

스마트 센서 기술을 이용한 구조물 건전도 모니터링 시스템 Part 1 : 스마트 센서의 개발과 성능평가

Structural Health Monitoring System Employing Smart Sensor Technology
Part 1: Development and Performance Test of Smart Sensor

허 광 희* 이 우 상** 김 만 구***
Heo, Gwang Hee Lee, Woo Sang Kim, Man Goo

Abstract

In this study, a smart sensor unit is developed by using the smart sensor technology that is being rapidly developed in recent years for structural health monitoring system, and its performance is evaluated through various experiments, and also, damage detection experiment is performed on a model structure. This paper as the first half of this study contains the development and performance evaluation of the smart sensor. In the latter half of this study, structure damage detection experiment is performed for the application of verified smart sensor unit into structural health monitoring, and it is compared with a wire measurement system. The smart sensor is developed by using high-power wireless modem, MEMS Sensor and AVR microcontroller, and an embedded program is also developed for the control and operation of the sensor unit. To verify the performance of the smart sensor, many experiments are performed for sensitivity and resolution analysis tests, data acquisition by using cantilever beam and shaker, and on-site application using actual bridge. As a result, the smart sensor proves to be satisfactory in its performance.

요 지

본 연구에서는 구조물의 모니터링 시스템을 위하여 최근에 급속하게 발전하는 스마트 센서 기술을 이용하여 스마트 센서 장치를 개발하였고 다양한 실험을 통하여 개발한 스마트 센서의 기본적 성능 평가와 모형 구조물을 이용한 손상 검출 실험을 실시하였다. 본 논문은 Part 1로써 스마트 센서의 개발과 성능 평가에 관한 것이고 Part 2에서는 스마트 센서를 이용한 손상 검출 결과를 유선 계측 시스템을 이용한 실험결과와 비교하였다. 스마트 센서는 고 출력의 무선 모듈과 고 성능 MEMS 센서, AVR 마이크로컨트롤러를 이용하여 개발하였으며 센서의 제어와 운영을 위한 임베디드 프로그램을 개발하였다. 스마트 센서의 성능을 검증하기 위하여 민감도와 분해능 분석 실험과 캔틸레버 보와 가진기를 이용한 데이터 획득 실험, 실 구조물을 이용한 현장 적용 실험을 실시하였다. 실험 결과, 개발한 스마트 센서의 성능에 대한 만족스런 결과를 얻었다.

Keywords : Smart sensor technology, Structural health monitoring, Damage detection

핵심 용어 : 건전도 모니터링 시스템(SHM), 스마트 센서, 손상검출알고리즘

* 정희원, 건양대학교 토목공학과 교수,

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 Post-Doc,

*** 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정.

E-mail : heo@konyang.ac.kr 041-730-5302

•본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

스마트 센서 기술은 최근 몇 년간 급속하게 발전하였으며 4가지의 중요한 특징을 가지고 있다. 첫 째는 센서 자체에 CPU 내장, 둘째는 장치의 소형화, 셋째는 데이터의 무선 전송, 마지막으로는 저가(Low-cost)라는 특징이 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 특징들 중에서 무선 통신은 스마트 센서 기술이 처음으로 건설 구조물의 계측에 사용된 이유이다. Straser(1996)는 처음으로 유선 계측 시스템의 케이블 작업으로 인한 높은 초기 설치비용과 유지관리 비용을 줄이기 위한 방법으로 무선 통신에 의한 계측 시스템을 제안하였다.⁽²⁾ 이와 같은 연구를 바탕으로 1999년 캘리포니아 대학과 록웰과학센터(Rockwell Science Center)에서 공동으로 개발한 AWAIRS-I와 미주리 대학의 Rolla 시스템이 개발되었다.⁽³⁾ 2002년에는 Lynch등에 의하여 다양한 스마트 센서 기술들인 마이크로프로세서와 MEMS 센서, 무선 모듈로 구성된 WiMMS(Wireless Modular Monitoring System)가 개발되었다.⁽⁴⁾ 이외에도 최근에는 센서들 간의 무선 네트워크 구성이 가능하고 전력 소모가 적고, 소형인 차세대 스마트 센서 시스템에 대한 연구가 진행되고 있는데 대표적인 시스템이 버클리 대학의 MICA Mote 시스템이다.⁽⁵⁾

그리고 이와 같이 개발된 스마트 센서를 토목 구조물의 계측에 적용하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Lynch등(2003)은 WiMMS를 이용하여 콘크리트 슬래브 교량의 동특성 획득을 위한 계측 실험을 실시하여 유선 계측 시스템의 결과와 비교하여 스마트 센서가 토목 구조물의 계측에 사용될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 각각의 센서에 내장된 CPU를 활용하여 독립적인 데이터 획득과 처리가 가능함을 보였다.⁽⁶⁾

Shinozuka등(2004)은 UCI에서 개발한 DuraNode를 이용하여 강 트러스 육교의 동특성을 분석하고 다양한 종류의 MEMS 센서의 성능 비교를 실시하여 MEMS 센서를 구조물의 모니터링에 활용이 가능함을 제시하였다.⁽⁷⁾ Kurata(2003) 등은 MICA Mote를 이용하여 인위적인 가진을 받는 모형 구조물의 위험 감시(Risk Monitoring)실험을 실시하였다. 실험에서

건물이 붕괴되는 극한 상황에서는 무선에 의한 데이터 송수신 방법이 유선에 의한 방법보다 더 효과적으로 위험 상황을 알려 준다는 연구 결과를 발표하였다.⁽⁵⁾ 하지만 아직까지는 기존에 개발된 스마트 센서의 짧은 통신거리와 센서의 낮은 민감도(Sensitivity)와 분해능(Resolution)등으로 인하여 실 구조물의 모니터링 시스템에 적용하는데 어려움이 있다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 고 출력의 무선 모듈과 민감도가 높은 MEMS 센서를 적용하였고 입력 신호를 증폭시켜 잡음의 영향을 최대한 감소시키는 차동 A/D 변환 방법을 이용하였으며 그 결과로 만족할 만한 성능의 스마트 센서를 개발하였다. 그리고 다양한 실험을 통하여 개발한 스마트 센서의 기본적 성능 평가와 모형 구조물을 이용한 손상 검출 실험을 실시하여 우수한 결과를 얻었다. 본 논문은 Part 1로써 스마트 센서의 개발과 성능 평가에 관한 것이다.

