

S-MAC 프로토콜 기반의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 관한 연구

준회원 정 원 수*, 정회원 오 영 환**

A Study on Energy Efficient MAC Protocol based on S-MAC Protocol

Won-soo Jung* Associate Member, Young-hwan Oh* Regular Member

요 약

무선 센서 네트워크의 센서 노드들은 일반적으로 무선 인터페이스를 통하여 구성되고, 다중 홉을 이용하여 데이터 전송을 한다는 점에서 무선 ad hoc 네트워크와 유사하다. 그러나 각 센서 노드들은 배터리를 기반으로 동작하기 때문에 센서 노드들의 생명주기를 연장하는 것이 큰 쟁점 사항이다. 이러한 사항을 고려하기 위해 S-MAC은 에너지 효율을 극대화하기 위해 제안된 프로토콜이다. 본 논문에서는 S-MAC 프로토콜의 SYNC 메시지와 RTS/CTS 메시지를 재설계함으로써, 통신반경에 따른 송신전력제어를 할 수 있도록 제안하였다. 제안한 사항의 성능평가를 위해 기본적인 S-MAC 프로토콜과 제안하는 에너지 효율을 위해 송신 전력을 고려한 S-MAC 프로토콜의 성능을 비교하였다. 송신 노드에서 데이터를 전송할 때 변경된 통신 반경 내에 있는 노드들에게만 데이터를 전송하기 때문에 불필요한 에너지 소모를 줄일 수 있었다.

Key Words : S-MAC; MAC; Ubiquitous Sensor Network; Wireless Sensor Network; TinyOS

ABSTRACT

Sensor nodes are connected with other nodes in air interface and using multi-hop data transmission in that is similar to the wireless ad hoc networks. However, sensor nodes operate consuming limited battery so to extend the life cycle of the sensor nodes is biggest issue. S-MAC protocol is proposed for solving energy efficiency problems. In this paper, we proposed energy efficiency protocol by redesign sync message and RTS/CTS message of S-MAC to allow the transmit power control. We compared performance evaluation of proposed protocol based on S-MAC protocol and performance S-MAC protocol. The proposed protocol could reduce unnecessary energy consumption, because when transmitting node send data packet only within switched radius nodes.

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 초소형 센서들로 구성된 적용형 망으로 물류, 국방, 교통, 의료, 환경등과 같은 전문적이고 다양한 분야 뿐만 아니라 미래의 유비쿼터

스 컴퓨팅, 차세대 이동통신, 지능형 교통 시스템 및 홈 네트워크 등의 구축에 필수적인 기반 기술이다¹⁻³⁾.

무선 센서 네트워크의 센서 노드들은 일반적으로 무선 인터페이스를 통하여 구성되고, 다중 홉을 이용하여 데이터 전송을 한다는 점에서 무선 ad hoc 네트

* 광운대학교 전자통신공학과 통신망연구실(sootan77@dreamwiz.com),

** 광운대학교 전자통신공학과 통신망연구실(11980002@kw.ac.kr)

논문번호 : 10008-0129, 접수일자 : 2010년 1월 29일

워크와 유사하다. 그러나 일반 무선 네트워크와는 달리 많은 수의 센서 노드들로 구성된 센서 네트워크에서 각 센서 노드들은 배터리를 기반으로 동작하기 때문에 센서 노드들의 생명 주기(lifetime)를 연장하는 것이 가장 큰 쟁점 사항이다. 따라서 무선 센서 네트워크에서는 일반 무선 네트워크의 MAC(Medium Access Control) 프로토콜과 다른 특성을 고려한 MAC 프로토콜을 적용하고 있다^{4,5)}.

