

Imote2 플랫폼 기반 스마트 무선센서노드를 이용한 항만구조물 건전성 모니터링

Structural Health Monitoring of Harbor Structures using Imote2-Platformed Smart Wireless Sensor Node

박재형*·이소영**·김정태***

Park, Jae-Hyung · Lee, So-Young · Kim, Jeong-Tae

요약

본 연구에서는 항만 구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 스마트 무선센서의 적용성을 평가하였다. 이를 위해 먼저, 고민감도 MEMS 가속도계를 탑재한 Imote2 센서 플랫폼 기반 스마트 무선센서를 설계하였다. 둘째, 스마트 무선센서노드의 독자적인 구조 상태 모니터링을 위한 내장 소프트웨어를 설계하였다. 마지막으로, 모형 케이슨 구조물의 진동실험을 통해 개발된 스마트 무선센서의 성능을 검증하였다.

keywords : 스마트 무선센서, Imote2 고민감도, 구조건전성 모니터링

1. 서론

국내·외에서의 대형 구조물의 붕괴로 인한 인명 또는 재산 피해가 발생하고 있다. 이같은 구조물의 붕괴를 미연에 방지하기 위해 구조건전성 모니터링에 관한 연구가 꾸준히 수행되고 있다. 현재, 국내·외에서 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). 이러한 단점을 극복하기 위하여 무선시스템이 응용 및 적용되고 있으며, 무선센서를 이용한 구조건전성 모니터링 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Lynch et al., 2006; Park et al., 2010). 하지만 현재까지 개발된 많은 스마트 무선센서들은 계측환경을 충분히 고려하지 않고 구조건전성 모니터링 시스템의 경제성에만 초점이 맞추어져 개발되어 왔다. MEMS 타입의 가속도계들은 충분한 가진력이 구조물에 적용되어 센서 노이즈가 계측 신호에 큰 영향을 미치지 못할 경우에는 유용하지만, 항만구조물에 적용하기 위해서는 비교적 오랜 시간의 계측데이터를 필요로 하기 때문에 스마트 무선센서의 연산능력이나 데이터 메모리 공간이 충분히 확보되어야 한다.

본 연구에서는 항만 구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 개발하였다. 이를 위해 첫째, 고민감도 MEMS 가속도계를 탑재한 Imote2 센서 플랫폼 기반 스마트 무선센서를 설계하였다. 둘째, 스마트 무선센서노드의 독자적인 구조 상태 모니터링을 위한 내장 소프트웨어를 설계하였다. 마지막으로, 모형 케이슨 구조물의 진동실험을 통해 개발된 스마트 무선센서의 성능을 검증하였다.

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 박사후연구원 cross96@pknu.ac.kr

** 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 박사과정 lsy84@pknu.ac.kr

*** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 idis@pknu.ac.kr

2. Imote2 기반 스마트 무선센서 설계

본 연구에서는 그림 1과 같이 항만구조물의 상시진동계측에 적합한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 설계하였다. 무선통신 모듈은 많은 데이터를 저장하고 처리해야하는 경우에 적합하게 설계된 Imote2를 선정하였으며, 가속도계는 Park 등(2010)의 가속도계 성능비교 결과를 바탕으로 SD1221 MEMS 타입 가속도계를 선정하였다. 그림 2는 본 연구에서 개발된 스마트 무선센서를 보여주며, 아래쪽에서부터 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. SSeL-A 센서 보드의 상부에는 SD1221 센서가 탑재되었고, 온도 및 습도 계측을 위한 SHT11 센서가 탑재되었다. 하부에는 16비트 A/D 컨버터 QF4A512가 탑재되었으며, Imote2와 연결하기 위한 커넥터가 있다(그림 3).

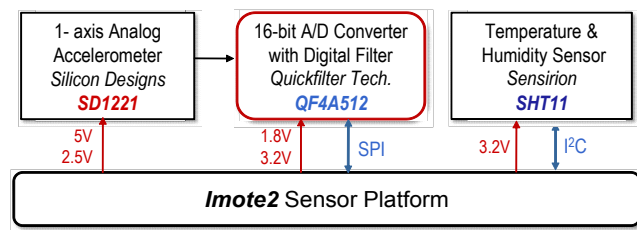


그림 1 스마트 무선센서의 설계

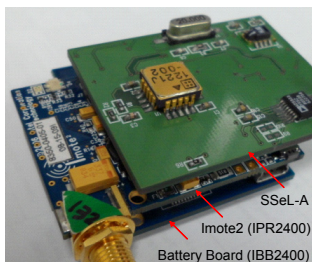
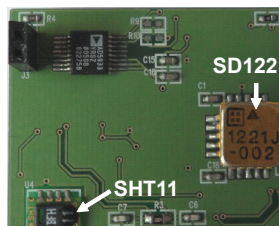
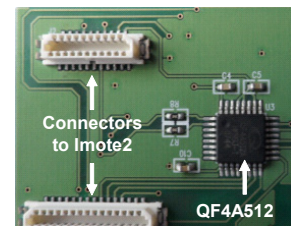


그림 2 스마트무선센서



(a) 앞면



(b) 뒷면

그림 3 가속도 응답 계측을 위한 SSeL-A 센서보드

3. 내장 소프트웨어 설계

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.

