

밀집된 무선센서네트워크를 위한 클러스터 기반의 멀티티어 MAC 프로토콜

문지환*, 장태무**

Cluster Based Multi-tier MAC Protocol for Dense Wireless Sensor Network

Moon Ji Hwan*, Chang Tae Mu**

요약

본 논문에서는 밀집된 무선센서네트워크에서 노드의 밀집도를 고려하고 에너지 효율적으로 동작하는 클러스터 기반의 새로운 MAC 프로토콜을 제안한다. 제안한 프로토콜은 인접노드의 밀집도가 높으면 발생하는 에너지 낭비 요인들을 줄이기 위해 클러스터 헤더가 인접 노드의 밀집도를 고려하도록 디자인 되었다. 클러스터 헤더가 인접노드의 밀집도를 파악하고 밀집도가 높을 경우 2개 이상의 티어로 분리하여 동작하도록 ACK 메시지를 수정하였다. 그리하여 같은 티어에 있는 노드들간의 통신을 하도록 구현하여 에너지 낭비요소를 줄이고 네트워크의 수명을 연장하였다. 본 논문에서는 NS-2 네트워크 시뮬레이터를 사용하여 기존의 MAC 프로토콜인 S-MAC과 비교하였으며, 패킷전송률, 처리량, 에너지 소모 부분에서 S-MAC보다 우수함을 보였다.

▶ Keyword : 무선 센서 네트워크, 밀집된 무선 센서네트워크, 에너지 효율성, MAC

Abstract

A new MAC protocol, MT-MAC(Multi-Tier Medium Access Control) by name, is proposed for dense sensor networks. Depending on the density of nodes in a virtual cluster, the cluster header performs the splitting to several tiers in nodes of virtual cluster. MT-MAC split the tiers to use modified-SYNC message after receiving the beacon message from the cluster header. Because only the sensor nodes in the same tier communicate each other, less power is consumed and longer network life time is guaranteed. By a simulation method with NS-2, we evaluated our protocol. In dense nodes environments, MT-MAC protocol shows better results than S-MAC in terms of packet delivery rates throughput and energy consumption.

▶ Keyword : wireless sensor networks, dense wireless sensor network, energy efficiency, medium access control

• 제1저자 : 문지환

• 투고일 : 2010. 08. 07, 심사일 : 2010. 09. 29, 게재확정일 : 2010. 11. 24.

* 동국대학교 컴퓨터 공학과 졸업(석사)(Dept. of Computer Science, Dongguk University)

** 동국대학교 컴퓨터 공학과 교수(Dept. of Computer Science, Dongguk University)

※ 이 연구는 2009학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음

1. 서론

무선 센서 네트워크는 컴퓨터 분야에서 굉장히 활발한 연구가 이뤄지고 있는 분야 중 하나이다. 무선 센서 네트워크는 애드혹 네트워크의 일종으로 미리 설치된 네트워크 기반시설 없이 작은 센서들로 동작하는 네트워크이다. 무선 센서 네트워크는 크게 다수의 일반 센서 노드와 하나 혹은 여러 개의 싱크 노드라고 불리는 노드들로 구성되어 있고 이 다수의 일반 센서 노드가 관심지역의 데이터를 수집하여 싱크 노드로 전송하는 형태의 네트워크를 말한다. 현재 무선 센서 네트워크는 하드웨어 기술의 급속한 발전으로 인해 과거 보다 더 저렴해지고 크기 또한 소형사이므로 제작될 수 있게 되었다. 현재까지의 하드웨어 기술의 발전속도 추이로 미루어보아 앞으로 지금보다 더 저렴하고 작은 크기의 센서노드 생산이 가능하게 될 것으로 보이며 이로 인해 무선 센서 네트워크가 사용되는 분야가 점점 많아질 것으로 예상된다[1][2].

무선 센서 노드들은 데이터수집 및 처리, 저장, 전송으로 총 4가지 기본적인 기능을 가지고 있다. 첫째 데이터 수집기능은 관심지역의 사물이나 환경을 감지하여 그로부터 사용자가 원하는 데이터를 수집하는 기능이며, 둘째 데이터 처리기능은 수집한 데이터를 사용자 어플리케이션이 원하는 형태로 처리하는 기능이다. 셋째로 처리한 데이터를 내장된 메모리에 저장할 수 있는 저장기능과 마지막으로 이렇게 처리와 저장이 끝난 데이터를 이웃 노드에게 전송하고 최종적으로 싱크 노드로 전송하는 통신기능을 갖추고 있다. 이러한 4가지 기본 기능을 가진 센서들이 마치 작은 먼지처럼 사용자가 원하고자 하는 곳에서 동작하기 때문에 흔히 스마트 더스트(smart dust)라고 일컫는다[1][2].

무선 매체를 통해 통신하는 무선 센서 노드는 매우 작은 크기와 저렴한 비용으로 제작하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 각각의 노드에 부착된 배터리의 용량은 매우 제한적이다. 또한 이 배터리는 일반적으로 재충전하거나 교체가 불가능하기 때문에 무선 센서 네트워크를 오랫동안 유지하며 사용하기 위해서는 에너지 효율적으로 동작하도록 설계 되어야 하며, 현재까지 효율적인 배터리 사용에 관한 끊임없는 연구가 이뤄지고 있다[1][2][3].

무선 센서 노드의 한정된 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 무선 센서 네트워크에서 에너지를 소모하는 요인을 분석하였다. 그 결과 센서 노드가 데이터 전송 및 수신할 때 가장 큰 에너지를 소모한다. 이는 정상적으로 데이터를 송·수신 하는 것 이외 overhearding, idle listening, packet collision,

control packet overhead로 인한 에너지를 소모는 불필요하게 에너지를 소모하는 요인이다. 무선 센서 네트워크의 한정된 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 무선 센서노드가 데이터를 수집 및 처리, 저장하는데 소모되는 에너지양을 줄이는 것 보다 데이터를 전송할 때 에너지를 불필요하게 소모하는 요소를 줄이는 것이 보다 더 효율적이며 이는 네트워크 전체 수명을 연장시킨다[2].

무선 센서 네트워크는 다수의 노드가 하나의 매체를 공유하여 통신하는 형태의 네트워크이다. 그렇기 때문에 공유 매체에 접근과 에너지 사용을 효율적으로 할 수 있는 프로토콜이 필요하며 이를 MAC(media access control) 프로토콜이라 한다. 무선 센서네트워크에서 사용하는 MAC 프로토콜은 기존 네트워크와는 다르도록 설계되어야 한다. 왜냐하면 기존 무선 네트워크에서 사용하는 MAC프로토콜은 에너지 소모를 크게 고려하여 설계되지 않았기 때문에 자원 제약이 심한 무선 센서 네트워크에서의 사용은 적합하지 않다. 무선 센서 네트워크의 자원 제약적인 특징을 충분히 고려한 에너지 효율적인 MAC 프로토콜이 필요하며 지금까지 이를 고려한 다양한 MAC 프로토콜이 연구되어 왔다[5][6][7][8][9][10][13][14].

