

무선센서 네트워크에서 에너지 효율적인 S-MAC 프로토콜

중신회원 윤 찬 영*

Energy efficient S-MAC Protocol in Wireless Sensor Network

Chan-Young Yun* *Lifelong Member*

요 약

제한된 자원을 사용하는 무선 센서 네트워크에서는 네트워크의 수명을 결정하는 에너지의 효율적인 사용에 관련하여 많은 연구가 진행 중이다. 본 논문은 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜을 이용하여 에너지 효율을 높이기 위해 제안한다. S-MAC(Senser Medium Access Control Protocol)은 무선 계층에서 에너지 소비가 가장 극심한 Idle Listening 문제 해결을 위해 센서 노드는 주기적으로 Sleep/Active를 사용한다. 하지만, 무선 센서 네트워크는 Active 모드에서의 데이터를 송수신하는 Radio가 on 상태로 되어있을 시 가장 많은 에너지를 사용한다. 하지만, Radio on 상태에서의 에너지 소모의 원인이 되는 통신 반경에 대해서는 고려하고 있지 않다. 또한 TinyOS에서 송신노드는 SYNC와 RTS 두 개의 제어 패킷을 사용하여 Sleep 상태의 모든 노드를 Active 상태로 변경 후 데이터를 전송한다. 하지만, 통신반경내의 다른 노드들은 불필요한 패킷의 처리로 인해 에너지 소모가 발생한다. 본 논문에서는 노드가 Active 상태일 때 이웃 노드와의 거리를 고려하여 적절한 통신 반경을 설정함으로써 에너지 효율을 향상시키고 연결 설정을 위한 제어 패킷을 재설계함으로써 불필요한 데이터에 따른 에너지 소모를 줄이는데 그 목표를 두었다.

Key Words : ZigBee, Wireless Sensor Network, S-MAC, USN, WPAN

ABSTRACT

S-MAC can solve the Idle Listening problem in wireless sensor network. The S-MAC using periodically Sleep/Active mode that doesn't consider transmission range by transmit power. The TinyOS using two command packet(SYNC, RTS) that changed active mode after sleep mode. The transmission node transmit data packet in S-MAC. But two commands packet caused energy waste that another node processing unnecessary packet. In this paper propose that considering transmission range and integrated one command packet. The proposed S-MAC technique can improve energy efficiency MAC Protocol in wireless sensor network.

I. 서 론

모바일 환경에 적합한 Embedded System의 발전과 장소와 시간에 구애받지 않고 언제 어디서나 네트워크에 접속하기를 원하는 사용자의 요구 증대로

유비쿼터스 컴퓨팅 환경이 도래했다. 이러한 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서 가장 주목받는 기술 중 하나는 무선 센서 네트워크이다. 무선 센서 네트워크의 목적은 인간의 오감을 대신하여 다양한 정보를 수집하고 사용자에게 정보를 제공하는 스마트 환경을

※ 이 연구는 2007년도 계원조형예술대학 교원특별연구비 지원에 의한 학술연구임.

* 계원조형예술대학 임베디드소프트웨어과 조교수 (cksdud@kaywon.ac.kr)

논문번호 : 07102-1204, 접수일자 : 2007년 12월 4일

제공하고 있다.

무선 센서 네트워크는 Mote라는 센서 노드를 통하여 WLAN 및 Ad-Hoc 네트워크와 유사한 구조의 네트워크 토폴로지를 구성하지만 하드웨어적 능력이 기존의 무선 네트워크 환경에 사용되는 노드와 많은 차이가 있다. 제한된 용량의 메모리, 처리능력 그리고 제한된 에너지는 센서 네트워크를 기존 네트워크처럼 구축하는데 많은 제약을 가지고 있으며 이러한 문제점 중 가장 최우선으로 고려돼야 할 영역은 센서 노드에 사용되는 배터리의 수명이다.

센서 노드가 가장 많은 에너지를 소모하는 부분은 통신에 필요한 Radio가 on 상태일 때이며, 노드의 상태를 Sleep/Active로 구분하여 통신이 필요하지 않은 상태에서는 Radio를 off하여 에너지 소모를 줄이고자 하는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜들이 제안되어 왔다.

