모드해석 기법이 내장된 가속도기반 무선센서노드 개발

Acceleration-based Wireless Sensor Nodes Embedding Output-only Modal Analysis

박 재 형* • 김 정 태** • 류 연 선*** • 윤 정 방****
Park, Jae-Hyung • Kim, Jeong-Tae • Ryu, Yeon-Sun • Yun, Chung-Bang

요 약

본 논문에서는 모드해석 기법이 내장된 가속도기반 무선센서노드을 개발하였다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다. 첫째, 가속도 데이터를 취득하고 분석할 수 있는 가속도기반 무선센서노드를 설계하였다. 둘째, 무선센서노드를 이용한 구조건전성모니터링에 적합한 모드해석 기법으로 주파수영역분해법을 선정하였다. 셋째, 무선센서노드에서 모드해석을 독자적으로 수행하기 위한 분산 무선센서 네트워크기반 모드해석 알고리즘을 설계하고 무선센서노드에 내장하였다. 마지막으로, 개발된 무선센서노드를 PSC 거더 모형에 설치하고 기존 구조건전성모니터링 시스템과의 성능비교를 통해 검증하였다.

keywords : 무선센서노드, 모드해석, 주파수영역분해법, *Autonomous operation, Embedded system*

1. 서 론

진동기반 구조건전성모니터링은 구조물의 고유진동수, 모드형상 등과 같은 동특성의 변화를 계측하여 구조물의 강성 저하, 지점부의 손상과 같은 구조건전성의 이상상태를 모니터링하는 것을 말한다. 현재까지 세계 각국에서는 주요 국가기반시설물에 구조건전성모니터링 시스템을 설치하여 운용 중에 있다. 그러나 최근 기존 구조건전성 모니터링 시스템의 설치가 어렵고 비용이 과대하다는 단점을 보완하기 위하여 국외적으로 무선센서노드의 개발이 활발히 진행되고 있다(Spencer 등, 1998, Lynch 등, 2006). 그러나 무선센서노드는 배터리로 인한 전원공급의 제약을 가지고 있어 단순한 무선데이터 전송에 대한 효율성에 문제가 제기되었다.

무선센서노드에는 마이크로프로세서가 내장되어 있어 이를 이용할 경우 무선센서노드 자체적으로 자동화된 구조건전성모니터링이 가능해 질 수 있으며 수많은 데이터 전송에 따른 배터리 소모를 줄일 수 있다. 이와 같은 무선센서노드의 장점과 구조건전성모니터링을 위해 고유진동수, 모드형상과 같은 모드해석이 선행되어야한다는 점을 고려하여 Nagayama(2007)와 Zimmerman 등(2008)은 무선센서노드에 모드해석 기법을 내장하고자 하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 독자적으로 모드해석을 수행할 수 있는 가속도기반 무선센서노드을 개발하였다. 이를 위해 첫째, 가속도 데이터를 취득하고 분석할 수 있는 가속도기반 무선센서노드를 설계하였다. 둘째, 무선센서노드를 이용한 구조건전성모니터링 환경에 적합한 모드해석 기법을 선정하였다. 셋째, 무선센서노드에서 모드해

* 정회원 • 부경대학교 해양공학과 박사후연구원 cross96@pknu.ac.kr
** 정회원 • 부경대학교 해양공학과 교수 idis@pknu.ac.kr
*** 정회원 • 부경대학교 해양공학과 교수 ysryu@pknu.ac.kr
**** 정회원 • 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 ycb@kaist.ac.kr

석을 독자적으로 수행하기 위한 분산 무선센서 네트워크기반 모드해석 알고리즘을 설계하고 센서노드에 내장하였다. 마지막으로, 개발된 무선센서노드를 PSC 거더 모형에 설치하고 해머 가진을 통해 모드계수를 추출하고, 기존 상용장비로부터 추출된 모드계수와 비교하여 무선센서노드의 성능을 검증하였다.

