
유비쿼터스 센서 망에서의 에너지 절약형 매체접근 제어 프로토콜

Energy-Conserving MAC Protocol in Ubiquitous Sensor Networks

양현호

군산대학교 전자정보공학부

Hyun-Ho Yang(hhyang@kunsan.ac.kr)

요약

응용분야를 계속 확장해가고 있는 무선 센서네트워크에서 매체접근제어(MAC)에 관한 연구는 주로 에너지 효율을 높이는데 집중되어왔으며 전송지연(Latency)에 관한 연구는 상대적으로 적다. 그러나 센서네트워크의 특성상 다중 홉(multi-hop) 전송이 빈번하게 일어나는 환경에서 종단 간 전송지연은 특히 시간 종속적인 응용분야에서는 중요한 성능상 제약이 될 수 있다. 본 논문에서는 분산적인 전송전력제어방식을 이용하여 다중 링크를 동시에 개설할 수 있도록 함으로써 센서네트워크의 전송 전력을 줄임과 동시에 네트워크의 공간 활용도를 향상시키고 전송지연시간을 개선 할 수 있는 매체접근제어(MAC) 방식을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능 검증 결과 제안하는 방식인 TPCS-MAC은 센서노드의 전력소모를 줄임과 동시에 특히 다중 홉(multi-hop) 센서네트워크에서 발생하는 종단 간 지연(end-to-end latency) 문제를 개선하는 것으로 판명되었다.

■ 중심어 : | 무선센서통신망 | 매체접근제어(MAC) | 전송전력제어(TPC) |

Abstract

Research on media access control (MAC) scheme for Wireless Sensor Network (WSN) has been mainly focused on energy efficiency improvement, while interest on latency is relatively weak. However, end-to-end latency could be a critical limitation specifically in the multi-hop network such as wireless multimedia sensor networks. In this paper we propose a media access control scheme with distributed transmission power control to improve end-to-end transmission latency as well as reduce power consumption in multi-hop wireless sensor networks. According to the simulation results, the proposed scheme is turned out to be an energy efficient scheme with improved end-to-end transmission latency

■ keyword : | Wireless Sensor Network(WSN) | MAC | Transmission Power Control(TPC) |

1. 서론

최근 그 응용분야가 확장되고 있는 무선 센서네트워

크는 이미 우리의 생활 주변에 다가와 있지만 기술적으로는 여전히 많은 부분의 개선 여지를 남기고 있다[1]. 이러한 개선이 필요한 항목 중에서 특히 중요한 것은

* 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

* 본 논문은 2005학년도 군산대학교 신임교수 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

접수번호 : #070806-003

접수일자 : 2007년 08월 06일

심사완료일 : 2007년 12월 07일

교신저자 : 양현호, e-mail : hhyang@kunsan.ac.kr

제한된 전력자원을 갖는 센서노드의 입장에서 최소한의 전력으로 통신을 유지하기 위한 매체접근 방식이다 [2]. 특히 최근 연구자들 사이에서 주목받기 시작하고 있는 무선 멀티미디어 센서 네트워크(Wireless Multimedia Sensor Network, WMSN)[3,4]는 실시간 원격 진료, 공정제어, 환경감시 등과 같이 QoS 보장이 요구되는 응용분야에 적용하는 것을 목표로 한다. 이 경우 다양한 형태의 콘텐츠를 목적에 맞게 전송하기 위해서는 저전력 전송과 아울러 지연시간에 대한 고려도 중요한 설계요소가 되지만 센서네트워크에서의 MAC 프로토콜에 관한 기존의 연구들은 이를 간과하였다.

본 논문에서는 기존의 방식에 비하여 적은 전력으로도 전송효율은 높이면서 지연시간은 줄일 수 있는 새로운 MAC 프로토콜인 TPCS-MAC(Transmission Power Controlled Sensor-MAC)을 제안한다. 이 방식은 노드간의 데이터 패킷 전송전력을 최소한의 필요전력 수준으로 유지함으로써 개별 노드의 소모 전력을 줄이는 한편 전송범위(transmission range)를 줄여 한 전송 주기 동안 서로 영향을 주지 않을 노드간의 통신을 동시에 가능하게 함으로써 네트워크 전체의 전송 효율을 향상시키고 지연시간을 줄일 수 있다.