S-MAC은 Duty Cycle을 적용하여 노드의 상태를 Sleep/Active 구간으로 나누어 에너지 소모율을 줄이는 방식이며, 대부분의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 경우 Duty Cycle의 적합성에 그 초점이 맞추어져 있다. Radio가 on 되어 있는 상태에서 에너지 소모를 일으키는 요인은 통신에 필요한 환경에 사용되는 송신 전력이다. 기존 무선 계층에서 사용되는 노드의 경우 정전압을 사용하기 때문에 이를 고려할 필요가 없으나, 센서 노드의 경우 배터리를 사용하기 때문에 이를 고려해야 더욱 에너지 효율을 높일 것이다. 그러나 S-MAC 프로토콜을 비롯한 대부분의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜은 고정된 통신반경을 사용으로 통신 환경에 소모되는 송신 전력에 대한 연구가 진행되고 있지 않다.^[14]

본 논문에서는 UC Berkeley 대학에서 개발한 TinyOS에서 사용 중인 S-MAC 프로토콜의 제어패킷인 SYNC와 RTS를 재설계하고 송신노드에서 링크 설정 시 가장 적합한 통신 반경을 구성하기 위한 송신전력 설정 부분을 추가하였다. Duty Cycle에 따른 에너지 소모율 감소와 Radio on 상태일 때의 에너지 소모 감소가 더해진다면 보다 효율적으로 센서 노드의 에너지 사용이 가능할 것으로 기대된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 관계이론으로 센서 네트워크의 바탕이 되는 ZigBee 및 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대해 소개하고, 3장에서는 제안한 MAC 프로토콜에 대하여 소개하고, 4장에서는 성능평가를 나타냈다. 마지막으로 5장에서 논문의 결론과 향후과제에 대해 논한다.

II. 관계이론

2.1 ZigBee(IEEE 802.15.4와 ZigBee Alliance)

ZigBee는 IEEE 802.15.4 표준화 작업을 기반으로 MAC과 PHY 영역을 정의하고 있으며 Network Layer 및 기타 상위 Layer를 ZigBee Alliance에서 정의하고 있다. Bluetooth와 비교할 때, ZigBee는 보다 저가이며 낮은 데이터 전송률, 그리고 이를 활용한 저전력 소모의 특징을 지니고 있으며 기존 유/무선 네트워크에서 사용하는 Star topology 및 mesh topology 등과 같은 다수의 토폴로지를 갖는 네트워크에도 적용이 가능하다. 다음 그림 1은 ZigBee 프로토콜 스택 구조를 나타내고 있다.

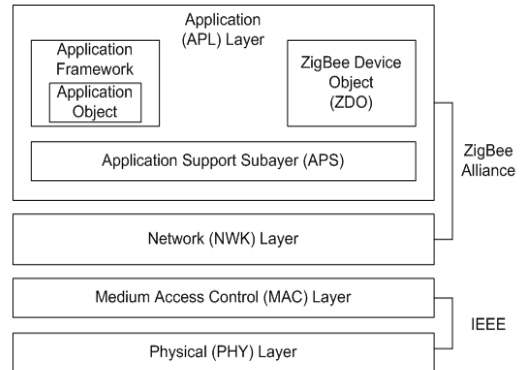


그림 1. ZigBee 프로토콜 스택 구조

IEEE 802.15.4 PHY 계층은 PHY Data service, PHY Management Service를 지원하며 868~868.6 MHz 대역에서 1개의 채널, 902~928 MHz 대역에서 10개의 채널 그리고 2.4 GHz~2.4835 GHz 대역에서 16개의 채널을 사용한다. 사용 대역에 따라 전송 속도가 다르며 2.4 GHz 대역에서는 O-QPSK 변조 방식에 의해 250 Kbps의 전송 속도를 제공한다. IEEE 802.15.4 WPAN의 PHY에서는 무선 영역의 활성화 및 비활성화 구간의 서비스와 현재 사용하는 채널에서 에너지 검출과 노드 사이의 전송 특성을 나타내기 위한 LQI(Link Quality Indication) 사용 및 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)를 사용하기 위한 CCA(Channel Clear Assessment) 지원 및 채널 주파수 선택 기능을 지원하며 데이터 송수신을 지원한다.