센서 네트워크의 대표적인 MAC 프로토콜인 S-MAC(Sensor Medium Access Control)은 채널 접근의 공정성, 충돌 문제 및 전송 지연 문제보다도 에너지 효율성을 극대화하기 위해 제안된 프로토콜이다. S-MAC은 센서 노드들이 주기적으로 Listen과 Sleep을 반복하고, Sleep 모드 동안 센싱에 관련된 전원을 차단함으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용한다. 이 때, 센싱 데이터가 발생하여 수신 노드까지 데이터를 전송해야 하는 경우, 송신 노드는 수신 노드까지 데이터를 전송하기 위하여 통신반경 내에 있는 모든 노드에게 SYNC 메시지와 RTS(Request To Send) 메시지를 전송한다. 실제 데이터 전송에 관여하는 노드는 CTS(Clear To Send)메시지를 송신 노드에게 보내게 되고 그 밖에 데이터 전송에 관여하지 않는 노드들은 sleep 상태로 들어가게 함으로써 전력 소모를 최소화한다. 데이터를 전송하기 위해서 사용되는 에너지는 데이터를 전달하기 위한 통신반경에 비례하기 한다. S-MAC 프로토콜의 경우 고정된 통신반경을 사용하기 때문에 통신반경 변화에 따른 송신 전력 제어에 관한 사항이 고려되고 있지 않아서 불필요한 에너지가 소모 된다⁶⁻⁹⁾.

본 논문에서는 UC Berkeley 대학에서 개발한 TinyOS에서 사용중인 S-MAC 프로토콜의 SYNC 메시지와 RTS /CTS 메시지를 재설계함으로써, 송신 노드에서 링크 설정 시 통신반경에 따른 송신 전력 제어를 할 수 있도록 하였다¹⁰⁾.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관계이론으로 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 관한 기술에 관하여 알아보고, 3장에서는 제안한 MAC 프로토콜에 관하여 알아본다. 4장에서는 시뮬레이션 및 성능 측정을 알아보고, 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향으로 끝을 맺고자한다.

II. 관계 이론

2.1 무선 센서 네트워크 에너지 관리 동향

무선 센서 네트워크는 주변 현상이나 이벤트

(Event)를 발견하는 동시에 정보의 수집 및 이벤트의 처리 그리고 정보를 원하는 사용자에게 센싱(Sensing)된 정보의 전달을 목적으로 하는 네트워크로 정의되어 있다. 센서 네트워크는 적은 크기의 메모리(Memory)와 낮은 능력의 프로세스(Process), 그리고 제한된 에너지로 무선 채널을 통한 통신 기능을 가진 센서 노드로 이루어져 있다. 그림 1은 센서 네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위한 기술 개발 동향을 나타내고 있다.

센서 네트워크는 기존 무선 네트워크의 트래픽(Traffic), 최단경로, 지연 등의 문제와는 달리 에너지 소모 문제가 가장 큰 이슈(issue)이다. 배터리 소모를 다한 노드로 인하여 토폴로지(Topology)가 바뀌게 되면 토폴로지 변화로 인한 전체 네트워크의 에너지 소모와 기능 마비 문제를 일으킬 수 있기 때문이다.

이중 가장 이슈화 되는 것은 센서 노드 간 통신에 불필요한 에너지를 방지하는 것과 통신에 필요한 에너지를 최소화 하는 것으로써 전체 네트워크의 효율적인 멀티 홉 통신에 대한 연구가 진행 중에 있다.

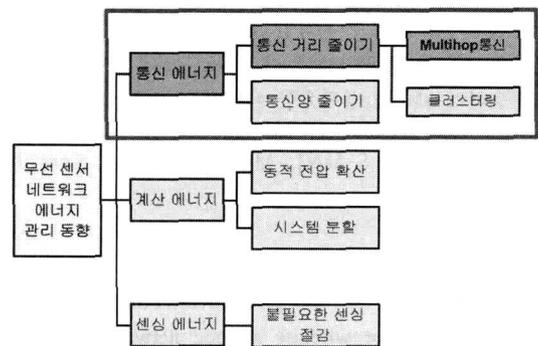


그림 1. 센서 네트워크 에너지 관리 동향

2.2 S-MAC 프로토콜

무선 센서 네트워크에서 데이터 송수신의 발생률이 낮은 경우 노드가 항상 라디오를 켜 상태로 대기하는 것은 Idle Listening에 따른 에너지 소모 문제를 일으킨다. S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크의 Idle listening 문제를 해결하기 위해 제안된 방법으로 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간(active part)와 수면 구간(sleep part)로 구분한다. 수면 구간에서는 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 에너지 소모를 거의 하지 않는 상태로 활성 구간의 Duty Cycle을 줄임으로써 전력 소

모를 줄이는 방법을 사용한다. 그림 2는 IEEE 802.11에서 사용하는 CSMA/CA와 S-MAC의 동작을 비교한 것이다.

