

압전 발전기를 이용한 WBAN/USN용 자기유지 시스템 구현

論 文
8-1-8

Self-Sustaining System Using Piezoelectric Power Generator for WBAN/USN Applications

노형환*, 박준석**, 김형석***

(Hyoung-Hwan Roh, Jun-Seok Park and Hyeong-Seok Kim)

Abstract

This paper presents a self-sustaining system, and an effective method in enhancing overall energy efficiency. The proposed system consists of the two major nodes: a slave node, which contains the environment information (e.g., temperature, humidity, etc.); and a master node, which communicates with the slave nodes, and transmit the slave node's information to users. All slave nodes are under control of the master node. Each slave node uses two power sources: the piezoelectric power generator (PPG); and the continuous wave from the master node. The paper highlights the basic operational principle, each node's specifications, and experimental data for performance verification. The two nodes successfully communicate each other in a range of 3.3m (maximal range), where the user's computer is wired the master node.

Keywords : self-sustaining, piezoelectric power generator, WBAN, USN

I. 서 론

u-헬스(u-health) 및 IT-BT 융합 기술의 발달로 WBAN(Wireless Body Area Network)시스템에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. WBAN의 경우 옷이나 신발 등의 입을 수 있는 소재나 신체에 장착해야 하므로 사이즈나 무게에 제약이 있다. 수십, 수백 개의 센서노드가 운용되는 USN(Ubiquitous Sensor Network) 응용분야에서는 소형으로 제작해야 하는 문제도 있지만 다수의 센서노드의 배터리 잔여량 유무를 정기적으로 확인 하고 배터리 교체 작업은 매우 비효율적이고 USN시스템 운영 비용을 증가시켜 다양한 응용분야에 접목시키는데

제약을 준다[2]. WBAN/USN 시스템의 초소형 설계 및 배터리 사용시간을 극대화시키기 위해서는 새로운 개념의 전력 공급 장치와 이 장치로 구동되는 센서 그리고 이 센서간의 효율적인 운용 및 통신방식이 요구되고 있다[3].

WBAN/USN 시스템의 초소형 설계를 위해서는 배터리의 사이즈 및 용량을 최소화하여 설계해야 한다[4]. 하지만 일반적인 WBAN/USN 시스템에서는 센서가 주변 정보를 수집하고 있을 때 전체 시스템이 휴면(idle) 상태로 있게 되고 이때 누설 전력을 소모하게 되어 배터리 수명이 한정적이다[4].

WBAN/USN 자기유지(self-sustaining) 시스템은 주변에 존재하는 사람이나 동물의 생체 에너지나 운동 에너지 또는 주변 환경에 존재하는 빛, 열, 진동 등과 같은 에너지로부터 시스템을 구동시킬 전력을 얻는 기술인 에너지 획득(energy scavenging)기술을 이용하여 스스로 충전하여 센서노드를 동작시킬 수 있는 에너지를 얻고 각

접수일자 : 2009년 1월 20일
최종완료 : 2009년 3월 26일
*국민대학교 대학원
**국민대학교 전자공학과
교신저자, E-mail : jspark@kookmin.ac.kr
***중앙대학교 전자전기공학부

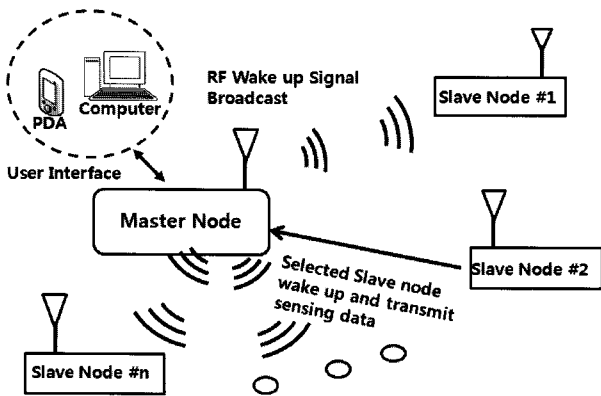


그림 1. WBAN/USN용 자기유지 시스템
Fig. 1. Self-sustaining system for WBAN/USN applications

노드간 저전력으로 통신하는 시스템이다[5].