IEEE 802.15.4 MAC은 가입(Association) 및 탈퇴(Disassociation)를 지원하고 Ack 프레임을 사용하여 프레임 유효성 검사 및 GTS 사용을 지원하며 비컨 관리 등의 특징을 가지며 16비트 Short Address와 64비트 Extended Address를 사용한다. 다음 그림 2는 IEEE 802.15.4의 데이터 송신 및 수신 과정을 나타내고 있다.

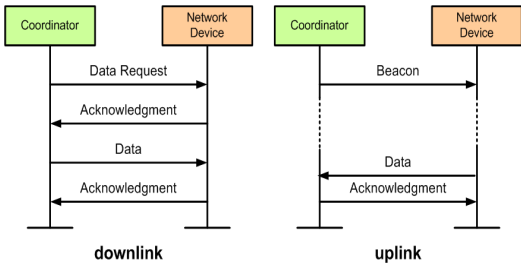


그림 2. IEEE 802.15.4의 데이터 송신 및 수신 과정

IEEE 802.15.4 표준의 MAC 프레임은 Frame Control 필드와 Sequence Number 필드, 그리고 4개의 Addressing 필드, Frame Payload 필드와 에러 검출을 위한 FCS(Frame Check Sequence) 필드로 구성되어 있다.

다음 그림 3은 IEEE 802.15.4 MAC Layer 표준이 사용하는 프레임 구조를 보여준다.^{[5][6][7]}

Octet : 2	1	0 / 2	0 / 2 / 8	0 / 2	0 / 2 / 8	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Frame Payload	FCS
Addressing Fields							
MHR						MAC Payload	MFR

그림 3. IEEE 802.15.4 MAC Layer 프레임 구조

2.2 에너지 효율적인 MAC 프로토콜

2.2.1 ZigBee 기반의 무선 센서 네트워크에서 발생하는 MAC 계층의 문제점

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 설계의 가장 큰 목적은 각 단말에서의 에너지 소모를 최소화 하면서 통신하여 전체 네트워크의 수명을 최대화 하는 것이다. 이러한 관점에서 무선 통신을 위한 MAC 프로토콜에서의 에너지 낭비 요인은 다음과 같다. 첫째, 전송된 패킷 또는 데이터가 Hidden Terminal 및 Exposed Terminal 문제로 인해 손상되어 재전송이 요구되는 collision. 둘째, 다른 노드

를 목적으로 하는 패킷을 엿듣게 되는 Overhearing. 셋째, 불필요한 제어 패킷 전송에 따른 Overhead. 마지막으로 자신은 전송할 데이터가 없음에도 불구하고 이웃 노드가 언제 데이터를 전송할지 모르기 때문에 자신의 전원을 항상 수신 모드로 유지하므로 발생하는 Idle listening이 있다. 다음 그림은 Hidden Terminal과 Exposed Terminal 문제를 보여 주고 있다.

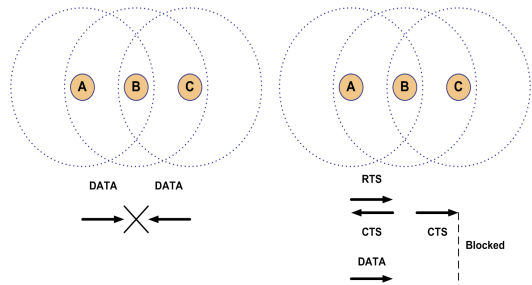


그림 4. Hidden Terminal 과 Exposed Terminal

2.2.2 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 기술 동향

무선 센서 네트워크에서 MAC 계층에서 발생하는 에너지 낭비 문제 해결을 위해 무선 센서 네트워크 환경에서 소모되는 전력을 줄이기 위한 MAC 프로토콜들은 물리 계층에서 사용되는 채널의 수, 경쟁기반 또는 비 경쟁기반(Contention based) 채널 접속 방식과 관련된 노드의 조직, 수신되는 메시지가 있을 때 이를 인지하는 방법(Notification)의 관점에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

