

논문 2007-44CI-2-4

# 높은 에너지 효율로 개선된 S-MAC 프로토콜을 이용한 센서 네트워크 시스템의 구현

## ( An Implementation for the Sensor Network System using S-MAC Protocol which is improved in Energy Consumption )

한 성 덕\*, 문 호 선\*, 김 용 득\*\*

( Seong Deok Han, Ho Sun Moon, and Yong Deak Kim )

## 요 약

무선 센서 네트워크에서는 기본적으로 교환이나 충전이 어려운 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성된다. 따라서 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 근거리 무선 통신 기술인 지그비에 높은 에너지 효율을 갖도록 개선된 S-MAC 프로토콜을 이용하여 센서 네트워크 시스템을 구현하였다. S-MAC 프로토콜에서 활성 구간에서의 duty cycle을 줄임으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용하여서 노드의 전력을 줄였다. 실험결과 제안된 알고리즘을 사용하면 S-MAC 프로토콜보다 약25~30%정도의 에너지 소모를 줄이는 것으로 나타났다.

## Abstract

Sensor Nodes are composed of battery which cannot be easily changed. So, it is very important to reduce energy consumption of Sensor Nodes. In this paper, we implemented Sensor Network system using changed S-MAC to save energy with Zigbee. We decreased energy consumption of node by reducing duty cycle in ACTIVE part. According to experiment, using supposed algorithm is better than using S-MAC about 25~30% in energy consumption.

**Keywords :** 센서 네트워크, S-MAC, 지그비

## I. 서 론

무선 센서 네트워크에서는 교환하기 어려운 작은 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되어 있는 경우가 많기 때문에 각 센서 노드들은 주어진 배터리의 수명이 다할 때까지만 원하는 정보를 전달할 수 있다<sup>[10]</sup>. 따라서 데이터 전송시의 1bit를 전달하는데 소모되는 에너지를 줄이는 것이 센서 네트워크의 설계시 최우선적으로 고려되어야 한다. 그리고 센서 네트워크의 특성상 센서 노드에서 수집된 정보는 일정 시간 내에서 유효하

기 때문에 센서 노드의 정보는 제한된 시간 안에 정보 수집기에게 전달되어야 한다. 따라서 주어진 에너지 소모 상황에서 최대 단-대-단 지연(maximum end to end delay) 조건에 맞도록 프로토콜을 설계하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 주로 각 계층별로 독립적으로 센서 네트워크 환경을 위한 프로토콜들이 제안되어 왔으며 이들 중 주된 연구로 센서 네트워크의 MAC(Media Access Control) 계층과 네트워크 계층에서의 에너지 효율적인 프로토콜들이 제안되었다.

무선 센서 네트워크에서 각 센서 노드들이 수집한 정보의 시간적인 유효성에 따라 최대 단-대-단 지연 조건을 만족시키면서도 센서 노드들의 배터리 수명을 고려하여 센서 네트워크 전체의 에너지 효율을 높이는 작업이 중요하다. 이에 본 논문에서는 에너지 소모를 적게 할 수 있도록 하드웨어를 설계하고, 펌웨어 상의 프로

\* 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: 2006년12월19일, 수정완료일: 2007년2월28일

그림 제작으로 효율적인 센서 네트워크 시스템을 구성하였다.

## II. S-MAC 프로토콜

### 1. 지그비의 개요

저소비 전력형 WPAN(Wireless Personal Area Network)는 UWB, 블루투스, 지그비 등이 있다. 지그비는 IEEE 802.15.4 기반으로 저전력과 저가격을 목표하는 저속 근거리 개인 무선 통신의 국제 표준 스펙이다. 지그비는 전력소모가 적고 칩 가격이 저렴하고 통신의 안정성이 높아 최근 가장 급속한 발전을 하고 있는 기술이다.

