

논문 2007-44CI-2-3

# 무선 센서 네트워크에서의 S-MAC 기반의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜

(Energy Efficient MAC Protocols based on S-MAC for Wireless  
Sensor Networks)

박재홍\*, 류경식\*, 김용득\*\*

(Jaehong Park, Kyeung Seek Lew, and Yong Deak Kim)

## 요약

본 논문에서는, 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대해 논한다. 제안하는 I-MAC 프로토콜은 S-MAC 프로토콜을 기반으로, 전송되는 데이터의 빈도수를 이용하여 능동구간 대비 수면구간의 사이클을 지능적으로 변화시킨다. 데이터 빈도수는 링크 계층의 데이터 체크 비트를 참조함으로써 얻어지게 된다. 제안된 프로토콜의 검증은 NS-2 시뮬레이터를 통해서 이루어졌고, 전송 데이터의 처리량은 S-MAC과 비교하여 유사한 성능을 나타냈고, 에너지 효율에 있어서는 최대 50%의 효율을 보였다.

## Abstract

In this paper, we deal with suggestion of energy efficient MAC protocol. The scheme(I-MAC) makes the active duty-cycle duration based on by utilizing data frequency. Data frequency is made by checking a check bit of Link layer. By being studies on NS-2 simulation environments, the proposed scheme was proved to be improved in terms of energy efficiency of 50 % and to be similar to throughput of S-MAC on every time interval.

**Keywords:** 무선 센서 네트워크, 에너지 효율적, S-MAC, NS-2, I-MAC

## I. 서론

무선 센서 네트워크는 마이크로 전자공학과 전자 시스템의 두드러진 발전으로 빠른 성장을 이루어왔다.<sup>[1]</sup> 무선 센서 네트워크는 등장 초기에는 주로 군사용으로 사용되었으나 최근에는 점점 더 많은 응용분야를 가지고 실생활에 접목되고 있다. 전형적인 무선센서 네트워크는 멀티 홉 네트워크를 형성하기 위한 많은 자율적인 센서 노드들로 구성되어지며, 대부분의 무선 센서 네트워크에서의 센서노드는 제한된 전력 원으로 동작하게

된다. 따라서 배터리를 교체하거나 충전하기가 매우 어렵기 때문에 무선 센서 네트워크에서는 전력소모를 최소화하는 것이 중요하다. 때문에 물리 계층뿐만 아니라 상위와도 직접 연결되어 통신을 제어하는 MAC 계층을 설계할 때에도 공평성, 시간지연, 대역폭과 같은 파라메타 보다도 에너지 효율이 중요한 설계 요건이 되어져왔다.<sup>[2]</sup> MAC 프로토콜 설계를 이용하여 에너지 소모를 줄이기 위한 연구 중, 대표적인 프로토콜로는 S-MAC<sup>[8]</sup>, Adaptive S-MAC<sup>[6]</sup> 프로토콜 등이 있다. S-MAC 프로토콜은 NS-2<sup>[10]</sup> 시뮬레이터에서뿐만 아니라, MICA2 라는 실제 모드에서도 탑재가 되어 사용되고 있다. 이는 S-MAC(Sensor-MAC) 프로토콜의 효율성과 안정성을 뒷받침 해주는 실례가 된다. 본 논문에서는 이처럼 신뢰성이 있는 S-MAC 프로토콜을 기반으로 수면구간 시간을 개선한 I-MAC (Intelligence-

\* 학생회원, \*\* 정회원, 아주대학교 전자공학부

(Dept. of Electronics Engineering Ajou University)

※ 본 논문은 “첨단 차량용 유비쿼터스 컴퓨팅 시스템의 산업화 핵심기술의 연구 결과로 수행되었음”

(C1012-0601-0014-01)

접수일자: 2006년12월18일, 수정완료일: 2007년2월27일

MAC) 프로토콜을 제안한다. I-MAC 프로토콜의 기본 아이디어는 S-MAC 프로토콜의 전체 듀티 사이클에 따라서 수면 구간이 정해진다는 알고리즘 방법론에서 착안되었다. 제안된 프로토콜의 성능은 무선 네트워크 시뮬레이터 중에서 가장 뛰어난 네트워크 시뮬레이터의 하나인 NS-2를 사용하여 측정하였고, 802.11과 S-MAC 프로토콜 그리고 Adaptive S-MAC과 비교하여 에너지 효율 및 데이터 처리량을 측정함으로써 그 성능을 평가하였다.

