

# MEMS 가속도계 기반의 기계 상태감시용 스마트센서 개발

## Development of MEMS Accelerometer-based Smart Sensor for Machine Condition Monitoring

손 종 덕\* · 심 민 찬\* · 양 보 석†

Jong-Duk Son, Min-Chan Shim and Bo-Suk Yang

(2008년 5월 19일 접수 ; 2008년 7월 22일 심사완료)

**Key Words :** Wireless Smart Sensors(무선스마트센서), MEMS Accelerometer(멤스 가속도계), Digital Signal Processing(디지털 신호처리), Machine Condition Monitoring(기계 상태감시)

### ABSTRACT

Many industrial operations require continuous or nearly-continuous operation of machines, interruption of which can result in significant cost loss. The condition monitoring of these machines has received considerable attentions in recent years. Rapid developments in semiconductor, computing, and communication with a remote site have led to a new generation of sensor called "smart" sensors which are capable of wireless communication with a remote site. The purpose of this research is to develop a new type of smart sensor for on-line condition monitoring. This system is addressed to detect conditions that may lead to equipment failure when it is running. Moreover it will reduce condition monitoring expense using low cost MEMS accelerometer. This system is capable for signal preprocessing task and analog to digital converter which is controlled by CPU. This sensor communicates with a remote site PC using TCP/IP protocols. The developed sensor executes performance tests for data acquisition accuracy estimations.

### 1. 서 론

최근 마이크로 시스템의 발달로 어떤 대상의 신호나 정보가 감지되는 일반적인 센서의 개념을 뛰어넘어 지능화 센서라 불리는 스마트센서가 출시되고 있다. 스마트센서는 기존 센서와 같이 원 데이터(raw data)를 감지하는 기능 이상의 더욱 진보된 기능성(functionality)과 구조(architecture)를 가지고 있다. 스마트센서는 일반적으로 감지요소(센서), 신호처리 및 통신기술을 필요로 한다<sup>(1)</sup>. 스마트센서는 교량과 스마트구조물 등의 상태감시용으로 사용하기 위해

낮은 전력 소모, 프로그래밍 가능한 소프트웨어, 빠른 데이터 취득능력, 신뢰성, 저가격을 목적으로 연구개발이 수행되었다<sup>(2)</sup>. 스마트센서는 산업 모니터링과 제어에 비용 절감, 유지보수의 용이성, 위험지역 접근의 용이성 등의 장점을 가지고 있다<sup>(3)</sup>. Wireless data research group보고서에 의하면, 스마트센서 기술을 포함하는 설비자산 무선감시용 하드웨어, 소프트웨어를 포함한 전체 M2M(machine to machine) 시장은 2002년 34억불에서 2007년 280억불로 증가되고 있다. 2006년에 발간된 ARC advisory group study에 따르면 산업 생산 공장에서 무선센서기술의 세계 시장 규모는 향후 5년 동안 26%씩 증가하여 2005년 3.257억불에서 2010년 10억불이 넘을 것으로 예측되고 있다.

MEMS(micro-electro-mechanical system) 기술은 유비쿼터스 네트워크나 초소형 휴먼 인터페이스

† 교신저자 : 정희원, 부경대학교 기계공학부  
E-mail : bsyang@pknu.ac.kr  
Tel : (051)629-6152, Fax : (051)629-6150

\* 정희원, 부경대학교 대학원 기계공학부

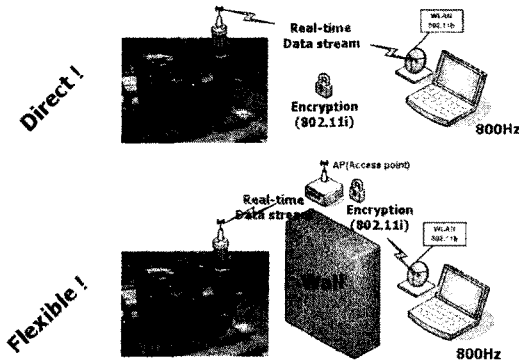


Fig. 1 System configuration

분야의 핵심 요소부품인 3차원 미소구조물, 센서 및 액추에이터 등을 소형화, 고정밀화하고 복합화 할 수 있는 기술이다. MEMS 기반의 정전용량형 진동 가속도계는 최근 연구개발이 활발하게 이루어져 3축 가속도계가 출시되었고, 기존 압전형 센서 가격의 1/100 정도인 수 US\$ 정도로 저가격화가 실현되어 시장 규모가 폭발적으로 증가하여 2006년도 1.7억 개가 판매되고 있는 추세이다.

