

# 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에서 에너지 효율성과 공정성 향상을 위한 기법 연구

## (An Energy Efficient and Fair MAC Protocol Using Preamble Counting for Wireless Sensor Networks)

이 동 호 <sup>†</sup>    정 광 수 <sup>\*\*</sup>  
(Dongho Lee)    (Kwangsoo Chung)

**요 약** 제한된 배터리를 갖는 노드로 구성되는 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 연구가 활발히 진행되고 있으며 낮은 듀티 사이클 동작이 에너지 소모를 줄이는 효과적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 낮은 듀티 사이클을 사용하는 MAC 프로토콜에서 불필요한 에너지 소모 및 지연을 줄이고 전송률을 향상시키기 위해 Short Preamble 기법이 제안 되었지만 송신 노드간의 경쟁을 충분히 고려하지 않아 불공정한 경쟁의 문제가 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Short Preamble에 우선순위 정보를 추가하여 수신 노드에서 적절히 송신 노드를 선택할 수 있는 Preamble Counting 기법을 제안하였다. Preamble Counting을 사용함으로써 송신 노드간의 에너지 소모 및 패킷 전송률의 균형을 이룰 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, MAC 프로토콜, 듀티 사이클, Short Preamble

**Abstract** Since wireless sensor networks consist of nodes with the constrained battery, energy efficient MAC operation is one of the important issues. Low duty cycle operation is critical to conserve energy in wireless sensor network MAC protocol. Some paper proposed a new approach to low power listening, which employs a short preamble to further reduce energy consumption and to reduce latency. But short preamble suffers from unfair channel access problem since there was no consideration for contention between transmission nodes. Preamble counting proposes a solution to each of these problems by employing node selection information. Simulation results show that the preamble counting provides an improved energy efficiency and fairness of packet delivery.

**Key words** : Wireless Sensor Networks, MAC protocol, Duty Cycle, Short Preamble

### 1. 서 론

최근의 무선 통신과 전자 공학의 진보는 저 비용, 저

- 본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.
- 이 논문은 2007 한국컴퓨터종합학술대회에서 '무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에서 에너지 효율성과 공정성 향상을 위한 기법 연구'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과  
dhlee@adams.kw.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수  
kchung@kw.ac.kr  
논문접수 : 2007년 10월 2일  
심사완료 : 2007년 12월 27일

Copyright © 2008 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다. 정보과학회논문지: 정보통신 제35권 제2호(2008.4)

전력의 무선 센서 네트워크 개발을 가능케 했다. 무선 센서 네트워크에서는 기본적으로 교환하기 어려운 작은 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되어 있기 때문에 각 센서 노드들은 주어진 배터리의 수명이 다할 때까지 만 원하는 정보를 전달할 수 있다. 따라서 무선 센서 네트워크의 설계 시 최우선적으로 고려해야 할 사항은 각 센서 노드의 에너지 소모를 줄여서 전체 네트워크의 수명을 최대화 하는 것이다. 센서 노드는 연산 보다 통신에 의해 소모되는 에너지가 크기 때문에 통신에 의한 에너지 소모를 최소화 하면서 기본적인 네트워크의 동작을 성취할 수 있도록 하여야 한다. 이러한 관점에서 각 통신 계층별로 센서 네트워크 환경을 위한 에너지 효율적인 프로토콜들이 제안되어 왔으며 그중 MAC(Medium Access Control) 계층에서의 에너지 효율적인 프로토콜에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에서 낮은 듀티 사이클(low duty cycle) 동작이 에너지 소모를 줄이는 효과적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 듀티 사이클을 이용하여 각 센서 노드는 주기적으로 활성 상태와 수면 상태를 반복하면서 활성 상태일 때 무선 송수신기에 전력을 공급하여 통신을 수행하고 수면 상태일 때는 무선 송수신기의 전력을 차단하여 통신에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있다[2].