이 논문의 구성은, II장에서는 MAC 이론에 대해서 검토하고, III장에서는 제안하는 I-MAC 프로토콜의 기술적인 부분을 논하게 된다. IV장에서는 제안한 프로토콜에 대한 시뮬레이션과 그 결과를 보이고, 마지막 5장에서 결론을 맺게 된다.

## II. MAC 이론의 검토

잘 알려진 IEEE 802.11 프로토콜은 Ad-hoc 모드에서 동작할 때도 저 전력소모적인 특징이 있다. 그러나 이 프로토콜은 모든 노드가 하나의 네트워크 셀에 있다는 가정 하에 설계되었기 때문에 멀티 홉을 주로 사용하는 무선 센서 네트워크에서는 비효율적일 수 있다.<sup>[6]</sup> 또한 802.11은 모든 구간에서 능동 모드이기 때문에 에너지 소모량이 매우 많게 된다. 때문에 802.11은 저 전력이 중요시되는 무선 센서 네트워크에서는 실용성이 떨어진다. 이렇게 에너지 소모량이 많은 802.11의 단점을 보완하고 무선 센서 네트워크에 적합하도록 만든 프로토콜이 S-MAC 프로토콜이다. S-MAC 프로토콜은 단일 주파수 경쟁기반의 프로토콜이며, 기본 아이디어는 시간을 충분한 크기의 프레임 단위로 나누는 것이다. 모든 프레임은 능동 영역과 수면 영역 두 부분으로 나누어지며, 수면 영역에서는 에너지를 보존하기 위해 통신을 중단하고, 능동 영역에서는 다른 노드와 통신을 하며 수면 기간 동안 큐에 저장된 데이터를 전송하게 된다.<sup>[8]</sup> 이와 같이, S-MAC 프로토콜은 낮은 듀티 사이

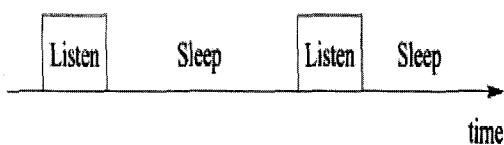


그림 1. 주기적인 듀티 사이클  
Fig. 1. Periodic duty cycle.

클을 기반으로 하여 높은 에너지 효율을 얻는다.

S-MAC 프로토콜의 주기적인 듀티 사이클의 기본 구성은 그림 1과 같다.

능동구간과 수면구간의 한 주기를 한 프레임이라 하고, 능동구간의 간격은 물리 계층과 MAC 계층의 프레임에 의해 고정되어진다. 그리고 모든 노드는 오버헤드를 피하기 위해 함께 동기화시킨다. 즉, 능동구간의 시간과 수면구간의 시간이 모두 동일하게 된다. 듀티 사이클은 프레임길이에 대한 능동 구간 길이의 비율로 정의되어지며, 듀티 사이클의 크기는 사용자에 의해 변경될 수 있다. 이와 같이, S-MAC 프로토콜은 낮은 듀티 사이클 동작과 능동 구간에서의 경쟁기반 매커니즘을 사용함으로써 능동구간에서의 쓸데없는 에너지 낭비와 충돌에 의한 에너지 소비를 줄임으로써 효율을 최대화할 수 있도록 설계되었다.<sup>[8]</sup>

