

Tiered-MAC: 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 하이브리드 MAC 프로토콜

(Tiered-MAC: An Energy-Efficient Hybrid MAC Protocol
for Wireless Sensor Networks)

이 한 선 [†] 정 광 수 ^{**}
(Hansun Lee) (Kwangsue Chung)

요약 무선 센서 네트워크에서의 센서 노드는 일반적으로 교체 불가능한 배터리를 전원으로 사용하기 때문에 에너지 효율적인 통신 프로토콜 개발이 가장 중요한 이슈이다. 무선 센서네트워크에서 에너지 효율적인 MAC 프로토콜은 무선 매체의 공유 방식에 따라 주로 경쟁 기반 혹은 스케줄 기반으로 나눌 수 있다. 하지만 경쟁 기반 프로토콜과 스케줄 기반 프로토콜은 상반된 특징을 갖기 때문에 두 가지 프로토콜을 혼합해서 사용할 경우 보다 좋은 성능을 발휘할 수 있다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 Tiered-MAC을 제안한다. Tiered-MAC은 싱크 노드와 센서 노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크 노드의 최대 전송 영역은 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크 노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 설계하였다. NS-2 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 제안하는 기법이 에너지 효율적으로 동작하는 것을 확인하였다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 스케줄 기반, 에너지 효율성

Abstract Because sensor nodes operate with the limited power based on battery which cannot be easily replaced, energy efficiency is a fundamental issue pervading the design of communication protocols developed for wireless sensor networks. In wireless networks, energy efficient MAC protocols can usually be described as being either a contention-based protocol or a schedule-based protocol. It is suitable to use combination of both contention-based protocol and schedule-based protocol, because the strengths and weaknesses of these protocols are contrary to each other. In this paper, in order to minimize energy consumption of sensor nodes and maximize network lifetime, we propose a new MAC protocol called "Tiered-MAC". The Tiered-MAC uses a schedule-based TDMA inside maximum transmission range of sink node and a contention-based CSMA otherwise. Therefore, by efficiently managing the congested traffic area, the Tiered-MAC reduces the unnecessary energy consumption. Based on the ns-2 simulation result, we prove that the Tiered-MAC improves the energy-efficiency of sensor network nodes.

Key words : Wireless Sensor Networks, Schedule-based, Energy-Efficient

· 본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업
과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

[†] 학생회원 : 평운대학교 전자통신공학과
hslee@cclab.kw.ac.kr

^{**} 종신회원 : 평운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2007년 11월 29일

심사완료 : 2009년 10월 18일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 정보통신 제37권 제1호(2010.2)

1. 서론

최근 정보통신 기술의 비약적인 발전으로 인해 컴퓨터는 정보단말로 발전하여 우리의 생활에 밀접한 영향을 주고 있다. 정보통신 기술의 진보는 유비쿼터스 컴퓨팅 (Ubiquitous Computing)이라는 새로운 정보통신 혁명을 야기하게 되었고, 사회 발전의 흐름과 끊임없이 환경을 인간 친화적으로 바꾸고 싶어하는 인간의 욕구와 맞물려 무선 센서 네트워크의 필요성이 제기되고 있다.

무선 센서 네트워크란 센서가 달려 있어 센싱이 가능하고 센싱된 정보를 가공할 수 있는 프로세서가 달려 있으며 이를 전송할 수 있는 무선 송수신기를 갖춘 소형 장치, 즉 센서 노드로 구성된 네트워크를 의미한다. 무선 센서 네트워크는 기존의 네트워크와 같은 의사소통의 수단이 아닌 다수의 센서 노드를 이용하여 환경의 변화, 수질 오염, 지진 활동, 건물의 구조적 상태 등에 대한 정보를 수집하는 것을 목적으로 한다[1].

무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 일반적으로 교체 불가능한 배터리를 전원으로 사용하기 때문에 각 센서 노드의 에너지 소모를 최소화하는 것이 무선 센서 네트워크 구축에 있어 가장 중요한 문제이다. 대부분의 에너지 소모는 센서 노드의 무선 송수신 시에 일어나므로 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 설계가 중요하며 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다[2].

