

센서 네트워크를 위한 멀티 홉 MAC 프로토콜

준회원 조 경 탁*, 종신회원 박 세 웅*

Multi-Hop MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

Kyong-Tak Cho* Associate Member, Saewoong Bahk* Lifelong Member

요 약

센서 네트워크를 위한 MAC 프로토콜들은 전력 소모를 최소화하기 위해 낮은 듀티 사이클(Duty Cycle)을 사용한다. 그 중에서 RMAC [4]의 경우 Pioneer(PION) 프레임을 이용하여 한 주기 내에 여러 홉을 전송한다. 본 논문에서는 HE-MAC(Hop-Extended MAC)이라는 홉 연장 프로토콜을 제안한다. HE-MAC의 데이터 전송은 기존 RMAC과는 달리 한 주기 내에 전달될 수 있는 최대 홉 수 정보가 포함된 Explorer(EXP)를 이용하여 이루어진다. EXP의 정보와 Ready-to-Receive(RTR) 상태를 이용하여 RMAC에 비해 2홉을 늘림으로써 평균 전송 지연 시간을 감소시킨다. 또한, 적응적 슬립을 통하여 불필요한 전력 소모를 최소화할 뿐만 아니라 RMAC에서 나타나는 잦은 트래픽(Traffic)으로 인한 패킷 역전 문제를 해결한다. HE-MAC의 패킷 전송 지연시간을 수학적으로 분석하였으며, ns-2를 이용한 모의실험을 통해 성능평가를 하였다. 300개의 노드가 배치된 랜덤 토폴로지에서 HE-MAC은 RMAC에 비해 전력 소모량과 평균 전송 지연 시간을 14%, 20%만큼 감소시킨다.

Key Words : Wireless Sensor Networks; MAC Protocol; Duty Cycling.

ABSTRACT

To minimize energy consumption, most of MAC Protocols in WSNs exploit low duty cycling. Among those, RMAC [4] allows a node to transmit a data packet for multiple hops in a single duty cycle, which is made possible by exploiting a control frame named Pioneer (PION) in setting up the path. In this paper, we present a MAC Protocol called Hop Extended MAC (HE-MAC) that transmits the data packet for more multiple hops in a single duty cycle. It employs an EXP (Explorer) frame to set up the multiple hop transmission, which contains the information of the maximum hop that a packet can be transmitted. With the use of the information in EXP and an internal state of Ready to Receive (RTR), HEMAC extends the relay of the packet beyond the termination of the data period by two more hops compared to RMAC. Along with our proposed adaptive sleeping method, it also reduces power consumption and handles heavy traffic efficiently without experiencing packet inversion observed in RMAC. We analytically obtain the packet delivery latency in HE-MAC and evaluate the performance through ns-2 simulations. Compared to RMAC, HE-MAC achieves 14% less power consumption and 20% less packet delay on average for a random topology of 300 nodes.

1. 서 론

센서 네트워크는 모니터링, 환경 감지 등의 목적

으로 사용되기 위해 현재 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 센서 노드들은 전력선으로 작동되는 것이 아니라 전지로 작동된다는 특징 때문에 노드

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-007-02, 3차원 환경에서의 지능형 무선 통신 시스템]

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소 (ktcho@netlab.snu.ac.kr, sbahk@snu.ac.kr),
논문번호 : KICS2008-12-536, 접수일자 : 2008년 12월 3일, 최종논문접수일자 : 2009년 6월 6일

들을 배치하는 데 있어서의 용이함이 센서 네트워크를 사용하는 데 있어서 큰 장점으로 다가오고 있다. 하지만 센서 노드들이 갖는 한정된 전력량 때문에 효율적인 전력 소모가 강조되고 있고, 이에 관한 여러 센서 네트워크 기술들이 연구되고 있다.

센서 노드들의 효율적인 전력 소모를 위해 최근에 제안된 MAC 프로토콜들은 듀티 사이클을 사용하여 데이터를 전송한다^{[1], [2]}. 듀티 사이클을 사용할 경우, 전송하는 노드와 수신하는 노드는 동시에 활성화된 상태여야만 데이터의 송수신이 가능하게 된다. 이러한 이유로, 네트워크상의 모든 노드들을 동기화하는 방식들이 제안되고 있다. S-MAC^[2], T-MAC^[3], RMAC^[4]은 동기화된 듀티 사이클을 사용하는 MAC 프로토콜의 대표적인 예이다.

S-MAC은 듀티 사이클에 따라 센서 노드들이 주기적으로 활성, 비활성 상태를 오가는 MAC 프로토콜이다. 네트워크의 동기화가 이루어진 후에 모든 노드들은 데이터 기간에 들어가게 된다. 어떤 소스 노드가 전송할 데이터가 있을 경우, 다음 홉 노드와 Request-to-Send(RTS)와 Clear-to-Send(CTS)를 교환하게 된다. RTS와 CTS로 인해 데이터 전송이 약속되어지면 소스 노드는 데이터 패킷을 다음 홉 노드에 전송하게 되며, 그에 대한 응답으로 Acknowledgment(ACK)을 수신한다. 듀티 사이클에 따라 모든 노드들이 슬립 기간에 들어가게 되면 비활성 상태로 슬립 모드에 들어가게 된다.

