

# 배관 안전진단을 위한 향상된 임피던스 컨버터 연구

論 文

10-1-1

## A Study on the Advanced Impedance Converter for Pipeline Health Monitoring

권 영 민\*, 이 형 수, 송 병 훈

Young-Min Kwon, Hyung-Su Lee, Byung-Hun Song

### Abstract

The Underground pipeline facility is a general but most important facility in modern world, but its maintainability has been left behind. An automated and intelligent management technology is needed to prevent the wast of social resource and security. In this paper, we introduce Pipeline Health Monitoring(PHM) with Ubiquitous Sensor Network(USN) for inexpensive structure safety monitoring system, and improve its utility by inventing the advanced impedance converter.

**Keywords** : pipeline health monitoring, Structure Health Monitoring, ubiquitous sensor network, impedance converter

### I. 서 론

지하 배관 구조물은 국가 주요 자원의 수송망을 책임지는 핵심적인 기능을 수행하는 시설물로서, 그 규모와 재료, 모양 면에서 구조적인 종류가 매우 다양하다. 급격한 산업화 추세에 부응하기 위해 지난 40년 동안 우리나라에서 건설된 수많은 배관 구조물이 점차 노후화되고 있는 추세이며, 대부분 도심에 집중적으로 건설되어 있기 때문에, 부식, 균열, 조인트 풀림 등의 손상으로 인한 누출사고 발생 시 막대한 사회·경제적 손실을 초래할 우려가 있다. 특히, 지중배관 및 노출 배관 경우에는, 현장 작업상황이 지속적으로 변화하고 있는 상황에서 24시간 안전관리에 대한 감시체계가 미흡한 것이 현실이다. 이에 배관 구조물의 안전성 확보를 위해서는 1차적으로 배관구조의 안전성을 충분히 고려한 구조해석 및 모형 실험을 통한 안전성평가 등을 통해 합리적이고 체계적인 계획, 설계, 제작 또는 시공이 이루어져

야 하며, 2차적으로는 제작/시공된 배관 구조물의 안전을 철저히 점검하고 점검결과에 따라 신속하고 합리적인 보수/보강을 수행하여 안전성을 확보해야 한다. 이러한 효과적 배관상태관리에 의한 유지관리를 위해서는 정기점검 및 정밀 비파괴 안전진단이 필수적이나, 이들만으로 배관 구조물의 안전성을 충분히 보장할 수 없다. 즉, 배관의 사용성과 구조적 건전성을 확보하기 위해서는, 운용 중 성능 및 건전성을 평가하는 첨단 구조 건전성 모니터링 및 비파괴 검사기술의 개발 및 적용이 필요하다. USN(Ubiquitous Sensor Network) 진단 기술은 최첨단 유비쿼터스 융합 기술로서 이에 대한 최신 지중시설물 건전도 측정을 가능하게 할 수 있다.

배관의 구조 건전도 평가 기술은 센서기술, 계측기술, 정보처리기술 등의 요소기술의 발전과 더불어 많은 발전을 이루게 되었으며, 최근 미국, 캐나다를 비롯한 유럽에서는 광섬유센서, 압전센서 등의 스마트센서를 활용하여 변형률, 진동 및 주파수 분석, 초음파 검사, 원격감시 기술 등의 첨단 연구를 이용하여 배관의 건전도를 평가하기 위한 연구가 활발히 추진되고 있다. 일본, 중국, 싱가포르를 포함한 아시아 국가에서도 다양한 배관

접수일자 : 2011년 01월 13일

심사일자 : 2011년 02월 10일

수락일자 : 2011년 03월 20일

\*교신저자, E-mail : [youngminy@keti.re.kr](mailto:youngminy@keti.re.kr)

구조물에 대하여 건전도 모니터링 시스템이 설치되고 있으며, 국내에서는 가스 배관을 중심으로 상시 모니터링 시스템이 설치되고 있지만, 현재의 기술은 배관 구조물 건전성 평가기술의 실용화를 위해 현장에서 적용되기에 비용이나 기술개발 면에서 매우 원시적인 수준이다. 고가의 센서설치 및 배관의 유지관리 비용 등의 문제를 극복하려는 센서개발 연구 및 센서로부터 취득된 측정데이터를 현장에서 분석하여 실시간으로 배관의 이상상태를 판정하여 원격으로 그 판정결과를 알려주는 유비쿼터스 원격감시기술에 대한 연구 및 기술개발이 요구된다[1].