에너지 효율적으로 제안된 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜은 무선 매체의 공유 방식에 따라 크게 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. CSMA(Carrier Sense Multiple Access)와 같은 경쟁 기반 방식의 프로토콜은 데이터 송신에 앞서 채널을 검사하여 충돌을 방지한다. 경쟁 기반의 프로토콜은 단순하고 적응적이며 복잡하지 않은 장점이 있으나 트래픽이 많은 환경에서 충돌 및 간섭이 심화되므로 에너지 효율성이 떨어지고 성능이 감소한다. TDMA(Time-Division Multiple Access)와 같은 스케줄 기반 방식의 프로토콜은 각 노드들이 데이터 송신을 위하여 라운드 로빈 스케줄링을 사용한다. 각 노드는 시간을 고정된 사이즈의 슬롯으로 나누어 각 타임 슬롯에서만 송신을 하므로 충돌이 발생하지 않는다. 하지만 각 노드의 시간 동기화에 따른 오버헤드가 크고 트래픽이 적은 환경에서는 슬롯의 낭비가 발생하여 에너지 효율성이 감소할 수 있다[3].

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 경쟁 기반과 스케줄 기반의 방식을 혼합한 Tiered-MAC을 제안한다. Tiered-MAC은 싱크 노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크 노드의 최대 전송 영역에는 스케줄 기반의 TDMA

를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크 노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이고 싱크와 멀리 떨어져 있어 트래픽이 적은 환경에서는 적응적으로 동작할 수 있도록 설계되었다. 또한 스케줄 기반으로 동작할 때 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송 지연을 줄일 수 있는 슬롯할당 기법을 제안하였다.

본 논문의 2장에서는 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에 대한 관련 연구를 기술하였고, 3장에서는 새롭게 제안한 Tiered-MAC에 대해 기술하였으며, 4장에서는 시뮬레이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하고 기존 프로토콜과의 성능 비교 결과를 기술하였다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

2. 관련연구

무선 센서 네트워크의 MAC프로토콜은 무선 매체의 공유 방식에 따라 경쟁 기반의 프로토콜과 스케줄 기반의 프로토콜, 그리고 제안하는 Tiered-MAC과 같은 혼합 방식의 프로토콜로 분류할 수 있다. 경쟁 기반의 프로토콜은 시간 동기화나 글로벌한 토폴로지의 정보 없이 각 노드에서 분산적으로 동작 가능하다. 또한 네트워크의 변화에 대해 추가적인 동작 없이 적응적으로 통신이 가능하다. 하지만 충돌 및 간섭에 따른 성능 감소가 빈번하며 데이터 전송을 보장해 줄 수 없다는 단점이 있다. 대표적인 경쟁 기반의 프로토콜인 S-MAC[4]은 동기적인 듀티 사이클을 기반으로 고정된 활성 구간 내에 RTS/CTS를 사용하여 경쟁 기반으로 데이터를 송수신한다. S-MAC은 듀티 사이클을 사용함에 따라 에너지 효율적이며 은닉 터미널 문제(Hidden Terminal Problem)를 방지할 수 있고, 적응적으로 동작하지만 RTS(Request-To-Send)/CTS(Clear-To-Send) 사용에 따른 오버헤드가 크며 고정된 듀티 사이클에 따른 Sleep Latency가 발생할 수 있다.

스케줄 기반 프로토콜의 대표적인 방식인 TDMA는 각 노드들이 서로 다른 시간에 전송하도록 시간을 나누어 스케줄링을 하기 때문에 추가적인 컨트롤 패킷의 오버헤드 없이 히든 터미널 문제를 해결할 수 있고 충돌 및 간섭이 발생하지 않는다. 또한 전송 보장이 가능하고 각 노드에게 공정한 자원 할당이 가능하다. 하지만 TDMA는 대규모 환경에서의 효율적인 시간 스케줄링이 어렵고 시간 동기화에 따르는 오버헤드가 크다. 또한 빈번한 토폴로지의 변화에 대한 제어가 까다롭다. 그리고 경쟁 노드들이 많지 않은 상황에서 TDMA는 CSMA보다 아주 낮은 채널 활용도를 가지며, 슬롯 낭비 문제가 발생한다.

