

# 무선 센서네트워크에서 에너지 효율성을 개선한 MAC 프로토콜 연구

정회원 성태경\*, 이형기\*\*

## A Study on Energy Efficient MAC Protocol in Wireless Sensor Network

Tae-Kyung Sung\*, Hyung-Ki Lee\*\* *Regular Members*

### 요 약

무선 센서 네트워크의 저전력 동작을 위해서, 기존의 S-MAC (Sensor MAC)에서는 고정된 duty cycle을 사용하였고, T-MAC (Time-out MAC)에서는 TA라는 시간을 두어 이 시간동안 데이터의 전송이 없을 경우, 바로 sleep 함으로써 불필요한 에너지 소모 문제를 해결하였고, B-MAC (Berkeley MAC)에서는 duty cycle과 idle listening을 줄이기 위한 목적으로 adaptive preamble sampling 기법을 사용하였다. 본 논문에서는 이러한 프로토콜들을 비교, 분석함으로써 에너지 소비의 주된 요인들을 파악하고, 제안된 Sync-RTS 기법에서의 에너지 소비, 지연, throughput, 패킷전송률 측면에서 각각 더 향상된 다양한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : Wireless Sensor Network(WSN), MAC Protocol, Power Efficiency

### ABSTRACT

To achieve low power operation in wireless sensor network, conventional S-MAC adapts fixed duty cycle. And T-MAC protocol apply TA period to solve the energy problem which is wasted unnecessarily, by using sleep method when there is no data to transmit. B-MAC employs an adaptive preamble sampling scheme to reduce duty cycle and minimize idle listening. By comparing these protocol to each other, and by analyzing each factors of energy consumption, this paper shows that flexibility results in better packet delivery rates, throughput, latency, and energy consumption.

### I. 서론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)은 최근 대두되고 있는 유비쿼터스 컴퓨팅의 연구에 힘입어 광범위하게 설치되어 있는 유무선 네트워크 인프라에 상황인지를 위한 다양한 센서 장치를 결합하여 감지된 환경 데이터를 응용서비스 서버와 연동하는 기술이며<sup>[1]</sup>, 저전력 무선통신, 스마트 센서, 프로세서, 임베디드 컴퓨팅, 미들웨어 기술

의 발전과 함께 소형의 근거리 무선통신이 가능한 저비용, 저전력, 다기능 WSN의 발전이 가능토록 하였다<sup>[2]</sup>. 그러나, 이러한 센서 네트워크가 다양한 응용분야에 실제 적용되기 위해서는 다음과 같은 선결 과제가 있다<sup>[3]</sup>.

첫째, WSN의 노드는 배터리로 동작하는 저가, 저전력의 시스템으로, 배터리 기술의 한계로 인해 노드들은 에너지 사용에 제약을 받는다. 따라서 WSN은 전력 효율을 높여 네트워크의 생존시간을

\* 인하대학교 초광대역무선통신연구센터 (tksung@inha.ac.kr) \*\* 재능대학 정보통신과 (leehk@mail.jnc.ac.kr)  
논문번호 : 08018-0318, 접수일자 : 2008년 3월 18일

극대화할 수 있어야 한다<sup>4)</sup>. 둘째, WSN은 다각도의 센싱 정보를 수집할수록 풍부한 상황정보를 파악할 수 있으므로 대규모 통신 노드로 구성되며, 보다 많은 노드에서 센싱을 분배 수행함으로써 정보의 정확도를 높인다<sup>5)</sup>. 셋째, WSN의 노드들은 사람의 접근이 어려운 지역에 임의로 배치되므로, 노드가 사람의 관리나 간섭 없이 네트워크를 자기 구성할 수 있어야 한다는 기술적 요구사항을 지닌다<sup>6)7)</sup>. 넷째, 앞에서 언급한 바와 같이 WSN이 배치되는 지역은 물리적 환경이 열악하고 가변적이라는 것이며, 이는 노드의 고장, 파괴 및 오동작 등이 빈번하게 일어날 수 있다는 가정이 전제된다. 따라서 급격히 변동하는 주변 환경에도 주어질 임무를 지속할 수 있는 장애 허용성 (fault tolerance)이 갖춰져야 한다는 것이다.

