

항만구조물 건전성 모니터링을 위한 Imote2 플랫폼 기반 스마트 무선센서노드의 성능 평가

Performance Evaluation of Imote2-Platformed Wireless Smart Sensor Node for Health Monitoring of Harbor Structures

박재형* · 김정태* · 이소영*
Jae-Hyung Park*, Jeong-Tae Kim* and So-Young Lee*

요 지 : 본 연구에서는 항만구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 개발하였다. 이를 위해 첫째, 고성능 Imote2 센서 플랫폼을 기반으로 하고, 고민감도 MEMS 가속도계를 탑재한 스마트 무선센서를 설계하였다. 둘째, 스마트 무선센서가 독자적으로 모니터링을 수행할 수 있도록 하는 내장 소프트웨어를 설계하였다. 마지막으로, 개발된 스마트 무선센서의 성능을 모형 케이슨 구조물에서의 실험을 통해 검증하였다.

핵심용어 : 스마트 무선센서, Imote2, 고민감도, 가속도, 구조건전성 모니터링

Abstract : In this study, a high-sensitive smart wireless sensor based on an Imote2 sensor platform is developed for structural health monitoring of harbor structures. To achieve the objective, the following approaches are implemented. Firstly, the smart wireless sensor based on the high-performance Imote2 sensor platform is designed to measure acceleration with high sensitivity from structures. Secondly, embedded software is designed for autonomous structural health monitoring. Finally, the performance of the smart wireless sensor is estimated from experimental tests on a lab-scaled caisson structure.

Keywords : smart wireless sensor, Imote2, high-sensitivity, acceleration, structural health monitoring

1. 서 론

1980년대 이후 구조건전성 모니터링을 위한 기법들이 꾸준히 개발되고 있으며, 최근 국내외에서의 크고 작은 구조물의 붕괴사고는 구조건전성 모니터링의 중요성을 부각시키는 계기가 되었다. 현재, 국내외 초고층 빌딩이나 장대교량에 대해서는 구조건전성 모니터링 시스템을 설치하여 운용 중에 있다. 그러나 이들 구조건전성 모니터링 시스템은 장비들의 가격이 비교적 고가이며, 케이블을 설치하는데 상당한 시간이 소요된다는 단점이 있다(Farrar, 2001; Straser and Kiremidjian, 1998).

기존 구조건전성 모니터링 시스템의 단점을 극복하기 위하여 1990년대 후반에 Straser and Kiremidjian(1998)은 무선센서를 처음으로 제안하였으며, 현재 국내외 기업에서 상용화되어 판매되는 무선센서도 많이 있다. 그러나 일반적인 무선센서는 기존에 케이블을 통해 전송되던 데이터를 단지 무선으로 바꾼 정도의 기능만 가지고 있어, 확장성에 문제가 제기되었다(Nagayama, 2007). 이러한 문제점들을 극복하기 위해 많

은 연구자들은 각각의 무선센서노드에서 필요한 신호처리 및 해석기능을 수행할 수 있는 스마트 무선센서의 개발에 노력을 기울이고 있다(Spencer et al., 2004; Lynch et al., 2006; Cho et al., 2008; Rice and Spencer, 2008; Nagayama et al., 2009; Park et al., 2010).

하지만 현재까지 개발된 많은 스마트 무선센서들은 계측환경을 충분히 고려하지 않고 구조건전성 모니터링 시스템의 경제성에만 초점이 맞추어져 개발되어 왔다. 예를 들어, Lynch et al.(2006)과 Rice and Spencer(2008)이 채택한 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 타입의 가속도계들은 충분한 가진력이 구조물에 적용되어 센서 노이즈가 계측 신호에 큰 영향을 미치지 못할 경우에는 유용하지만, 항만구조물(예를 들어, 방파제나 안벽)과 같이 비교적 작은 상시하중(파력이나 풍력) 하에서 측정할 경우 이들 센서들의 적용성에는 한계가 있을 수 있다. 또한 상시하중 하에서는 비교적 오랜 시간의 계측데이터를 필요로 하기 때문에 스마트 무선센서의 연산능력이나 데이터 메모리 공간이 충분히 확보되어야 한다.

*부경대학교 해양공학과 (Corresponding author : Jeong-Tae Kim, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea, idis@pknu.ac.kr)

본 연구에서는 항만구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 개발하였다. 이를 위해 첫째, 고성능 Imote2 센서 플랫폼을 기반으로 하고, 고민감도 MEMS 가속도계를 탑재한 스마트 무선센서를 설계하였다. 둘째, 스마트 무선센서가 독자적으로 모니터링을 수행할 수 있도록 하는 내장 소프트웨어를 설계하였다. 마지막으로, 개발된 스마트 무선센서의 성능을 모형 케이스 구조물에서의 실험을 통해 검증하였다.