2. 가속도기반 무선센서노드

가속도기반 무선센서노드는 그림 1과 같이 전원부, MEMS 가속도계(SD1221, Silicon Design사), coupling capacitor, 신호증폭기, anti-aliasing(AA) 필터, analog-to-digital convertor, 마이크로컨트롤러, 무선 칩으로 구성된다. 전원은 4개의 AAA 배터리(6V)를 이용하였으며, AA 필터로는 8차 Butterworth low-pass 필터를 이용하였다. 또한 신호취득 및 신호처리를 위해 ATmega128(ATMEL사) 마이크로컨트롤러를 사용하였으며, 데이터 송수신을 위해 2.4GHz 대역을 이용하는 Xbee(Digi사)을 사용하였다. 그림 2는 본 연구에서 개발된 무선센서노드이다.

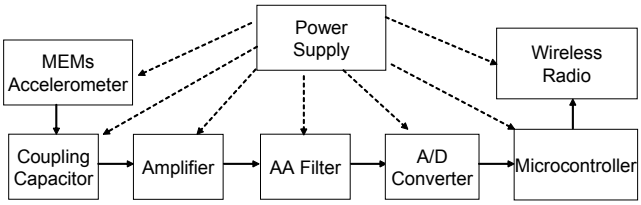


그림 1 가속도 기반 무선센서노드 설계

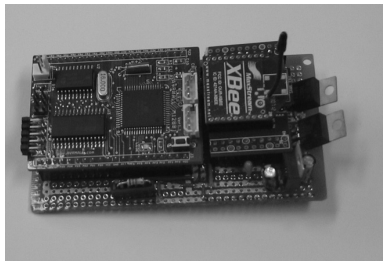


그림 2 (본 연구 개발)가속도 기반 무선센서노드

3. 모드해석기법

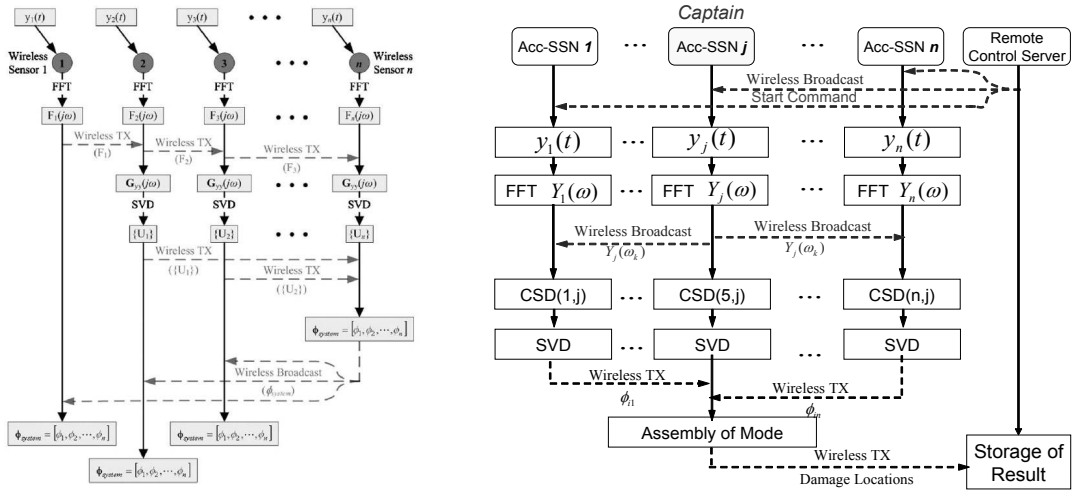
진동기반 구조건전성모니터링은 구조물의 고유진동수, 모드형상 등과 같은 동특성의 변화를 계측하여 구조물의 강성 저하, 지점부의 손상과 같은 구조건전성의 이상상태를 모니터링하는 것을 말한다. 이와 같은 구조건전성모니터링을 위해서는 고유진동수, 모드형상과 같은 모드해석이 선행되어야한다. 이를 위해 현재까지 많은 실험모드해석 기법들이 개발되어져 왔다. Yi 등(2004)는 2개의 주파수영역 기법(peak-peaking(PP)법, 주파수영역분해법(FDD)),과 4가지의 시간영역기법(Ibrahim 시간영역 기법(ITD), eigensystem realization 기법(ERA), 확률론적 부공간 규명법(SSI/BR와 SSI/CVA))에 대하여 그 성능을 평가하였고, 대체적으로 FDD 기법이 시간영역 기법에 비해 정확도는 떨어지지만 빠른 시간 내에 수행할 수 있으며, ERA, SSI기법들은 정확도는 높지만 계산이 복잡하고 시간이 오래 걸리는 것으로 나타났다.