본 논문에서는 USN 기술을 활용한 배관안전진단 기술을 소개하고 기존의 배관안전시스템의 성능을 향상시키기 위한 전압 분배기 기반의 자가감지 기술을 적용한 향상된 임피던스 컨버터에 대한 연구를 수행 하였다.

## II. 자가감지 임피던스 방법

구조물을 모니터링 하기 위하여 다양한 형태의 센서 및 가진기가 개발되고 있으며, 최근 PZT(Piezoelectric Transducer) 및 MFC(Macro Fiber Composite) 센서와 같은 패치형 압전 능동센서를 활용하여 구조물의 저주파 진동, 고주파 임피던스, 및 유도 초음파를 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 압전소자는 역학적 압력이 가해지면 전하 또는 전압을 발생시키고, 반대로 전기장 안에 놓이면 역학적인 변형이 발생된다. 이러한 고유한 압전 현상으로 인해, 압전소자는 임피던스의 계측이나 램파(Lamb Wave)의 생성 및 계측 등을 위한 가진기와 센서로써, 광범위하게 사용될 수 있다. 그림 1은 PZT 센서와 구조물간의 결합관계를 도식화한 1차원 모델링이다[1].

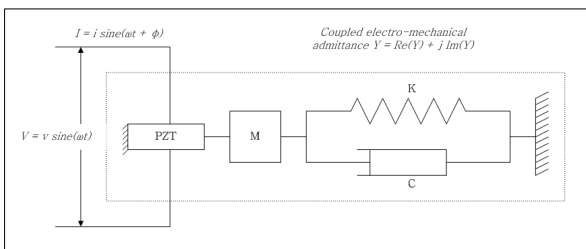


그림 1. PZT센서와 구조물 사이의 1차원 모델

압전형 능동형 센서를 이용하여 진동 및 임피던

스 기반 구조물 손상 검색 기술은 구조물에 부착된 압전 센서에서 얻어지는 시간영역의 구조응답을 주파수 영역에서 상시적으로 분석하여 기준신호와 급격한 특성변화가 나타날 경우, 이 변화를 이용하여 전역적 또는 국부적인 이상 상태를 찾아내는 기술이다. 구조물에 소형 압전 센서를 적절한 위치에 부착하여 저주파 영역 진동응답으로부터 구조물의 진동모드를 구함으로써 구조물 전체의 거동특성을 감시할 수 있다.

PZT 센서가 구조물의 표면에 부착되어 있는 경우 PZT 센서에서 계측되는 전기적 임피던스  $Z(w)$ 는 구조물의 기계적 임피던스  $Z_s(w)$ 와 압전센서의 기계적 임피던스  $Z_a(w)$ 가 결합된 함수로 표현되며, 식(1)과 같이 표현된다[2].

$$Z(w) = \frac{V(w)}{I(w)} = [j\omega C(1 - k_{31}^2 \frac{Z_s(w)}{Z_s(w) + Z_a(w)})]^{-1} \quad (1)$$

$C$ 는 PZT의 무부하 커패시턴스,  $k_{31}$ 은 PZT의 전기기계 결합계수이다.

그림 2는 커패시터를 이용한 간단한 전압 분배기(Voltage divider)를 기반으로 하는 자가감지(self-sensing) 회로이다. 자가감지란 단일 PZT 센서가 동시에 가진과 측정을 수행 하는데 이용되는 것을 의미한다.[3] 단일 PZT 센서, 최소한의 전자 소자와 장비를 이용하여 구조물의 임피던스를 측정할 수 있어 USN과 같은 저가의 솔루션에 적합하다.

