

도시 지하시설물 관리를 위한 USN 기술 연구

論 文
9-3-2

UFSN : Underground Facility Sensor Network

권 영 민*, 이 형 수*, 송 병 훈*

Young-min Kwon, Hyung-su Lee, and Byung-hun Song

Abstract

In this paper, we introduce UFSN (Underground Facility Sensor Network) in order to build the intelligent management system for the underground facility and drainage in convergence with ubiquitous technologies. and propose the three type of UFSN.

Keywords : ubiquitous sensor network, wireless sensor network, UFSN, energy harvesting System

I. 서 론

도시의 지하에는 눈에 보이지는 않지만 다양한 종류와 규모의 지하시설물들이 존재하고 있으며 지하시설물의 대부분은 지하자원의 수송을 담당하고 있는 지하배관 시설물이다. 지난 40년 동안 급격한 산업화와 도시화에 부흥하기 위해 건설된 수많은 지하시설물들은 점차 노후화 되어 있는 추세이며 도심에 집중적으로 건설되어 있어 사고가 발생할 경우 막대한 경제적 손실과 인명 손실을 초래할 우려가 있다. 또한 새롭게 건설되고 있는 첨단도시의 경우 기존의 아날로그를 기반으로 한 인력에 의한 관리방법으로는 첨단 유비쿼터스 시설물 관리 서비스를 하기에 적합하지 않다.

기존의 문제점을 극복하고 도시시설물을 지능화하기 위한 다양한 기술들이 소개 되고 있지만 실제 적용된 사례는 드문 것이 현실이다. 산업분야가 보수적인 점도 첨단 시설물 관리 시스템이 빠르게 확산되는데 걸림돌로 작용하고 있지만 더 큰 문제점은 개발된 시스템이 기존 시설물의 특성을 적절히 반영하지 못한데 있다. 첨단 도시 지하시설물

접수일자 : 2010년 07월 09일

최종완료 : 2010년 09월 10일

*전자부품연구원

교신저자, e-mail : hslee@keti.re.kr

관리를 위해서는 시설물의 환경적 특성, 물리적 특성 그리고 운영방식 등에 대한 연구가 선행 되어야 하고 이를 고려한 시스템의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 효과적으로 도시 지하시설물을 지능화하기 위하여 개발된 Underground Facility Sensor Network(UFSN) 시스템 기술을 소개하고 시설물 특성에 적합한 UFSN 기술 적용에 대한 연구를 수행하였다.

II. Underground Facility Sensor Network (UFSN)

1. UFSN 개요

최근 들어 첨단도시에 대한 관심이 높아지면서 실시간으로 데이터를 수집하고 분석하는 다양한 첨단 도시 시설물 관리에 대한 기술들이 소개되었다. 하지만 이러한 시스템들은 범용으로 개발된 무선 시스템을 시설물 관리에 활용함으로써 시설물의 환경적 특성에 대한 고려가 부족하여 무선 통신에 대한 효율성과 신뢰성이 떨어지고 잦은 유지관리가 요구되는 등의 여러 문제점이 제기되었다.

UFSN 기술은 도시의 지하시설물을 대상으로

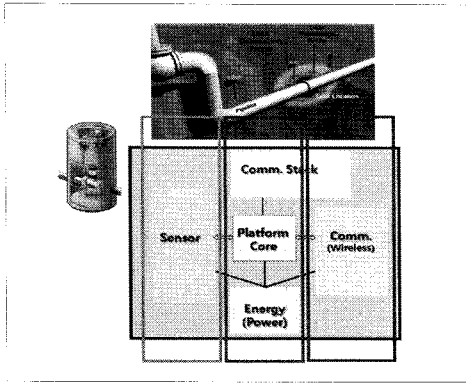


그림 1. UFSN System Architecture

첨단 관리를 위하여 개발된 유비쿼터스 융합 기술이다. UFSN의 가장 큰 특징은 그림 1과 같은 구조로 개별 시설물의 환경적 특성을 반영하여 센서, 플랫폼, 통신, 에너지 기술들을 복합적으로 개발함으로써 기존의 문제점을 극복하고 종합적인 지하시설물 관리에 방향을 제시하였다. UFSN 센서는 지하배관을 통하여 이동하는 유체의 물리적 특성에 따라 액체형 UFSN 센서와 기체형 UFSN 센서로 구분된다. 그리고 최근 들어 급속히 발전하고 있는 디지털 신호처리 기술을 활용하여 기존의 센서와 동일한 정밀도의 저전력 센서 기술을 적용하였다.