실제 모드해석기법이 무선센서노드에 내장한 연구로서 Nagayama(2007)는 Natural excitation 기법(NExT)과 ERA기법을 이용하였으며, 이때 데이터 전송량은 n_s개의 무선센서노드로부터 N개의 데이터를 받았을 때 $N+N/2\times(n_s-1)$개였다. 이에 반해 Zimmerman 등(2008)은 FDD 기법을 무선센서노드에 내장하였으며, 이때 데이터 전송량은 NM개의 모드를 고려하여 $2\times(n_s-1)+2\times(n_s-2))\times NM$개로 Nagayama의 연구에 비해 데이터 전송량이 매우 작다는 것 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FDD 기법을 개발된 가속도기반 무선센서노드에 내장하기 위하여 선정하였다.

4. 분산 무선네트워크 기반 모드해석 알고리즘

Zimmerman 등(2008)은 그림 3(a)와 같이 각 무선센서노드들은 자신이 취득한 신호를 인근의 무선센서노드로 전송하고 모드해석을 수행한 뒤 각각의 결과를 1개의 무선센서노드에서 취합하여 모드를 추출하는 방법을 이용하였다. 하지만 이들 기법은 전술한 바와 같이 여전히 많은 양의 데이터 통신이 필요로 하게 되며, 모드 취합과정에서 모드 절점이 기준 센서로 사용될 경우 큰 오차로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 3(b)와 같이 captain 센서노드의 가속도 신호를 broadcast하여 모드해석을 수행하는 분산 무선센서 네트워크기반의 모드해석 알고리즘을 설계하였다. 제안된 모드해석 알고리즘은 다음과 같이 동작한다.

(1) 신호 측정을 위해 원격제어 서버에서 각 무선센서노드로 시작 명령 전송한다.
(2) 각 센서노드는 신호를 취득하고 메모리에 데이터를 저장한다.
(3) 각 센서노드는 내장 FFT 알고리즘을 이용하여 주파수 응답 및 고유진동수를 계산한다.
(4) Captain 센서노드는 대상모드와 관련된 주파수 응답 값을 다른 모든 센서 노드로 broadcast 한다.
(5) 각 센서노드는 파워스펙트럼 행렬을 구성하여 특이치 분해를 수행하고, 모드형상을 추출한다.
(6) 각 센서노드는 각각의 추출된 모드형상을 Captain 센서로 전송한다.
(7) Captain 센서노드는 각 모드형상을 조합하여 최종 모드형상을 추출하여 서버로 전송한다.