Imote2 센서 플랫폼 기반의 스마트 무선센서를 구동시키기 위한 임베디드 소프트웨어는 그림 4와 같이 메모리, 무선칩, A/D 컨버터 등을 제어하기 위한 장치 드라이버와 시간동기화 신호를 취득하기 위한 미들웨어, 그리고 구조건전성 모니터링의 수행을 위한 응용프로그램으로 구성된다. 장치드라이버와 미들웨어는 ISHMP Service Toolsuite을 이용하였으며, 응용 소프트웨어는 본 연구에서 선정된 모니터링 기법을 독자적으로 수행할 수 있도록 프로그램된 SSeL SHM tools를 사용하였다. 그림 5는 항만구조물의 독자적인 구조건전성 모니터링을 위해 내장된 응용프로그램인 SSeL SHM tools의 개략도를 보여준다. 응용프로그램은 구조물의 기본 데이터를 수집하고, 하한관리치를 결정하기 위해 동작하는 초기화모드와 타이머가 작동하는 매 시간마다 상관계수를 계산하여 손상여부를 판별하고 손상 발생 시 서버에 경보하는 모니터링모드로 구성되어 있다.

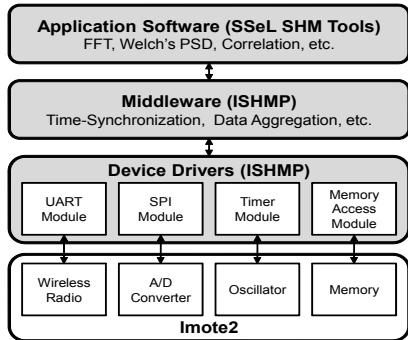
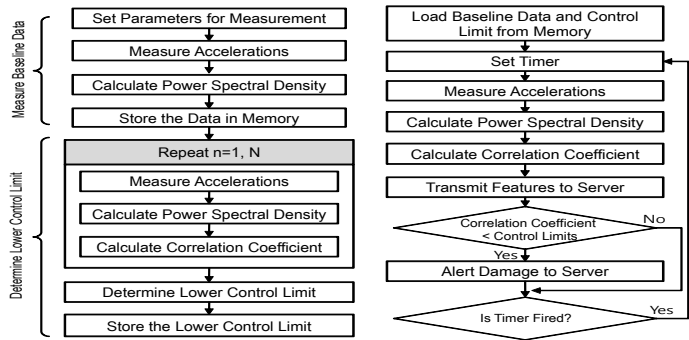


그림 4 구조건전성 모니터링을 위한 내장 소프트웨어



(a) 초기화 모드 (b) 모니터링 모드

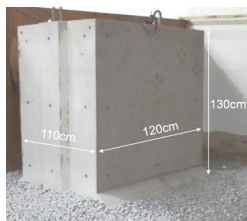
그림 5 SSEL SHM Tool을 통한 구조건전성 모니터링 개략도

4. 스마트 무선센서의 성능 검증

스마트 무선센서의 적용성 검증을 위하여 케이슨 구조모형에 대하여 진동실험을 수행하였다. 대상 모형케이스 구조물을 그림 6(a)와 같다. 케이슨 구조모형 크기는 가로 120cm, 세로 110cm, 높이 130cm를 가지며, 성토된 기초마운드 위에 설치하였다. 기초마운드는 콘크리트 지반 위에 성토되었으며 40cm 두께의 모래 성토 후, 1차 다짐을 수행하였고, 자갈을 이용하여 10cm 두께로 모래지반을 피복한 뒤, 2차 다짐을 수행하였다. 스마트 무선센서의 손상모니터링 성능검증을 위하여 손상시나리오로서 비손상 상태와 두 가지의 손상상태를 고려하였다. 이때, 손상 1은 그림 6(b)와 같이 모형케이슨 전면벽 하부의 자갈사석이 부분적으로 유실된 상태이며, 손상 2는 그림 6(c)와 같이 손상 1의 상태에 추가적인 지반 손상이 발생한 상태이다.