2. 스마트 센서 기술

스마트 센서와 일반 센서의 가장 큰 차이점은 지능화 능력의 유무이다. 그러므로 스마트 센서는 필히 CPU(Central Processing Unit)기능을 하는 소형 마이크로프로세서나 마이크로컨트롤러를 내장해야만 한다. 그리고 센서의 지능화는 마이크로컨트롤러에 내장된 프로그램에 의해 구현되는데 스마트 센서의 임베디드(Embedded) 프로그램은 데이터의 저장과 연산 기능, 의사 결정, 정보의 수집, 데이터의 송수신 기능 등을 수행하거나 제어하는 역할을 수행한다.⁽¹⁾ 또한 전력 소모의 최소화를 위하여 센서의 상태를 대기모드(Sleep Mode)와 작동 모드(Operate Mode)로 제어할 수 있는 기능을 가진다. 스마트 센서 기술 중에서도 하나 중요한 기술이 전자회로와 기계부품을 같은 칩 위에 집적(Integrate)시킬 수 있는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술이라 할 수 있다.⁽⁷⁾ 기존의 센서는 기계적 변환시스템을 사용하여 제조됨으로 가격이 비싸고 외형의 크기를 소형화 하는 데는 한계가 있었다. 그러나 MEMS 기술은 센서의 제조과정을 대량생산 체제로 변환 시켜 가격이 저렴하

고 초소형으로 전자 회로에 부착이 용이하여 스마트 센서에 적합하다. 그러므로 현재 개발 중에 있는 대부분의 스마트 센서에는 MEMS 센서를 사용하고 있으나 MEMS 센서의 단점으로는 잡음 레벨이 높고 민감도가 낮아 상시 가진 상태에서는 교량과 같은 진동 신호의 주파수와 진폭이 적은 구조물의 응답을 측정하기에는 적합하지 않았었다. 그러나 현재에 생산되는 제품은 그 성능이 많이 발전되었으며, 이러한 문제는 적합한 증폭 회로와 필터링 회로를 사용하면 충분히 개선이 가능하다. 마지막으로 스마트 센서에 사용되는 무선 모듈은 케이블 사용으로 인한 비용을 감소시키고 센서 장치 간의 통신을 가능하게 하여 센서 장치 간의 네트워크(network) 통신망을 구성할 수 있어 데이터나 센서 장치의 상태 정보를 공유할 수 있다. Table 1은 기존에 개발된 스마트 센서들에 적용된 스마트 센서 기술들을 정리한 것이다.

3. 스마트 센서의 개발

본 절에서는 주요 사회 기간 시설물을 외부의 위험 요소로부터 구조물의 안전성을 확보하기 위한 방안으로 장시간 구조물의 감시가 가능한 스마트 센서 시스템을 구성하기 위한 방법과 이러한 시스템의 구성에 적합한 알고리즘을 제시하고 있다.

3.1 개발 시스템의 구성 개요

본 논문에서는 기존에 연구 개발된 스마트 센서들의 성능을 개선하기 위하여 민감도가 높은 센서를 사용하였으며, 센서에서 출력되는 아날로그(Analog) 신호를 증폭하여 디지털 값으로 변환할 수 있도록 별도의

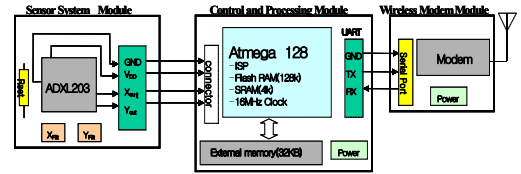


Fig. 1 스마트 센서의 구성

A/D 변환과정을 설계하였다.

본 센서는 Fig. 1과 같이 센서 시스템 모듈과 제어 및 처리 모듈, 무선 모듈로 구성하였다. 그리고 각각의 모듈들의 제어와 운영을 위하여 임베디드 프로그램을 개발하였다. 가속도 센서로는 측정 범위가 작은 대신에 민감도가 우수한 MEMS 형식의 Analog Devices사의 ADXL203 센서를 사용하였다. 또한 센서의 민감도를 높이기 위하여 A/D 변환을 차동(Differential) 입력방법으로 설계하여 입력 신호를 증폭할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 8채널 10bit 분해능의 축차비교형(successive approximation) A/D 변환기를 내장하고 있는 고성능의 AVR Atmega128 마이크로컨트롤러를 사용하였다.⁽⁸⁾ 센서 시스템 모듈의 성능은 100Hz의 샘플링 율, 50Hz의 대역폭(Bandwidth)으로 설계하였으며 실시간으로 측정이 가능하도록 무선 모듈을 설계하였다. 또한 구조물에 센서의 설치가 편리하도록 센서 시스템 모듈은 별도의 알루미늄 케이스로 제작하였다. Fig. 2는 본



Fig. 2 스마트 센서의 시제품

Table 1 스마트 센서들과 적용된 스마트 센서 기술

Smart Sensor	CPU	Sensor		Wireless Modem	
		Model	Sensitivity	Data Rate	Range
MICA	Atmega128	ADXL202	12%/g	19.2kbps	100ft
WiMMS	AT90S8515 MPC555	ADXL210	30%/g	121kbps	500ft
DuraNode	-	ADXL202 SD-2210	12%/g	-	400ft

Table 2 ADXL203 센서의 성능

Range	Sensitivity	Sensitivity Accuracy (%)	**Max Band Width (kHz)	Voltage Supply (V)	Supply Current (mA)	Temp Range(°C)
±1.7g	1000 mV/g	±6	2.5	5	0.7	-40~125°C

연구를 통하여 설계·제작된 스마트 센서의 시제품이며, Table 2는 ADXL203의 성능을 요약하여 나타낸 것이다.

