DBpia

Stationary 센서 네트워크 환경에서 비동기식 Duty-Cycle MAC의 에너지 효율과 지연시간 성능향상 방안

정회원 이 재 호*, 종신회원 허 경**, 엄 두 섭***°

A Enhanced Theory for Reducing Energy Consumption and end-to-end Delay in Stationary Wireless Sensor Network

Jae-ho Lee* *Regular Member*, Kyung Hur**, Doo-seop Eom***° *Lifelong Members*

요 약

센서 네트워크 환경에서 이벤트 감지나 침입탐지 등의 응용 분야에 사용되는 비동기식 MAC은 주기적 Control Frame이 발생하지 않기 때문에 에너지 효율이 높지만, 동기화 수행의 부재로 인한 전송 지연시간 문제가 발생하며, 전송 데이터량이 증가할 경우 에너지 효율도 감소할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 비동기식 MAC의 에너지 효율을 유지하면서 일시적인 동기화 기법을 수행하여, 전송 지연시간 문제와 멀티 홉 경로상의 QoS를 보장하기 위한 방안을 제안한다. 또한 기존 비동기식 MAC의 에너지 효율을 크기 향상시킨 X-MAC과의 성능 비교분석을 위한 시뮬레이션 결과를 제시하여, 제안하는 알고리즘의 효율을 분석한다.

Key Words : MAC, Duty-Cycle, Asynchronous MAC Protocol, Wireless Sensor Networks, Wireless Communications

ABSTRACT

Typically, asynchronous MAC protocols are being used to monitor a significant facility for certain events or to detect an intrusion in Wireless Sensor Networks (WSN). And it can give a lot of advantages in that there is no periodic control frame. However, it has the problem of long end-to-end delay time per link caused by no precedent time synchronization, and it is not profitable at infrequent and subsequent event such as fire and intrusion. This paper introduces various wakeup period schemes and proposes a new asynchronous MAC protocol that can achieve approximated wakeup time synchronization. In this protocol, the new scheme, named Virtual Tunneling through the arbitration of wakeup time at each node, is introduced to improve the end-to-end delay and to provide enhanced QoS in multi-hop topologies with low power consumption. Additionally, it achieves protection of Virtual Tunnel by using NAV scheme. We have evaluated this protocol through comparison with the X-MAC, which is the energy efficient MAC protocol in WSN. Finally, we have evaluated experimental implementation results using the Testbed in real wide military environments.

Ⅰ. 서 론

유비쿼터스 네트워크의 다양한 연구는 실제 생활 속에서의 무한한 필요성과 함께 활발히 진행되고 있으며, 이에 대한 통신 분야인 Wireless Personal Area Network (WPAN) 역시 점진적으로 발전하고 있다.

※ 본 연구는 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 지원을 받아 수행되었습니다.
* 고려대학교 전기전자전파공학과 미래정보망 연구실(izeho75@korea.ac.kr), ** 경인교육대학교 컴퓨터교육과
*** 고려대학교 전기전자전파공학과(eomds@korea.ac.kr), (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2010-04-174, 접수일자 : 2010년 4월 15일, 최종논문접수일자 : 2010년 9월 14일

www.dbpia.co.kr

Wireless Wide Area Network (WWAN)[3], Wireless Local Area Network (WLAN)[2] 등의 기존 통신망에서는 통신 거리와 높은 수율(throughput)이 요구되는 반면, WPAN에서는 에너지 효율과 멀티 홉 전송 및 전송 지연시간 문제 등이 가장 핵심적인 연구 주제로 자리 잡고 있으며, 최근 주요 시설물 관리 지역이나 군사용 침입탐지 시스템 등의 응용분야에서 센서 네트워크 기술을 사용하는 사례를 찾아볼 수 있다[4][5]. 센서 네트워크는 설치가 용이하고 유지보수의 효율성이 높기 때문에 위와 같은 응용분야에 적합하며, 운용상의 경제성을 높이기 위하여 높은 에너지 효율을 필수적으로 요구한다. 이러한 센서 네트워크의 에너지 효율을 높이기 위한 방법은 여러 방면에서 활발히 연구되고 있으며, MAC 계층에서는 Duty-Cycle 방식이 가장 일반적이다. 이는 모든 노드가 sleep과 wakeup을 반복하여 수행하는 방식을 의미하며, 크게 동기식[6,7]과 비동기식[8-10]으로 구분된다.

동기식 MAC은 노드 간 상호 wakeup time과 Duty-Cycle 주기를 동기화 시키는 방식을 의미하며 S-MAC[6], T-MAC[7] 등이 대표적이다. S-MAC은 각 노드가 자신의 이웃노드들과 wakeup time을 동기화하고, RTS/CTS를 통하여 각 노드가 데이터 전송 전에 채널을 예약함으로써 overhearing 문제를 해결하였다. 또한 T-MAC은 S-MAC 에서의 wakeup time을 가변적으로 운영하여 에너지 효율을 높였다. 하지만 이러한 동기식 MAC 방식은 wakeup time 동기화로 인하여 최소 전송 지연시간을 보장하지만, Duty-Cycle 마다 전송하는 control frame으로 인한 에너지 소모가 불필요하게 발생한다.

한편, 비동기식 MAC은 동기식에 비하여 주기적 전송을 수행하지 않기 때문에 전력소모 측면에서는 유리하다. 또한 모든 노드는 자신만의 Duty-Cycle을 가지며 이를 토대로 주기적으로 sleep / wakeup을 반복하여 에너지 소모를 줄이고, 비컨(beacon) 전송, 시각동기 등의 동기식 메커니즘을 사용하지 않음으로써 불필요한 control frame 전송횟수를 줄였다. 하지만, 노드 간 wakeup time을 서로 알지 못하기 때문에 link 당 최대 Duty-Cycle period 만큼의 전송 지연시간이 발생하게 된다.

WSN에서 현존하는 비동기식 MAC은 대표적으로 B-MAC[8], Wise-MAC[9], X-MAC[10] 등이 있다. B-MAC[8]은 기존 비동기식 MAC의 문제점을 보안하기 위하여, 실제 데이터를 전송하기 전에 프리앰블(preamble)을 우선 전송함으로써, 상대 노드의 wakeup time을 파악하기 때문에 실제 데이터의 재전송 횟수를 줄였다. B-MAC에서 발생하는 프리앰블의 에너지 소모량을 감소시키기 위해 제안된 Wise-MAC[9]은 이웃 노드의 wakeup schedule을 학습하고, 이를 토대로 프리앰블 전송 시작 시간을 예측하기 때문에, 프리앰블 전송 시 발생하는 에너지 소모량를 줄이고 주기오차를 확률적으로 낮추었다.

