

멀티 홉 무선 센서 네트워크에서 저 지연을 지원하는 MAC 프로토콜

전준헌 · 김성철*

A Low-Delay MAC(LD-MAC) protocol in Multi-Hop Wireless Sensor Networks

Jun-Heon Jeon · Seong-Cheol Kim*

Department of Computer Science, SangMyung University, Seoul 110-743, Korea

요 약

무선 센서 네트워크에서 MAC 프로토콜은 에너지 소모의 감소, QoS 지원, 공정성 지원, 그리고 전송 지연의 감소 등과 같은 많은 해결해야 할 문제들을 가진다. 본 논문에서는 멀티 홉 무선 센서 네트워크에서 저 지연을 지원하는 MAC 프로토콜을 제안한다. 본 논문에서 제안하고 있는 LD-MAC 프로토콜은 전송 지연을 줄이기 위해 RB(rapid beacon) 프레임의 사용한다. RB 프레임은 IEEE 802.15.4의 비콘 프레임의 수정된 형태이다. 송신 노드의 적응적 wakeup을 위해 RB 프레임에는 수신 노드의 wakeup과 관계된 seed 수를 포함한다. 또한 다음 홉 수신 노드의 적응적 wakeup을 위해 RB 프레임에는 남은 데이터 패킷 길이 정보를 포함한다. LD-MAC 프로토콜은 기존에 제안된 다른 프로토콜에 비해 데이터 패킷 전송 지연에서 더 좋은 성능을 보였다.

ABSTRACT

In Wireless Sensor Networks the Medium access control (MAC) protocol has many challenges to solve such as reducing energy consumption, supporting QoS(quality of service) fairness, and reducing delivery delay. This paper proposed a low-delay supporting MAC protocol in multi-hop Wireless Sensor Networks. The proposed protocol uses the RB(rapid beacon) frame for reducing delivery delay. The RB frame is a modified IEEE 802.15.4 beacon frame. For sender adaptive-wakeup, the RB frame includes a seed number for determining of a receiver wakeup time. And for next hop receiver adaptive-wakeup, the RB frame includes the length of remaining data packet information. Results showed that our LD-MAC protocol outperformed other protocol in terms of data packet delivery delay.

키워드 : 지연, 에너지 효율, MAC 프로토콜, 멀티 홉 무선 센서 네트워크

Key word : Delay, Energy efficient, MAC protocol, Multi-hop Wireless Sensor Networks

접수일자 : 2013. 11. 21 심사완료일자 : 2014. 01. 23 게재확정일자 : 2014. 02. 05

* **Corresponding Author** Seong-Cheol Kim(E-mail:sckim@smu.ac.kr, Tel:+82-2-2287-5315)

Department of Computer Science, SangMyung University, Seoul 110-743, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2014.18.2.452>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

무선 센서 네트워크에서 센서 노드들은 사용 목적에 따라 일정한 지역에 랜덤하게 배포된다. 랜덤하게 배포된 센서 노드들은 스스로 네트워크를 구성한다. 네트워크가 형성된 무선 센서 네트워크는 온도, 습도, 침입 등 다양한 정보를 감지하고, 감지된 데이터를 싱크 노드로 전달한다. 무선 센서 네트워크는 환경, 건축물, 산업 모니터링 등 다양한 분야에서 사용된다. 다양한 적용 환경으로 발전해 가면서 무선 센서 네트워크에서는 영상, 소리 등 다양한 데이터 처리가 요구되어진다. 요구되어지는 데이터는 기존의 단순한 정보의 데이터에서 복잡하고 크기가 커진 데이터 정보로 발전해가고 있다. 복잡하고 다양한 크기의 데이터 전송은 기존의 방식으로 전송할 경우 효율성은 떨어진다. 기존에 제안된 MAC 프로토콜들은 작은 데이터 패킷(예. 온도, 습도 등)의 전송에서 효율적인 방법이다[1,2]. 이런 MAC 프로토콜들은 다양한 크기의 데이터 패킷(예. 음성, 영상 등) 전송에 있어서 효율성이 떨어지는 단점을 가진다. 본 논문에서는 다양한 크기의 데이터 패킷에서 효율적인 전송 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안된 방식은 송신자와 수신자, 수신자와 1홉 떨어진 수신자(다음 홉 수신자) 사이의 데이터 전송 지연을 줄인다. 제안하는 MAC 프로토콜은 변형된 비콘 프레임의 사용과 멀티 홉의 overheard를 통해 지연(delay)과 에너지 소모를 줄이는 전송방식이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대해 설명한다. 3장에서는 제안하는 LD-MAC 프로토콜에 대해 자세히 다루고, 4장에서 성능분석을 통해 본 논문에서 제안하고 있는 MAC 프로토콜을 평가한 후, 5장에서 결론으로 구성된다.