[4]에서는 동기화된 MAC 프로토콜인 RMAC을 제안하고 있다. 그림 1에 나타난 것처럼 RMAC은 데이터 기간 내에 Pioneer (PION) 이라는 제어 프레임 수신지를 향해 전송한다. 수신지를 향한 경로에 놓인 노드들은 네트워크 계층으로부터 얻은 라우팅 정보를 이용하여 다음 홉 노드로 PION을 릴레이한다. PION을 릴레이하면서 각 노드는 PION 내의 홉 수 정보에 따라, 슬립 기간이 시작된 다음에 언제 다시 활성화할 것인지에 대해 설정한다. 이러한 과정을 통해, PION을 릴레이한 노드들만 슬립 기간에 활성화되면서 데이터 패킷을 릴레이하게 된다. 하지만, 그림 1에서도 나타나듯이 각 노드는 PION을 릴레이한 후에 슬립 기간까지 계속 활성화 상태에 놓이면서 불필요한 전력 소모를 하게 된다. 또한, RMAC은 활성화 상태에 있을 때 두 개 이상의 PION 프레임을 수신할 가능성을 지니고 있어서 ‘패킷 역전 현상’이 발생할 수 있다.

본 논문에서는, 기존의 RMAC에 비해 하나의 듀티 사이클 내에서 2홉을 추가적으로 릴레이할 수

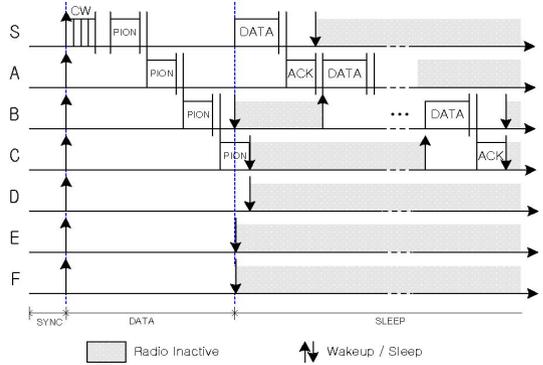


그림 1. RMAC : 데이터 전송

있는 HE-MAC (Hop- Extended MAC)이라는 MAC 프로토콜을 제안한다. HE-MAC은 한 주기 내에 릴레이 될 수 있는 최대 홉 수 정보가 포함된 EXP (Explorer)를 이용하여 데이터를 전송한다. 또한 적응적 슬립을 통하여 불필요한 전력 소모를 최소화할 뿐만 아니라, ‘패킷 역전 현상’을 해결한다.

이후 본 논문은 다음과 같은 구성을 따른다. II에서는 HE-MAC에 대한 간략한 설명을 담고, III에서는 HE-MAC에 대한 수학적 분석을 한다. IV에서는 모의실험을 통한 성능 평가를 할 것이며 V에서는 결론을 맺음으로써 본 논문을 정리할 것이다.

II. HE-MAC 프로토콜

HE-MAC은 cross-layer 라우팅 정보 및 EXP 프레임의 정보를 이용하여 한 듀티 사이클 내에 데이터를 여러 홉 수로 전송한다. 이러한 멀티홉 전송을 가능케 하기 위해 센서 노드들은 EXP 프레임을 서로 주고 받는다. EXP 내의 정보를 이용해 릴레이는 슬립 기간까지 연장된다. 또한, 데이터 기간 내에서 적응적 슬립을 통하여 불필요한 전력 소모를 최소화할 뿐만 아니라 패킷 역전 현상을 해결한다.

2.1 경로 설정

다른 프로토콜(e.g., [5],[6])을 통해 모든 노드들 간의 동기화가 이루어진 후에 어떤 소스 노드가 전송할 데이터 패킷이 존재할 경우, 그 노드는 EXP를 생성한다. EXP는 RTS 내의 정보, 전달된 홉 수, cross-layer 라우팅 정보 등의 PION 정보를 모두 포함한다. 이 뿐만 아니라, EXP는한 주기 내에서 데이터 패킷이 최대 몇 홉까지 전송될 수 있는지에 대한 정보 또한 포함한다. 한 주기 내에 전송할 수 있는 최대 홉 수(maxHop)는 소스 노드가 전송을

위해 얼마 동안 다른 노드들과 경쟁하였는지에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$\max Hop = \left\lceil \frac{T_{data} - CW - DIFS}{durEXP + SIFS} \right\rceil + 2 \quad (1)$$

여기서 T_{data} 는 데이터 기간의 길이, CW 는 소스 노드가 경쟁한 시간, $durEXP$ 는 하나의 EXP 패킷을 보내는데 걸리는 시간을 나타낸다. RMAC [4]에서 계산된 값보다 2만큼 증가한 이유는 ‘홉 연장’에 의해서이다. ‘홉 연장’에 관해서는 II-3에서 자세히 언급하도록 하겠다.