X-MAC[10]은 B-MAC과 Wise-MAC을 근간으로 하는 MAC으로서, Short-Preamble과 Address Filtering, Early ACK를 사용하여 에너지 효율을 향상시켰다. Short-Preamble 방식은 B-MAC의 프리앰블 전송 방식을 짧게 나누어 여러 번 전송하는 방법으로, 프리앰블간의 송신 간격만큼 에너지 효율을 증가시켰으며, Address Filtering은 각 노드가 Short-Preamble을 수신하기 위한 wakeup time을 줄이는 방법으로, Short-Preamble에 Destination Address를 포함시켜 수신중인 노드로 하여금 자신의 주소와 일치하지 않을 경우, 전체 프리앰블을 수신하지 않고 빠른 Sleep 상태로 진입하게 하여 전력 소모량를 최소화하였다. 마지막으로 Early ACK는 송신 노드가 해당 수신 노드의 Wakeup 상태를 미리 알고 프리앰블에 대한 ACK 전송 후 데이터 전송을 실시하는 방법으로써, 기존의 ACK 메커니즘과는 다른 방법을 사용하였다. 기존 Wise-MAC에서는 상대 노드의 Wakeup 상태를 파악하지 못하기 때문에 불필요한 데이터 재전송이 발생하였으나, X-MAC에서는 프리앰블 전용의 Early ACK를 이용하여 데이터 프레임의 ACK 대기 시간을 줄여 전송효율을 높이고 에너지 소모량을 감소시켰다.

그러나, 이러한 X-MAC에서도 비동기식 MAC의 고질적인 문제인 전송 지연시간 문제를 해결하지 못했다. X-MAC을 포함한 대부분의 비동기식 MAC에서는 상대 수신노드의 wakeup 상태를 알지 못하기 때문에 전송해야 할 데이터가 링크당 최대 duty cycle 크기만큼 전송 지연시간이 발생하며, 이는 침입 탐지나 감시경계 등의 센서 네트워크 응용 서비스에서는 커다란 단점으로 남을 수 있다.

이에 본 논문에서는 Stationary WSN 환경에서 MAC 연구에 초점을 두고, 기존 비동기식 X-MAC을 활용하여, 비동기식 MAC의 가장 큰 단점인 전송 지연시간 문제를 해결하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하였으며, Virtual Tunneling 방식을 통해 QoS를 보장하였다. 또한 제안하는 방식에서는, X-MAC의 장점인 Address Filtering 방식은 그대로 사용하고 Duty-Cycle의 유동적 운영을 통한 에너지 절감을 향상시켰다.

www.dbpia.co.kr

Ⅱ. 이벤트 기반의 비동기식 MAC 프로토콜

2.1 제안하는 비동기식 MAC 방식

제안된 이벤트 기반의 Duty-Cycle MAC 방식은 모든 노드가 주기적으로 Sleep / Wakeup 모드를 반복하여 수행하며, 이벤트가 발생하지 않을 경우 각 노드들은 동기를 위한 control frame을 송신하지 않는다. 이는 모든 노드가 이웃 노드의 주기를 알지 못하는 비동기식 MAC을 의미하며, 위에서 설명한 바와 같이 감시경계 등의 이벤트 발생빈도가 매우 낮은 환경에서는 동기식 MAC에 비하여 현저한 에너지 절감효과를 얻을 수 있다. 그림 1은 이벤트가 발생하여 한 Node가 전송할 데이터가 생길 경우에 한하여 일반적으로 데이터를 송신하는 흐름을 나타낸 것이다.

그림 1과 같이, 먼저 송신노드는 수신노드의 wakeup time을 알지 못하기 때문에 ACK를 수신할 때까지 데이터를 Retransmission Interval Delay 간격으로 지속적으로 송신한다. 이때 송신노드는 모든 데이터를 전송할 때 CSMA/CA방식과 Random Back-off Delay를 사용하며, 수신노드는 송신노드와 독립적으로, Duty Cycle 간격으로 Sleep / Wakeup 모드를 반복 수행하고, Wakeup 모드에서 데이터를 수신하면 곧바로 ACK를 전송한다.

기존의 X-MAC에서는 대상 노드의 상태를 알아내기 위하여 프리앰블을 사용하였으나, 이러한 프리앰블을 통한 방식은 RF Tranceiver에서의 지원이 필요하기 때문에 H/W 변경이 불가피하다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 비동기식 MAC 방식에서는 H/W 변경 없이 적용성을 확보하기 위하여[12] 실제 이벤트 데이터를 그대로 이용한다. 이는 즉, Layer1 에서의 RF chip의 변경이 불필요하기 때문에 현존하는 Tranceiver를 그대로 사용할 수 있다는 장점을 갖는다. 물론 실제 전송할 데이터 용량이 클 경우, 대량의 데이터를 불필요하게 재전송하여 에너지 소모량을 증가시킬 가능성

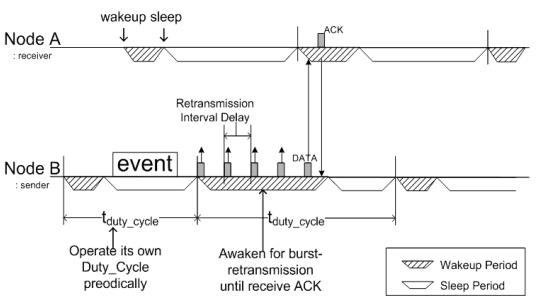

그림 1. 제안하는 비동기식 MAC의 동작

이 존재하지만, 일반적인 센서 네트워크 환경에서 요구되는 데이터 크기는 매우 제한적일 확률이 높기 때문에, 이 경우 수 있다.

일반적인 비동기식 MAC에서는, 모든 노드는 Wakeup와 Sleep 모드를 반복하며 Wakeup 모드에서 데이터를 수신할 경우에는, 수신이 완료 될 때까지 Wakeup 모드를 유지한다. 하지만 전송중인 데이터의 목적지 주소와 관계없는 노드들은 패킷 수신으로 인한 에너지 소모가 발생하기 때문에, 제안하는 MAC 방식에서는 X-MAC에서의 Address Filtering을 기반으로, 수신된 MAC 헤더 내부의 목적지 주소가 자신이 아닌 경우 전체 패킷을 수신하지 않고 Early-Sleep을 실시하여 전력소모를 줄인다.

2.2 Variable Wakeup Period in Duty-Cycle

Duty-Cycle방식의 비동기식 MAC 프로토콜에서는 Duty-Cycle과 Wakeup Period에 의하여 수율(throughput)과 에너지 소비량이 결정되며, 일반적으로 이 두 가지는 Trade-off 요소가 된다. 하지만 실제 사용 환경에 따라 위 두 가지 요소에 대한 중요도가 달라질 수 있고, 이러한 관점에서 볼 때 가변적인 Wakeup Period는 상당한 이득을 얻을 수 있다. 예를 들어, 온습도 등의 센싱 데이터를 주기적으로 관측하는 센서네트워크 에서는 전송량이 정해져 있기 때문에 수율 보다는 에너지 효율이 중요하고, 침입탐지 시스템과 같은 응용에서는 평상시 전송 데이터가 극도로 적고 특정 이벤트 발생 시에만 전송량이 다발적으로 증가할 가능성이 크기 때문에 상황에 따라 수율과 에너지 효율 성능이 각각 다르게 요구된다. 이러한 문제로 인하여 제안하는 MAC 프로토콜에서는 MAC level의 주기적 파라미터 관측을 통해 네트워크 환경의 동적 상황을 고려하고자 한다.