이와 같은 문제점들 중에서 특히 본 논문에서는 에너지 소비를 최소화하여 전체 네트워크의 수명을 극대화하고자 하며, 그 방법으로 무선 통신을 위한 MAC 프로토콜에서의 에너지 소비 요인을 파악하고 나아가 WSN에서 에너지 효율적인 측면을 고려한 MAC 프로토콜에 대하여 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 제2장에서는 WSN의 MAC 프로토콜에서의 에너지 효율성을 증대시키기 위해 제안되었던 기존의 S-MAC (Sensor MAC), T-MAC (Time-out MAC) 및 B-MAC (Berkeley MAC) 등을 고찰하고, 제3장에서는 S-MAC과 T-MAC의 성능을 비교 분석함으로써 에너지 소비의 주된 요인과 특성을 고찰하고, 제4장에서 에너지 소비, 지연, throughput 및 패킷전송률 측면에서 더욱 향상된 Sync-RTS 방식을 제안하고, 이의 개요 및 성능분석을 하며, 제5장에서 결론을 맺는다.

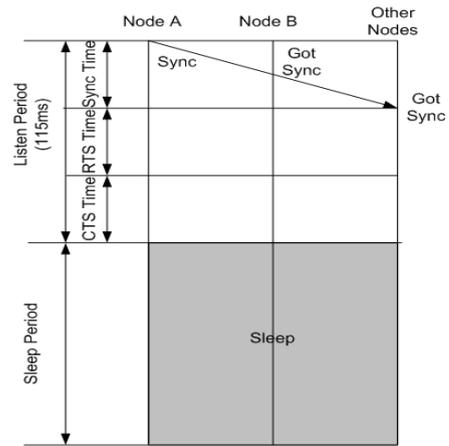
## II. 기존의 MAC 프로토콜

### 2.1 S-MAC (Sensor MAC)

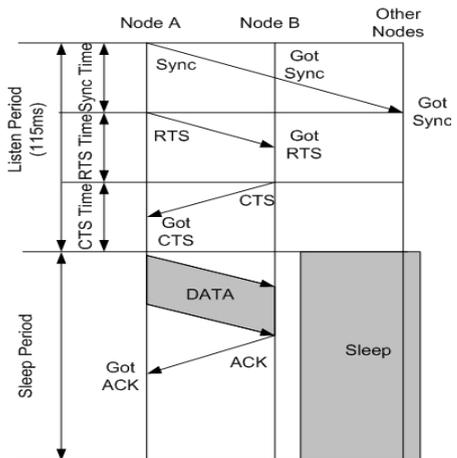
WSN의 대표적인 MAC 프로토콜인 S-MAC은 센서 노드의 동작 구간을 수면(sleep) 구간과 활성(active) 구간으로 구분하여 데이터 전송이 없는 경우에는 전력소모가 아주 적은 수면 상태를 유지하여 에너지 절감효과를 얻을 수 있도록 해 주는 프로토콜이다<sup>8)9)</sup>. S-MAC은 단일 주파수를 사용하는 경쟁기반의 프로토콜로서 시간을 활성과 수면 구간으로 구성되는 프레임으로 나누어, 수면 구간동안 노드는 데이터를 송수신 하지 않고 전원 off 상태를 유지하고, 활성 구간에서 이웃 노드와 통신하므로

에너지를 절감할 수 있다. 그러나 S-MAC은 idle listening 문제를 해결하기 위해 고정된 duty cycle 을 사용하므로, 송수신되는 데이터가 없거나 적은 경우 에너지를 낭비하며, 전송량이 많은 경우 활성 시간 동안에 모든 데이터를 전송하지 못하는 결과를 초래하게 된다.