하지만 S-MAC 프로토콜이 저 전력을 실현하기는 했지만, 수면 구간이 길기 때문에 데이터를 원하는 목적지까지 전달하는데 걸리는 시간이 길어진다는 단점이 생긴다. 따라서 저 전력과 더불어 데이터 전송 지연을 최소화하기 위한 프로토콜로 Adaptive listening S-MAC 프로토콜이 연구되었다.<sup>[6]</sup> Adaptive listening S-MAC 프로토콜은 에너지 소비와 홉 간 전송 지연을 상충시킨 프로토콜로 S-MAC 프로토콜보다 에너지 효율은 줄어 들고 홉 간 지연의 성능은 향상된다. Adaptive listening S-MAC 프로토콜의 기본적인 동작은 그림 2와 같다. 논의된 바와 같이, S-MAC 프로토콜은 능동구간과 수면구간의 시간이 정해져 있기 때문에 한 번의 데이터 전송이 완료된 후에는 다음 주기의 능동구간이 되기 전까지는 다른 노드에게 데이터를 보낼 수가 없다.<sup>[4]</sup> Adaptive listen S-MAC 프로토콜에서는 이에 대한 보완으로 RTS와 CTS에 자신의 스케줄 정

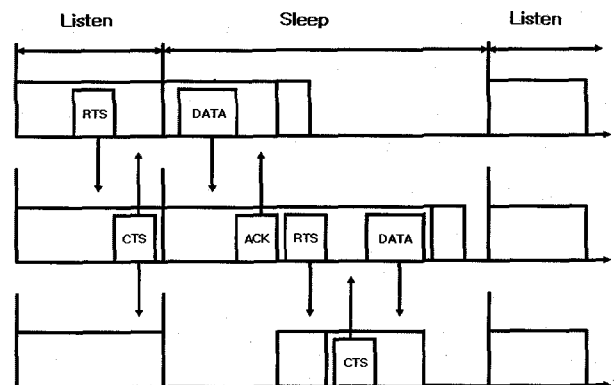


그림 2. Adaptive listen S-MAC의 동작  
Fig. 2. Detail cycle in adaptive listen S-MAC.

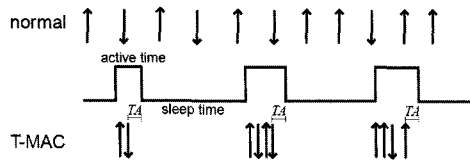


그림 3. T-MAC 프로토콜의 듀티 사이클  
Fig. 3. The T-MAC duty cycle.

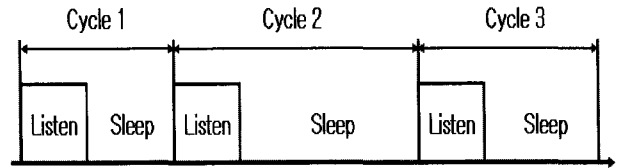


그림 4. I-MAC 프로토콜의 duty-cycle  
Fig. 4. I-MAC protocol duty-cycle.

보를 담아 보내어 이웃 노드들이 데이터 전송이 끝나는 시점에 깨어나도록 하여 수면 구간에서도 능동 상태로 전이하여 RTS와 CTS 전송이 가능하도록 하였다.

이 외에, S-MAC 프로토콜의 필요 없는 능동구간을 좀 더 줄이기 위한 프로토콜로 T-MAC(Timeout) 프로토콜이 있다.<sup>[7]</sup> 그림 3에서와 같이 T-MAC 프로토콜은 그림1의 S-MAC 프로토콜과 비교해 불 때 능동구간의 시간이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

T-MAC 프로토콜은 현 상태가 능동구간일지라도 더 이상 데이터를 보낼 필요가 없을 때는 수면 모드로 전환하도록 해서 에너지 효율을 더 높이도록 한 것이다. 여기에서 TA는 능동 구간의 수면모드로 전환하는 시점을 판별하는 중요한 요소로,  $TA > C + R + T$  과 같은 식에 의해 결정된다. 여기에서, C, R, T는 각각 경쟁 구간의 길이, 패킷의 길이, 되돌아오는 시간을 나타낸다.