2. Imote2 기반 스마트 무선센서 설계

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 항만구조물의 상시진동계측에 적합한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 설계하였다. 스마트 무선센서는 무선 칩 및 메모리와 같은 주변 장치들을 제어하고 독자적인 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼과 가속도의 측정을 위한 고민감도 MEMS 센서인 SD1221 및 디지털 필터가 내장된 16 bit A/

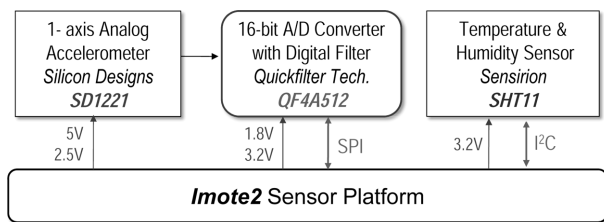


Fig. 1. Design of High-performance Smart Wireless Sensor.

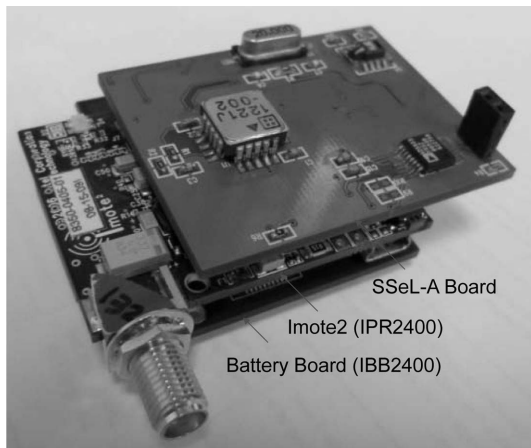


Fig. 2. Prototype of Smart Wireless Sensor.

D(analog to digital) 컨버터로 구성된다. 또한 외부 환경(온도 및 습도)의 계측을 위한 SHT11 센서가 탑재되었다. Fig. 2는 본 연구에서 개발된 스마트 무선센서를 보여주며, 아래쪽에서 부터 Memsic 사에서 판매하는 배터리 보드(IBB2400), Imote2 센서 플랫폼(IPR2400)이며, 최상층은 가속도 계측을 위해 본 연구에서 개발된 SSeL-A(Smart Structural engineering Lab's Acceleration) 센서 보드이다.

2.1 Imote2 센서 플랫폼

본 연구에서는 기존의 스마트 무선센서(Lynch et al., 2004; Kurata et al., 2005; Sazonov et al., 2006; Rice and Spencer, 2008; Nagayama et al., 2009; Park et al., 2010)에 사용된 센서 플랫폼의 성능을 바탕으로 Imote2 센서 플랫폼을 선정하였다. Imote2 센서 플랫폼은 많은 데이터를 저장하고 처리해야 하는 경우에 적합하게 설계되었다. Imote2는 저전력 X-scale 프로세서 PXA27x를 탑재하고 있으며, 256 kB의 내부 메모리, 32MB의 확장 메모리 및 32MB의 프로그램 플래쉬 메모리를 가지고 있고, 무선 칩 CC2420을 탑재하고 있다. 특히 마이크로컨트롤러인 PXA27x는 8 byte를 이용하는 double precision의 소수점 연산이 가능하여 보다 정확한 수치계산을 할 수 있다. 참고로 기존에 Lynch et al.(2004)와 Park et al.(2010)이 개발한 무선센서에서 사용된 마이크로컨트롤러 ATmega128은 4 byte를 이용한 float precision의 소수점 연산만 가능하다.

기존의 Park et al.(2010)이 개발한 Acc-SSN과 비교해 볼 때, Table 1과 같이 Imote2는 고성능 마이크로프로세서를 가지며, 많은 양의 메모리 공간을 가지고 있다. 비록 Imote2가 고속 모드에서 전력 소비량이 크고, 무선데이터 전송거리가 짧은 단점이 있지만, 그 만큼 데이터 처리속도가 빠르고, 무선데이터 전송거리는 외부 안테나의 사용에 의해 전력 소비량은 늘지만 최대 125 m까지 늘일 수 있다.

2.2 SSeL-A 센서 보드

가속도 계측을 위한 센서 보드는 (1) 가속도계의 측정 가능한 가속도 및 주파수 범위, (2) 센서 민감도, (3) 노이즈 특성, (4) Anti-Aliasing 필터, (5) A/D 컨버터의 분해능을 고려하여 설계되어야 한다. 일반적으로 토목구조물, 특히 상시진동 하에서의 항만구조물 가속도를 계측하기 위해서 고민감도 저노

Table 1. Comparison of Features of Imote2 and Acc-SSN by Park et al.(2010)

Feature	Imote2	Acc-SSN
Clock Speed (MHz)	13 - 416	16
Active Power (mW)	44/570 at 13/416 MHz	23/46 at 8/16MHz
Program Flash (Bytes)	32M	128K
RAM (Bytes)	256K + 32M external	4K + 32K external
Radio Frequency (MHz)	2400	2400
Data Rate (kbps)	250	250
Outdoor Range (m)	30	100
Power of Radio (mW)	52/59/0.06 ^(*)	149/165/0.03 ^(*)

