

## 저전력 MEMS 기반 3축 가속도계의 성능 시험

### Efficiency Test for Low Electric Power Type and MEMS Based 3-axis Accelerometer

이 병 렬<sup>1)</sup>      이 승 재<sup>2)\*</sup>      문 대 중<sup>3)</sup>      정 진 우<sup>4)</sup>  
Byeung-Leul Lee      Seung-Jae Lee      Dae-Joong Moon      Jin-Woo Jung

#### Abstract

In this study, an efficiency test was performed by fabricating MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) based 3-axis acceleration sensor modules and an earthquake monitoring system was composed. Data acquisition device (NI-9239) with a 24bit ADC (Analog to Digital Converter) was used for improving the performance of 3-axis acceleration sensor modules and filtered data (100Hz Low Pass Filter) was used for reducing noises. Also this paper focused on detecting meaningful vibration in the building by developing the earthquake monitoring software. If vector sum of 3-axis acceleration is greater than the preset value, the value will be recorded and saved to the file.

Keywords : Dynamic range, Earthquake monitoring system, MEMS sensor, Vector sum, 3-axis accelerometer

#### 1. 서 론

가속도 센서는 자동차 산업, 가전 산업, 항공 우주 산업 및 구조물 계측 산업 등에 적용 되어 왔다. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 기술이 발달함에 따라 MEMS 가속도 센서의 응용분야가 점차 확대되고 있다 (Stauffer, 2004).

1970년대 실리콘을 이용한 가속도 센서가 처음으로 개발 되었고 (Roylance and Angell, 1979), 1990년대부터 MEMS 기술을 기반으로 한 가속도 센서의 연구가 본격적으로 이루어졌는데, 캔틸레버 빔과 진동추의 구조에 따른 정적 및 동적 해석에 관한 연구가 수행되었다 (Kampen and Wolfenbutter, 1998). 또한 2000년대에는 MEMS 구조를 설계하기 위한 연구의 일환으로 정전기력을 받는 구조의 응답 및 모드해석에 관한 연구와 동적 특성의 변화에 관한 연구도 이루어졌다 (Jung et al., 2005). 최근에는 단자유도 GPS와 MEMS 가속도계를 이용하여 지진, 산사태, 화산 활동과 관련된 지반 운동을 모니터링하는 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Zanjani

and Abraham, 2010).

본 논문에서는 MEMS 기반 3축 가속도 센서 모듈을 제작 하여 성능시험을 수행하였다. 3축 가속도 센서 모듈의 성능 향상을 위하여 24bit ADC (Analog to Digital Converter)가 내장된 데이터 수집 장치를 사용하였으며, 잡음을 감소시키는 방법으로 100Hz LPF (Low Pass Filter)를 통과시킨 데이터를 사용하였다. 또한 지진 모니터링 소프트웨어를 개발하여 구조물에 유의한 진동을 감지하는데 초점을 맞추었다. 진동을 감지하기 위한 방법으로 각 축의 가속도 크기 뿐만 아니라 3축 가속도의 벡터 합을 구하여 이 벡터 합이 미리 설정한 값을 초과할 때의 수치를 별도로 표시하고 이를 파일로 저장하는 알고리즘을 사용하였다.

#### 2. 지진 계측 시스템 구성 방식

##### 2.1 지진 모니터링 시스템 구성 요소

지진 모니터링 시스템을 구성하기 위해선 3축 가속도센서

1) 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수, 공학박사  
2) 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 교신저자  
3) 정회원, (주)이제이텍 연구소장, 공학박사  
4) 정회원, (주)이제이텍 연구원

\* Corresponding author : leeseung@koreatech.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

와 출력신호를 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 변환하기 위한 DAQ (Data Acquisition) 및 변환된 데이터로부터 정보를 추출하는 응용 소프트웨어가 필요하다. 본 논문에서 구성한 시제품은 MEMS 가속도 센서의 성능 테스트가 주목적이므로 아날로그 출력 방식의 상용 가속도 센서를 이용하여 구현하였다. 이 경우 센서 뿐만 아니라 DAQ의 분해능에 따라 전체 시스템의 성능이 결정되므로 24bit 급 ADC를 내장한 DAQ 보드를 사용하였다. 응용 소프트웨어는 National Instruments 사의 LabView를 기반으로 제작하여 기본적인 데이터 수집장치 기능을 수행하도록 구성하였다.