본 논문은 무선 센서 네트워크에서 이 기존 MAC 프로토콜이 보다 정밀한 데이터를 수집하거나 신뢰 있는 데이터를 수집하기 위해 많은 수의 노드를 관심지역에 분포한 경우에 에너지 효율적으로 동작하지 못하는 점을 문제점으로 보고 관심지역에 많은 수의 노드가 분포한 경우에도 에너지 효율적으로 동작하는 MAC 프로토콜을 제안하였다. 기존의 MAC 프로토콜들은 한 노드의 이웃노드 수가 약 5~9개 일 경우 에너지 효율적으로 동작하도록 설계되었다. 하지만 보다 정밀하고 신뢰 있는 데이터 수집을 위해 많은 수의 노드를 분포시킨 경우에 이웃노드의 수는 약 10~15개 혹은 그 이상이기 때문이다. 이 때, 지금까지 제시된 많은 MAC 프로토콜들이 에너지 효율적 못하였다[12]. 기존 이웃 노드의 수를 고려하지 않은 MAC 프로토콜을 사용했을 때 에너지 효율적으로 동작하지 못한 원인은 이웃 노드의 수가 증가함에 따라 overhearding을 하는 노드의 수가 증가하고, 노드간의 통신 간섭이 증가하여 에너지를 낭비하기 때문이다. 또 전송된 패킷간 충돌이 일어날 확률이 증가하며 이웃노드의 정보를 유지하기 위해 전송하는 메시지 크기와 빈도 또한 증가한다. 이로 인해 본래 기능을 인해 소모되는 에너지 보다 불필요하게 에너지를 소모되는 요인으로 인한 에너지 소모가 크고 응답시간이 지연되며 네트워크 전체 처리량 또한 줄어 네트워크가 제 역할을 할 수 없게 된다[2][12].

본 논문에서는 사용자가 보다 정밀하고 신뢰있는 데이터 수집을 위해 많은 수의 센서 노드를 관심지역에 분포 시킨 경우 에너지 효율적으로 동작하도록 노드의 밀집도를 고려한 새로운 MAC 프로토콜을 설계하였다. 이 프로토콜은 이웃 노드의 수가 많아 노드의 밀집도가 높을 때 하나의 노드가 통신하는 이웃 노드의 수를 줄이도록 스케줄링하여 데이터를 전송할 때 불필요하게 에너지를 소모하는 요인을 줄임으로 에너지 효율적으로 동작하도록 하였다. 이 프로토콜의 성능 검증을 위해 대표적인 네트워크 시뮬레이터인 NS-2를 사용하였으며 노드가 밀집된 상황에서 제안한 프로토콜의 네트워크 성능을 S-MAC과의 비교하였다. 그 결과 제안한 프로토콜이 노드가 밀집된 환경에서 S-MAC에 비하여 전반적으로 에너지 효율적으로 동작함을 증명하였다.

II. 관련 연구

센서 네트워크의 MAC 프로토콜은 일반적으로 공유매체를 접근하기 위한 노드들의 동작에 관하여 크게 동기화방식과 비동기화방식이 있으며, 이 두 가지 방법을 혼용한 하이브리드 방법이 있다. 이 3가지 모두 idle listening으로 인한 에너지 소모를 줄이기 위해 동작시간을 효율적으로 하면서 공유매체 접근하여 통신하기 위한 방법이다. 3가지 방식의 MAC 프로토콜 중 동기화식 MAC 프로토콜은 통신하고자 하는 노드간의 동작시간을 서로 일치시켜 같은 시간에 동작하도록 하는 통신 방법을 말한다. 동기화식 MAC 프로토콜은 TDMA(Time Division Multiple Access)방식을 기반으로 하며 시간을 슬롯으로 분할하여 각 슬롯에 노드의 상태를 활동구간(active period)과 수면구간(sleeping period)으로 나누어 동작한다[5]. 동기화식 MAC 프로토콜은 duty cycle 기법을 사용하여 에너지 소모를 줄인다. 이러한 방법을 사용하는 무선센서 네트워크 MAC 프로토콜로는 대표적으로 S-MAC(Sensor MAC)[5]이 있다. S-MAC은 단일 채널 상에서 약 10% 가량의 고정된 duty cycle을 가지고 동작하며, 가상클러스터링 기법을 사용한다. S-MAC의 고정된 duty cycle이 네트워크 트래픽 덜 함에도 불구하고 고정되어 동작하는 것이 불필요하게 에너지를 소모시키는 원인이라고 보고 트래픽 상황에 따라 duty cycle을 조절하여 에너지 소모를 줄이는 T-MAC(Timeout MAC)[6]이 있다.

하지만 이러한 동기화식 MAC 프로토콜은 인접노드의 수가 증가할수록 동기화 되는 노드의 증가로 인해 overhearing과 duty cycle으로 인한 에너지 소모가 증가하게 된다. 또한 각 노드들이 유지해야 하는 이웃 노들의 정보 역시 늘어나게

되어 노드의 메모리 공간을 많이 차지하게 된다. 노드의 메모리 공간은 노드가 데이터 수집 및 각종 데이터를 처리하기 위한 공간이므로 이 공간이 줄어들게 되면 데이터를 수집하고 보내는 기본적인 기능에 악영향을 끼치게 된다. 노드의 밀집도를 고려하지 않고 디자인된 기존의 동기화식 MAC 프로토콜들은 노드가 밀집된 상황에서 네트워크로서의 기능을 제대로 수행하기 힘들며 에너지 소모가 크기 때문에 네트워크 수명이 짧아지는 단점이 있다.