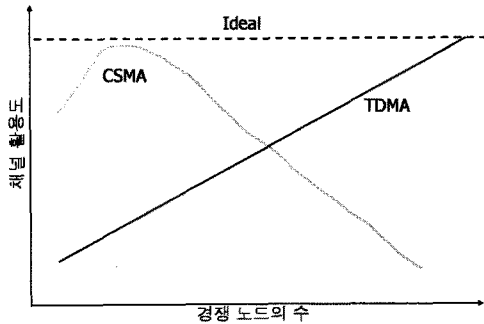


그림 1 경쟁 노드 수에 따른 CSMA와 TDMA의 채널 활용도

경쟁 기반 프로토콜과 스케줄 기반 프로토콜은 고유의 장단점을 갖기 때문에 한가지 방식을 독립적으로 사용하는 것은 실용적이지 않다. 그림 1은 경쟁 노드의 수가 증가함에 따른 CSMA와 TDMA의 채널 활용도를 나타낸 것이다. 경쟁 노드의 수가 적을 경우 CSMA는 TDMA에 비해 높은 채널 활용도를 나타내지만 경쟁 노드가 많아 짐에 따라 시간에 따라 스케줄링 되어있는 TDMA 방식이 높은 채널 활용도를 나타내게 된다. 따라서 CSMA와 TDMA와의 적절한 조화가 필요하다.

Z-MAC(Zebra-MAC)[5]은 TDMA기반으로 CSMA의 장점을 포함하는 혼합 형태의 MAC 프로토콜이다. Z-MAC은 혼잡 상황에서는 스케줄 기반의 TDMA로 동작하여 충돌을 회피하고, 혼잡하지 않을 경우에는 다른 노드가 소유한 슬롯을 사용함으로써 TDMA의 단점인 슬롯 낭비 문제를 해결하고자 하였다. Z-MAC은 새로운 슬롯 스케줄링 없이 사용되지 않는 시간을 효율적으로 사용할 수 있으나 이러한 접근 방법은 TDMA의 특징인 충돌 없는 전송을 보장해주지 못하며 또한 시간 동기화 등에 따른 오버헤드 문제는 해결할 수 없다. 본 논문에서는 슬롯 낭비 문제뿐만 아니라 TDMA 사용에 따른 오버헤드 문제를 해결하기 위하여 CSMA와 TDMA를 혼합하여 사용한다. 경쟁이 심한 싱크 노드 주변은 채널 활용도가 높은 TDMA를 사용하고 비교적 경쟁이 적은 싱크와 먼 영역의 센서 노드들은 CSMA 사용을 통해 시간 동기화에 따른 오버헤드 및 슬롯 낭비 문제를 해결한다.

3. Tiered-MAC

본 장에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 제안한 Tiered-MAC에 대해 기술한다. 제안한 Tiered-MAC은 그림 2와 같이 싱크 노드와 센서 노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크 노드

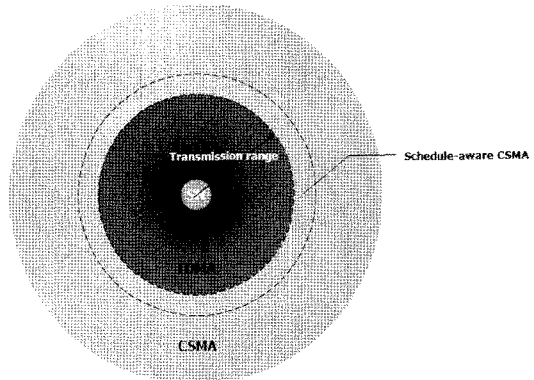


그림 2 영역에 따른 MAC 사용 구분

의 최대 전송 영역에서는 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 그 이상의 영역에서는 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크 노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 한다.

스케줄 기반의 TDMA의 경우 노드에 할당된 슬롯에서만 동작하여 유휴 청취 (Idle Listening)와 엿듣음 (Overhearing)을 줄임으로써 에너지 소비를 줄인다는 장점을 가지고 있지만, 할당된 슬롯에서만 데이터를 송수신 할 수 있기 때문에 낮은 전송률과 높은 전송 지연을 갖는다는 문제점을 가지고 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 Tiered-MAC에서는 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송 지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 제안하였다.