## 2.2 부품 선정

MEMS 기반 가속도 센서를 선정하기 위해서는 센서의 최대 측정 범위와 분해능이 고려되어야 한다. 이 두 가지 특성은 지진 발생 시 진도 계급 표출을 위해 반드시 필요하며 가속도 센서의 동적범위를 산정하는데 직접적인 연관이 있기 때문이다. 그리하여 MEMS 센서는 동적범위 120dB급 단축 가속도 센서인 Colibrys SF1600을 선정하였다. DAQ 하드웨어로는 24bit SDM (Sigma Delta Modulation) 방식의 ADC가 내장된 NI-9239를 사용하였다. NI-9239는 USB 플랫폼에서 작동하며 기존 PC기반 플랫폼에 비해 소형이기 때문에 노트북에 연결하면 외부에서도 쉽게 계측이 가능하다는 장점이 있다. 또한 무선 DAQ를 지원하므로 향후 무선 데이터 로거로 확장이 가능하다.

## 3. 센서 모듈 제작

### 3.1 센서 장착용 기구물 설계

SF1600은 단축 센서이기 때문에 3축의 가속도를 계측하기 위해선 공간상에 정확한 직교 상태를 유지하면서 3개의 센서를 장착할 수 있는 케이스가 필요하다. Fig. 2와 같이 센



Fig. 1 NI-9239

서를 장착할 부분과 이를 덮을 수 있는 부분으로 구분하여 센서 탑재 후 모듈조립이 가능하게 구성하였다. 모듈의 전체 크기는 85×75×57mm<sup>3</sup>이다.

### 3.2 센서 모듈 조립

SF1600 단축 가속도 센서의 외관은 Fig. 3과 같다. 최상위의 칩이 신호 처리를 위한 주문형 반도체 (ASIC, Application-Specific Integrated Circuit)이고, 하부에 10 pin 커넥터로 외부와 결선할 수 있도록 구성하였다. Fig. 4는 센서를 장착한 상태의 모듈의 모습이고, Fig. 5는 각 센서의 아날로그 출력을 외부로 연결하기 위한 배선 구조, 센서 모듈과 DAQ 보드의 결선상태를 보여준다.