비동기식 MAC 프로토콜은 노드간의 동작시간을 일치시키지 않고 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 방식으로 노드 간에 서로 공유 매체를 경쟁을 통해 접근하는 방식이다. 이 방식은 동기식 방식에서 노드들이 동기화를 위해 주기적으로 동기화 메시지를 주고받는 것이 네트워크 성능을 감소시키는 원인이며 특히 overhearing으로 인해 에너지 소모가 크다고 본다[7][8][9]. 그리하여 비동기식 방식은 동기화 메시지를 보내는 대신 preamble sampling 방법을 사용하여 통신하고자 하는 노드들 사이의 동기화를 통해 통신하게 된다. 비동기식은 동기화 메시지 대신 전기적 신호인 preamble을 보내고 이를 통하여 통신하고자 하는 노드들 간에 동기화를 이루기 때문에 동기화 메시지를 교환에 대한 오버헤드가 적고 또한 해당 노드와만 통신을 하기 때문에 overhearing을 통한 에너지 소모도 줄어드는 장점이 있다. 게다가 노드의 유입이나 이동, 이탈을 고려하여 토폴로지가 변하더라도 서로 통신하고자 하는 노드간의 동기화에 크게 영향을 받지 않도록 하였다. 이러한 비동기화 방식을 사용하는 MAC 프로토콜에는 preamble 길이를 네트워크의 트래픽에 따라 유동적으로 변화시켜 preamble 길이의 최적화하여 에너지 소모를 줄이는 WiseMAC[7], CCA와 LPL 메커니즘을 사용하는 B-MAC[8], B-MAC에서 노드간 통신하기 위해 보내는 긴 preamble이 네트워크 성능을 감소시키는 요인이라고 보고 이를 짧은 preamble을 여러 번 보내는 것으로 개선하여 네트워크 성능을 끌어올린 X-MAC[9]이 있다.

비동기식 MAC 프로토콜은 동기화 방식에 비해 노드의 유입과 이탈, 이동 등에 대해서 더 유연하고 동기화 메시지에 대한 오버헤드를 고려하여 설계한 프로토콜이다. 하지만 공유매체를 경쟁을 통해 접근하는 방식이기 때문에 노드의 수가 많아질수록 공유매체를 접근하기 위한 경쟁 또한 비례해서 증가하게 된다. 또한 메시지를 전송하기 위해 사용하는 preamble과 네트워크 지연은 노드의 수가 증가하면서 더욱 큰 문제가 된다. 이러한 문제점으로 인해 네트워크 지연이 증가하고 네트워크 내 overhearing으로 인한 에너지 소비하는 노드들도 증가하여 결국 네트워크 성능을 저하시키고 수명을 짧게 하는 문제가

생긴다. 이는 기존의 비동기식 MAC 프로토콜이 노드의 밀집도는 고려하지 않았기 때문에 보다 정밀한 데이터를 수집하기 위해 많은 수의 노드를 분포한 경우에 적합하지 않다.

하이브리드 방식으로 Z-MAC(Zebra-MAC)[10]은 TDMA와 CSMA의 장점을 혼합한 형태의 MAC 프로토콜이다. Z-MAC은 네트워크 트래픽을 고려하여 트래픽이 없는 상황에서는 CSMA 방식을 취하고 트래픽이 과도한 상황에서는 채널 활용도를 높이기 위해 TDMA 방식을 사용하는 프로토콜이다. 하지만 노드의 밀집된 경우 트래픽 양도 비례하여 증가하게 된다. 그렇기 때문에 Z-MAC은 하이브리드 형태의 MAC 프로토콜이지만 도를 고려하지 않았기 때문에 Z-MAC의 경우 TDMA 방식으로 동작하게 된다. 이는 기존 동기화 방식의 MAC 프로토콜과 동작과 그에 따른 문제점 역시 같게 된다.

기존의 매체 접근하는 방법에 대한 연구들은 보다 정밀한 데이터를 수집하기 위해 많은 노드를 분포시켰을 경우 노드의 밀집도를 고려하지 않았기 때문에 에너지 효율적으로 동작하지 못하였다.

III. 본 론

본 논문에서는 정확한 데이터 수집을 위해 관심지역에 많은 노드를 분포시켰을 경우 에너지 효율적으로 동작하도록 하는 새로운 MAC 프로토콜은 제안한다. 이 프로토콜은 클러스터 기반으로 동작하며 기존의 동기화식 방식의 동기화 메시지 내 인접노드의 정보를 수정하여 방법으로 클러스터내 인접노드가 서로 다른 계층을 가지고 계층 간 동기화 시간이 서로 달리 동작하도록 함으로 에너지 효율적으로 동작하도록 설계되었다. 클러스터 방식을 취한 이유는 노드의 수가 많기 때문에 이를 관리할 수 있는 노드가 필요하기 때문이고 전송범위 내 인접노드의 수가 적다면 에너지 효율을 고려하였을 때 충분히 에너지 효율적으로 동작할 수 있기 때문이다. 무선 센서 네트워크의 자원제한적인 부분과 네트워크 지연을 고려하여 간단한 알고리즘을 적용하였으며 이를 통해 클러스터내 인접노드를 노드의 밀집도에 따라 여러 계층으로 분할하여 계층당 인접노드의 수가 약 5~9개로 동작하도록 설계하였다. 이 프로토콜의 이름을 여러 계층으로 나눠 동작하기 때문에 Multi-tier MAC 프로토콜이라고 이름 지었으며, 본 논문에서는 줄여서 MT-MAC으로 정의하였다.

3.1 MT-MAC 프로토콜 동작 단계

무선 센서노드들은 관심지역에 분포된 후 이웃노드를 찾고

이를 통해 토폴로지를 구성한다. 이때 각 노드들의 전송거리와 싱크 노드까지의 거리 등을 고려하여 계층구조를 이루게 된다. 일반 노드들은 클러스터방식으로 클러스터 내 노드들 간의 동기화 및 패킷을 주고받으며 이를 관리하는 클러스터 헤더가 존재한다. 클러스터 헤더는 클러스터 내 노드들의 동작시간과 휴식시간에 대한 정보를 담긴 SYNC 메시지를 주기적으로 클러스터내 노드들에게 보내게 된다. 클러스터내 노드들은 클러스터 헤더가 보낸 SYNC 메시지 안에 스케줄링 정보를 참조하여 동작하게 된다. <표 1>은 MT-MAC 프로토콜에서 클러스터 헤더와 클러스터내 일반 노드들의 동작을 단계별로 정리한 것이다.