S-MAC에서는 두 노드간의 통신을 위해 RTS/CTS 제어 신호를 듣는 이웃 노드들은 두 노드간의 통신이 완료할 때까지 수면 모드로 전환되어 overhearding으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하게 된다. 그림 1에는 보내야할 데이터가 없는 경우와 있는 경우에 대한 S-MAC의 에너지 소비특성을 보인



(a) 보낼 데이터가 없는 경우  
(a) When no nodes have data traffic



(b) 노드 A에서 노드B로 보낼 데이터가 있는 경우  
(b) When node A has data for node B

그림 1. S-MAC의 에너지 소비특성  
Fig. 1. Energy consumption characteristics of S-MAC.

다. 그림 1(a)에서 보이듯 보내야 할 데이터가 없을 경우에는 sync 구간동안 노드 A는 B를 포함하는 모든 노드들에게 sync 메시지를 뿌리게 된다. 그리고 다른 노드들은 이 구간동안 sync를 맞추게 되므로 S-MAC의 특성상 보내야 할 데이터가 없을 때에도 두 가지 남은 구간동안을 기다리게 하며, 이 시간에 필요 없는 에너지를 소모하게 된다. 그림 1(b)에서는 보내야 할 데이터가 있을 경우 센서가 데이터 전송이 끝난 후, 초기 sync로부터 예약된 수면 구간이 끝나야만 자기 자신이 수면 모드로 들어갈 수 있으므로 남은 수면 구간만큼의 에너지를 소비하게 된다.

### 2.2 T-MAC (Timeout MAC)

T-MAC 프로토콜은 WSN을 위한 경쟁기반의 MAC 프로토콜이다. WSN에서 에너지 효율성을 얻기 위해서 duty cycle을 적용하는 기법이 S-MAC이다. 하지만 S-MAC은 고정된 duty cycle을 적용하였지만 그림 2에서와 같이 T-MAC에서는 adaptive duty cycle을 제시하였다. 에너지를 소모하는 주된 요인은 idle listening 임을 시뮬레이션 결과 알 수 있었다. T-MAC은 이러한 idle listening으로 인한 에너지 낭비 요인을 줄임으로써 에너지 효율성을 극대화하기 위한 방법이다. 그림 2는 T-MAC의 동작과정을 보인 것이다.

T-MAC은 전송할 데이터가 없을 경우 다음 프레임을 기다리는 수면 모드로 전환되며, 그동안의 데이터는 큐(Queue)에 저장된다. 노드들은 서로 통신을 하기 위해 기존의 4-handshake 기법을 사용하여 충돌을 회피하고, 데이터 전송에 있어 신뢰성을 보장한다. 이러한 방식은 활성 시간 앞에서 데이터를 동시에 전송하고, 송수신 데이터가 없다면 일정한 시간만큼의 타이머(TA)를 동작시켜 S-MAC보다 일찍 수면 모드가 가능하게 하여 불필요한 idle listening을 줄일 수 있다.

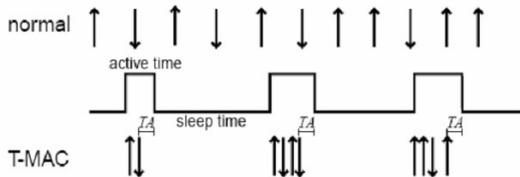


그림 2. T-MAC 동작  
Fig. 2. Operation of T-MAC.