지그비는 네트워크 층 이상을 규정한 단거리 무선 통신 프로토콜 규격으로 지그비 Alliance에서 물리층과 MAC층에 대해서는 IEEE802.15.4에 의거하고 데이터 전송 속도는 최대 250kbps이며, 적은 소비 전력으로 전지의 수명을 장기간 확보할 수 있는 이점을 가진 네트워크와 산업용 모니터 제어 시스템 센서 네트워크 등에 이용되고 있다. 채널은 16채널의 2.4GHz, 10채널의 915MHz 및 1채널의 868MHz의 3종류이다. 데이터 전송 속도는 2.4GHz, 915MHz 및 868MHz에서는 각각 250kbps, 40kbps, 20kbps에 해당된다. 변조 방식은 DS-SS(Direct Sequence Spread Spectrum), 액세스 제어 방식은 CSMA-CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance)를 채용하고 있다. 지그비의 MAC계층은 저 전력 소모를 위한 방식들을 제공하고 있는데, 슈퍼프레임 구조로 동작하는 방법, 데이터 request frame을 사용하는 방법, backoff 횟수를 줄이는 방법, short address를 사용하는 방법 등으로 이를 실현하고 있다. PHY계층은 간단한 구조로 되어 있다. 별도의 channel coding 기법을 사용하지 않고, Spreading과 PSK modulation만을 하여 전송하는 구조로 되어 있다. 따라서 근거리의 저속 무선 통신에 한정된 용도를 지녔지만, 낮은 가격으로 실현될 수 있다<sup>[7]</sup>.

지그비의 구조는 IEEE 802.15.4를 포함한 계층 스택 구조를 가지고 있다. 지그비의 스택은 4개의 계층구조로 되어 있으며, PHY, MAC, NWK, APS로 나눈다. 이중 물리(PHY)계층과 매체접근제어(MAC)계층은 IEEE 802.15.4에서 정의된 것을 그대로 사용하며, 네트워크(NWK) 계층과 응용지원(APS)계층을 지그비 연합에서 스펙으로 추가하였고, 그 위의 계층에 사용자 응용 프로그램이 위치된다.

PHY계층은 무선으로 직접 데이터를 주고받는 물리 계층이다. PHY계층은 무선으로 직접 데이터를 주고받는 물리 계층이다. PHY계층은 2.4GHz에서 16개, 902~928MHz 사이에 10개 그리고 868~870MHz에 하나의 자유 주파수 대역을 사용한다. 송신하기 전에 누군가가 네트워크를 사용하고 있는지 확인을 한 다음 전송을 하고, 전송이 어려울 경우 다른 경로를 선택하는 것이 CSMA 방식이다. IEEE 802.15.4는 간단한 프레임 구조를 가진다. 이 구조는 신뢰성 있는 데이터 전송을 위해서 알림 신호(ACK)와 결합된다. 네트워크의 결합과 분리에는 AES-128 암호화가 지원된다. CSMA 기술은 여러 장비가 함께 공존할 때 아주 괜찮은 방식이다. 빠른 응답을 위해서 슈퍼프레임구조를 선택사항으로 제공한다.

MAC부분 계층은 물리적 무선 채널 접근에 대한 모든 것을 다루며 표3과 같은 기능을 한다. MAC 부분 계층은 CSMA-CA 매커니즘을 사용하여 무선 채널을 접근하고, 비컨 프레임의 전송, 동기관리, 신뢰성 있는 전송 매커니즘을 제공한다. MAC부분계층은 SSCS와 PHY사이의 인터페이스를 제공한다.

### 2. S-MAC

무선 센서 네트워크에서의 통신은 여러 계층으로 나뉘어지며 이러한 계층 가운데 하나인 MAC 계층은 MAC 프로토콜을 사용하여 센서 노드간의 통신을 보장한다. 전통적인 MAC 프로토콜은 패킷 처리율의 최대화, 지연의 최소화 및 공평성 제공이 주된 목적으로 설계된 반면, 무선 센서 네트워크에서 MAC 프로토콜은 에너지 소모를 최소화 하여 네트워크 수명을 오랫동안 유지하는 것이다. 다음 고려사항은 네트워크 변화에 적용할 수 있는 능력 및 확장성으로서, 센서 노드는 수명을 다해 소멸 될 수 있고 새로운 노드들이 네트워크에 참여 할 수도 있으므로 네트워크는 이러한 변화를 모두 수용해야 한다. 또한 노드들은 공통된 목적을 이루기 위한 협력하는 체계로 이뤄진다<sup>[1][2][9]</sup>.

