

논문 2007-44CI-3-5

대규모 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC 프로토콜

(Energy Efficient Medium Access Control
for Large-Scale Sensor Networks)

배진현*, 김건욱**

(Jinheon Bae and Keonwook Kim)

요약

본 논문에서는 대규모 센서 네트워크를 구성함에 있어서 에너지 소비 효율성이 우수한 Co-MAC (Coexistence MAC) 프로토콜을 제안한다. Co-MAC 프로토콜에서 전체의 네트워크는 시간 축 상에서 상호간에 직교하면서 동작하는 독립적인 subnet 들로 나뉜다. Co-MAC 프로토콜의 기본적인 아이디어는 임의의 센서 노드가 이웃 노드로부터 불필요한 데이터를 수신하는 overhearing을 줄이기 위하여 임의의 지역에서 센서 노드들이 고르게 각 subnet으로 할당되도록 설계하는 것이다. 본 논문의 시뮬레이션 결과에서는 제안된 Co-MAC 프로토콜이 기존의 센서 MAC 프로토콜보다 동일한 환경에서 에너지 소모 측면에 관하여 더 효율적임을 보였다.

Abstract

This paper proposes Co-MAC (Coexistence MAC), an energy efficient medium access control protocol designed for large-scale sensor networks. In Co-MAC protocol, an overall network is divided into independent subnets, and each subnet orthogonally operates on time line in a temporal fashion. The basic idea of Co-MAC is to evenly distribute sensor nodes in a certain geographic area based on subnets to minimize overhearing which means the reception of unnecessary data packets from neighboring nodes. In our simulation, it was observed that energy efficiency of Co-MAC outperforms conventional MAC protocols under the given conditions.

Keywords : medium access control, large-scale sensor network, sensor network, energy efficient protocol

I. 서론

센서 네트워크는 센싱 기술의 발전과 더불어 넓은 범위의 응용 분야에 적용되고 있다. 그 중에서 도시 환경이나 자연 생태 모니터링과 같은 시스템은 다양한 센서를 바탕으로 광범위한 지역으로부터 정보를 획득함으로써 자동화 환경이 가능하도록 한다. 이러한 응용 분야에서는 배터리 재충전이 어려운 대량의 센서 노드가 광범위한 영역에 걸쳐 배치되고, 하나의 채널을 공유하게 된다. 이와 같이 다수의 센서 노드들이 채널을 공유하

는 상황에서 에너지 소모를 최소화할 수 있도록 Medium Access Control (MAC)을 디자인하는 것은 필수적이다.

대규모 센서 네트워크에서 에너지 관리는 MAC 프로토콜을 디자인하는데 있어서 최우선시 되는 요소이다. 에너지 낭비의 주요 원인들은 idle listening, collision, control packet overhead, overhearing 등^[2]이다. 데이터 송수신 유무와 관계없이 연속적으로 채널을 감시하는 Idle listening은 에너지 소모를 일으키는 주요 요인이다. 이를 보완하기 위하여 S-MAC^[2]과 T-MAC^[3]과 같은 동기식 방식의 프로토콜에서는 센서 노드들을 일정 시간 휴면시킴으로써 불필요한 에너지 소비를 방지하여 낮은 duty cycle을 유지하도록 한다. 이와 달리

* 학생회원, ** 정회원, 동국대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Dongguk University)

접수일자: 2007년3월21일, 수정완료일: 2007년5월4일

B-MAC^[7]과 Wise-MAC^[8]과 같은 비동기 방식의 프로토콜은 일정 주기로 채널을 샘플링하여 데이터 전송이 있을 경우 이를 수신하고, 없을 경우는 즉시 휴면 상태로 돌아가는 구조로써 극히 적은 트래픽이 발생하는 상황에서 센서 노드들이 저전력으로 동작하도록 유지한다. 하지만 트래픽량이 증가하게 되면 비동기식 프로토콜은 센서 노드들 간의 overhearding이 증가하게 되어 요구되는 duty cycle을 항상 보장하지 못하게 된다.

