

# WSN을 위한 Xenomai의 실험적 성능평가

손태영, 임성락\*  
호서대학교 컴퓨터공학부

## An Experimental Performance Evaluation with Xenomai for WSN

Tae-Yeong Son, Seong-Rak Rim\*  
Division of Computer Engineering, Hoseo University

**요약** 다리 혹은 건물과 같은 구조물들은 그들의 안전상태를 진단하기 위하여 지속적으로 점검할 필요가 있다. 그러나 사람이 이러한 구조물의 모든 지점을 직접적으로 접근하여 점검해야 하는 치명적인 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 오늘날에는 WSN(Wireless Sensor Node)를 이용한 SHM(Structural Health Monitoring)에 대한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 WSN을 이용한 SHM에서 보다 정밀한 점검을 위하여 실시간 처리를 제공하는 Xenomai의 성능을 기존 리눅스 커널과 실험적으로 비교 평가하였다. 이를 위하여 상용 임베디드 보드인 라즈베리 파이(Raspberry Pi) 보드의 기존 리눅스 커널에 Xenomai를 패치 시키고, 캔틸레버 빔(cantilever beam)의 고유 주파수(natural frequency)를 분석하기 위하여 가속도 센서로부터 z-축 진동 데이터를 주기적으로 읽어 들이는 태스크를 구현하였다. 동일한 방법으로 기존 리눅스 커널에서 데이터를 측정 후, Smart Office Analyzer를 이용하여 캔틸레버 빔의 고유 주파수를 분석하였다. 마지막으로, WSN을 위한 Xenomai의 타당성을 검토하기 위하여 가속도 센서의 z-축 진동 데이터를 유선으로 측정하여 동일한 방법으로 비교 분석하였다.

**Abstract** Structures like bridges or buildings need to be checked continuously to diagnose their safety. However, it is extremely difficult for the people who access such structures to check all areas directly. To overcome this problem, there is a lot of active research into structural health monitoring (SHM) with wireless sensor nodes (WSNs). In this paper, for more accurate checking of SHM with WSNs, we experimentally compare and evaluate the performance of Xenomai, which provides real-time processing under the traditional Linux kernel. For this purpose, we patch Xenomai into the traditional Linux kernel of a commercial embedded board, Raspberry Pi, and implement a task that periodically reads vibration data of the z-axis from an accelerometer in order to analyze the natural frequency of cantilever beams. Reading the data from the traditional Linux kernel with the same method, we analyze the natural frequency of the cantilever beams using Smart Office Analyzer. Finally, to review the validity of Xenomai for WSNs, we obtain vibration data on the z-axis from the accelerometer via wired network and compared and analyzed them the same way.

**Keywords** : Natural Frequency, Raspberry Pi, SHM(Structural Health Monitoring), WSN(Wireless Sensor Node), Xenomai

### 1. 서론

건물이나 교량 같은 구조물의 안전을 위해서는 지속

적인 점검이 필요하다. 하지만 이러한 구조물의 경우 사람이 쉽게 접근하기 어려운 장소들이 있어 구조물의 모든 장소의 정보를 파악하기 쉽지 않다. 사람이 쉽게 접근

\*Corresponding Author : Seong-Rak Rim(Hoseo Univ.)

Tel: +82-41-540-5708 email: srrim@hoseo.edu

Received September 22, 2016

Accepted January 6, 2017

Revised (1st October 25, 2016, 2nd November 2, 2016)

Published January 31, 2017

하지 못하는 위험이 있는 장소의 정보를 얻기 위한 방법으로 SHM(Structural Health Monitoring)이 연구되고 있다[1].

SHM 시스템에서는 가속도계, 풍향풍속계, 변형률계 등의 구조물에 상태를 확인하기 적합한 센서를 설치하여 모니터링 한다[2]. 구조물의 SHM 시스템을 구축하기 위해서는 많은 수의 센서 노드가 필요하다. 유선 센서 노드를 사용할 경우 설치와 관리에 많은 비용이 소모된다. 무선 센서 노드를 사용할 경우 유선 센서 노드의 단점을 해결할 수 있어 SHM 시스템에 무선 센서 노드를 적용한 연구가 진행되고 있다[3].

최근 MEMS(micro-electro-mechanical systems)의 무선 통신과 소형화 기술이 발전함에 따라 저비용과 저전력에 다양한 기능을 가지는 센서 노드의 개발이 가능해졌다[4]. WSN 기술은 매우 중요한 기술 중에 하나로 군사, 수질 관리, 의료 기술과 같이 다양한 분야에 이용할 수 있다[5].