3.2 스마트 센서의 S/W 구성

본 스마트 센서의 운영을 위한 임베디드 프로그램의 전체적인 구성은 Fig. 3과 같이 크게 두 부분으로 나누어 구성하였다. 첫 번째는 장치의 제어와 설정에 관한 것으로 각 모듈의 초기화 및 시스템 변수의 설정이 이 부분에 해당된다. 모듈의 초기화에는 타이머(Timer)와 인터럽터(Interrupter), USART(Universal Synchronous and Asynchronous Receiver/Transmitter), 메모리의 할당을 위한 것이 포함된다. 또한 장치의 운영에 기본적으로 필요한 값들을 시스템 변수로 설정하여 실수 형 배열로 할당하여 초기 값을 주어 마이크로컨트롤러의 메모리에 저장하도록 구성하였다. 두 번째 부분은 데이터 획득에 관한 것이다. 본 연구에서 개발한 스마트 센서는 실시간 모드(Real Time Mode)와 준 실시간 모드(Near Real Time Mode)로 데이터 획득이 가능하도록 프로그램을 설계하였다. 실시간 모드에서는 데이터의 획득과 동시에 USART을 이용하여 전송하도록 하였으며, 준 실시간 모드에서는 획득한 데이터를 할당된 메모리에 저장한 후, 필터(Filter)를 거친 데이터를 FFT를 수행하여 주파수영역 데이터를 생성하여 메모리에 저장하도록 설계하였다.

FFT(Fast Fourier Transform)은 신호 데이터를 시간영역에서 주파수 영역으로 변환하는 알고리즘이다. 구조물의 응답 신호를 주파수 영역을 통하여 분석하는 이유는 구조물의 동특성 인자들인 구조물의 주파수 성분과 구조물의 모드 벡터를 획득하기 위한 모달영역(Modal Domain)분석의 기초 자료로 활용할 수 있다. 그리고 FFT알고리즘을 이용하면 측정 데이터로부터 구조 시스템의 주파수 응답 함수(Frequency

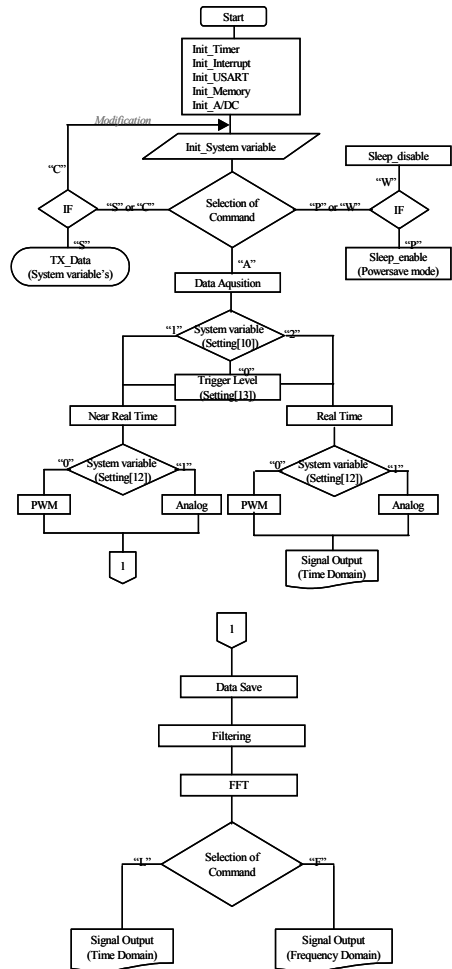


Fig. 3 임베디드 프로그램의 흐름도

Response Function: FRF)를 직접적으로 계산할 수가 있다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 스마트 센서의 임베디드 프로그램에 FFT 모듈을 Cooly-Turkey 알고리즘을 사용하여 개발하였다.

구조물의 모니터링 시스템은 계측 시스템에서 측정된 신호의 분석과 시스템 분석이 필수적이다. 신호 분석은 일반적으로 알려지지 않은 어떤 가진 입력에 의

한 시스템의 응답을 알아내고, 그것을 쉽게 이해할 수 있는 방법으로 나타내 주는 과정이다. 이러한 분석을 위해서는 신호 처리 과정을 거치게 되는데 신호처리에서 가장 중요한 주제 중의 하나는 원하지 않는 잡음으로부터 원하는 신호들을 추출하는 것이다. MEMS 센서의 단점 중의 하나가 신호의 레벨(Level)이 미약할 경우에 잡음의 영향이 상대적으로 크다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 계측된 신호의 저역통과(Low Pass)나 대역통과(band Pass)를 필터링 할 수 있는 임베디드 신호 필터링 모듈을 개발하여 내장하였다.