### III. I-MAC의 제안

기존의 S-MAC 및 T-MAC 프로토콜은 에너지 효율적인 측면에서 매우 뛰어난 효율성을 보였다. 그리고 Adaptive listen S-MAC 프로토콜은 휴 간 지연 줄일 수 있었다. 하지만 이러한 프로토콜들은 에너지 효율과 휴 간 지연을 개별적으로 만족하고 있기 때문에 실제 상황에서 적용할 때는 어느 한 가지를 포기해야만 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 에너지 효율뿐만 아니라 휴 간 지연의 성능까지 모두 만족시킬 수 있는 I-MAC 프로토콜을 제안한다. I-MAC 프로토콜은 S-MAC 프로토콜에 기반하며 그 성능을 향상 시킨 프로토콜이다. I-MAC 프로토콜의 기본 아이디어는 듀티 사이클을 데이터의 빈도수에 따라서 지능적으로 변화시킨다는 것이다. T-MAC 프로토콜도 듀티 사이클을 변형시켰지만, 에너지의 효율성만을 감안하여 변경하기 때문에 모든 상황을 고려해야하는 실제 상황에서의 적용성은 떨어질 수가 있다. 또한 S-MAC 프로토콜도 듀티 사이클의 변경이 가능하긴 했으나, 실제상황에서는 사용자가 임의로 변경하기 어려울 뿐 아니라, 변하는



그림 5. listen 구간의 요소들  
Fig. 5. Element of listen interval.

환경에 맞추어 듀티 사이클을 선택적으로 바꾸는 것은 불가능하다. 때문에 모든 환경에서 적용할 수 있도록 필요에 따라 듀티 사이클을 가변적으로 변형시킬 수 있는 지능형 MAC 프로토콜이 요구되어진다. 본 연구에서 제안하는 지능형 MAC 프로토콜은 듀티 사이클을 데이터의 전송 빈도수에 따라서 적응적으로 변경하여 데이터 처리 성능과 에너지의 효율을 동시에 만족시킬 수 있도록 하였다. I-MAC 프로토콜에서 듀티 사이클을 변화시키기 위해 참조하는 부분은 링크 계층 부분이다. 기존의 B-MAC<sup>[5]</sup> 프로토콜에서도 링크 레이어를 참조하기 위해 프리앰블을 샘플링하는 기법을 이용하였으나, 코드와 램 사이즈의 크기로 인해 실제 센서네트워크 플랫폼에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 하지만 S-MAC 프로토콜은 이미 많은 플랫폼에서 적용되어 있기 때문에 이에 기반하고 있는 I-MAC 프로토콜은 실제 적용 측면에서도 안정성을 갖는 장점이 있다.

제안된 I-MAC 프로토콜의 기본 설계는 그림 4와 같다. 능동 구간은 정해진 파라미터들에 의해 최소 길이로 고정되어 있고, 데이터의 빈도수에 따라 한 프레임의 사이클이 가변적으로 변하게 된다. 능동 구간에 들어가는 주요 시간 구간은 그림 5에서와 같이 SYNC 구간과 데이터 구간이며, 데이터 구간은 다시 RTS 와 CTS 영역으로 나누어지게 된다.

이처럼, I-MAC 프로토콜은 한 프레임의 사이클이 변해도 능동 구간은 항상 고정되어 있고, 듀티 사이클과 수면 구간만 동시적으로 변하게 된다. 이는 I-MAC 프로토콜이 기반하고 있는 S-MAC 프로토콜의 듀티 사이클이 다음과 같은 식으로 되어있기 때문이다.

$$\begin{aligned} \text{cycleTime} &= \text{listenTime} \times 100 / \text{dutyCycle} - 1 \\ \text{sleepTime} &= \text{cycleTime} - \text{listenTime} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 보는바와 같이, 듀티 사이클이 커지면 전체 사이클 시간이 줄어들어서 그림 4의 Cycle 1과 같이 수면 구간이 짧아지게 되고, 반대로 듀티 사이클이 작아지면 전체 사이클 시간이 길어져서 그림 4의 Cycle 2와 같이 수면 구간이 길어지게 된다.