(*): When Transmitting, Receiving and Powered-Down

Table 2. Specifications of an ICP-type and Two MEMS-type Accelerometers

Feature	PCB393B04	ADXL203	SD1221
Measurable Range (g)	± 5	± 1.7	± 2
Sensitivity (mV/g)	1000	1000	2000
Operating Voltage (V)	18~24	3~6	4.75~5.25
Operating Current (mA)	2~8	0.7~1.1	8~10
Noise Density ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	0.3	110	5
Typical Band Width (Hz)	0.02~1700	0.5~2500	~400
Cost (USD)	900	20	300

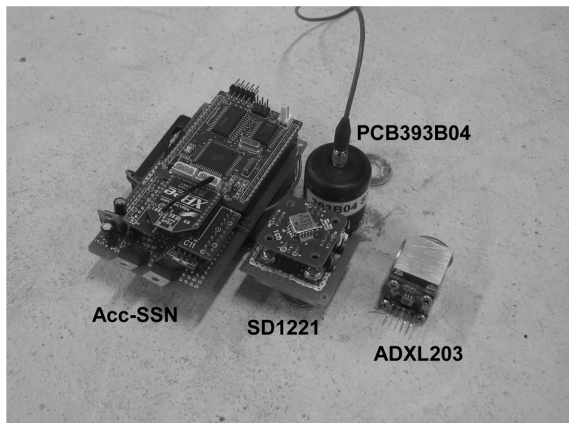
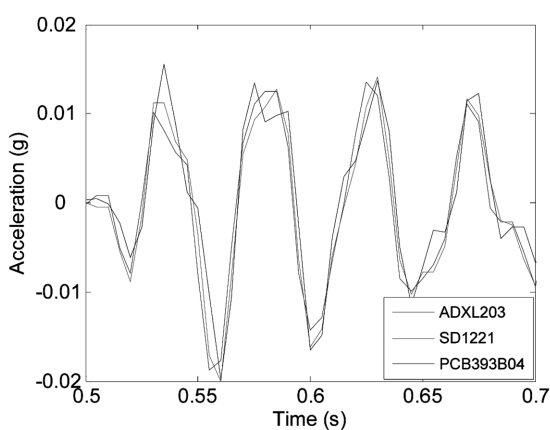
이즈 가속도계와 16bit 이상의 분해능을 가지는 신호계측 장비가 사용된다. 본 연구에서는 가속도계의 선정을 위해 Table 2와 같은 3가지 가속도계의 성능을 비교하였다. 첫 번째는 일반적으로 많이 사용되는 ICP(Integrated Circuit Piezoelectric) 타입의 가속도계 PCB393B04(PCB Piezotronics사)이고, 나머지 두 센서는 MEMS 타입의 가속도계로 각각 ADXL203 (Analog Devices사)과 SD1221(Silicon Designs사)이다.

Table 2에서와 같이 PCB393B04는 넓은 측정 가속도 및 주파수 범위를 가지고 있으며 노이즈 특성이 매우 뛰어나지만, 큰 전력을 필요로 하고 가격이 비교적 비싼 편이다. ADXL203의 경우 가격이 저렴하고 소비전력이 낮아 무선센서에 적합할 수

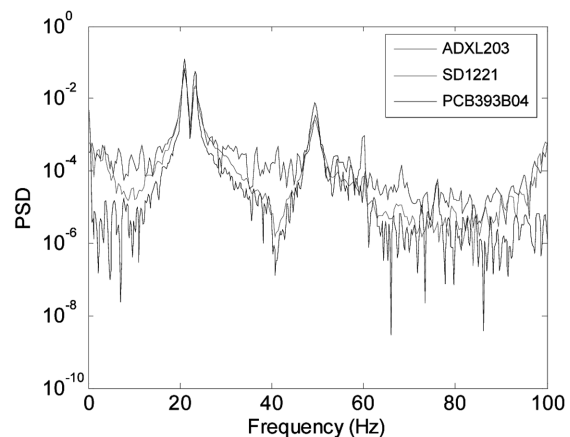
있으나, 노이즈 특성이 좋지 못하다. SD1221의 경우에는 좁은 측정 주파수 범위를 가지고 가격이 다소 비싸지만, 민감도가 크고 노이즈 특성도 비교적 좋다. 이 같은 서로 다른 3가지 센서의 계측 성능을 분석하기 위하여 Park et al.(2010)이 이용한 프리스트레스드 콘크리트 거더에 Fig. 3과 같이 각각의 센서들을 설치하여 그 성능을 비교하였다. 센서들로부터의 신호를 취득하기 위하여 PCB393B04는 관련 계측 장비인 PCB481A03 signal conditioner와 16 bit DAQ(data acquisition) 카드인 NI-6036에 연결하였으며, ADXL203과 SD1221은 Park et al.(2010)이 개발한 Acc-SSN에 연결하였다.