본 논문에서는 휴면 상태일 때 전체 시스템을 끄고 Wake-up 모듈의 전력을 무선으로 전송 받아 누설전력 소모의 문제를 해결하고 초소형 압전 발전기를 이용하여 진동에너지를 통해 자체적으로 충전하여 배터리 수명을 획기적으로 증가시킨 WBAN/USN용 자기유지 시스템을 제안하였다.

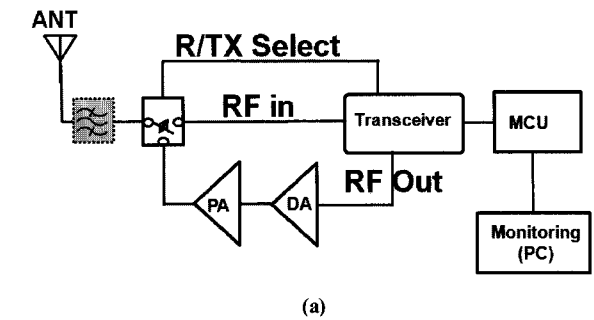
본 논문의 II장 1절에서는 WBAN/USN용 자기유지 시스템의 변조방식 및 전체 동작에 대해 설명하고, II장 2절과 3절에서는 마스터노드와 초소형 압전발전기를 내장한 슬레이브노드의 블록 설명과 내부회로 및 설계방향에 관하여 설명한다. 이후 III장에서는 마스터노드와 슬레이브노드를 보드로 구현한 측정 결과를 보여주었다.

II. 자기유지 시스템 디자인 및 구현

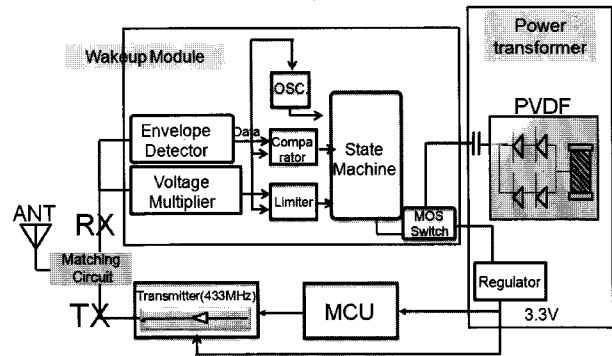
1. WBAN/USN용 자기유지 시스템

본 논문에서 제안한 자기유지시스템은 그림 1과 같이 단일 마스터 노드와 다수의 슬레이브노드로 구성되어 있다.

사용자가 마스터노드를 제어하거나 슬레이브노드에서 수집한 데이터를 저장하기 위해 컴퓨터나 PDA같은 저장매체와 마스터노드를 연계하여 사용한다. 슬레이브노드는 진동에너지를 이용하여 자체적으로 충전하며 노드에 부착된 센서에서 온도, 빛, 습도 등의 환경정보를 모아 마스터노드에 보내준다. 하나의 마스터노드로 여러 개의 슬레이브노드를 제어하기 때문에 충돌을 방지하기 위해 각 슬레이브노드는 고유 ID를 가지고 있다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 마스터노드, (b) 슬레이브노드의 블록도
Fig. 2. Block diagram of (a) master node and (b) slave node

에너지 획득 기술을 사용하여 전력을 공급받는 슬레이브노드의 수신부는 회로가 간단하고 전력 소모가 적어야 하고 데이터 복원회로가 간단해야 한다. 마스터노드에서 슬레이브노드로 데이터를 보낼 때 진폭 편이방식(ASK: Amplitude Shift Key)을 사용하여 수신부를 간단한 구조로 구현한다[6]. 슬레이브노드에서 마스터노드로 수집한 데이터를 보낼 때는 쉬운 동기화로 인해 통신 거리를 늘릴 수 있는 주파수 편이 방식(FSK: Frequency Shift Key modulation)을 사용하여 데이터를 전송한다[6].