II. 관련 연구

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 설계에서 에너지 효율적 사용이 매우 중요하다[1,3]. 기존의 무선 센서 네트워크에 대한 연구는 active 구간과 sleep 구간을 조절하여 에너지 소모를 줄이는 방식이 대표적이다[4,5]. 대표적인 MAC 프로토콜로는 S-MAC[4], X-MAC[5], B-MAC[6] 프로토콜을 들 수 있다. 이런 방식

들은 에너지 효율적인 측면에서 고안된 프로토콜로서 데이터 전송 지연은 고려하지 않은 단점을 가진다. 또한 수신자 기반으로 에너지 효율적인 MAC 프로토콜로 RI-MAC [7] 프로토콜이 있다. RI-MAC 프로토콜은 수신자의 비콘 신호로 데이터 전송을 시작하는 방식이다. RI-MAC 프로토콜은 송신 노드의 제어신호 전송으로 에너지 소모를 줄이는 장점을 가지고 있지만, 송신 노드가 수신 노드의 비콘 프레임이 올 때까지 계속 기다리는 idle listening으로 에너지가 소모되는 단점을 가진다. PW-MAC[8] 프로토콜은 수신자의 비콘 프레임에 의사 랜덤 수(pseudo-random number)를 추가하여 송신 노드가 수신 노드의 wakeup 시간을 예측하는 방식을 사용한다. 그러나 PW-MAC 프로토콜은 트래픽이 증가하면 충돌이 자주 발생하는 단점과 송신 노드와 수신 노드 사이에 1홉 전송만을 고려한 적용 한계를 가진다.

본 논문은 멀티 홉 무선 센서 네트워크에서 저 지연을 지원하는 MAC 프로토콜(LD-MAC)을 제안한다. LD-MAC 프로토콜은 RI-MAC 프로토콜의 단점인 송신 노드의 idle listening으로 발생하는 에너지 소모를 줄였으며, 1홉 환경으로 제한된 PW-MAC 프로토콜을 개선한 멀티 홉 환경에서 지연을 줄이는 방식이다.

III. LD-MAC 프로토콜

3.1. 프레임 형식

그림 1은 본 논문에서 사용되는 송신 노드의 데이터 프레임과 수신 노드의 RB 프레임을 보여준다. 이들 RB 프레임 및 데이터 프레임은 IEEE 802.15.4[9]의 프레임을 수정한 것이다.

그림 1. (a)의 데이터 프레임에는 IEEE 802.11의 NAV (network allocation vector)와 같은 데이터 프레임 전송 완료 정보를 포함한다. 이 NAV를 통해 수신 노드는 송신 노드의 데이터 패킷 전송 완료 시기를 알 수 있다. 그림 1. (b)와 같이 RB 프레임에는 2가지 정보를 포함한다. Pkt remain length는 남은 데이터 패킷 길이에 대한 정보이다. 이 정보는 다음(next) 홉 수신 노드의 wakeup 시간을 결정하는데 사용한다. Seed no.는 시드 수이다. 이 정보는 송신 노드 및 다음 홉 수신 노드의 wakeup 시간 결정에 사용한다.

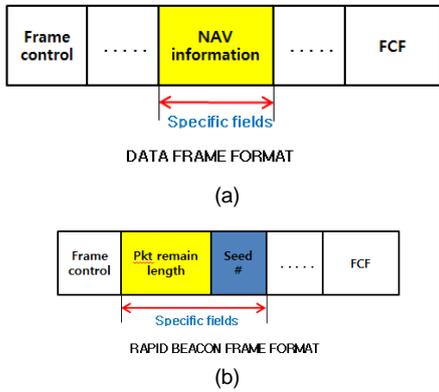


그림 1. 빠른 비콘 프레임 및 데이터 패킷 프레임 구성
Fig. 1 Rapid beacon and Data packet frames formats

3.2. 저 지연 제공 메커니즘

그림 2는 저 지연을 위한 전송 메커니즘을 보여준다.