WSN을 사용하기 위해 필요한 기술로는 센서 노드, 센서 노드를 위한 운영체제, 센서 노드와 운영체제 또는 센서 노드들끼리 정보를 교환하기 위한 프로토콜, 전력 소모 절감 기술 등으로 구성된다[6]. WSN을 위한 선행 연구들은 센서 노드, 정보를 교환하기 위한 프로토콜, 전력 소모 절감 기술들이 연구되었다.

SHM 시스템에 WSN을 적용한 사례들은 주로 교량이나 고층 건물을 위한 방법들이 연구 되었다[7]. [8]에서는 WSN을 사용하는 경우 배터리를 전원으로 사용하는 WSN의 전력 문제를 해결하기 위해서 에너지 저장(Energy Harvesting) 기술을 적용시킴으로써 전력 소모 절감 기술을 연구하였다. [9]에서는 WSN에서 네트워크를 통해 데이터를 전송할 때 지연이 계속 발생하게 되면 여러 번 동작하게 되어 손실되는 전력 소모를 줄이기 위한 방법으로 클러스터링 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서는 라즈베리 파이 보드에서 사용하는 리눅스와 실시간성이 부여된 Xenomai를 통해 지정한 시간 내에 작업을 수행하는 시간 결정성을 확인하고, 보드에 연결된 가속도 센서 데이터를 비교함으로써 센서 노드를 위한 운영체제로 Xenomai의 성능을 평가한다.

## 2. Xenomai

Xenomai는 오픈소스로 개발된 실시간 임베디드 리눅

스 시스템이다. 오픈소스로 개발되었기 때문에 개발에 드는 비용을 줄일 수 있고, 개발이 쉽다는 장점이 있다[10].

Xenomai를 사용하기 위해서는 리눅스 커널에 ADEOS I-Pipe를 패치를 적용해야 한다. ADEOS는 도메인이라고 하는 각각의 운영체제를 동일한 하드웨어 플랫폼에서 동작하도록 허용하는 자원 가상화 층이다[11]. ADEOS 도메인들은 시스템에 의해 생성되는 이벤트를 파이프라인을 통해서 수신 받는다. 파이프라인을 통해 전달되는 이벤트는 높은 우선순위부터 점점 감소되어 낮은 우선순위의 도메인으로 전달된다.

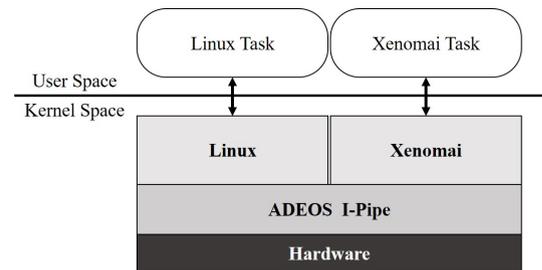


Fig. 1. Xenomai system architecture

Fig. 1과 같이 리눅스와 Xenomai 커널이 있는 경우 Xenomai가 높은 우선순위를 가지게 되어 시스템에서 생성되는 이벤트를 가장 먼저 수신하게 된다[12].

## 3. 주파수 응답 함수

구조물을 이루는 모든 물체는 각각의 고유 주파수(Natural Frequency)를 가지고 있다. SHM에서는 구조물이 외부 요인에 의해 굽이 가거나 파손이 되는 경우 센서를 통해 측정된 데이터를 이용하여 손상 위치나 손상 정도를 추정하는 기법을 사용한다[13].

손상탐지를 위해 진동 모달(modal) 실험값을 이용하는 방법이 많이 사용된다. 모달 해석(modal analysis)을 위해서는 구조물의 운동방정식을 통해 고유 주파수에 대한 값을 얻는다. 얻어진 모달의 고유 주파수와 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 통해 구조물의 손상탐지에 사용된다[14].

주파수 응답 함수는 해머나, 진동기 등을 이용하여 구조물에 외부 충격을 가하여 진동을 발생시키고, 가속도 센서나 진동을 측정할 수 있는 도구를 이용하여 구조물의 외부 충격에 대한 진동 값을 얻는다. 외부의 힘에 의

해 발생된 진동 값에 대한 가속도 값들을 그래프로 표현했을 때 최댓값은 구조물의 고유 주파수를 나타낸다[15].