Fig. 4는 가진 해머를 이용한 강제진동실험을 통해 각각의 센서로부터 취득된 시간영역 가속도 응답 및 주파수영역 응답을 보여준다. Fig. 4(b)에서와 같이 피크 주파수들은 모두 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, ADXL203으로부터 받은 가속도에는 노이즈(Fig. 4(b)에서 20Hz 및 50Hz 부근의 피크를 제외한 부분)가 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 노이즈는 특히 가속도가 작은 상시진동 계측 시 손상 모니터링의 오류로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가속도 계측을 위해 SD1221 MEMS 타입 가속도계를 선정하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 SSeL-A 센서 보드를 보여준다. 센서 보드의 상부에는 SD1221 센서가 부착되었고, 온도 및 습도 계측을 위한 SHT11 센서가 부착되었다. 하부에는 16 비트 A/D 컨버터 QF4A512가 탑재되었으며, Imote2와 연결하기 위한 커넥터가 있다. A/D 컨버터 QF4A512는 Rice and

**Fig. 3.** Experimental Setup for Performance Evaluation of Three Accelerometers.

(a) Time Responses



(b) Frequency Response

Fig. 4. Time and Frequency Responses from Three Accelerometers.

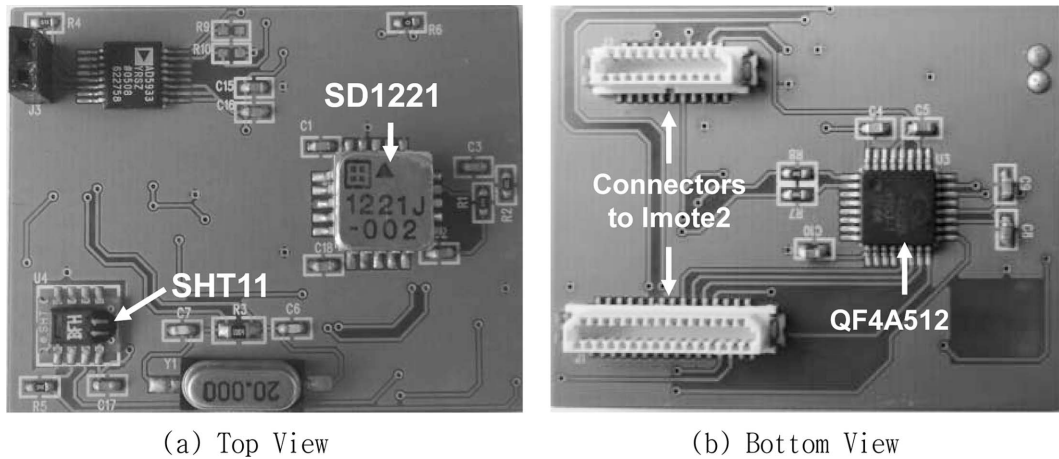


Fig. 5. SSeL-A Sensor Board for Acceleration Measurements.

Spencer(2008)에 의해 개발된 SHM-A 센서 보드에서 적용된 것으로 신호의 취득과정에서 발생하는 aliasing 효과를 방지하기 위하여 디지털 필터가 내장되어 있다. 디지털 anti-aliasing 필터는 아날로그 필터에 비해 샘플링 간격이나 cut-off 주파수의 설정이 하드웨어의 수정 없이 소프트웨어의 수정만으로 가능하다는 장점을 가진다.

3. 임베디드 소프트웨어 설계

3.1 진동기반 구조건전성 모니터링 기법

현재까지 항공/우주, 토목, 건축 구조물에 대한 진동기반 구조건전성 모니터링 기법이 많이 개발되어 적용되어 왔으나, 항만구조물 특히, 케이슨식 구조물에 대한 적용사례는 드물다. Yang et al.(2001)은 케이슨식 구조물에 대한 고체-유체 상호 해석을 통하여 지반의 액상화 현상에 기인하는 케이슨 구조물의 동적 거동을 분석하였고, 김두기 등(2005)은 고체-유체-지반의 상호응답을 고려한 동적 거동을 분석하였다. 이소영 등(2009)은 최적화 기법을 이용한 케이슨 구조물의 손상검색에 관한 연구를 수행하였고, 이소영 등(2010)은 케이슨식 방파제의 사석 마운드 손상 모니터링 기법으로서 자기회귀 모델을 이용한 기법, 주파수응답의 상관계수를 이용한 기법, 고유진동수 변화 및 모드 보증지수를 이용한 기법을 선정하고 이들 기법들의 적용성을 평가하였다.

