링 주파수와 RMS 값의 관계를 그래프로 나타낸 것으로 샘플링 주파수에 따른 RMS 값의 변화 추세가 3차 곡선과 유사함을 보이고 있다.

3.2 주파수 응답 성능 실험

가속도 센서의 중요한 특성 중의 하나가 주파수 대역에 따른 응답성능이다. 본 실험에서는 무선 센서 장치의 주파수 응답 성능을 주파수 대역에 따라 성능이 검증된 상용 가속도 센서와 비교를 통해 분석하였다. 상용 가속도 센서는 Wilcoxon Research사의 초 저주파 지진측정용 가속도 센서 모델링 731-207을 사용하였다. Model 731-207 가속도 센서는 민감도(Sensitivity)가 10.0V/g, 주파수 범위 0.2Hz~1,300Hz인 압전형(Piezoelectric) 가속도 센서이다. 실험 방법은 일정한 주파수로 가진할 수 있는 Fig. 9과 같은 Shaker에 무선 센서 장치와 유선 가속도



Fig. 9 Shaker Test

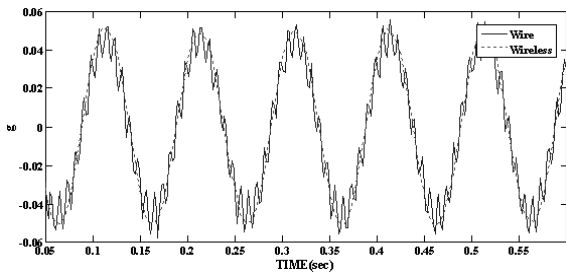


Fig. 10 Acceleration Signal plot of Acquired Data at 10Hz

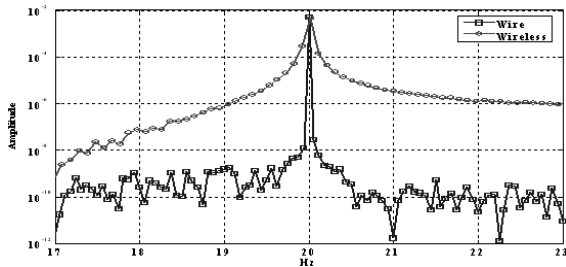


Fig. 11 The Characteristics of Distribution at Frequency Domain (20Hz)

센서를 설치한 후, Table 2에서 나타낸 바와 같이 0.5Hz~70.0Hz까지 증가하여 진동 신호를 발생하여 각각, 200Hz 샘플링으로 데이터를 획득하였다.

Fig. 10은 10Hz로 가진 시 유선과 무선으로 동시에 획득한 가속도 신호를 시간영역으로 나타낸 것이다. 무선 데이터인 경우 10Hz 정현파만 측정된 반면 유선 데이터는 10Hz의 정현파와 100Hz 이상의 실험 장소 주변에서 발생된 고주파 잡음 신호가 함께 측정된 것으로 판단된다. 또한, 무선 계측시스템의 동적 측정 성능 범위를 알아보기 위해 유/무선 계측시스템에서 측정된 데이터를 주파수 영역에서 plotting하여 비교한 결과, 무선센서의 동적 범위가 유선 가속도 센서에 비하여 적음을 확인할 수 있었다. Fig. 11는 대표적으로 20Hz로 획득한 가속도 신호

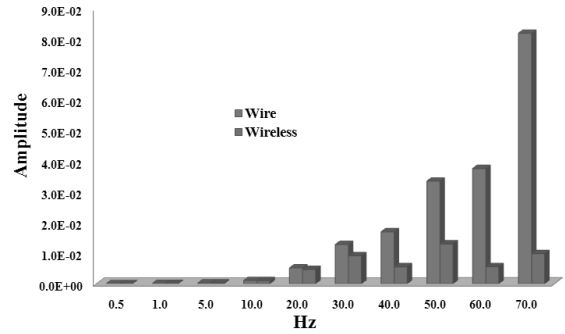


Fig. 12 Results of Frequency Response Test

Table 2 Correlation between Frequency and the Maximum Amplitude of FFT

Frequency (Hz)	Maximum Amplitude Value		Rate (A/B) (%)
	Wireless (A)	Wire (B)	
0.5	1.99E-06	6.5172E-07	305
1.0	4.44E-06	3.3598E-06	132
5.0	2.52E-04	2.2686E-04	111
10.0	1.02E-03	1.0762E-03	95
20.0	4.65E-03	5.1449E-03	90
30.0	9.13E-03	1.2795E-02	71
40.0	7.20E-03	1.6933E-02	43
50.0	1.30E-02	3.3507E-02	39
60.0	5.56E-03	3.7639E-02	15
70.0	9.82E-03	8.1872E-02	12

를 주파수 영역으로 나타낸 것이다.