본 논문에서는 선행 연구[16]에서 사용한 모달의 고유 주파수와 주파수 응답 함수에 의해 측정된 유선 센서의 주파수 응답 함수 실험값을 이용하여 SHM의 WSN을 위한 운영체제로 Xenomai의 성능을 평가한다.

## 4. 구현 및 실험

### 4.1 구현

Xenomai와 리눅스 환경에서 태스크를 생성하기 위한 응용 프로그램과 생성된 태스크는 Fig. 2와 같이 동작한다.

응용 프로그램은 태스크가 센서 데이터를 읽을 수 있도록 다음과 같은 과정들을 수행한다.

- ① 센서 데이터를 저장할 파일 생성과 닫기
- ② 센서 초기화
- ③ 타이머 설정

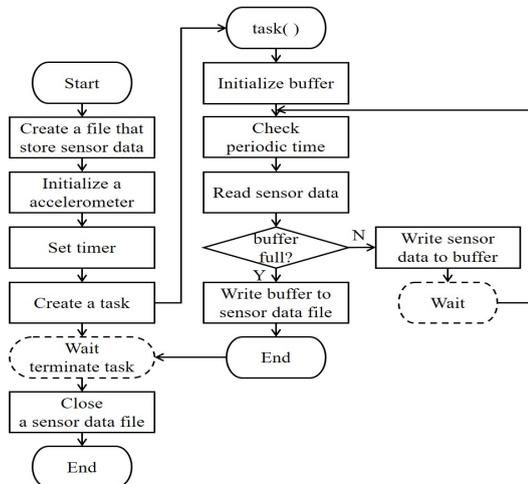


Fig. 2. Xenomai and linux task algorithm

응용 프로그램은 태스크가 읽어드린 센서 데이터를 저장할 파일을 생성한다. 태스크가 센서 데이터를 읽을 수 있도록 센서의 초기화 과정을 수행한다. 정밀한 센서 데이터를 얻기 위해서는 초기화 과정에서 센서가 측정된 데이터를 출력하는 속도와 센서의 데이터 출력 속도에 맞게 태스크가 주기적으로 센서 데이터를 읽도록 설정해야 한다. 태스크가 주기적으로 동작할 수 있도록 타이머를 사용한다. Xenomai 환경에서는 태스크의 실행 주기를 나노초(nano second)단위로 설정하도록 되어있다. 리

눅에서도 타이머를 설정하여 나노초 단위로 제어할 수 있는 nanosleep() 함수를 사용하여 Xenomai와 리눅스 환경의 태스크가 동일한 조건으로 동작할 수 있도록 설정한다. 응용 프로그램은 모든 초기화 과정이 정상적으로 이루어지면 태스크를 생성하고 태스크가 종료되기를 기다렸다가 태스크가 모든 동작이 끝나 종료되면 센서 데이터를 저장한 파일을 닫고 종료한다.

태스크는 최소한의 과정으로 지정한 시간 주기에 동작할 수 있도록 센서 데이터를 파일로 바로 쓰지 않고 버퍼에 저장한다. 태스크가 지정한 시간 주기에 맞게 동작하는지 확인하기 위해서 센서 데이터를 읽으려할 때마다 gettimeofday()를 사용하여 전과 후의 동작 시간을 비교하여 태스크의 시간 주기를 확인한다. 버퍼가 가득차지 않은 경우 태스크는 읽어드린 센서 데이터를 버퍼에 쓰고, 지정한 주기 시간만큼 대기했다가 재개되어 센서 데이터를 읽어 버퍼가 가득 찼 때까지 데이터를 수집하는 과정을 반복한다. 버퍼의 크기만큼 센서 데이터를 수집하면 버퍼에 저장한 센서 데이터를 파일에 쓰고 종료한다.

### 4.2 실험

실험에서 사용하는 라즈베리 파이 보드는 Table 1과 같은 사양[17]을 가지고 있다.

Table 1. Specifications of raspberry Pi

Features / Model	Model B+
Dimensions	85 x 56 x 17mm
SoC	BCM2835
Processor core	ARM11
Processing power	700 MHz
Memory	512 MB SDRAM, 400 MHz
Ports	4 x USB 2.0, 1 x 10/100 Ethernet
GPIO	40

라즈베리 파이 보드에 연결한 센서는 Table 2와 같은 사양[18]의 가속도 센서를 사용한다.