4. 실내 성능 실험

4.1 민감도와 분해능 실험

본 실험의 목적은 마이크로컨트롤러와 무선모뎀으로 구성된 센서장치가 가속도계의 본래의 성능을 충분히 발휘시키는지를 검토하기 위한 것이다. 첫 번째로 센서의 민감도와 분해능을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 민감도 측정은 오실로스코프(Oscilloscope)를 이용하여 0g와 1g의 정상상태(Steady State)에서 출력되는 전압 신호를 각각 측정하여 기록하였다. 분해능 실험은 마이크로컨트롤러의 A/D 변환기의 분해능인 10bit에 적합한 결과가 측정되는지를 분석하였다. 데이터의 획득은 0g일 때의 가속도 신호를 실시간으로 100Hz의 샘플링 율로 10.24초 동안 획득하여 실험하였다.

Fig. 4는 측정 결과를 나타낸 것이다. 본 스마트 센서는 0g상태에서는 2.52V의 전압을 출력하였고 1g

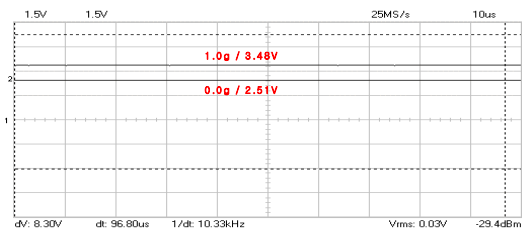


Fig. 4 전압 신호 측정 결과

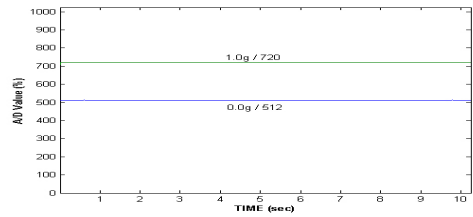


Fig. 5 A/D 변환 값의 차이

상태에서는 3.38V의 전압 신호를 출력하여 970 mV/g의 민감도를 나타내었다. 이 결과는 센서의 Datasheet의 값(1000±60mV/g)과 일치하였다. 또한 각각의 A/D 변환 값을 획득하여 스마트 센서의 분해능을 분석하였다.

본 스마트 센서의 마이크로컨트롤러의 A/D 변환기는 10bit의 분해능을 가지고 있다. 그러므로 설계 분해능은 0V~5V의 입력 신호를 10bit의 분해능으로 나눌 경우 약 233 AD값/g 이다. 그러나 실제적으로 출력되는 A/D 변환 값의 차이는 Fig. 5에서와 같이 208로 측정 되었다. 이 값을 가속도의 분해능으로 환산하면 약 4.8mg으로 이론적인 계산 값 4.3mg보다는 10% 정도 크게 분석되었다.

4.2 데이터 획득 실험

4.2.1 캔틸레버 보 실험

본 연구에서는 스마트 센서의 데이터 획득 성능을 조사하기 위하여 자유진동 상태에서 캔틸레버 보의 가속도 신호를 획득하는 실험을 실시하였다. 실험은 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 캔틸레버 보의 끝단에 스마트 센서와 유선 계측 장비에 연결된 기존의 상용

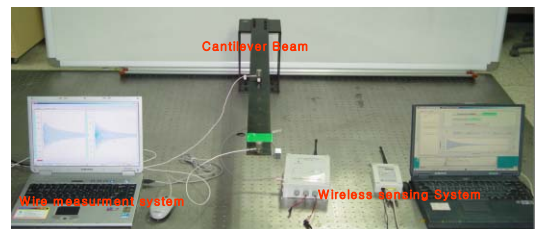


Fig. 6 캔틸레버 보 실험 장면

가속도계를 부착하여 구조물의 가속도 응답을 획득하였다. 실험에 사용한 유선 계측 장치는 HP- VXI1432 시스템을 이용하였고, MTS 사의 T-DAS를 활용하여 데이터를 획득·분석하였다. 가속도계는 감도가 500 mV/g 이며, 측정주파수의 범위는 1~3000Hz를 갖는 Dytran 모델 3134D를 사용하였다. 캔틸레버 보는 구조용 강재를 이용하여 총 길이 0.94m, 폭과 두께는 6cm와 0.5cm로 제작하였다.

데이터 획득은 준 실시간 모드에서 66.7Hz 샘플링율로 총 20초 동안 이루어 졌으며 최대 가속도는 1.0g, 최대 진폭은 2cm 상태에서 실험을 실시하였다. Fig. 7은 스마트 센서와 유선 계측 장비를 이용하여 측정된 캔틸레버 보의 가속도 응답을 시간 영역에서 나타낸 것이다.

스마트 센서에서 측정된 시간이력 데이터의 주파수 응답 함수는 장치 내의 임피던스 FFT 알고리즘을 이용하여 계산하였다. FFT는 획득한 응답 신호 중에서 2초부터 17.36초 사이의 1024개 데이터를 이용하였다. 유선 계측 장비에서 측정된 데이터의 주파수 응답 함수(FRF)는 MATLAB을 이용하였다.

구조물의 처음 두개의 고유진동수는 Fig. 8에 나타난 주파수 응답 함수로부터 분석 할 수 있었다. 스마트 센서로부터 분석된 고유진동수들은 4.07Hz, 25.651 Hz이고 유선 계측 장비로 부터 분석된 주파수성분은 4.15Hz, 25.89Hz이다. 분석된 모드들의 주파수들은 2%이내에서 일치함을 보였다.