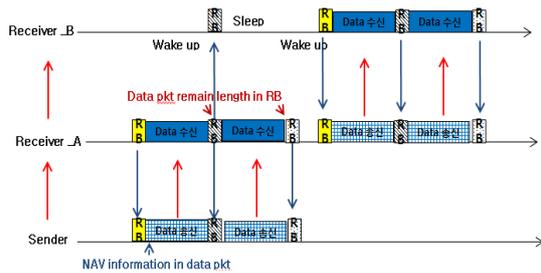


그림 2. 저 지연을 제공하는 메커니즘
Fig. 2 Low delay supporting mechanism

그림 2에서 수신 노드 A는 송신 노드로부터 데이터 패킷 전송 받기 위해 RB 프레임을 브로드캐스트 한다. 전송할 데이터 패킷을 가지고 있는 송신 노드는 RB 프레임을 받고 데이터 패킷 전송을 시작한다. 연속적인 데이터 패킷 전송을 위해 수신 노드 A는 패킷 수신 후 즉시 RB 프레임을 브로드캐스트 한다. 이 RB 프레임은 전송 받은 데이터 패킷의 응답의 의미와 다음 데이터 패킷을 전송하라는 의미를 가진다. 수신 노드 B는 자신의 wakeup 주기에 수신 노드 A의 RB 프레임을 overhearing한다. 이를 통해 수신 노드 B는 송신 노드의 데이터 패킷 전송 완료 시간까지 sleep 모드로 전환한다. 수신 노드 B는 수신 노드 A의 전송 시작 시점 바로 전에 wakeup하여 지연 없이 데이터 패킷을 전송한다. RB

프레임에 포함된 시드 수는 서로 충돌할 수 있는 범위에 있는 이웃 수신노드의 동시 전송으로 충돌 시 수신 노드의 같은 wakeup으로 인해 발생할 수 있는 연속적인 충돌을 줄이기 위해 사용된다. 수치적 분석을 위해 다음과 같이 정의한다.

- $G(x)$: 누적분포함수
- D_l : 데이터 패킷의 길이
- T_p : 전파 지연(Propagation Delay)
- L_i : 송신 노드와 수신 노드 사이의 wakeup 차이
- D : 지연(Delay)

$G(x)$ 는 단위시간당 RB 프레임을 전송 받을 수 있는 누적 분포함수라 할 때 $1 - G(x)$ 는 RB 프레임을 전송 받지 못할 누적 분포함수이다. 다음 홉 수신 노드가 RB 프레임을 전송받을 확률은 수식 (1)과 같고 전송받지 못할 확률은 수식 (2)와 같다.

$$P \{ \text{RB received} \} = G(x) \quad (1)$$

$$P \{ \text{RB not received} \} = 1 - G(x) \quad (2)$$

수신 노드와 다음 홉 수신 노드 사이의 지연은 다음 홉 수신 노드가 RB 프레임의 overhearing 으로 지연 없이 데이터 패킷을 전송할 확률과 overhearing 하지 못하여 수신 노드가 다음 홉 수신 노드의 wakeup 할 때 까지 idle listening한 이후 데이터 패킷을 전송할 확률의 합과 같다. 수식으로 나타내면 수식(3)과 같다.

$$D = G(x)(D_l \times T_p) + (1 - G(x))(D_l \times T_p + L_i) \quad (3)$$

누적분포함수 $G(x)$ 는 단위시간당 RB 프레임을 전송받을 확률로 그 값은 지수 분포를 따르므로, 수식으로 나타내면 (4) (5)와 같다.

$$G(x) = \lambda e^{-x\lambda} \quad (4)$$

$$1 - G(x) = 1 - \lambda e^{-x\lambda} \quad (5)$$

수식(3)에 수식 (4) (5)을 대입하면 수식(6)과 같다. 수식(6)은 수신 노드와 다음 홉 수신 노드 사이의 데이터 패킷 지연 시간을 나타낸다.

$$D = \lambda e^{-x\lambda} (D_l \times T_p) + (1 - \lambda e^{-x\lambda}) (D_l \times T_p + L_t) \quad (6)$$

3.3. 에너지 효율적인 Wakeup 메커니즘

그림 3은 본 논문에서 제안하고 있는 송신 노드와 수신 노드 사이의 에너지 효율적인 wakeup 메커니즘을 보여준다.