3.1 MAC 프레임 구조

스케줄 기반의 TDMA와 경쟁 기반의 CSMA를 계층적으로 혼합하여 사용하기에는 두 기법의 동작방식이 차이가 있기 때문에 적합한 MAC 프레임 구조가 필요하다. TDMA 스케줄링을 위한 MAC 프레임 구조는 IEEE 802.15.4[6]를 기반으로 동작하도록 하였다. IEEE 802.15.4의 슈퍼 프레임 구조는 그림 3과 같다. 슈퍼프레임(Superframe)은 비콘 구간(Beacon Period), 경쟁 구간(CAP: Contention Access Period), 비경쟁 구간(CFP: Contention Free Period)으로 나누어진다. 비콘 구간에서는 네트워크 구성에 필요한 제어정보 및 노드들로 보내는 데이터 등을 담아 전송한다. 각 노드들은 비콘을 수신함으로써 스케줄링을 위한 동기를 맞추고 스케줄에 따라 데이터를 송수신하게 된다. 경쟁 구간에서는 하나 이상의 슬롯으로 구성되고 노드들 간에 충돌 발생을 줄일 수 있도록 랜덤하게 액세스한다. 비경쟁 구간에서는 하나 이상의 보증 시간 슬롯으로 싱크 노드로부터 보증 시간 슬롯을 할당 받아 데이터 송수신에 사용한다.

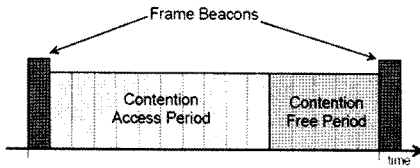


그림 3 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

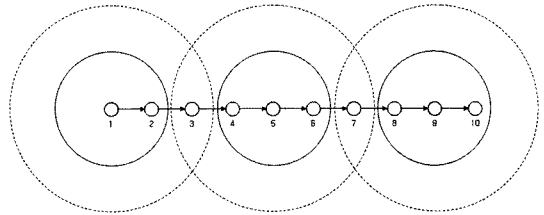


그림 4 전송 및 간섭 영역

TDMA 영역과 CSMA 영역의 동작방식이 다르기 때문에 송수신 과정에서 충돌 또는 간섭을 일으키게 된다. 따라서 스케줄 기반의 TDMA 영역과 경쟁 기반의 CSMA 영역 사이에 두 기법을 인지할 수 있는 영역이 필요로 하게 되고, 두 영역 사이에 Schedule-aware CSMA 영역을 두게 된다. TDMA 영역의 노드는 비콘을 수신하게 되면, 비콘의 스케줄 정보를 Schedule-aware CSMA 영역으로 전달하게 된다. 스케줄을 수신한 노드들은 TDMA 영역의 노드들이 언제 데이터를 송수신하는지 알 수 있기 때문에 TDMA 영역의 데이터 송수신을 방해하지 않게 된다. 또한 Schedule-aware CSMA 영역은 CSMA 영역에서 송신되는 데이터들이 언제 수신될지 알지 못하지만 동일한 CSMA 방식을 사용하기 때문에 경쟁 기반으로 데이터를 송수신 할 수 있다.

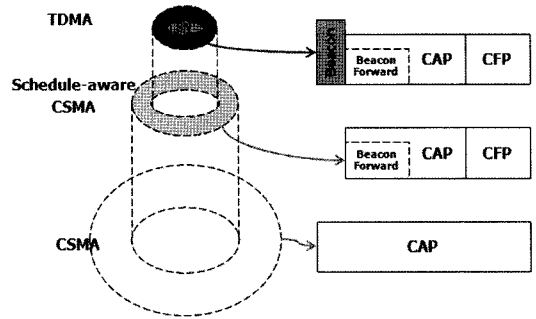


그림 5 Tiered-MAC 프레임 구조

Schedule-aware CSMA 영역을 확장하면 스케줄 전송을 위한 오버헤드가 크고, 축소하면 충돌과 간섭을 일으킬 수 있다. 충돌과 간섭을 최소로 하며 오버헤드를 줄이기 위해 무선 네트워크 환경에서 전송 및 간섭 영역을 살펴보면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 실선과 점선으로 된 원은 각각 전송 영역과 간섭 영역을 의미한다. 노드 1에서 패킷을 전송하게 되면 노드 3에 간섭을 일으켜 노드 4와의 전송을 동시에 할 수 없게 되고, 노드 4에서의 패킷 전송은 노드 2의 패킷 전송과 충돌을 일으키게 한다. 따라서 패킷 전송에 의한 충돌이나 간섭을 최소화하기 위해서는 최소 4홉 이상의 노드에서 패킷을 전송해야 하고 채널 사용률을 최대로 하기 위한 전송 홉 간격은 4홉이 된다. 이와 같은 이유로 TDMA와 CSMA 영역의 충돌 및 간섭을 제거하기 위해 Schedule-aware CSMA 영역은 세 홉 구간으로 설정한다[7-9].