4.2.2 가진기 실험

토목 구조물과 같은 대형 구조물의 고유진동수는 수 Hz 미만의 저 주파수 대역이 대부분이며 신호의 레벨

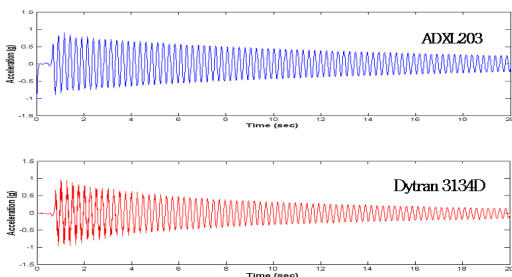


Fig. 7 캔틸레버 보에서 측정된 가속도 응답

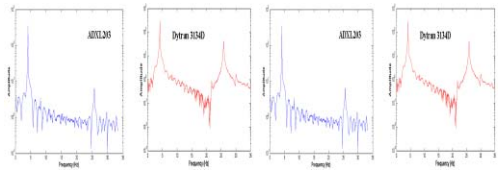


Fig. 8 가속도 응답에서 유도된 주파수 응답 함수

이 미약하여 응답을 측정하기 위해서는 민감도가 높은 센서를 사용하는 것이 일반적이다. 본 실험에서는 실 구조물에서 발생할 수 있는 미약한 응답을 측정하기 위한 실험을 실시하였다. 본 실험을 위하여 Fig. 9에서와 같이 VTS600 모델의 가진장치를 이용하여 주파수가 1.0Hz인 sin파로 진폭은 $\pm 3.0\text{mm}$, 최대 가속도는 $\pm 10\text{mg}$ 으로 진동하도록 설정하였다. 이는 실험에 사용한 가진기(Shaker)가 출력할 수 있는 최저 주파수이다. Fig. 10(a)은 자유진동 실험에서 사용한 유선 계측장비로 측정된 결과와 가진기의 진동 신호이다. Fig. 10(b)은 스마트 센서로 측정된 결과로서 유선 계측 장치의 결과와 비교하여 잡음의 영향이 있지만 가진기의 출력 파형의 특성을 정확히 나타내고 있다. 본 실험을 위하여 센서 장치의 성능을 증가하기 위한 방법으로 기존의 단극성 입력 방식에서 A/D 변환 방법을 차동(Differential) 입력방법으로 설계하여 입력 신호를 5배로 증폭할 수 있도록 회로를 구성하였다.

실험 결과, 비록 스마트 센서의 측정 결과가 가진기의 진동 특성을 나타낸다고는 하지만 유선 계측 장치의 결과에 비해서는 잡음 성분을 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

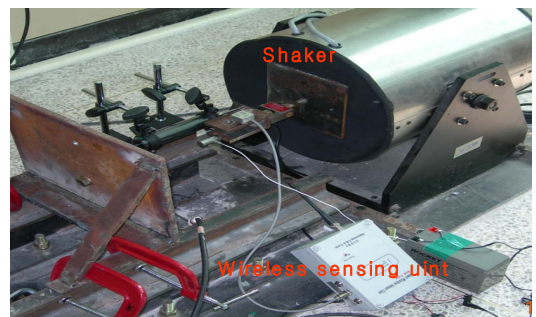
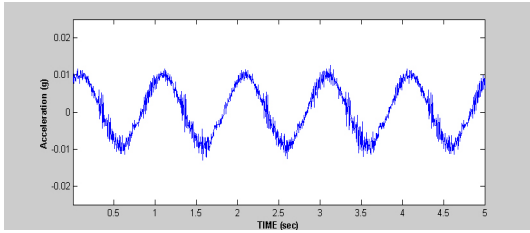
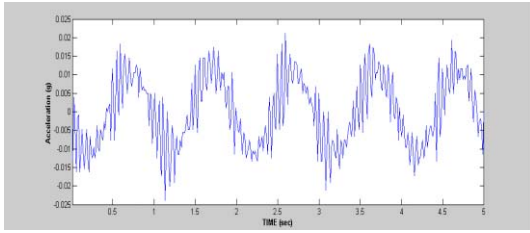


Fig. 9 가진기 실험 장면



(a) 유선 계측 장비



(b) 스마트 센서

Fig. 10 가진기 실험 결과

본 연구에서는 구조물의 응답 측정에서 포함되는 잡음 성분으로 판단되는 원치 않는 주파수 성분의 신호를 제거하기 위하여 임베디드 프로그램에 신호 필터링 모듈을 포함시켰다. Fig. 11은 스마트 센서로 획득한 Fig. 10(b)의 신호를 임베디드 신호 필터링 모듈로 필터링한 결과이다. 필터링 설정은 중심 주파수 1Hz, 대역폭 1Hz 설정하였으며 Hamming 창을 사용하였다. Fig. 12는 스마트 센서로부터 획득한 데이터를 필터링 전과 후의 주파수 영역 데이터와 적용된 Hamming 창 함수를 동시에 나타낸 그림들이다.

5. 현장 실험

실시간 구조물 모니터링 시스템에 사용되는 계측 시스템은 바람이나 지진, 교통하중으로 인한 교량의 응답을 측정하게 된다. 상시 가진에 의한 교량의 응답은 강제진동에 의한 응답에 비해 상당히 미약하여 측정하는데 어려움이 있다.