표 1. MT-MAC의 프로토콜내 클러스터 헤더와 클러스터 내 노드들의 동작단계
Table 1. Steps of the operation of cluster header and node within the cluster in the MT-MAC protocol

단계	클러스터 헤더
1	클러스터 내 노드에게 Beacon 메시지 전송
2	지연된 ACK를 고려한 시간 동안 클러스터 내 노드들로부터 ACK 메시지를 수신
3	클러스터 내 노드들로부터 수신한 ACK순서대로 노드번호를 배열에 기록
4	알고리즘 1을 적용하여 수신한 ACK의 수를 기반으로 노드의 밀집도를 줄이기 위해 계층(Tier)수를 결정
5	알고리즘 2를 적용하여 계층 수를 고려한 새로운 스케줄링 정보를 담은 SYNC 메시지를 작성
6	SYNC 메시지를 클러스터 내 노드들에게 전송
단계	클러스터 내 노드들
1	클러스터 헤더로부터 Beacon 메시지 수신
2	전송되는 ACK간의 충돌을 피하기 위해서 랜덤 백오프 시간을 갖은 후 ACK 메시지 전송
3	클러스터 헤더로부터 SYNC 메시지 수신
4	SYNC 메시지에 자신의 계층번호와 이웃노드의 정보를 확인
5	SYNC 메시지에 따른 스케줄에 따라 동작

<그림 1>은 MT-MAC의 클러스터헤더와 클러스터내 노드 간의 동작과정을 그림으로 나타낸 것이다. 클러스터 헤더는 Beacon 메시지를 브로드캐스트 하게 되고 클러스터 내 노드들은 이를 수신 한 후 Beacon에 대한 ACK 메시지를 보내게 된다. 이때 클러스터 헤더가 많은 수의 노드들로부터 ACK를 수신하는데 있어 ACK간 충돌을 방지하기 위해 각 노드들이 Beacon을 수신 한 이후 바로 해당하는 ACK를 보내지 않고 일정한 시간 이후 보내도록 하여 ACK간의 충돌을 방지하도록 하였고 클러스터 헤더는 이를 충분히 수신할 수 있도록 ACK를 수신하는 시간을 늘리도록 하였다.

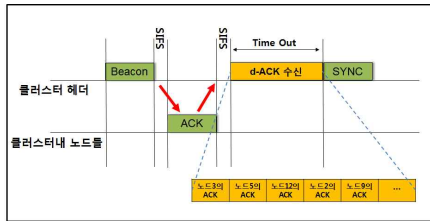


그림 1. MT-MAC 프로토콜의 기본적인 동작과정
Fig. 1. Basic operation of MT-MAC protocol.

노드의 밀집도가 높은 경우에 무선채널을 사용하는 특성상 클러스터 헤더에서 수신하는 ACK 메시지 간 충돌과 간섭이 발생할 수 있기 때문에 이를 고려한 방법이 필요하다. 만약 ACK메시지가 패킷충돌로 인해 클러스터의 수신시간 동안 수신하지 못하게 되면 해당 노드는 클러스터 헤더에 클러스터내 노드로 등록이 되지 않게 되고 이로 인해 네트워크의 노드로서 역할을 수행하기 어렵게 된다. 노드들이 등록되지 않아 제대로 역할을 수행하지 못하게 되면 정밀하게 데이터를 수집하기 위해 많은 노드를 분포시킨 의미가 없어지게 된다. 많은 수의 노드를 분포한 후 이를 충분히 이용하기 위해서 클러스터 내 노드들이 클러스터 헤더가 보내는 Beacon 메시지에 대한 ACK가 충돌 없이 전송할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 클러스터내에 있는 일반 노드가 ACK 메시지를 전송하기 전 랜덤 백오프(random backoff)를 거쳐 전송하도록 하였다. 각 노드가 Beacon 메시지를 수신한 후 랜덤 백오프를 거친 후 ACK를 전송하게 되면 ACK간의 패킷충돌을 크게 완화시킬 수 있다. 클러스터 헤더가 랜덤 백오프를 거친 ACK를 수신하기 위해서는 랜덤 백오프 시간을 고려하여 충분히 수신할 수 있는 시간 동안 기다려야 한다. 이렇게 전송되는 ACK 메시지는 즉시 전송이 되어야 하나 랜덤 백오프로 인해 시간적으로 지연되었기 때문에 d-ACK(delayed-ACK)로 정의하였다. 클러스터 내 노드가 d-ACK를 정해진 시간내에 패킷충돌과 간섭으로 인해 정확히 전송하지 못한 경우에는 다음번 동기화 때까지 sleep 모드로 동작하여 에너지 소모를 줄이도록 하였다.

3.2 MT-MAC 프로토콜의 클러스터 헤더의 동작과정

3.2절에서는 제안한 MAC 프로토콜인, MT-MAC 프로토콜의 클러스터 헤더의 동작과정에 대해 설명한다. 클러스터 방식의 MAC 프로토콜의 가장 중심이자 중요한 노드가 바로 클러스터 헤더이다. MT-MAC에서는 클러스터 헤더가 클러스터 내 노드들을 여러 개의 계층으로 분리하며 해당 노드들에게 스케줄을 할당하는 역할을 하기 때문에 동작과정은 매우 중요하다.

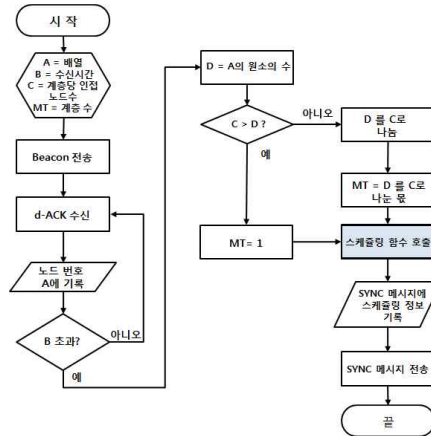


그림 2. 클러스터 헤더의 프로토콜 동작과정을 나타낸 순서도
Fig 2. Flow chart of protocol operation in cluster head.

<그림 2>는 MT-MAC 프로토콜이 클러스터 헤더에서의 동작과정을 순서도로 나타낸 것이다. 클러스터 헤더는 수신하는 d-ACK메시지의 노드번호를 저장하기 위해 배열 A를 정의하고 초기화한다. 변수 B와 C는 사용자에게 미리 정해진 값으로 설정되는 값이다. 이 값은 d-ACK를 수신하는 시간과 한 계층내 인접노드의 수를 설정하는 것으로 네트워크 성능에 많은 영향을 끼치는 값이다. 추후 4장의 실험에서는 수신시간을 2초, 인접노드의 수를 7개로 설정하였다.

d-ACK를 모두 수신한 후에 노드의 수를 미리 설정한 B값으로 나누어 계층 값 MT를 구하게 된다. 계층 값을 구한 후에는 계층별 스케줄링 정보를 설정하기 위해 함수를 호출한다.

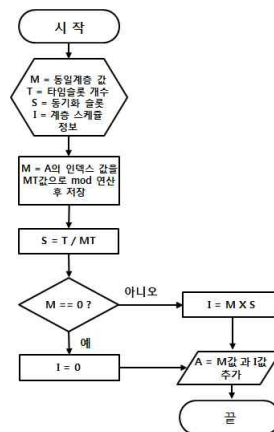


그림 3. MT-MAC프로토콜 내 스케줄링 함수의 순서도
Fig 3. Flow chart of scheduling function in the MT-MAC protocol.