그림 2(a), (b)에 마스터노드와 슬레이브노드의 블록도를 나타내었다. 자기유지 시스템의 동작 순서는 먼저 마스터노드에서 제어데이터를 보내지 않을 때인 휴면상태부터 시작한다. 이 때 슬레이브노드는 송수신 모듈을 끈 상태로 압전기 (piezoelectric)를 이용하여 진동으로부터 교류 전력을 추출하여 고 용량 저장 커패시터(storage capacitor)에 충전한다. 그 상태에서 마스터노드가 슬레이브노드 고유 아이디(ID : IDentification)가 포함된 웨이크업(wake-up) 신호를 브로드캐스팅하면, 각각의 슬레이브노드가 아이디를 체크하여 동작유무를 판단한다. 이 때 저장 커패시터에 충

전된 전력을 이용하여 동작유무를 판단하는 것이 아니라 마스터노드에서 보낸 RF신호를 전압채배기(voltage multiplier)를 통해 직류 전력으로 변환하여 사용한다. 그 전력을 받은 저전력 상태기계(state machine)가 아이디 체크를 하게 된다[7]. 슬레이브노드의 아이디가 일치하지 않으면 다시 휴면모드로 들어가 계속해서 압전기를 이용해 교류 전력을 추출하고, 아이디가 일치하면 저장 커패시터에 저장된 전력을 이용하여 마이크로 컨트롤러(MCU : MicroController Unit)와 송신기에 전원을 인가한다. 전원이 인가되어 센서가 동작하게 되면 센서로부터 수집된 환경정보(온도, 습도 등)를 마스터노드로 전송을 하게 되고 전송이 끝나면 슬레이브노드는 다시 휴면모드로 들어가게 된다. 그 다음 마스터노드는 사용자가 필요 시 그 정보를 조회할 수 있도록 그 센싱정보를 PDA나 PC와 같은 서버에 전송한다. 즉, 슬레이브노드는 아이디 체크를 할 경우와 센서 정보를 마스터노드로 전송할 때만 동작을 하고 그 외에는 동작을 하지 않게 된다. 아이디 체크과정에서도 충전된 전력을 사용하지 않고 안테나를 통해 들어오는 수신 전력만으로 아이디 체크를 하게 되므로 아이디 체크과정에서 자체 저장 커패시터의 전력 소모가 없다. 슬레이브노드를 깨워주는 웨이크업 신호는 신호의 High 구간이 길어 전압채배기에서 전압을 승압할 때나 포락선 검파기에서 신호를 검출할 때 용이한 장점이 있는 PIE(Position Independent Code)를 사용하였다[8].

2. WBAN/USN용 마스터노드

마스터노드는 슬레이브노드로 아이디기만 웨이크업 신호를 보내고 슬레이브노드로부터 정보 데이터를 수신하여 서버에 전송하는 역할을 담당한다.

송수신기(transceiver)는 송신모드일 경우 슬레이브노드로 웨이크업 신호를 송신하고 수신모드에서는 슬레이브노드로부터 입력되는 주파수 변조된 센싱 데이터를 수신한다. 이 웨이크업 신호는 진폭 변조된 정현파(CW: Continuous Wave) 신호와 슬레이브노드간 충돌 현상을 방지하기 위한 슬레이브노드 아이디 데이터를 포함하고 있다. 마이크로 컨트롤러는 마스터노드의 송수신 모드를 결정한다. 또한 송신 모드일 때는 데이터를 생성하고, 수신 모드일 때는 슬레이브노드로부터 들어오는 센싱 데이터를 받아서 서버에 전송하여

사용자가 모니터링 및 제어에 사용할 수 있도록 한다.

3. 초소형 압전발전기를 내장한 슬레이브노드

슬레이브노드는 웨이크업모듈(wakeup module), 전력 변환기, 송신부로 나뉠 수 있다. 웨이크업 모듈은 에너지 획득(scavenging)을 통해 얻은 전력으로 센서노드를 동작할 수 있도록 하기 위한 핵심 모듈이다. WBAN/USN용 자기유지 시스템은 하나의 마스터노드에 다수의 슬레이브노드가 통신하므로 에너지의 효율적인 사용과 데이터들의 충돌 방지가 필요하다. 에너지의 효율적인 사용과 데이터들의 충돌 방지 기능을 웨이크업 모듈이 지원한다[9]. 웨이크업 신호는 슬레이브노드 안테나를 통해 4단의 디슨(Dickson) 구조 전압 채배기로 입력되는데 RF신호를 직류 전력으로 변환하여 외부의 에너지 공급 없이 상태기계를 동작시킬 수 있는 전력을 공급하였다[10]. 두 노드간의 거리가 가까우면(1m이내) 전압 채배기의 출력전압이 뒀단 블록에 충격을 줄 수 있을 정도의 높은 전압이 나오게 될 수 있어 채배기의 출력단에 전압 제한기(voltage limiter)를 추가하여 최고 2.1V이상 못 올라가도록 설계하였다. 복조기는 마스터노드에서 송신되는 진폭 편이 방식 신호를 복조하고 추출한 데이터를 상태기계로 보내주는 역할을 한다. 복조기 회로는 포락선 검파기(envelop detector) 방식을 사용하였다[11]. 복조기로부터 데이터를 받은 상태기계(state machine)는 입력 ID 정보를 체크하여 신호가 슬레이브노드 고유 ID와 맞을 경우 전원공급스위치를 단락하여 송신부와 전압 조절기(voltage regulator)에 전압을 공급하고 아닐 경우 현재 상태를 유지한다.