UFSN 통신은 지하공동구와 맨홀 등의 지하시설물 매설 환경적 특성을 반영하여 Zigbee, 칩 확산 스펙트럼(CSS : Chirp Spread Spectrum), WIFI등의 다양한 통신 기술을 활용하고 빠르게 기존 시스템을 대체하기 위하여 신뢰성 높은 Modbus와 같은 산업 표준 프로토콜을 적용하였다. UFSN 플랫폼은 임베디드 시스템을 기반으로 산업에 적용 가능한 고신뢰성의 플랫폼 기술이다. UFSN 에너지 기술은 지하시설물 환경에너지를 이용하여 UFSN 시스템을 자가 유지하기 위한 에너지 획득 시스템 및 고효율 에너지 관리 시스템 기술이다.

지하 시설물 환경과 기존 시설물의 분석을 통

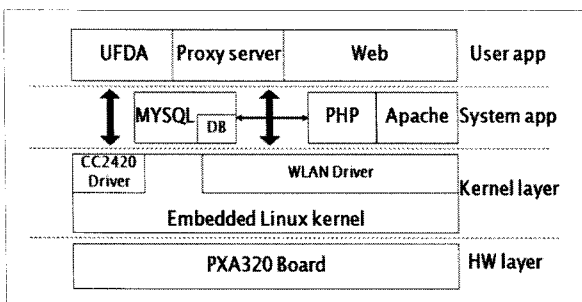


그림 2. UFDA System



그림 3. 액체형(상수도, 하수도) UFSN 시스템

하여 제안된 UFSN 기반 기술들을 활용하여 액체형 UFSN, 기체형 UFSN, 안전진단 UFSN을 개발하고 그림 2와 같은 구조의 지하 환경에 특화된 USN 게이트웨이 기반의 임베디드 플랫폼인 지하데이터 수집장치(UFDA)를 통하여 효과적으로 지하데이터를 수집한다.

2. 액체형 UFSN

대표적인 지하시설물인 상수도 시설은 그 중요성에 비하여 대표적으로 낙후된 시설물이다. 2008년 기준으로 평균 누수율 12.8%, 734백만 m^3 의 상수도가 누수 되고 있는 실정이지만 상수도의 경우 아날로그 유량계로 대부분 관리되고 있으며, 더욱이 하수도는 특별한 계측설비가 없는 형편이다. 상수도의 고질적인 누수와 기후변화로 인한 국지성 폭우로 인한 하수도 역류, 침수와 같은 피해를 방지하기 위해서는 상수도 시설의 정비와 함께 보다 정확한 하고 광범위한 유량 계측이 필요하다.

액체형 UFSN은 기존 상수도 시설물의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 맞춤형 유비쿼터스 융합 기술로써 정확도 높은 저전력의 초음파 센서와 지하시설물용 UFSN 기술 등이 활용되었다. 그림 3은 상수도 UFSN 유량계가 적용된 상수도 맨홀과 하수도 유량계가 적용된 하수도 맨홀의 개념도이다.

초음파를 이용한 유량계는 초음파의 순방향과 역방향으로 진행되는 초음파의 전달 시간차를 이용하는 방식으로 디지털 신호처리 기술을 기반으로 정확도가 향상됨에 따라 급속한 성장을 하고 있는 분야이다. 기존 유량 측정 방식에 비해 측정 유체의 전도도, 탁도, 온도, 관경 등에 따른 제약이 적고 저전력으로 구현이 가능한 특징으로 인

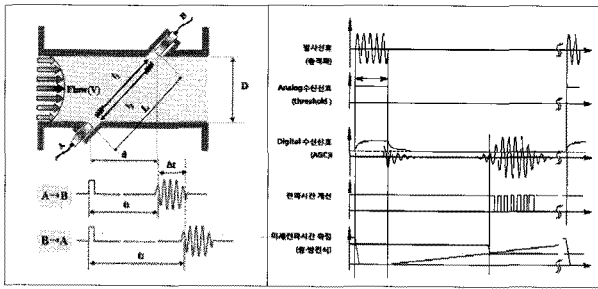


그림 4. UFSN 초음파 센서 유속 측정 알고리즘

하여 UFSN 응용에 적합하다.