생성된 EXP는 IEEE 802.11에서처럼 DIFS (Distributed Interframe Space)의 시간을 거친 후에 cross-layer 라우팅 정보에 의해 전송된다. 다음 홉 노드가 소스 노드로부터 EXP를 받게 되면, 그 노드는 네트워크 계층으로부터 다음 홉 노드의 주소를 받는다. 이 주소를 바탕으로 SIFS (Short Interframe Space)의 지연 후에 EXP를 릴레이하게 된다. EXP를 자신의 다음 홉 노드 뿐만 아니라 이전 홉 노드에게도 전송함으로써, EXP의 릴레이가 제대로 이루어졌음을 이전 홉 노드에게 알린다. 이전 홉 노드는 자신의 다음 홉 노드로부터 EXP 릴레이에 대한 확인을 받자마자 슬립 모드로 들어가면서, 적응적 슬립을 실행한다. 이러한 적응적 슬립을 통하여, 데이터 기간 내에서 낭비되는 에너지를 최소화한다. EXP를 릴레이 한 후, 데이터 패킷의 송수신을 위해 슬립 기간 내에서 다시 활성화 상태로 돌아갈 시점을 다음과 같은 식을 이용하여 설정한다.

$$W(i) = (i-1) \cdot (DATA + ACK + 2 \cdot SIFS) + \kappa \quad (2)$$

여기서 i 는 EXP 안에 들어있는 홉 수 정보, κ 는 $durEXP$ 보다 약간 큰 값을 갖는 오프셋 값, DATA와 ACK은 각각 데이터 패킷과 ACK 프레임 을 전송하는 데 걸리는 시간을 나타낸다. 여기서 κ 값이 더해진 이유는 S로부터의 데이터 전송이 다른 노드들의 EXP 송수신에 영향을 끼칠 수 있는 경우를 방지하기 위해서이다. 소스 노드를 제외한 모드 노드들은 수식 (2)를 통해 슬립 기간 내에 언제 활성화될지에 대해 계산한다. 소스 노드의 경우, 다른 노드들과는 달리 $i=0$ 의 값으로 EXP를 전송하게 되지만 (2)식을 이용한 계산은 $i=1$ 의 값으로 하게 된다. 이러한 과정을 통해, 소스 노드와 첫 번째 홉에 해당하는 노드는 활성화 시점을 맞추으로써 정확한 데이터 송수신이 가능해진다 (그림 2에서 T_1

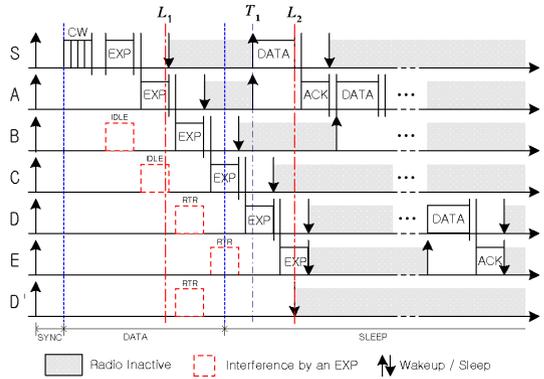


그림 2. HE-MAC : 데이터 전송

으로 표기되어있다).

2.2 RTR (Ready-to-Receive) 상태

슬립 기간 내까지 릴레이를 연장하기 위해서는 앞서 언급한 \maxHop 정보 외에도 RTR (Ready-to-Receive) 상태의 도입이 또한 요구된다. 어떤 노드가 EXP를 전송하고 있을 때, 그 주변의 노드가 EXP전송에 의한 간섭을 받을 경우, 간섭을 주는 프레임을 디코딩할 필요 없이, 자신의 상태를 IDLE에서 RTR로 바꾼다.

이러한 RTR로의 상태 변화는 ‘홉 연장’에 참여할 노드들에 한해서만 요구된다. 하지만, 이러한 상태 변화는 디코딩에 의한 작업이 아닌 단순히 간섭에 의해서만 이루어지기 때문에 RTR 상태를 지닌 모든 노드들이 실제적인 패킷 릴레이에 참여하지는 않는다. 따라서 상태 변화에 의한 부가를 줄이기 위하여 RTR 상태로 변화되는 노드의 개수를 최소화해야한다. 이를 위해, 다음과 같은 식을 만족하는 노드들에 한해서만, 간섭을 받을 시에 RTR로 자신의 상태를 변화시킨다.

$$|t_{inter} - t_{sleep}| \leq 2 \cdot durEXP + SIFS \quad (3)$$

여기서 t_{inter} 는 해당하는 노드가 간섭을 받게 된 최초시간을, t_{sleep} 은 듀티 사이클에 의해 그 노드가 슬립 기간에 들어가게 될 시간을 나타낸다. 수식 (3)에 나타난 시간 범위의 시작점은 그림 2에서 L_1 과 같이 그려진다. 이처럼 각 노드가 자신의 상태를 RTR로 바꿈에 따라서 EXP의 릴레이를 준비할 수가 있게 된다. ‘홉 연장’을 위해 RTR 상태에 놓인 노드들의 경우 IDLE 상태인 다른 노드들과는 달리 듀티 사이클에 의해 슬립 기간이 시작되어도 슬립

모드로 들어가지 않는다. 하지만, RTR 상태의 노드 여도 실제적인 데이터 릴레이에 참여하지 않을 가능성이 존재한다. 이러한 이유 때문에 그림 2에서 L_2 와 같이 표기된 것처럼, $t_{sleep} + 2 \cdot (durEXP + SIFS)$ 의 시간까지 어떠한 패킷 송수신이 일어나지 않은 노드들의 경우 슬립 모드로 들어가 비활성화 되면서 듀티 사이클을 따른다. 이처럼 RTR 상태를 도입함으로써 슬립기간에서의 ‘홉 연장’은 가능해진다.

2.3 maxHop과 RTR을 이용한 홉 연장

기존 RMAC에서의 PION은 데이터 기간이 끝나는 시점까지 수신지를 향해 릴레이된다. 하지만 HE-MAC은 EXP의 maxHop 정보와 RTR 상태를 이용하여 릴레이를 데이터 기간이 끝나는 시점 이후까지 연장하는 ‘홉 연장’을 시행한다.