또한, 획득한 데이터는 FFT 알고리즘을 이용하여 주파수 영역으로 변환하여 FFT 진폭 크기를 유선 가속도 결과값과 비교하여 분석하였다. Table 2는 실험 결과를 정리한 것이고, Fig. 12은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

분석 결과, 30Hz 이하 주파수 대역에서는 유선과 무선 가속도 센서의 성능이 거의 유사하게 나타났으나 30Hz 이상에서는 무선 가속도 센서의 성능이 현저하게 저하되었다. 이러한 결과는 최대진폭의 비율을 그래프로 나타낸 Fig. 13과 주파수 별 가속도 최대 크기 비율을 나타낸 Fig. 14에서 명확하게 알 수 있다. 두 그림에서 나타난 바와 같이 30Hz 이상에서는 무선 센서의 주파수와 가속도 측정 범위가 유선 가속도와 30%이상 차이를 보였다.

4. 데이터 송수신 실험

4.1 통신 거리 실험

무선 센서 시스템에서 데이터 송수신 거리 성능은 중요

Table 3 Rate of Data Loss with Communication Distance and Sampling Rate(%)

Sampling Rate(Hz)	150	200	300	400	600
Distance(m)					
260	0	0	0	0	0
280	0	0	0	0	0
300	7.53	0	0	0	0
320	26.98	24.98	0	0	0
340	37.54	37.54	19.41	9.04	0
360	58.50	61.29	29.86	23.36	26.98
380	71.22	75.03	51.32	37.59	37.58
400	75.47	50.05	60.36	56.79	53.86

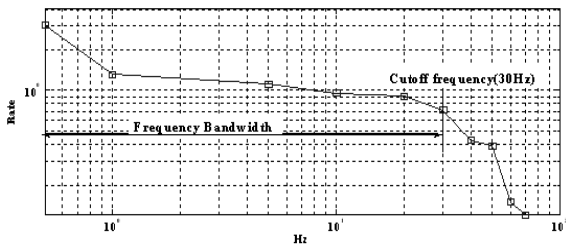


Fig. 13 Plot of Correlation between Frequency and the Rate of Maximum FFT Amplitude

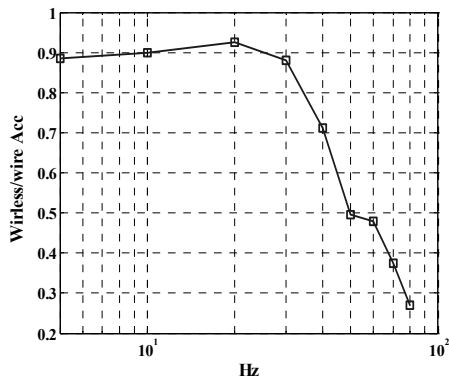


Fig. 14 Comparison between Frequency and the Rate of Maximum FFT Amplitude

한 특징 중에 하나이다. 본 실험에서는 본 연구에서 개발한 무선 센서 시스템의 송수신 거리를 센서 장치의 샘플링 율의 변화에 따라 분석하는 실험을 실시하였다. 무선 센서 장치는 부착하는 안테나의 종류와 계측 환경이 통신 거리에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 본 실험에서는 무선 센서 장치와 송수신 장치 사이에 장애물이 없는 상황에서 5dB 다이폴 안테나를 양쪽에 부착하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 Table 3과 같이 데이터 획득률로 정리하였다. 실험결과, 통신거리 280m까지는 모든 샘플링 주파수 데이터의 손실이 없었으며, 샘플링 주파수가 낮을

Table 4 Results of RF Communication Test with Sensor Location

송수신기	교량 상판	교량 하부	상자 내부
센서 장치			
교량 상판	○	○	X
교량 하부	○	○	X
상자 내부	X	X	△
비고	○ : 좋음, △ : 양호, X : 불량		









Fig. 15 The Target Bridge for Communication Test

수록 데이터 손실이 많음을 보였다. 이와 같은 결과는 블루투스 통신의 중요한 특성 중에 하나로 판단된다.