본 논문의 2장에서는 센서네트워크의 MAC 프로토콜과 관련된 연구 및 전송전력제어에 대하여 기술하였고 3장에서는 본 논문에서 제안하는 TPCS-MAC에 대하여 설명한다. 4장에서는 TPCS-MAC 방식에 대한 성능평가 결과를 기술하였고 5장에 결론을 기술하였다.

II. 관련 연구

2.1 센서네트워크의 매체접근 방식

센서네트워크에서 가장 대표적인 매체접근제어 방식인 S-MAC[5]은 전원에 대하여 제약을 받는 센서네트워크에서 노드들이 주기적으로 수면상태에서 깨어나 주변 노드와 통신을 하는 방식을 취함으로써 노드의 전력 소모를 줄이고 있다. 그러나 이 방식에서 각 노드는 주변 노드의 영향으로 경쟁구간 동안 채널을 확보하지 못하면 다음 전송주기까지 기다려야 하기 때문에 전송

에 대한 지연이 발생하게 된다.

S-MAC의 성능을 개선하기 위한 변형 프로토콜이 제안되어왔는데 T-MAC[6]에서는 활성화된 사이클의 길이를 적응적으로 조절하여 노드의 전력 소모를 줄이려 시도하였지만 지연시간에 대한 고려는 포함되어있지 않았다. D-MAC[7]에서는 단방향의 데이터 수집 트리를 구성하고 이에 따라 노드의 활성 시간을 제어함으로써 노드의 전력 소모를 줄임과 동시에 지연 시간도 개선하려 하였으나 노드간 매우 정밀한 동기화가 요구된다는 단점이 있다.

[8]에서는 센서네트워크에서의 전송전력 제어를 위하여 SYN 패킷을 제외한 나머지 제어패킷을 최소한의 전력 레벨로 전송함으로써 전송전력을 줄이는 방안을 제안하였으며 이를 위하여 각 노드가 주변 노드의 스케줄 및 수신 전력 레벨을 기록한 표를 관리하도록 하였고 전송 전력은 미리 정해진 몇 단계의 출력 레벨을 적용하여 결정하였다. 이 방식은 S-MAC에 비하여 노드의 전송 소모 전력을 줄일 수 있는 반면 데이터 전송 효율이나 지연시간의 개선에 대한 고려는 반영되지 않았다.

[9]는 data 전송 효율을 높이기 위하여 S-MAC의 경쟁 방식에 2개의 CW (Contention Window)를 운영하여 RTS/CTS 메시지 교환이 2차례에 걸쳐 이루어지고 결과적으로 2개의 링크를 동시에 개설하는 방법을 채택하였다. 또한 전송전력을 절약하기 위하여 전송전력 제어 기법을 적용하여 제어패킷은 최대전력을 사용하여 전송하는 반면 DATA 및 ACK 패킷은 최소전력을 사용하도록 하였다. 이를 통하여 S-MAC 대비 종단 간 패킷 전달 지연 및 패킷 당 소모 전력을 줄일 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 이 방식에서는 NTS 패킷 교환 등의 절차가 추가되고 다중링크 개설이 하나씩 차례로 이루어져 링크 수가 늘어날수록 CW 수가 증가한다는 단점이 있다.

2.2 전송전력제어 (Transmission Power Control)

IEEE 802.11[10] DCF(distributed coordination function) 기반의 무선네트워크에서 각 노드는 hidden terminal 문제를 해결하기 위하여 충돌회피 알고리즘을

사용한다. 충돌회피 알고리즘은 RTS/CTS 등의 제어 패킷과 NAV(Network Allocation Vector)를 사용하여 충돌을 미리 방지하지만 통신 상대방의 위치와 무관하게 모든 패킷을 최대 전력으로 전송함으로 인하여 불필요하게 전송을 전력을 소모하거나 다른 주변 노드의 전송을 제한하는 exposed terminal 문제를 유발시킨다. 전송 전력제어는 이러한 문제에 대한 대안으로 제안되었다[11]. 예를 들어 [그림 1]에서 노드 C가 D로 전송 중인 경우 B는 C로부터 RTS를 수신하여 진행 중인 전송을 감지하게 되므로 A로부터의 전송요구를 수용할 수 없게 된다. 그러나 만일 C가 전송전력을 D가 충분히 수신할 수 있는 크기의 최소전송전력으로 줄이면 B는 C의 수신 권에서 벗어나게 되므로 A에서 B로의 전송도 동시에 가능하게 된다. 이러한 방식은 각 노드의 전송 전력을 절약함으로써 노드의 수명을 연장시킬 수 있을 뿐만 아니라 동시에 복수의 링크 개설이 가능함으로써 네트워크의 공간재활용도도 높일 수 있다.