예를 들어, 그림 1에 나타난 RMAC 프로토콜의 경우 노드 C는 PION을 슬립 기간에 들어가기 직전에 릴레이하기 시작한다. 따라서 노드 C와 D는 PION의 송수신이 끝난 후에 듀티 사이클에 따라 슬립 모드로 들어가게 된다. 이처럼 RMAC 프로토콜을 사용할 경우, 한 주기 내의 릴레이는 노드 C 까지만 가능하게 된다.

반면에, HE-MAC의 경우 기존에 언급된 maxHop 정보와 RTR 상태를 이용하여 제어 프레임인 EXP의 릴레이를 슬립 기간에까지 연장한다. 그림 2에 나타난 바와 같이, RMAC과 동일하게 노드 C는 데이터 기간이 끝나기 직전에 EXP를 릴레이하기 시작한다. 이럴 경우, RMAC에서와는 다르게 C가 D로 EXP를 릴레이할 때에 EXP 내에 들어있는 maxHop 정보와 홉 수 정보를 비교한다. 노드 C는 D로 릴레이할 때에 EXP내의 maxHop 값이 홉 수 값보다 크다는 정보를 통해 추후에 더 많은 릴레이가 일어날 수 있음을 감지한다. 이러한 인지로 통해 EXP를 릴레이한 후에, RTR상태에 놓여있지 않았음에도 불구하고 슬립 모드로 들어가지 않는다.

노드 D, E, D'의 경우 L_1 과 L_2 사이의 시간 내에 노드 B 또는 C의 릴레이에 의해 간섭을 받았던 상태이므로 RTR 상태에 놓이게 된다. 이러한 이유로 노드 D, E, D' 또한 슬립 기간에 들어간 상태임에도 불구하고 활성화된 상태를 유지한다. 이러한 작업을 통해 노드 D는 슬립 기간 안에 있음에도 불구하고 노드 E에게 EXP를 릴레이한다. 노드 D와는 달리, 노드 E의 경우 동일한 값을 갖는 maxHop과 홉 수 정보가 포함된 EXP를 릴레이한다. 이 두 값

이 동일함을 인지함으로써, 노드 E는 이 주기 안에서 더 이상 릴레이가 불가능하다는 것을 스스로 판단한다. 따라서 노드 E는 노드 D에게 EXP를 전송하여 릴레이가 제대로 되었음을 확인시켜줌과 동시에 듀티 사이클에 따라 슬립 모드로 들어가게 된다.

노드 D'의 경우 RTR 상태에 놓여있었기 때문에 슬립 기간이 시작되는 시점에도 슬립 모드로 들어가지 않는다. 하지만 D'의 경우 L_2 시점에 이를 때까지 어떠한 패킷도 전송 또는 수신을 하지 않으므로 자신이 ‘홉 연장’에 참여하지 않는 노드임을 확인한다. 따라서 노드 D'는 듀티 사이클에 따라 L_2 에 비활성 상태로 전환하게 된다. HE-MAC은 ‘홉 연장’을 통해 한 주기 내의 릴레이를 노드 E까지 확장하며 RMAC에 비해 2 홉을 연장한다. 이처럼 HE-MAC은 한 주기 내에 전송할 수 있는 홉 수를 늘림으로써 전송 지연 시간을 크게 줄인다.

2.4 패킷 역전 현상

‘패킷 역전 현상’은 RMAC에서 활성화 상태 동안 두 개 이상의 PION 프레임을 받게 될 경우 발생한다. RMAC의 경우, 슬립 기간에 들어가기 전까지는 비활성 상태를 유지하므로 또 다른 PION 프레임을 수신할 가능성이 존재한다. 이처럼 두 개 이상의 PION 프레임을 수신할 경우, 최근에 수신된 PION 프레임의 홉 수 정보에 의해 다음 활성화 시점이 변경된다. 이러한 현상은 슬립 기간 내에서 불필요한 에너지 소모를 발생시키고 패킷 순서가 바뀌는 문제점 등이 발생한다.

예를 들어, 그림 3에 나온 것처럼 PION 프레임 P_1 이 소스 노드 S에서 발생하여 노드 A까지 릴레이 되었다고 하자. 그 후, B까지 릴레이 될 수 있는 다음 패킷 P_2 가 또한 S로부터 발생했다고 생각해 보자. 그 결과로서, 노드 A와 B는 PION 프레임 P_1, P_2 모두를 릴레이하게 된다.

노드 A와 B의 경우 처음에는 P_1 의 정보에 의해 다음 활성화 시점을 설정해 놓는다. 하지만, P_2 를 추가적으로 릴레이하게 됨으로써, 다음 활성화 시점

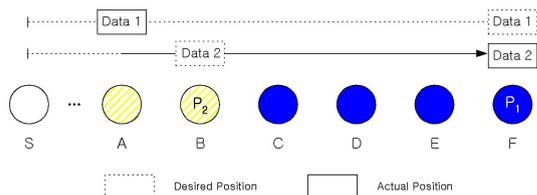


그림 3. 패킷 역전 현상 (1)

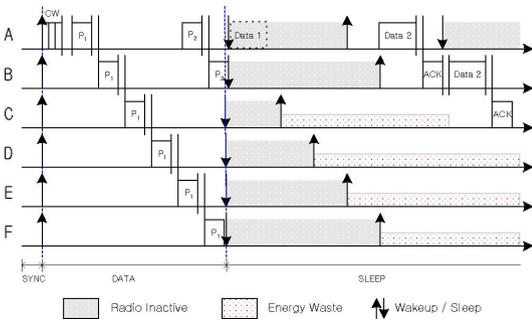


그림 4. 패킷 역전 현상 (2)

이 바뀌게 된다. 이로 인해 노드 A와 B는 P₂에 의한, 노드 C, D, E, F는 P₁에 의한 다음 활성화 시점을 갖게 된다.