### 2.3 B-MAC (Berkely MAC)

B-MAC은 기존 저전력을 위해 제안되었던

TDMA, S-MAC, T-MAC 등 여러 MAC들이 사용했던 비콘 메시지(control packet)를 과감히 제거하고, 간단한 프리앰블 신호로 노드들이 서로간의 동기를 맞추도록 하였다. 이전의 MAC 프로토콜들이 어떤 비콘 메시지를 사용하여 서로간의 동기 시간을 맞추려는 알고리즘으로 동작했었다면, B-MAC은 동기화에 대한 별도의 알고리즘 없이 모든 노드들이 주기적으로 매우 짧은 시간동안만 프리앰블 신호를 감지하기 위해 RF 네트워크를 수신하고 다시 power down 모드로 들어가도록 하였다. 또한, 데이터 통신이 이루어지게 하기 위해 송신하고자 하는 노드는 프리앰블 신호를 수신 노드들이 깨어난 주기보다 길게 전송하고 그 뒤에 서로간의 동기를 맞춘 후 데이터를 통신토록 한다. B-MAC은 기존의 MAC 들이 채택하고 있는 복잡한 알고리즘을 제거하고 아주 단순하고 효율적인 방식으로 노드간의 동기를 구현했으며, 기존의 MAC들보다 효율적인 저전력 데이터 처리능력을 가지며, B-MAC에서는 duty cycle과 idle listening을 줄이기 위한 목적으로 adaptive preamble sampling 기법을 사용하였다.

## III. S-MAC/T-MAC 에너지 소비 특성

본 장에서는 시뮬레이션을 위하여 Mica Mote를 이용한 프로토콜 실험환경을 구성하였다. Mica Mote는 U.C. Berkeley에서 개발된 무선 센서 노드 플랫폼으로 저전력 프로세서(Atmel90LS8535), 128k의 프로그램 메모리, 4K의 SRAM, RF 무선 디바이스 등으로 구성되며 운영체제로는 TinyOS를 사용한다. TinyOS<sup>[10][11]</sup>는 이벤트 기반의 경량급 운영체제로서 Mica Mote에 포팅될 때 주어진 작업을 처리하기 위해 꼭 필요한 컴포넌트만으로 구성되어 컴파일 된다. Mica Mote<sup>[12][13]</sup>상에서의 네트워킹 기능과 관련된 Tiny 컴포넌트 구조도로서 크게 물리계층, 통신계층, 응용계층의 세 부분으로 구분된다. 물리계층은 일종의 하드웨어 부분으로 Clock과 센싱모듈 그리고 실제 데이터 송수신 및 통신 모듈의 On/Off를 위한 RF 모듈로 구성되며, 응용계층은 데이터 트래픽 제어를 위한 테스트 애플리케이션과 센싱 제어를 위한 센싱 애플리케이션으로 구성된다. 통신계층은 라우팅 및 MAC 기능을 담당하는 일종의 소프트웨어 부분이다. 그림 3에는 MICA 시리즈의 무선 센서 플랫폼을 보인다.

그림 4에는 Mote의 동작 순서를 보인다.

S-MAC과 T-MAC의 에너지 소비 측면을 비교,



그림 3. MICA2/MICA2DOT/Sensor board  
Fig. 3. MICA2/MICA2DOT/Sensor board.

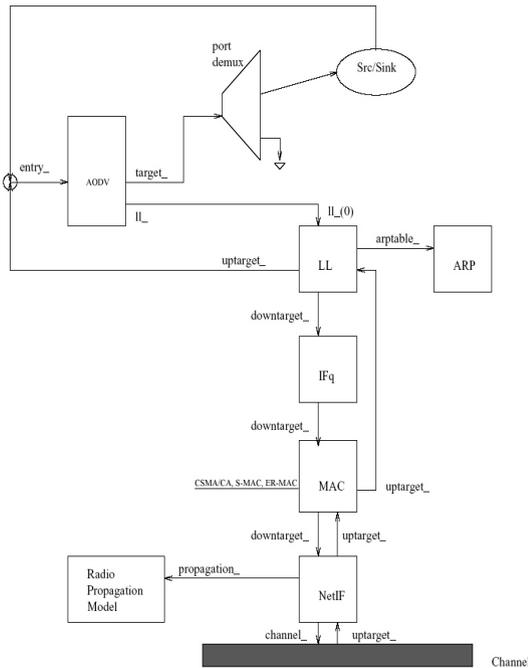


그림 4. Mote의 다이어그램  
Fig. 4. Diagram of Mote.

분석하기 위하여 각각 10노드와 20노드 환경에서의 다른 트래픽 로드를 주어 에너지 소비특성을 측정하였으며, 그 결과는 그림 5에 보인다.