무선 통신을 위한 MAC 프로토콜에서의 에너지낭비 요인으로는, 전송된 packet 이 손상되어 재전송이 요구되는 collision, 다른 노드를 목적으로 하는 패킷을 엿듣는 overhearing, 불필요한 제어 패킷 전송에 따른 overhead 및 이웃 노드가 언제 데이터를 전송 할지 모르기 때문에 자신의 전원을 항상 수신 모드로 유지하므로 발생하는 idle listening 이 있다.

idle listening 으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하

기 위해 센서 노드에 주기적으로 sleep 모드를 주입하는 duty cycle 을 적용하는 방법이 최근에 연구되고 있는 추세이다. TDMA 기반의 프로토콜은 충돌을 피하므로 에너지가 보존되지만, 각 노드별로 시간 스케줄을 유지해야 하므로 메모리가 소모되고, 시간을 매우 작은 슬롯단위로 할당하므로 clock drift 문제가 발생한다<sup>[3]</sup>. 경쟁기반의 CSMA 기법을 사용하는 IEEE 802.11 프로토콜은 에너지를 절감하는 특성을 갖고 있지만 1-홉 범위에서만 적용이 가능하므로 멀티-홉 통신이 요구되는 센서 네트워크에 적용하기에는 부적절하다<sup>[5]</sup>. 에너지를 절감하기 위한 다른 방법으로는 통신을 위해서 사용되는 radio 와 분리된 wake-up 신호를 사용하는 방법이다. 이 신호는 다른 노드를 깨울 때만 사용되므로 별도의 데이터 처리가 필요 없으므로 매우 적은 에너지가 사용되지만 센서 노드에 추가적인 장치 및 별도의 주파수 사용이 요구된다<sup>[6]</sup>.

S-MAC은 Sensor network를 위해 제안된 단일 주파수를 사용하는 경쟁 기반의 MAC protocol로 가장 큰 특징은 주기적인 sleep 시간을 갖는 것이다. 노드들은 가상 클러스터를 구성하여 깨어나는 시간을 동기화하고 일정한 시간(duty cycle)동안만 활성 상태로 데이터를 주고 받는다. 이 스케줄링 된 시간이 끝나면 바로 sleep 상태로 돌아가게 되고 다시 활성 상태가 될 때까지 transceiver의 전원을 끈다. 따라서 그 동안 무의미하게 소비될 에너지의 낭비를 막을 수 있다.

802.11 MAC과 유사하게 송신측과 수신측은 RTS/CTS/데이터/ACK 순서로 신호를 교환한다. 활성순간이 되면 서로 SYNC 신호를 주고받은 후 충돌을 피하기 위해 CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 방식으로 약간의 contention time을 거쳐 RTS를 보낸다. SYNC 신호는 이웃 노드들과 활성순간을 조정하기 위한 신호로써 RTS보다 작은 프레임 형식을 가지며, 비정기적으로 주고받는다.

Overhearing을 피하기 위해 다른 노드의 RTS나 CTS를 듣게 되면 다른 노드가 먼저 통신하게 되는 것을 알게 되므로 바로 sleep 상태로 들어간다. 자신과 상관없는 다른 노드의 신호를 듣지 않으므로 에너지 낭비를 막을 수 있다.