전력 변환기는 여러 에너지 획득 기술 중 진동 에너지를 이용하여 시스템에 필요한 에너지를 공급받는 구조로 구현하였다. 에너지 변환장치는 PVDF(PolyVinylidene Fluoride) 기술을 적용한 전원공급용 소자를 만들어서 사용하였다[12].

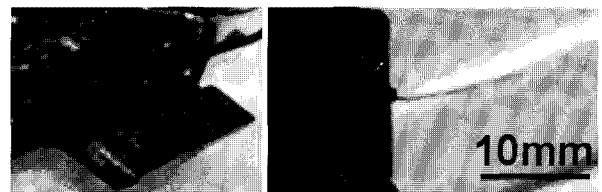
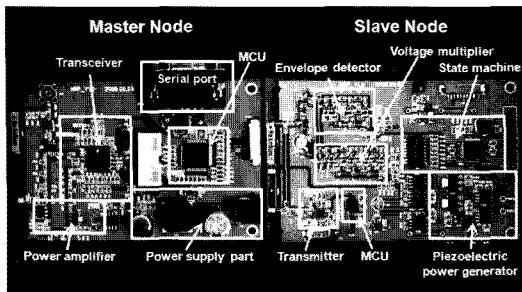
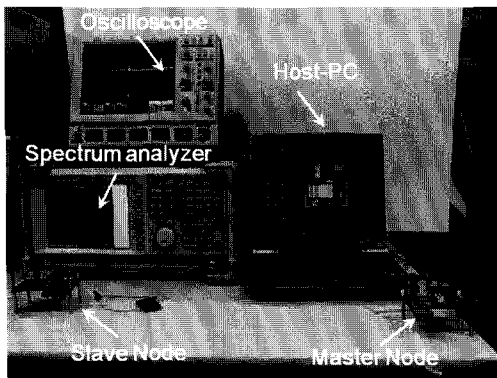


그림 3. 제작한 진동에너지변환장치
Fig. 3. Piezoelectric energy converter

그림 3에 제작한 진동에너지변환장치를 나타내었다. PVDF는 압력이나 길이 변화 등의 기계적 변형이 가해지면 전기적 신호(전압)를 발생시키고 반대로 전기적신호를 가하면 기계적 변형을 일으키는 압전 특성을 가진 물질이다[12]. PVDF를 이용하여 전압을 추출하는 정류회로를 만들기 위해서는 내부 회로에 다이오드가 구현되는데 일반적으로 동작 전압이 낮은 쇼트키 다이오드(Schottky diode)와 역방향 누설 전류가 적은 패드 다이오드(pad diode)를 사용한다[13,14]. 본 논문에서는 자기유지시스템에 적합한 누설전류가 매우 적은 패드 다이오드를 사용하였다. 두 가지 다이오드를 사용하였을 때 에너지 및 전력 소모량을 비교 측정하여 그림 7에 나타내었다. 압전발전기에서 생성한 전력은 전압 조절기를 통해 3.3V크기로 변환하여 마이크로 컨트롤러(MCU)와 송신기에 공급한다.