그림 6 시간에 따른 MAC 프레임 변화

지금까지 기술한 TDMA, CSMA, Schedule-aware CSMA 영역에 대한 구분과 프레임 구조를 정리하면 그림 5와 같다. 모든 영역을 CSMA로 사용하게 되면 트래픽이 집중되는 싱크 노드 주변은 빠르게 에너지를 소모하게 되고, 이와 달리 모든 영역을 TDMA로 사용하게 되면 네트워크 크기가 커지고 노드의 이동이 잦게 되면 스케줄을 관리하기 힘들 뿐 아니라 많은 컨트롤 오버헤드를 가지게 된다. 따라서 스케줄 기반의 TDMA와 경쟁 기반의 CSMA를 계층에 따라 적절히 나누어

사용하는 Tiered-MAC의 구조는 단일 MAC방식의 사용에 따른 단점을 보완할 수 있고, 에너지 효율적으로 동작할 수 있다.

TDMA와 Schedule-aware CSMA 영역에 스케줄 정보를 업데이트하기 위해 싱크 노드는 주기적으로 경로 정보를 요청을 하고 수신하게 된다. 시간에 따른 Tiered-MAC의 프레임 변화를 보면 그림 6과 같다. 경로 정보를 요청하고 수신하기 위한 컨트롤 패킷은 데이터 패킷에 비해 매우 작은 크기를 가지고 있기 때문에 여러 비콘 주기마다 한번씩 데이터 구간을 일찍 마치고 라우팅 구간을 두어 전송한다. 경로 정보를 송수신 하여 스케줄을 정하는 과정은 3.2절에서 설명한다.

3.2 슬롯 할당

스케줄 기반의 TDMA는 할당된 슬롯에서만 데이터를 송수신 할 수 있기 때문에 낮은 전송률과 높은 전송 지연의 문제점을 갖는다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Tiered-MAC에서는 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송 지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 제안하였다.

슬롯을 할당하고 스케줄링을 하기 위해 싱크 노드는 최대 전송 범위로 센서 노드의 경로 정보를 요청한다. 경로 요청을 받은 센서 노드는 너비우선탍색(BFS: Breadth First Search) 기법을 통해 싱크 노드로 경로

정보를 전달하게 된다. 깊이우선탐색(DFS: Depth First Search)을 하게 되면 빠르게 경로 정보를 수신할 수 있지만 전체 네트워크를 파악하기 어렵다. 반면 너비우선탐색을 통해 싱크 노드로부터 먼 노드부터 정보를 순차적으로 받을 수 있으며, 전송을 마친 노드는 수면 상태로 에너지 소모를 줄일 수 있게 된다.

그림 7과 같이 싱크노드 SN이 경로요청 RouteReq를 전송하면 이를 받은 센서 노드들은 싱크노드로부터 먼 거리에 있는 노드부터 4A~4E, 3A~3D, 2A~2C, 1A, 1B 순으로 경로정보 RouteRep를 전송하게 된다.

싱크 노드는 수신한 경로정보를 기반으로 슬롯할당을 위한 스케줄을 정하게 된다. 전송에 의한 충돌과 간섭을 최소화하기 위해서는 4홉 이상의 구간이 요구된다. 그림 8과 같이 임의의 노드 4A의 두 홉 상위의 부모 노드 2A의 자식 노드들 중에서 자신의 부모 노드 3A의 자식 노드가 아닌 노드들 중 선택하게 된다. 선택된 노드 4C는 이와 같은 방법을 반복하여 노드들을 선택하고, 선택된 노드들은 충돌과 간섭에 자유로운 노드들로 동시에 데이터를 전송할 수 있다.