이 연구에서는 MEMS 가속도계를 기반으로 사용자의 요구에 따라 신호처리하며 실시간으로 무선 송수신하는 스마트센서를 개발하였고, 그 성능을 검토하였다. Fig. 1과 같이 직접 통신도 가능하며 방해물이 있을 때도 유연하게 데이터를 송수신할 수 있도록 access pointer(AP)를 이용하여 실시간으로 wireless LAN(WLAN)통신을 할 수 있다. 네트워크는 WLAN 통신에서 일반적으로 사용하는 802.11i 규약에 따라 암호화가 가능하다.

## 2. 스마트센서의 구성

스마트센서는 크게 4개의 모듈, 즉 센서, 인터페이스, 서버, 데이터분석 모듈로 구성되어 있다. 먼저 스마트센서의 구성을 살펴보면, Fig. 2와 같이 배터리를 통하여 센서 모듈의 MEMS 가속도계에 입력되는 전원은 DC 5V이고, 아날로그 형태의 가속도 데이터가 출력된다. 그리고 아날로그 가속도 신호를 수동소자를 사용하여 저주파수대역필터와 고주파수대역필터의 신호처리를 수행한다. 이때 아날로그 신호는 인터페이스 모듈로 전송이 되며, CPU에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 데이터를 패

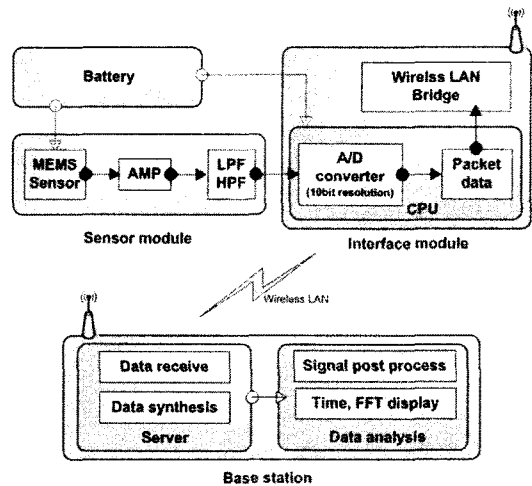


Fig. 2 Block diagram of a smart sensor

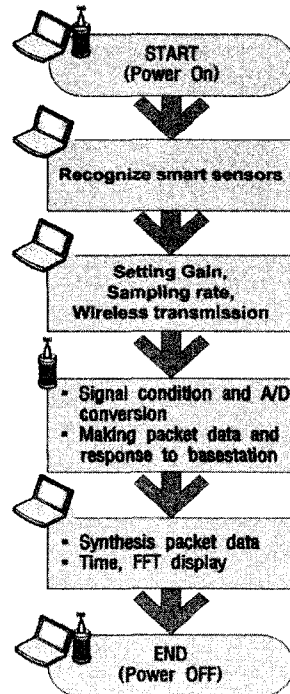


Fig. 3 Flowchart of smart sensor

킷으로 변환한 뒤 무선 브리지를 통하여 베이스 스테이션으로 송신하게 된다. 베이스 스테이션에 수신된 패킷 데이터는 서버 모듈을 통하여 데이터를 수신 취합하여 데이터분석 모듈에서 시간, 주파수 그래프를 보여주게 된다. Fig. 3에 나타낸 데이터 흐름은 전원을 켜는 순간 베이스 스테이션에서 스마트센

**Table 1** Specification of smart sensor elements

MEMS Accelerometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Name : 1210-050,</li> <li>• Company : Silicon design</li> <li>• Frequency rage : 0 ~ 2000 Hz</li> <li>• Sensitivity : 80 mV/g</li> <li>• Shock rage : 2000 g</li> <li>• Power : +5VDC, 8 mA</li> <li>• Temperature : -55 ~ 125°C</li> </ul>
CPU (ATmega128)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A/D Converter resolution : 10 bit</li> <li>• Communication : UART</li> <li>• Embedded : ISP, JTAG</li> <li>• Memory : 4K EEPROM</li> <li>• Clock : 16 MHz</li> </ul>
Wireless LAN module	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Name : Wiport</li> <li>• Company : Latronix</li> <li>• Networking : 802.11b</li> <li>• Communication Speed : 230400 bps</li> <li>• Security : IEEE 802.11i-PSK,WPA-PSK,TKIP</li> </ul>