<그림 3>은 스케줄링 함수의 순서도이다. 이 함수는 계층 값을 기반으로 노드의 스케줄을 해당 계층끼리 동작시키기 위한 것으로서 MT-MAC 프로토콜에서 매우 중요한 함수이다. M값은 노드의 번호가 저장된 배열의 인덱스 값을 MT로 나눈 나머지 값으로 설정하고 같은 M 값을 가진 노드들은 같은 계층으로 설정된다. 그 후 같은 계층을 가진 노드들끼리 같은 타임 슬롯을 사용하지 않고 통신하도록 하기 위해 일정한 간격을 두기 위해 전체 타임 슬롯을 계층 수로 나눈다. 이 값을 토대로 계층별 동작하는 타임 슬롯을 할당한다.

표 2. 인접노드의 수 20, 한 계층당 인접노드의 수 7, 20개의 타임 슬롯 일때, 스케줄링에 필요한 값의 예
Table 2. An Example of scheduling values when the network has a 20 neighbor nodes, 7 nodes per tier and 20 time slot.

배열 A	MT값	M값	T값	S값	I값
A[0] = 32	3	0	20	6	0
A[1] = 24		1			6
A[2] = 7		2			12
A[3] = 2		0			0
A[4] = 12		1			6
.
.

<표 2>는 계층을 나누기 전 분포된 인접노드의 수가 20이고 밀집도를 줄이기 위해 하나의 계층 당 약 7개의 인접노드를 갖도록 하고 전체 타임 슬롯이 20개일 때로 가정하고 프로토콜 및 스케줄링에 필요한 값을 구한 것이다.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
32						24						7							
2						12													
.						.						.							

그림 4. MT-MAC의 노드에 할당된 동작슬롯의 예
Fig 4. Example of assigned time slot of node in the MT-MAC

<그림 4>은 <표 2>의 노드들의 동작시간의 타임 슬롯 할당을 보여주고 있다. 네트워크가 10%의 duty cycle을 갖는다고 한다면, 20개의 타임 슬롯 중 2개만을 활동구간으로 사용할 것이다. 하지만 MT-MAC에서는 밀집도에 따라 계층별로 나누기 때문에 전체 10%의 duty cycle을 정확히 적용하기 어렵다. 그렇기 때문에 MT-MAC에서는 계층이 나뉘진 후 10%를 적용하도록 하였다. 노드 32, 2는 0번 계층으로써 동

작시간은 0번 슬롯이 된다. 노드 24와 12는 1번 계층으로 6번 타임 슬롯을 할당받아 서로 통신하게 된다. 이러한 방식으로 클러스터 내 노드들이 서로의 동작시간과 휴식시간을 달리 하도록 스케줄링함으로써 노드의 밀집도를 줄이는 효과를 기대할 수 있으며, 그로 인해 overhearing과 idle listening으로 인한 에너지 소모를 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

IV. 성능분석

무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 Network Simulator2(NS2)를 사용하여 노드가 밀집된 상황에서 제안한 프로토콜의 성능을 평가하였다. 비교는 동기화 방식의 무선 센서 MAC 프로토콜인 S-MAC과의 성능을 비교하였으며 패킷 전송률, 전송 지연, 네트워크 처리량, 노드의 에너지 잔량에 대한 시뮬레이션을 수행하고 분석하였다.

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 위해 사용된 NS2의 버전은 2.34버전으로 2009년 6월에 업데이트된 가장 최신의 버전을 사용하였다 [12]. 시뮬레이션에 사용된 시스템은 <표 3>와 같다.

표 3. 시뮬레이션에 사용된 시스템 정보
Table 3. System specification for the simulation.

중앙처리장치	Intel Xeon 3.06Ghz × 2
메인 메모리	DDR1 512MB × 4
하드디스크	160GByte × 2
운영체제	CentOS 5.4 (Kernel 2.6.18)
네트워크 시뮬레이터 버전	2.34 (Lastest Version)

시뮬레이션 환경설정 값 설정은 <표 3>에 내용을 토대로 설정하였다. 무선 센서 노드가 상당히 밀집된 환경에서 기존 MAC 프로토콜과 제안한 프로토콜과의 성능을 비교하기 위해 동일한 토폴로지 상에서 노드의 개수를 달리하여 설정하고 실험을 진행하였다. 센서 노드의 수만큼이나 노드의 밀집도에 영향을 미치는 것이 노드의 전송범위이다. 만약 일반 노드의 전송범위를 크게 설정한다면, 1홉내 인접노드의 수가 증가되고 이는 네트워크 지연 및 처리량 등 네트워크 성능에 영향을 주게 된다. 그리고 overhearing 혹은 idle listening로 인한 에너지 소모도 증가하기 때문에 시뮬레이션에 매우 중요한 설정 값이다. 시뮬레이션에서는 이 전송 범위 값을 Mica2 모트의 제한사항에 기준하여 20m로 설정하였다. 기타 설정

값으로 노드의 이동성은 없는 것으로 가정하였으며, 데이터를 수집하는 싱크 노드는 1개로 설정하였다. 라우팅 프로토콜은 NS2에서 무선센서 네트워크를 위한 표준 라우팅 프로토콜이 없으므로 AODV 방식의 라우팅 프로토콜을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

표 4. 시뮬레이션 설정 값
Table 4. Simulation parameters.

센서노드의 수	50, 75, 100, 150, 200
싱크노드의 수	1
센서모드 모델	Mica2
물리계층	802.11
라우팅 프로토콜	AODV
노드의 전송범위	20m
토폴로지 크기	100m × 100m

<표 5>는 NS2를 통한 시뮬레이션에서 사용될 센서 모드에 대한 설정 값이다. 특히 에너지 관련 설정 값이 중요한데 NS2시뮬레이터에서는 이에 대한 설정 값을 세세하게 설정할 수 있도록 되어 있다. 기본 설정 값은 시뮬레이션에서 Mica2 센서모드의 제원사항에 기준을 두고 설정하였다. 시뮬레이션 에너지 관련 설정은 일반노드는 모두 동일한 센서 노드이며, 초기에너지 값은 100J, 패킷을 송·수신할 때 소모되는 에너지양은 0.5J로 가정하고 설정하였다. 또한 idle listening로 인한 에너지 소모도 패킷을 수신하는 것과 동일한 값으로 가정하고 0.5J로 설정하였다. 그 밖에 에너지 설정 값은 Mica2 모드 기본 값으로 설정하였으며, 네트워크 처리량 및 지연에 영향을 줄 수 있는 대역폭 값과 초당 처리할 수 있는 명령어의 개수 역시 Mica2의 기본 값으로 설정하였다.