제안하는 MAC 방식에서 송신노드는 Duty-cycle 내의 Wakeup Period에서는 데이터를 전송하기 전에 Carrier Sensing을 수행하기 위하여 random back-off delay를 기다린 후, channel 상황을 파악하기 위하여 Clear Channel Assessment (CCA)를 검사한다. 이때 CCA값이 “busy”일 경우 busy-state Hit Count (BHC) 값을 증가시키고, 반대로 CCA 값이 “idle”일 경우 BHC를 감소시킨다. 모든 노드는 이러한 BHC를 관리하며, Duty-Cycle 가변성을 위한 최대 임계값과 최소 임계값을 보유한다. 이러한 BHC는 운영 중 특정 임계값을 초과할 경우 Wakeup Period를 2배 증가시킨 후 0으로 초기화시키고, 반대의 경우는 $\frac{1}{2}$로 감소시킨 후 초기화 한다.

www.dbpia.co.kr

먼저 $I\{A\}$를 식(1)과 같이 정의하고,

$$I\{A\} = \begin{cases} 1 & (A\ is\ true) \\ 0 & (A\ is\ |true) \end{cases} \quad (1)$$

Wakeup Period의 가변성을 위한 BHC의 최대 임계값을 $K_{\max}$, 그 반대를 $K_{\min}$으로 구분한다.

$$K_{\max} > K_{\min} \quad (K_{\max} > 0, K_{\min} < 0) \quad (2)$$

n번째 Wakeup Period에 대한 Duration을 D_n이라고 정의하면 Duty-cycle 내의 Wakeup Period는 식(3)과 같이, MIMD (Multiple Increase / Multiple Decrease) 방식으로 변동시킨다.

$$D_{n+1} = D_n \cdot 2^{I\{BHC_n > K_{\max}\} - I\{BHC_n < K_{\min}\}} \quad (3)$$

또한 BHC값은 식(4)와 같이 운영된다.

$$BHC_{n+1} = \begin{cases} BHC_n + 1 & (CCA_n\ state\ is\ set) \\ BHC_n - 1 & (CCA_n\ state\ is\ clear) \\ 0 & (BHC_n > K_{\max} | BHC_n < K_{\min}) \end{cases} \quad (4)$$

이 때, $I\{BHC_n > K_{\max}\}$와 $I\{BHC_n < K_{\min}\}$는 상호 배타적이므로 동시에 만족할 수는 없으며, 전체 Duty-Cycle 에서의 최소 Wakeup Period가 보장되어야 하기 때문에 Wakeup Period는 특정 범위 내에서 한정되어지며, 본 논문에서는 전체 Duty-Cycle의 2%를 권장한다.

가변 Wakeup Period는 기본적으로 수신 성능을 향상시키기 위한 방식이며, 따라서 수신측면에서의 에너지 효율과 수신 성공률 간의 Trade-off 요소를 효과적으로 결정하기 위하여 제안하였다. 가변 Wakeup Period 방식이 근본적으로 수신 성능을 해결하기 위한 방식임에도 불구하고, 송신 측면에서 고려하는 이유는, 모든 수신절차에 ACK와 같은 송신 기능이 포함되어 있기 때문이다. 한편, 송신 노드는 데이터 송신 요구가 발생한 시간 이후의 Wakeup Period에서 즉시 전송하며, 이때 수신 노드로부터 ACK를 받기 전까지는 Wakeup Period 상태를 유지시킨다.

Ⅲ. 전송 지연시간 감소를 위한 QoS 향상 알고리즘

X-MAC, Wise-MAC 등과 같은 비동기식 MAC은 상대노드의 응답을 수신할 때까지 패킷을 계속적으로 전송하여 상호간 Wakeup Period를 맞춘다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 주기적 Control Frame 전송을 제거하여 에너지 효율을 증가시키는 장점이 있지만, 불필요한 재전송을 야기 시켜 데이터가 많을 경우 오히려 에너지 효율이 악화될 수도 있다. 제안하는 비동기식 MAC 방식에서는 Network Layer와의 Cross Layer 기법을 활용한 Synchronize on each Neighbor's Cycle (SNC) 기능과 Synchronize on Tunneling Cycle (STC) 기능을 통하여 이러한 문제를 해결하였다.

3.1 Synchronization on each Neighbor's Cycle (SNC) 기능

일반적으로 WSN 환경에서는 Network Layer 상에서 형성되는 토폴로지가 존재한다. 이 토폴로지는 tree 형태나 mesh형태로 존재하게 되는데, 이들은 멀티 홉 환경에서 데이터 전송을 위한 라우팅 테이블이 존재하고, 이는 노드 당 통신가능 거리 내에 위치하는 Neighbor Node List를 기반으로 생성된다. 이러한 Neighbor Node List 정보 내에는 Wakeup Time과 Duty-Cycle 정보가 포함되며, MAC Layer 에서는 이와 같은 두 가지 정보를 활용하여 양단간 Wakeup Time의 상대시각 오차를 줄이고 근사치 기반 동기화 기능을 수행할 수 있다. 이러한 동기화는 시각 동기화 알고리즘 기반의 동기식 MAC과 같은 정확한 동기화를 수행할 수는 없다. 하지만 주기적 동기신호 없이 재전송 횟수를 줄여서 비동기식과 동기식 MAC의 장점을 모두 보유하는 것이 가능하다.

일반적으로 Registration 과정을 완료한 노드는 Neighbor Node List와 함께 라우팅 정보를 보유하게 되지만, 비동기식 MAC 특성상 이웃노드의 Duty-Cycle 정보는 알지 못한다. 그 후, 송신 노드가 정보를 전송할 때 대상으로부터 ACK를 수신하기 전까지는 계속 재전송 과정을 수행하는데, 이때 MAC 헤더 내에 Retransmission Interval (RI), Retransmission Count (RC), Duty-Cycle 정보를 포함시킨다. 이 재전송 데이터는 수신 노드가 Wakeup 상태가 될 때까지 진행되며, 수신 측에서는 이 세 가지 정보를 이용하여 해당 데이터가 자신이 Wakeup 되기까지 얼마나 오랫동안 재전송되었는지를 파악한 후, Neighbor Node List 내에 정보를 저장한다.