**Table 2** Sensor module option

Gain	Filter
0 dB 10 dB 20 dB 30 dB	High pass filter : 2 Hz Low pass filter : 1600 Hz

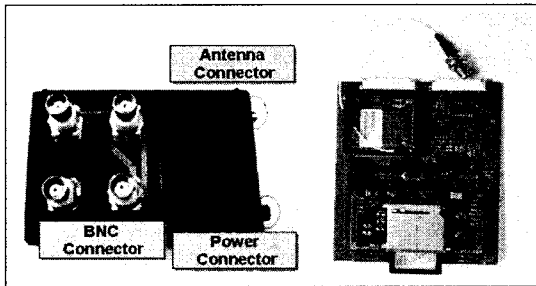
**Table 3** Definition of packet bit

(a) Base station

Start bit	Header	Server	Sensor ID	Frequency range	Gain	End	Change line
\$	PKW	S	0 ~ 99	0 ~ 6	10 ~ 30	0×0D	0×0A

(b) Smart sensor

Start bit	Header	Client	Sensor ID	Gain	Data	END	Change line
\$	PKW	C	0 ~ 99	10 ~ 30	[1024]	0×0D	0×0A



**Fig. 4** Developed smart sensors

서를 자동으로 인식한다. 베이스 스테이션에서는 신호 증폭 및 샘플링 주파수를 설정하고, 세팅된 정보를 스마트센서로 전송하게 되면, 스마트 센서는 이 정보를 바탕으로 MEMS 가속도계로부터 데이터를 수집하여 다시 베이스 스테이션으로 패킷데이터를 송신하고, 베이스 스테이션에서는 데이터를 수집하여 시간·주파수 정보를 보여주게 된다.

Fig. 4는 개발된 스마트센서를 보인다. 스마트센서 제작에 사용된 MEMS센서와 소자의 명세는 Table 1과 같고, 각각의 모듈 기능에 대해 이하에 설명한다.

**2.1 센서 모듈**

MEMS 가속도계로부터 데이터 취득 및 신호처리의 역할을 수행한다. 관련내용은 Table 2에 나타내었고, 베이스 스테이션에서 명령된 정보에 따라 MEMS 가속도계의 신호를 0, 10, 20 및 30 dB까지 크기 증폭이 가능하며, 고주파수 대역 필터(HPF)는 수동 IC소자를 이용하여 2 Hz 이상 필터링 할 수 있다.

**2.2 인터페이스 모듈**

이 모듈은 아날로그신호의 디지털변환 기능과 무선전송 기능을 가진다. 센서모듈로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하고 디지털 신호를 패킷으로 묶어서 WLAN 통신으로 PC로 데이터 송신을 수행한다. 만약 아날로그-디지털 변환과정에서 오랜 시간이 지났을 때 발생할 수 있는 샘플링주파수 오차를 막기 위해 24시간마다 샘플링 인터럽트 신호를 초기화하는 기능을 가지고 있다.

센서모듈의 Gain, HPF를 제어하기 위해 인터페이스 모듈의 CPU에서 0~5 V의 출력 값으로 제어를 하고, 데이터를 패킷화 하기 위해 선박용 산업규격 NMEA(national marine educators association) data sheet를 참고하여 Fig. 3과 같이 베이스 스테이션과 스마트센서 사이의 패킷의 비트를 정의하였다. A/D 변환된 데이터는 64개씩 패킷화되어 시리얼(RS232) 통신으로 115200 bps 속도로 실시간으로 데이터가 전송된다.

**2.3 서버 모듈**

서버모듈은 데이터 수집기능을 수행한다. Delphi 언어로 프로그램 되었으며, 스마트센서에서 64개씩 보낸 패킷 데이터를 수집하여 2048개의 데이터로 만든 뒤 데이터 분석모듈로 실시간으로 전송하게 된다.