무선 통신에서 에너지 낭비 원인 중 하나인 Overhearing 문제를 해결하기 위해 S-MAC은 Overhearing avoidance 기법을 적용한다. S-MAC은 두 노드간의 통신을 사용하기 위해 사용되는 RTS, CTS 메시지를 듣는 이웃 노드들은 두 노드간의 통신이 완료될 때까지 Sleep 모드로 전환되어 Overhearing 문제를 해결하게 된다. 또한 불필요한 제어 메시지의 과부하(Control Packet Overhead)로 인한 에너지 소모를 방지하기 위해 긴 메시지를 작은 단위로 분할하여 한번에 전송하는 기법을 사용한다. 그림 3은 IEEE 802.11과 S-MAC의 데이터 전송 비교를 나타낸다.

분할된 모든 데이터 전송에 대해서 전송 매체를 예약하여 사용하므로, S-MAC에서는 제어 신호는 통신을 시작하는 초기에만 사용하게 되어 제어 신호 과부하로 인한 에너지 문제를 해결할 수 있다.

다음 그림 4는 UC Berkeley 대학에서 개발한 TinyOS에서 사용하고 있는 S-MAC 프로토콜의 패킷 구조를 나타내고 있다. S-MAC 프로토콜은 각각 10bytes의 SYNC와 RTS/CTS 패킷을 제어 메시지로 사용함으로써 송신노드의 통신반경내의 모든 노드의 Active/Sleep 모드를 결정한다.

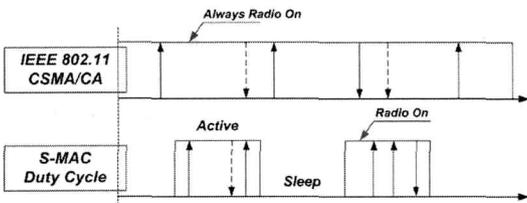


그림 2. S-MAC과 IEEE 802.11의 동작상태

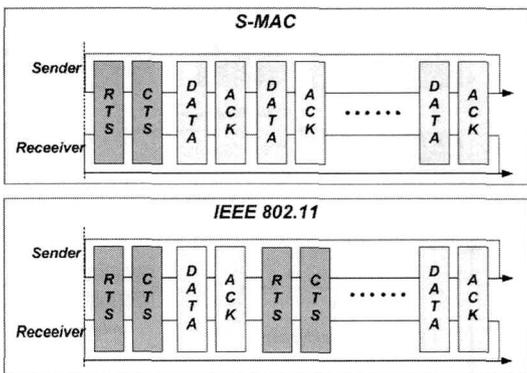


그림 3. S-MAC과 IEEE 802.11 제어 패킷

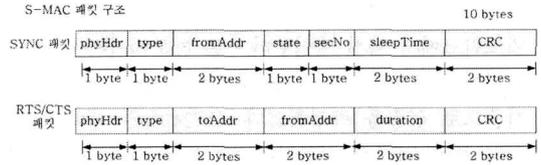


그림 4. TinyOS의 S-MAC 프로토콜의 패킷 구조

2.3 송신 전력에 따른 통신 반경

자유 공간에서 경로 손실(path loss)은 전적으로 송신기와 수신기간의 거리에 달려 있고 사용 주파수와는 무관하다. 그러므로 IEEE 802.15.4 표준 주파수 대역간에는 본질적으로 통신 거리의 차이는 없다. 이 경우 자유 공간을 가정하면 수신 안테나와 송신 안테나의 출력 비는 Friis 전송 모델에 의해 결정 된다.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (1)$$

여기에서 P_R 와 P_T 는 각각 수신 안테나와 송신 안테나에서의 와트 출력 값이다. G_R 와 G_T 는 각각 수신 안테나와 송신 안테나에서의 출력 이득이다.