무선 센서 네트워크에서 듀티 사이클을 이용한 MAC 프로토콜을 동기 방식과 비동기 방식으로 구분할 수 있다. S-MAC[3], T-MAC[4], D-MAC[5] 등이 주기적인 동기 신호에 따라 듀티 사이클을 관리하는 대표적인 동기 방식의 프로토콜이고 B-MAC[6], WiseMAC[7]은 Preamble Sampling을 통해 수신 노드를 깨우는 대표적인 비동기 방식의 프로토콜이다. 동기 방식에서의 센서 노드 간 듀티 사이클 동기화는 구현에 있어서 복잡성이 높으므로 비교적 구현이 단순한 비동기 방식의 MAC 프로토콜이 널리 이용되고 있다. 하지만 비동기 방식에서 수신 노드를 깨우기 위해 듀티 사이클의 수면 상태 시간만큼의 Long Preamble을 사용함에 따라 송신 지연의 문제가 발생할 수 있고, 잠재적 수신 노드들의 Overhearing으로 인해 추가적인 에너지 소모 문제가 발생할 수 있다[8].

Long Preamble의 문제점을 해결하기 위해 Short Preamble을 사용하는 MAC 프로토콜이 제안되었다. 짧고 반복적인 패킷단위의 Preamble을 통해 수신 노드는 좀 더 빨리 데이터 수신을 시작하게 되고, 잠재적 수신 노드들은 자신에게 향하는 데이터가 아닐 경우 빨리 수면 상태로 돌아간다. 이를 통해 불필요한 에너지 소모 및 지연을 줄이고 전송률을 향상시킬 수 있다[2].

Long Preamble을 개선한 Short Preamble 기법은 향후 듀티 사이클을 이용한 MAC 프로토콜 설계에 널리 사용될 것으로 예상된다. 하지만 Short Preamble을 실제 무선 센서 네트워크의 응용에 적용하고 사용하기 위해서는 해결해야 할 문제들이 존재한다. 첫 번째로 반복적인 Short Preamble 패킷 송신과 그에 따른 ACK(Acknowledgment)를 수신하기 위한 송수신 스케줄링은 정교하고 복잡한 구현을 필요로 한다. 두 번째로 반복적인 Short Preamble을 통한 채널 점유 경쟁은 송신 노드간의 경쟁을 충분히 고려하지 않아 불공정한 경쟁의 문제가 발생할 수 있다. 세 번째로 Short Preamble 또한 비동기 방식의 듀티 사이클 MAC 프로토콜이 안고 있는 Hidden Node Problem 등을 명확히 해결할 수 없다.

본 논문에서는 Short Preamble MAC 프로토콜의 문제점 해결을 위해 알고리즘의 복잡도를 높이지 않으면

서 경쟁 노드간의 공정성을 향상시킬 수 있는 Preamble Counting 기법을 제안하였다. 이를 통해 송신 노드간의 에너지 소모 및 패킷 전송률이 균형을 이룰 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

논문의 2장에서는 Short Preamble MAC 프로토콜에 대한 관련 연구를 기술하였고 3장에서는 Short Preamble MAC 프로토콜에서의 Preamble Counting 기법에 대하여 설명하였다. 4장에서는 실험을 통해 Preamble Counting 기법의 성능을 평가하였으며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

## 2. 관련 연구

본 논문의 연구 주제와 관련된 Short Preamble MAC 프로토콜은 낮은 듀티 사이클에서 동작하는 비동기 방식 MAC 프로토콜의 성능을 향상시킨다. 본 장에서는 Short Preamble MAC 프로토콜에 대해 설명하고 설계 시 고려할 사항을 분석하도록 한다. 그리고 Short Preamble MAC 프로토콜이 가지는 문제점에 대해서 기술하도록 한다.