이처럼, I-MAC 프로토콜에서는 듀티 사이클을 가변적으로 조정하여 전체 사이클과 수면 구간을 동시에 바꿀 수 있게 되는데, 듀티 사이클을 조정하는 주요 요소는 데이터의 빈도수가 된다. 즉, I-MAC 프로토콜은 보내는 데이터 빈도수가 많을 때에는 듀티 사이클을 크게 해서 능동 및 수면 구간의 주기를 작게 하여 데이터의 전송을 원활하게 하고, 데이터 빈도수가 적을 때는 프레임의 사이클을 크게 해서 수면 구간을 늘려서 에너지 효율을 높일 수 있도록 하였다. 결국, 데이터 전송이 필요할 때는 데이터 전송률을 높이고, 데이터 전송이 적을 때는 에너지 효율을 높여서 모든 환경에서 에너지와 데이터 전송의 효율을 높일 수 있도록 한 것이다. 또한 이렇게 함으로써 각각의 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 노드의 전 수명동안에 전체적인 에너지와 데이터 전송효율도 향상될 수 있게 된다.

I-MAC 프로토콜은 듀티 사이클을 변경시키기 위해 그림 6에서와 같이 MAC레이어의 상위인 링크 계층을 참조하게 된다. 링크 계층의 프레임 타입을 참조하여 데이터 존재 유무를 판별한 다음 데이터의 빈도수에 따라 듀티 사이클을 변경하도록 한다.

각 계층에서 데이터가 존재할 때마다 그림 6의 링크 프레임 포맷의 CHECK 영역이 SET 되게 된다. MAC 계층에서는 이 CHECK 영역을 참조해서 데이터가 존재하는지 판별하여 데이터의 빈도수를 계산하게 된다. 데이터 빈도수에 따른 듀티의 변화량은 다음 식과 같다.

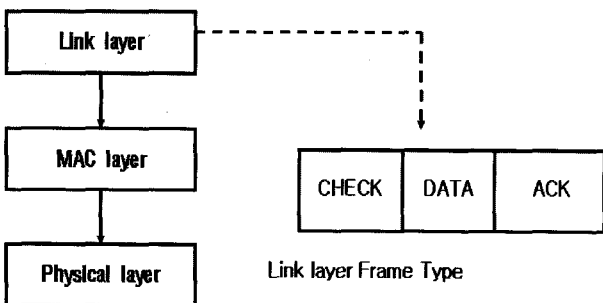


그림 6. 링크 레이어의 프레임 타입  
Fig. 6. Link layer frame type.

$$D_t = D_{t-1} * \exp(\Delta d) \quad (2)$$

단,  $D_t$ 는 현재 시간의 듀티 사이클이다.

여기에서  $\Delta d$ 는 데이터 빈도수의 변화량에 따른 값으로 실험에 의해 최적화된 값을 선정하도록 한다.  $\Delta d$ 에 따라 듀티 사이클은 지수함수 적으로 증가 혹은 감소하게 되어, 데이터 전송이 급작스럽게 많아지거나, 줄어들 때에도 듀티 사이클은 이에 맞추어 지능적으로 변하게 된다.

#### IV. 시뮬레이션 및 성능 평가

제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 본 논문에서는 NS-2<sup>[9]</sup> 시뮬레이터를 사용하였다. NS-2 시뮬레이터는 매우 신뢰성 있는 시뮬레이터로 무선 센서 네트워크에서의 효율성을 검증하기에 적합한 시뮬레이터이다.<sup>[3]</sup>

실험을 위해 사용한 노드 구성은 그림 7과 같다.