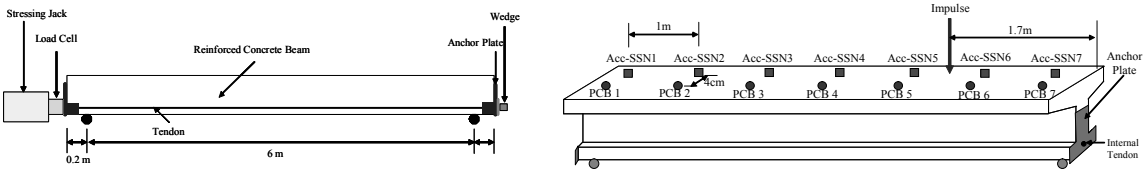


(a) (Zimmerman 등) 모드해석 알고리즘 (b) (본 연구 제안) 모드해석 알고리즘

그림 3 분산 무선네트워크기반 진동모드해석 알고리즘

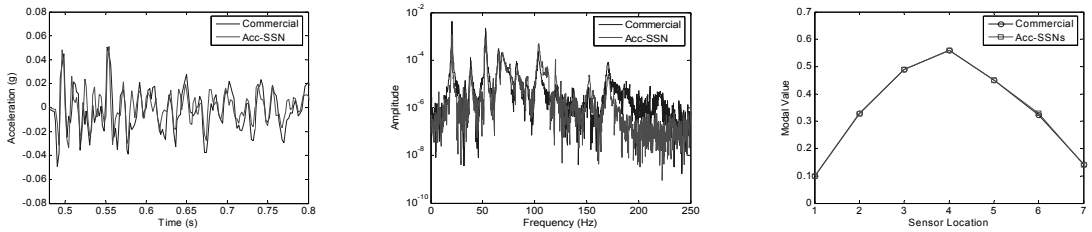
5. 실험 검증

본 연구에서 개발된 가속도 기반 무선센서노드의 성능을 평가하기 위하여 그림 4(a)와 같은 PSC 거더 모형에 그림 4(b)와 같이 가속도 기반 무선센서노드를 설치하였다. 또한 무선센서노드의 성능 비교를 위하여 각 무선센서노드 옆에 기존에 많이 사용되는 상용 가속도계(PCB393B04)를 함께 설치하였다. 가속도 신호의 취득을 위하여 500Hz의 sampling 주파수를 각각 설정하였고, 그림 4(b)에서와 같이 충격하중을 가하였다. 그림 5는 무선센서노드에 의해 취득된 가속도 신호 및 계산된 주파수 응답과 모드형상을 보여주며, 또한 기존의 상용센서로부터 취득된 데이터와 off-line으로 직접 해석한 결과와 비교한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 가속도 신호와 주파수 응답 및 해석된 모드형상이 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다.



(a) PSC 거더 모형 (b) 실험 계획

그림 4 무선센서노드의 성능평가를 위한 실험 구성



(a) 가속도 응답(각 센서 3번 위치) (b) 주파수 응답(각 센서 3번 위치) (c) 모드형상(1차)

그림 5 가속도기반 무선센서노드와 기존 상용장비로부터 추출된 진동특성 비교

6. 결론

본 논문에서는 독자적으로 모드해석을 수행할 수 있는 가속도기반 무선센서노드을 개발하였다. 이를 위해 먼저 가속도기반 무선센서노드를 설계하였다. 다음으로 무선센서 노드에 효율적인 모드해석 기법으로 주파수 영역분해법을 선정하고 무선센서노드에 내장하였다. 마지막으로, 개발된 무선센서노드를 PSC 거더 모형에 설치하고 무선센서노드의 성능을 검증하였다. 성능 검증을 통해 제안된 무선센서노드가 기존 상용 계측 시스템과 유사하게 모드를 추출할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 연구비 지원(R11-2002-101 -03002-0)으로 이루어졌으며, 저자는 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

Spencer, B.F., Ruiz-Sandoval, M.E. and Kurata, N. (2004. Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges, *Structural Control and Health Monitoring*, 11, pp.349~358.

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 Material and Structures*, 15, pp.1561~1575.

Nagayama, T. (2007) Structural Health Monitoring Using Smart Sensors", Ph.D. Dissertation, *University of Illinois at Urbana-Champaign, UC.*

Zimmerman, A.T., Shiraishi, M., Swartz, R.A. and Lynch, J.P. (2008) Automated Modal Parameter Estimation by Parallel Processing within Wireless Monitoring System, ASCE, Journal of Infrastructures Systems, 14(1), pp.102~113.

Yi, J.H. and Yun, C.B. (2004) Comparative Study on Modal Identification Methods using Output-only Information, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), pp.445-466.