λ 는 미터 단위의 파장이고 f 는 헤르쯔 단위의 주파수이고, 그리고 c 는 초당 미터 단위로의 광속이다.

상수를 적절히 치환하면 위 수식은 데시벨 형태의 기복 경로 손실 L_B 로 표현될 수 있다.

$$L_B = 32.44 + 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km} \quad (2)$$

식 2는 전파 손실에 L_B 를 dB 단위로 나타내고, 등방성 안테나의 사용을 가정으로 주파수의 단위를 MHz, 거리의 단위를 Km로 나타낸다. 무선 계층에서 송신 전력은 자유 공간에서 거리에 제곱에 비례하여 손실되기 때문에 통신 거리의 증가에 따른 전송 에너

표 1. CC2420의 통신 반경에 따른 전류 소비

Radio Output Power(dBm)	최대 통신 거리(m)	전류 소비(mA)
0	177	17.4
-1	158	16.5
-3	126	15.2
-5	100	13.9
-7	79	12.5
-10	56	11.2
-15	32	9.9
-25	10	8.5

지 소모는 지수적으로 증가 하며 이는 실제 무선 센서 네트워크에서 역시 성립한다. 본 논문에서는 실제 제작되어 사용되고 있는 Chipcon 사의 CC2420 칩셋을 기준으로 성능을 측정하였다. CC2420은 최대 177m 까지 통신 거리를 지원한다. CC2430의 수신 감도에 따른 최대 통신 거리 및 소비 전류는 표 1과 같다.

III. 제안한 MAC 프로토콜

S-MAC 프로토콜에서 송신 노드는 수신 노드까지 데이터를 전송하기 위하여 통신반경 내에 있는 모든 노드들을 동기화 한다. 송신 노드는 동기화를 위한 SYNC 패킷과 대상 노드에게 데이터 송신을 요청하는 RTS 패킷을 이용하여 데이터 전송 이전에 통신 반경에 있는 다른 노드에게 데이터 전송을 미리 알려 다른 노드들이 Sleep 상태로 들어가게 함으로써 Overhearing을 방지한다. 하지만, 고정된 통신 반경을 사용하는 S-MAC 프로토콜의 경우 SYNC 패킷을 사용하여 통신 반경내에 있는 모든 노드를 Listen 상태로 들어가게 하기 때문에 네트워크의 수명을 감소시킨다.

제안한 프로토콜은 에너지 소모를 효율적으로 관리하기 위하여 통신 반경을 고려하여 에너지 소모를 줄이는 방안을 제안한다. 그림 5는 제안한 제어 메시지의 패킷 구조이며, 송신 노드에서 수신 노드로 데이터를 전송 시 에너지 소모를 효율적으로 관리하기 위하여 SYNC 패킷에 txPower 필드를 RTS/CTS 패킷에 txPower와 timer 필드를 추가하였다.

txPower 필드는 송신 전력을 조절하기 위하여 Chipcon사의 CC2420칩의 내부 레지스터인 PA_LEVEL과 TXCTRL 레지스터를 사용한다. CC2420의 경우 총 8단계의 송신전력이 가능하다. 표 2는 txPower 필드 설정에 따른 PA_LEVEL과 TXCTRL 레지스터 설정 값을 나타낸다.

S-MAC에서는 송신 전력을 고정값을 사용하지만 실제 임의로 배치된 노드들 사이의 거리는 고정되어 있지 않기 때문에 노드와의 거리를 기준으로 8단계의 송신 전력을 노드간의 거리에 따라 조절하여 RTS 패

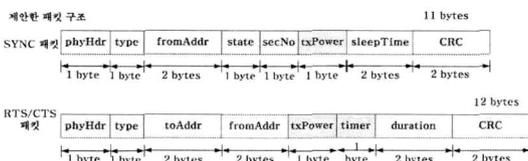


그림 5. 제안한 제어 메시지 구조

표 2. 제안한 txPower 필드 값 설정

Radio Output Power(dBm)	전류 소비 (mA)	txPower	PA_LEVEL	TXCTRL 레지스터
0	17.4	0x1F	31	0xA0FF
-1	16.5	0x1B	27	0xA0FB
-3	15.2	0x17	23	0xA0F7
-5	13.9	0x13	19	0xA0F3
-7	12.5	0x0F	15	0xA0EF
-10	11.2	0x0B	11	0xA0EB
-15	9.9	0x07	7	0xA0E7
-25	8.5	0x03	3	0xA0E3

킷을 전송할 경우 불필요한 오버헤드 메시지를 감소 시키며 데이터 전송에 사용되는 에너지 소모량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 송신 노드에서 수신노드로 데이터 전송을 나타내는 MAC 프로토콜의 동작 과정을 나타낸다.