노드 A, B에서 정해진 시간 간격에 따라 데이터를 각각 D, E에 전송하게 된다. 각 노드 간 최소 거리는 약 35m 이며, Rx는 이웃 노드만 수신이 가능하도록 Rx threshold를  $3.652e-10(40m)$ 로 설정하였다. 그리고 Cs는 전체 노드가 인지하도록 하기 위해 Cs threshold를  $8.136e-11(80m)$ 로 설정하였다. 그리고 실험에서 사용한 에너지 소모 모델은, 송신 출력 24.75mW, 수신 출력 13.5mW, 수면 모드시 출력이 15uW가 된다.<sup>[6]</sup>

그림 8은 시간 간격에 따른 에너지 소모량을 보여준다. 제안된 프로토콜은 기존의 S-MAC 프로토콜보다 전 구간에서 효율적이었으며, 최대 50% 이상의 효율을 보였다. 이는 데이터 빈도수가 적을 때 수면 구간을 늘림으로써 에너지 소모를 줄였기 때문이다. 또한 그림 9에서 보여주고 있는 데이터 처리량은 전 구간에서

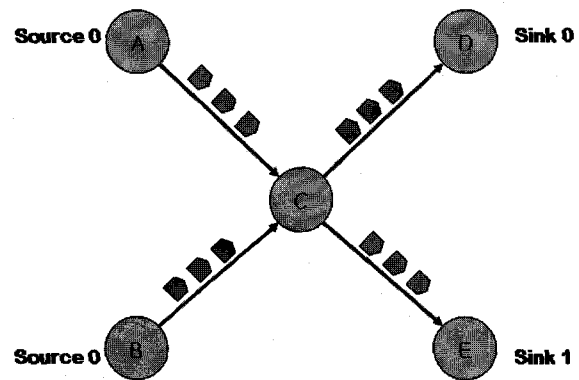


그림 7. 노드 구성  
Fig. 7. Node configuration.

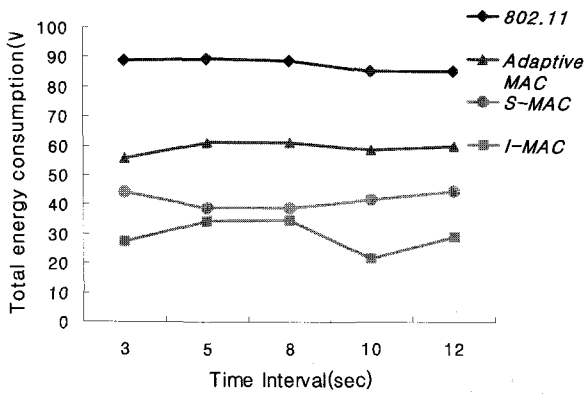


그림 8. Time Interval Vs. Energy  
Fig. 8. Time Interval Vs. Energy.

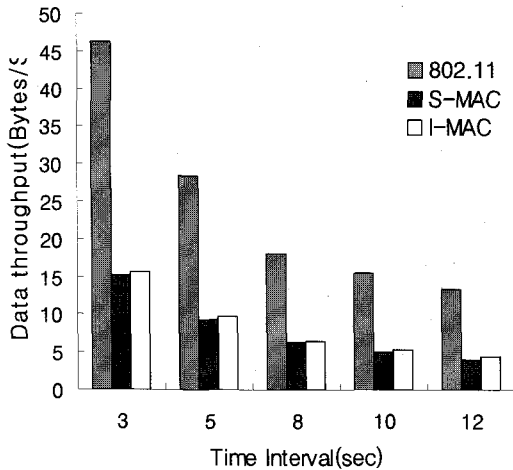


그림 9. 시간 간격 Vs. 데이터 처리량  
Fig. 9. time Interval Vs. data throughput.

S-MAC 보다 같거나 향상되었음을 알 수 있다. 이를 통해서, I-MAC 프로토콜은 데이터 빈도수가 적은 구간에서는 수면 구간을 늘려서 에너지를 보존하고, 데이터 빈도수가 많을 때는 수면 구간을 줄여서 데이터 전송을 좀 더 효율적으로 할 수 있음을 알 수 있다.