일반적으로 진동기반 구조건전성 모니터링 기법들은 고유진동수와 모드형상과 같은 모드특성치를 주로 이용하고 있으나, 항만구조물의 경우 구조물의 대부분이 해수 중에 잠겨 있어 계측의 제약으로 인해 모드특성치의 추정이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서 개발한 스마트 무선센서의 유용성을 평가하기 위하여 비교적 간단한 방법인 주파수응답의 상관계수를 이용한 기법을 선정하였다. 임의의 구조물에서 서로 다른 시점에서 계측된 두 주파수응답함수 $H_1(f)$, $H_2(f)$ 가 있을 때, 이 두 함수를 확률변수로 취급하면 두 주파수응답함수간의 상관계수 ρ_{H_1, H_2} 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Kim et al., 2008).

$$\rho_{H_1, H_2} = \frac{E[H_1(f)H_2(f)] - \mu_{H_1}\mu_{H_2}}{\sigma_{H_1}\sigma_{H_2}} \quad (1)$$

여기서, σ_{H_1} 과 σ_{H_2} 는 각 주파수응답함수의 표준편차이고, μ_{H_1} 과 μ_{H_2} 는 각 주파수응답함수의 평균을 나타낸다. 또한 식 (1)과 같은 상관계수는 $-1 \leq \rho_{H_1, H_2} \leq 1$ 의 관계를 만족하며, 만약 손상이 발생하지 않은 경우 ρ_{H_1, H_2} 값은 1이 되며, 손상이 발생할 경우에는 1보다 작은 값을 가지게 된다. 그러나 일반적으로 계측 노이즈에 의해 ρ_{H_1, H_2} 값은 주파수 응답함수의 변화가 없음에도 1보다 작은 값을 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 관리도 해석(control chart analysis)을 통해 손상의 유무를 판별하는 기법(Sohn et al., 2001)을 사용하였다. 손상 유무를 판별하기 위한 하한관리치(lower control limit, LCL)는 다음과 같이 정의된다.

$$LCL_p = \mu_p - 3\sigma_p \quad (2)$$

여기서 μ_p 와 σ_p 는 비손상 상태에서 반복 계측된 자료로부터 구해지는 상관계수의 평균과 표준편차이며, 반복 계측된 자료가 많을수록 신뢰성이 커진다. 만약 상관계수 ρ_{H_1, H_2} 값이 하한관리치보다 작게 되면 손상이 발생했음을 의미한다.

3.2 임베디드 소프트웨어

Imote2 센서 플랫폼 기반의 스마트 무선센서를 구동시키기 위한 임베디드 소프트웨어는 Fig. 6과 같이 크게 주변장치(메모리, 무선칩, A/D 컨버터 등)를 제어하기 위한 장치 드라이버와 시간동기화 신호를 취득하기 위한 미들웨어, 그리고 구조건전성 모니터링을 수행하기 위한 응용 소프트웨어로 구성된다. 장치 드라이버와 미들웨어는 ISHMP (Illinois Structural Health Monitoring, 2010) Service Toolsuite을 이용하였으며, 응용 소프트웨어는 본 연구에서 선정된 모니터링 기법을 독자적으로 수행할 수 있도록 별도로 프로그램된 SSeL SHM tools를 사용하였다. Imote2 센서 플랫폼의 개발환경이 Linux 기반 TinyOS를 이용하기 때문에 이들 소프트웨어 역시 TinyOS를 기반으로 프로그램 되었다. TinyOS는 저전력 무선 센서의

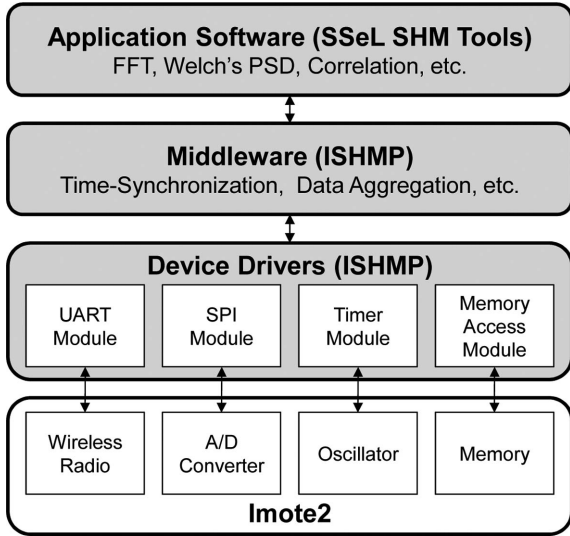


Fig. 6. Embedded Software for Autonomous Structural Health Monitoring.

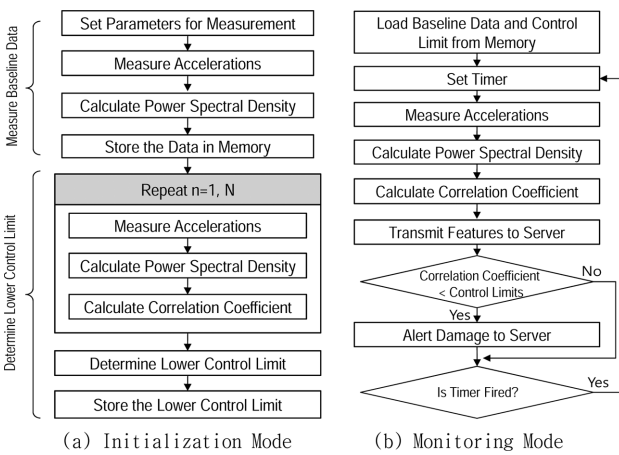


Fig. 7. Schematic of Autonomous SHM by SSeL SHM Tools.