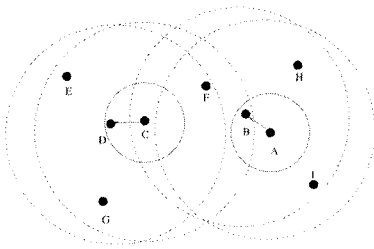


그림 1. 전송 전력 제어의 동기

III. TPCS-MAC(Transmission Power Controlled Sensor-MAC)

본 장에서는 무선센서네트워크에서 수신노드가 복수의 노드로부터 전송 전력 제어를 적용하여 발행된 링크 개설 요구에 대하여 수신 전력 레벨 및 이를 반영하여 예측한 SINR 값의 변화를 기준으로 링크개설 승인 여부를 결정함으로써 전송 소모 전력을 절약하면서 가상 클러스터 내에서 동시에 다중 링크 개설을 가능하게 하는 매체접근제어방식인 TPCS-MAC(Transmission

Power Controlled Sensor-MAC) 방식을 제안한다.

3.1 시스템 모델

TPCS-MAC이 적용되는 무선 센서네트워크에서 각 노드는 데이터 전송 경로 상 가장 가까운 단일 홉(hop) 인접 노드와 링크를 개설하며 전송되는 데이터는 한 전송주기 동안 전송이 완료될 수 있는 크기이고, 매 전송 주기가 시작될 때 마다 새롭게 링크 개설 절차를 수행하는 것으로 가정한다. 또한 링크 개설을 위한 협상 절차는 동일 가상 클러스터 내에서, 경쟁구간 (contention period) 동안에만 이루어지며 data 전송 구간에는 새로운 링크 개설을 위한 협상을 개시하지 않는다. 끝으로, 실제 데이터의 전송은 경쟁구간이 끝난 후 협상에 성공한 모든 링크가 동시에 개시하는 것으로 한다.

TPCS-MAC에서는 각 노드는 제어패킷 및 데이터 패킷의 전송을 위하여 일정한 수의 이산적 전력 레벨을 사용한다. 또한, ACK를 제외한 모든 제어패킷은 최대 전력레벨로 전송되며 DATA 패킷 및 ACK 패킷은 최소 전력레벨로 전송된다. 각 노드 주변의 간섭/잡음 전력 레벨 P_{IN} 은 active 주기 동안 새롭게 개설되는 링크에 의해서만 변화되며 그렇지 않은 경우에는 active 주기 시작 시점의 간섭/잡음 전력레벨이 유지된다고 가정한다. 임의의 노드 n 주변의 간섭/잡음 전력 레벨의 초기값은 각 노드가 가상클러스터에 참여 할 때 SYNC 패킷에 실어서 방송한다. 이후 각 노드는 매 active 주기가 시작될 때 마다 주변의 간섭/잡음 레벨을 측정하여 현재의 레벨과 다를 경우 SYNC 패킷에 변화된 정보를 포함시켜 주변 노드에 알린다. 간섭/잡음 전력 레벨은 양자화 된 이산적인 값을 갖는다. 모든 제어패킷은 한 미니슬롯 동안에 전송이 완료된다. 네트워크의 무선 환경은 안정적인이어서 경로이득은 급격하게 변화하지 않는 것으로 가정한다.

특정 노드로 전송할 데이터가 발생한 송신 노드는 수신노드의 스케줄에 맞추어 깨어나 SYNC 패킷을 방송한다. 수신 노드는 자신의 정해진 스케줄에 따라 깨어나서 SYNC 패킷을 주변 노드에 방송한다. 두 경우 모두 SYNC 패킷에는 해당 노드 주변의 간섭/잡음 전력 레벨(P_{IN}) 정보를 포함하며 최대 전송전력으로 송신된

다. 가상클러스터 내의 각 노드는 SYNC 패킷에 포함된 정보를 사용하여 해당 노드와의 경로이득 및 3.3절에서 설명하는 최소 전송 전력 레벨 등을 계산한다. 각 노드는 이상에서 언급한 주변노드에 관한 모든 정보를 NIT (Neighbor Information Table)에 기록하여 관리한다. NIT에서 관리하는 정보에 포함되는 항목은 다음과 같다.