(a)



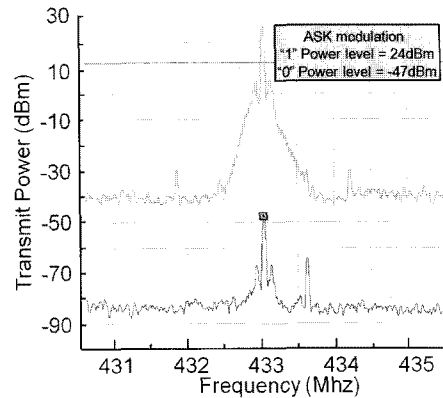
(b)

그림 4. 마스터노드, 슬레이브노드 보드 사진(a)과 측정환경(b)

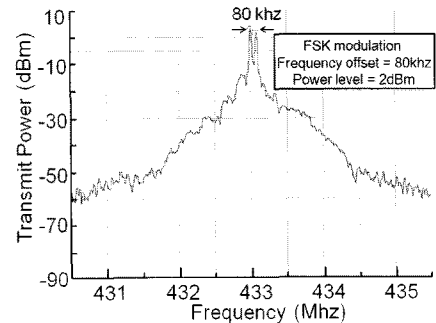
Fig. 4. Implemented system (a) master(left) and slave(right) nodes (b) measurement sight

III. 측정 결과

그림 4 (a), (b)는 구현한 마스터노드와 슬레이브노드 보드 사진과 두 노드간의 통신 테스트 환경을 나타내었다. 이 테스트 환경에서 거리를 변화시키며 모든 측정을 진행하였다.



(a)



(b)

그림 5. '1', '0' 상태일 때 마스터노드 (a) 슬레이브노드 (b) 스펙트럼 마스크

Fig. 5. Measured spectrum masks(state '1' and '0', respectively) (a) master node, (b) slave node

그림 5는 마스터노드와 슬레이브노드의 송신단의 안테나직전에서 출력 스펙트럼을 측정한 값이다. 그림과 같이 마스터노드는 '1'과 '0'일 때 출력을 24dBm, -47dBm으로 ASK 신호를 송신하고, 슬레이브노드는 80Khz FSK 신호를 2dBm으로 송신하였다. 마스터노드에서 웨이크업 신호를 보내줄 때 슬레이브노드에서 측정한 전압 체배기 출력 전압은 그림 6에 나타내었다. 5V이상의 전압도 측정되었지만 뒷단에 전압 제한기를 설계하여 2.1V이내로 제한시켰다. 거리 3.3m에서 상태기계를 동작시키기 위한 1.8V전압보다 높은 1.82V가 나옴을 알 수 있다.

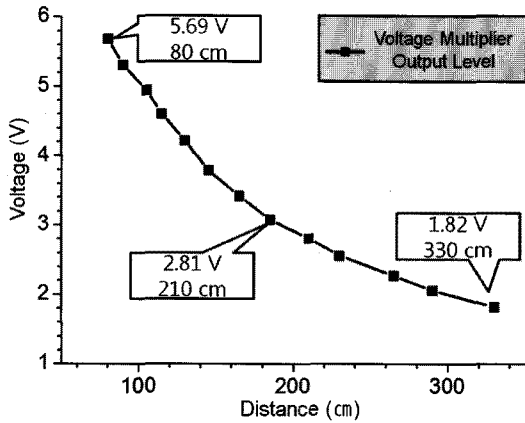


그림 6. 전압 체배의 거리에 따른 출력전압
 Fig. 6. Voltage multiplier output voltage by distance between master node and slave node

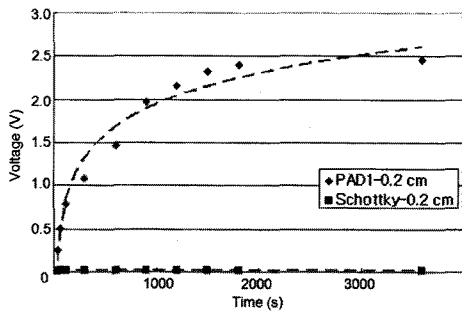
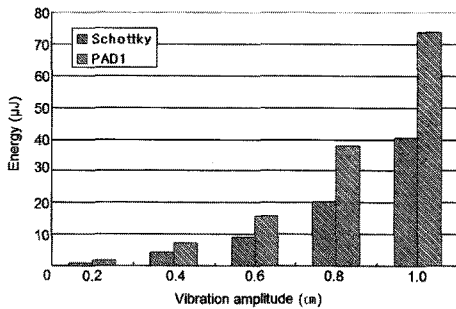


그림 7. Pad diode 와 schottky diode를 사용한 PVDF 정류회로 측정 비교치
 Fig. 7. PVDF measurement results using pad diode or schottky diode

그림7(a)와 (b)는 PVDF 정류회로에 들어가는 다이오드의 특성을 비교한 그림이다. 그림(a)는 진폭에 따른 에너지 발생량을 측정한 그래프이고, 그림(b)는 진폭이 0.2cm 일 때 저장 커패시터에 충전되는 전압을 나타낸 그래프이다. 그림 (b)를 보면 진폭이 0.2cm일 때 Schottky diode는 역방향 누설전류로 인해 충전이 안 된 것을 볼 수 있다.