본 논문에서는 대규모 센서 네트워크를 구성할 시 에너지 소비 효율성이 우수한 Co-MAC (Coexistence MAC) 프로토콜^[1]을 제안한다. Co-MAC 프로토콜은 임의의 지역에서 센서 노드들이 고르게 각 subnet으로 할당되도록 설계함으로써 시간 동기화되는 센서 노드들을 segment 수만큼 분산시켜 센서 노드간의 overhearding을 줄일 수 있다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. II장에서는 Co-MAC 프로토콜의 디자인에 대해서 설명하고, III장에서는 에너지 효율성에 관한 시뮬레이션을 통해 S-MAC, T-MAC, 및 Co-MAC과의 성능을 비교, 분석한다. 관련 연구, 결론과 향후 연구가 각각 IV장과 V장에서 설명된다.

II. 관련 연구

센서 네트워크 분야는 에너지 제약이라는 중요한 이슈 때문에 지난 수년간 다양한 종류의 MAC 프로토콜들이 제안되어져 왔다. 이러한 MAC 프로토콜은 크게 slotted protocol과 sampling protocol^[9] 두 가지로 분류한다.

slotted protocol은 시간을 slot들로 나누고, 각 slot을 기본 단위로 휴면 상태에 있을지 활동 상태로 동작할지에 관하여 결정하게 된다. S-MAC^[2]과 T-MAC^[3]은 센서 네트워크의 MAC 프로토콜과 관련하여 성능 벤치마크로써 대표적인 slotted protocol들이다.

Mica2 하드웨어에 기본 MAC으로 사용되어지는 B-MAC^[7]은 규칙적으로 채널을 샘플링하여 채널 상태를 확인하여 송수신 여부를 결정하는 adaptive sampling protocol이다. Adaptive sampling protocol은 저전력 소모를 위한 Low Power Listening (LPL), Clear Channel Assessment (CCA)와 packet backoffs, 신뢰성을 위한 link layer acknowledgments로 구성되어진다.

이와 같은 분류와 함께, 상위 레벨의 프로토콜과 특

정 응용 분야 관련한 연구 주제로써 여러 가지 MAC 프로토콜들이 제안되었다. 그 중 CSMA/p*^[10]와 Sift^[4]는 센서 네트워크에서 발생하는 트래픽이 event를 중심으로 발생하는 현상에 초점을 맞춰 디자인된 MAC 프로토콜이다. 다수의 센서 노드들이 동시 다발적으로 데이터를 전송하려는 상황에서 우수한 성능을 나타낸다.

III. Co-MAC 프로토콜 디자인

Co-MAC^[1]은 S-MAC^[2]과 T-MAC^[3]과 유사한 방식으로 시간을 slot으로 나누고, 각 slot을 기본 단위로 휴면 상태에 있을지 활동 상태로 동작할지에 관하여 결정하는 slotted protocol이다. 그림 1은 Co-MAC에서 정의된 시간 구조를 나타낸다. L slots은 하나의 segment를 구성하고, M segments는 하나의 frame으로 이루어진다. Co-MAC에서 기본적으로 센서 노드들은 M segments 중 하나를 선택하여 활동 상태로 동작하게 되고 나머지 segments에서는 휴면 상태에 놓이게 되고, 프레임마다 주기적으로 반복하게 된다. 동일한 segment 상에서 동작하는 노드들은 하나의 subnet을 구성하게 된다.

Co-MAC 프로토콜의 기본적인 아이디어는 overhearding을 줄이기 위하여 임의의 지역에서 센서 노드들이 고르게 각 subnet으로 할당되도록 디자인하는 것이다. Co-MAC 프로토콜은 시간 동기화되는 센서 노드들을 임의의 지역을 기준으로 segment 수만큼 분산 시킴으로써 S-MAC과 T-MAC과 비교하여 상대적으로 낮은 비율의 overhearding이 발생하도록 유도하여 에너지를 절약한다.