- 주변 노드의 다음 청취 스케줄
- 자신 및 주변 각 노드 주위의 간섭/잡음 전력 레벨
- 주변 각 노드와의 경로이득

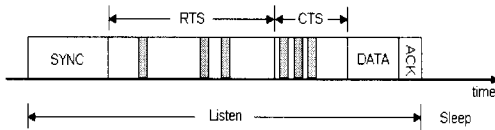


그림 2. 채널의 논리적 구조

3.2 프레임 구조

TPCS-MAC에서 사용하는 프레임 구조는 [그림 2]와 같다. 이 프레임 구조는 S-MAC등 기존의 프로토콜들에서와 같이 무선 채널이 켜지는 청취(listen) 구간과 무선 채널이 꺼지는 수면(sleep) 구간으로 구성되며 청취 구간은 SYNC-RTS-CTS-DATA-ACK의 순서로 진행 된다.

SYNC 구간은 S-MAC에서와 같이 청취 스케줄을 동기화하는 기간이다. RTS와 CTS구간은 정해진 시간동안 지속되며 다중 링크 개설을 위한 절차가 수행 된다. DATA 및 ACK 구간은 실제 데이터 패킷의 전송과 이에 대한 확인 응답이 전송되는 구간이다. 전송 데이터가 없는 경우 DATA 및 ACK 구간은 수면 구간의 일부로 된다.

TPCS-MAC의 채널 구조가 S-MAC과 다른 점은 다중의 링크 개설을 위한 제어 패킷의 교환을 위하여 RTS 및 CTS 경쟁구간이 미니슬롯으로 분할되어 있다는 점이다. 이와 함께 무선 채널의 대역폭은 한 미니슬롯 동안에 하나의 제어패킷을 충분히 전송 할 수 있을 만큼 넓은 것으로 가정한다.

전송할 데이터가 발생한 모든 노드는 RTS 구간 동안

랜덤하게 미니슬롯을 선택하여 RTS를 전송한다. RTS에 대한 응답으로 CTS를 전송할 노드도 같은 방법으로 CTS 구간동안에 응답한다. 송신할 데이터가 모두 RTS를 보내는 것과는 달리 CTS는 링크가 승인되는 경우에만 전송하므로 CTS 패킷 발생 확률 및 충돌 확률이 RTS에 비하여 적기 때문에 CTS 구간은 RTS 구간보다 짧다.

3.3 최소 데이터 전송 전력레벨

최소 데이터 전송 전력레벨은 송신노드가 데이터 전송을 위하여 사용할 최소한의 전력 레벨이며 수신노드가 계산한다. 이 값의 결정에는 수신 노드 주변의 간섭/잡음 전력 레벨, 송수신 노드간의 경로 이득, 최소 신호대 간섭잡음비($SINR_{thresh}$), 그리고 최소신호수신강도($RSSI_{thresh}$)가 사용된다. 최소 송신 전력 레벨은 다음 두 조건을 동시에 만족하는 전력레벨(P_{tx})이다.

$$RSSI_{thresh} < \frac{P_{tx}}{G_{ij}} \tag{1}$$

$$SINR_{thresh} < \frac{P_{tx} G_{ij}}{P_{INj}} \tag{2}$$

여기서 P_{INj} 는 수신노드 j 주변에서의 간섭/잡음 전력 레벨이며 G_{ij} 는 송신노드 i 와 수신노드 j 사이의 경로 이득이다. 위 조건으로부터 노드 i 가 노드 j 로 데이터를 전송할 경우 사용할 최소 데이터 전송 전력레벨($P_{txD-min-i}$)은 다음 식과 같다.

$$P_{txD-min-i} = \max \left\{ \frac{RSSI_{threh}}{G_{ij}}, \frac{SINR_{thresh} P_{INj}}{G_{ij}} \right\} \tag{3}$$

3.4 전송전력 기반 링크 승인

전송할 데이터가 있는 송신 노드 i 는 수신 노드 j 가 수면상태에서 깨어나면서 방송하는 SYNC 패킷으로부터 수신 노드 주변의 간섭 잡음 전력 레벨(P_{INj}) 정보를 추출한 다음 식(3)을 이용하여 데이터 전송에 사용할 최소 데이터 전송 전력 레벨($P_{txD-min-i}$)을 구한다. 송신

노드는 이 값을 RTS에 실어 수신노드에게 전송한다. 송신노드로부터 RTS를 수신한 수신노드는 이 값을 다음 식(4)에 적용하여 주변의 각 노드로 부터 수신된 RTS 신호 전력 및 자신 주변의 간섭 잡음 전력을 비교한 신호대간섭잡음비(SINR_{ij})를 계산한다.