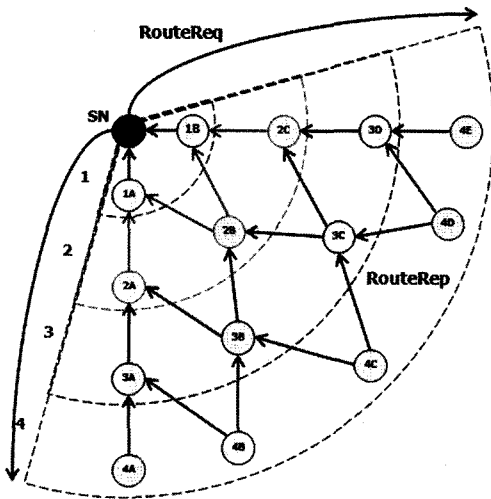


그림 7 경로 요청 및 응답

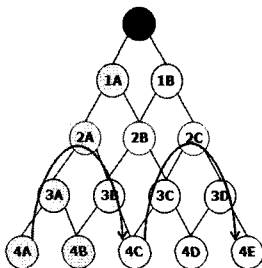


그림 8 공간제사용을 위한 스케줄링 기법

이때 같은 슬롯을 사용할 수 있는 노드의 수는 식 (1)과 같다. h는 홉 수로 2홉에서 3홉 구간에서는 최대 4개의 노드까지 한 번에 전송할 수 있으며, 4홉에서 5홉 구간에서는 최대 8개까지 전송할 수 있다.

$$\max \text{ spatial reuse value} = 2^{\lfloor \frac{h+1}{2} \rfloor}, h=2,3,4,\dots \quad (1)$$

그림 7과 같은 네트워크 토폴로지에서 공간 제사용을 위한 스케줄링 기법을 통해 만들어진 스케줄링 테이블을 보면 그림 9와 같다. 각 노드는 자신에게 할당된 슬롯에서 동작(Active) 상태로 데이터를 송수신하며, 할당되지 않은 슬롯에서는 휴면(Sleep) 상태로 에너지 소비를 줄인다.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1B		■							■	
1A	■						■			
2C				■						
2B					■					
2A						■				
3D			■							
3C				■						
3B					■					
3A						■				
4E			■							
4D				■						
4C					■					
4B			■							
4A	■									

그림 9 스케줄 테이블

TDMA 영역에서 싱크 노드로 데이터 패킷을 전송할 때 스케줄에 따라 할당 받은 슬롯에서 전송하게 되며, 싱크 노드에서 컨트롤 및 데이터 패킷을 센서노드로 전송할 때는 최대 전송 영역의 경계부분의 노드들만 패킷 전달에 관련되어 동작한다. 따라서 TDMA 영역에서 경계 이외의 노드들은 싱크 노드로 전송과정에만 관련되므로 에너지 소모를 조금 더 줄일 수 있다.

4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 제한한 Tiered-MAC의 성능 평가를 위해 LBNL(Lawrence Berkely National Laboratory)의 ns-2(Network Simulator)를 사용하여 다양한 실험을 수행하였다[10].

4.1 실험 환경

제한한 Tiered-MAC의 성능을 평가하기 위해서 그림 10과 같은 실험환경을 구성하여 성능 실험을 수행하였다. 본 실험은 100m x 100m 크기의 네트워크 구역을 가정하고, 100개의 노드를 임의로 배치하여 토폴로지를 구

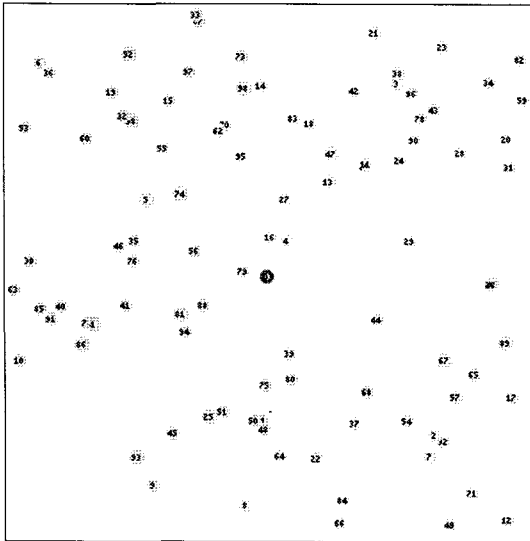


그림 10 실험 환경

성하였다. 싱크 노드의 최대 전송범위는 50m, 센서 노드의 전송범위는 20m로 하였고, 모든 노드는 128byte의 패킷을 1초마다 전송하였다. 에너지 모델로 초기 에너지는 0.1J, 송수신 회로는 50nJ/bit, 전송 측 증폭기는 100pJ/bit로 설정하였다. 제한한 Tiered-MAC와 성능을 비교하기 위한 기존 프로토콜로 S-MAC과 Z-MAC 프로토콜을 사용하였다.