Table 2. Specifications of 3-axis accelerometer

Features / Model	ADXL345Z
Operating voltage range	2.0 ~ 3.6 V
Accelerometer range	±2g, ±4g, ±8g, ±16g
Output resolution	10 ~ 13 Bits
Sensitivity (All g-ranges, fullresolution)	230 ~ 282 LSB/g
Sampling rate	0.1 ~ 3200 Hz
Output type	I2C, SPI

실험을 위한 센서 노드의 샘플링 레이트를 256Hz로 설정하고, 가속도 센서의 z축 데이터만을 수집한다. 정밀한 센서 데이터를 얻기 위해서는 Xenomai와 리눅스 태스크가 256Hz의 속도로 0.00390625초의 시간 주기로 동작해야 한다. 태스크가 가속도 센서의 z축 데이터를 읽고 메모리에 쓰는 동작이 0.0001초가 소요되는 것으로 가정하고 Xenomai와 리눅스 태스크의 시간 주기를 0.0038초로 동일하게 설정하여 각각의 태스크가 동작할 시간 주기는 Fig. 3과 같다.

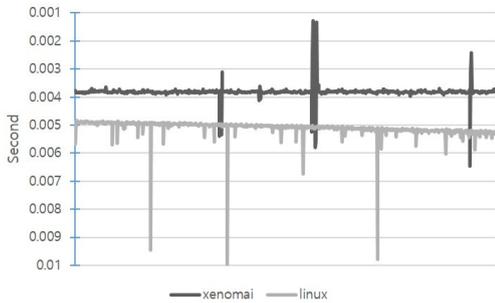


Fig. 3. Xenomai and linux task periodic time

Xenomai 태스크는 지정한 시간 주기에 가까운 평균 0.00381663초의 시간 주기로 동작했으며 동작 중에 지정한 시간 주기보다 느린 경우는 13번 발생했다. 하지만 리눅스 태스크의 경우에는 지정한 시간 주기보다 느린 평균 0.005102초의 시간 주기로 동작했다.

Xenomai와 리눅스에서 센서의 z축 데이터 비교를 위해 Fig. 4와 같은 환경을 구성하여 실험한다.

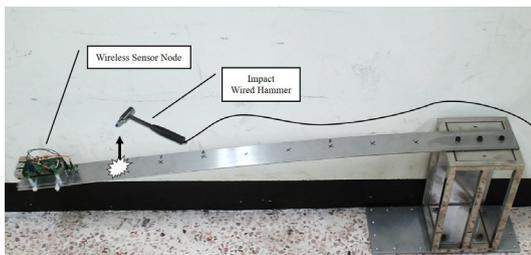


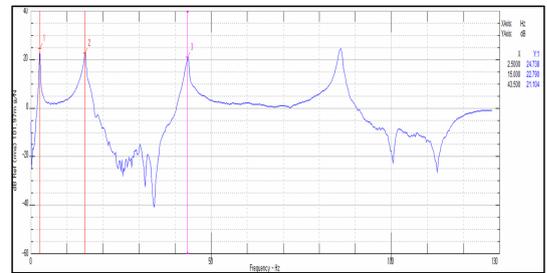
Fig. 4. A wireless accelerometer on a cantilever beam

캔틸레버 빔(cantilever beam)은 고층 타워나 교량과 같은 구조물의 형태와 비슷하여 진동을 기반으로 구조물의 모니터링이나 결함탐지를 위한 방법을 연구하기 위해 사용된다[19]. 캔틸레버 빔은 외부에서 전달되는 힘에 의해 진동이 발생하는 경우 물질의 고유주파수에 의해

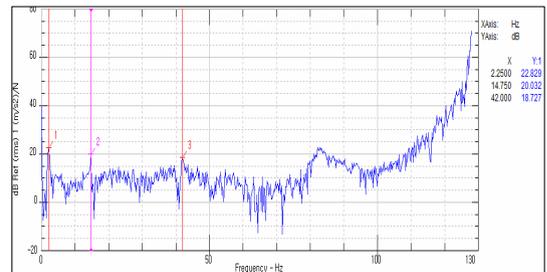
동일한 진동이 발생한다. 캔틸레버 빔에서 발생하는 진동을 측정하였을 때 고유주파수에 의한 특징점을 가지게 되며 이를 통해 센서 노드가 수집한 데이터의 정확도를 판단할 수 있다.

본 논문에서는 캔틸레버 빔에 유선 센서인 해머로 진동을 발생시키고 동일한 256Hz의 샘플링 레이트로 4초 동안 총 1024개의 z축 데이터를 수집한다. Xenomai와 리눅스에서 수집한 데이터의 정확도를 평가하기 위해 동일한 조건에서 수집된 유선 센서 데이터와 비교 평가한다.