$$SINR_{ij} = \frac{P_{txD-min-i} G_{ij}}{\sum_{k \neq i} P_{txD-min-k} G_{kj} + P_{INj}} \quad (4)$$

단, k 는 RTS를 송신한 모든 노드의 집합이다. 구체적으로 예를 들어 노드 A가 노드 B로 데이터를 전송할 경우 노드 B는 RTS 구간동안 노드 A 뿐만 아니라 주변의 다른 노드들로부터 청취한 모든 RTS 패킷으로부터 최소 데이터 전송 전력레벨을 추출하고 이 값을 식(4)를 이용하여 각각의 링크 개설 요구에 대하여 평가한다. 이 경우 평가대상에는 주변 노드가 자신에게 보낸 RTS 뿐만 아니라 주변 다른 노드 간에 교환되는 RTS도 포함된다. 그 결과 다음 두 식 (5) 및 (6)의 조건이 만족되는 경우 수신노드 B는 CTS를 전송하여 송신노드 A로부터의 링크개설요구를 승인한다.

$$SINR_{AB} \geq \text{Max}(SINR_{ij}) \quad (5)$$

$$SINR_{AB} \geq SINR_{thresh} \quad (6)$$

3.5 링크 개설 절차

TPCS-MAC프로토콜은 다음과 같은 진행 단계에 따라 다중 링크를 개설한다.

단계 1. 노드 B로 전송할 데이터가 발생한 노드 A는 자신의 NIT를 참조하여 (3)식에서 정의한 데이터 전송을 위한 최소 전력레벨($P_{txD-min-A}$)을 다음과 같이 계산한다.

$$P_{txD-min-A} = \max \left\{ \frac{RSSI_{thresh}}{G_{AB}}, \frac{SINR_{thresh} P_{INB}}{G_{AB}} \right\} \quad (7)$$

노드 A는 이 결과를 자신의 NIT에 기록하고 RTS에

포함시켜 최대 전력으로 B에게 전송한다. RTS는 다중 링크 개설을 위하여 동시에 여러 노드가 전송할 수 있으며 충돌을 피하기 위하여 RTS 구간 내의 mini slot을 random하게 선택한다.

단계 2. 각 노드는 RTS 구간이 종료 될 때까지 자신을 수신자로 하는 RTS를 수신하지 못한 경우 sleep 모드로 전환한다. 송신노드 A로부터 RTS를 수신한 노드 B는 3.3절에 기술된 방법에 따라 수신된 RTS에 대한 승인 여부를 판정한다. 즉, 식 (4)를 이용하여 청취된 모든 RTS 신호에 대하여 신호대간섭잡음비를 계산한 후 식(5)와 (6)의 조건이 동시에 만족되는 경우 수신노드 B는 송신노드 A를 경쟁의 승자로 결정하고 CTS를 전송한다. 경쟁의 승자는 개별 수신 노드에서 판정하므로 같은 전송 기간 동안 동시에 둘 이상이 있을 수 있다. CTS는 최소 데이터 전송전력 레벨($P_{txD-min-A}$)정보를 포함하며 최대 전력 레벨로 전송된다.

단계 3. 수신노드로부터 CTS를 수신한 송신노드들은 결정된 전송전력레벨($P_{txD-min-A}$)로 데이터패킷을 전송한다. 일정한 시간 내에 CTS를 수신하지 못한 송신노드는 sleep 상태로 전환한다. 실제 DATA 패킷 전송은 CTS구간이 끝나는 시점에 시작되며 경쟁에서 승리한 송신노드들이 동시에 전송을 시작한다.

단계 4. DATA 패킷을 정상적으로 수신한 수신노드는 ACK 패킷을 전송한다. ACK 패킷은 진행 중인 다른 session을 방해하지 않도록 데이터패킷과 마찬가지로 최소 전력으로 전송된다. 최종 데이터 패킷 전송 후 송신 노드와 수신 노드는 sleep 상태로 전환한다.

IV. 성능분석

4.1 시뮬레이션 모델

TPCS-MAC의 성능평가는 시뮬레이션을 통하여 수행 하였다. 이 시뮬레이션에서는 제안하는 방식의 기본적인 링크 개설 메커니즘을 구현하는데 집중하기 위하여 네트워크의 위상 구조와 데이터 발생 빈도는 최대한 단순하게 가정하였다. 또한 SYNC 패킷의 분실은 고려하지 않았으며, 노드는 고정되어있는 것으로 가정하

였다.