S-MAC은 단일 주파수를 사용하는 경쟁기반의 프로토콜로서 시간을 활성 와 sleep 구간으로 구성되는 프레임으로 나눈다. sleep 구간 동안 노드는 데이터를 송수신을 하지 않고 전원 오프 상태를 유지하고, 활성 구간에서 이웃 노드와 통신하므로 에너지를 절감 할 수

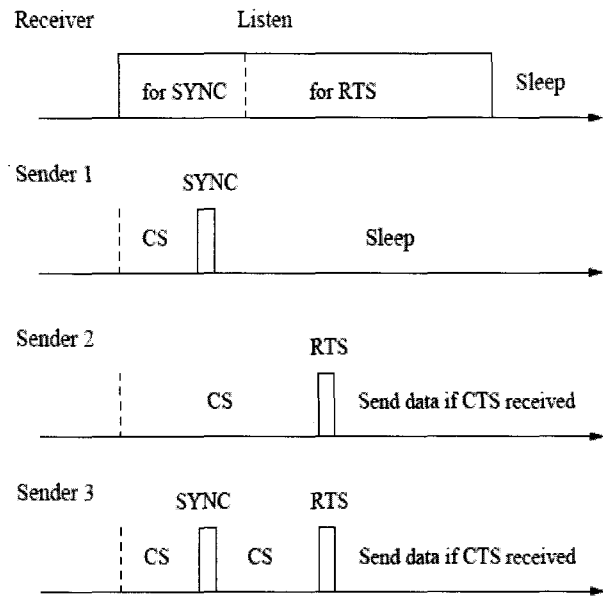


그림 1. receiver와 sender간의 타이밍 그림

Fig. 1. Timing relationship between a receiver and different senders.

있다. 그러나 S-MAC 은 idle listening 문제를 해결하기 위해 고정된 duty cycle 을 사용하므로, 송수신되는 데이터가 없거나 적은 경우 에너지를 낭비하는 결과를 가져오게 되고, 전송량이 많은 경우 활성 time 동안에 모든 데이터를 전송하지 못하는 결과를 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 T-MAC 은 데이터를 활성 구간 시작점에서 빠르게 전송하고 일정한 타이머를 동작시켜 더 이상 송수신되는 데이터가 없다면 활성 구간을 조기에 종료하여 sleep 상태로 전환되므로 S-MAC 에 비해 에너지를 절감한다.

### III. 제안 수정한 S-MAC 프로토콜을 이용한 시스템 구현

그림 2는 시스템의 구성도이다. 시스템 구성에서 사용된 device는 MCU로 Atmel의 ATmega128L을, RF 칩은 Chipcon사의 CC2420을 사용하였다. Atmega128L은 PIC처럼 RISC 및 하버드 구조를 가지는 고성능 8bit 마이크로 컨트롤러이면서 프로그램용 코드 메모리로 플래시 메모리를 내장하고 있어 쉽게 반복적인 프로그래밍이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 한 클럭 당 한 명령어를 처리하기 때문에 동일 클럭에서 동작 시 PIC나 8051을 보다 몇 배 이상 빠르다. RF 모듈의 CC2420은 2400 - 2483.5Mhz 대역의 RF Transceiver로 작은 전력소모(RX:19.7mA, TX:17.4 mA)의 장점을 가

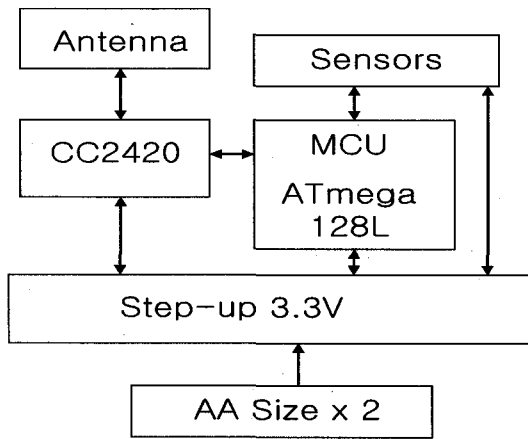


그림 2. 시스템 구성도  
Fig. 2. System Block Diagram.