그 결과로서 그림 4에 나온 것처럼 노드 C, D, E, F는 슬립 기간에 활성 상태로 돌아오게 되지만, 원하는 데이터 패킷인 Data1을 수신하지 못하는 문제점이 발생한다. 그 대신, 일정한 불필요한 에너지를 소모한 후에야 Data2를 먼저 수신하게 된다. 이는 곧, Data1과 Data2가 같은 목적지 노드를 향하고 있으면 순서가 역전된다는 것이다.

HE-MAC에서는 다음 홉 노드로부터 EXP 릴레이에 대한 확인을 받으면 적응적 슬립을 통하여 비활성 상태로 들어가게 된다. 다음 활성화 시점까지 비활성 상태를 유지하기 때문에 데이터 기간 내에서의 불필요한 에너지 소모를 없앨 수가 있다. 이 뿐만 아니라, ‘패킷 역전 현상’에 대한 해결책을 제시한다. EXP 프레임은 릴레이한 노드들은 적응적 슬립을 통하여 추가적인 EXP 프레임 수신하지 않게 된다. 다시 말하면, HE-MAC은 불필요한 에너지 소모를 없앨 뿐만 아니라, 패킷의 순서가 역전되는 문제점을 해결한다.

III. HE-MAC 수학 분석

본 장에서는 HE-MAC의 평균 전송 지연 시간에 대한 수학 분석에 대해 기술할 것이다. HE-MAC은 EXP와 데이터 패킷을 한 주기 내에 멀티홉으로 전송한다. 한 주기 내에 갈 수 있는 최대 홉 수는 소스 노드가 EXP를 전송하기 위한 경쟁에 소요된 시간에 따라 변한다. 예를 들어, 소스 노드가 Contention Window 내에서 경쟁에 소요된 시간이 짧다면, 그만큼 남은 시간을 EXP 릴레이하는 데에 시간을 더 사용할 수 있게 되므로 한 주기 내에 더 많은 홉 수로 릴레이할 수 있게 된다. 분석을 단순

화하기 위해 EXP를 전송하거나 수신하는 데 실패하지 않는다고 가정한다. 또한, 모든 수학적 분석의 단위는 1초로 한다.

HE-MAC의 평균 전송 지연 시간은 소스 노드의 경쟁 시간에 따라 변하는 최대 릴레이 홉 수의 영향을 받는다. 평균 전송 지연 시간에 관한 수식 전개를 위해 다음과 같은 상수들을 설정한다.

$$\begin{aligned} \alpha &= T_{data} - DIFS \\ \beta &= durEXP + SIFS \\ \gamma &= DATA + ACK + 2 \cdot SIFS \end{aligned} \quad (4)$$

소스 노드가 EXP를 전송할 때, 한 주기 내에 릴레이 될 수 있는 홉 수는 데이터 기간에 따라 어떠한 범위로 한정된다. 여기서 릴레이 될 수 있는 홉 수는 소스 노드가 경쟁한 시간 이후에 몇 개의 EXP 패킷이 남은 데이터 기간에 들어갈 수 있는지와 같다. 예를 들어, 소스 노드가 0ms동안 경쟁을 하였을 경우 가장 많은 개수가 들어갈 수 있으며, 반대로 Contention Window이 끝나는 시간까지 경쟁을 하였으면 가장 적은 개수가 들어간다. 즉, 하나의 듀티 사이클 내에서 EXP가 전송될 수 있는 최소 및 최대 홉 수는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$h_{min} = \left\lfloor \frac{\alpha - CW_{max} + 2\beta}{\beta} \right\rfloor, \quad h_{max} = \left\lfloor \frac{\alpha + 2\beta}{\beta} \right\rfloor \quad (5)$$

여기서 h_{min}과 h_{max}는 소스 노드의 경쟁 시간에 따라 EXP가 릴레이 될 수 있는 최소, 최대 홉 수를, CW_{max}는 소스 노드가 전송을 위해 경쟁할 수 있는 최대 시간을 나타낸다. 여기서 h_{min}과 h_{max} 식 안에 2β가 더해진 이유는 ‘홉 연장’으로 인한 추가적인 2홉 릴레이 때문이다. 위에서 언급한 바와 같이, 릴레이되는 홉 수는 소스 노드가 Contention Window 내에서 EXP 전송을 위해 경쟁한 시간에 큰 영향을 받는다. 따라서 한 주기 내에서 h 홉을 가기 위해 소스 노드가 경쟁해야 하는 시간의 범위는 (5) 식을 도출한 동일한 방법으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$CW_v(h) = \min \left(CW_{max}, \left\lfloor \frac{10^3 (\alpha - (h-2) \cdot \beta)}{10^3} \right\rfloor \right) \quad (6)$$

$$CW_f(h) = \max \left(0, \left\lfloor \frac{10^3 (\alpha - (h-1) \cdot \beta + \epsilon)}{10^3} \right\rfloor \right) \quad (7)$$

여기서 $CW_u(h)$ 와 $CW_l(h)$ 는 한 주기 내에 h 홉을 릴레이하기 위해 소스 노드가 경쟁해야 할 최소, 최대 시간을 나타내며, ϵ 는 오프셋이다 ($\epsilon \ll 1$).