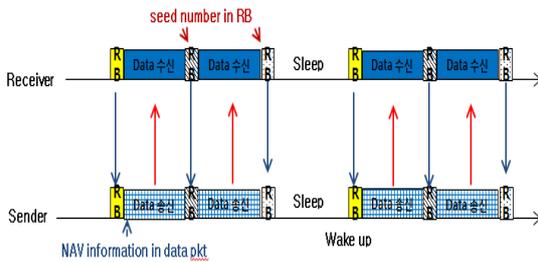


그림 3. 에너지 효율적인 wakeup 메커니즘
Fig. 3 Energy efficient wakeup mechanism

그림 3에서 수신 노드는 송신 노드의 데이터 패킷을 받은 다음에 RB 프레임을 브로드캐스트 한다. 송신 노드는 RB 프레임의 시드 수를 통해 수신 노드의 다음 wakeup 시간을 예측한다. 즉 송신 노드와 수신 노드의 정확한 wakeup 시간을 조절함으로써, 송신 노드의 idle listening으로 발생하는 에너지 소모를 감소시킨다. 수신 노드의 다음 wakeup 시간은 현재의 wakeup 시간, 현재 데이터 패킷 전송 시간, 그리고 시드 수를 더한 값이다. 수식으로 나타내면 수식 (7)과 같다.

$$\text{Next wakeup time} = \text{now} + \text{transmission time} + \text{seed number} \quad (7)$$

3.4. Algorithm

LD-MAC 프로토콜에서 전송할 데이터를 가진 송신 노드는 수신 노드의 RB 프레임을 수신한 후에 데이터 패킷 전송을 시작한다. 송신 노드는 자신의 데이터 패킷 전송 후 반드시 수신 노드로부터 RB 프레임을 수신하여 이를 통해 전송중인 데이터 패킷에 대한 응답과 수신자의 다음 wakeup 시간을 예측한다. 송신 노드의 데이터 전송 알고리즘은 그림 4와 같다.

멀티 홉 무선 센서 네트워크에서 저 지연을 지원하는 MAC 프로토콜

```

1:SENDER: Data Generation
2:SENDER: Channel sensing
3:SENDER: if channel == busy
{ sleep }
4:SENDER: else if channel == idle
{ wait until received RB }
5:SENDER: if sender_buffer == RB
6:SENDER: for(i=0;i < data_pkt_number;i++)
{ transmission = data_pkt_i }
{ receive = RB }
7:SENDER: else
{ wakeup_time = RB_seed_number
+ 1_transmission_time }
8:SENDER: sleep until wakeup_time

```

그림 4. 송신 노드의 알고리즘
Fig. 4 Algorithm of sender node

```

1:RECEIVER: Periodic wake_up
2:RECEIVER: Channel sensing
3:RECEIVER: Channel == busy
{ received RB }
4:RECEIVER: Channel == idle
{ transfer RB }
5:RECEIVER: if buffer == null
{ sleep }
6:RECEIVER: else
7:RECEIVER: for(i=0;i==n,null;i++)
{ received data_pkt_i }
{ RB = Data_pkt_remain_length }
{ RB = Seed_number }
{ broadcast RB }

```

그림 5. 수신 노드의 알고리즘
Fig. 5 Algorithm of receiver node

수신 노드의 데이터 수신 방식에 대한 알고리즘은 그림 5와 같다. 수신 노드는 주기적으로 wakeup하여 자신이 데이터 패킷을 받을 준비가 되었음을 이웃 송신 노드들에게 알린다. 그러나 일정 시간 데이터 패킷이 전송되지 않으면 sleep 하여 에너지를 절약한다. 송신 노드로부터 데이터 패킷을 수신하게 되면 데이터 패킷 다음에 즉시 RB 프레임을 브로드캐스트 한다. 다음 홉 수신 노드는 채널이 사용 중이면 sleep하지 않고 RB 프레임을 overhearing 한다. RB 프레임을 수신한 다음 홉 수신 노드는 수신 노드와 송신 노드 사이의 데이터 패킷 전송이 완료될 때까지 sleep하여 에너지를 절약한다.