### 2.1 Short Preamble MAC 프로토콜

무선 센서 네트워크에서 가장 널리 사용되는 듀티 사이클 기반의 MAC 프로토콜로 TinyOS[9]의 기본 프로토콜인 B-MAC을 들 수 있다. B-MAC은 LPL(Low Power Listening)이라는 확장된 Preamble을 이용한 Preamble Sampling을 수행한다. 이를 통해 간단하고 비동기 적이며 에너지 효율적인 장점을 갖게 된다. 하지만 LPL의 Long Preamble은 몇 가지 단점을 가지고 있다. 첫 번째로 수신 노드는 깨어나는 시점에 상관없이 전체 Preamble을 수신해야 하기 때문에 그에 따른 추가적인 에너지 소모 및 지연이 발생한다. 두 번째로 Preamble을 모두 수신한 후 목적지 주소를 알 수 있기 때문에 송신 노드 주변의 노드들도 Preamble 전송 시에 Overhearing을 하게 된다. 그에 따른 추가적인 에너지 소모는 주변 노드의 수에 비례하여 증가한다.

LPL의 단점을 해결하기 위해 X-MAC[2]에서는 목적지 주소가 포함된 패킷화 된 Short Preamble을 제안하였다. 비교적 짧은 Preamble을 수신한 노드는 목적지 주소 확인을 통해 수신 상태 혹은 수면 상태로 신속하게 전환할 수 있다. 또한 낮은 듀티 사이클에서 수신 노드를 깨우기 위해 수신 노드는 Preamble 패킷을 수면 상태의 시간만큼 반복해서 전송하게 되는데 Preamble 패킷을 수신한 노드는 Early ACK을 전송하여 Preamble 송수신을 마치고 신속히 데이터 송수신 작업에 들어가게 된다. 그림 1은 LPL과 X-MAC의 동작 방식을 비교해서 나타낸 것이다. LPL에서는 송신 노드의 Preamble을 다 전송한 후에 데이터를 수신할 수 있기

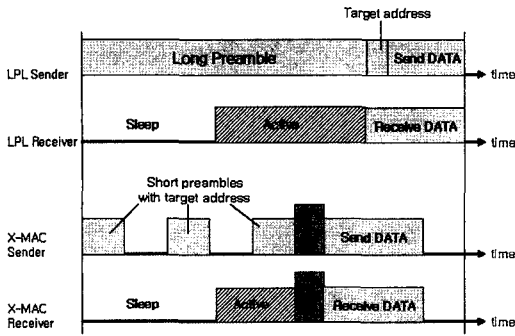


그림 1 LPL과 X-MAC의 동작 방식 비교

때문에 데이터 전송의 시작 위치가 X-MAC의 Short Preamble 보다 늦어지게 됨을 알 수 있다. 이에 따라 X-MAC의 송수신 노드는 LPL의 송수신 노드보다 에너지 소모 및 지연이 적어지고 단위 시간당 데이터의 전송률은 높아지게 된다.

CMAC(Convergent MAC)에서도 Long Preamble를 Aggressive RTS라는 다수개의 RTS 패킷으로 대체하여 사용한다. RTS 패킷 사이에 짧은 시간 간격을 두어 수신 노드로부터의 CTS 패킷을 수신할 수 있도록 한다. 또한 수신 노드가 RTS 패킷 전송 사이에 깨어나 채널 감지에 실패하는 것을 막기 위해 적절한 시간 차이를 두고 두 번 채널 감지를 수행하는 Double Channel Check기법을 사용한다[8].

B-MAC+[10]에서는 Countdown Packet이라는 Short Preamble조각들을 사용한다. 각 Preamble은 counter와 address필드를 포함한다. counter필드는 남은 Preamble의 개수를 나타내고 address필드는 수신 노드의 주소를 나타낸다. B-MAC+에서도 Short Preamble를 통해 이웃 노드의 Overhearing을 방지하지만 X-MAC의 Early ACK과 같은 기법이 없어서 모든 Preamble을 전송할 때까지 수신 노드는 기다리게 된다.