소스 노드는 경쟁 시 $[0, CW_{max}]$ 의 범위 내에서 균일한 확률로 경쟁을 하기 때문에, 위에서 도출한 홉 수의 범위와 경쟁 시간의 범위를 통하여 n 번째 주기에서 패킷을 h 홉만큼 전송할 확률은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P(h_n) = P(h) = \frac{CW_u(h) - CW_l(h) + 10^{-3}}{|CW|} \quad (8)$$

여기서 $|CW|$ 는 Contention Window의 크기를 나타내며, $CW_{max} + 10^{-3}$ 의 값을 갖는다. 위 식에서의 동등 관계는 경쟁 시간과 소스 노드가 거친 주기의 홉수 간의 독립성 때문에 성립한다. 수식 (8)을 이용하면 EXP와 데이터 패킷이 n 주기 안에 L 홉만큼 전송될 확률을 다음과 같은 확률 함수로 구할 수가 있다.

$$f_L(n) = \begin{cases} \sum_{h_1} \dots \sum_{h_n} \left\{ P(h_n \geq L - \sum_{y=1}^{n-1} h_y) \cdot \prod_{x=1}^{n-1} P(h_x) \right\} & n \geq 2 \\ P(h_n \geq L) & n = 1 \end{cases} \quad (9)$$

여기서 h_n 의 값은 h_{min} 과 h_{max} 사이의 값으로 한정된다. 정확한 전송 지연 시간을 계산하기 위해서는 위와 같은 확률 함수뿐만 아니라, 마지막 주기에서 수신지까지의 평균 잔여 홉 수 또한 계산되어야 한다. 여기서 평균 잔여 홉 수는 수신지까지의 홉수와 마지막 듀티 사이클에 들어가기 이전까지 전송한 평균 홉수 간의 차이와 같다. 따라서 (8)과 (9)를 이용하면, L 홉만큼 떨어진 수신지까지의 평균 잔여 홉수인 R_L 을 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$R_L = L - E \left(\sum_{n=1}^{\hat{n}-1} h_n \right) = L - \left(\sum_{h_n} h_n \cdot P(h_n) \right) \left(\sum_{n=1}^{\hat{n}-1} n f_L(n) - 1 \right) \quad (10)$$

여기서 \hat{n} 은 수신지까지 데이터 패킷을 전송하는데 소요되는 주기의 홉수를 나타낸다. 수신지까지 데이터 패킷을 보내는데 소요되는 평균 지연 시간을 최종적으로 구하기 위해서는 다음 세 가지 요소를 고려해야만 한다. 첫째, 수신지까지 패킷을 보내

기 위해서는 여러 번의 듀티 사이클을 거쳐야만 한다. 둘째, 모든 노드가 슬립 기간에 있을 때 패킷이 생성되었을 경우 어느 정도의 지연 시간 후에야 전송이 가능하다. 마지막으로, 최종 수신지까지 데이터를 전달하기 위해서는 마지막 듀티 사이클에서 잔여 홉수만큼 전송을 해야 한다. 이 세 가지 요소들을 고려하며, 식 (9)와 (10)을 이용하면 평균 전송 지연 시간은 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$D_L = \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) T_{cycle} \cdot f_L(n) \right\} + D_{tx} + \gamma \cdot R_L = \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) T_{cycle} \cdot f_L(n) \right\} + \frac{T_{sleep}}{2} + \gamma \cdot R_L \quad (11)$$

여기서 T_{cycle} 과 T_{sleep} 은 각각 주기의 길이, 슬립 기간의 길이를 나타내며, D_{tx} 는 다음에 생성된 EXP를 소스 노드가 전송하는데 소요되는 평균 지연 시간을 나타낸다.

식 (11)의 첫 번째 항은 첫 번째 요소로부터 발생하는 평균 지연 시간을 나타낸다. 두 번째 항의 경우, EXP가 슬립 기간 동안에 생성되었을 경우 생기는 지연 시간이므로, 이의 평균 시간 D_{tx} 는 $T_{sleep}/2$ 의 값을 갖는다. 마지막으로 세 번째 항은 잔여 홉수를 전송하는 데 소요되는 시간을 나타낸다.

IV. 모의실험 결과

HE-MAC의 성능 평가를 위한 모의실험은 2.29 버전의 ns-2 프로그램을 사용하였다. 평균 전력 소모량과 평균 전송 지연 시간을 RMAC과 비교하여 성능 평가를 하였다. 모든 모의실험은 1%의 듀티 사이클을 이용하였다. 성능 평가 외에도 수학 분석

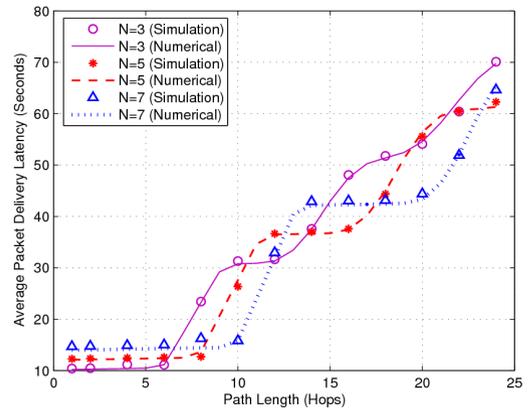


그림 5. HE-MAC에 관한 모의실험과 수학 분석 비교

의 정확성을 확인하기 위해 다음과 같이 N값에 따라 데이터 기간의 길이를 바꾸면서 실험하였다.