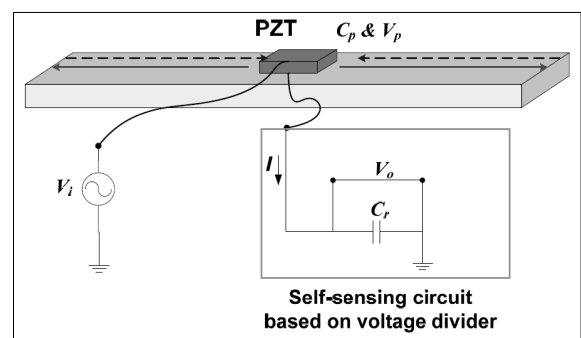


그림 2. Self-Sensing 임피던스 방법

자가감지 회로는 입력신호 대비 기계적 응답의 차이를 구하는데 사용되며, 임피던스는 식(2)와 같이 간략화 되어 표현된다.[4]

$$Y_{cp}(j\omega) = \frac{I(j\omega)}{V_p(j\omega)} = j\omega C_r \left( \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega) - V_o(j\omega)} \right) \quad (2)$$

$Y_{cp}$ 는 구조물과 PZT의 합성 어드미턴스,  $V_p$ 는

입력 신호와 구조물의 기계적 응답의 합성,  $C_r$ 은 자가감지 회로의 기준 커패시턴스,  $V_o$ 는 PZT에서의 주파수응답,  $V_i$ 는 입력의 주파수응답이다.

구조물의 손상에 대한 수치를 구하기 위해서 일반적으로 식(3)의 RMSD(Root mean square deviation)를 이용하며, 손상에 의한 구조물 임피던스의 실수 부파워 변화를 의미한다.

$$RMDS = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{[Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,0})]^2}}{[Re(Z_{i,0})]^2} \times 100 \quad (3)$$

$Re(Z_{i,1})$ 은 손상된 구조물의  $i$ 번째 측정 주파수에서의 실수부 임피던스 이고  $Re(Z_{i,0})$ 는 기준값의 실수부 임피던스이다.

### III. 배관안전진단 시스템

#### 1. 배관안전진단 USN

배관안전진단 USN은 지하배관의 상시 모니터링 체계 구축을 목표로 개발된 시스템으로 배관의 임피던스 측정과 지하 환경에서의 무선전송이 가능한 시스템이다. 임피던스 측정을 위해 사용된 Analog Devices 사의 임피던스 컨버터(AD5933)는 저가의 소형 저전력 칩셋으로 무선 센서네트워크 응용에 적합한 특성을 갖추고 있다. 이 초소형 임피던스 측정 칩셋이 무선 센서 네트워크 기술과 접목되면서, 내장형 감지, 내장형 신호처리 알고리즘, 무선 데이터 전송 모듈 등을 모두 포함한 능동형 임피던스 센서노드가 제작되었다. 이 센서 노드에는 초소형 임피던스 측정장치, 마이크로 프로세서, RF 송신기가 탑재되어 있으며, 신호호출, 데이터 획득을 포함한 모든 과정이 센서 내에서 자체적으로 실행된다.

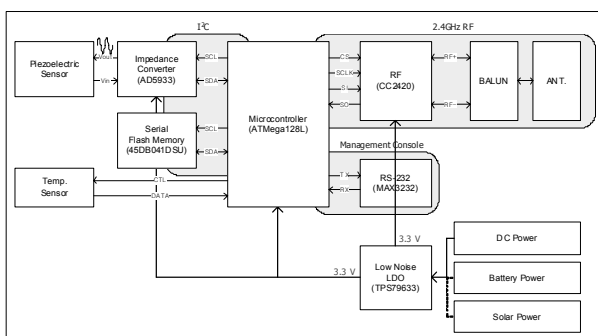


그림 3. 배관안전진단 USN 블록 다이어그램

그림 3의 블록 다이어그램을 살펴보면 마이크로 프로세서 (ATmega128L)는 센서노드의 전체기능을 제어하고 신호계측 및 해석 알고리즘들을 수행하며, RF 송신모듈 (Zigbee PHY(CC2420))은 계측된 임피던스 신호 또는 해석 처리된 결과를 원격의 서버로 전송한다. 그리고 초소형 임피던스 측정장치 (AD5933)는 정해진 주파수 대역에서 압전센서로부터 임피던스 값들을 얻어내는 기능을 하며, 온도 센서를 소켓에 연결하여 실시간으로 온도 데이터를 계측한다.