그림 4는 액체형 UFSN 유량계의 구조와 전달 시간차 방식의 유속 측정 알고리즘이다. 초음파 센서 A에서 B로의 초음파 도달시간 t_1 은 식 (1)과 같으며 역방향의 초음파 도달시간 t_2 는 식 (2)와 같다. t_1 과 t_2 의 순간 유속 V에 의해 결정되며 순간 유속 V는 식 (3)과 같이 측정된다.

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (2)$$

$$V = \frac{L^2 (t_2 - t_1)}{2d t_1 \times t_2} \quad (3)$$

UFSN에 사용된 초음파 센서의 정확도는 $\pm 0.5\sim 1.0\%$, 소모전류는 30mW 이하, 그리고 유체의 탁도는 10,000mg/L이하 에서 동작한다. 측정된 순간 유속과 관경을 이용하여 신뢰성 높은 적산유량, 평균유량 그리고 압력 등의 값을 산출할 수 있다.

액체형 UFSN 유량계는 저전력 초음파 센서와 지하 상하수도 맨홀 및 공동에 적합하게 설계된 CSS 방식의 물리계층(Physical Layer)을 채용하였다. 기존 IEEE 802.15.4와 달리 칩 펄스를 이용한 Multi Dimensional Multiple Access(MDMA Keying) 변조 방식을 사용함으로써 지하 시설물 환경에서 발생하는 노이즈에 강한 통신 방식이다. CSS 2.45GHz, 7개의 채널을 이용하여 최대 2Mbps의 데이터 전송속도를 가진다. 그리고 유량계의 산업 표준 프로토콜 중 하나인 Modbus-RTU를 지원함으로써 기존 산업에 대한 적용성을 높였다[2].

3. 기체형 UFSN

대표적인 기체형 지하시설물인 가스 배관은 누출이나 폭발 사고 발생 시 막대한 피해를 초래할 수 있는 위험 시설물로서 해당 안전관리

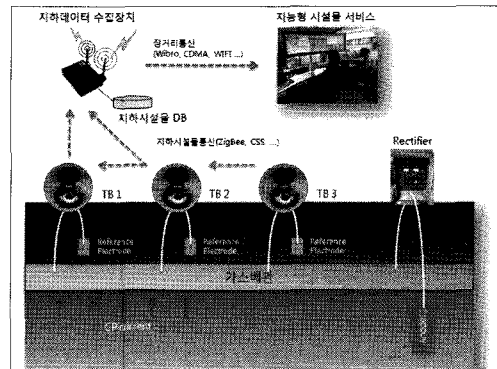


그림 5. 기체형 UFSN 시스템

규정에 의해 철저하게 관리되고 있다. 전기방식 시설을 이용한 가스배관의 부식 방지 시스템은 대표적인 가스배관 관리 시스템으로써 전위측정용 터미널이 매설 가스배관을 따라 300m ~ 500m 간격으로 설치되어 있으며 정기 검사를 통하여 전위측정기를 이용하여 방식전위의 이상 유무를 검사한다. 검침 주기가 길고 측정 데이터의 양이 많지 않으며 적당한 간격으로 시설물이 위치하고 있어 UFSN 기술을 적용하기 용이한 응용이다.

기체형 UFSN은 기존의 가스 배관 관리시스템에 UFSN 기술을 적용하여 상시 모니터링 체계 구축을 위한 시스템이다. 그림 5과 같이 가스 배관을 따라 일정 간격으로 배치된 가스안전 UFSN의 지하시설물통신(Zigbee, CSS 등) 네트워크를 이용하여 방식전위 데이터를 전달하고 지하데이터 수집장치에서 데이터를 취합한다. 그리고 필요한 경우 장거리 통신(Wibro, CDMA, WIFI)을 이용하여 도시의 지하시설물 관제센터로 데이터를 전송한다. 기체형 UFSN은 저전력 MCU인 MSP430과 Zigbee 기반의 CC2420을 기반으로 설계되었다. 그리고 정밀한 데이터 측정을 위해 별도의 아날로그 디지털 컨버터와 자가 유지를 위한 에너지회복회로 및 전원 회로로 구성되어 있다.