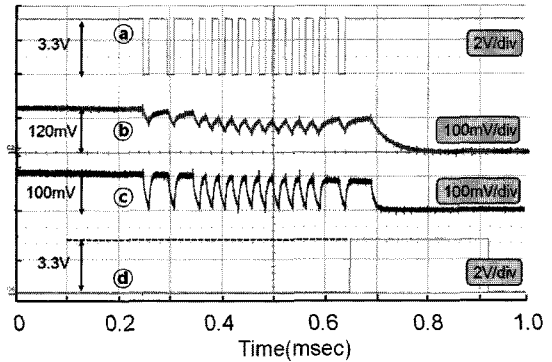


그림 8. 마스터노드에서 슬레이브노드로 보내는 데이터 측정값
 Fig. 8. Received master node signals by slave node

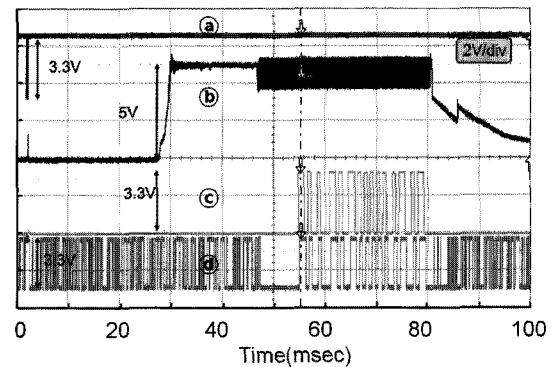


그림 9. 슬레이브노드에서 마스터노드로 보내는 데이터 측정값
 Fig. 9. Slave node signals in wider time domain

그림 8은 마스터노드에서 슬레이브노드로 송신할 때의 출력파형이다. 마스터노드에서 슬레이브노드 사이의 거리는 3.3m로 고정하고 측정하였다. 그림에서 ㉑는 사용자가 선택한 슬레이브노드의 ID 데이터 파형이고, ㉒는 슬레이브노드의 전압 체배기에서 본 ID 데이터 파형, ㉓는 슬레이브노드의 포락선 검파기에서 본 ID 데이터 파형이고 ㉔는 ID가 일치하였을 때 마이크로컨트롤러와 송신기를 동작시키기 위한 상태기계 출력 파형이다.

그림 9의 ㉑는 마스터노드에서 송신하는 ID 데이터 파형이다. ㉒는 PVDF에서 충전된 전압을 마이크로 컨트롤러와 송신기로 공급하는 전압조절기의 출력파형이다. 신호가 입력되지 않을 때는 전압조절기 출력이 없다가 ID 데이터가 들어오면 ID 체크 후 전원 스위치를 단락시키기 위한 High 신호를 보내고 송신기로 데이터를 출력을 한 후 다시금 꺼지는 것을 볼 수 있다. ㉓는 송신기로 입력되는 센싱된 데이터 파형이다. ㉔는 마스터노드에서 수신하는 최종파형이다. 그림에서 보듯이 센싱정보가 정확하게 복원되었음을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서 제안한 압전발전기를 내장한 WBAN/USN용 자기유지시스템은 필요 없는 전력 소모 문제를 해결하기 위해 RF신호를 무선으로 받아 DC 전압으로 변환해주는 전압 체배기를 삽입하였고, 웨이크업 모듈을 사용해 동작모드 일때만 송신부와 마이크로 컨트롤러에 전원을 공급하는 방식으로 기존의 에너지 수확 기술 보다 적은 전력을 이용하여 동작이 가능한 방식을 사용하였다. 그 결과 마스터노드 출력 신호가 '1'일 때 레벨이 24dBm이고 3.3m거리까지 에너지 획득 기술로 센서노드가 동작하고 웨이크업 신호에 따라 센서노드의 동작을 제어하는 것을 측정하였다. 이 시스템은 에너지 획득 기술이 적용 가능한 환경에서 불요 전력을 최대한 활용하고, 이를 고효율 변환과정을 거쳐 필요한 데이터를 모니터링 하는 WBAN/USN 응용분야에 활용 할 수 있다.