첫 번째, 물리 계층에서 사용하는 채널수에 따른 분류의 경우, 다중 채널 시스템의 충돌이 거의 없는 환경에서는 SMACS와 PicoRadio와 같은 다중 채널을 사용하는 MAC 프로토콜들이 좋은 성능을 보여 주고 있지만 다중 채널에 의한 복잡한 무선 통신이 상당한 에너지 소모를 보여 MAC 프로토콜의 설계 시 가장 적합한 단일 채널의 물리 계층을 사용하는 경향으로 바뀌게 되었다. 두 개의 채널을 사용하는 MAC 프로토콜은 한 개의 데이터 채널과 다른 하나의 Wake-up 채널을 사용하는데, Miller와 Vaidya는 송신 노드가 Wake-up 채널을 통하여 수신 노드를 깨울 때 다른 노드들도 이 채널을 듣고 깨어나서 어떤 노드가 수신 노드인지를 알려주는 신호를 들은 후 송신 노드가 지정한 수신 노드가 아닌 노드들은 다시 저전력 소모 상태로 돌아감으로써 불필요한 전력 소모를 줄이는 방법을 제시하였다.

두 번째는, MAC 계층에서 네트워크 내 센서 노드들의 조직화 방법에 따른 분류이다. 경쟁 기반 프로토콜은 랜덤 액세스(Random Access) 방식이기 때문에 다른 노드와의 전송 충돌로 인한 에너지 소모와 매체 접근을 위한 채널 감지 CSMA/CA 프로토콜이 그 예로 이 방식은 충돌을 가능한 피하는 방식이다.

S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 특별히 고안된 방법으로 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 Active 모드와 Sleep 모드로 나눈다. 수면 구간에서는 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 에너지 소모를 거의 하지 않는 상태로 활성 구간의 Duty Cycle을 줄임으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용한다. 하지만 수율(throughput)과 지연(delay)에 대한 성능 사이에 tradeoff를 해야 하는 문제가 있다.

세 번째는 센서 노드가 메시지 송수신을 어떻게 인지하는가에 의한 분류이다. 스케줄링 기반의 프로토콜은 사전에 각 노드가 통신을 할 수 있는 시간이 정해져 있기 때문에 언제든지 채널을 감지하고 있을 필요가 없이 정해진 시간에서만 통신을 하면 되므로 에너지 소모를 줄일 수 있는데, TDMA 방식을 사용하는 프로토콜이 그 대표 예이다.

2.2.3 Sensor Medium Access Control (S-MAC)

무선 센서 네트워크에서의 데이터 발생률은 매우 낮은 경우, 노드가 항상 Listening을 유지하는 것은 Idle Listening으로 인한 에너지 낭비의 원인이 된다. 따라서 이러한 문제 해결을 위해서 S-MAC은 Duty Cycle을 도입하여 노드가 주기적으로 Sleep 모드로 들어가게 함으로써 Idle Listen 시간을 줄일 수 있다. 예를 들어 1초 동안에 노드가 0.5초는 Sleep 상태이고, 0.5초는 Listen 상태라면, Duty Cycle은 50%로 감소한다.

그림 5는 S-MAC 동작 절차를 일반적인 CSMA 기법의 802.11과 비교하여 나타내고 있다.^[8]

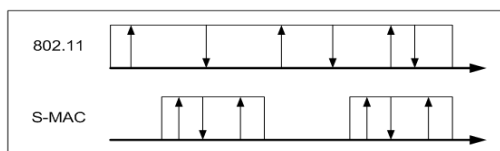


그림 5. 802.11의 CSMA와 S-MAC의 비교

S-MAC 프로토콜은 무선 통신에서 에너지 낭비 원인 가운데 하나인 Overhearing 문제를 해결하기 위해 Overhearing avoidance 기법을 적용하고 있다. 두 노드간 통신을 하기 위해 사용되는 RTS, CTS 제어 신호를 듣는 이웃 노드들은 두 노드간의 통신이 완료될 때 까지 Sleep 모드로 전환되어 Overhearing으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하게 된다.