Co-MAC 프로토콜의 기본적인 아이디어는 overhearding을 줄이기 위하여 임의의 지역에서 센서 노드들이 고르게 각 subnet으로 할당되도록 디자인하는 것이다. Co-MAC 프로토콜은 시간 동기화되는 센서 노드들을 임의의 지역을 기준으로 segment 수만큼 분산 시킴으로써 S-MAC과 T-MAC과 비교하여 상대적으로 낮은 비율의 overhearding이 발생하도록 유도하여 에너지를 절약한다.

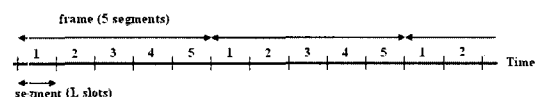


그림 1. Co-MAC에서 정의된 시간 구조

Fig. 1. Time-line for Co-MAC protocol.

1. 시간 동기화를 위한 싱크 패킷 전송 규칙

싱크 패킷 전송을 위한 규칙을 정의하기 위하여 f frames을 하나의 round로 정의한다. 각 round에서는 그에 해당하는 subnet만이 싱크 패킷을 전송하게 된다. 각 round의 첫 번째 frame에서는 베이스 노드가 해당 subnet이 동작하는 segment 시작 지점에서 싱크 패킷을 전송하게 된다. 두 번째 frame에서는 이전 frame에서 싱크 패킷을 수신한 센서 노드들이 현재 segment 시작 지점에서 싱크 패킷을 전송하기를 시도한다.

다수의 센서 노드들이 동시에 싱크 패킷을 전송할 경우 충돌이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위하여 각각의 센서 노드들은 싱크 패킷 전송 시 크기가 작고 고정된 Contention Window (CW)를 사용한다. CW는 여러 노드가 동시 다발적으로 패킷을 전송 시 효율적으로 충돌을 방지할 수 있도록 고안된 K.Jamieson and H. Balakrishnan이 제안한 Sift^[4]를 이용한다. Sift 확률 분포는 다음과 같이 주어진다.

$$p(r) = \frac{(1-\alpha) \cdot \alpha^{CW}}{1-\alpha^{CW}} \cdot \alpha^{-r} \text{ for } r=1...CW \quad (1)$$

식 (1)에서 α 는 0과 1사이의 값을 가지는 확률 분포를 위한 파라미터이다. CW는 contention window 개수를 나타낸다. α 는 넓은 범위의 적용 가능한 최적의 값에 대한 연구^[5]를 바탕으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = N_1^{-\frac{1}{CW-1}} \quad (2)$$

식 (2)에서 N_1 는 동시에 싱크 패킷 전송을 시도할 수 있는 최대의 노드 수를 의미한다.

가장 앞에 위치한 CW를 선택한 센서 노드는 두 번째 frame에 해당 segment 시작 지점에서 싱크 패킷을 전송하게 된다. 동시에 싱크 패킷 전송을 시도하려던 다른 노드들은 싱크 패킷을 수신하게 되면 전송을 포기하게 된다. 이때 싱크 패킷을 전송한 노드와 싱크 패킷을 전송을 포기한 노드들 모두는 이번 round에서는 싱크 패킷을 더 이상 전송하지 않는다. 반면, 새로이 싱크 패킷을 수신한 센서 노드들은 같은 방식으로 세 번째 frame에 해당 segment 시작 지점에서 싱크 패킷 전송을 시도한다.