각 노드의 송신과 수신이 반복되어 빈번히 일어나는 Short Preamble 기법을 사용하기 위해서 반드시 정교한 시간 간격의 정의가 필요하다. 듀티 사이클의 활성 상태의 시간을  $D_{ACTIVE}$ , 수면 상태의 시간을  $D_{SLEEP}$ 이라 할 때 전체 Preamble 전송 시간  $D_{TOTAL\_PREMABLE}$ 은 일반적으로 식 (1)과 같이 정의한다[2].

$$D_{TOTAL\_PREMABLE} \approx D_{SLEEP} \quad (1)$$

$D_{TOTAL\_PREMABLE}$ 과 Short Preamble 전송 시간인  $D_{PREMABLE}$ , ACK을 기다리는 시간인  $D_{WAIT\_ACK}$ 의 관계는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 이때  $k$ 는 Short Preamble 구간과 ACK 수신 구간의 주기로 1이상의 값을 갖는다.  $k$ 값이 커질수록 Preamble전송 지연은 감소

하지만 잦은 송수신의 변화로 어려움이 증가할 수 있다.

$$D_{TOTAL\_PREMABLE} \approx (D_{PREMABLE} + D_{WAIT\_ACK}) \times k + D_{PREMABLE} \quad (2)$$

수신측에서의 ACK 전송 시간을  $t_{ACK}$ 이라고 할 때  $D_{PREMABLE}$ 과  $D_{WAIT\_ACK}$ 의 범위는 각각 식 (3) 그리고 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 즉  $D_{PREMABLE}$ 은 MAC이 가질 수 있는 가장 작은 사이즈의 패킷 전송 시간 보다 작을 수 없고 식 (2)에 의해 가장 작은  $k$ 값을 가졌을 때의 시간을 초과할 수 없다. 반면  $D_{WAIT\_ACK}$ 은 ACK 패킷의 전송 시간보다 커야 수신이 가능하고 수신측의 활성구간에 Preamble이 감지될 수 있기 위해  $D_{ACTIVE}$ 를 초과하지 않도록 해야 한다.

$$t_{MIN\_PKT} \leq D_{PREMABLE} \leq \frac{D_{SLEEP} - D_{WAIT\_ACK}}{2} \quad (3)$$

$$t_{ACK} \leq D_{WAIT\_ACK} \leq D_{ACTIVE} \quad (4)$$

이때  $D_{PREMABLE}$ 이 커질수록 에너지 소모는 늘어나고  $D_{PREMABLE}$ 이 작아질수록  $D_{WAIT\_ACK}$ 의 값이 늘어나서 채널 감지 실패율을 높인다. 따라서 네트워크의 상태에 따른 최적화된 시간 간격을 정의하는 것이 Short Preamble 기법의 성능 향상을 위해 중요하다.

### 2.2 Short Preamble의 문제점

비동기 방식의 듀티 사이클 MAC에서 Preamble은 데이터 송신을 위해 수신 노드를 깨우는 역할 외에도 이웃의 경쟁 노드들에게 자신의 채널 사용을 알려서 송신을 억제하는 RTS의 역할을 수행한다. 하지만 Short Preamble을 사용할 경우 경쟁 노드에 대한 송신 억제가 완벽히 이루어지지 않아 충돌을 발생시키거나 공정하지 못한 송신 노드의 선택이 발생할 수 있다. 그림 2는 Short Preamble을 사용할 경우 송신 노드 사이의 경쟁에서 발생하는 문제를 나타낸다.

그림 2에서 Sender(1)이 데이터 전송을 위해 Short Preamble을 전송하는 도중에 Sender(2) 역시 데이터 전송을 위해 Short Preamble 전송을 시도하였다. 그 이유는 Sender(1)의 WAIT\_ACK 구간에 Sender(2)가 데이터 전송을 위해 채널 상태를 확인하고 채널이 한가하