다음 그림 6은 S-MAC 프로토콜의 동작 과정을 나타내고 있다.

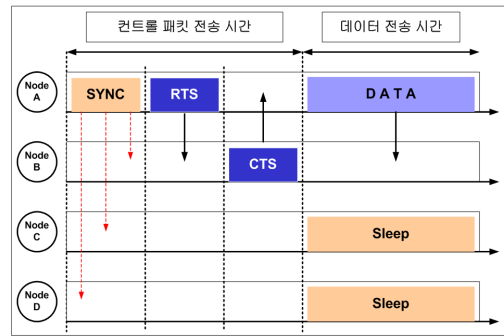


그림 6. S-MAC 프로토콜의 동작 과정

노드 A가 노드 B에게 데이터 전송을 원하는 경우 SYNC 신호를 보내어 Sleep 상태에 있던 노드를 깨운다. 이때, 노드 A의 통신 반경에 존재하는 다른 노드들도 이 신호를 수신할 수 있다. 그러나 노드 A가 보내는 RTS는 노드 B만 응답할 수 있으며 노드 B는 이에 대한 응답으로 CTS를 송신하고 두 노드 간 데이터 전송은 이루어진다. 또한, 두 노드가 데이터 전송을 하는 기간에 노드 A의 통신 반경에 존재하여 SYNC를 수신한 노드 C와 D는 Sleep 모드로 돌아가게 된다. 다음 그림7은 UC Berkeley 대학에서 개발한 TinyOS에서 사용하고 있는 S-MAC 프로토콜의 패킷 구조를 나타내고 있다. S-MAC 프로토콜은 각 10bytes의 SYNC와 RTS 패킷을 제어 패킷으로 사용함으로써 송신노드의 통신반경내의 모든 노드의 Active/Sleep 모드를 결정한다.

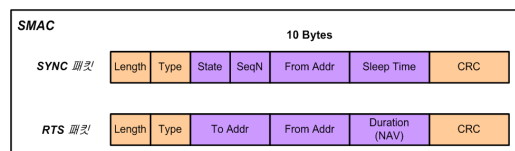


그림 7. TinyOS의 S-MAC 프로토콜의 패킷 구조

Ⅲ. 제안한 통신 반경을 고려한 S-MAC 프로토콜

S-MAC 프로토콜에서 송신노드에서 수신노드로 데이터를 전송하기 위해 통신반경내의 모든 노드를 동기화한다. 송신노드는 동기화를 위한 SYNC 패킷과 대상 노드에게 데이터 송신을 요청하는 RTS 패킷을 이용하여 데이터 전송 이전에 통신반경내의 다른 노드에게 데이터 전송을 미리 알려 다른 노드들이 Sleep 모드로 들어가게 함으로써 Overhearing을 방지한다. 하지만, SYNC와 RTS 같은 제어 패킷은 실제 데이터의 송수신을 위한 노드가 뿐 아니라 전체 네트워크의 모든 노드들이 이를 처리하는 Overhead 문제를 발생시키며 궁극적으로 네트워크의 수명을 감소 시킨다.

제안한 프로토콜은 Overhead의 문제가 되는 제어 패킷을 하나의 패킷으로 줄여서 Overhead로 인한 에너지 소모를 줄이는 방안을 제안한다. 그림 8은 제안한 프로토콜의 패킷이며, 송신노드에서 수신노드로 데이터를 전송 시 에너지 효율을 고려하기 위해서 Timer와 Tx_Power의 필드를 추가하였다.

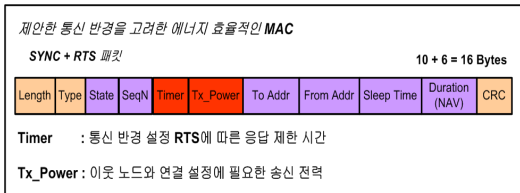


그림 8. 제안한 MAC 프로토콜의 제어 패킷 구조

그림 9는 송신노드에서 수신노드로 데이터 전송을 나타내는 MAC 프로토콜의 동작 과정을 나타낸다.