전송전력 소모(transmission energy consumption), 전송(transmission) throughput 그리고 전송 지연(transmission latency)을 주요 성능평가 지표로 삼아 각각의 지표에 대한 개선 사항을 평가하였으며, 패킷당 소모 전력은 일정 시간동안 소모된 전력을 그 기간 동안 전송된 패킷의 수로 나누는 방법으로 산정하였다.

네트워크 구성은 성능 비교를 위하여 [5] 및 [9]에서와 같이 10-hop의 1차원 네트워크 토폴로지를 고려하였다. [그림 3]은 이 네트워크의 구성을 나타낸 것이다.

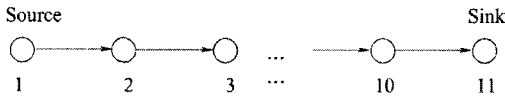


그림 3. 시뮬레이션을 위한 노드 배치

그림에서 보듯이 1차원 센서네트워크에는 11개의 노드가 한 줄로 늘어 서 있고 각각의 거리는 일정한 것으로 가정 하였다. 양단의 노드는 각각 source 노드와 sink 노드로 동작한다. source 노드는 20개의 패킷을 다양한 시간 간격으로 sink 노드로 전송하며 각 패킷은 100바이트로 가정하였다. 그 밖의 주요 시뮬레이션 파라미터를 [표 1]에 정리하였다. 시뮬레이션은 독립적으로 50회 반복하였다. 성능 비교 대상은 802.11 MAC[10], S-MAC[5] 및 APC-MAC[9]로 하였으며 각 방식과 TPCS-MAC 방식에 대하여 패킷당 에너지 소모량과 평균 중단간 throughput 그리고 평균 중단간 전송 지연을 비교하였다.

표 1. 주요 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
SYNC 구간 길이	31 slot
RTS 구간 길이	31 slot
CTS 구간 길이	15 slot
SINR threshold	10 dB
수신기 감도	-64 dB
반송파 감지 레벨	-78 dB
Noise floor	-104 dB
송신모드 소모전력	가변
수신모드 소모전력	0.395 W
대기모드 소모전력	0.35 W

객관적인 성능 비교를 위하여 무선센서네트워크를

위한 대표적인 MAC 프로토콜인 S-MAC 플랫폼을 기반으로 ns-2[12]를 사용하여 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

4.2 소모 전력

TPCS-MAC은 각 노드가 필요한 최소 전력을 사용하여 데이터를 전송함으로써 노드의 데이터 전송에 따른 전력 소모를 줄이는 것을 일차적인 개선 사항으로 볼 수 있다. 이와 함께 전송 전력을 최소화함에 따라 각 노드의 전송 거리가 짧아지게 되며 이는 결과적으로 망을 구성하는 채널의 공간적 활용도를 증대시키게 된다. 이에 따라 연속적인 데이터 패킷열의 전송이 이루어지는 상황에서는 경우에 따라서 개별 노드에서 처리하는 패킷의 수가 증가함에 따라 개별 노드의 총체적인 전력 소모는 오히려 증가 할 수 있다. 따라서 본 모의 실험에서는 개별 패킷을 중단간 전송하는 데 소모되는 전력인 패킷당 소모전력을 성능지표로 삼아 TPCS-MAC 방식의 전력 절감 성능을 평가하였으며 그 결과는 [그림 4]에 나타난 바와 같다.

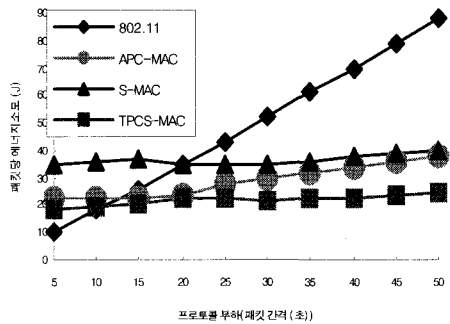


그림 4. 패킷당 에너지 소모량

그림에서 802.11 MAC의 경우 전원이 계속 켜져 있는 상태이고 전송 전력제어도 이루어지지 않는 경우에 해당하며 부하가 적어서 전송되는 패킷이 적을수록 개별 패킷이 소모하는 평균전력은 증가한다. 반대로, S-MAC을 비롯한 센서네트워크 프로토콜은 주기적인 청취 및 수면을 반복하게 되며 부하가 적을 경우 수면 상태의 시간이 길어지므로 적은 부하에 대하여도 패킷