표 5. NS2의 센서모드에 관한 시뮬레이션 파라미터
Table 5. Simulation parameters about sensor mote in NS2

초기 에너지	100J
대역폭	28.8×103 bps
센싱하는데 소모되는 에너지	0.015J
처리하는데 소모되는 에너지	0.024J
전송하는데 소모되는 에너지	0.5J
수신하는데 소모되는 에너지	0.5J
대기하는데 소모되는 에너지	0.5J
수면모드일 때 소모되는 에너지	0.001J
수면모드에서 대기상태로 전환될 때 소모되는 에너지	0.2J
초당 처리할 수 있는 명령어의 개수	8,000,000

NS2를 통한 시뮬레이션에서 노드의 분포를 무작위 혹은 격자모양으로 설정이 가능하다. 하지만 실제상황에서 노드를 격자모양으로 배치하는 것은 특수한 경우를 제외하고는 없기 때문에 본 실험에서는 센서노드가 무작위로 분포하도록 설정하였다. 하지만 NS2에서는 센서 노드의 위치 값을 x,y,z 값으로 구체적인 위치를 지정하도록 되어 있기 때문에 토폴로지에 상에 센서노드를 무작위로 분포시키기 위하여 NS2 시뮬레이터에서 제공하고 있는 setdest 툴을 이용하여 센서노드의 위치와 토폴로지 형태를 설정하였다.

<표 6>은 <표 4>와 <표 5>의 설정 값을 토대로 토폴로지를 형성 값을 정리한 것이다. 모든 설정 값은 고정으로 하고 센서 노드의 개수만 다르도록 하여 5개의 토폴로지를 형성하였으며 5개의 토폴로지내의 노드의 위치 좌표 값은 모두 다르도록 설정되어 있다. 마지막으로 시뮬레이션 시간은 1000초로 설정하였다.

표 6. setdest를 통한 토폴로지 5가지 토폴로지 생성
Table 6. Generate 5 kind of topology via setdest function in the NS2

구분	토폴로지 1~5
버전	2
노드의 개수	50, 75, 100, 150, 200
노드의 속도 타입	1
최저 속도	0.0
최대 속도	0.0
시뮬레이션 시간(sec)	1000
정지 타입	1
정지 시간	2.0
토폴로지 넓이(m)	100
토폴로지 폭(m)	100

<그림 5>는 위 가정 사항 및 설정을 토대로 NS2에서 토폴로지 3의 토폴로지를 시뮬레이션 한 것이다. 노드가 모두 무작위로 분포되어 있음을 확인할 수 있으며 설정 값을 토대로 시뮬레이션이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

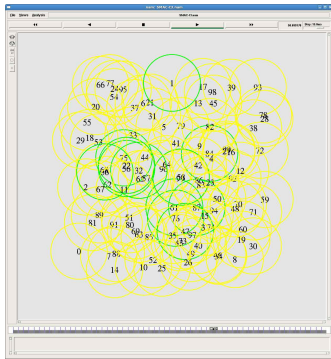


그림 5. 100m×100m에 20m의 전송범위를 갖는 100개의 노드의 무작위 분포를 갖는 토폴로지 3의 시뮬레이션 진행 화면
 Fig 5. transmission range is 20m, 100 nodes 100m×100m

4.2 실험 평가결과

시뮬레이션은 노드의 밀집도에 각기 다르도록 작성한 총 5개의 토폴로지 상에서 MT-MAC 프로토콜과 S-MAC과의 성능을 비교 분석하였다. 무선 센서 네트워크에서 에너지 대비 동작효율이 중요하다. 이는 동일한 에너지를 소비하면서 얼마나 데이터를 많이 전송하는지에 대한 것을 나타낸다. 이를 위해 패킷 전송률 및 네트워크 지연, 노드의 데이터 처리량과 에너지 잔량을 시뮬레이션 결과 값을 토대로 평가 하였다.

4.2.1 노드의 밀집도에 따른 전송률

실험은 5가지의 토폴로지 상에서 노드간 서로 패킷을 송수신이 발생하도록 하였으며 이 때 NS2에서 패킷의 송신지와 수신지, 전송결과를 trace 파일로 기록하도록 하여 분석하였다. 패킷 전송률은 한 노드가 1000초 동안 혹은 노드의 에너지가 모두 소모할 때까지 송수신된 패킷을 분석하여 전체 패킷 송수신한 것 중 성공적으로 송수신된 것을 백분율로 구한 것이다.

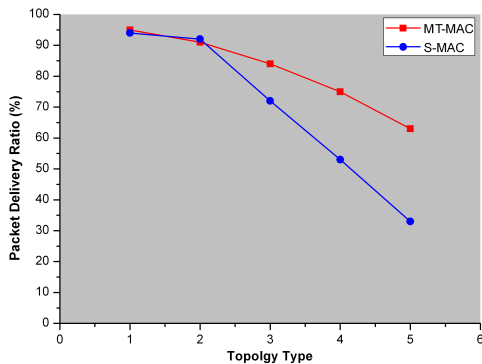


그림 6. 무작위로 선출된 5개 노드의 패킷 전송률의 평균값 비교
 Fig 6. Comparison of average packet delivery ratio randomly selected 5 node

<그림 6>은 NS2의 trace 파일에서 무작위로 선출된 5개의 노드들의 패킷 전송률의 평균치를 비교한 값이다. 산출방법은 5개의 노드의 각각의 패킷 전송률을 구하고 평균낸 후, 오차를 줄이기 위해 이를 다시 3회 반복하여 산출한 값을 다시 평균값이다. 분석 결과 두 프로토콜 모두 노드의 밀집도가 증가함에 따라 패킷 전송률이 떨어지는 결과를 나타내었다. 패킷 전송률이 높다는 것은 성공한 패킷이 폐기한 패킷보다 많다는 것을 의미하고, 이는 패킷 충돌로 인한 네트워크 성능이 뛰어난 것을 증명하는 것이다. 반대로 패킷 전송률이 낮다는 것은 패킷 충돌로 인한 폐기가 많아졌다는 것을 의미하며, 이 비율이 낮을수록 네트워크는 재역할 수행하지 못하고 있다고 할 수 있다. 토폴로지 1,2에서는 두 프로토콜 모두 산출한 값에 큰 차이가 없었으나 노드의 밀집도가 심해지는 3,4,5 토폴로지에서는 S-MAC은 MT-MAC보다 더 낮은 패킷 성공률을 나타냈으며, 노드의 밀집도가 극심한 토폴로지 5에서는 약 1.8배가량의 패킷 전송률의 차이를 보였다. 이러한 결과는 노드의 밀집도에 따른 계층분할 알고리즘이 제대로 동작함을 보이는 것으로 분석되며, 이를 통해 노드의 밀집도를 S-MAC 비해 상대적으로 줄였기 때문으로 분석된다.