그림 2에서 노드C는 자신의 Wakeup Time 에서 데이터 전송요구가 발생하여 노드A로 전송을 하기 시작한다. 이때 노드A는 Sleep Period 상태이므로 수신

www.dbpia.co.kr

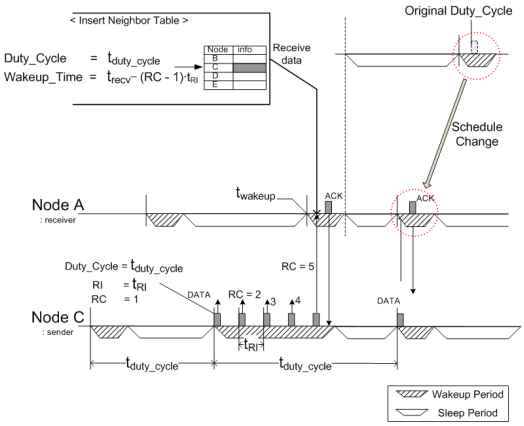

그림 2. SNC 동작절차

이 불가능하여 ACK를 전송하지 못하기 때문에, 노드C는 노드A의 wakeup time 까지 데이터를 재전송한다. 이것은 비동기 Duty-Cycle MAC의 일반적인 형태로, 상대 노드의 Wakeup Schedule을 알지 못하기 때문에 반복 재전송이 불가피한 상태이다. 하지만 제안하는 MAC에서는 노드C가 노드A로 데이터 전송 시 MAC Layer의 헤더에 그림과 같은 Duty-Cycle 정보와 RI, RC값을 추가하여 전송함으로써 노드A가 노드C의 Wakeup Time을 계산할 수 있게 해준다. 우선 Duty Cycle은 노드C의 주기인 t_{duty_cycle}이 되고, RI는 데이터를 재전송하는 주기인 t_{RI}값이 된다. 그리고 RC는 재전송 횟수에 대한 카운터이므로, 첫 전송인 1부터 순차적으로 증가시킨다. 그 후 수신측 노드A가 Wakeup Period에 진입하여 5번째 재전송 데이터를 수신하게 되면, 자신의 Neighbor List Table 내에 상대 노드 Schedule 정보를 기록하게 되는데, 이 정보는 대상 Node의 Wakeup/Sleep 주기인 Duty_Cycle 과 언제 깨어나는지를 의미하는 Wakeup Time으로 구성된다. 물론 Duty_Cycle과 Wakeup Time 정보는 위 그림에서 도출되었듯이 $DUTY_CYCLE = t_{duty_cycle}$, $Wakeup_Time = t_{recv} - (RC-1)t_{RI}$ 형태로 구할 수 있으며, 이때 t_{duty_cycle}는 상대 노드의 재전송 데이터 헤더에 포함된 값이며, t_{recv}는 제일 처음 데이터를 수신한 시각이다. 따라서 노드A가 노드C와 동기화를 진행할 경우, 노드A의 $n+1$번째 Wakeup Time은 식5와 같다.

$$t_{wakeup,n+1} = t_{wakeup,n} + t_{duty_cycle} - (RC-1)t_{RI} \quad (5)$$

노드A는 위와 같은 방법으로 노드C의 예상 Wakeup Time을 알기 때문에, 자신이 노드C의 주기에 맞출 수 있다. 물론 노드A의 Neighbor Node List 내에는 노드C 외에도 다른 노드가 존재하지만, 모두 자신의 1홉 내에 있기 때문에 직접 통신이 가능하므로, 이웃하는 모든 노드의 주기에 직접 맞출 수 있다. 즉, 노드A는 Neighbor Node List 내의 모든 노드들의 Wakeup Time을 위와 같은 방법을 통하여 기록하고, 필요시 이 List를 참조하여 동기화를 수행할 수 있다.

이 방법은 수신 노드가 송신 노드 주기에 맞추는 방법으로써, 단일링크 상에서 에너지 효율을 증가시키는 데 큰 효과가 있다. 하지만 Ad-hoc 라우팅 구조상 이웃 노드가 많아질 수도 있기 때문에, 수신 노드 자신의 Schedule 자체를 변경하게 되면, 모든 이웃노드의 Schedule에 맞춰야 하는 모순이 발생한다. 이렇게 되면 모든 수신 노드는 자신만의 Schedule이 없이 복합적인 Duty_Cycle을 수행함으로써 에너지 효율이 현저히 감소할 가능성이 있다. 이러한 이유로 인하여 SNC는 MAC 자체에서 항상 사용하는 기능이 아니라, Application 등의 상위 Layer 상에서 QoS측면이 요구되는 경우에 국한하여 사용한다.

3.2 Synchronization on Virtual-Tunneling Cycle (STC) 기능

일반적으로 비동기식 MAC은 비주기적 이벤트 감지를 위한 센서네트워크 환경에서 에너지 효율이 높다. 이러한 비주기적 이벤트 감지는 평상시에 주기적으로 데이터를 전송할 필요가 없고, 특정 이벤트가 발생했을 경우에만 데이터를 전송하는 형태로 구축되는 경우가 일반적인데, 이 경우 이벤트 데이터는 보통 여러 개의 데이터가 짧은 시간 동안 연속적으로 생성되는 경우가 많다. 따라서, 일반적인 비동기식 MAC은 홉 당 Wakeup Time이 동기화되지 않기 때문에 동기식에 비하여 홉당 전송 지연시간이 길어진다. 이처럼 짧은 시간 내에 연속적으로 데이터가 발생하는 경우, 멀티 홉 환경에서 라우팅 경로를 일시적으로 고정시키고 MAC에서 Duty-Cycle의 일시적인 동기화를 수행하여, 해당 이벤트 전송경로상의 모든 노드에 대한 QoS를 확보하기 위하여 STC 기능을 사용한다.

STC는 SNC와 알고리즘 상으로 동일하다. 단, SNC는 이웃 노드에 대하여 Wakeup Time 정보를 주기적으로 갱신하고 필요시 동기화를 수행하는 기법인 반면, STC는 멀티 홉 환경에서 적용한 기법이다. 위에서 설명한 바와 같은 일시적이고 연속적인 이벤트 데이터가 발생하는 경우, 토폴로지 상에서 Uplink 경로에 해당되는 모든 노드들의 일시적 Single Path에

www.dbpia.co.kr

대한 QoS를 보장하기 위하여, Virtual Tunneling 기법을 제안한다.