**2.4 데이터분석 모듈**

이 모듈은 데이터 시간, 주파수 디스플레이와 저

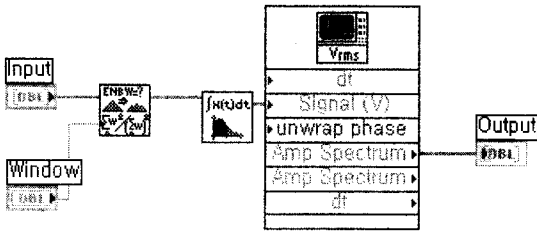


Fig. 5 LabVIEW DLL program code

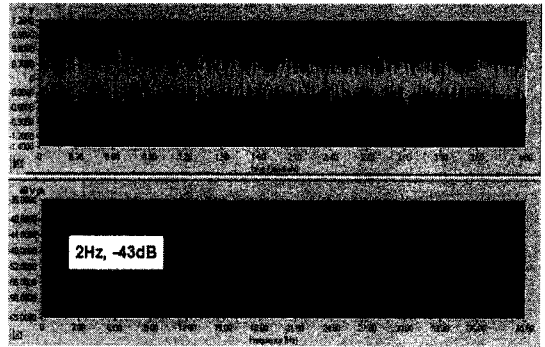
장의 기능을 수행한다. Delphi 언어와 LabVIEW의 동적 라이브러리(DLL) 함수를 사용하여 만들어졌다. 이 모듈은 서버에서 취득한 데이터를 시간 및 주파수 영역에서 보여주고 시간신호를 저장할 수 있는 기능이 있다. Fig. 5는 데이터분석 모듈의 FFT 계산에 적용된 LabVIEW 동적 라이브러리(DLL)를 생성하기 위한 프로그램이다.

### 3. 실험 및 검증

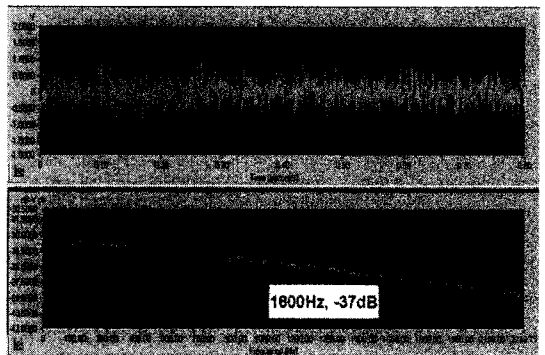
#### 3.1 아날로그 센서 테스트

MEMS 가속도계로부터 취득된 가속도 신호를 칩 저항(chip register)과 칩 콘덴서(chip capacitor)를 이용하여 고주파대역필터(high pass filter)와 저주파대역필터(low pass filter)를 각각 기준신호보다 3 dB 아래에서 2 Hz, 1600 Hz로 필터링 됨을 확인하였다. 신호취득 방법은 1 V의 white 노이즈를 입력 신호로 하고 1000번 평균화를 수행하여 얻은 데이터는 Fig. 6과 같다.

MEMS 가속도계의 가진 시험을 위해, Fig. 7과 같은 실험 장치를 구성하였다. 아울러 비교 검증을 위해, 주파수범위 12.6 kHz, 감도 100 mV/g의 일반 가속도계(B&K 4371)를 가진기 위에 설치하고 300 Hz로 가진시험을 수행하였다. 시험결과로 시간파형과 주파수 스펙트럼을 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 먼저 시간 신호를 비교해보면 일반센서의 가속도계는 평균값 0V를 기준으로 조화성분의 신호가 나타나지만 MEMS 가속도센서는 2.5 V를 기준으로 신호가 나타난다. 이는 MEMS가속도 센서의 출력이 DC 2.5 V를 가지기 때문이다. 그리고 주파수 신호 비교에서는 일반 가속도센서와 MEMS 센서의 각각 감도를 고려하여 신호를 나타낸 결과 0.85 g, 0.89 g 유사하게 나타났다. MEMS 가속도 센서 테스트 시 고려할 점은 데이터 시트에 표기된 감도만을 고