응용을 위해 특화된 운영체제이다.

Fig. 7은 항만구조물의 독자적인 구조건전성 모니터링을 위

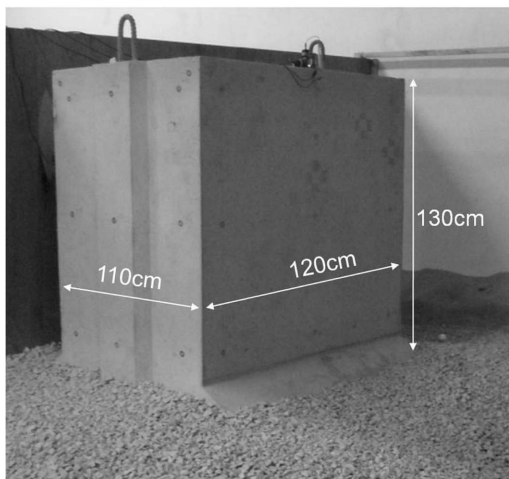
해 내장된 응용프로그램인 SSeL SHM tools의 개략도를 보여 준다. 응용프로그램은 크게 초기화(initialization) 모드와 모니터링(monitoring) 모드로 구성되어 있다. Fig. 7(a)에서와 같이 초기화 모드에서는 구조물의 기본 데이터를 수집하고, 하한관 리치를 결정하기 위해 동작하는 모드로서 스마트 무선센서가 구조물에 처음 설치되었을 때 동작한다. 초기화 이후에는 Fig. 7(b)와 같이 모니터링 모드로 동작하며 타이머가 작동하는 매 시간마다 상관계수를 계산하여 손상여부를 판별하고 손상 발생 시 서버에 경보하게 된다.

4. 스마트 무선센서의 검증

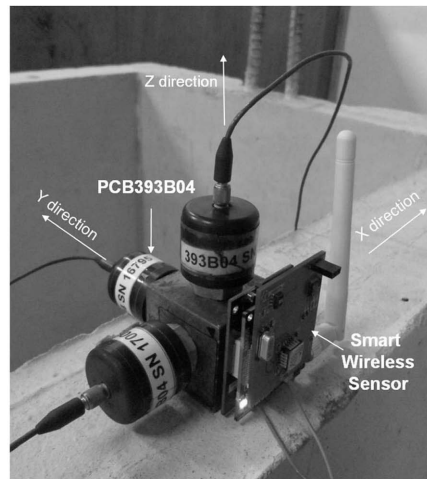
4.1 대상구조물 및 실험구성

항만구조물에 있어 스마트 무선센서의 적용성 검증을 위하여 케이슨 구조모형에 대하여 진동실험을 수행하였다. 케이슨 구조모형 크기는 Fig. 8(a)와 같이 가로 120 cm, 세로 110 cm, 높이 130 cm를 가지며, 성토된 기초마운드 위에 설치하였다. 기초마운드는 콘크리트 지반 위에 성토되었으며 40 cm 두께의 모래 성토 후, 1차 다짐을 수행하였고, 자갈을 이용하여 10 cm 두께로 모래지반을 피복한 뒤, 2차 다짐을 수행하였다.

진동응답의 계측을 위하여 Fig. 8(b)와 같이 케이슨 구조모 형의 전면벽 중앙 상부에 기존의 ICP 가속도계 PCB393B04를 3축 방향으로 설치하였으나 y 방향의 센서만 이용하였고, 스 마트 무선센서를 y축 방향의 PCB393B04 센서 반대편에 설 치하였다. PCB393B04 가속도계로부터 신호를 측정하기 위하여 PCB481A03 signal conditioner와 NI-6036 DAQ카드를 설치 하였다. 케이슨 구조모형의 진동응답을 얻기 위해 충격 해머 를 이용하여 y 방향의 충격 가진을 주었으며, 샘플링 주파수 는 기존의 시스템과 스마트 무선센서 모두 1 kHz로 하여 각 각 10초간의 데이터를 취득하도록 설정하였다. 신호의 Aliasing 효과를 피하기 위한 Low-pass filter의 cut-off 주파수는 모두 250 Hz로 설정하여 실험을 수행하였다.



(a) Caisson Structure



(b) Experimental Setup

Fig. 8. Lab-scaled Caisson Structure and Experimental Setup.