어떠한 데이터가 최종 목적지인 싱크노드까지 전달되려면, 토폴로지 형태에 관계없이, 포워딩되는 중간 노드들의 관점에서는 항상 Linear한 형태로 구성될 수 있다. 이러한 포워딩 노드들의 집합을 대상으로 Virtual Tunnel을 형성하여, 이들 간의 동기화를 구성한다면 에너지 효율과 전송 지연시간의 성능 측면에서 큰 이득을 얻을 수 있다. 그림 3은 Tree-Topology 상에서 A-B-C의 순차적 형태인 2-hop Link가 형성되어 있다고 가정할 때, 즉 노드C가 노드B의 자식노드이고, 노드A가 노드B의 부모노드이며, 노드A와 노드C는 이웃노드가 아닐 경우에 대하여 STC 기법을 이용하여 동기화를 수행하는 모습이다. 먼저 동기화 되지 않은 A, B, C 노드들은 자신들만의 Duty_Cycle에 의하여 Wakeup / Sleep 을 반복하고, 최하위 노드인 노드C에서 다량의 이벤트 데이터가 발생되면, 노드B는 SNC와 동일한 방법으로 $t_{wakeup,n+1}$을 구하고, 자신의 Duty_Cycle Schedule을 노드C에 동기화시킨다. 그리고 노드C로부터 수신한 데이터를 노드A로 전달할 때, 수신된 RC 값을 추가적으로 증가시켜 전달하게 된다. 또한 최종적으로 노드A가 수신한 RC값은 노드C로부터 시작된 값이기 때문에 SNC와 동일한 형태로 $t_{wakeup,n+1}$을 계산하여도 노드A는 2-hop 거리의 노드C와 동기화를 진행할 수 있다.

이렇게 하여 토폴로지상의 모든 포워딩 노드들은 연속적인 특정 이벤트들에 대하여 Virtual Tunnel을 형성할 수 있는데, 물론 여기에도 오차는 존재한다. 그림 3에서의 τ_{error}는 STC 동기화의 오차를 의미하며, 이 값은 중간 노드인 노드B의 ACK 수행에 사용

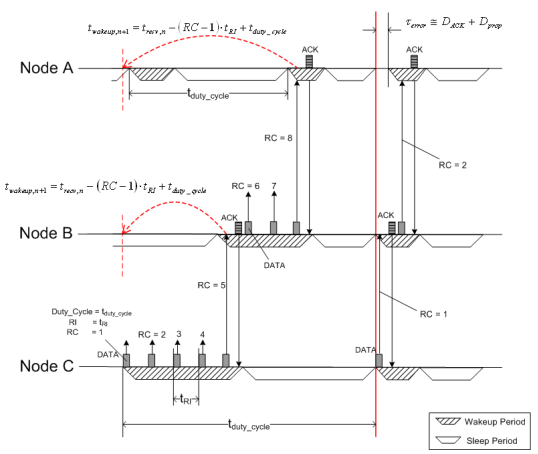

그림 3. STC 동작절차

되는 지연시간인 D_{ACK}와 노드간 거리에 따라 증가하는 Propagation Delay를 의미하는 D_{prop}로 구성된다. 먼저, D_{prop}는 정밀한 시각 동기화 알고리즘을 사용해야 예측할 수 있기 때문에 제안하는 MAC 방식에서는 고려하지 않으며, 동기화 후의 데이터 전송 시에도 ACK 과정을 통한 하위노드의 수행시간이 존재하기 때문에 D_{ACK}에 대한 영향은 크지 않다. 즉, 노드A와 B의 $n+1$번째 Wakeup Time인 $E_B[t_{wakeup}]$은 식6과 같고, 노드A의 $n+1$번째에 실제 데이터를 수신하게 될 시간은 식7과 같다.

$$\begin{aligned} E_B[t_{wakeup,n+1}] &= E_A[t_{wakeup,n+1}] - \tau_{error} \\ E_A[t_{wakeup,n+1}] &= E_B[t_{wakeup,n+1}] + D_{ACK} + D_{prop} \end{aligned} \quad (6)$$

$$E_A[t_{recv,n+1}] = E_B[t_{wakeup,n+1}] + D_{ACK} \quad (7)$$

따라서, 노드A의 수신시 발생하게 될 실제 오차 ERR_{recv}는 식8과 같이 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} ERR_{recv} &= E_A[t_{recv,n+1}] - E_A[t_{wakeup,n+1}] \\ &= D_{prop} \end{aligned} \quad (8)$$

이때, 일반적인 센서 네트워크 환경에서는 노드별 통신 가능 거리가 200미터 이내이기 때문에, $D_{prop} \cong 667_{nsec}$정도가 되며, 이미 언급된 것처럼 제안하는 MAC 방식에서는 Propagation Delay를 고려하지 않기 때문에, 노드A의 수신시 발생하는 실제 오차는 거의 없다.

STC는 초기 이벤트 데이터에 대한 효율은 기대할 수 없지만 이와 같은 방법으로 두 번째 데이터 전송부터는 큰 이득을 얻을 수 있으며, 비주기성 이벤트 특성상 발생하는 데이터는 연속성일 확률이 높기 때문에, 비동기식 MAC에서의 STC 효과는 크다.

3.3 Protection of Virtual Tunnel schedule

Virtual Tunneling이 형성된 후에는 토폴로지상의 다른 노드들은 Virtual Tunnel의 동기화된 Schedule을 침범하지 않아야 한다. 또한 이미 형성된 Virtual Tunnel외의 또 다른 일시적 연속성 데이터 전송이 발생할 경우, 새로운 Virtual Tunnel이 생길 수도 있으며, 이러한 경우도 기존에 존재하는 Virtual Tunnel의 Schedule을 침범하지 않아야 한다. 이를 위하여 제안하는 MAC에서는 STC과정에서 발생되는 데이터 패킷과 ACK를 Tunnel에 속해있지 않은 이웃노드가 Overhearing하여 Network Allocation Vector (NAV)

www.dbpia.co.kr

를 설정하는 방법을 제안한다.

그림 3에서 노드B의 또 다른 이웃노드인 B´이 존재할 경우, 노드B의 모든 이웃노드들이 노드B´의 이웃노드들과 정확하게 일치하지 않기 때문에, 노드B´은 노드B의 모든 수신 데이터를 동일하게 수신할 수는 없지만, 노드B가 송신하는 데이터는 수신이 가능하다. 먼저 노드B는 노드C에 대한 ACK를 송신할 때, ACK 헤더에 t_{RI}, RC, t_{duty_cycle}에 대한 값을 포함한다. 이 때, 노드B´ 은 노드B가 송신한 ACK를 overhearing 하여 Node B의 $t_{wakeup,n+1}$값을 예측한다. 노드B´ 은 노드B의 Tunnel Schedule을 보호하기 위하여, 노드B의 $[t_{data_start}, t_{data_end}]$구간을 NAV로 설정한다. 이 중 t_{data_start}는 노드B의 ACK를 Overhearing 하는 시점인 t_{recv_ack}을 이용하여 식9와 같이 예측할 수 있다. 또한 노드B´의 t_{data_end}는 노드B가 Wakeup 하는 시점인 t_{data_start}에서부터 노드B가 노드A로 포워딩하는 마지막 데이터 송신의 ACK까지로 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_{NAV} &= [t_{data_start}, t_{data_end}] \\ t_{data_start} &= t_{recv_ack} - (RC-1)t_{RI} + t_{duty_cycle} + D_{ACK} \\ t_{data_end} &= t_{data_send} + \tau_{recv_ack} \end{aligned} \quad (9)$$

t_{data_end} 은 노드 B가 데이터를 노드 A로 포워딩하는 시각인 t_{data_send}로부터 상위노드 A의 ACK 송신시간을 예상하여 NAC를 설정한다. 이때, τ_{recv_ack}는 ACK 길이가 고정되어 있기 때문에 예측이 가능하며, 이렇게 산출한 NAV 값은 다음 Duty Cycle에 적용하여, 결과적으로 노드 B´은 Virtual Tunnel Schedule을 보호하게 된다. 따라서 노드B´은 자신의 다른 데이터 전송 요구가 발생하여도 $[t_{data_start}, t_{data_end}]$구간을 자신의 NAV로 설정하여, Tunneling Schedule을 침범하지 않는다.