(a) High pass filter



(b) Low pass filter

Fig. 6 Filter performance test of smart sensor

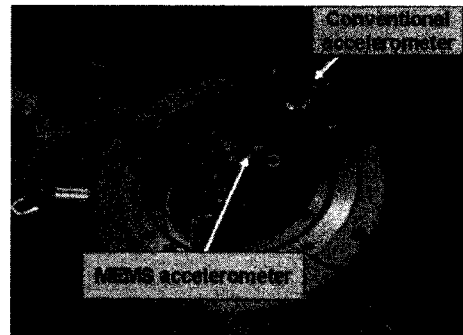
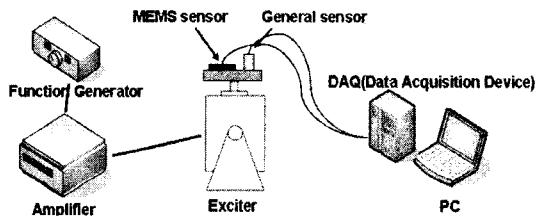
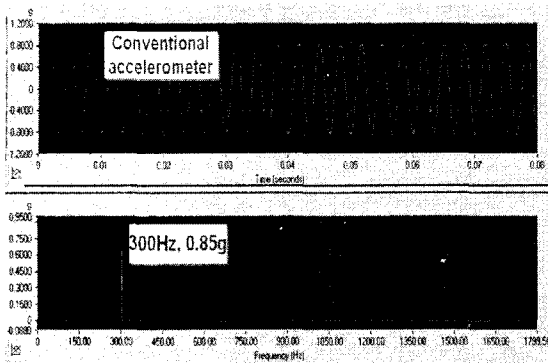
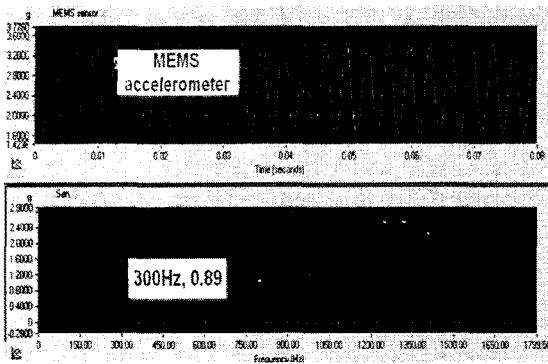


Fig. 7 Configuration for exciter test

려할 때 정확한 신호 출력값을 얻기 어려우므로 반드시 실험을 거쳐 감도 보정을 수행해야한다.



(a) General accelerometer



(b) MEMS accelerometer

Fig. 8 Exciter test results

### 3.2 디지털 테스트

A/D 변환과정에서 발생할 수 있는 샘플링 오차를 확인하기 위해 베이스 스테이션에서 800 Hz의 주파수 범위를 취득하는 명령을 주었다. 샘플링 주파수를 확인하기 위해 데이터가 샘플될 때 CPU에서 인터럽트 신호를 발생하여 오실로스코프로 인터럽트 주기를 측정하였다. 테스트 결과는 Fig. 9에서와 같이 각 데이터 샘플의 주기는 0.000488281이었고 샘플링 주파수는 2.048 kHz로 나타났다.

$$\text{샘플링률} = \text{주파수 범위} \times 2.56$$

디지털 변환과 무선통신 사이에서 발생할 수 있는 신호 크기의 주파수 변화를 확인하기 위해, Fig. 10 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 함수발생기를 이용하여 10Hz의 Peak-Peak  $\pm 1$  V의 신호를 발생하여 스마트센서에는 가속도 입력대신 함수발생기 입력을 주었다. 아날로그 신호는 오실로스코프로 확인하고, 디지털 신호는 무선통신으로 베이스 스테이션에서 확인하였다.