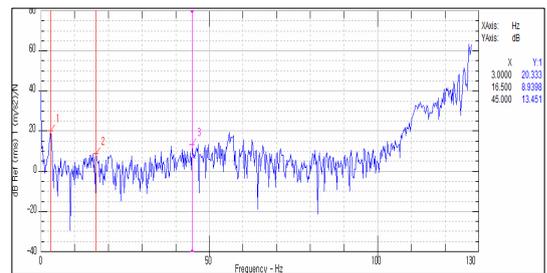
수집된 센서 데이터들은 Smart Office Analyzer[20]를 이용하여 Fig. 5와 같이 그래프를 통해 유선 센서 데이터와 무선 환경의 Xenomai와 리눅스 센서 데이터를 비교한다.



(a) Wired sensor data



(b) Wireless xenomai sensor data



(c) Wireless linux sensor data

Fig. 5. Compared wired and wireless sensor data

유선 센서 데이터 그래프(a)의 경우 캔틸레버 빔의 진

동에 의한 3개의 고유 주파수 특징 점을 확인할 수 있다. Xenomai를 통해 수집된 센서 데이터 그래프(b)의 경우 (a)와 같이 3개의 고유 주파수 특징 점을 확인할 수 있다. 하지만 리눅스를 통해 수집된 데이터 그래프(c)의 경우 (a), (b) 경우와 다르게 첫 번째 고유 주파수 특징 점을 제외한 나머지 고유 주파수 특징 점은 구분하기 어렵다.

각 센서 데이터 그래프에서 고유 주파수 특징 점에 대한 값은 Table 3과 같다.

Table 3. Modal natural frequencies

Mode	Natural frequency (Hz)		
	Wired	Wireless	
		Xenomai	Linux
1st	2.50	2.25	3.00
2nd	15.00	14.75	16.50
3rd	43.50	42.00	45.00

유선 센서 데이터의 경우 주파수 응답 함수를 통해 실험에 사용한 캔틸레버 빔의 고유 주파수를 정확하게 나타낸다. 가속도 센서에서 설정한 샘플링 레이트로 동작하는 Xenomai 무선 센서 데이터는 유선에 비해 노이즈가 있지만 고유 주파수에 가까운 값을 나타낸다. 하지만 가속도 센서의 샘플링 레이트보다 느린 동작 주기를 보인 리눅스 무선 센서 데이터는 Xenomai 보다 많은 노이즈와 캔틸레버 빔의 고유 주파수를 표현하지 못했다.

## 5. 결론

교량이나 건물 같은 구조물의 사람이 쉽게 접근하기 어려운 위험도가 있는 장소의 지속적인 점검을 위해 SHM이 연구되고 있다. 유선을 사용한 센서 노드를 사용할 경우 발생하는 단점을 극복하기 위해 WSN를 활용하고 있다. WSN을 활용한 연구들 중에서 센서 노드를 위한 운영체제로 기존의 리눅스를 사용한 센서 노드와 실시간성을 부여한 Xenomai를 사용한 센서 노드를 통해 WSN을 위한 운영체제로 Xenomai의 성능을 실험하였다.

센서 데이터의 정밀도를 위한 샘플링 레이트에 맞는 지정된 시간 주기에 동작되는지 확인하기 위해 Xenomai와 리눅스에서 태스크를 생성하고 동일한 시간 주기를

지정하였다. 리눅스 태스크의 경우 지정된 시간 주기를 지키지 못했지만 Xenomai 태스크의 경우 지정된 시간 주기에 실행되는 것을 확인하였다. 또한 각 센서 노드에서 가속도 센서를 사용한 주파수 응답 함수를 이용한 Smart Office Analyzer의 그래프로 유선 센서와 리눅스 무선 센서와 비교함으로써 WSN을 위한 운영체제로 Xenomai의 성능을 평가하였다. Xenomai는 다른 실시간 운영체제들에 비해 비용 절감과 사용이 쉽고, 비실시간 운영체제에 비해 정밀한 센서 데이터를 얻을 수 있어 이를 활용한 추가 연구가 필요하다.