진동응답의 계측을 위하여 그림 7(a)와 같이 케이슨 구조모형의 전면벽 중앙 상부에 유선 ICP 가속도계(PCB393B04)와 스마트 무선센서(SSEL-A)를 설치하였다. 진동응답 분석에는 y방향의 가속도응답만을 이용하였다. 충격 해머에 의한 y 방향의 충격 가진응답을 계측하였으며, 가속도 신호의 샘플링 주파수는 1kHz로서 기존의 시스템과 스마트 무선센서 모두 동일하게 설정하였다.

유·무선 계측시스템에 의한 가속도응답과 파워스펙트럼 밀도를 그림 7(b)와 그림 7(c)에 함께 나타내었으며, 유·무선 계측시스템의 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 다음으로 스마트 무선센서의 손상모니터링 성능을 검증하였다. 먼저, 손상 여부를 판정하기 위한 주파수응답 상관계수의 하한관리치(LCL)를 결정하기 위하여 비손상상태에서 9회의 실험을 실시한 후, 첫 번째 취득된 자료와 나머지 8회에서 취득된 자료로부터 총 8개의 주파수응답의 상관계수 및 하한관리치를 결정하였다. 다음, 각각의 손상 시나리오별로 8회씩 실험을 실시하여 총 24회의 손상모니터링 결과를 비교하였다. 손상 모니터링 결과를 그림 8에 나타내었다. 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.



(a) 모형케이슨

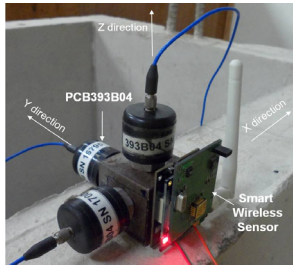


(b) 손상 1

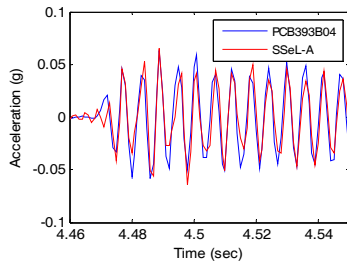


(c) 손상 2

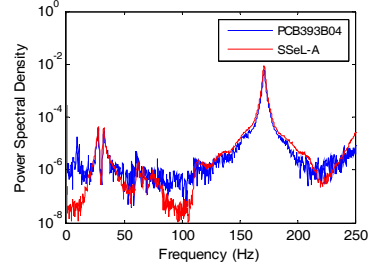
그림 6 모형케이슨과 손상시나리오



(a) 센서의 설치위치 및 방향

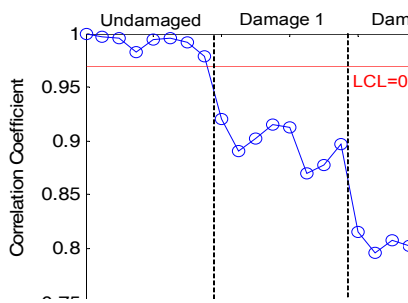


(b) 가속도 신호

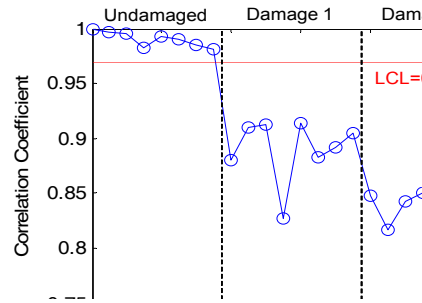


(c) 파워스펙트럼 밀도

그림 7 센서의 설치 및 진동응답 신호



(a) 유선센서에 의한 상관계수 변화



(b) 무선센서에 의한 상관계수 변화

그림 8 유/무선센서에 의한 상관계수 변화 결과 비교

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 항만 구조물의 구조건전성 모니터링을 위한 Imote2 센서 플랫폼 기반의 고민감도 스마트 무선센서를 개발하였다. 이를 위해 고민감도 MEMS 가속도계를 탑재한 Imote2 센서 플랫폼 기반 스마트 무선센서와 스마트 무선센서노드의 독자적인 구조 상태 모니터링을 위한 내장 소프트웨어를 설계하였다. 다음으로 모형 케이스 구조물의 진동실험을 통해 개발된 스마트 무선센서의 성능을 검증하였다. 실험 결과로부터 스마트 무선센서는 기존의 유선 계측시스템을 대체 할 수 있을 만한 성능을 보였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원하는 항만리모델링기반건축 연구사업 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2010-0012957)의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

- 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.
- Park, J.H., Kim, J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D., and 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), pp.711~730.
- 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.
- 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, pp.1561~1575.