4.2 송수신 위치 시험

본 연구에서 사용한 무선 통신 모듈은 2.4GHz 대역의 블루투스 장치로 전파의 직진성은 우수한 반면 전파의 굴절 성능이 미비하여 장치 간 장애물이 있을 경우 통신이 단절되는 단점이 있다. 장기간 교량 계측 시스템 설치에 있어 교량 구조물의 특성상 센서 장치와 송수신 장치 사이에 장애물 없이 설치하기는 어렵다. 이러한 점을 확인하기 위하여 본 연구에서는 다양한 시나리오를 바탕으로 교량 구조물에 있어 통신이 원활한 위치를 판단하기 위한 실험을 실시하였다. 실험은 Fig. 15에 보인 공용중의 강상자형 교량을 대상으로 Table 4에 나타난 바와 같이 센서 장치와 송수신 장치의 위치를 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험 결과, 센서와 수신부가 교량 외부나 내부 중에 동일한 지역에 위치할 경우에는 데이터 송수신이 양호한 것으로 나타났으며, 위치가 다른 경우에는 데이터 송수신이 불가능한 것으로 확인이 되었다. 이러한 경우에는 중계기와 같은 장치를 별도로 센서와 수신기 사이에 설치하는 것이 필요하다.

Table 5 Results of Modal Analysis of the Bridge

Item	Bending Mode	Bending Mode	Bending Mode
Mode shape			
Frequency	2.0472Hz	3.6941Hz	5.1534Hz
Item	Twist Mode	Twist Mode	Bending Mode
Mode shape			
Frequency	7.5675Hz	7.6936Hz	8.2529Hz

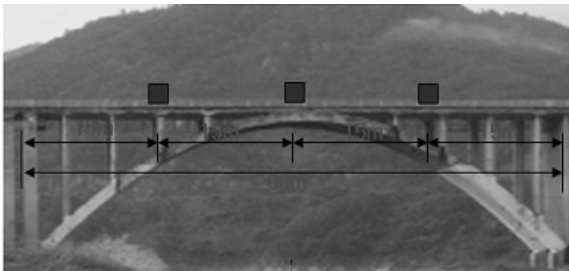


Fig. 16 The Target Bridge for Field Test

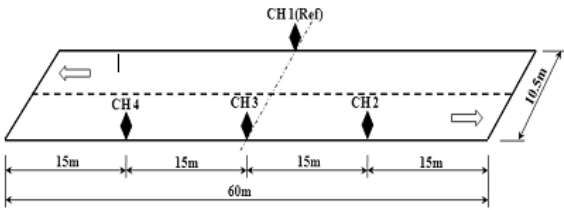
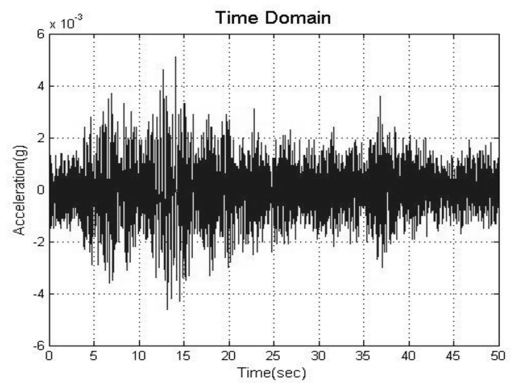