Ⅳ. 성능 분석

제안하는 비동기식 MAC은 기존 X-MAC의 에너지 효율을 최대한 유지하면서 링크 당 전송 지연시간을 크게 개선하였다. 또한 Duty-Cycle 내의 Wakeup Time을 네트워크 혼잡도에 따라 가변적으로 운영하도록 설계하여 불필요한 재전송 횟수를 크게 감소시켰다. 이러한 설계방식을 검토하기 위하여 NS-2를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 이에 대한 환경설정은 표1과 같다. 또한, 성능의 객관성을 위하여 Duty-Cycle의 크기와 전송 데이터량은 X-MAC과 동일하게 적용하였다.

일반적으로 센서 네트워크 적용 지역은, 넓은 지역의 센싱 데이터를 관찰하는 환경과 경계선을 따라 침입탐지 등의 서비스를 운영하는 환경으로 구분되며[5], 이를 충분히 적용하기 위하여 토폴로지 모델에 Grid 구조와 Linear 구조를 적용하였다.

표 1. 성능분석을 위한 시뮬레이션 환경.

환경요소	Value
Duty_Cycle	1 sec
RF Tx Rate	250 kbps
Traffic Source	CBR 100kbps
Average Packet Length	120 Bytes
Initial Wakeup Time Rate	10% / Duty_Cycle
Routing	AODV, Flooding
Simulator	NS-2

4.1 Grid 토폴로지

Grid토폴로지는 그림 4와 같이 모든 노드가 일정한 간격을 유지하는 격자형 토폴로지로서, 다양한 라우팅 환경과 노드 당 이벤트 부하를 균일하게 할당할 수 있는 환경이다. 이러한 구조는 보편적인 Ad-hoc 라우팅을 시험할 수 있는 가장 적절한 구조이며, 넓은 지역의 센싱 데이터를 관찰하는 서비스의 적용성을 파악하기에 적합하다.

Grid 토폴로지와 같은 환경은 멀티 홉 환경에서 다양한 다중경로가 존재할 수 있고, 제한적인 하드웨어 자원에 대한 유용성을 확보하기 위해서는 메모리 점유율이 낮은 Re-active Routing 방식이 적합하다. 따

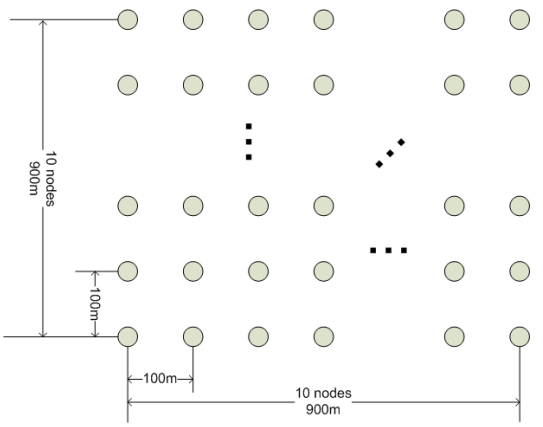

그림 4. GRID 토폴로지

www.dbpia.co.kr

라서 제안하는 MAC 방식에서는 Grid 토폴로지에서의 시뮬레이션 환경을 AODV를 통하여 수행하였으며, 이를 통하여 그림 6~8과 같은 성능결과를 X-MAC과 함께 측정하였다.

그림 6에서 나타나듯이 제안하는 MAC 방식에서는 STC를 이용한 Virtual Tunneling 기법을 사용하여 링크 당 전송 지연시간을 크게 개선하기 때문에 Grid 구조의 멀티 홉 환경에서 End-to-End 전송 지연시간이 X-MAC에 비하여 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이 결과는 STC 수행으로써 이웃노드 간 링크 당 전송 지연시간이 짧아지며, 토폴로지 상 전송경로