T-MAC은 overharing avoidance를 사용하지만 full-buffer를 사용하지 않는다. T-MAC은 S-MAC 보다 적은 에너지를 사용하였지만 T-MAC에 적합한 최고 대역폭이 S-MAC 보다 낮기 때문에 edge 노드들의 수가 증가하게 되면 에너지 소비가 현저하게 많이 된다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 edge 노드들의 수가 많기 때문에 T-MAC은 early sleeping problem을 보임을 알 수 있다.

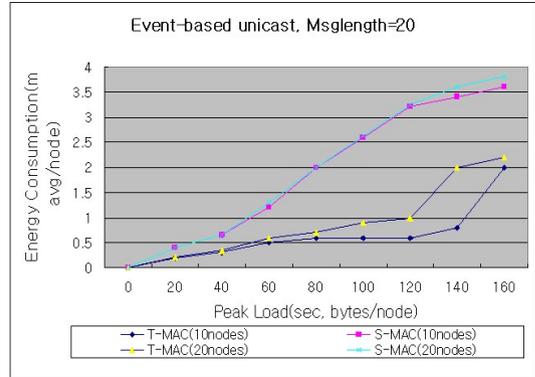


그림 5. S-MAC/T-MAC 에너지 소비특성  
Fig. 5. Energy consumption characteristics of S-MAC/T-MAC.

#### IV. Sync-RTS 기법

##### 4.1 Sync-RTS의 개념

S-MAC 계열 프로토콜들에서 정의하고 있는 고정된 listen 주기는 불필요한 에너지 낭비를 야기한다. 앞서 언급하였듯이 S-MAC에서 불필요하게 소비되는 에너지 특성에 기인하여 보내야할 데이터가 있을 때와 보내야할 데이터가 없을 때 불필요하게 소비되는 에너지가 있었다. 제안하는 Sync-RTS 기법은 3가지로 구성된 lister 구간을 보내야할 데이터가 있을 때와 보내야 할 데이터가 없을 때로 나누어 보내야할 데이터가 존재하지 않는다면 동기를 마치고 즉시 수면 상태로 들어갈 수 있는 방법을 제시하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 Sync와 RTS 패킷을 하나로 만들고 이를 하나의 구간 즉, Sync-RTS 구간으로 적용하고 중복되는 부분을 삭제하여, 3구간으로 이루어진 listen 구간을 2구간으로 줄이고 필드를 수정하였다.

표 1. Sync 패킷과 RTS 패킷의 비교  
Table 1. Comparison of Sync packet & RTS packet.

		10Bytes					
Sync 패킷	Lentgh	Type	State	SeqN	From Addr	Sleep Time	C R C
RTS 패킷	Lentgh	Type	To Addr(2Byte)	From Addr	Duration(NAV) (2Byte)		C R C

##### 4.2 Simulation & Results

시뮬레이션은 그림 6에 보이는 바와 같이 2개의 스케줄을 가지는 5개의 노드로 구성하였으며, 노드 A와 노드 B가 각각 노드 D와 노드 E에게 sync를

수행한다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 2에서와 같이 S-MAC의 파라미터 설정은 TinyOS 디폴트로 구성하였고, Sync-RTS 패킷 사이즈는 S-MAC의 Sync 패킷에 4Byte의 RTS를 추가하여 단일 구간으로 만듦으로써 중복되는 필드를 생략시켰다.

그림 7과 그림 8에는 각각 S-MAC과 Sync-RTS의 시간변화에 따른 각 노드에서의 전력소비량/시간 그래프를 보인다. 각 노드에 대하여 1초 간격으로 15초간의 전력소비량을 측정하였으며, 동일한 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3에는 S-MAC

과 제안한 Sync-RTS의 각 노드별 평균 전력소비량을 나타내었다. 그림 7과 그림 8에서 각 노드들의 초기상태로부터 100초까지의 시간적 변화를 보일 때 각 노드 A, B, C, D 및 E를 그래프에서 1, 2, 3, 4, 및 5로 나타내었으며, 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제안한 Sync-RTS 방식이 S-MAC에 비해 평균 대비 2.8 정도 소비 전력량이 개선된 결과를 보였다. 그림 9는 Sync-RTS와 S-MAC에서 목적지 노드 4, 즉 노드 D에서의 수면 모드 시간 비율 측정결과를 보인다.