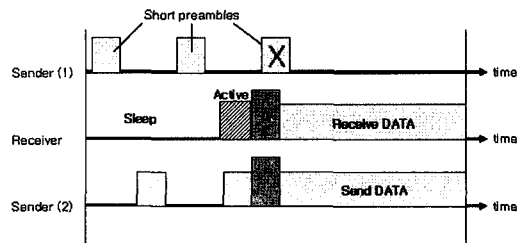


그림 2 Short Preamble 사용 시 경쟁 문제

다고 판단하였기 때문이다. 즉 Short Preamble이 충분히 이웃 노드의 송신을 억제하지 못하여 불필요한 경쟁을 초래하였다. 한 노드가 Short Preamble을 전송하는 도중에 이웃 노드가 채널이 한가하다고 판단할 확률은 식 (5)와 같다.

$$P = \frac{D_{WAIT\_ACK}}{D_{WAIT\_ACK} + D_{PREAMBLE}} \quad (5)$$

Sender(1)이 먼저 전송을 시작하였음에도 불구하고 Receiver가 활성 상태로 변환 후 Sender(2)의 Preamble을 먼저 수신하였으므로 Receiver는 Sender(2)에게 ACK을 전송하고 그 후 두 노드는 데이터를 주고받는다. Sender(1)의 경우 경쟁에서 패하여 백오프를 시작하게 되고 Receiver의 다음 활성 구간에 재전송을 시도하게 된다. 이와 같이 먼저 전송을 시도한 노드가 채널 점유 경쟁에서 패할 경우 에너지 소비 및 데이터 전송의 불균형을 발생시키고 이런 현상이 누적될 경우 전체 네트워크의 성능을 크게 저하시키는 원인이 된다.

### 3. Preamble Counting 기법

2장에서 언급한 불공정한 경쟁 문제를 비롯해 Short Preamble 설계 시 고려되지 않아 발생하는 많은 문제들이 남아있다. 동기 방식의 MAC 프로토콜에 비해 비동기 방식의 MAC에서 Short Preamble 기법의 복잡한 Preamble 전송 방식에 따라 오히려 복잡도가 높아질 우려가 있다. 따라서 복잡도를 크게 높이지 않으면서 Short Preamble의 문제점을 해결할 수 있는 연구가 필요하다. 3장에서 제안하는 Preamble Counting 기법은 Short Preamble을 사용하는 MAC에서 복잡도 증가를 최소화 하면서 불공정한 경쟁 문제를 해결할 수 있는 방법을 제공한다.

#### 3.1 Preamble Counting 개요

TDMA 방식과 같은 스케줄링 기반의 프로토콜에서 송신자와 수신자는 스케줄 정보를 통해 데이터 송신에 걸리는 시간 및 노드 간 송신 순서 등을 알 수 있다 [11]. 하지만 경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 각 노드간의 스케줄 정보의 부족으로 인해 부가적인 채널 감지 및 충돌 회피에 따른 오버헤드가 따른다. 특히 비동기 방식의 듀티 사이클 MAC에서는 각 노드의 주기가 다르기 때문에 노드 간 통신에 더욱 어려움이 따른다 [12]. 이러한 노드의 스케줄 정보 부족 문제를 Short Preamble에 Preamble Counting 기법을 적용하여 다소 완화 시킬 수 있다.

앞 장에서 설명한 바와 같이 Short Preamble 기법을 사용할 경우 불공정한 경쟁의 문제가 발생할 수 있다. 즉 Short Preamble이 이웃 노드의 전송 억제를 충분히