4.2 성능 평가

본 논문에서 제안하는 Tiered-MAC은 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크 노드의 최대 전송 영역에서 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크 노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송 지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 제안하고 있다. 제안하는 프로토콜의 에너지 효율성을 검증하기 위해 기존 프로토콜인 S-MAC과 Z-MAC을 비교하였다.

그림 11을 보면 S-MAC의 경우 빠르게 에너지가 소모되어 생존하는 노드가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 트래픽이 집중하는 싱크노드 주변에 배치된 노드들은 잦은 충돌과 과도한 트래픽으로 인해 에너지 소모가 일어나게 된다. Z-MAC은 스케줄 기반으로 동작하여 충돌이 일어나지 않기 때문에 S-MAC 보다 더 오랜 시간 네트워크를 유지한다. 제한한 Tiered-MAC은 Z-MAC와 비슷한 결과를 보이지만 싱크와 멀리 떨어져 있는 노드에서는 CSMA를 사용하여 오버헤드가 줄기 때문에 에너지 효율성이 조금 더 증가하였음을 알 수 있다.

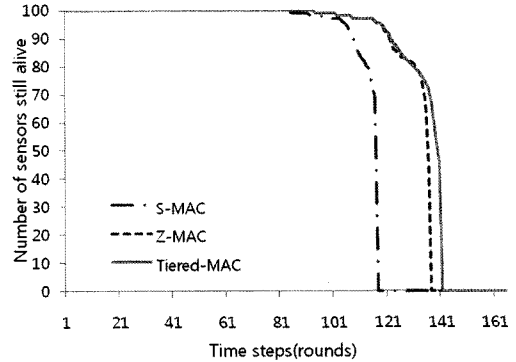


그림 11 시간에 따른 생존 노드 수

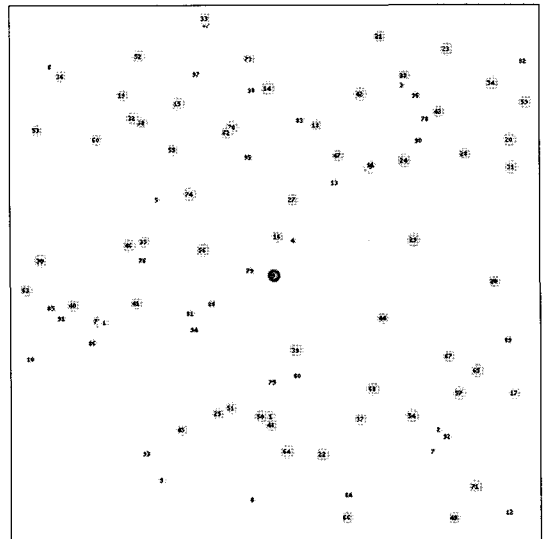


그림 12 Tiered-MAC 생존 노드(80round)

시간경과에 따른 Tiered-MAC의 생존 센서 노드의 분포는 그림 12와 같다. Tiered-MAC은 스케줄 기반으로 밀집되는 트래픽을 관리하기 때문에 고른 에너지 분포를 보인다. 센서 네트워크에서 네트워크의 수명이 가장 중요한 문제인데 그림 12를 보면 싱크 노드 주변의 노드들은 에너지가 많이 소모되었지만, 싱크 노드로부터 멀리 있는 노드들은 많은 에너지가 남아있으며 거의 소모되지 않은 노드들도 보인다.

각 프로토콜에 따른 라운드당 소요시간을 보면 그림 13과 같다. S-MAC은 듀티 사이클로 인한 Sleep Latency가 발생하여 큰 전송 지연을 보이는 반면에 Z-MAC은 할당된 슬롯에서뿐만 아니라 다른 노드의 슬롯에서도 데이터를 보낼 수 있기 때문에 낮은 전송 지연을 보인다. Tiered-MAC은 영역에 따라 TDMA와 CSMA를 사용하기 때문에 CSMA 영역에서는 빠른 전송을 보이지

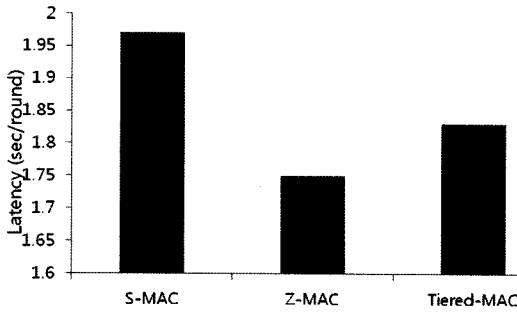


그림 13 전송 시간 비교

만 TDMA 영역에서의 전송 지연으로 인해 Z-MAC 보다 높은 전송 지연 시간을 갖게 된다.