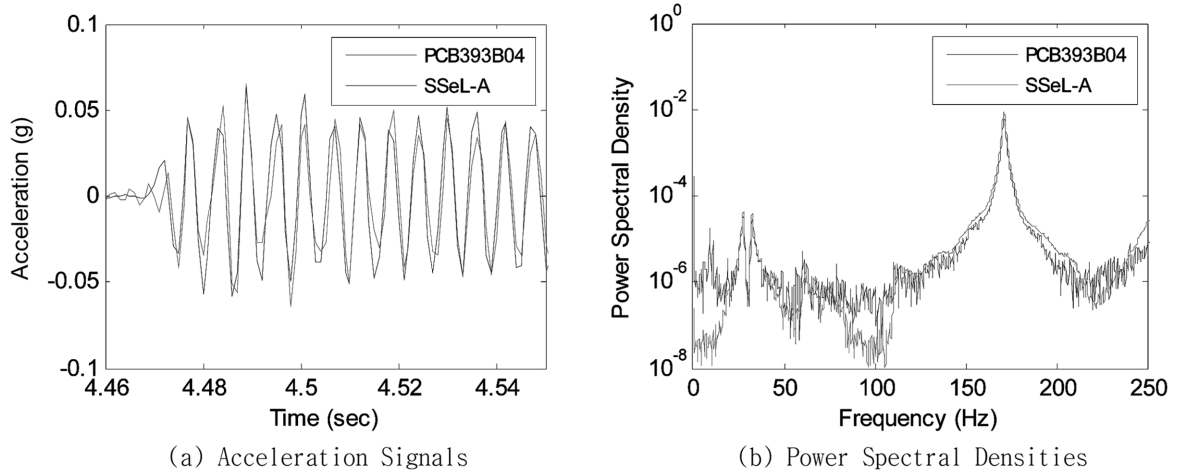


Fig. 9. Measured Acceleration Signals and Power Spectral Densities from PCB393B04 and SSeL-A Sensor Board.

4.2 스마트 무선센서의 성능검증 결과

스마트 무선센서의 성능을 검증하기 위하여 먼저 대상구조물로부터 취득된 가속도와 파워스펙트럼을 기존의 유선 계측시스템으로부터 취득된 결과와 비교하였다. Fig. 9에서와 같이 시간영역에서의 가속도 신호와 주파수영역의 파워스펙트럼이 비교적 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 스마트 무선센서의 손상모니터링 성능을 검증하였

다. 손상 시나리오는 Fig. 10과 같이 Undamaged Case와 2가지 Damage Case로 선정하였다. Damage 1의 경우는 전면벽 하부의 자갈이 부분적으로 유실된 경우이고, Damage 2의 경우는 Damage 1에서 추가적으로 모래까지 유실된 경우이다.

먼저 손상 여부를 판정하기 위한 주파수응답 상관계수의 하한관리치(LCL)를 결정하기 위하여, 즉 Fig. 7(a)와 같이 초기



Fig. 10. Damage Scenarios.

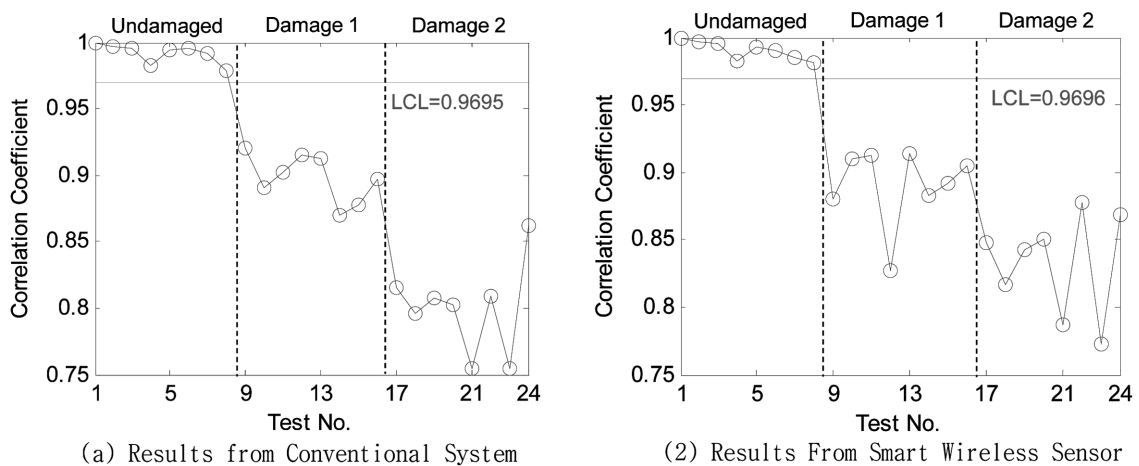


Fig. 11. SHM Results from Conventional System and Smart Wireless Sensor.