이러한 반복은 round를 구성하는 f frame 까지 실행된다. 이러한 경우 f 번째 frame 이후 센서 노드들이 자동적으로 싱크 패킷 전송을 중단해야하는 과정이 필요하다. 이를 위하여 싱크 패킷 내에는 Time To Live

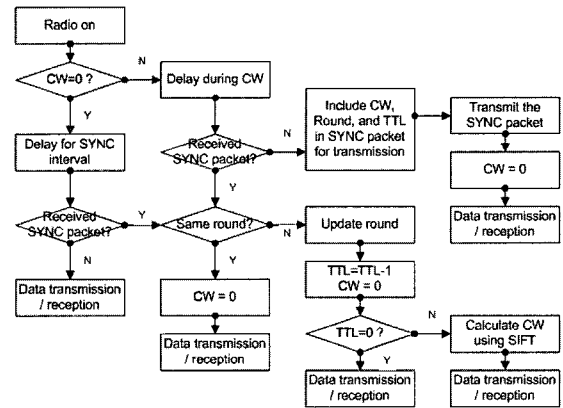


그림 2. 싱크 패킷 전송 규칙을 위한 블록 다이어그램
Fig. 2. Block diagram for 싱크 패킷 transmission scheme.

(TTL) 값을 포함하고 싱크 패킷이 전송될 때마다 하나씩 값을 감소시키며 최종적으로 0이 되면 자동적으로 소멸되게 구성된다.

라운드 로빈 방식에 의해 베이스 노드는 다음 시작하게 될 round를 결정하게 되고, 해당 segment의 시작 지점에서 싱크 패킷을 전송하게 된다.

그림 2는 싱크 패킷 전송 규칙을 블록 다이어그램을 나타낸다. 각 센서 노드는 r , Round 두 가지 변수를 저장한다. r 값이 0이면 해당 frame에서 싱크 패킷 전송을 하지 않는다. 그리고 센서 노드는 저장된 Round 값을 바탕으로 수신한 싱크 패킷의 Round와 비교하여 현재 round를 인식한다.

2. 결합을 위한 확률 모델

Co-MAC은 임의의 지역에서 센서 노드들이 M 개의 subnets에 고르게 할당되도록 구성하는 것이 목적이다. 이를 위해서 Co-MAC에서는 결합 과정에서 센서 노드들이 각각의 subnet에 분배되도록 구성한다.

결합 과정은 미결정 센서 노드들이 싱크 패킷을 수신할 경우 결합 자격을 가지게 됨으로써 발생하게 되고, 결합 여부는 제안된 확률 모델을 바탕으로 실행한다. 각 센서 노드가 클러스터 헤드로 고르게 선택될 수 있도록 확률 값을 할당하는 LEECH^[6]에서 영감을 받아 유도된 확률 모델은 임의의 frame f 에서 결합 되는 노드 수, k 를 최대한 일정하게 유지시킴으로써 최종적으로 각 subnet에 할당되는 노드 수를 고르게 분산시키는 방식이다.

$$E[AN] = \sum_{i=1}^n p_i(f) = k \quad (3)$$

식 (3)에서 AN 은 한 frame 당 결합되는 센서 노드 수를 의미하고, k 는 그에 해당하는 기대값이다. n 은 현 frame에서 결합에 참여하는 노드 수의 기댓값을 의미한다. 그러므로 각 센서 노드가 임의의 frame f 에서 싱크 패킷 수신하였을 경우 결합할지 안할지를 결정하게 되는 확률은 다음과 같다.

$$p_i(f) = \frac{k}{n} \quad (4)$$

식 (4)에서 k 는 상수이다. 반면 n 은 베이스 노드에 의해서 계산되는 값으로써, 베이스 노드가 싱크 패킷에 포함시켜 각 round의 첫 번째 frame에서 전송하고, 각 센서 노드들은 이 n 값을 각 round에서 유지하며 SYNC packet 전송 시 동일하게 포함시킨다. 베이스 노드는 n 을 다음과 같이 갱신한다.

$$n = \frac{n_{pending}}{N_{total}} \cdot S \quad (5)$$

식 (5)에서 N_{total} 은 네트워크를 구성하는 총 노드 수이고, $n_{pending}$ 은 결합되지 않은 총 노드 수를 의미한다. S 는 임의의 한 노드에서 통신 가능한 범위 내에 존재하는 노드 수이다. 따라서, n 은 임의의 센서 노드가 싱크 패킷 전송 시 그에 해당하는 통신 범위 내에서 아직 결합을 하지 못한 노드 수를 나타낸다.