Z-MAC과 Tiered-MAC의 성능비교를 보면 근사한 결과를 보이지만 센서 네트워크의 크기가 커짐에 따라 Z-MAC은 스케줄을 위한 컨트롤 오버헤드가 커질 뿐 아니라, 전체적인 스케줄을 관리하기 어렵게 된다. 하지만 Tiered-MAC에서는 싱크 노드의 최대 전송 범위 안에 있는 노드들만 비콘과 경로 요청에 의해 스케줄을 관리하여 동작하기 때문에 매우 적은 컨트롤 오버헤드와 단순한 스케줄링 과정을 통해 관리를 쉽게 할 수 있다.

5. 결론

무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 일반적으로 교체 불가능한 배터리를 전원으로 동작하기 때문에 에너지 소비를 줄이는 것이 매우 중요하다. 따라서 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜 연구는 에너지 소비를 최소화 하는 것에 초점을 두고 있다. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜은 무선 매체의 공유를 위해 주로 CSMA나 TDMA 기반 기법을 사용하지만 고유의 장단점을 갖기 때문에 한가지 방식을 독립적으로 사용하는 것은 실용적이지 않다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 Tiered-MAC을 제안한다. Tiered-MAC은 싱크노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크 노드의 최대 전송 영역을 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡 상황이 잦은 싱크 노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이고 싱크와 멀리 떨어져 있어 트래픽이 적은 환경에서는 적응적으로 동작할 수 있도록 설계되었다. 또한 스케줄 기반으로 동작할 때 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송 지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 제안하였다. 실험을 통해서 제안하는 Tiered-MAC이 무선 센서 네트워크 환경에서 에너지

효율적으로 동작하는 것을 확인하였다.

향후 연구 과제로 Tiered-MAC의 CSMA영역에 클러스터링 기법을 적용하여 에너지 소모를 줄일 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 제한한 Tiered-MAC을 실제 센서 네트워크에 적용하여 에너지 효율적인 센서 네트워크가 동작할 수 있는 구현 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] D. Chae, K. Han, K. Lim, S. An, "Trend and Technology of Sensor Network," *Communications of the KIISE*, vol.22, no.12, pp.5-12, Dec. 2004. (in Korean)
- [2] T. Dam, K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.171-180, Nov. 2003.
- [3] J. Degeys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: Self-Organizing Desynchronization and TDMA on Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp.11-20, April. 2007.
- [4] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 21st IEEE INFOCOM*, vol.3, pp.1567-1576, Jun. 2002.
- [5] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.90-101, Nov. 2005.
- [6] IEEE Standard 802.15.4, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)," Feb. 2003.
- [7] R. Jiang, V. Gupta, and C. Ravishankar, "Interactions Between TCP and the IEEE 802.11 MAC Protocol," *Proc. of the DARPA Information Survivability Conference and Exposition*, vol.1, pp.273-282, Apr. 2003.
- [8] IEEE Standard 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Nov. 1997.
- [9] L. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment," *Proc. of the 20th IEEE INFOCOM*, vol.3, pp.1548-1557, Jul. 2001.
- [10] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nanam/ns/>



이 한 선

2004년 광운대학교 전자물리학과 학사
2006년 광운대학교 전자통신공학과 석사
2006년~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정. 관심분야는 센서네트워크, Ad-Hoc 네트워크, 임베디드시스템



정 광 수

1981년 한양대학교 전자공학과 학사
1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 미국 University of Florida 전기공학과 박사(컴퓨터공학전공). 1983년~1993년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1991년~1992년 한국과학기술원 대우 교수. 1993년~현재 광운대학교 전자공학부 교수(정보통신 연구원). 관심분야는 인터넷 QoS, 유.무선 비디오 스트리밍, 센서네트워크