본 실험의 목적은 스마트 센서가 상시 가진 상태의 실 교량의 응답을 측정할 수 있는 성능을 가지고 있는지를 평가하기 위한 것이다. 실험 대상 구조물은 준공된지 8년이 경과된 SBG(Steel Box Girder) 형식의

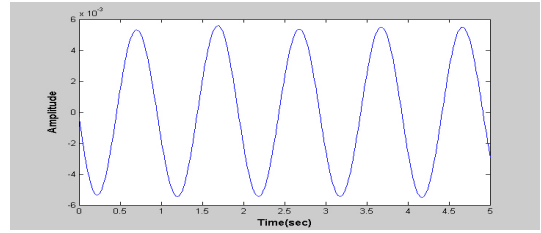
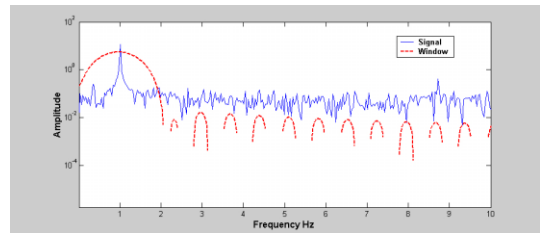
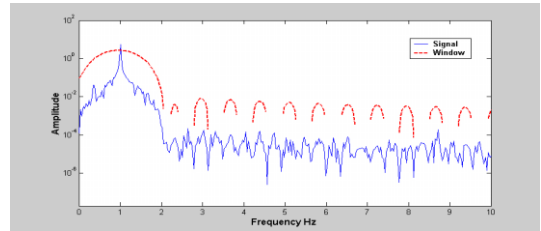


Fig. 11 필터링 된 가진기의 응답 신호



(a) before Filtering



(b) after Filtering

Fig. 12 주파수 영역 신호 & Hamming Window

교량으로 총 길이가 280m, 각 경간의 길이는 40m, 폭 22m으로 왕복 4차선의 1등급 교량이다. 계측 방법은 차량의 통행 시 발생하는 교량의 상시 가진 응답을 Fig. 13에서와 같이 교량의 세 번째 경간(S3)의 중앙부와 네 번째 경간(S4)의 중앙부에서 총 2개의 센서를 부착하였으며, 71.4Hz의 샘플링 율로 28.672초 동안, 총 2048개의 샘플 데이터를 획득하였다.

그리고 성능 비교를 위한 기준으로 사용하기 위한 유선 계측 장치는 HP-VXI1432 시스템과 500mV/g의 민감도 성능을 가진 Dytran모델 3134D를 사용하여 102Hz의 샘플링 율로 19.835초 동안, 총 2048개의 샘플 데이터를 획득하였다. 실험을 위하여 실 구조물의 미약한 응답 신호를 검출하기 위하여 유선 계측 장비의 입력 전압 신호를 0~50mV으로 설정하였

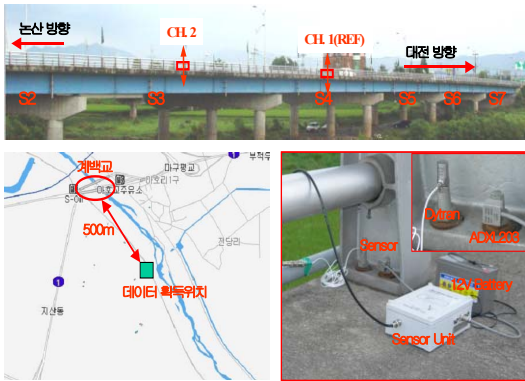


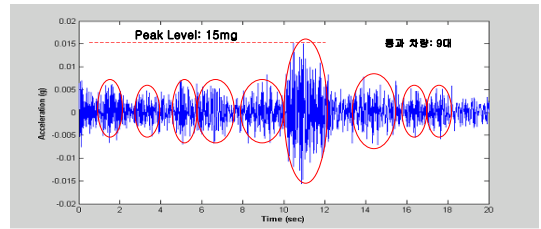
Fig. 13 실험 대상 교량과 계측 장비 설치 장면

으며 센서 출력 전압을 10배로 증폭하였다. Fig. 13은 실험 대상교량과 실험을 위한 센서 설치 장면을 보여준다. 스마트 센서를 이용한 실험은 센서장치의 설치 위치에서부터 약 500m거리의 지점에서 데이터를 실시간으로 획득하였다. 스마트 센서의 전원 공급은 12V, 7.0A용량의 휴대용 배터리를 사용하였다.

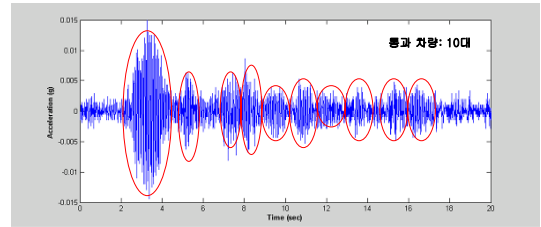
5.1 현장 계측 실험

현장 실험에서는 우선적으로 유선 계측 장비를 이용하여 차량의 통행으로 발생하는 교량 응답의 형태와 크기를 S3의 중앙부에 설치한 CH.2 센서에서 측정하였다. Fig. 14(a)는 유선 계측 장비를 사용하여 측정 한 결과이다. 유선 계측 장치의 계측 결과 Fig. 14(a)에서 알 수 있는 바와 같이 통행 차량의 크기에 따른 교량의 응답을 검출할 수 있었으며 최대 응답에 대한 검출 신호의 크기는 15mg, 즉 센서 출력 전압으로 환산하면 약 7.5mV로 대상 구조물의 응답 가속도 신호의 크기가 상당히 미약한 것으로 분석되었다.