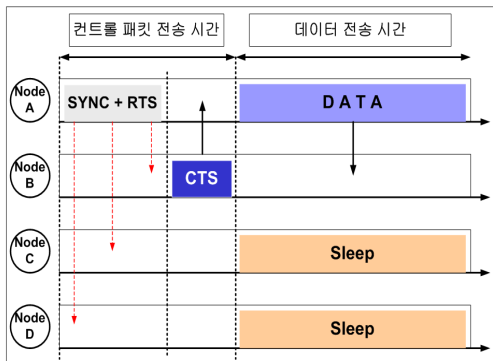
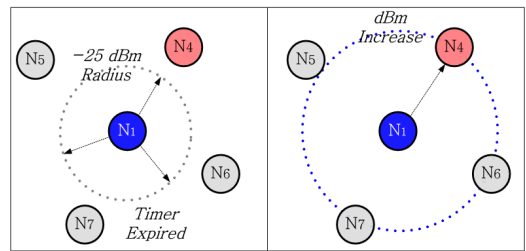


그림 9. 제안한 프로토콜의 동작 과정

S-MAC 프로토콜의 경우 통신 반경을 고려하지 않은 채 Radio의 on/off만을 고려하여 이웃 노드와의 link를 설정한다. 하지만, 제안한 MAC 프로토콜의 송신노드는 제어 패킷에 응답하는 시간을 정의한 Timer와 송신 전력의 레벨을 정의하는 Tx_Power의 필드를 사용한다. 그림 10은 송신노드에서 통신반경에 따른 이웃노드와의 링크 관계를 나타내고 있다. 즉, 그림 10 (a)와 같이 송신노드는 최소의 전력을 이용하여 자신의 현재 송신 전력에 따른 통신 반경 내에서의 노드를 찾게 되고 일정 시간 내에 응답 노드가 없을 경우 그림 10 (b)와 같이 통신 반경을 증가 시켜 센서 노드를 찾게 된다.



(a) 최소 통신 반경에서의 노드 검색 (b) 송신 전력 증가로 이웃 노드 탐색

그림 10. 통신반경에 따른 이웃노드와의 관계

그림 11은 제안한 MAC 프로토콜에서 송신노드가 Timer와 Tx_Power 필드를 사용하여 통신 반경을 결정하는 동작 과정을 나타낸다.

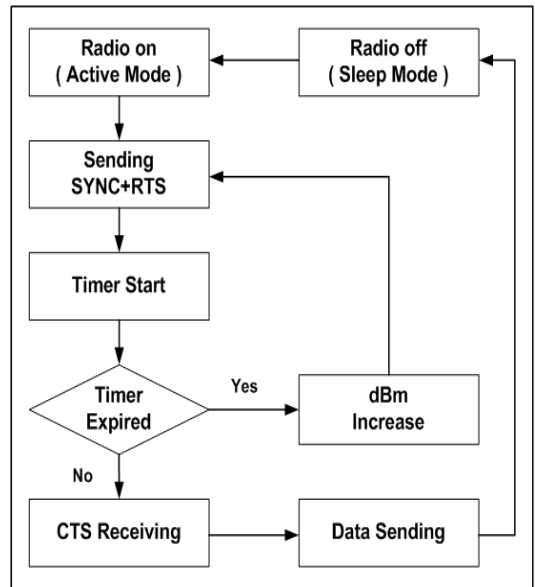


그림 11. 제안한 MAC 프로토콜의 송신전력 설정 순서도

IV. 성능 평가

본 논문에서는 데이터 패킷의 감소에 따른 에너지 효율 및 통신 반경에 따른 에너지 소모율을 측정하여 기존 S-MAC 프로토콜에 비해 어느 정도 성능 향상을 보여줄 수 있는지 NS2를 기반으로 실험하였다. 실험환경을 위한 파라미터는 다음 표1과 같다.

표 1. 성능평가를 위한 실험환경의 파라미터

구분	적용
Duty Cycle	1 ~ 99%
송신 전력 (0dBm)	17.4 mA
Packet size	36 Bytes
전원	3V
노드 수	10 ~ 100
packet 갯수	1000개
Event Time	0.5sec

또한 센서 노드에서 사용되는 통신 반경에 대한 파라미터로 센서 모트에 Radio chip으로 많이 사용되는 CC2420표준 specification을 사용하여 0 dBm 부터 -25 dBm까지 8 step으로 dBm에 따른 소모 전력을 기준으로 정했다. 각 step에 따른 소모 전력은 다음 표 2와 같다.