화하기 위해, Undamaged Case에서 9회의 실험을 실시한 후, 첫 번째 취득된 자료와 나머지 8회에서 취득된 자료로부터 식 (1)을 이용하여 총 8개의 주파수응답의 상관계수를 계산하였다. 다음으로, 식 (2)를 이용하여 하한한계치를 결정하였다. 기존 계측 시스템의 경우 하한한계치가 0.9695였으며, 스마트 무선센서의 경우 0.9696으로 거의 유사한 값으로 결정되었다. 마지막으로 각각에 손상 시나리오별로 8회씩 실험을 실시하여 총 24회의 손상모니터링 결과를 비교하였다. Fig. 11(a)는 기존 계측 시스템으로부터 손상이 모니터링된 결과이며, Fig. 11(b)는 스마트 무선센서에 의해 모니터링된 결과이다. 그림에서와 같이 기존 시스템 및 스마트 무선센서는 케이슨 구조물에 발생한 사석의 유실을 경보할 수 있으며, 모니터링을 위해 계산된 상관계수 또한 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 항만구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 개발하였다. 이를 위해 첫째, 고성능 Imote2 센서 플랫폼을 기반으로 하였고, 3가지 유형의 가속도계의 성능 실험을 통해 고민감도 MEMS인 SD1221 가속도계를 탑재한 SSeL-A 센서보드를 설계하였다. 둘째, 스마트 무선센서가 독자적으로 모니터링을 수행할 수 있도록 장치 드라이버, 미들웨어, SHM 응용 소프트웨어를 설계하고 스마트 무선센서에 내장하였다. 마지막으로, 개발된 스마트 무선센서의 성능을 모형 케이슨 구조물에서의 진동 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과로부터 스마트 무선센서는 기존 고가의 계측시스템과 유사한 결과를 보였으며, 이로부터 스마트 무선센서가 기존의 계측시스템을 대체할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2010-0012957)이며, 국토해양부가 지원하는 항만리모델링 기반구축 연구사업의 일부로 수행되었습니다. 또한, 실험체 제작을 지원해 주신 ㈜삼성건설 제주 해군항 건설현장 김형섭 소장님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김두기, 류희룡, 서형렬, 장성규 (2005). 가진 주파수성분에 따른 항만구조물의 지진응답특성에 관한 연구. 한국해양공학회지, 17(1), 41-46.
- 이소영, 김정태, 이진학, 강윤구 (2009). 최적화 회음탐색법을 이용한 항만 케이슨 구조물의 구조건전성 평가. 한국해양공학회지, 23(1), 122-128.
- 이소영, 김정태, 김현태 (2010). 사석마운드가 손상된 케이슨식 방파제의 진동기반 구조건전성 모니터링. 한국해양공학회지, 24(1), 90-98.
- Cho, S., Yun, C.B., Lynch, J.P., Zimmerman, A.T., Spencer B.F. and Nagayama, T. (2008). Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures. *Steel Structures*, 8, 267-275.
- Farrar, C.R. (2001). Historical overview of structural health monitoring. *Lecture Notes on Structural Health Monitoring Using Statistical Pattern Recognition*, Los Alamos Dynamics, Los Alamos, NM.
- Illinois Structural Health Monitoring Project (2010), Available from: <<http://shm.cs.uiuc.edu/>>
- Kim, J.T., Na, W.B., Ryu, Y.S., Park, J.H. and Lee, J.M. (2008). Vibration-Based Damage Monitoring Algorithm for Prestress-Loss in PSC Girder Bridges, *Proceedings of SPIE*, 6932, San Diego, CA.
- Kurata, N., Spencer, B.F. and Ruiz-Sandoval M. (2005). Risk monitoring of buildings with wireless sensor networks, *Structural Control and Health Monitoring*, 12, 315-327.
- Lynch, J.P., Wang, W., Loh, K.J., Yi, J.H. and Yun, C.B. (2006). Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors. *Smart Materials and Structures*, 15, 1561-1575.
- Lynch, J.P., Law, K.H., Kiremidjian, A.S., Carryer, E., Farrar, C.R., Sohn, H., Allen, D.W., Nadler, B., and Wait, J.R. (2004). Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), 393-408.
- Nagayama, T. (2007). Structural health monitoring using smart sensors. Ph.D Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, UC.
- Nagayama, T., Spencer, B.F. and Rice, J.A. (2009). Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors. *Structural Control and Health Monitoring*, 16, 842-859.
- Park, J.H., Kim, J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D., Lynch, J.P. (2010). Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements. *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 711-730.
- Rice, J.A. and Spencer, B.F. (2008). Structural Health Monitoring Sensor Development for the Imote2 Platform. *Proceedings of SPIE*, 6932, San Diego, CA.
- Sazonov, E., Jha, R., Janoyan, K., Krishnamurthy, V., Fuchs, M. and Cross, K. (2006). Wireless intelligent sensor and actuator network (WISAN): a scalable ultra-low-power platform for structural health monitoring, *Proceedings of SPIE*, 6177, San Diego, CA.
- Sohn, H., Farrar, C.R., Hemertz, F.M., Shunk, D.D., Stinemat, D.W. and Nadler, B.R. (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, Los Alamos, NM.

Spencer, B.F., Ruiz-Sandoval, M.E. and Kurata, N. (2004). Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11, 349-368.

Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S. (1998). A modular, wireless damage monitoring system for structure. Technical Report 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.

Yang, Z., Elgamal, A., Abdoun, T., and Lee, C.J. (2001). A numer-

ical study of lateral spreading behind a caisson-type quay wall, *Proceedings of Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium*, San Diego, CA.

원고접수일: 2010년 10월 7일

수정본채택: 2010년 12월 8일

게재확정일: 2010년 12월 13일