4. 배관안전진단 UFSN

지하배관의 효과적인 유지관리를 위해서는 정기적인 배관 점검 및 정밀 비파괴 안전진단 기술이 필수적이다. 하지만 기존의 고가의 측정 장비를 이용한 비정규적인 검사만으로는 배관안전 진단을 위한 상시 모니터링 체계 구축이 어려운 것이 사실이다. 배관 안전진단 UFSN은 지하배관 환경에 특화된 통신 기술과 유비쿼터스 응용에 적합한 저전력 압전 센서 기술을 활용하여 그림

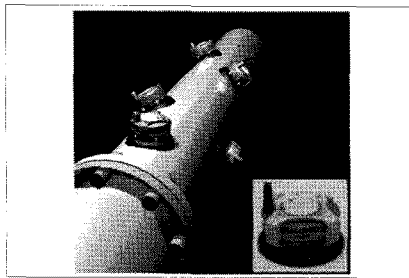


그림 6. 배관안전진단 UFSN

6의 개념도와 같이 지하 배관의 상시 안전진단을 수행한다.

압전소자는 외부로부터 기계적 변형을 가하면 전하가 발생하고 전계를 가하면 역학적인 변형이 발생하는 소자이다. 최근 이러한 압전효과를 이용하여 구조물의 저주파 진도, 고주파 임피던스 및 유도 초음파를 측정하기 위한 연구가 활발히 진행 중이며 임피던스 기반 구조물 손상 기술은 구조물에 부착된 압전 센서에서 얻어지는 구조물의 주파수 응답을 상시적으로 분석하여 배관 구조물의 특성변화를 탐지하는 기술이다. MFC 센서를 이용한 임피던스 측정기술은 배관 구조물과 같은 곡면부에 부착이 용이한 유연한 재질로 되어 있고 저전력으로 알고리즘의 구현이 가능하여 배관 안전진단 UFSN에 적합하다.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = [j\omega C(1 - k_{31}^2 \frac{Z_i(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_o(\omega)})]^{-1} \quad (4)$$

구조물의 임피던스는 식 (4)와 같이 구조물의 기계적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 와 압전소자의 기계적 임피던스 $Z_o(\omega)$ 가 결합된 함수도 표현된다. C는 PZT의 무부하 커패시턴스, k_{31} 은 PZT의 전기기계 결합계수이다.[1] 구조물의 손상 지수는 임피던스 리얼 파트의 파워 변화를 관찰함으로써 구할 수 있으며 일반적으로 식 (5)와 같은 RMSD 값을 측정한다. $Re(Z_{i,1})$ 은 i번째 측정 주파수에서의 리얼 파트 임피던스 이고 $Re(Z_{i,0})$ 는 기준치의 리얼 파트 임피던스이다.

$$RMSD(\%) = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{[Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,0})]^2}}{[Re(Z_{i,0})]^2} \times 100 \quad (5)$$

배관안전진단 UFSN은 저전력, 저가의 유비쿼터스 응용에 적합한 자가 감지 임피던스 기법을 기반으로 배관구조물에 부착이 용이한 MFC 센서를 이용하여 개발되었다. 임피던스 측정을 위하여 사용된 Analog Devices 사의 임피던스 컨버터

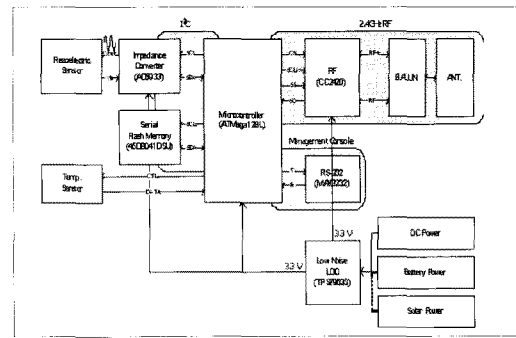


그림 7. 배관안전진단 UFSN 블록다이어그램

(AD5933)는 역시 저가의 소형 저전력 칩셋으로 UFSN에 적합한 특성을 갖추고 있다. 그리고 그림 7의 배관안전 진단 UFSN의 블록다이어그램과 같이 저전력 마이크로 프로세서(ATmega128L)을 이용하여 센서노드의 기능을 제어하고 RMSD 값을 계산하여 손상지수를 모니터링 한다.