$$T_{data} = CW_{max} + DIFS + durEXP + N \cdot (SIFS + durEXP) \quad (12)$$

4.1 수학적 분석과의 비교

모의실험은 노드 간에 150m 떨어진 연쇄 토폴로지를 이용하였다. 평균 전송 지연 시간을 수신지까지의 홉 수와 N값을 변화시키면서 수학 분석의 정확성을 확인하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 HE-MAC의 평균 전송 지연 시간에 대한 수학 분석과 모의실험 결과는 정확히 일치함을 알 수가 있다.

4.2 연쇄 토폴로지에서의 성능 평가

본 소단원에서는 RMAC과 HE-MAC의 평균 전력 소모량과 평균 전송 지연 시간을 비교한다. 모의 실험에서 N값은 4로 설정되었으며, 연쇄 토폴로지의 길이를 1에서 24홉으로 변화시키면서 실험을 하였다.

1) 평균 전력 소모량 : 그림 6은 RMAC과 HE-MAC의 평균 전력 소모량을 보여준다. HE-MAC은 홉 연장과 적응적 슬립으로 인한 더 낮은 전력 소모량을 갖는다. HE-MAC은 RMAC에 비해 최대 30.5%, 평균적으로 20.6% 감소된 전력 소모량을 갖는다.

2) 평균 전송 지연 시간 : 그림 7을 통해 알 수 있듯이, HE-MAC은 RMAC에 비해 더 낮은 평균 전송 지연 시간을 갖는다. HE-MAC은 홉 연장을 통해 RMAC에 비해 최대 44.4%, 평균적으로 22.8% 감소된 전송 지연 시간을 갖는다.

4.3 랜덤 토폴로지에서의 성능 평가

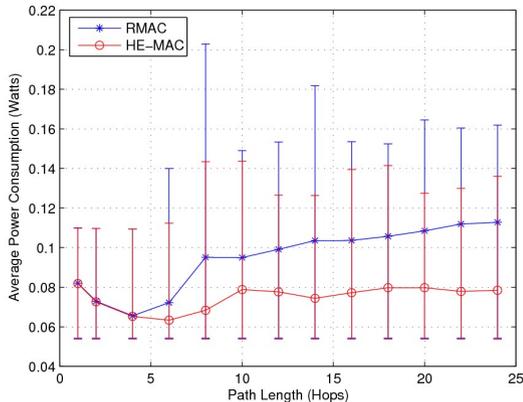


그림 6. 연쇄 토폴로지에서의 평균 전력 소모량 비교

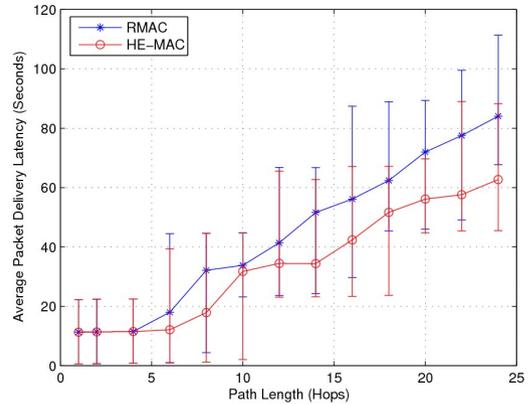


그림 7. 연쇄 토폴로지에서의 평균 전송 지연 시간 비교

노드들이 임의적으로 배치된 랜덤 토폴로지를 통해 HE-MAC의 성능을 평가하였다. 300개의 노드가 2500m×2500m의 네트워크에 배치된 토폴로지를 고려하였으며 N의 값은 4로 설정하였다. 그림 8을 통해 HE-MAC이 RMAC에 비해 평균 전송 소요 시간이 크게 감소함을 확인할 수가 있다. HE-MAC의 평균 전송 소요 시간은 RMAC에 비해 수신지까지의 홉 수에 따라 최대 48%까지 감소할 수 있다. 또한, 적응적 슬립을 통하여 전력 소모량이 크게 감소하였다. 랜덤 토폴로지에서도 HE-MAC의 평균 전력 소모량과 평균 전송 지연 시간은 표 1과 같이 정리된다.

표 1의 결과를 보면 알 수 있듯이, 랜덤 토폴로지에서는 연쇄 토폴로지일 때에 비해 전송 지연 시간 감소율은 비슷하지만 전력 소모량의 감소율은 약간 더 낮다. 이는 랜덤 토폴로지 하에서 그림 2에 나타난 D'같은 노드들이 더 많이 존재하기 때문

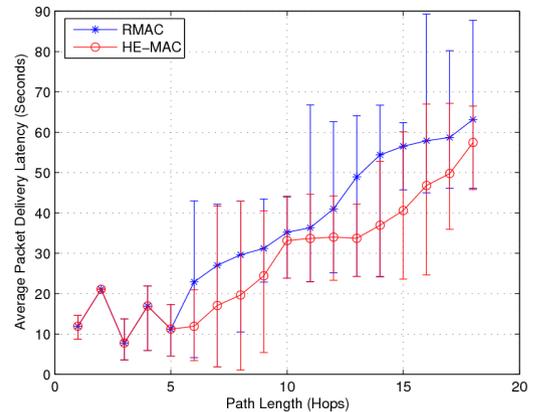


그림 8. 랜덤 토폴로지에서의 평균 전송 지연 시간

표 1. 랜덤 토폴로지에서의 모의실험 결과

	전력 소모량 (W)	전송 지연 시간 (초)
RMAC	0.069	35.10
HE-MAC	0.059	28.23
감소율	14.3%	19.6%

이다. 이러한 상태의 노드들이 증가함으로써 랜덤 토폴로지에서의 평균 전력 소모량 감소율은 연쇄 토폴로지에서의 성능 감소율에 비해 낮다.