지고 있다. 또한 출력의 power를 프로그램 할 수 있으며, 외부 RF switch나 Filter가 필요 없어서 외부 디바이스 수를 절감하고 크기 면에서도 유리하다. 그림 이 시스템에는 온도, 습도 센서와 조도 센서를 탑재하여 주변 환경 정보를 확인할 수 있게 했으며, 효율적인 전원관리를 위해 Maxim사의 3.3V Step-up MAX1678을 사용하여 AA 배터리의 전원을 3.3V로 승압하여 이용하였다.

MCU와 RF 모듈간의 통신은 4-wire SPI인터페이스를 통해 통신한다. 위와 같은 하드웨어 구성에 소프트웨어는 기존에 많이 쓰는 TinyOS가 아닌 펌웨어 레벨로 직접 C로 개선된 S-MAC의 알고리즘을 적용하였다. S-MAC은 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간과 수면 구간으로 나누고, 수면 구간에서는 센서 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 전력을 거의 소모하지 않는 상태가 되는 알고리즘이다.

이 시스템의 소프트웨어는 Coordinator는 동일한 PAN(Personal Network Area)내의 Device들에게 비콘 프레임을 주기적으로 Broadcasting한다. 이 때, 연속된 두 개의 비콘 프레임사이의 시간을 활성, 비활성구간으로 분할하여 사용할 수 있는데, 이와 같이 분할된 구조를 슈퍼프레임 구조라고 한다(그림 4). 슈퍼프레임 구조에서 동작하는 PAN내에서는 활성 구간의 시간에만 채널의 접근이 허용되며, 비활성 구간에서는 모든 Device들이 Sleep mode로 동작하기 때문에 슈퍼프레임 구조를 조정하여 저전력 소모가 가능해진다<sup>[7]</sup>.

기존의 S-MAC에서는 네트워크 트래픽에 관계없이 활성 구간 동안에만 송수신하므로 네트워크 전체 트래픽이 적을 경우나 송수신해야할 데이터가 없어도 idllelistening으로 동작을 하게 되어 그만큼의 에너지가

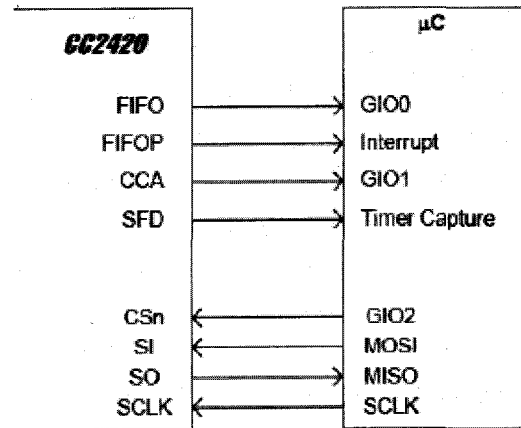


그림 3. MCU와 CC2420의 인터페이스  
Fig. 3. Interface between MCU and CC2420.

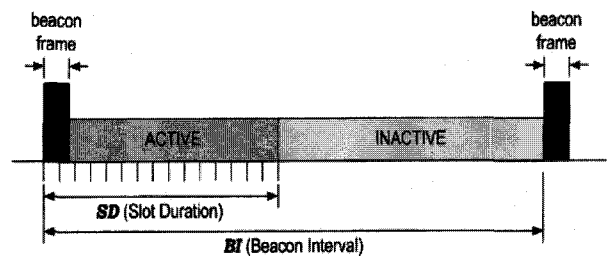


그림 4. 슈퍼프레임 구조  
Fig. 4. Structure of Superframe.