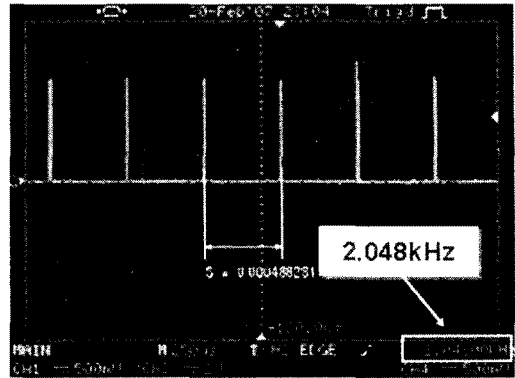


Fig. 9 Interrupt of analog digital conversion

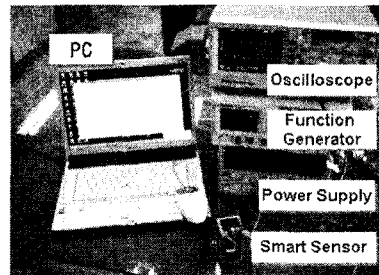
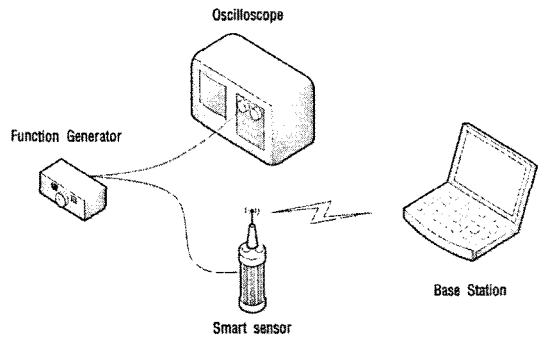