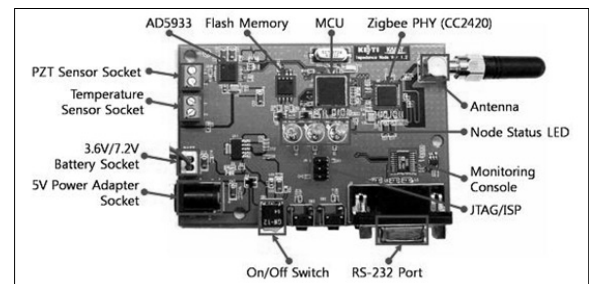


그림 4. 배관안전진단 USN 노드

배관안전진단 USN은 다음 그림 4와 같이 구성되어 있다. ATMEL사의 ATmega128L 프로세서를 메인프로세서로 사용하여 Impedance Converter와 Clock, Data 버스를 이용하여 연결되어 있다. 또한 RF Transceiver인 CC2420과는 4 Wire SPI 인터페이스를 사용해서 구성되어 있다. 각각 플랫폼의 데이터 및 동작 모니터링은 RS-232 통신을 통해 가능하게 되어 있다. 보드의 프로그래밍을 위해 이용되는 SPI, JTAG 인터페이스가 구성되어 있다. 또한 MFC센서의 인터페이스는 2핀 커넥터가 제공되는데 ATmega128의 설정에 따라 타 센서의 인터페이스를 할 수 있는 범용성을 확보하기 위해 A/D 변환 포트와 GPIO 역할을 수행할 수 있게 설계되었다. 각각의 보드의 ID를 위해서 부착되는 Silicon Serial Number IC는 1-wire 인터페이스를 통해서 Data Read가 가능하다[1].

#### 2. 배관안전진단 임피던스 컨버터

기존의 USN 기반의 배관안전진단 시스템은 유비쿼터스 응용에 적합하지 않는 HP4194A와 같은 임피던스 측정기를 대체하기 위하여 Analog Devices사의 AD5933 임피던스 컨버터를 활용하여 무선기반의 저가의 저전력 시스템으로 개발되었다. 하지만 HP4194A에 비해 AD5933은 출력 주파수 범위, 분해능, 처리속도 그리고 고속 푸리

에 변환(FFT : Fast Fourier Transform) 사이즈 등의 하드웨어 사양에서 많은 제약이 있으며 측정된 신호의 분석을 위해서 PC를 이용한 후처리가 필요하다. 보다 진보된 구조물진단 시스템 개발을 위해서는 USN에 특화된 임피던스 컨버터의 개발이 필수적이다.