4.4 패킷 역전 현상의 영향

본 소단원에서는 패킷 역전 현상이 RMAC과 HE-MAC에 미치는 영향에 대해 알아본다. 모의실험은 13 홉의 연쇄 토폴로지서 이루어졌다. 패킷 역전 현상은 패킷 발생률이 높을 때에 발생할 확률이 높다. 그림 9는 패킷 발생률이 각 MAC 프로토콜의 평균 전력 소모량에 어떤 영향을 미치는지 보여준다. 패킷 발생률이 0.02 이하일 경우 RMAC과 HE-MAC의 전력 소모량은 큰 변화가 나타나지 않는다. 이 구간 내에서 HE-MAC은 RMAC에 비해 21.5% 감소된 전력 소모량을 갖는다. 이는 데이터 기간 내에서의 불필요한 전력 소모가 감소되었기 때문이다.

패킷 발생률이 0.02 이상으로 증가하였을 때에 RMAC은 HE-MAC에 비해 매우 큰 전력 소모량을 갖는다. 이는 패킷 역전 현상에 의해 패킷의 순서가 바뀌었을 뿐만 아니라, 슬립 기간 내에서의 불필요한 전력 소모가 발생하였기 때문이다.

이에 반해, HE-MAC은 적응적 슬립을 통하여 한 듀티 사이클 내에서 하나의 EXP만을 릴레이하게 된다. 즉, 높은 패킷 발생률로 인한 패킷 역전 현상

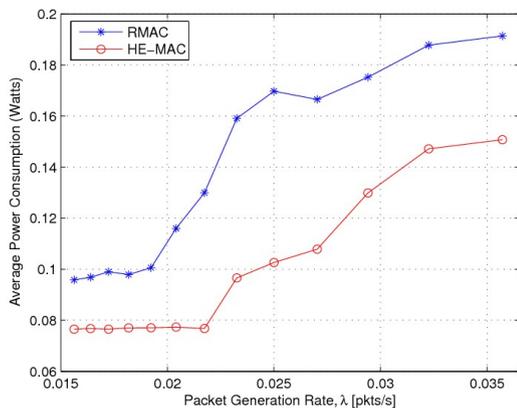


그림 9. 패킷 발생률에 따른 평균 전력 소모량

을 방지한다. 모의실험 결과에서도 알 수 있듯이, HE-MAC은 RMAC에 비해 전력 소모량을 최대 40.9%, 평균적으로 28.8% 감소시킨다.

V. 결론

본 논문에서는 홉을 연장하는 HE-MAC(Hop-Extended MAC) 프로토콜을 제안하였다. HE-MAC은 EXP (Explorer) 내의 정보와 RTR (Ready-to-Receive) 상태를 이용하여 슬립 기간이 시작하는 시점 넘어서까지 릴레이를 연장하였다. 이러한 ‘홉 연장’을 통하여 HE-MAC은 RMAC에 비해 매우 낮은 전송 지연 시간을 나타냈다. 더불어, 적응적 슬립을 통해 전력 소모량을 감소시켰을 뿐만 아니라, 패킷 역전 현상을 해결하였다. 또한, HE-MAC의 평균 전송 지연 시간을 수학적으로 분석하여 모의실험 결과와 비교하였다. 끝으로 HE-MAC의 전력 소모량에 대한 수학적 분석 및 TinyOS를 이용한 프로토콜 구현은 향후 과제로 남겨둔다.

참고 문헌

- [1] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks,” in *SenSys 2004* pp. 95-107.
- [2] Wei Ye, John S. Heidemann, and Deborah Estrin, “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *INFOCOM 2002* pp. 1567-1576, Jun 2002.
- [3] Tijs van Dam and Koen Langendoen, “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *SenSys 2003* pp. 171-180, Nov 2003.
- [4] Shu Du, Amit Kumar Saha, and David B. Johnson, “RMAC: A Routing-Enhanced Duty-Cycle MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *INFOCOM 2007* pp. 1478-1486, May 2007.
- [5] Qun Li, and Daniela Rus, “Global Clock Synchronization in Sensor Networks,” in *INFOCOM 2004*.
- [6] Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, and Mani B. Srivastava, “Timing-Sync Protocol for Sensor Networks,” in *SenSys 2003*. pp. 138-149.

조 경 탁 (Kyong-Tak Cho)

준회원



2008년 연세대학교 전기 전자
공학부 학사

2008년~현재 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석사 과정
<관심분야> 센서 네트워크

박 세 응 (Saewoong Bahk)

종신회원



1984년 서울대학교 전기공학과
학사

1986년 서울대학교 전기공학과
석사

1991년 University of Pennsylvania
박사

1991년~1996년 AT&T Bell Lab.

1994년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 차세대 무선 네트워크, 네트워크 보안