### V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 S-MAC 프로토콜을 기반으로 에너지 효율과 데이터 처리량의 성능을 개선한 I-MAC 프로토콜을 제안하였다. I-MAC 프로토콜은 S-MAC 프로토콜의 고정된 듀티 사이클을 데이터 빈도수에 따라 지능적으로 변화시켜서, 전 시간 구간에서 S-MAC 프로토콜과 비교할 때 데이터 처리량을 증대시킬 뿐 아니라, 에너지 절약은 최대 50% 이상의 효율을 보였다. 이는 기존의 프로토콜에서는 에너지

와 데이터 전송 중 하나만을 취하기 위해 다른 요소와 상충해야 했지만, I-MAC 프로토콜은 에너지와 데이터 전송 효율을 모두 만족시킬 수 있음을 보인 것이다. 비록, 데이터의 효율이 S-MAC 프로토콜과 비교할 때 그다지 높지 않게 나타났지만 더 많은 실험을 통해서 실험의 주요 파라메타인  $\Delta d$ 의 최적화된 값을 찾아낸다면, 에너지와 데이터 전송 효율 모두에서 뛰어난 성능을 보일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 앞으로의 연구는 실제 환경에서 적용하기 위해 mica2와 같은 모트에 탑재하여 그 성능을 평가하고, 실제 상황에서 있을 수 있는 더 많은 환경 변수의 값을 고려해 다 효율적인 I-MAC 프로토콜을 연구할 예정이다.

### 참고 문헌

- [1] Prasad Raviraj, Hamid Sharif, Michael Hempel, Song Ci, "An Energy Efficient MAC Approach for Mobile Wireless Sensor Networks", *IEEE*, pp 565-570, 2006.
- [2] Muneeb Ali, Umar Saif, Adam Dunkels, "Medium Access Control Issues in Sensor Networks", *ACS SIGCOMM Computer Communication*, Vol 36, No 2, April 2006.
- [3] 서창수 "Research on Energy Efficient MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", *공학석사학위논문*, Nov 2006.
- [4] 송영미, 서창수, 고영배, "무선 센서 네트워크에서 에너지 효율성과 전송 지연 최소를 동시에 고려한 MAC 프로토콜", *한국컴퓨터종합학술대회, 2005 논문집 Vol. 32, No. 1(A)*, pp 493-495, 2005.
- [5] Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *Conference on embedded networked sensor systems*, pp 95-107, Nov 2004.
- [6] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol 12, No 3, pp493-506, June 2004.
- [7] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", in: *1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, Los Angeles, CA, pp. 171-180. November 2003.
- [8] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", in: *21st Conference of the*

*IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 3, pp. 1567-1576. June 2002.

[9] The CMU Monarch Project, "The CMU Monarch Project's Wireless and Mobility Extensions to NS."

[10] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

### 저자 소개



박재홍(학생회원)  
2006년 아주대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
<주관심분야 : 임베디드시스템,  
컴퓨터, 통신>



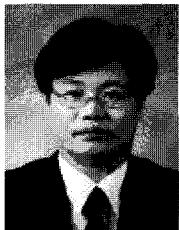
김용득(정회원)  
1971년 연세대학교 전자공학전공  
(학사)  
1973년 연세대학교 전자공학전공  
(석사)  
1978년 연세대학교 전자공학전공  
(박사)

1979년~현재년 아주대학교 전자공학부 정교수  
1973년~1974년 불란서 E. S. E 전자공학 연구실  
1973년~1974년 미국 STANFORD 대학교  
연구교수

1981년~1982년 한국전자통신연구소 위촉연구  
위원

1994년~1998년 ITS 연구기획단연구위원,  
전자부문총괄

<주관심분야 : 통신, 컴퓨터, ITS>



류경식(학생회원)  
1991년 아주대학교 전자공학과  
졸업 (공학사)  
1993년 아주대학교 대학원 전자  
공학과 졸업 (공학석사)  
2006년 아주대학교 대학원 전자  
공학과 박사수료

1993년~1997년 (주)인켈 기술연구소

1997년~1998년 (사)고등기술연구원 정보통신  
연구실

1998년~2000년 용인송담대학 겸임교수

1998년~2000년 유레카시스템 대표

2000년~현재 (주)윌텍 대표이사

<주관심분야 : 임베디드시스템, 통신>