배관안전 진단 UFSN을 적절한 위치에 부착하여 각 노드에서의 저주파 영역 진동응답으로부터 구조물의 진동모드를 구함으로써 구조물 전체의 거동특성을 실시간 감시할 수 있다. 임피던스 기법을 이용한 진단 결과 볼트 풀림과 노치의 개수가 증가함에 따라 임피던스 신호의 공진 주파수 변화가 더 크게 나타났고 손상 지수를 통하여 구조물의 손상정도를 정량적으로 파악하고 배관의 상시모니터링 체계 구축이 가능하다.

III. 테스트베드 실험

지하시설물용 UFSN의 성능 검증을 위해서 실제 환경과 유사한 그림 8의 지하시설물 테스트베드와 맨홀에서 테스트를 수행하였다.

지하시설물 테스트베드는 반지하 환경에 PC 압거 2조로 구성되어 있으며 내부에는 SUS 304 100mm관, 유량 조절용 전자식 가변 밸브, 물탱크 및 펌프 그리고 기준 유량계(초음파, 전자식)등의 테스트를 위한 설비가 갖추어져 있다.

액체형 UFSN에서 측정된 데이터는 지하시설물

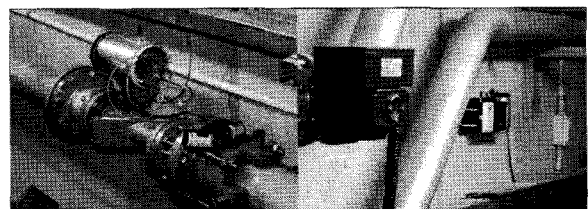


그림 8. 액체형 UFSN 테스트베드

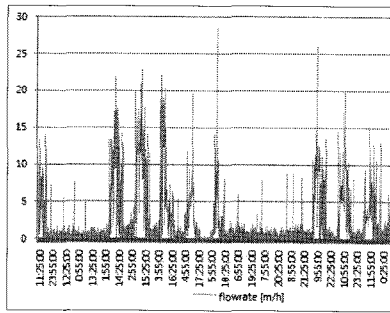


그림 9. UFSN 순간유량 데이터

모니터링 시스템을 통해 순간유속, 적산유량, 상태를 모니터링 하고 유량계 데이터의 유기적인 해석 및 상황인지를 통하여 을 통하여 관망해석, 누수탐지, 파손탐지 등의 다양한 u-지하시설물 관리 서비스를 제공할 수 있다. 테스트베드 실험을 통하여 검증된 액체형 UFSN은 기준유량계와 유사한 $\pm 1.0\sim 2.0\%$ 의 정확도, 60mW이내의 전력 소모를 보이며 95%이상의 데이터 전송률을 보인다. 그림 9는 연휴가 포함된 2주간의 액체형 UFSN의 순간 유량계 데이터이다.

배관 안전진단 UFSN 역시 그림 10의 테스트베드 환경을 활용하여 테스트하였다. 테스트베드 배관 구조물의 상태에 따른 임피던스를 계측하고 데이터를 기준 데이터와 비교 분석함으로써 구조물 상태에 대한 신뢰성 있는 상시모니터링이 가능한지 평가 가능하다. 테스트베드 실험은 배관안전진단 UFSN 노드와 계측된 임피던스 신호를 무선통신으로 받아 지하시설물 모니터링 시스템으로 전달하는 지하데이터 수집장치(UFDA) 등을 구성하여 실험을 수행하였다.