하지 못하여 여러 노드의 채널 접근 시도가 발생할 수 있다. 이때 수신 노드는 깨어난 후 가장 먼저 전송받은 Preamble을 선택하게 되는 것이 일반적이다. 이와 같은 여러 노드의 채널 접근 시도가 발생할 경우 수신 노드가 활성 기간 동안 여러 노드의 Preamble을 수신 받을 수 있기 때문에 그중에서 하나의 송신 노드를 선택하는 방법을 생각할 수 있다. 일반적인 Short Preamble MAC 프로토콜은 첫 Preamble이 수신되면 곧바로 Preamble 전송을 취소시키고 데이터 전송을 알리지만 노드의 밀집도를 고려하여 어느 정도의 Preamble 수집 기간을 둔다면 모든 경쟁하는 노드의 ID를 파악할 수 있다. 이런 특성을 이용하여 Short Preamble에서 패킷 전송을 조절하는 Preamble Counting 기법을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 Preamble Counting 기법은 수신 노드에게 데이터 전송을 알리기 위한 Short Preamble 패킷에 순서 번호를 매겨서 송신 노드의 전송 시작 시간을 파악하고 경쟁하는 송신 노드 간의 송신 순서 결정을 위해 사용한다. 이를 위해 Short Preamble 패킷에 Preamble 순서 정보 필드를 추가한다. 전송 시작 시간을 파악하는 이유는 경쟁 기반의 MAC에서는 먼저 채널에 접근하는 노드에게 채널을 할당하기 때문이다. 하지만 Short Preamble을 사용함에 따라 단편적이고 반복적인 Short Preamble 패킷만으로는 전송의 시작시간을 판단하기 어렵다. 따라서 2장에서 언급한 불공정한 경쟁과 같은 문제가 발생하게 된다. 따라서 정확한 Preamble의 전송 시작 시간을 파악하는 방법이 마련되어야 한다. 또한 순서 번호를 통해 전송 시작 시간의 지표로 사용하는 이유는 비동기 MAC 프로토콜에서는 각 노드간의 시간 동기화가 이루어지지 않아 시간 값의 비교가 어렵기 때문이다. 그리고 각 노드 간 Short Preamble 패킷의 사이즈가 같고 이에 따라 전송 시간 및 ACK을 기다리는 시간도 같기 때문에 고정된 주기 값을 Preamble 순서번호와 계산하면 쉽게 전송 노드의 전송 시작 시간을 파악할 수 있기 때문이다. 수신한 Short Preamble 패킷의 순서 정보를 통해 전송 시작 시간을 파악하는 방법은 식 (6)과 같다. 이때  $PC_n$ 은  $n$ 노드로부터 수신한 Short Preamble 패킷에 포함된 순서 번호이다.

$$t_{TX\_START(n)} = t_{CURRENT} - (D_{PREAMBLE} \times PC_n) - (D_{WAIT\_ACK} \times (PC_n - 1)) \quad (6)$$

식 (6)을 사용하여 각 송신 노드의 전송 시작 시간을 파악하고 이를 비교하여 먼저 채널에 접근을 시도하였던 노드를 파악하여 채널 할당을 할 수 있다. 즉 Preamble Counting 기법을 통해서 간단한 Preamble 순서 정보만 사용하여 Short Preamble의 불공정한 경쟁의 문제를 해결하고 일반적인 경쟁 기반의 MAC 프로토콜

과 같은 결과가 나올 수 있도록 채널 접근을 조절할 수 있다.

이후 3.2절에서는 공평한 패킷 수신을 위한 패킷 수신 조절 기법을 설명하고 3.3절에서는 새롭게 정의된 Short Preamble 패킷의 포맷을 설명한다. 그리고 3.4절에서는 Preamble Counting 기법의 동작 과정 및 불공정한 경쟁의 문제 회피 과정을 설명하도록 한다.

### 3.2 패킷 수신 조절 기법

무선 센서 네트워크의 일반적인 응용에서의 트래픽 특성은 기존의 컴퓨터 네트워크와는 매우 다른 양상을 보인다. 센서 네트워크 응용의 기본적인 기능은 온도와 같은 환경의 센싱 정보를 샘플링하여 인프라스트럭처(infrastructure)로 그 데이터를 전파하는 것이다[13]. 이러한 환경에서 노드 간의 에너지 소모 및 데이터 수집의 균형을 위해 특정 시간 내에 각 노드에서 전달하는 패킷 수가 일정하도록 유지하는 것이 센서 네트워크의 응용에 적합하다. 따라서 노드 간 패킷의 고른 전송을 위한 패킷 수신 조절 기법이 필요하다.