## References

- [1] Saidov, K., Szpytko, J., "Problems review of the health monitoring of tall type buildings", Journal of KONES, vol. 22, no. 2, pp. 191-204, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5604/12314005.1165438>
- [2] Myungkyu Lee, Heonwoo Lee, Jongho Kim, Taejin Kim, "SHM System for Maintenance of Super Tall Buildings", Proceedinds of WEIHK Symposium, pp. 95-98, 2015.
- [3] Sunghan Sim, Billie F. Spencer Jr, "Decentralized strategies for monitoring structures using wireless smart sensor networks", Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [4] Akyildiz, I. F., Su, W, Sankarasubramaniam, Y. "Wireless sensor networks: a survey", Computer networks, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- [5] Mohammed Ibbini, E., Kweh, Y. L., Othman, M., Mohd Hanapi, Z., "A survey of routing MAC techniques for wireless sensor networks routing protocol", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol. 76, no. 3 pp. 322-332, 2015.
- [6] Namhyun Yoo, Giljong Song, Juhyun Yoo, Suyeong Yang, Cheolsu Son, Jingwang Koh, Wonjung Kim. "Design and Implementation of the Management System of Cultivation and Tracking for Agricultural Products using USN", Journal of KIISE, Computing Practices and Letters, vol. 15, no. 9, pp. 661-674, 2009.
- [7] Shome, S. K., Sen, S., Mondal, K., Datta, U, "Development and performance analysis of wireless sensor node for structural health monitoring using fast fourier and wavelet transform", In 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), pp. 491-495, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ciec.2016.7513836>
- [8] Lee Yoonmyung, David Blaauw, Dennis Sylvester, "Ultralow Power Circuit Design for Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring", Proceedings of the IEEE 104.8, pp. 1529-1546, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2016.2547946>

- [9] Nirbhay K. Chaubey, Dharti H. Patel, "Energy Efficient Clustering Algorithm for Decreasing Energy Consumption and Delay in Wireless Sensor Networks (WSN)", International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 8652-8656, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.15680/IJIRCCCE.2016.0405084>
- [10] Xenomai Homepage, Start Here, <http://xenomai.org/start-here/>
- [11] Koh, J. H., Choi, B. W, "Real-time performance of real-time mechanisms for rtai and xenomai in various running conditions", International Journal of Control and Automation, vol. 6, no. 1, pp. 235-246, 2013.
- [12] Gerum, P., Life with adeos, White paper, <http://www.xenomai.org/documentation/xenomai-2.3/pdf/Life-with-Adeos-rev-B.pdf>.
- [13] Kim HackJin, Kim HoGeun, Yu EunJong, Lee SangHyun, Cho SeungHo, Chung Lan, "Stiffness Identification of Reinforced Concrete Wall Building Specimens Using Finite Element Model Updating", Architectural institute of korea, vol. 27, no. 1, pp. 107-110, 2007.
- [14] HoYon Hwang, JoongYup Lee, "Damage Detection of Structures Based on Frequency Response Functions", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 28, no. 2, pp. 46-57, 2000.
- [15] Siemens Aktiengesellschaft, "What is a Frequency Response Function (FRF)?", <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Knowledge-Base-Testing-Solutions/What-is-a-Frequency-Response-Function-FRF/ta-p/354778>
- [16] Sohn Surgwon, SeongRak Rim, InJung Lee, "Vibration Measurement of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring," Advanced Science and Technology Letters, 98, pp. 18-22, 2015.
- [17] RS Components Ltd, Technical Reference, Raspberry Pi FAQs, <http://uk.rs-online.com/web/p/processor-microcontroller-development-kits/8111284/>
- [18] Analog Devices MEMS, ADXL345(Rev. E) Data Sheet, <http://www.analog.com/en/products/mems/accelerometers/adxl345.html#product-overview>  
DOI: [http://dx.doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2016.32.4.3](http://dx.doi.org/10.5659/JAIK_SC.2016.32.4.3)
- [19] Jongwon Lee, "Crack Detection Method of Tapered Cantilever Pipe-type Beam with a Tip Mass", JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction, 32.4, 3-10, 2016.
- [20] m+p international Mess, Dynamic Signal Acquisition and Analysis, <http://www.mpihome.com/en/products-solutions/dynamic-signal-analysis/dynamic-signal-acquisition-and-analysis.html>

손 태 영(Tea-Yeong Son)

[정회원]



- 2004년 2월 : 호서대학교 컴퓨터공학과 (학사)
- 2013년 2월 : 호서대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야>

임베디드 시스템, 분산 파일시스템, 리눅스 커널

임 성 략(Seong-Rak Rim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 공과대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
- 1992년 8월 : 서울대학교 공과대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 1983년 3월 ~ 1990년 2월 : (주)금성반도체연구소 선임연구원
- 1993년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야>

임베디드 시스템, 리눅스 커널