Fig. 14(a)에서 원으로 표시한 부분은 차량 통행에 따른 교량의 응답으로 분석한 것으로 기록한 차량의 통과 수량과 일치함을 보였다. 스마트 센서의 계측 실험은 센서 입력 전압을 5배로 증폭하여 교량의 응답을 측정하였다. 측정 결과, Fig. 14(b)에서 나타난 바와 같이 통행 차량에 따른 교량의 응답을 명확하게 검출할 수 있었다. 또한, 본 실험에서는 스마트 센서의 계측 가능 거리를 파악하기 위하여 데이터 수신 위치를



(a) 유선 계측 장비



(b) 스마트 센서

Fig. 14 CH. 2에서의 상시 가진에 의한 응답 측정 결과

변경하면서 실험을 하였다. 실험 결과 스마트 센서의 계측 가능 범위는 센서 장치와 데이터 수신 장치 사이에 장애물이 없는 현장 조건에서 이득(gain)이 5.5dB 안테나를 사용할 경우 약 600m까지 계측이 가능하였다. 이는 기존의 스마트 센서인 MICA의 30m, WiMMS의 150m 통신 거리에 비하여 월등히 우수한 성능이다.

5.2 동특성 분석 실험

구조물의 동특성은 구조물의 완공된 직후의 원형 구조물에 적용되거나, 사용 중인 구조물에 적용되어 모니터링을 위해 기준이 되는 기본 구조물을 설정하는데 활용될 수 있다. 기본 구조물은 장시간 모니터링을 수행하기 위한 손상검출 알고리즘에 적용되어 구조물의 손상정도를 파악하는 기준으로 사용된다.

본 연구에서는 스마트 센서를 이용하여 일반차량 하중 상태에서 상시진동이 발생하는 SBG교량의 고유진동수를 간단히 분석하는 실험을 실시하였다. 구조물의 고유진동수 분석을 위해 상시 진동으로부터 구조물의 동적 특성을 분석하는 대표적인 알고리즘인 자연가진 기법(NExT: Natural Excitation Technique)과 고유계 구현기법(ERA: Eigensystem Realization

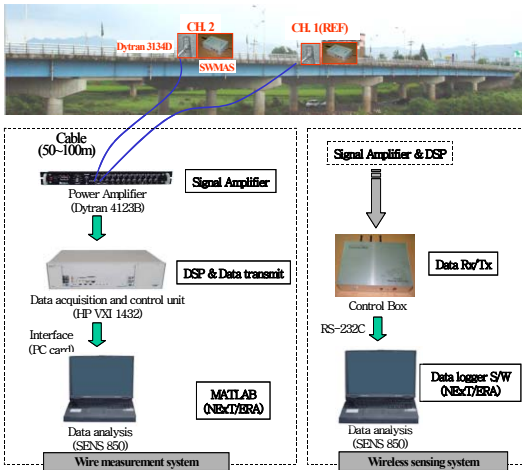
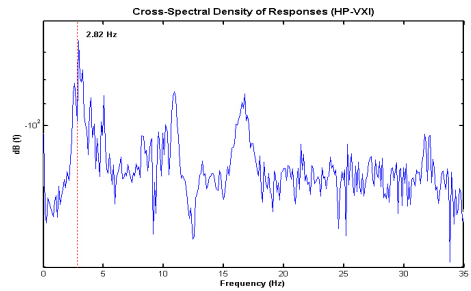


Fig. 15 유선 계측 시스템과 무선 계측 시스템의 계측 절차 비교

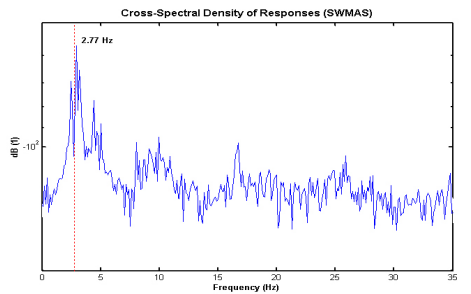
Algorithm)을 이용하였다.⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾ Fig. 15은 동특성 분석을 위한 계측 위치와 유·무선 계측 시스템의 장비 구성 및 계측 절차를 비교하여 나타낸 것이다. 무선 계측 시스템은 유선 계측 시스템의 절차와 기본적으로는 동일하나 센서와 계측 장치와 연결하는 케이블이 없으며, 신호 증폭과 디지털 변환, 필터링과정을 센서 장치 내에서 일괄적으로 수행하므로 계측 시스템 구성이 쉽고 간편하다.

가속도계의 부착 위치는 Fig. 15에서와 같이, CH.1과 CH.2에 설치하였으며 CH.1을 기준(reference) 채널로 설정하였다. 측정된 데이터의 각 프레임당 크기는 유·무선 모두 2048개로 설정하였다. 측정 주파수 범위는 스마트 센서의 성능을 고려하여 무선 시스템에서는 0~35Hz로 설정하였으며, 유선 시스템에서는 0~50Hz로 설정하였다. 측정시간은 무선 시스템에서는 28.672초와 유선 시스템에서는 19.835초로 프레임 당 5회 평균하였다. 또, 측정 잡음을 제거하고 전기적 신호의 왜곡을 피하기 위해 Hamming window를 이용하였다.

자연가진기법과 같이 구조물의 응답 신호만을 이용하여 동적 특성 분석을 수행하는 알고리즘을 적용하기 위해서는 기준(Reference) 채널의 위치 선정이 중요하다. 그 이유는 응답 신호만을 계측하기 때문에 특정 모드의 반곡점에 위치한 가속도계를 기준 채널로 설정