당 에너지 소모량은 큰 변화를 보이지 않는다. TPCS-MAC 역시 S-MAC에 근간한 동작 사이클을 적용한 방식으로서 망의 부하 변화에 따른 소모 전력의 변화는 크지 않다. 한편, TPCS-MAC과 APC-MAC은 전송전력 제어 기법을 사용함으로써 S-MAC보다 적은 에너지를 소모하게 된다. 더욱이, TPCS-MAC은 경쟁 구간의 프레임 구조를 단순화하고 기간을 단축함으로써 APC-MAC에 비하여 전력 소모량을 좀 더 줄이는 결과를 보였다.

4.3 Throughput

중단 간 throughput은 소스 노드에서 싱크 노드로 일정한 시간동안 패킷 형태로 전송된 데이터의 총 량으로 정의하며 망 전체의 전송 용량을 가늠할 수 있는 측정 지표이다.

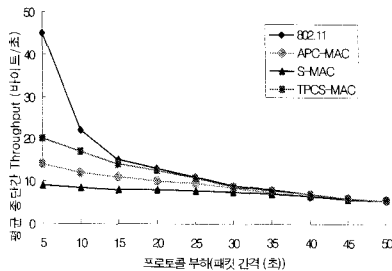


그림 5. 평균 중단간 throughput

802.11 MAC과 S-MAC은 동일 클러스터 내에서 한 순간에 한 개의 링크만이 개설 가능하지만 TPCS-MAC은 다중링크 설정이 가능하므로 전체적인 망의 전송 능력은 향상된다. [그림 5]에서 보는 바와 같이 802.11 MAC의 경우 부하의 증가에 따라 throughput이 지수적으로 증가하지만 다른 방식에서는 그 양상이 다르다. S-MAC의 경우 duty cycle에 의존적이긴 하지만 통상적인 동작 환경에서는 부하가 증가하더라도 대부분의 시간을 수면상태로 유지하기 때문에 망의 throughput은 부하의 증가에 맞추어 증가하지는 않는다. 이러한 상황은 결과적으로 전송 지연을 유발시킨다. 이점이 바로 전송전력을 절약하는 대가로 감수해야 하는 S-MAC의 단점이다. 이에 비하여 TPCS-MAC은

동일한 클러스터 내에서 다중의 링크를 개설 할 수 있기 때문에 부하의 증가에 따라 어느 정도는 throughput을 증가시킬 수 있다. 또한 APC-MAC이 최대 두 개의 링크만 개설 가능한 것에 비하여 TPCS-MAC은 이러한 제약이 없으므로 부하 증가에 따른 throughput 향상 효과가 더 크며 이러한 결과는 망의 부하가 증가할수록 더욱 높아진다. 부하가 극단적으로 낮아지는 경우에는 모든 방식의 throughput이 일정한 값으로 수렴하며 방식간의 차이가 없어진다.

4.4 전송 지연

중단간 전송지연시간은 소스노드에서 발생한 패킷이 최종적으로 싱크노드에 전달되는데 소요된 지연시간으로 정의한다. 항상 동작 상태로 운영되는 802.11 MAC와 다르게 S-MAC을 기반으로 한 MAC 프로토콜들에서는 전원의 절약을 위하여 동작시간을 제한한다. 이에 따라 패킷이 발생 되더라도 수신노드가 깨어나 동작상태가 되기까지 송신노드는 전송을 대기하여야 하며 이에 따른 전송 지연이 불가피하다. 이러한 상황은 망의 부하와 밀접한 관련이 있다.

본 시뮬레이션에서 소스노드는 100바이트길이의 패킷 20개를 발생하여 10 홉(hop) 떨어진 싱크노드로 전송하며 패킷의 전송 간격을 1초에서 50초 까지 변화시키면서 이에 따른 전송지연시간을 각 프로토콜별로 조사하였다.

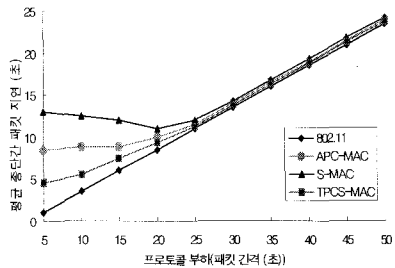


그림 6. 평균 중단간 패킷 지연

[그림 6]에서 보는 바와 같이 802.11 MAC은 동일한 부하 조건에서 가장 작은 전송지연을 보이며 S-MAC 기반의 MAC 프로토콜은 부하가 높을 수록 전송 지연

이 커진다. 두 개의 링크를 동시에 개설 할 수 있는 APC-MAC의 경우 S-MAC에 비하여 전송 지연이 상대적으로 작으며 TPCS-MAC는 APC-MAC에 비하여 다중 링크 개설에 대한 제약이 적어 셋 이상의 다중 링크 개설이 가능하므로 전송 지연이 더욱 작아진다.