IV. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 환경

본 논문에서 시뮬레이션은 200m x 200m 크기의 지역에 n 개의 센서 노드를 균등한 확률로 랜덤하게 배치하는 모델을 고려하였다. 각 센서 노드의 통신 가능한 전파 범위는 60m 까지 전송할 수 있도록 설정하였다. 그림 3은 200개의 센서 노드가 200m x 200m 크기의 지정된 지역 위에 균일한 확률을 바탕으로 랜덤하게 분포된 결과를 보여주고 있다.

Co-MAC 구성을 위해 설정된 매개 변수는 표 1과

표 1. Co-MAC 프로토콜을 위한 매개 변수
Table 1. Parameters for Co-MAC protocol.

Parameter	Value
SIFT 확률 모델의 α 값	0.8348
SIFT 확률 모델의 CW 개수	16
결합을 위해 제한된 노드 수 k	1
트래픽 모델	CBR

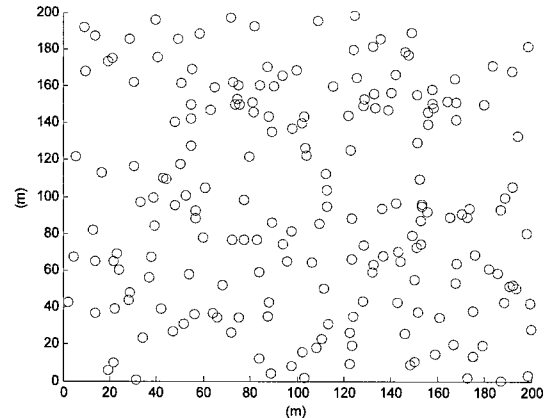


그림 3. 노드 배치

Fig. 3. Random uniform deployment of nodes.

같다. SIFT 프로토콜에서 확률 분포 발생을 위한 α 값은 식 (2)에 시뮬레이션을 통해 추정된 $N_1=15$ 와 contention window 개수 $CW=16$ 을 각각 대입함으로써 구할 수 있다. 각 센서 노드가 결합에 참여할 때, 각 기회마다 네트워크에 할당되는 센서 노드의 수는 평균적으로 1을 유지할 수 있도록 k 값을 설정하였다. 본 시뮬레이션에서 사용되는 트래픽 모델은 Constant-Bit-Rate (CBR)을 고려하였다.

2. 분석 결과

시뮬레이션을 통하여 개개의 센서 노드와 통신 가능한 인접 노드 수를 분석하여 Co-MAC 프로토콜이 기존의 프로토콜보다 에너지 효율성이 뛰어나다는 것을 보였다.

그림 4는 S-MAC, T-MAC 및 Co-MAC에서 네트워크 내에 존재하는 총 센서 노드 수에 따라 각 센서 노

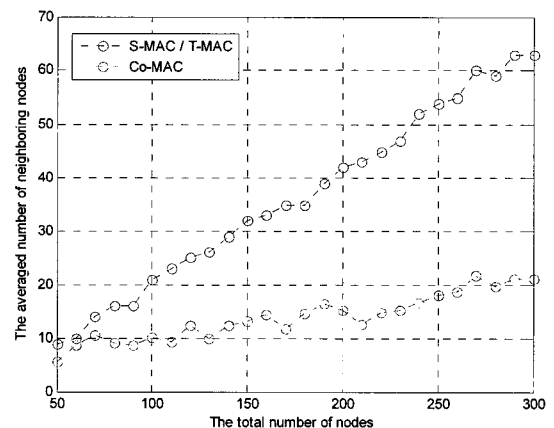


그림 4. 전체 노드 수의 증가에 따른 인접 노드 수

Fig. 4. The number of neighbor nodes according to the total number of nodes in overall network.