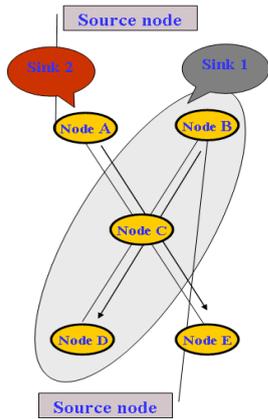


그림 6. 시뮬레이션 토폴로지  
Fig. 6. Simulation Topology.

표 2. 시뮬레이션 파라미터  
Table 2 Simulation Parameters.

Slot time	1ms
Processing delay	1ms
Encoding	Manchester Coding
Contention	31 Slot time
Window Size	31 Slot time
Sync	10 Byte
Control Packet Size	10 Byte
Data Size	100 Byte
Sync. + RTS Size	14 Byte
Channel	916MHz
Number of Nodes	Base 1EA/Slave EA
Node Type	Mica2
Processing OS	TinyOS 1.1.7 (S-MAC ver.1.1)

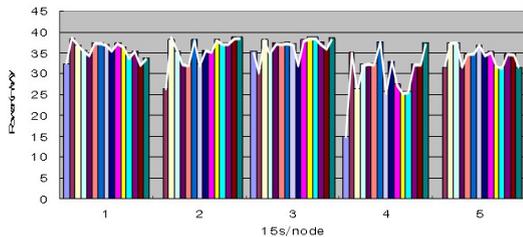


그림 7. S-MAC에서의 시간변화에 따른 각 노드의 전력소비량  
Fig. 7. Power consumption of each nodes for time variance of S-MAC.

표 3. Sync-RTS와 S-MAC에서의 평균 전력소비량 비교  
Table 3. Comparison of mean power consumption.

Index	Sync-RTS	S-MAC
Node A	31.5	35.9
Node B	32.0	35.6
Node C	33.3	36.7
Node D	28.3	30.8
Node E	33.7	34.5
Total Mean	31.8	34.6

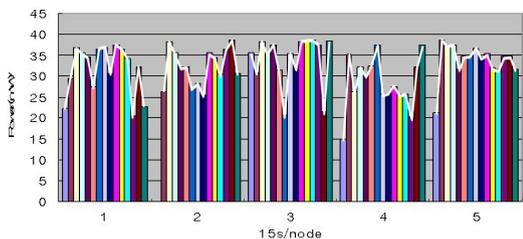


그림 8. Sync-RTS 시간변화에 따른 각 노드의 전력소비량  
Fig. 8. Power consumption of each nodes for time variance of Sync-RTS.

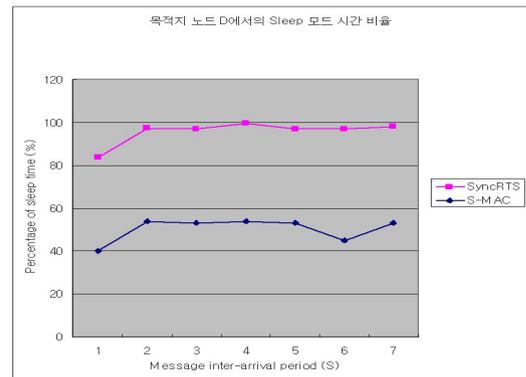


그림 9. 다양한 inter-arrival에서의 수면 모드 시간 비율  
Fig. 9. Sleep time proportion in various inter-arrival.