이상에서 TPCS-MAC의 성능을 세가지 측면에서 평가하였다. 결론적으로 TPCS-MAC은 기존의 방식에 비하여 패킷당 소모되는 에너지를 줄이면서도 종단간 throughput과 전송지연을 개선할 수 있는 프로토콜임을 알 수 있다.

V. 결론

센서 네트워크에서 MAC 프로토콜은 적은 전력을 사용하면서도 전송 지연을 줄일 수 있는 방안으로 개선이 진행되고 있다. 본 논문에서는 분산적인 전송전력제어 방식을 이용하여 다중 링크를 동시에 개설할 수 있도록 함으로써 센서네트워크의 전송 전력을 줄임과 동시에 네트워크의 공간 활용도를 향상시키고 전송지연시간을 개선 할 수 있는 매체접근제어(MAC) 방식을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능 검증 결과 제안하는 방식인 TPCS-MAC은 센서노드의 전력소모를 줄임과 동시에 특히 다중 홉(multi-hop) 센서네트워크에서 발생하는 종단 간 지연 문제를 개선하는 것으로 판명되었다.

본 논문에서 제안한 TPCS-MAC 프로토콜은 최근 연구자들 사이에서 관심이 집중되고 있는 멀티미디어 센서네트워크[13]등의 센서네트워크 응용 분야에 적용할 경우 통신의 품질을 향상시키는데 유용한 방안이 될 것으로 기대되며 이를 위해서는 시뮬레이션이 아닌 실제 노드로 구성된 네트워크를 통한 검증 및 보완이 필요하다. 이를 위하여 특별히 네트워크의 부하의 변화, 충돌로 인한 SYNC 패킷의 손실, 이동하는 노드의 영향 등에 따른 성능의 분석 등의 추가적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz et. al., "A survey on Sensor Networks," *IEEE Communication Magazine*, pp.102-114, 2002(8).
- [2] I. Demirkol, C. Ersoy and F. Alagöz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communication Magazine*, pp.115-121, 2006(4).
- [3] E. Gurses, O.B. Akan, "Multimedia Communication in Wireless Sensor Networks," *Ann. Telecommun.* 60 (7-8), pp.799-827, 2005.
- [4] F. Hu, S Kumar, "Multimedia Query with QoS Considerations for Wireless Sensor Networks in Telemedicine," in *Proc. of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Intl. Conf. on Internet Multimedia Management Systems*, Orlando, FL, 2003(9).
- [5] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 12, No. 3, pp.493-506, 2004.
- [6] T. van Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Proc. of SenSys'03*, pp.171-180, 2003.
- [7] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi Raghavendra, "An adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks," in *Proc. of the 4th Intl. Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks*, 2004(4).
- [8] P. C. Nar, E. Cayirci, "PCSMAC: A Power Controlled Sensor-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Proc. of EWSN*, pp81-92, 2005.

- [9] S. Woo, E. Kim, S. Sung and K. Kim, "An Adaptive Power Controlled MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in Proc. of ISSADS2006, pp102-114, 2006.
- [10] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. IEEE Std. 802.11-1999 edition, 1999.
- [11] J. Monks, V. Bharghavan, and W-M. Hwu, "A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks," in Proc. of INFOCOM2001, vol. I, pp.219-228, 2001.
- [12] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [13] I.F. Akyildiz, T. Melodia, "A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks, Comput," Networks (Elsevier) 51, pp.921 - 960, 2007.

저 자 소 개

양 현 호(Hyun-Ho Yang)

정회원



- 1986년 2월 : 광운대학교 전자공학과(공학사)
- 1990년 8월 : 광운대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과(공학박사)

- 1989년 ~ 1990년 삼성 SDS 주식회사
- 1991년 ~ 1997년 포스데이타 주식회사
- 1997년 ~ 2005년 순천청암대학
- 2005년 ~ 현재 군산대학교 전자정보공학부

<관심분야> : 무선데이터통신, Ad Hoc 네트워크, 무선 센서망