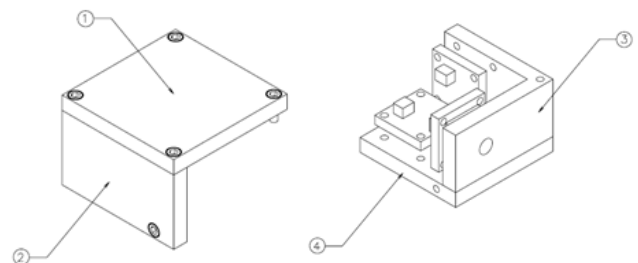


Fig. 2 The acrylic case for acceleration sensors

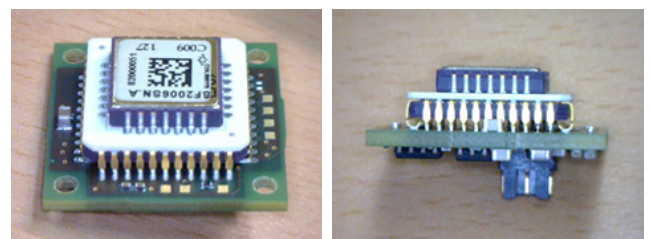


Fig. 3 Colibrys SF1600

서 모듈 조립



Fig. 4 The sensor module



Fig. 5 The sensor module, electric wiring and DAQ board

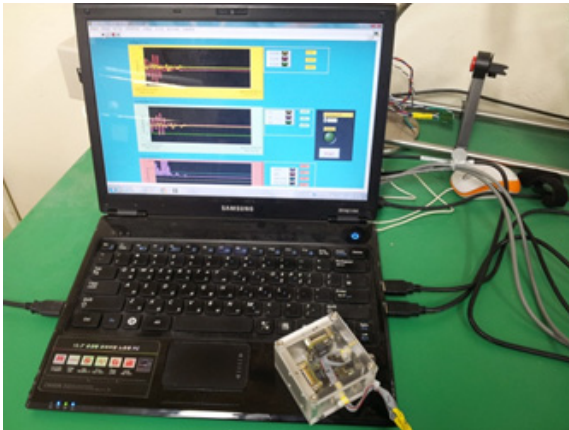


Fig. 6 The observation of output signals

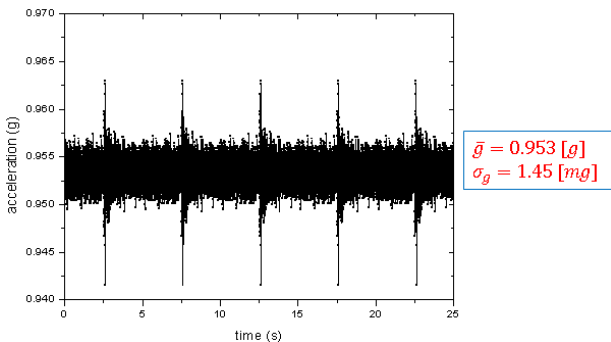


Fig. 7 The dynamic range of data using 16bit DAQ

#### 4. 센서 모듈 성능 시험

Fig. 6과 같이 센서 모듈을 수평하게 높은 상태에서 출력 신호의 산포를 관측하면 분해능을 파악할 수 있다.

이 때 센서 성능이 우수하더라도 DAQ (data acquisition) 보드에 내장된 ADC (analog to digital converter) 해상도가 떨어지면 미세한 출력 전압의 변화를 구분할 수 없기 때문에 시스템의 분해능이 저하된다. Fig. 7은 16bit DAQ로 수집한 결과를 나타낸 것으로, Fig. 8에 보인 출력 데이터의 특성 분

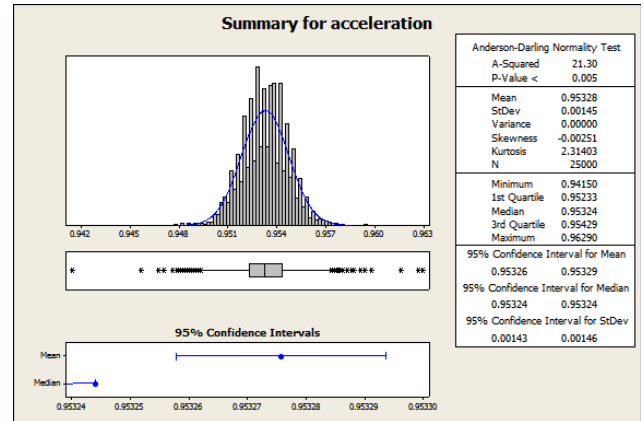


Fig. 8 Descriptive statistics of measured acceleration data

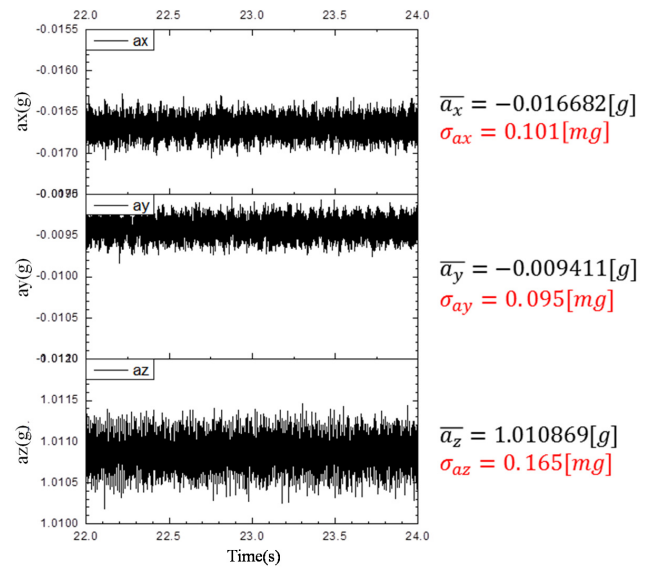


Fig. 9 Characteristics of the raw data

석 결과를 살펴보면 잡음 증가 분해능이 1.5 mg 정도이기 때문에 이 측정시스템의 동적 범위는 60dB에 불과하다.