지하시설물 테스트베드에서 측정된 임피던스 신호는 그림 11과 같으며 4200Hz ~ 4500Hz 영역에서 기준 공진 주파수가 측정되었으며 5~6 정도의 특징 주파수가 나타난다. 배관의 구조물의 크기와 종류에 따라 특성 임피던스가 달라지는 것을 확인가능하며 연결부 결함과 배관 파손 등에

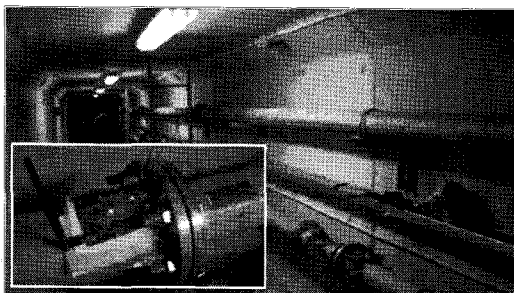


그림 10. 배관안전진단 UFSN 테스트

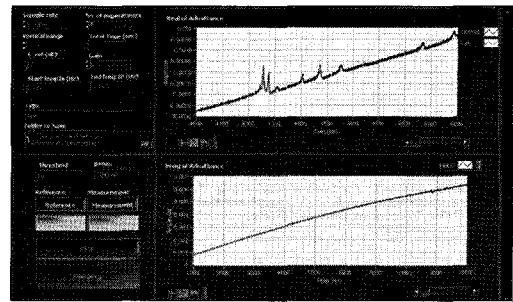


그림 11. 배관안전진단 UFSN 임피던스 데이터

의한 특성 변화를 통하여 배관의 상태를 진단 할 수 있다. 기체형 UFSN은 현재 개발을 진행 중이며 추후 테스트베드 시스템 구축을 통하여 테스트 할 예정이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 도시지하시설물의 환경적 특성과 물리적 특성을 고려하여 시설물을 지능화하기 위한 UFSN 기술을 소개하고 지하시설물 테스트베드 실험을 통해 시스템을 실증 하였다. UFSN 시스템은 정확도 높은 저전력 센서 기술, 산업용 프로토콜을 적용한 강성통신 기술, 신뢰성 기반의 임베디드 플랫폼 기술 그리고 지하시설물 에너지 획득 기술 등이 적용 되었다. 각 시설물 특성에 맞게 개발된 액체형 UFSN, 기체형 UFSN 그리고 배관안전진단 UFSN은 지하 강성통신을 통하여 지하 데이터 수집장치로 전송되고 취합된 데이터는 위험상황인지, 사고예방, 에너지 효율화 등의 다양한 지능형 지하시설물 서비스를 위하여 도시 관제시스템으로 장거리 전송된다.

본 연구는 지하시설물 지능화 기술을 개발하여 실시간 데이터를 기반으로 즉시적이고 종합적인 분석과 서비스를 제공하는 지능형 도시 관제 시스템을 구축에 활용 하고자 한다. 궁극적으로는 선진 지능형 지하시설물 관리체계 구축을 통해 삶의 질, 시민 안전의식 향상과 투명하고 신뢰성 있는 정책 실현 그리고 효율적인 행정업무 및 국가예산 절감에 기여 하고자 한다.

현재 실내외 테스트베드를 통한 실험을 통하여 시스템을 검증하였고 추후 실제 필드 테스트베드로 선정된 세종시 테스트를 통하여 도시지하시설물 관리용 UFSN 기술을 완성도를 높여갈 예정이다.

감사의 글

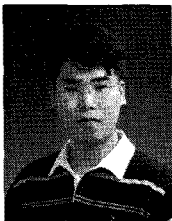
본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(06국토정보C01)에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

[1] V. Giurgiutiu and C. A. Rogers, "Electro-Mechanical (E=M) impedance method for structural health monitoring and nondestructive evaluation,"

International Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 433 - 444, Stanford University, 1997.
 [2] "Modbus application protocol specification V1.1b", www.modbus.org
 [3] F. Fraden, *Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications, 2nd Edition*, Springer-Verlag, New York ,2000
 [4] M. Takamoto, H. Ishikawa, K. Shimizu, H. Monji, and G. Matsui, "New measurement method for very low liquid flow rate using ultrasound," in *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 12, no. 4, pp. 267-273, Aug. 2001.

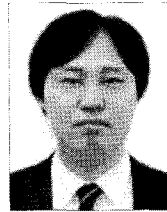
Biography



권영민

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

<e-mail> youngminy@keti.re.kr



송병훈

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

<관심분야> 신뢰성USN무선통신, 건설 USN 시스템, 마이크로 에너지하베스팅

<e-mail> 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