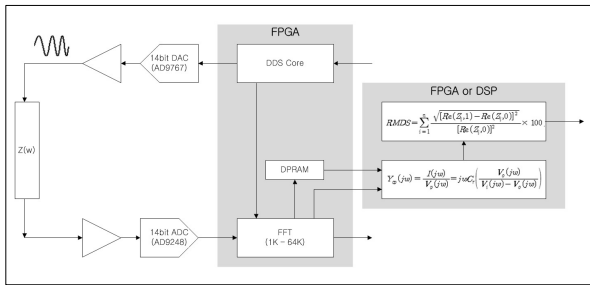


그림 5. 임피던스 컨버터 블록 다이어그램

그림 5는 배관안전진단 시스템을 위한 임피던스 컨버터의 블록다이어그램이다. 설계된 임피던스 컨버터는 Xilinx사의 Spratan-3A DSP FPGA를 사용하여 설계되었으며 14bit D/A 컨버터(AD9767)와 14bit A/D 컨버터(AD9248)를 기반으로 구조물의 임피던스를 측정한다. 자가감지 기법을 이용한 임피던스 측정을 위한 칩(Chirp) 신호 생성과 주파수 영역에서의 분석을 위한 푸리에 변환에 Xilinx사의 LogiCORE IP인 DDS(Direct Digital Synthesizer) Compiler V4.0[5]과 FFT(Fast Fourier Transform) V7.1이 사용되었다.

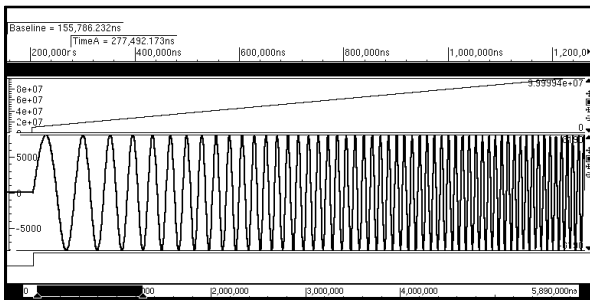


그림 6. 칩 신호 생성

제안된 임피던스는 DDS Compiler를 통하여 정해진 주파수 범위를 스위프하기 위한 칩(Chirp)신호를 생성하고 D/A 컨버터를 통하여 PZT 센서의 입력 신호로 전달된다. 그리고 그와 동시에 A/D 컨버터로 PZT 센서의 기계적 응답을 받아서 FFT 이용한 주파수 변환을 통하여 주파수 영역에서의 분석을 수행한다. PZT 센서로 입력된 신호의 FFT 결과와 PZT 센서의 기계적 응답의 FFT 결과를 이용하여 구조물의 어드미턴스를 구

하게 되며 이를 반복 비교함으로써 구조물의 손상 정도를 모니터링 할 수 있다.

칩 신호는 시스템 전달함수를 구하기 위하여 광범위하게 사용되는 신호원으로 식(4)와 같이 표현된다.

$$x(t) = A \times \text{sint} \left\{ t \left( \omega_0 + \frac{\omega_1 - \omega_0}{2N} t \right) \right\} \quad (4)$$

A는 진폭,  $\omega_0$ 는 시작 각주파수, 중단 각주파수, N은 샘플수이다. 칩 신호를 사용하는 장점은 다음과 같다. (1)쉽게 생성 할 수 있다. (2)풍부한 주파수 성분을 가지고 있다. (3)주파수 스위프(sweep) 범위를 쉽게 제어할 수 있다. (4)주파수 스위프 속도를 쉽게 제어할 수 있다[6]. 그림 6은 DDS Compiler를 이용하여 생성한 10Khz ~ 30Khz 주파수 범위의 칩 신호이다.