Fig. 9는 24bit DAQ 보드를 이용하여 10kHz 속도로 샘플링한 원시 데이터의 특성을 보인 것이다. 중력 가속도에 의해 X와 Y방향은 평균 0g 이고 Z방향은 1g가 작용한다. Z축 신호의 잡음이 크게 보이는 이유는 건물의 미세한 진동 영향이다. 잡음 증가 분해능이 100 $\mu$ g에 해당하므로 동적범위는 92dB 수준이다.

잡음을 줄이기 위해 100Hz LPF (Low Pass Filter)를 통과시키면 고주파 잡음이 크게 줄어든다. Fig. 10에서 보인 바와 같이 잡음 증가 분해능은 43 $\mu$ g에 해당하므로 동적 범위는 100dB로 개선된다.

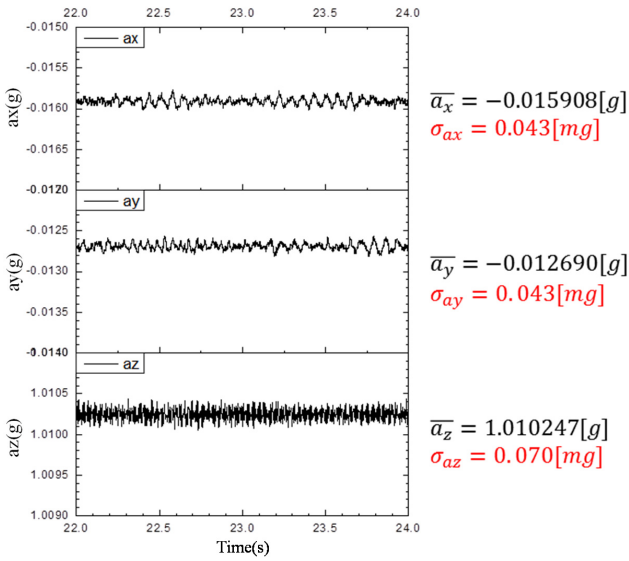


Fig. 10 Characteristics of the filtered data

## 5. 진동 모니터링 응용 소프트웨어

### 5.1 지진 모니터링 방식

가속도 센서 모듈과 DAQ를 이용하여 고속으로 받아들이는 지진계급 3축 가속도 센서의 데이터를 이용하여 연속적으로 진동을 모니터링하고 일정 수준 이상의 진동이 발생하는지 여부를 파악할 수 있는 기능을 NI LabView로 구현하였다. 이와 관련하여 기존에 주로 사용하던 구성은 3축 가속도 센서를 장착하고 각 센서가 초기 값에서 일정 수준 이상의 크기로 벗어나면 지진에 의한 진동이라고 판단하는 방식이다. 다음 수식 (1)에서  $a_x, a_y, a_z$  는 3축 방향으로 측정된 가속도 데이터이며,  $a_o$ 는 기준값, 그리고  $\Delta_{warn}$ 은 가속도의 허용 변동 범위를 의미한다. 여기서  $a_o$ 의 크기는 센서 모듈이 건물의 x/y/z축에 정확히 정렬되는 경우 1g 혹은 0g가 된다.

$$a_o - \Delta_{warn} < a_x, a_y, a_z < a_o + \Delta_{warn} \quad (1)$$

그러나 이 방법은 센서 모듈을 장착할 때마다 미세하게 달라지는 각도 변화로 인해 개별 센서의 정상 출력이 달라지므로 이상 진동을 판단하는 범위를 매번 수정해야 하는 등 설치비용이 상승하는 문제가 생긴다. 이를 해결하려면 외력이 없는 상태에서 3축 개별 가속도의 벡터 총합은 항상 지구 중력가속도인 1g와 같다는 점을 이용하면 된다. 즉 가속도의 벡터 합이 1g에서 일정 범위 이상 벗어나는 지를 확인해서 지진 발생 여부를 판단할 수 있으므로 정밀하게 설치할 때