IV. 성능 분석

본 장에서는 LD-MAC 프로토콜과 기존의 RI-MAC 프로토콜과 성능을 비교분석한다. 이는 제안하는 LD-MAC 프로토콜이 RI-MAC 프로토콜과 같이 수신자의 비콘 프레임으로 시작되는 프로토콜이기 때문이다. 본 논문의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정한다. 50m x 50m의 공간에 50개의 센서 노드가 있으며, 50개의 센서 노드들을 10번 임의로 분포를 변경하여 평균값을 취한다. 본 논문에서 사용한 파라미터 값은 참고문헌 [5,10]에서 사용된 값들을 사용하여, NS-2 시뮬레이터를 이용하였다. 표 1은 본 논문에서 사용한 파라미터 값을 보여준다.

표 1. 성능 분석에 사용된 파라미터들 [5,10]

Table. 1 Parameters used in performance evaluation

파라미터	설명	값
P_{TX}	TX 모드에서 무선전력 소모	27mW
P_{idle}	idle에서의 전력소모	10mW
P_{sleep}	슬립모드에서의 전력소모	10 μ W
P_{RX}	RX모드에서 무선전력 소모	10mW
T_{data}	데이터 패킷 전송시간	7.744ms
$Data_Rate$	데이터률	250kbps
$B_{capacity}$	배터리 용량	1000mAh
TR	Transmission range	250m
IR	Interference range	500m
$BEACON$	beacon size	44byte
$DATA$	data packet size	220byte

3장에서 유도한 수식과 제안한 알고리즘에 의하여 전송 노드 수에 따른 데이터 전송 지연과 홉 수 증가에 따른 전력 소모에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 그림 6과 그림 7과 같다. 그림 6은 송신 노드 수에 따른 데이터 전송 지연을 보여준다.

그림에서 보듯이 전송 노드의 수가 증가할수록 LD-MAC 프로토콜과 RI-MAC 프로토콜의 차이가 증가함을 알 수 있다. 이는 전송 노드 수가 증가할수록 수신 노드의 비콘 프레임을 기다리는 송신 노드의 지연 시간이 증가하기 때문이다. 그러나 본 논문에서 제안하고 있는 LD-MAC 프로토콜은 다음 홉의 수신노드의 전송완료시기를 예측하여 wakeup 하기 때문에 전송지연은 적게 증가한다.