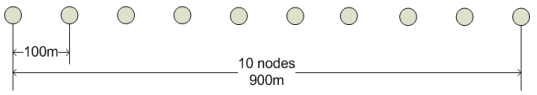

그림 5. Linear 토폴로지

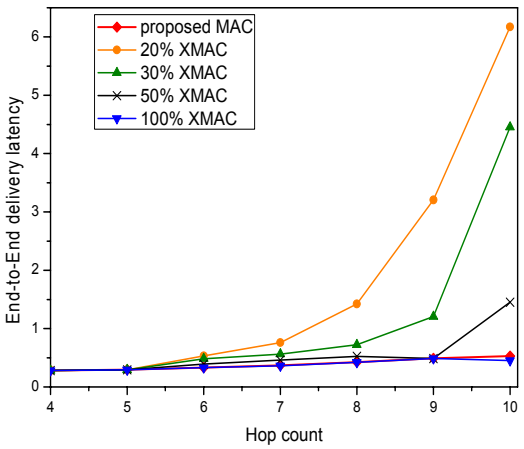

그림 6. GRID 환경의 hop당 end-to-end 전송 지연시간

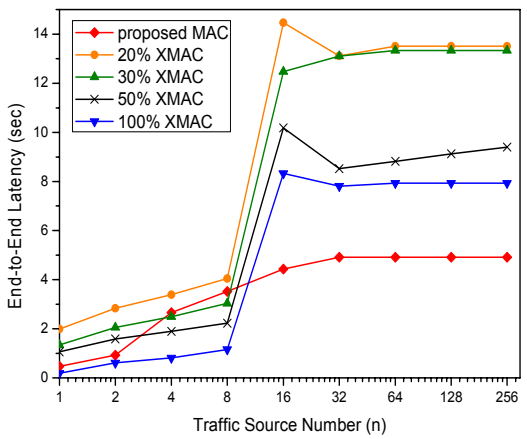

그림 7. GRID 환경의 트래픽 발생 수 당 전송 지연시간

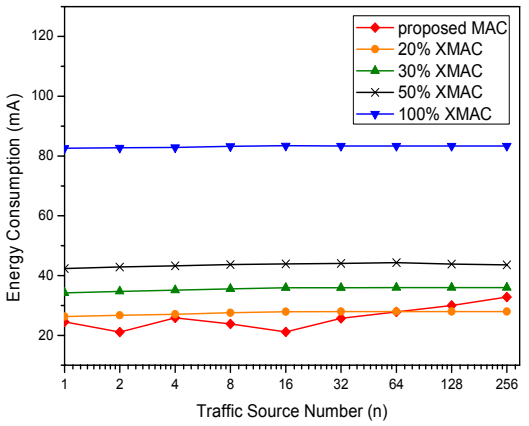

그림 8. GRID 환경의 트래픽 발생 수 당 에너지 소모량

외의 노드들이 NAV를 통하여 Virtual Tunneling의 Schedule을 보호하기 때문에 나타날 수 있다. 또한 그림 5의 결과와 같은 이벤트 발생 트래픽에 따른 노드 종단 간 통신 성공률 역시 STC로 인한 링크 간 전송 지연시간 개선에 따라 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 7은 10kbps 트래픽 발생 이벤트의 개수를 변화시키면서 이에 따른 end-to-end 전송 지연시간을 측정한 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 트래픽 발생 수가 많을수록 제안하는 방식이 기존 X-MAC보다 전송 지연시간 측면에서 성능이 높다는 사실이 확인된다.

그림 8은 에너지 소모량을 X-MAC과 비교하여 실험한 결과이다. X-MAC에서는 실제 데이터를 전송하기 전에 Preamble-Sampling을 통하여 대상 노드의 Wakeup 상황을 파악하기 때문에, 실제 데이터보다 작은 Preamble전송으로 인한 에너지 절감효과를 설계하였다. 그러나 환경 모니터링이나 침입탐지 서비스 등과 같은 응용환경 에서는 데이터량이 크지 않으며, 따라서 제안하는 MAC 방식에서는 실제 데이터를 Preamble대신 그대로 사용하였다. 이는 그림 9에서 확인할 수 있듯이, 대량의 데이터를 전송할 경우를 제외하고는 에너지 소모량의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한 450 bytes 이하에서는 제안하는 MAC의 에너지 효율이 30%-XMAC보다 높게 측정되는데, 이는 STC와 Wakeup Time의 가변화의 결과로 인한 재전송 패킷수가 줄어들었기 때문이다. 또한 일반적인 센서 네트워크에서 사용되는 RF Transciver에서는 128bytes 이하의 데이터 길이만을 제공하기 때문에, 제안하는 MAC 프로토콜이 preamble 사용방식에 비하여 효율적이다.

www.dbpia.co.kr

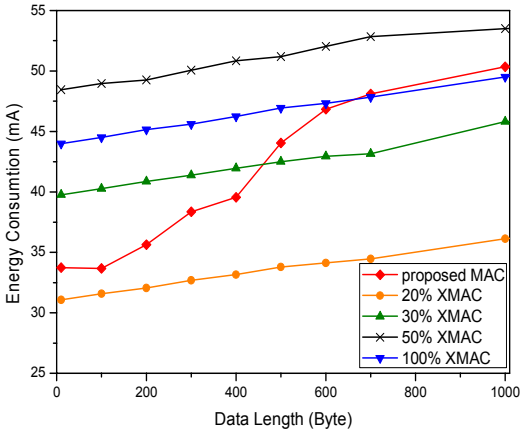

그림 9. 데이터 길이당 에너지 소모량

4.2 Linear 토폴로지

군사용 감시경계 서비스나 중요 시설물 침입탐지 서비스 등에서는 일정 경계선을 따라 센서노드를 배치하는 경우가 적합하다. 이러한 환경은 대부분 노드들이 Linear한 구조를 형성하기 때문에, 제안하는 MAC의 성능 또한 Linear 토폴로지 환경에서 X-MAC과 함께 실험하였다. Linear 토폴로지는 그림 5와 같이 Grid 토폴로지와 달리, 전송경로가 일정하고 다중경로가 존재할 가능성이 매우 낮기 때문에 AODV대신 Flooding 라우팅 알고리즘이 유용하다.

그림 10~12는 Linear 토폴로지 환경에서 Flooding 라우팅을 이용하여 X-MAC과 비교 측정한 결과로서, 측정 항목은 Grid 구조와 동일하다. 먼저 그림 10에서 나타난 End-to-End 전송 지연시간은 제안하는 MAC 방식이 X-MAC보다 크게 개선되었으며, Linear 구조에서는 그림 6의 Grid 구조에 대한 결과와 비교하여

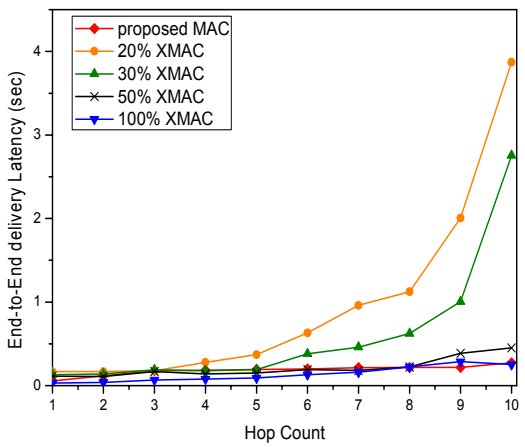

그림 10. Linear 환경의 hop당 end-to-end 전송 지연시간

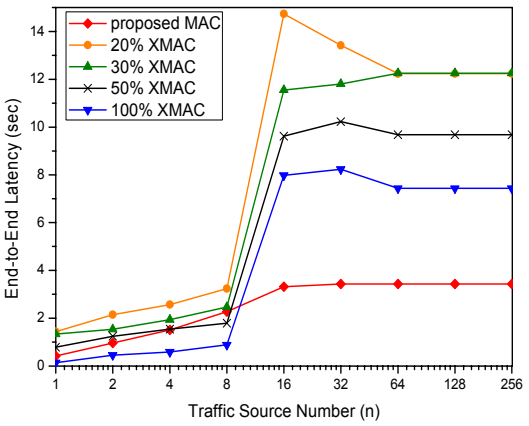

그림 11. Linear 환경의 트래픽 발생 수 당 전송 지연시간

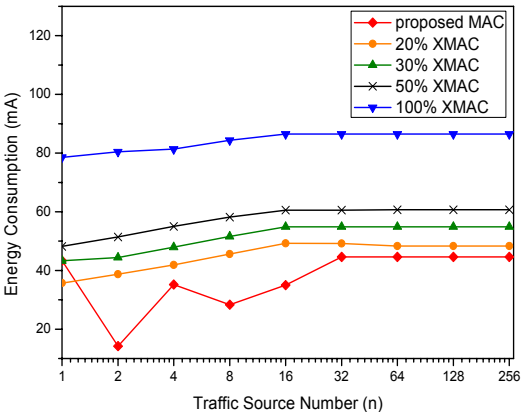

그림 12. Linear 환경의 트래픽 발생 수 당 에너지 소모량

크게 향상되었음을 확인하였다. STC를 이용한 Virtual Tunneling은 멀티 홉 상에서 이벤트 전송경로 상의 노드가 형성하는 기술이며, 특히 Linear 구조에서는 다중경로의 부재와 경로외의 노드 부재로 인하여 전송 지연시간이 크게 향상됨을 확인할 수 있다. 그림 11과 그림 12는 Grid 토폴로지와 같이 10Kbps의 트래픽 발생 이벤트의 개수를 증가시키면서 각각 노드 종단 간 end-to-end 전송 지연시간과 에너지 소모에 대한 결과를 Linear 구조를 통하여 측정하였으며, 이 결과들 또한 Grid 구조에서의 결과보다 크게 향상됨을 확인하였다.