Fig. 10 Test setup for analog and digital signals

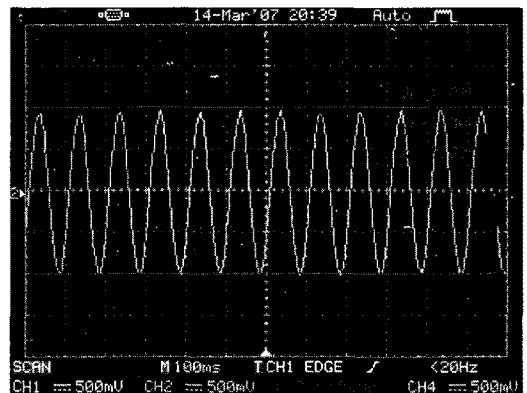


Fig. 11 Time signal result of function generator

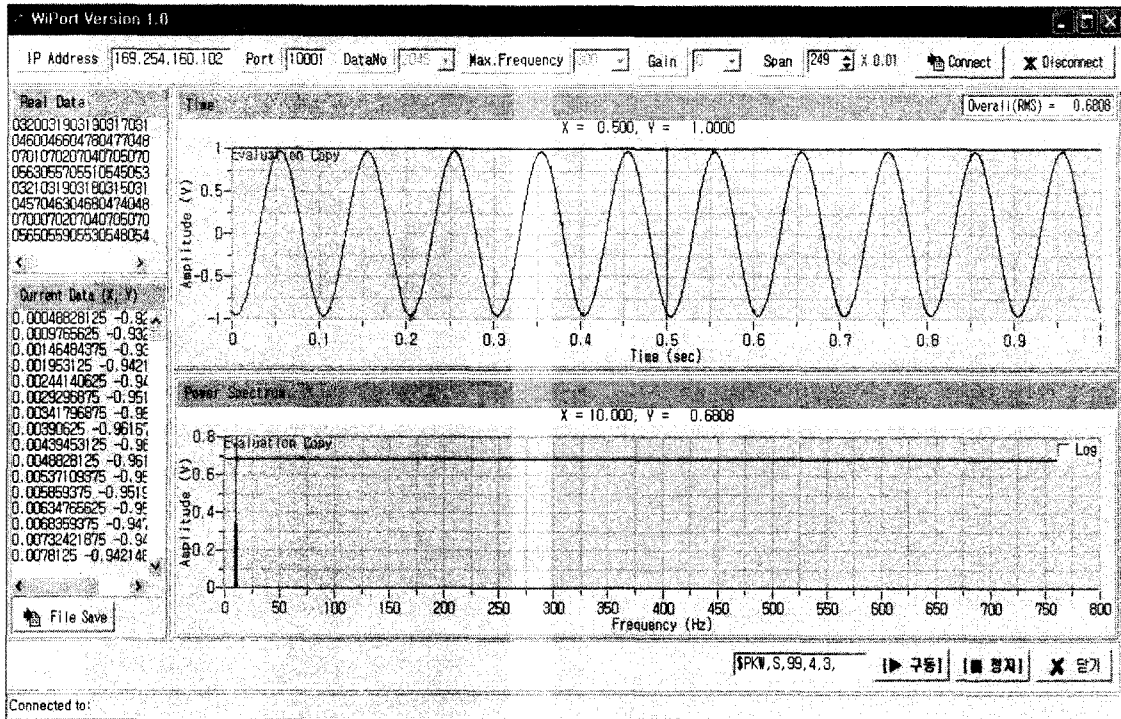


Fig. 12 Base station signal of function generator

실험 결과로 아날로그 신호는 Fig. 11와 같이 10 Hz 주파수로  $\pm 1$  V의 크기를 잘 나타내고 있으며, 베이스 스테이션에서도 Fig. 12와 같이 디지털로 변환된 신호의 크기와 주파수가 함수발생기 신호와 동일한 크기와 주파수가 실시간으로 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

기계설비의 무선 상태감시용으로 사용하기 위한 MEMS 가속도계 기반의 스마트센서를 개발하였다. MEMS 가속도계 신호를 수동소자를 이용하여 신호 처리(HPF, LPF, gain) 설계를 수행하였다. 인터페이스 모듈의 하드웨어 설계와 아날로그 디지털 변환 프로그램을 제작 및 검증하였다. 스마트센서 기구설계를 실시하고, 무선 LAN통신 기반의 실시간 디지털 데이터를 받을 수 있는 네트워크, 서버, 데이터 분석 소프트웨어를 제작하였다.

향후 과제로는 스마트센서의 실증 현장 적용시험, 기구 공진 회피설계, 기구의 소형화, 무선 데이터 전송속도 향상 및 저전력 통신기반의 스마트센서 개발을 수행할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) McLean, C. and Wolfe, D., 2002, "Intelligent Wireless Condition-based Maintenance", *Sensors*, June, p. 16.
- (2) Ziani, M., Bennouna, M., Amamou, M. and Barboucha, M., 2000, "The Smart Sensor Design in Industrial Processes Applications", 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, IEEE, Vol. 1, pp. 115~118.
- (3) Spencer Jr, B. F., Ruiz-Sandoval, M. E. and Kurata, N., 2004, "Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 11, pp. 349~368.
- (4) Yazdi, N., Mason, A., Najafi, K. and Wise, K. D., 1996, "A Smart Sensing Microsystem with a Capacitive Sensor Interface", *Center for Integrated Sensors and Circuits*.
- (5) Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S. and Carryer, E., 2003, "Design of Piezoresistive MEMS-based Accelerometer"

meter for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring”, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE 0893-1321.

(6) Ng, S., Po, C., Guo, D., Dzulkipli, M., Hapipi, B. M. and Hock, F. T. E., 2006, “MEMSWear-Biointerfacing- Incorporating Sensors into Smart Shirt for Wireless Sentinel Medical Detection and Alarm”, *Journal of Physics, Conference Series*, Vol. 34, pp. 1068-1072.

(7) Corsi, C., 2007, “Smart Sensors”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 49, pp. 192-197.

(8) Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E., 2002, “Wireless Sensor Networks: a Survey”, *Computer Networks*, Vol. 38, pp. 393-422.

(9) ISO 13373-1, 2002, “Condition Monitoring and Diagnostics of Machines- Vibration Condition Monitoring- Part 1: General Procedures.

(10) Arms, S. W., Townsend, C. P., Churchill, D.

L., Hamel, M. J., Galbreath, J. H. and Mundell, S. W., 2004, “Frequency Agile Wireless Sensor Networks”, in: *International Symposium on Smart Structures & Materials/NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, pp. 1-8.

(11) Ramamurthy, H., Prabhu, B. S. and Gadhi, R., 2004, “Smart Sensor Platform for Industrial Monitoring and Control”, *Wireless Internet for the Mobile Enterprise Consortium Los Angeles, California, USA*.

(12) Townsend, C. P., Hamel, M. J. and Arms, S. W., 2001, “Telemetered Sensors for Dynamic Activity & Structural Performance Monitoring”, *International Symposium on Smart Structures & Materials/NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, in: *Proceedings SPIE*, Vol. 4334, pp. 228-233.

(13) Lee, D. H., 2002, “Vibration Accelerometer”, *Journal of KSNVE*, Vol. 12, No. 4, pp. 225-236