표 2. 8Step의 dBm에 따른 소비전력

Radio Output Power(dBm)	Current Consumption (mA)
0	17.4 mA
-1	16.5 mA
-3	15.2 mA
-5	13.9 mA
-7	12.5 mA
-10	11.2 mA
-15	9.9 mA
-25	8.5 mA

성능평가 결과 기존 S-MAC에 비하여 목적 노드까지 걸리는 전송 시간의 경우 제안한 프로토콜이 기존 S-MAC 보다 약간 지연되는 결과를 나타냈지만 에너지 소모에 있어서 훨씬 좋은 결과를 볼 수 있었다.

다음 그림 12는 노드의 수가 증가함에 따라 네트워크에 소모되는 에너지를 측정한 결과이다.

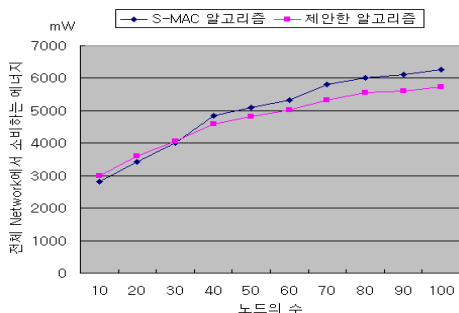


그림 12. 노드의 수의 증가에 따른 네트워크 소모 에너지 비교

다음 그림 13은 홉 수가 증가할수록 목적지까지 데이터가 전달되는 시간을 나타낸다.

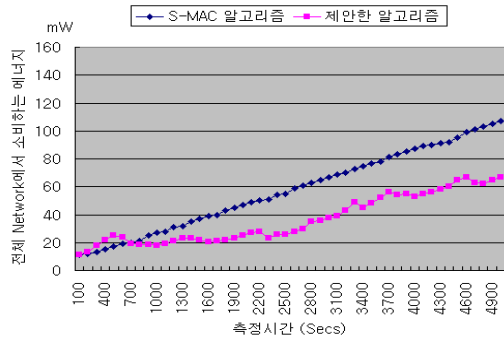


그림 13. 홉 수 증가에 따른 목적지까지의 전달 시간 비교

V. 결론

본 논문에서는 제한된 에너지를 갖는 센서 노드를 에너지 효율적인 사용을 위해 기존의 S-MAC 알고리즘에서는 고려하지 않는 송신전력에 따른 통신반경을 고려하여 에너지 효율을 개선하는 특징을 가진다. 그림 13과 같이 초기의 Link설정에 의한 에너지 소모를 제외하고 시간이 지날수록 전체 네트워크에서 소모하는 시간은 제안한 알고리즘에서 30%정도의 에너지 효율을 가짐을 볼 수 있다.

향후 제안한 알고리즘을 이용하여 센서 네트워크의 수명을 연장하여 보다 저가의 서비스를 제공하는데 유용할 것이다.

참고 문헌

- [1] 김지은, 김세한, 정운철, 김내수, “USN 센서노드 기술 동향”, 전자통신동향분석 제 22권 제 3호, 2007년 6월
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.12, Issue 3, June 2004, pp.493-506.
- [3]. Ye W, Heidemann J, Estrin D, “An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, *Proceedings of the 21st international annual joint conference of the IEEE Computer and Communications*

Societies (INFOCOM 2002), 2002.

- [4] T. van Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *The First ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, Los Angeles CA, Nov. 2003.
- [5] 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.
- [6] <http://www.zigbee.org>
- [7] (주) 한백전자 기술연구소, "Zigbex를 이용한 유비쿼터스 센서 네트워크 시스템", ITC
- [8] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification, *IEEE, New York, NY, USA, IEEE Std 802.11-1997 edition*, 1997.

윤 찬 영 (Chan-young Yun)

중신회원

한국통신학회논문지 제32권 4T호 참조