하지만 제안하는 MAC 방식 또한 복잡한 토폴로지 환경에서 다중경로가 빈번하게 발생하는 경우, 다중 Virtual Tunnel이 발생하게 되어, 하나의 노드에 다수의 Virtual Tunnel 스케줄링이 실행되는 경우가 존재할 수 있다. 이러한 경우에는 노드의 스케줄링 복잡도를 줄이기 위해, 다중 Virtual Tunnel 경로 상에서 중

www.dbpia.co.kr

첩되는 노드를 기준으로 Virtual Tunnel을 분리시켜야 한다. 이러한 Virtual Tunnel 분리는 경로 상 중첩되는 노드에서 발생되는 채널간섭을 감소시킬 수 있지만, 전송 지연시간은 증가하는 단점이 존재한다.

V. 결 론

감시경계 및 침입탐지와 같은 센서 네트워크 서비스 에서는 센싱 데이터가 비주기적으로 나타나기 때문에, 주기적 Control Frame이 없는 비동기식 MAC이 에너지 효율 측면에서 유용하다. 하지만 이벤트가 다량으로 발생할 경우, End-to-End 통신 지연시간이 길어지며 에너지효율 또한 낮아질 수 있다.

SNC 방식은 비동기식 MAC의 단점인 링크 간 전송 지연시간을 단축할 수 있으며, 이를 기반으로 STC를 이용한 Virtual Tunneling 기법은 종단 간 통신 지연시간을 단축시키고 전송 경로 상 QoS를 크게 향상시킬 수 있으며, 이에 따른 에너지 효율성도 증가시킬 수 있다. 또한 네트워크 상황을 고려한 Duty-Cycle 내의 Wakeup Time 가변화 방법은, 네트워크 혼잡도에 따라 Duty-Cycle 방식의 불필요한 재전송을 크게 감소시킬 수 있기 때문에 에너지 효율을 더욱 향상시켰다.

따라서 제안하는 비동기식 MAC 방식은 동기신호 없이 예측에 의한 동기화를 수행하므로, 일반적인 비동기식 MAC의 단점을 극복할 뿐 아니라 동기식과 비동기식 MAC의 장점을 모두 지니는 특성을 가질 수 있기 때문에, 에너지 효율과 전송 지연시간 문제에 대하여 큰 효율성을 제공할 것으로 판단된다.

최근 센서 네트워크에서 이미지 센서 등과 같은 대량 데이터 전송에 대한 요구가 나타나고 있다. 이에 제안하는 비동기식 MAC 방식과 더불어 향후 노드 간 혼잡도를 고려한 대용량 데이터 전송 기법을 연구하여 MAC 성능을 개선해야한다. 또한 다중경로 발생에 대비하여, 다중 Virtual Tunnel에서의 효과적인 Virtual Tunnel 분리방법에 대한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

〔1〕 Y. Koucheryavy, J. Harju, VB Iversen, "A Random Backoff Algorithm for Wireless Sensor Networks", *Lecture Notes in Computer Science* 4003, pp.108–117, 2006.

〔2〕 IEEE 802.11 Standards. http://www.ieee.org

〔3〕 IEEE 802.16 Standards. http://www.ieee.org

〔4〕 I. Akyildiz et al., "A Survey on Sensor Networks", *IEEE Communication Mag*, 40, No. 8, pp.102-14, Aug 2002.

〔5〕 I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey", *Computer Networks* 38(4), pp.393-422, 2002.

〔6〕 Wei Ye, John S. Heidemann, and eborah Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *IEEE Computer and Communications Societies* (INFOCOM 2002), pp.1567-1576, June 2002.

〔7〕 Tijs van Dam and Koen Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *First International Conference On Embedded Networked Sensor Systems* (SenSys 2003), pp.171–180, November 2003.

〔8〕 Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *International Conference On Embedded Networked Sensor-Systems* (SenSys 2004), pp.95–107, November 2004.

〔9〕 Amre El-Hoiydi, Jean-Dominique Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks", *International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks* (ALGOSENSORS2004), *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS3121, pp.18-31, July 2004.

〔10〕 Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, Richard Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", *International Conferenceon Embedded Networked Sensor Systems* (SenSys 2006), pp.307-320, 2006.

〔11〕 Peng Lin, Chunming Qiao, Xin Wang, "Medium Access Control With A Dynamic Duty cycle for sensor networks". *IEEE Wireless Communications & Networking Conference* (WCNC 2004), pp.1534-1539, 2004.

〔12〕 Xi Zang, Junaid Ansari, Petri Mahonen, "Traffic aware medium access control protocol for wireless sensor networks", *ACM international symposium on Mobility management*

www.dbpia.co.kr

and wireless access, pp.26-27, October 2009.
〔13〕 ADD, Korea. http://www.add.re.kr

이 재 호 (Jae-ho Lee) 정회원

2005년 고려대 전자공학과 석사
2008년 3월~현재 고려대 전자공학과 박사과정
<관심분야> WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC, WBAN

허 경 (Kyung Hur) 종신회원

1998년 고려대 전자공학과 학사
2000년 고려대 전자공학과 석사
2004년 8월 고려대 전자공학과 통신공학 박사
2004년 8월~2005년 8월 삼성종합기술원(SAIT) 전문연구원
2005년 9월~현재 경인교대 컴퓨터교육과 조교수
<관심분야> QoS, Mobile IP, Wireless MAC, 컴퓨터교육

엄 두 섭 (Doo-seop Eom) 종신회원

1987년 고려대 전자공학과 학사
1989년 고려대 전자공학과 석사
1999년 일본 오사카대학 보통신공학과 박사
1989년 2월~1999년 8월 한국전자통신연구소 연구원
1999년 9월~2000년 8월 원광대학교 전임강사
2000년 9월~현재 고려대 전기전자전파공학부 교수
<관심분야> 통신네트워크 설계 및 성능분석, 무선 ATM, IP 네트워크

www.dbpia.co.kr