S-MAC 프로토콜의 경우 통신 반경을 고려하지 않고 Radio의 on/off만을 고려하여 이웃 노드와 링크를 설정한다. 하지만, 제안한 MAC 프로토콜의 송신 노드는 제어 메시지에 응답 시간을 정의한 timer 와 송신 전력의 레벨을 정의하는 txPower 필드를 사용한다. 그림 7은 송신 노드에서 통신 반경을 고려한 링크 구성 과정을 나타내고 있다.

그림 7 (a)와 같이 송신 노드는 최소의 전력을 이용하여 현재 자신의 송신 전력에 따른 통신 반경 내에서 노드를 찾게 되고 일정 시간 내에 응답노드가 없는 경우 통신 반경을 증가 시켜 센서 노드를 찾게 된다. 이 경우 SYNC 패킷을 받은 노드만 라디오를 on 상태로 전환 한다. 그림 7 (b)는 송신 노드가 이웃 노드로부터 CTS 패킷을 전송 받으면 자신의 이웃 노드로 선정 하고 적합한 송신 전력으로 링크를 구성한다. 그림 7

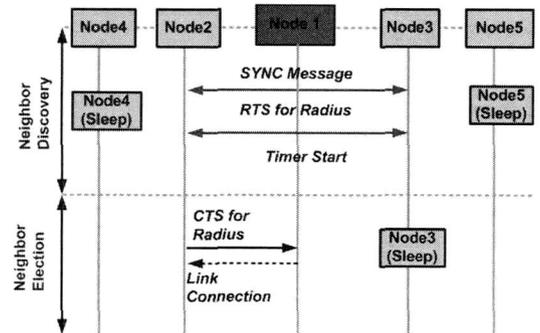


그림 6. 제안한 MAC 프로토콜의 동작 과정

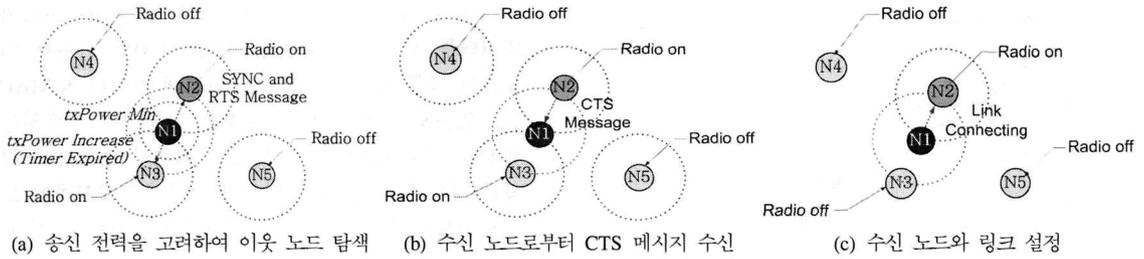


그림 7. 통신 환경을 고려한 링크 구성 과정

(c)에서 이웃 노드로 선정되지 못한 노드는 Sleep 상태로 돌아가 통신에 필요한 라디오를 off 시킨다.

그림 8은 제안한 MAC 프로토콜에서 송신 노드가 txPower와 timer 필드를 사용하여 통신 환경을 결정하는 동작을 나타낸다.