Fig. 17 Sensor Location of the Bridge

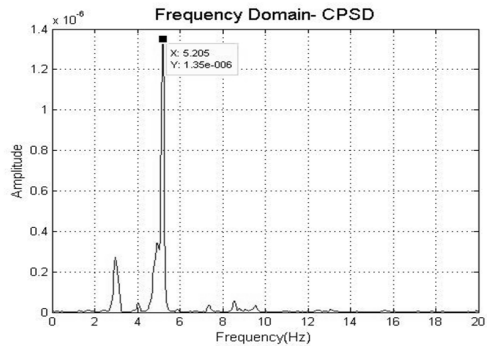
5. 현장 실험

5.1 대상 교량

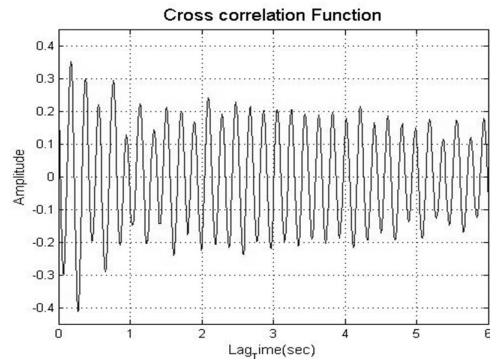
실험 대상 교량은 Fig. 16과 같이 총길이가 204m인 콘크리트 아치 교량으로 준공한 지 20년이 경과한 교량이다. 설계하중은 DB24, 최대경간은 60m, 교고 30m, 폭이 10.5m인 국도 상에 위치한 1종 교량이다. 계측 시스템 설치는 Fig. 17과 같이 60m 구간에 한 쪽에 등간격으로 3개의 센서, 반대편의 중앙에 1개의 센서, 총 4개의 가속도 센서를 설치하였다. 데이터 획득 방법은 트리거 방식으로 1mg이상 신호 측정 시, 150Hz 샘플링으로 4092개의 데이터를 27.28초 동안 4개의 채널에서 동시에 획득하였다. 실험 전, 대상교량에 대한 대략적인 모달(Modal) 해석을 실시한 결과 Table 5와 같은 결과를 얻었다.



(a) Time history data



(b) Cross Power Spectrum Density



(c) Cross Correlation Function

Fig. 18 Typical time domain Data, CPSD and CCF Data

Table 6 The Results of Natural Frequency of the Bridge Structure

Item	1st Bending	2nd Bending	3rd Bending	4th Bending
FE Analysis	2.047Hz	5.153Hz	8.253Hz	9.353Hz
NExT & ERA	2.167Hz	5.187Hz	8.885Hz	9.639Hz
Error (%)	5.9%	0.7%	7.6%	3.1%

5.2 데이터 분석

획득한 데이터 분석은 상시 가진 응답만을 가지고 구조물의 동특성을 추정하는 NExT & ERA 알고리즘을 사용하였다. NExT & ERA 알고리즘은 각 측정점의 시계열 데이터의 상호상관함수들에 대한 스펙트럼을 Singular Value Decomposition(SVD)의 기법을 이용하여 분해하는 과정을 통해 고유진동수를 추출하는 방법이다(James, et. al, 1993). Fig. 18은 계측된 데이터를 NExT 모듈을 이용하여 교차 파워 스펙트럼(CPS)과 이를 역 푸리에 변환하여 상호 상관 함수(CCF)로 변환된 대표적인 신호처리 결과를 나타낸 것이고, 획득 데이터 분석, 실험 구조물의 수직방향 휨모드(Bending Mode) 고유진동수 추출 결과를 FE 해석결과와 비교하여 Table 6에 정리하였다.