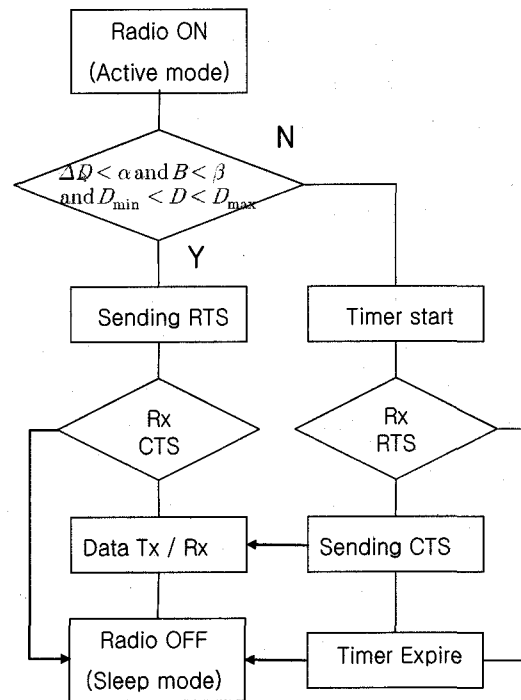


그림 5. 제안하는 알고리즘  
Fig. 5. Supposed Algorithm.

낭비되었다<sup>[8]</sup>. 그러나 이 시스템에서는 데이터의 변화가 작을 경우, 타이머를 작동시켜 sleep모드로 전환하여 에

너지 낭비를 막았다.

그림 5를 보면 활성 구간에서 판단을 하게 되는데 조건은 데이터의 변화량이 지정한  $\alpha$ 값 보다 작아야하고, 버퍼에 있는 데이터가 버퍼의 임계값보다 작아야하며, 데이터의 값은 일정한 범위 안에 있어야 한다. 데이터 값의 범위를 지정한 이유는 데이터가 범위 밖에 있을 때는 정상인 아닌 상황으로 판단하게끔 하기 위함이다. 이렇게 이 조건을 판단하여 참이면 타이머를 동작시켜 자신에게 데이터를 전송하려는 이웃 노드를 기다린다. 타이머가 종료될 때 까지 이웃 노드로부터 RTS 패킷을 수신하지 못하면 자신에게 전송하려는 노드가 없다고 판단하여 전원을 오프하고 sleep 상태로 전환되어 활성 구간에서의 idel listening 시간의 에너지 소모를 절감할 수 있다.

동일한 조건하에서 이 알고리즘을 적용을 했을 때와 단순히 S-MAC만을 적용했을 때를 실험했다. 실험은 실내에서 온도 센서로 온도를 측정하였고, 1초에 5번씩 온도 정보를 보내게 하였다. 그리고 데이터 변화량의 임계값은 0.1, 0.2, 0.3 으로 각각 실험을 하였고, 버퍼의

임계치는 동일하게 테스트를 하였다. 실험 결과는 아래의 표와 같다. 동일한 새것의 AA 배터리 1개로 실험을 하였을 경우에 S-MAC을 개선한 알고리즘이 적용된 시스템이 아닌 것에 비해 약27%정도 더 오래가는 것을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

무선 통신 기술의 발전과 이를 이용하는 어플리케이션들이 증가하면서 무선 통신 기술은 고속으로 다량의 데이터를 전송하는 기술 말고도 저속의 저전력을 사용하는 기술도 요구하게 되었다. 이 기술은 유비쿼터스 시대의 센서 네트워크에 활용되어 Home Automation, Personal Health care, sensing과 monitoring 등의 다양한 분야에 활용될 수 있다. 지그비는 간단한 PHY layer와 배터리로 동작할 때 배터리의 파워 소모를 고려한 MAC protocol로 저가의 저전력 장비를 구성할 수 있도록 개발되었다.