4.2.2 노드의 밀집도에 네트워크 지연

네트워크의 지연은 네트워크의 성능을 평가하는 기준 중에 하나이다. 사용자 와 어플리케이션의 QoS를 만족시키기 위해서는 네트워크 지연은 낮아 빠르게 요청에 응답할수록 성능은 좋다. 이 네트워크 지연이 낮아지기 위해서는 네트워크상의 노드가 패킷을 주고받는 과정에서 수신 노드에서 패킷이 충돌 혹은 수신노드에서 병목현상 등이 발생하는 횟수가 적어야 한다. 만약 패킷충돌이 일어났다면, 수신 노드는 패킷을 폐기하게 된다. 이렇게 폐기되는 패킷이 많을수록 네트워크 성능은 떨어지게 된다. 만약 전송계층의 프로토콜에서 재전송을 요구하게 된다면 재전송으로 인한 통신 오버헤드가 발생하게 되며, 이는 추가적인 에너지 소모와 함께 네트워크 지연을 발생시킨다.

실험에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 밀집도에 따른 네트워크 지연을 분석하기 위해 하나의 패킷이 전송 시작 시간과 성공적으로 수신한 시간의 시간차를 trace 파일을 분석하여 계산하였다. 전송계층에서의 프로토콜은 TCP를 사용하여 패킷충돌이 일어날 경우 재전송을 하도록 설정하였다. <그림 7>은 각각 토폴로지 상에서 무작위로 5개의 패킷을 선출한 후의 지연 시간의 평균을 구하고 이를 다시 3회 반복한 후 평균 내어 산출한 것이다.

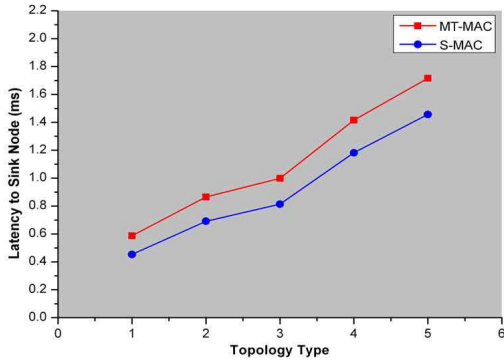


그림7. 무작위로 선출된 5개 노드의 네트워크 지연의 평균값 비교
Fig 7. Comparison of average latency randomly selected 5 node in network

분석결과 네트워크 지연이 노드의 밀집도가 높아짐에 따라 지연 시간이 늘어남을 알 수 있었다. 이는 노드의 밀집도가 높아져 하나의 패킷이 성공적으로 전송되는데 걸리는 시간이 늘어남을 의미한다. 이는 바꾸어 말해 네트워크 성능이 노드의 밀집도가 높아짐에 따라 저하되고 있음을 의미하고 S-MAC에 비해 MT-MAC이 떨어지는 결과를 보여주고 있다. 이는 계층을 분할하는 알고리즘을 적용하는 과정에서 발생하는 것으로 분석되며, 특히 Beacon 메시지에 대한 d-ACK를 수신하기 위해 설정한 긴 타임아웃 시간으로 인한 것으로 분석된다. 이는 MT-MAC 프로토콜의 단점이다.

4.2.3 노드의 밀집도에 따른 단위 시간당 처리량

네트워크 성능을 평가하는데 있어서 단위 시간당 처리량은 매우 중요한 평가요소 중 하나이다. <그림 8>은 1000초의 실험시간 중 무작위로 선출한 10개의 노드의 10초 마다 전송된 패킷의 양을 분석한 것이다. 분석은 50~150초 사이의 시간 구간에서 10초 단위로 전송된 네트워크 패킷의 양을 구하고 이의 평균치를 산출한 값이다. 시뮬레이션 시간 전체 1000초 중 50~150초 사이의 패킷 전송양만을 측정하는 이유는 2가지이다. 하나는 토폴로지에 따라 노드의 배터리가 모두 소모되는 시점이 각기 달라졌기 때문이다. 또한 전체 시뮬레이션 시간으로 계산하여 패킷의 양을 구하게 되면 토폴로지 1과 토폴로지 5의 살아 있는 노드의 수의 편차가 극심하여 정확한 분석이 어렵기 때문이다. 그리하여 특정 구간인 50~150초 사이의 데이터만 분석하였고, 초기 이웃노드 등록하는 시간을 고려하여 50초부터 150초까지 매 10초간 10개 구간의 데이터를 구하여 분석하였다.

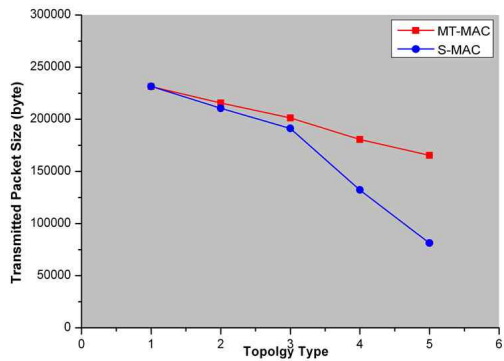


그림8. 10개의 노드의 매 10초 마다 측정된 평균 네트워크 처리량 비교 (시뮬레이션 시간 50~150초 구간)
Fig 8. Comparison of measured average network throughput of randomly selected 10 node per 10 sec. (simulation time between 50 and 150 sec)

분석결과 노드의 밀집도에 따라 두 프로토콜 모두 네트워크 처리량이 선형적으로 감소하였다. MT-MAC과 S-MAC 모두 토폴로지 1,2,3에서는 큰 차이를 나타내지 않았으나 노드의 밀집도가 점점 높아지는 토폴로지 4,5에서 결과 값에 차이를 보였으며 특히 토폴로지 5에서 S-MAC에 비해 약 2.1 배 이상의 처리량 차이를 보였다. 이는 노드가 밀집된 상황에서 MT-MAC 프로토콜이 계층 분할 알고리즘을 통해 동작한 것으로 볼 수 있다. 로그파일을 분석한 결과 토폴로지3에서 앞서 실험 결과와 달리 S-MAC과 큰 차이가 없는데, 이는 성공적으로 전송된 패킷이 S-MAC보다 많았지만 MT-MAC이 네트워크 지연으로 인해 단위 시간당 전송된 패킷이 줄었기 때문으로 분석된다.