비교 결과, 고유진동수가 분석가능한 주파수 범위 내에서 모드 차수에 따른 고유진동수 변화 추세는 상당히 일치함을 보이고 있다. 그러나 FE 해석결과보다 계측 분석 결과가 7.6%~ 0.7% 오차 범위에서 크게 분석되었다. 이는 FE 해석 시, 대상구조물 모델링과정에서 기인한 오차가 주요 원인이라 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 MEMS센서와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 교량 모니터링을 위한 무선 계측 시스템 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저, MEMS센서의 가속도 측정 범위 및 주파수 응답 범위 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였고, 교량 계측에 적합성 여부를 판단하였다. 다음으로는 개발된 무선 가속도 센서 시스템을 공용중인 교량에 설치한 후, 교통하중에 의한 진동데이터를 획득하여 교량의 동특성을 실시간 분석하였다. 이때 분석결과는 대상교량의 FE 해석결과와 비교를 통하여 무선 가속도 센서 시스템의 성능을 평가하였다. 이상의 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험 결과, 개발된 스마트 무선 센서 시스템은 고성능의 압전형 가속도 센서에 비하여 동적 범위와 측정 주파수 범위 성능은 낮으나, 30Hz 미만의 저주파수 대역 측정에는 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 또한, 개발된 스마트 무선 센서 시스템의 최대 통신 거리 측정 결과, 약 280m 범위까지 신뢰성 있는 통신 거리의 확보가 가능함을 확인하였다.
- 3) 종국적으로, MEMS센서와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 개발한 무선 가속도 센서는 교량과 같은 저주파수 진동특성을 갖는 건설구조물의 계측에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 2008년도 및 2010년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2010-0027626, 과제번호: 2010-0024250)의 일부 연구비 지원으로 수행되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. Agre, J. R., Clare, L. P., Pottie, G. J. and Romanov, N. P. "Development Platform for Self-organizing Wireless Sensor Networks", Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Orlando, Vol.3713, Apr.8-Apr.9, 1999.
2. Bergbreiter, S. and Pister, K. S. J., "CotsBots: An Off-the-shelf Platform for Distributed Robotics", Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, October, 2003.
3. James III, G. H., Carne, T. G. and Lauffer, J. P., "The Natural Excitation Technique(NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines", SAND92-1666, UC-261, 1993.
4. Kurata, N., Spencer Jr, B. F., Ruiz-Sandoval, M., Miyamoto, Y. and Sako, Y., "A Study on Building Risk Monitoring Using Wireless Sensor Network MICA-Mote", First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, November 13-15, 2003.
5. Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Kenny, T. W., Carryer, E. and Partridge, A., "The Design of a Wireless Sensing Unit for Structural Health Monitoring", 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA. pp.1041-1050, 2001.
6. Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W.,

-
- Kiremidjian, A. S. and Carryer, E., "Design of a Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with a Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring", Journal of Aerospace Engineering, ASCE, 16(3), pp.108-114, 2003.
7. Maser, K., Egri, R., Lichtenstein, A. and Chase, S., "Development of a Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System(WGBEMS)", Proceedings of the Specialty Conference on Infrastructure Condition Assessment: Art, Science, Practice, pp.91-100, 1997.
8. Mitchell, K., Sans, S., Balakrishnan, V.S., Rao, V. and Pottinger, H. J., "Micro Sensors for Health Monitoring of Smart Structures", SPIE Conference on Smart Electronics and MEMS, 3673 : 351-358, 1999.
9. Spencer Jr., B. F., "Opportunities and Challenges for Smart Sensing Technology", First International Conference on structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, 2003.
10. Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S., "A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures," The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No.128, 1998.
- (접수일자 : 2010년 5월 6일)
(수정일자 : 2010년 12월 28일)
(심사완료일자 : 2011년 1월 20일)

요 지

본 논문에서는 MEMS 센서와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 교량 모니터링을 위한 무선 계측 시스템 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 MEMS 센서의 가속도 측정 범위 및 주파수 응답 범위 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하여 교량 계측에 적합성 여부를 판단하였다. 실험 결과, 고성능의 압전형 가속도 센서에 비하여 동적 범위와 측정 주파수 범위의 성능은 낮으나 30Hz 미만의 저주파수 대역 측정에는 무리가 없을 것으로 판단한다. 그리고 최대 통신 거리 측정 결과, 280m 정도의 성능을 가지고 있음을 확인하였다. 마지막으로 개발된 무선 가속도 센서 시스템을 공용중인 교량에 설치한 후, 교통하중에 의한 진동데이터를 획득하여 교량의 동특성을 실시간 분석하였다. 분석결과는 대상교량의 FE 해석결과와 비교를 통하여 무선 가속도 센서 시스템의 성능을 평가하였다. 실험 결과, MEMS 센서와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 개발한 무선 가속도 센서는 교량과 같은 저주파수 진동특성을 갖는 건설구조물의 계측에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 모니터링, 스마트 무선 센서 시스템, MEMS 센서, 블루투스 통신, NEXt & ERA