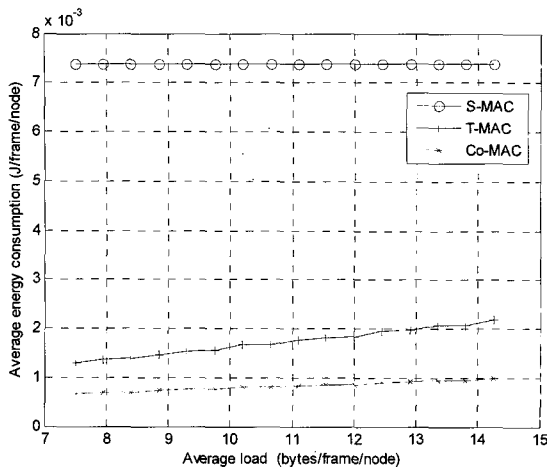


그림 5. 평균 에너지 소모
Fig. 5. Average energy consumption.

드와 통신 가능한 인접 노드 수의 관계를 나타낸 것이고, Co-MAC은 5개의 subnet들로 나뉜진 경우이다. 이때, S-MAC과 T-MAC의 경우 Co-MAC에 비해 개개의 노드의 평균적인 인접 노드 수가 네트워크 내의 총 센서 노드가 증가함에 따라 상대적으로 가파르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 센서 노드들 간의 overhearding이 상대적으로 높은 빈도를 가지고 발생하게 되고, 결과적으로 추가적인 에너지 소모가 야기된다.

그림 5는 S-MAC, T-MAC, Co-MAC 프로토콜에서 각 노드를 기준으로 프레임당 전송되는 평균 데이터량에 대한 개개의 노드가 소비하는 평균 에너지를 나타낸 것이다. 전체 노드 수는 300개이고, Co-MAC의 경우 나뉘지는 세그먼트 수 M 은 5로 설정하였다. 수학적 모델링^[1]을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과에서 Co-MAC 프로토콜이 인접 노드 수가 상대적으로 낮아 overhearding이 발생 빈도가 적은 이유로 S-MAC 프로토콜보다는 대략 8배, T-MAC 프로토콜보다는 대략 2배 가량의 우수한 성능을 나타내었다.

그림 6는 Co-MAC 구성 시 세그먼트의 수의 증가에 따른 각 센서 노드의 통신 가능한 범위 내의 인접한 노드 수의 관계를 나타낸 것이다. Co-MAC의 세그먼트 수는 duty cycle과 관계가 있다. 예를 들어, $M=5$ 인 경우 해당 센서 노드들은 20% duty cycle을 유지하면서 동작하게 된다. M 이 증가할수록 낮은 duty cycle을 유지하면서 동작하게 되고, 그림 6에서 나타난 결과에서 보여주듯이 개개의 센서 노드의 통신 범위 내의 인접 노드 수 또한 감소하게 된다. 그러므로 나뉘지는 세그먼트 수를 높게 구성할수록 더욱 효율적인 에너지 절약이 가능한 시스템을 구성할 수 있다.

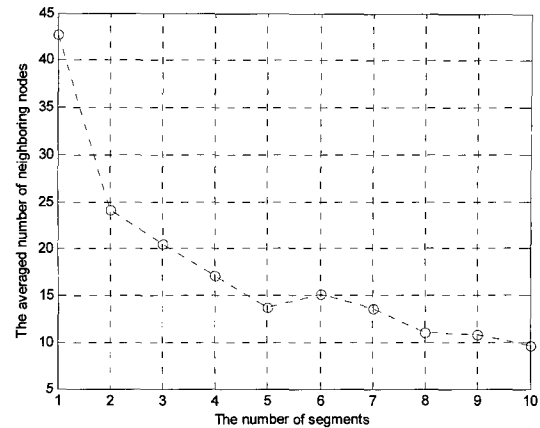


그림 6. 세그먼트 수의 증가에 따른 인접 노드 수
Fig. 6. The number of neighbor nodes according to the number of segments.