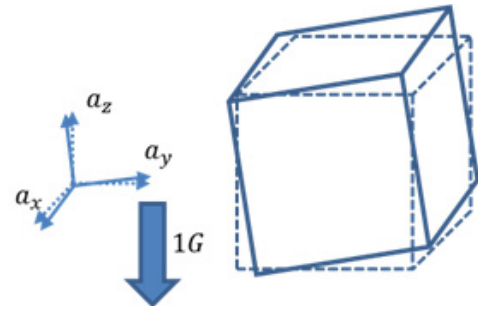


Fig. 11 The acceleration of gravity and Vector sum

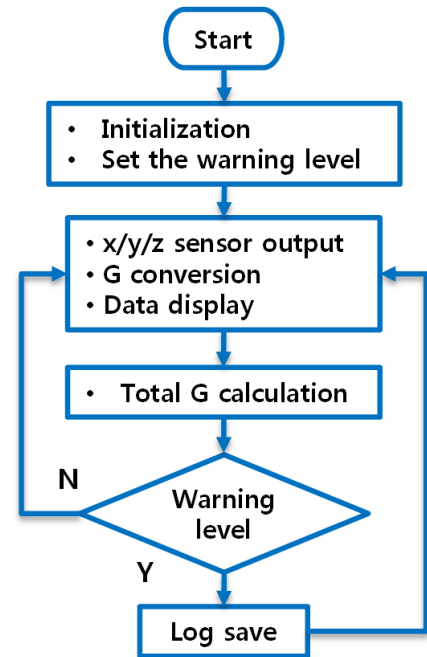


Fig. 12 The flowchart for monitoring software

요구되는 비용 문제를 피할 수 있다.

$$1g - \Delta_{warn} < G_{total} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} < 1g + \Delta_{warn} \quad (2)$$

### 5.2 지진 모니터링 소프트웨어 구현

Fig. 12는 지진 발생 여부를 모니터링 하기 위한 소프트웨어 흐름도를 보인 것이다. 3축 가속도 센서의 출력을 고속으로 순차적으로 받아들이는 다음 이들의 벡터 합을 매 순간 계산하고 이 값이 초기에 설정한 경고수준을 벗어나는지를 확인하는 방식이다.

이 때 경고 수준 이상의 외란이 들어오면 이를 의미 있는 진동이라고 판단하고 이를 알리는 신호를 발생시켜 그 순간의 각 축의 가속도 크기와 발생 시간을 로그파일에 저장하도록