[참고 문 헌]

- [1] C. A. Otto, E. Jovanov, and A. Milenkovic, "A WBAN-based system for health monitoring at home," *IEEE/EMBS International Summer School, Medical Devices and Biosensors*, pp. 20-23, 2006.
- [2] B. Warneke, M. Last, B. Leibowitz, and K. S. J. Pister, "Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 1, pp. 44-51, 2001.
- [3] E. M. Yeatman. "Advances in power sources for wireless sensor nodes," *Proceedings of the International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pp. 20-21, 2004.
- [4] W. Nosovic and T. D. Todd. "Scheduled rendezvous and RFID wakeup in embedded wireless networks," *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, vol. 5, pp. 3325-3329, 2002.
- [5] E. Dallago, D. Miatton, G. Venchi, V. Bottarel, G. Frantini, G. Ricotti, and M. Schipani, "Electronic interface for piezoelectric energy scavenging system," *Solid-State Circuits Conference*, pp. 402-405, 2008.
- [6] M. R. Yuce and A. Tekin, "Ultra low-power digital demodulators for short range applications," *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, vol. 5, pp. 2280-2284, 2006.
- [7] H. Vogt, "Efficient object identification with passive RFID tags," *Proceedings of the International Conference on Pervasive*, vol. 2414, pp. 98-113, 2002.
- [8] S. J. Kim, M. C. Cho, J. H. Park, K. Song, Y. Kim, and S. Cho, "An ultra low power UHF RFID tag front-end for EPC global Gen2 with novel clock-free decoder," *IEEE International Symposium on Circuits and System*, pp. 660-663, 2008.
- [9] S. V. D. Mark and G. Boeck, "Ultra low power wakeup detector for sensor networks," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, pp. 865-868, 2007.
- [10] J. F. Dickson, "On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique," *IEEE Journal on Solid-State Circuits*, vol. 11, no. 3, pp. 374-378, 1976.
- [11] C. C. Wang, T. J. Lee, U. F. Choi, Y. T. Hsiao, and J. J. J. Chen, "A 570-kbps ASK demodulator without external capacitors for low-frequency wireless bio-implants," *Microelectronics Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 130-136, 2008.
- [12] P. Ueberschlag, "PVDF piezoelectric polymer," *Journal on Sensor Review*, vol. 21, no. 2, pp. 118-126, 2001.
- [13] L. Mays and K. Kime, "Utilizing low forward voltage drop power semiconductors to minimize heat sinking requirements in multichip module DC solid state relays and static switching applications," *Proceedings of the International Conference on Multichip Modules and High Density Packaging*, pp. 149-154, 1998.
- [14] G. Casse, P. P. Allport, and M. Hanlon, "Improving the radiation hardness properties of silicon detectors using oxygenated n-type and p-type silicon," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 47, no. 3, pp. 527-532, 2000.

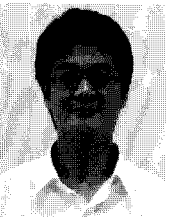
Biography



노형환(Hyoung-Hwan Roh)

2005년 국민대학교 전자공학과(공학사).
2007년 국민대학교 전자공학과(공학석사).
2007년~현재 국민대학교 전자공학과 박사과정
재학 중.

<관심분야> RFIC 설계, UHF RFID tag IC, 저전력 센서 기술.



박준석(Jun-Seok Park)

1991년 국민대학교 전자공학과(공학사).
1993년 국민대학교 전자공학과(공학석사).
1996년 국민대학교 전자공학과(공학박사).
2003년~현재 국민대학교 전자공학과 부교수.

<관심분야> RFIC, USN/WBAN용자기유지시스템, 무선전력전송,
에너지 획득기술.

<e-mail> jspark@kookmin.ac.kr



김형석(Hyeong-Seok Kim)

1985년 서울대학교 전기공학과(공학사).
1987년 서울대학교 전기공학과(공학석사).
1990년 서울대학교 전자공학과(공학박사).
1990년~2002 순천향대학교 정보기술공학부
부교수.

1990년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수.

<관심분야> 무선통신 부품설계, RFID시스템응용, IT-SoC, 전력IT.

<e-mail> kimcaf2@cau.ac.kr