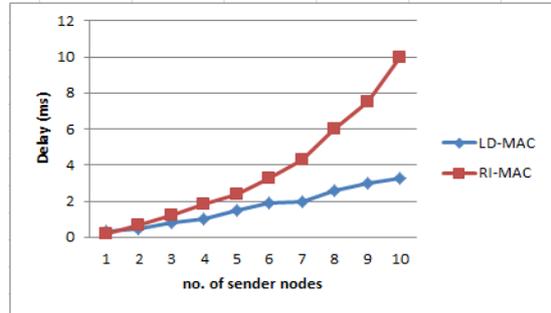


그림 6. 전송 노드 수에 따른 데이터 전송 지연
Fig. 6 Delay of data packet vs number of senders

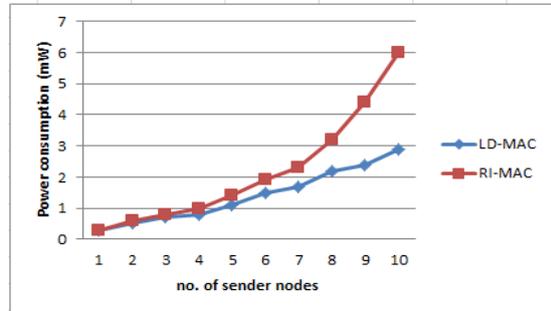


그림 7. 홉 수 증가에 따른 전력 소모
Fig. 7 Power consumption vs number of hops

그림 5는 전송 센서 노드 홉 수의 증가에 따른 센서 노드의 에너지 소모를 보여준다. 적은 홉 수를 가지는 환경에서의 에너지 소모는 기존의 RI-MAC 프로토콜과 비교하여 큰 차이가 보이지는 않지만 홉 수가 증가할수록 LD-MAC 프로토콜이 더 적은 에너지가 소모되고 있음을 알 수 있다. 이는 LD-MAC 프로토콜은 송신 노드로부터 2홉 거리의 수신 노드의 overhearding으로 1홉의 수신 노드의 전송 완료시기를 예측할 수 있기 때문에 1홉 수신 노드의 idle listening으로 발생하는 에너지 소모를 줄일 수 있기 때문이다. 그림 6, 7에서 RI-MAC 프로토콜은 그 값이 노드 수 증가 및 홉 수의 증가에 따라 큰 폭으로 증가하고 있지만 LD-MAC 프로토콜은 overhearding을 통해 wakeup을 예측하기 때문에 지연 및 idle listening으로 발생하는 전력 소모가 급격하게 증가하지 않고 있다. 결과적으로 본 논문에서 제안하고 있는 LD-MAC 프로토콜은 기존의 RI-MAC 프로토콜에 비해 더 작은 에너지가 소모되며, 더 적은 지연으로 데이터를 전송할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수정된 비콘 프레임인 RB 프레임을 사용하여 송신 노드와 수신 노드 간 여러 홉이 존재할 경우 전체 전송 지연을 감소시킬 수 있는 MAC 프로토콜을 제안하였다. 본 논문에서 제안하고 있는 LD-MAC 프로토콜은 멀티 홉 네트워크 환경에서 데이터 전송에 참여하는 노드들의 wakeup 시간을 조절함으로써 전송 노드가 10개 이상인 환경에는 전체 전송 지연의 약 33%의 효율이 있으며, 싱크까지의 홉 수가 10홉 이상일 경우 전체 노드들의 에너지 총합의 최대 약 48%의 에너지 효율이 있다. 추후에 전송되는 트래픽 간의 상호 연관 관계된 변화에 따른 다양한 적용 방법에 대한 연구가 이루어질 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 상명대학교 교내연구비를 지원 받아 수행하였음

REFERENCES

- [1] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutka, and N. Xi, "The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey", *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* vol. 15, Issue 1, pp. 101-120, 2012.
- [2] S. C. Kim, J. H. Jeon, "EEP-B-MAC: Energy Efficient & Priority-Based MAC Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *Journal of The KOREA Institute of Information and Communication Engineering* vol. 17, no. 3, pp. 755-761, 2013.
- [3] A. S. M. Sanwar Hosen, S. H. Kim, and G. H. Cho, "An Energy Efficient Cluster Formation and Maintenance Scheme for Wireless Sensor Networks," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering (JICCE)*, vol.10, no.3, pp.276-283, 2012.
- [4] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. INFOCOM*, pp. 1567-1576, 2002.
- [5] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, Richard Han, "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," *ACM SenSys '06*, pp. 307-320, October 2006.
- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," *ACM SenSys '04*, Baltimore, Maryland, USA, pp. 95-107, November 2004.
- [7] Yanjun Sun, Omer Gurewitz, David B. Johnson, "RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," *ACM SenSys '08*, pp. 1-14, November 2008.
- [8] L. Tang, Y. Sun, O. Gurewitz, and Johnson, D. B., "PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pp. 1305-1313, April 2011.
- [9] IEEE Std 802.15.4-2006, *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local metropolitan area networks - Specific requirements, Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2006.
- [10] Jeong-Yeob. Oak, Young-June Choi, and Wooguil Pak, "EP-MAC: Early Preamble MAC To Achieve Low Delay And Energy Consumption In Duty Cycle Based Asynchronous Wireless Sensor Networks," *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)* vol. 6, no. 11, pp. 2980-2991, 2012.



전준헌(Jun-Heon Jeon)

상명대학교 컴퓨터과학과(박사과정)
 ※ 무선 센서 네트워크, MAC 프로토콜, QoS 통신



김성철(Seong-Cheol Kim)

상명대학교 컴퓨터과학과 교수

※ 무선 센서네트워크, MAC 프로토콜, QoS 통신, 초고속통신망, 멀티미디어통신