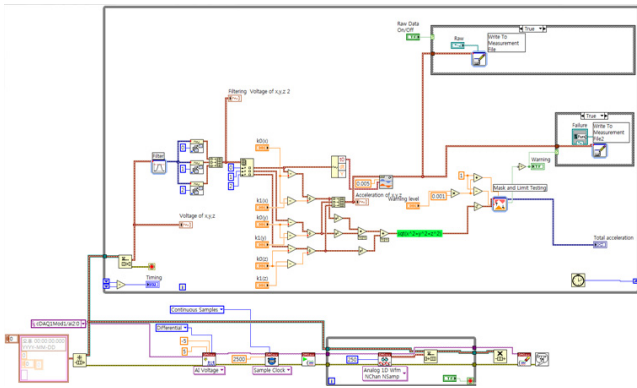


Fig. 13 The Block diagram of monitoring program

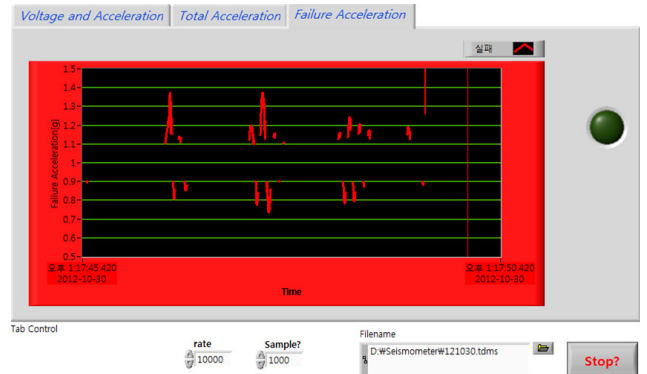


Fig. 16 Failure acceleration in the monitoring program

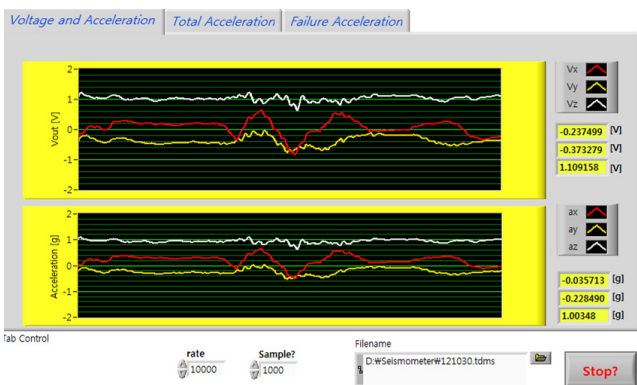


Fig. 14 Voltage and acceleration in the monitoring program

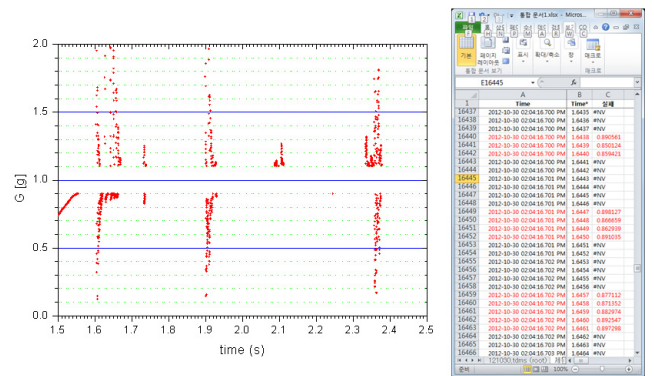


Fig. 17 The acceleration result over the preset value

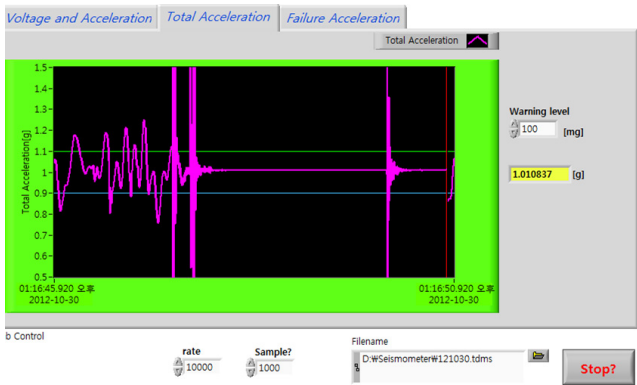


Fig. 15 Total acceleration in the monitoring program

록 구성하였다. 전체 소프트웨어는 LabView를 이용하여 구현하였으며 Fig. 13은 block diagram을 보인 것이다.

Fig. 14는 LabView로 구현한 진동 데이터 수집 결과 화면으로 3축의 센서 출력 전압으로 각 축당 입력 가속도 크기를 계산한다. 센서 출력 전압( $V_{out}$ )으로부터 실제 가속도의 크기( $a$ )는 미리 측정된 센서의 감도와 오프셋( $V_{offset}$ )으로부터 다음 수식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$a = \frac{V_{out} - V_{offset}}{sensitivity} \quad (3)$$

3축 방향의 가속도 성분의 벡터 합을 구하면 외란이 없는 상태에서는 항상 1g를 유지하고 있으므로 미리 설정한 범위 이상으로 변동하면 유의한 진동 신호라고 파악할 수 있다.

$$G_{total} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (4)$$

예를 들어 총 가속도 성분이  $1g \pm 100mg$ 의 범위를 벗어나는지 여부를 모니터링 한다면 Fig. 16과 같이 3축 가속도의 벡터 합이 0.9g 미만 혹은 1.1g 이상일 때 경고 신호를 발생시키고, 이 순간의 가속도 신호 정보를 파일에 저장한다.

Fig. 17은 설정치 이상의 진동을 검출해서 파일에 저장한 결과를 보인 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 MEMS 가속도 센서를 이용하여 3축 가속

도계를 제작하였고, 가속도계의 성능시험을 수행하였다. 또한 24bit 급 ADC를 내장한 DAQ 보드를 사용하여 DAQ의 분해능을 향상시켰다. 잡음을 줄이기 위해 100Hz LPF (Low Pass Filter)를 통과시킨 데이터를 사용하였으며 그 결과 가속도계의 동적범위를 100dB로 개선하였다. 지진 모니터링 소프트웨어를 개발하여 구조물에 유의한 진동을 감지하고자 하였으며, 진동을 감지하는 알고리즘은 각 축의 가속도 값을 별도로 판단하는 방식이 아닌 3축 가속도의 벡터 합을 이용하여 유의한 진동 여부를 판단하는 방식을 이용하였다.