하지만 나뉘지는 세그먼트의 수가 증가하게 되면, 네트워크 운영 및 유지가 상대적으로 복잡하게 되고, 추가적으로 센서 노드들의 세그먼트 할당 시 지역적인 불균형이 초래되어 센서 노드들 간의 에너지 소모가 불균형하게 이루어지게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 대규모 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 Co-MAC 프로토콜을 제안하였다. Co-MAC 프로토콜은 임의의 지역에서 센서 노드들이 고르게 각 subnet으로 할당되도록 설계함으로써 시간 동기화되는 센서 노드들을 segment 수만큼 분산시켜 센서 노드간의 overhearding을 줄일 수 있다. 앞서 언급된 시뮬레이션 결과는 대규모 센서 네트워크를 구성할 시 기존의 프로토콜보다 의미있는 에너지 절약 결과를 나타내고 있음을 보여준다.

제안된 Co-MAC에서 네트워크를 구성하고 유지시킬 시 베이스 노드는 반드시 필요한 요소이다. 향후 연구는 베이스 노드의 의존도를 낮춤으로써 네트워크를 강인하게 구성하는 것이다. 더욱이, 센서 노드들의 스케줄에 관하여 지역적으로 불균형한 배치에 대한 해결 방안이 연구될 것이다.

참 고 문 헌

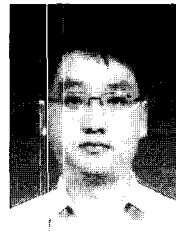
[1] Jinhun Bae, Kitae Kim, and Keonwook Kim, "Co-MAC: Energy Efficient MAC protocol for Large-Scale sensor networks", The 20th

- International Teletraffic Congress, Ottawa, Canada, 2007, Lecture Notes in Computer Science.
- [2] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive sleeping for Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Trans. on Networking, 493-506, 2004.
- [3] T. Van Dam and K. Lanendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", The ACM Sensys conf., Los Angeles, California, 2003.
- [4] Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Y.C. Tay, "Sift: A MAC protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks", EWSN. 2006. Lecture Notes in Computer Science. vol. 3868. Springer-Verlag, 260-275. 2006.
- [5] Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Y. C. Tay, "Sift: A MAC Protocol for Event-Driven Wireless sensor networks", Technical report MIT-LCS-TR-894, Massachusetts Institute of Technology. 2003.
- [6] Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Bari Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", IEEE Transaction on Wireless Communications. 660-670, 2002.
- [7] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", The ACM Sensys conf., Baltimore, Maryland, 2004.
- [8] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, Jean-Dominique Decotignie, and Vincent Peiris, "WiseNET : An ultralow-power Wireless Sensor Network solution" IEEE computer society, 2004.
- [9] Joseph Polastre, Jonathan Hui, Philip Levis, Jerry Ahao, david Culler, Scott shenker, and Ion Stoica, "A Unifying Link Abstraction for Wireless Sensor Networks", The ACM Sensys Conf., San Diego, California. 2005.
- [10] Y. C. Tay, Kyle Jamieson, and Hari Balakrishnan, "Collision-Minimizing CSMA and Its Applications to Wireless Sensor Networks", IEEE Journal on selected areas in Communications. 1048-1057. 2004.

 저 자 소 개



배진현(학생회원)
 2006년 동국대학교 전자공학과
 학사.
 2007년 동국대학교 전자공학과
 석사 과정.
 <주관심분야 : 센서 네트워크, 어
 레이 신호처리>



김건욱(정회원)-교신저자
 1995년 동국대학교 전자공학과
 학사
 1997년 University of Florida
 석사
 2001년 University of Florida
 박사

2001년~2003년 Florida State University 조교수
 2003년~현재 동국대학교 전자공학과 조교수
 <주관심분야 : 레이 신호처리, 병렬 신호처리 시
 스템 설계, 센서 네트워크 응용>