(a) 유선 계측 장비



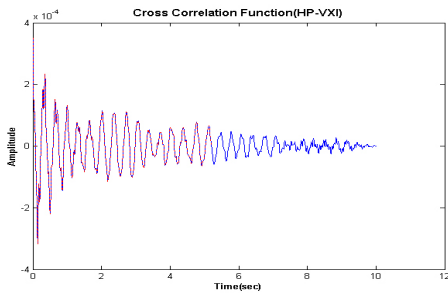
(b) 스마트 센서

Fig. 16 Cross power spectrum

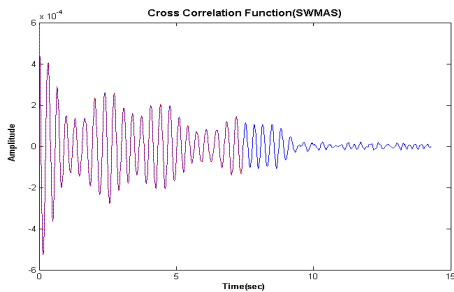
하게 되면 해당 모드에 대한 결과를 획득할 수 없는 결과를 초래하기 때문이다. 본 연구에서는 스마트 센서의 성능 평가를 위한 것이므로 대상 교량의 첫 번째 1차 모드의 고유 진동수 획득을 목표로 실험을 실시하였고 1차 모드의 응답 신호가 충분히 반영될 수 있는 위치로 교량의 경간 중앙인 CH.1로 결정하였다. 계획된 계측 시스템에 의해 측정된 CH.2에서의 교차 파워 스펙트럼(Cross power spectrum)들은 Fig. 16과 같다.

교차 파워 스펙트럼은 기준 채널(CH.1)과 응답점(CH.2)간의 관계로부터 획득된 스펙트럼이고, 자연가진기법의 적용을 위해서 역 푸리에 변환되어 Fig. 17와 같은 자유 응답 데이터(Free Response Data)로 간주되는 상호상관함수(Cross correlation function)로 변환된다.

실험 결과, 본 실험의 목적 모드로 설정한 대상 교량의 1차 휨 모드의 고유 진동수는 무선 계측 시스템의 경우 2.77Hz, 유선 계측 시스템인 경우에는 2.82



(a) 유선 계측 장비



(b) 스마트 센서

Fig. 17 Cross correlation function

Hz로 두 결과가 약 2% 오차 내에서 일치하는 것으로 분석되었다.

6. 결론

본 논문에서는 최근에 미래의 모니터링 시스템으로 활발히 연구 중에 있는 스마트 센서 기술을 이용한 구조물 모니터링 시스템을 제안하였고, 이를 위하여 스마트 센서의 개발과 성능 평가 실험을 실시하였다. 이 실험 결과를 분석하고 평가하여 다음과 같은 결론을 제시한다.

- 1) 스마트 센서의 가속도계 성능을 충분히 발휘하는지를 검토하기 위한 민감도 및 분해능 실험을 실시하였다. 실험 결과, ADXL203 센서는 민감도가 970 mV/g로 Data sheet의 값 1000±60mV/g와 일치함을 보였고, 분해능은 4.5mg으로 약 10%정도 크게 분석되었다.
- 2) 본 논문에서는 토목 구조물의 스마트 모니터링 시

스템에 적용하기 위해 새롭게 개발한 스마트 센서의 데이터 획득과 처리 능력을 평가하였다. 이를 위하여 모형 캔틸레버 보를 이용한 자유진동 실험과 가진장치를 이용한 실험을 실시하였다. 실험 결과, 스마트 센서의 응답 계측 성능과 자체적인 임베디드 신호 처리 수행 능력을 확인 하였다.

- 3) 본 연구에서는 스마트 센서를 이용하여 일반차량 하중 상태에서 상시진동이 발생하는 SBG교량의 고유진동수를 분석하는 실험을 실시한 결과, 본 실험의 목적 모드로 설정한 대상 교량의 1차 휨 모드의 고유 진동수는 무선 계측 시스템의 경우 2.77Hz, 유선 계측 시스템인 경우에는 2.82Hz로 두 결과가 2% 오차 내에서 일치하는 것으로 나타나, 우수한 결과를 얻었다.

참고문헌

1. Spencer, B.F., "Opportunities and Challenges for smart sensing Technology". First International Conference on structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, 2003.
2. Straser, E.G. and Kiremidjian A.S., "A modular visual approach to damage monitoring for civil structures." Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, 2719, 1996, pp. 112-122.
3. 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. Vol. 3713, Apr. 8 -Apr. 9 1999. Orlando, FL, USA, 1999, pp. 257-267.
4. Jerome P. Lynch, Kincho H. Law, Erik G. Straser, Anne S. Kiremidjian, and Tom W. Kenny, "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, 2000, pp. 30-31.
5. 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, 2003, November pp. 13-15.
6. Jerome P. Lynch, Arvind Sundarajan, Kincho H. Law, Anne S. Kiremidjian, Ed Carryer, Hoon sohn, Charles R. Farrar., "Field validation of a wireless structural monitoring system on the Alamosa Canyon Bridge", SPIE 10th, San Diego, CA, USA, March, 2003.
 7. Masanobu Sinozuka, Maria Q.Feng, Pai Chou, Yangbo Chen, chulsung Park., "MEMS-Based Wireless Real-Time Health Monitoring of Bridge", The 3rd International conference on Earthquake Engineering Najing, China, 8, 2004.
 8. Hewlett Packard, "The Fundamentals of Signal Analysis", Application Note 243.
 9. ATMEL Inc., "Atmega128 data sheet." www.atmel.com, 2004.
 10. Caicedo J. M., Dyke S. J., "Phase II SHM Benchmark Studies: Application of the NExT and ERA for Damage Detection", Proceedings of the IMAC XXI Conference, Orlando, Florida, February 3-6, 2003.
 11. Caicedo, J. M., Dyke, S. J., Johnson, E. A., "NExT and ERA for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, submitted, 2002.
 12. Giraldo D., Caicedo J. M. and Dyke S. J., "Experimental Phase of the SHM Benchmark Studies. Damage Detection Using NExT and ERA", Proceedings of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, Washington, July, 2003, pp. 16-18.
- 금행 (접수일자 : 2006년 11월 13일)