현재 제안한 방식으로 간이 실험을 통해 장기간에 걸친 건물의 모니터링에 적용 가능성을 확인한 상태이다. 추후 보완해야 할 부분으로는 센서 출력에서 잡음의 속성을 분석하여 신호대 잡음비를 개선해야 하는 부분과 전체 센서 모듈의 소형화와 저전력화를 위한 보완 설계가 진행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호: 12첨단도시C11)에 의해 수행되었습니다.

#### References

1. Chen, D., Li G., Wang, J., Chen, J., He, W., Fan, Y., Deng, T., and Wang, P. (2013), A Micro Electrochemical Seismic Sensor based on MEMS Technologies, *Sensors and Actuators A*, 202, 85-89.
2. Jung, K. S., Moon, S. J., and Yoo, H. H. (2005), Responses and Modal Analysis of Micro Double Cantilever Beams Interacted by Electronic Forces, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 15(2), 199-205 (in Korean).
3. Li, G., Chen, D., Wang, J., Jian, C., He, W., Fan, W., and Deng, T. (2012), A MEMS based Seismic Sensor using the Electrochemical Approach, *Procedia Engineering*, 47, 362-365.
4. Roylance, L. M., and Angell, J. B. (1979), A Batch-fabricated Silicon Accelerometer, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 26, 1911-1917.
5. Stauffer, J. M. (2004), Market Opportunities for Advanced MEMS Accelerometers and Overview of Actual Capabilities vs. Required Specifications, *IEEE Position location and Navigation Symposium*, 78-82.
6. Tu, R., Wang, R., Ge, M., Walter, T. R., Ramatschi, M., Milkereit, C., Binde, D., and Dahm, T. (2013), Cost Effective Monitoring of Ground Motion related to Earthquakes, Landslides or Volcanic Activity by Joint Use of a Single Frequency GPS and a MEMS Accelerometer, *Geophysical Research Letter*, 40(15), 3825-3829.
7. Van Kampen, R. P., and Wolffenbuttel, R. F. (1998), Modeling the Mechanical Behavior of Bulk-micromachined Silicon Accelerometers, *Sensors and Actuators A*, 64, 137-150.
8. Yoo, T. S., LEE, S. C., Hong, S. K., and Ryuh, Y. S. (2013), Smart Filter Design for the Localization of Robotic Fish using MEMS Accelerometer, *Intelligent Autonomous Systems*, 193, 509-518.
9. Zanjani, P. N., and Abraham, A. (2010), A Method for Calibrating Micro Electro Mechanical Systems Accelerometer for Use as a Tilt and Seismograph Sensor, *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, 637-641.

Received : 12/05/2013

Revised : 01/13/2014

Accepted : 01/21/2015

## 요 지

본 연구에서는 MEMS 기반 3축 가속도 센서 모듈을 제작하여 성능 시험을 수행하였고, 지진 모니터링 시스템을 구성하였다. 3축 가속도 센서 모듈의 성능 향상을 위하여 데이터 수집장치를 24bit ADC (Analog to Digital Converter)가 내장된 NI-9239를 사용하였고, 잡음을 줄이기 위해 100Hz LPF (Low Pass Filter)를 통과시킨 데이터를 사용하였다. 또한 지진 모니터링 소프트웨어를 개발하여 구조물에 유의한 진동을 감지하는데 초점을 맞추었다. 진동을 감지하기 위한 방법으로 각 축의 가속도 크기 뿐만 아니라 3축 가속도의 벡터 합을 구하여 이 벡터 합이 미리 설정한 값을 초과할 때의 수치를 별도로 표시하고 이를 파일로 저장하는 알고리즘을 사용하였다.

**핵심 용어** : 동적 범위, 지진 모니터링 시스템, MEMS 센서, 벡터 합, 3축 가속도계