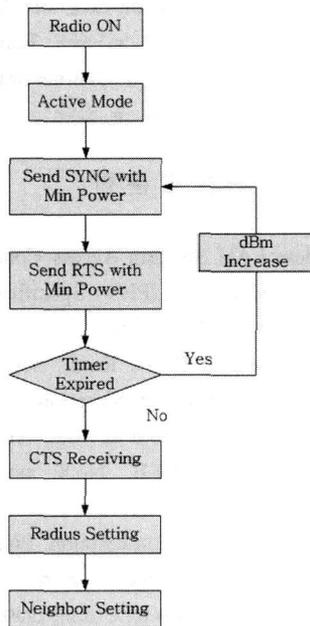


그림 8 제안한 MAC 프로토콜의 송신 전력 설정 순서도

IV. 시뮬레이션 및 성능 측정

제안하는 MAC 프로토콜에 대한 성능을 측정하기 위해서 NS-2 시뮬레이터를 사용하였다. NS-2 시뮬레이터는 큐잉(queuing) 알고리즘, 라우팅 프로토콜, 우선 및 무선에서의 IP 프로토콜과 같은 다양한 환경에서 시뮬레이션이 가능하다. 본 논문에서는 기본적인 S-MAC 프로토콜과 제안하는 에너지 효율을 위해 송신 전력을 고려한 S-MAC 프로토콜의 성능을 비교하

였다. 성능 측정을 위해서 사용된 파라미터는 표 3과 같다.

성능 측정을 위해서 임의로 배치된 노드로부터 싱크까지의 링크를 구성하고 모든 노드로부터 싱크로 총 100번의 데이터 전송을 하도록 시나리오를 구성하였다. 전송을 위해 사용된 데이터 크기는 32 bytes 와 100 bytes 로 분류하여 데이터를 전송하였다.

그림 9와 그림 10은 32 bytes와 100 bytes 크기의 데이터를 모든 노드로부터 싱크로 100번 전송할 때 노드의 평균 잔여 에너지량을 나타낸 것이다. S-MAC

표 3. 성능 측정 파라미터

파라미터	값
Initial Energy	1000 J
Slot Duration	1 milisec
Frame Duration	100 milisec
Data Packet Size	36 bytes
	100 bytes
Control Packet(Ack/Beacon) Size	10 byte
Bitrate	250kbps
Duty Cycle	50%

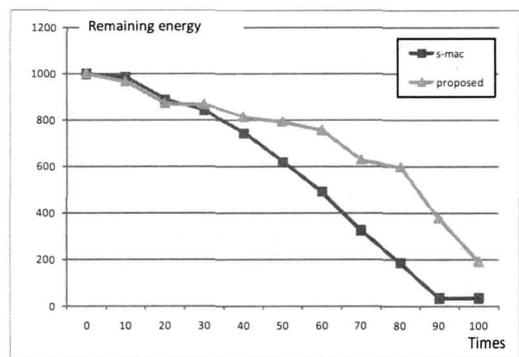


그림 9. 32byte 데이터를 전송할 때 전체 노드의 잔여 에너지량

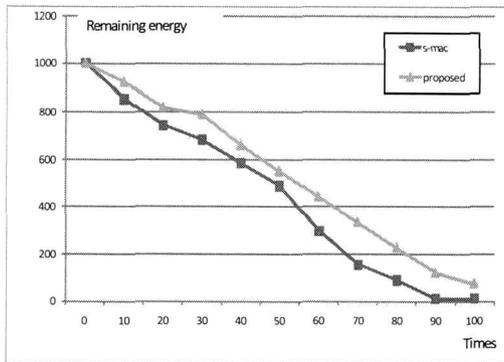


그림 10. 100byte 데이터를 전송할 때 전체 노드의 잔여 에너지량 비교

프로토콜에 비해서 통신 반경을 나누어서 전송하는 제안한 프로토콜의 노드의 평균 잔여 에너지량이 더 높은 것을 알 수 있다. 이를 통해서 전체 네트워크의 생존률을 높일 수 있으며 에너지 소모량 역시 줄일 수 있다는 것을 확인 할 수 있다.