## V. Conclusion

WSN을 구성하는 각 노드는 그 크기가 작고 배터리의 용량도 매우 적으므로 오랜 시간 노드가 활동하기 위해서는 에너지 소비를 줄이는 것이 관건이다. 또 센서 네트워크는 Ad-hoc 네트워크와 매우 유사하지만, 각 노드들의 응용계층에서 적은 양의 데이터를 생성하고, 느린 속도로 전송되는 특징이 있으므로 다른 계층에서 생성하는 데이터가 다른 네트워크에 비해 상대적으로 더 많은 전송량으로 나타나게 된다.

본 논문에서는 S-MAC에서 전송 데이터가 있을 경우 대표적인 에너지 소비구간인 sync 구간과 RTS 구간을 하나의 구간으로 결합시킨 sync-RTS 방식을 제안하여 중복되는 필드를 생략시키도록 하였으며, 시뮬레이션 결과에서 보이듯이 랜덤하게 발생하는 데이터 트래픽을 가지고 있지 않는 노드의 경우에는 Sync-RTS 부분에 전송할 sync 패킷에 자신이 가지고 있는 데이터의 RTS 정보를 포함함으로써 기존의 sync와 RTS 구간을 줄임으로써 소비되는 에너지가 경감된 결과를 보임을 확인하였다. 제안된 sync-RTS 방식은 센서 네트워크에 활용 가능할 것으로 기대된다.

차후 연구과제로는 S-MAC 또는 T-MAC에서 가지고 있는 패킷 fragmentation처럼 패킷의 길이가 무선망에서 갑자기 증가했을 때 야기될 수 있는 문제점들을 실제적인 실험환경에 적용하여 보다 신뢰성 있는 연구를 하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Weiser, "Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing," *Commun. ACM*, 36(7), pp. 75-84, 1993.
- [2] C. Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," *Proc. of the IEEE*, 91(8), pp. 1247-1256, 2003.
- [3] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K.S.J. Pister "Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust",", *Proc. of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, Seattle, WA., pp.271-278, 1999.
- [4] Wireless Sensors and Integrated Wireless Sensor Networks (Technical Insights), *Frost & Sullivan*, 2002.

- [5] C. Chi and M. Hatler, *Wireless Sensor Networks: Mass Market Opportunities*, *ON World*, 2004.
- [6] D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme, "Connecting the Physical World with Pervasive Networks," *Pervasive Computing IEEE*, 1(1), pp. 59-69, 2002.
- [7] National Research Council, *Embedded, Everywhere: A Research Agenda for Networked Systems of Embedded Computers*, *National Academy Press*, 2001.
- [8] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *In Proc. 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Commun. Societies (Infocom 2002)*, 3, pp. 3-12, June 2002.
- [9] F. Zhao, L.J. Guibas, *Wireless Sensor Networks: an information processing approach*, *Morgan Kaufmann Publishers*, 2004.
- [10] <http://www.tinyos.net>
- [11] [http://sourceforge.net/cvs/?group\\_id=28656](http://sourceforge.net/cvs/?group_id=28656)
- [12] <http://www.xbow.com>
- [13] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>

### 성 태 경 (Tae-Kyung Sung)

정회원



1996년 2월 동의대학교 전자통신공학과(공학사)  
 1999년 2월 동의대학교 전자공학과(공학석사)  
 2005년 8월 한국해양대학교 전자공학과(공학박사)  
 2006년 6월~현재 인하대학교 UWB-ITRC 전임연구원

2002년 7월~2004년 2월 동의대학교 전자세라믹스 센터 선임연구원

2001년 3월~2002년 7월 탐시스템(주) 연구원

<관심분야> UWB, WPAN, CR, OFDM

### 이 형 기 (Hyung-Ki Lee)

정회원



1985년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)  
 1987년 8월 인하대학교 전자공학과(공학석사)  
 2006년 2월 인하대학교 전자공학과(공학박사)  
 1992년 3월~현재 재능대학 정보통신과 교수

1989년 6월~1992년 3월 LG 텔레콤 네트워크센터 연구원

<관심분야> MIMO, WLAN, UWB