본 논문에서는 이러한 지그비의 개요 및 구조와 동작 원리에 대해 알아보고 이를 응용해 저전력을 중점으로 개선된 S-MAC 알고리즘을 통해 시스템을 구현해보았다. 데이터 변화량과 버퍼의 임계치의 적절한 설정으로 인해서 조금 더 나은 에너지 효율을 가지는 시스템을 만들 수 있었다. 앞선 실험에서는 온도 센서를 가지고 노드를 만들어 시스템을 꾸몄으나, 다양한 시스템에 적용을 할 수 있도록 더 많은 주변 환경 요소를 반영할 수 있도록 해야 할 것이다. 에너지 효율이 향상된 알고리즘의 개발과 범용적인 적용이 가능하게 발전시킨다면 더 나은 저속의 저전력 시스템을 개발할 수 있을 것으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Wei Ye, John Heidemann, Devorah Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for wireless Sensor Networks," USC/ISI Technical Report ISI-TR-567, January 2003.
- [2] Tijs van Dam, Koen Langendoen, An adaptive Energy-Efficient MAC protocol for wireless Sensor Networks, Sensys '03, November 2003.
- [3] P.havinga and G.smit, Energy-efficient TDMA medium access control protocol scheduling, In Asian International mobile Computing Conference (AMOC 2000), pages1-9, November 2000.

표 1. 변수 설정

Table 1. Selection of variable.

변 수	설 명
$\Delta D$	데이터의 변화량
$\alpha$	데이터 변화량의 임계값
B	버퍼에 있는 데이터 용량
$\beta$	버퍼의 임계치
$D_{min}$	데이터의 최소값
$D_{max}$	데이터의 최대값

표 2. 실험 결과

Table 2. Result.

	S-MAC	개선된 알고리즘
$\alpha=0.1$	27시간 25분	34시간 40분
$\alpha=0.5$	27시간 25분	35시간 32분
$\alpha=1.0$	27시간 25분	36시간 46분
$\alpha=1.5$	27시간 25분	37시간 51분

- [4] I.F.Akyildiz, D.Pompili, and T. Melodia, "Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks," ACM Sigbed Review, Vol. 1, No.2, Jul. 2004.
- [5] LAN MAN Standards Committee of the IEEE computer Society, IEEE Std 802.11 - 1999, wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical layer(PHY) specification, IEEE 1999
- [6] C. Guo, L. Zhong, and J. Rabaey, "Low-Power Distributed MAC for Ad Hoc Sensor Radio Networks," Proc. Internet Performance Symp. (Globecom '01), Nov. 2001.
- [7] 윤성록, 서상호, 최호석, 황용석, 유형준, 박신중, "지그비 : 저속-저가-저전력의 무선 통신 기술," SITI Review, 제6호, 3-9쪽, 2004년 10월
- [8] 김호년, 김동민, 유준채, 송병철, 김범준, 이재용, "무선 센서 네트워크에서 임계값을 적용한 에너지 절감방안 연구", 제 14회 통신정보 합동 학술대회 논문집(JCCI 2004), 2004. 4. 28~ 4. 30. II-D-1
- [9] 조위덕, 이상향, 강정훈, "센서 네트워크 기술 개요", Information Network Review, vol 17-1, 2003.5
- [10] 황호영, 정윤원, "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC프로토콜에 대한 동향 및 분석", Telecommunications Review, 제14권 6호, 918-934 쪽, 2004년 12월

---

 저 자 소 개
 

---



한 성 덕(학생회원)  
 2005년 아주대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2007년 아주대학교 전자공학과  
 석사 재학 중.  
 <주관심분야 : 임베디드 시스템,  
 Embedded Linux, 컴퓨터>



문 호 선(학생회원)  
 1998년 아주대학교 산업공학과  
 학사 졸업.  
 2005년 아주대학교 전자공학과  
 석박사통합과정 수료  
 <주관심분야 : 통신, RTOS, 임  
 베디드 시스템 >



김 용 득(정회원)  
 1971년 연세대학교 전자공학전공  
 (학사)  
 1973년 연세대학교 전자공학전공  
 (석사)  
 1978년 연세대학교 전자공학전공  
 (박사)

1979년~현재 아주대학교 전자공학부 정교수  
 1973년~1974년 불란서 E. S. E 전자공학 연구실  
 1973년~1974년 미국 STANFORD 대학교  
 연구교수  
 1981년~1982년 한국전자통신연구소  
 위촉연구위원  
 1994년~1998년 ITS 연구기획단연구위원,  
 전자부총괄  
 <주관심분야 : 통신, 컴퓨터, ITS>