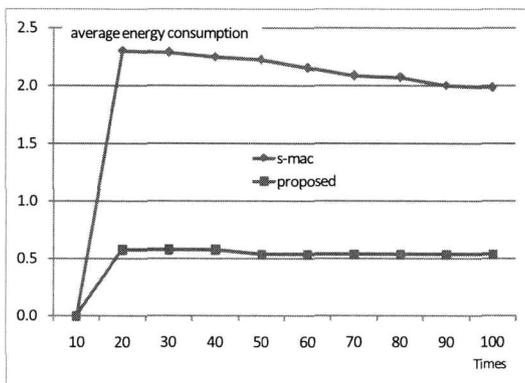


그림 11. 32bytes 크기의 데이터를 100번 전송할 때 노드의 평균 에너지 소모량

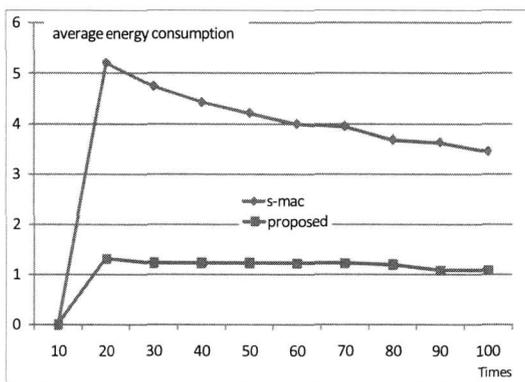


그림 12. 100bytes 크기의 데이터를 100번 전송할 때 노드의 평균 에너지 소모량

그림 11과 그림 12는 32 bytes와 100 bytes 크기의 데이터를 모든 노드로부터 싱크로 100번 전송할 때 노드의 평균 에너지 소모량을 나타낸 것이다. S-MAC 프로토콜에 비해서 통신 반경을 나누어서 전송하는 제안한 프로토콜의 노드의 평균 에너지 소모량이 더 낮은 것을 확인 할 수 있었으며 제안한 프로토콜이 노드의 생존률을 높이는데 더 효율적임을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 제안된 에너지를 갖는 센서 노드의 효율적인 사용을 위해 기존의 S_MAC 프로토콜에서 고려하지 않은 송신 전력에 따른 통신 반경을 고려하여 에너지 효율을 개선하는 방법을 제안하였다. 송신 노드에서 제어 메시지를 전송할 때 통신 반경을 고려하여 이웃한 노드를 Radio on 또는 off 상태로 전환할 경우 통신 반경내에 있는 노드들만 Radio on 상태로 전환하기 때문에 불필요한 Overhearing 문제뿐만 아니라 에너지 소모를 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE Std. 802.11-1999 edition.
- [2] M. Stemm and R. H. Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices," IEICE Trans. Commun., Vol.E80-B, No.8, pp.1125-1131, Aug. 1997.
- [3] O. Kasten. Energy consumption. Eldgenossische Technische Hochschule Zurich. [Online]. Available: http://www.inf.ethz.ch/~kasten/research/bathtub/energy_consumption.html
- [4] Akyildiz, I.F.; Weilian Su; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E "A survey on sensor networks" IEEE Communications Magazine Aug. 2002
- [5] G. Lu; B. Krishnamachari; C. Raghavendra "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks" International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN 04), April 2004.
- [6] Wei Ye; Heidemann, J.; Estrin, D. "Medium

- | | | |
|--|--|------------|
| <p>Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks” IEEE/ACM Transactions on Networking, June, 2004</p> | <p>정 원 수 (Won-Soo Jung)
한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조</p> | <p>준회원</p> |
| <p>[7] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin “An Energy- Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”</p> | <p>오 영 환 (Young-Hwan Oh)
한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조</p> | <p>정회원</p> |
| <p>[8] 황호형, 정윤원, 김민정, 정창영, 권재균, 성단근, “무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 동향 및 분석”, SK Telecommunications Review, 제 14권 6호, 2004년 12월</p> | | |
| <p>[9] 이상학, 정태충, “유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심, 무선 센서 네트워크 기술”, 경희대학교출판국, 2005년. 1월. 동향, “주간기술동향, 2005년7월, pp.918-933</p> | | |
| <p>[10] 윤찬영, “무선센서 네트워크에서 에너지 효율적인 S-MAC 프로토콜”, 한국통신학회논문지 08-2 Vol.33 No.2, pp.22-26</p> | | |