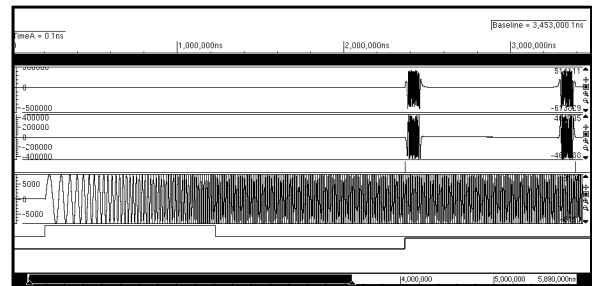


그림 7. PZT 입력 신호의 고속푸리에 변환

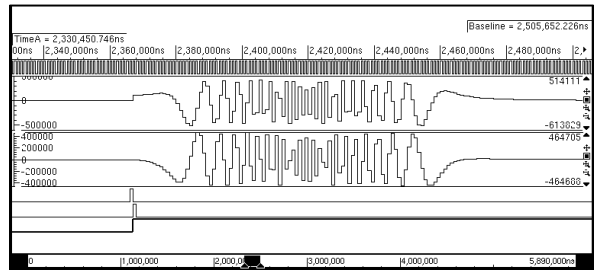


그림 8. PZT 기계적 응답 신호의 고속푸리에 변환

제안된 임피던스 컨버터는 구조물의 기계적 응답을 주파수 영역에서 분석하기 위하여 고속 푸리에 변환을 이용한다. 고속 푸리에 변환(FFT : Fast Fourier Transform)은 푸리에변환에 근거하여 근사공식을 이용한 이산푸리에변환(DFT : Discrete Fourier Transform)을 계산할 때 연산횟수를 줄일 수 있도록 고안된 알고리즘으로 DFT는 식(5)와 같이 표현된다[7].

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jnk2\pi/N} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

그리고 연속적인 데이터 처리를 위해서 다수의 Radix-2 버터플라이 프로세싱 엔진을 내장하고 있는 "Pipeline, Streaming I/O" FFT 아키텍처를 사용하여 주파수 변환을 수행한다. 그림 7과 8은 각각 PZT 입력 신호와 PZT 응답 신호의 고속 푸리에 변환 결과이다.

그림 9는 전압 분배기 기반의 자가 감지 회로와 식(2)의 간략화된 임피던스 계산식을 이용하여 측정된 어드미턴스 결과이다. 주파수 스위프 범위는 10Khz ~ 30Khz이며 10pF의 커패시터를 이용하였으며 1MHz 샘플링 신호를 이용하였다.

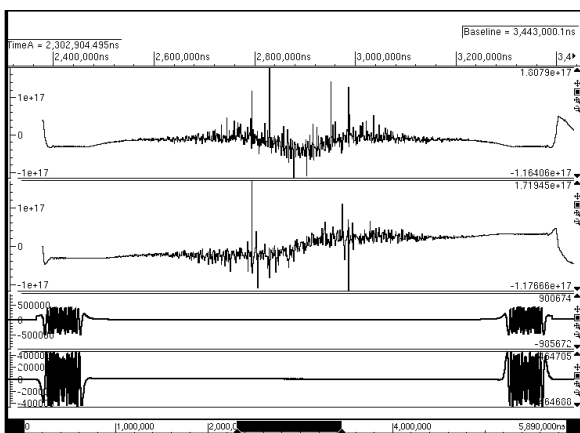


그림 9 Self-Sensing 임피던스 결과

제안된 임피던스 컨버터 시스템의 주요특징은 14bit, 1Mbps 이상의 샘플링을 지원하는 A/D 컨버터를 지원하고 1k ~ 64k 포인트의 FFT를 내장하고 있으며 별도의 추가적인 회로나 장치 없이 임피던스와 RMSD를 연산을 수행한다. 또한, 기존의 AD5933에 비해 정확도와 처리속도가 대폭 향상되었으며 FPGA를 기반으로 설계되어 있어 새로운 알고리즘(Waveguide, cross-correlation 등)의 적용이나 다기능의 지원이 가능하다. 표 1은 제안된 시스템과 AD5933의 비교표이다.

표 1. AD5933과 제안 시스템 비교

	AD5933	제안된 시스템
Output Frequency Range	1~ 100Khz	1~400Khz
Output Frequency Resolution	0.1Hz	0.01Hz
A/D Resolution	12 bit	14bit
A/D Sampling Rate	250kbps	1Mbps ~
DFT size(point)	1024	1k ~ 64k
Impedance Measurement	△	O
RMSD	X	O

## IV. 결 론

본 논문은 패치타입 MFC 압전센서와 임피던스 측정을 위한 자가감지 기법을 활용한 배관안전진단 USN에 대해 소개하고 핵심소자인 임피던스 컨버터에 대한 연구를 수행하였다. USN 기반의 배관안전진단 시스템은 유비쿼터스 응용에 적합하지 않는 HP4194A와 같은 임피던스 측정기를 대체하기 위하여 Analog Devices사의 AD5933 임피던스 컨버터를 활용하여 무선기반의 저가의 저전력 시스템으로 개발되었다. 하지만 HP4194A에 비해 AD5933은 출력 주파수 범위, 분해능, 처리속도 그리고 FFT 사이즈 등의 하드웨어 사양에서 많은 제약이 있으며 측정된 신호의 분석을 위해서 PC를 이용한 후처리가 필요하다. 보다 진보된 구조물진단 시스템 개발을 위해서는 USN에 특화된 임피던스 컨버터의 개발이 필수적이다.