4.2.4 노드의 밀집도에 따른 에너지 소모량

무선 센서 네트워크의 성능 평가 요인 중 가장 중요한 것은 에너지 관련 평가이다. 특히 무선 센서 네트워크는 자원 제약적인 특징 때문에 노드의 에너지소모 및 남은 잔량이 매우 중요하다. 왜냐하면 노드의 에너지가 모두 소진되면, 네트워크의 기능이 떨어지고, 대다수 노드의 에너지가 소모된다면, 더 이상 네트워크로써의 기능을 상실하기 때문이다. 네트워크로써의 기능을 상실하는 기준에 대해서는 어플리케이션의 QoS마다 다르기 때문에 본 논문의 실험에서는 특정 노드의 에너지 잔량만을 실험하고 분석하였다. 측정방법은 5개 토폴로지서 무작위로 10개의 노드를 추출하여 시뮬레이션이 시작된 후 100초 동안 소모된 에너지를 측정하여 평균을 계산하고 이를 다시 3회 반복한 평균값을 계산하여 측정하였다.

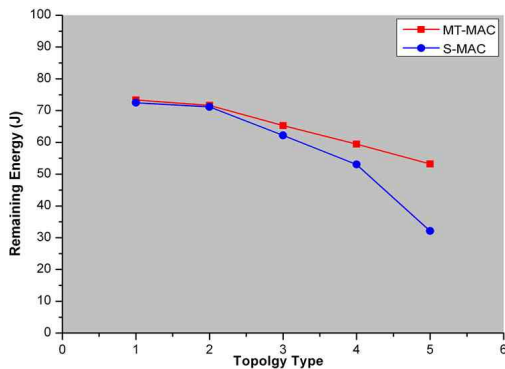


그림9. 무작위로 선출된 5개 노드의 평균 에너지 잔량 비교
 Fig 9. Comparison of average remained energy randomly selected 5 node in network

<그림 9>는 5개의 토폴로지에서 시뮬레이션 시작 후 100초가 되는 시점에서 무작위로 10개의 노드를 선택하여 남은 에너지의 잔량을 나타낸 것이다. 토폴로지 1~3까지는 3개의 프로토콜 모두 큰 차이는 없었으나 노드의 밀집도가 증가하는 토폴로지 4~5에서 결과는 차이를 보였으며 토폴로지 5에서는 남은 에너지 잔량이 약 1.7배가량 차이를 보였다. 이는 노드의 밀집도가 증가하면서 패킷충돌, 패킷충돌로 인한 재전송, duty cycle, overhearing 등으로 인해 노드의 S-MAC을 사용하는 노드의 에너지가 급격하게 떨어지는 것을 실험결과 확인할 수 있었으며, MT-MAC은 계층 분할을 통해 S-MAC에 비해 양호한 결과를 나타낸 것이라고 분석된다.

V. 결론 및 향후연구과제

본 논문은 에너지 효율적인 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜을 디자인 하였다. 지금까지 제시된 MAC 프로토콜은 자원 제약적인 특징 때문에 에너지 효율성만을 고려하여 디자인 되었다. 하지만 노드의 밀집도가 높을 경우 불필요하게 소모되는 에너지양이 많아지게 된다. 이 때문에 네트워크 성능이 저하되고 전체 수명에도 영향을 미치기 때문에 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜을 디자인할 때 이점을 고려해야 한다. 본 논문에서는 노드의 밀집도가 일정한 값 보다 높을 때, 여러 계층으로 나누는 방식으로 MAC 프로토콜 디자인을 제안하였다. 무선 센서 네트워크의 특징을 고려해 복잡한 알고리즘 대신 간단한 방법으로 짧은 시간 내에 클러스터 헤더가 클러스터 내에서 계층을 분할할 수 있도록 하였다. 실험 분석 결과 노드의 밀집도가 높을 때 S-MAC 프로토콜보다 패킷 전송률, 단위시간당 처리량과 노드의 에너지 잔량에서 성능이

더 뛰어남을 증명하였다.

향후 연구에서는 보다 더 정교한 계층 분할 알고리즘을 개발과 S-MAC뿐만 아닌 다른 MAC 프로토콜과 비교 분석할 것이다.

참고문헌

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications magazine*, vol.40, pp.102-116, Aug. 2002.
- [2] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagöz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey," *IEEE Communications Magazine*, 2006
- [3] W. Ye and J. Heidemann, *Wireless Sensor Networks*, ch "Medium Access Control in wireless sensor networks," Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [4] Wei Ye and John Heidemann, "Medium Access Control in wireless sensor networks," Kluwer Academic Publishers, 2004
- [5] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in the *Proceedings of the IEEE Infocom*, New York, NY, June 2002, IEEE, New York, 2002, pp. 1567 - 1576.
- [6] T. Dim, K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of SenSys 2003*, Los Angeles, California, 2003.
- [7] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks," in the *Proceedings of the Ninth IEEE Symposium on Computers and Communication*, ISCC'04, pages 244-251, Alexandria, Egypt, June 2004.
- [8] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," in the *Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004)*, Baltimore, MD (2004) pp. 95-107
- [9] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol

For Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," The Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2006)

- [10] I. Ree, A. Warriar, M. Ais, J. Min, "Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks," IEEE/ACM Transactions on Networking Volume 16 , Issue 3, June 2008
- [11] The network simulator:
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [12] K. Langendoen, A. Baggio, O. Visser, "Murphy loves potatoes: Experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture," Proc. of the 14th Int. Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS), Rhodes, Greece (2006)
- [13] Seong Cheol Kim, Hyung jue Kim, "A MAC Protocol Considering Traffic Loads Information For a Clustered Wireless Sensor Networks," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 14, No. 3, pp. 113-119, Mar. 2009.
- [14] Seong Cheol Kim, Dong Min Kim, "A Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks Enhancing Network Performance," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 13, No. 2, pp. 177-183, Mar. 2008.

저 자 소 개



문 지 환

2007 : 동국대학교 전산원 졸업
 2010 : 동국대학교 컴퓨터 공학과 졸업(석사)
 관심분야 : 센서 네트워크, 컴퓨터 구조
 E-mail : njhstam@nate.com



장 태 무

1997년 : 서울대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1979년 : 한국 과학기술원 전산학과 졸업 (이학 석사)
 1995년 : 서울대학교 컴퓨터 공학과 졸업(공학박사)
 1979년~1981년 :
 한국 전자 기술 연구소 연구원
 1998년 :
 University of Southeastern Louisiana 교환 교수
 1981년 ~ 현재 : 동국대학교 컴퓨터 공학과 교수
 관심분야 : 컴퓨터 구조, 센서네트워크 보안, 분산처리
 E-mail : jtm@dg.uedu