제안된 시스템은 Xilinx사의 Spratan-3A DSP FPGA를 사용하여 설계되었으며 14bit D/A 컨버터(AD9767)와 14bit A/D 컨버터(AD9248)를 기반으로 구조물의 임피던스를 측정한다. 자가감지 기법을 이용한 임피던스 측정을 위한 칩(Chirp) 신호 생성과 주파수 영역에서의 분석을 위한 푸리에 변환에 Xilinx사의 LogiCORE IP인 DDS (Direct Digital Synthesizer) Compiler V4.0[5]과 FFT(Fast Fourier Transform) V7.1이 사용되었다. 본 시스템은 기존의 AD5933에 비해 정확도와 처리속도가 대폭 향상되었으며 FPGA를 기반으로 설계되어 있어 새로운 알고리즘(Waveguide, cross-correlation 등)의 적용이나 다기능 알고리즘의 지원이 가능하다. 새롭게 제안된 시스템은 향상된 조기 위험 감지와 신뢰성 있는 상시 모니터링 체계 구축에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(06국토정보B01)에 의해 수행되었습니다.

### [ 참고 문헌 ]

[1] Y. M. Kwon, H. S. Lee, and B. H. Song, "A Study on the impedance-based Wireless Sensor Node for Pipeline Health Monitoring," KCC2010,(2010)

- [2] G. Park, H. Cudney, and D. J. Inman, "Impedance-based Health Monitoring of Civil Structural Components," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 6, No. 4, 153-160.
- [3] S. J. Lee, H. Sohn, and J. W. Hong, "Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-diagnosis Under Varying Temperature," ISHM, 2008,
- [4] S. J. Lee and H. Sohn, "Active self-sensing scheme development for structural health monitoring," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, pp. 1734 - 1746, 2006.
- [5] LogiCORE IP DDS Compiler V4.0 Product Specification, Xilinx, [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)
- [6] B. Xu, "Structural Health Monitoring Instrumentation, Signal Processing and Interpretation with Piezoelectric Wafer Active Sensors," pp. 77-78,
- [7] LogiCORE IP Fast Fourier Transform V7.1, Xilinx, [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)

## Biography



### 권영민

2002년 영남대학교 전자공학과 졸업  
2004년 영남대학교 전자공학과(공학석사)  
2004년~현재 전자부품연구원 선임연구원  
<관심분야> 센서네트워크, 산업용 USN 시스템, EHS, FPGA

<e-mail> [youngminy@keti.re.kr](mailto:youngminy@keti.re.kr)



### 송병훈

1998년 광운대학교 전자계산학과 졸업  
2000년 광운대학교 전자통신공학과(공학석사)  
2004년 광운대학교 전자통신공학과(공학박사)  
2004년~현재 전자부품연구원 RFID/USN 융합연구센터 책임연구원

<관심분야> 신뢰성USN무선통신, 건설 USN 시스템, 마이크로 에너지하베스팅

<e-mail> [bhsong@keti.re.kr](mailto:bhsong@keti.re.kr)



### 이형수

1989년 아주대학교 전자공학과 졸업  
2000년 아주대학교 컴퓨터공학과(공학석사)  
2006년 성균관대학교 전기전자컴퓨터(공학박사)  
1997년~현재 전자부품연구원 RFID/USN 융합 연구센터 센터장

<관심분야> 센서네트워크, RFID, Green IT

<e-mail> [hslee@keti.re.kr](mailto:hslee@keti.re.kr)