기존의 경쟁 기반의 MAC 프로토콜에서는 패킷 수신 조절이 상위 레이어의 정보 없이는 어렵다. 하지만 Preamble Counting 기법은 수신 노드에서 송신 노드를 선택하는 방식이기 때문에 MAC에서 어느 정도의 패킷 수신을 조절할 수 있다. 즉 수신 노드에서 Short Preamble 수신시 경쟁에서 패하여 재전송이 요구되는 노드를 파악하여 다음 경쟁에 우선순위를 부여함으로써 각 노드의 패킷 수신율이 공평해질 수 있도록 조절을 한다. 먼저 각 송신 노드는 패킷 전송 전에 전송 우선순위 값을 0으로 세팅하고 Short Preamble 패킷 마다 그 값을 포함하여 수신 노드에게 전송한다. 수신 노드는 한 활성 구간동안 여러 노드에서 들어온 Short Preamble 패킷에서 Preamble 순서 정보에 앞서 전송 우선순위 값을 비교한다. 비교 결과 가장 큰 우선순위 값을 갖는 노드를 송신 노드로 선택하게 되고 값이 같을 경우에는 Short Preamble 순서 번호 비교 과정을 통해 송신 노드를 선택한다. 선택된 노드를 제외한 송신 노드는 전송 우선순위 값에 1을 올리고 수신 노드의 다음 활성 구간까지 대기한다. 다음 활성 구간에서 전송 우선순위 값이 높은 노드가 선택되었을 경우 선택된 노드는 우선순위 값을 0으로 초기화 하고 데이터를 전송한다.

이와 같이 Preamble Counting 기법에서 비교적 단순한 방법으로 패킷 수신 조절을 수행할 수 있다. 패킷 수신 조절은 센서 네트워크의 응용에 따라 필요 여부가 다를 수 있기 때문에 선택적으로 적용할 수 있도록 한다.

### 3.3 Short Preamble 패킷

본 절에서는 앞서 설명한 Preamble Counting 기법과 패킷 수신 조절 기법을 사용하기 위해 변형된 Short

Preamble 패킷의 포맷을 설명한다. 새로운 Short Preamble 포맷에는 기존 Short Preamble의 정보 뿐 아니라 Preamble 순서 번호 및 전송 우선순위 값이 포함된다. Short Preamble 패킷의 필드 구성은 표 1과 같다.

표 1 Short Preamble 패킷 포맷

Bytes: 4	1	2	2	1	1
Preamble	Sync	TXID	RXID	TX_PRI	PC

Preamble과 Sync 필드는 기본적인 Preamble 및 동기화 필드이고 TXID와 RXID는 전송 노드와 수신 노드의 아이디 필드이다. TXID는 수신 노드에 의한 송신 노드 결정에 사용되고 RXID는 송신 노드의 Preamble로부터 수신 노드가 아닌 이웃 노드의 Overhearing을 막기 위해 사용된다. TX\_PRI 필드는 전송 우선순위 값을 나타내고 PC는 데이터 전송을 위해 보낸 Short Preamble 패킷의 순서 번호를 나타낸다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 수신 노드는 TX\_PRI 와 PC를 사용하여 경쟁하는 송신 노드간의 우선순위를 결정한다. 즉 수신 노드는 노드 간 데이터 수집 및 에너지 소모의 균형을 위해 TX\_PRI 값을 비교하고 그 값이 같을 경우 송신을 먼저 시작한 노드를 선택하기 위해 PC 값을 비교하여 송신 노드를 결정한다.

### 3.4 Preamble Counting 동작 방식

Preamble Counting 기법을 통한 송신 노드 선택 기법은 수신 노드의 활성 구간에서 이루어진다. Short Preamble 사용 시 채널 상태의 잘못된 판단이나 혹은 Hidden Node Problem에 의해서 두 개 이상의 송신 노드가 하나의 수신 노드로 Short Preamble을 전송할 경우 수신 노드는 활성 구간동안 자신으로 향하는 Preamble 패킷을 수집하고 각 패킷의 TX\_PRI 혹은 PC 필드를 비교하여 노드간의 우선순위를 결정하게 된다. 그림 3은 TX\_PRI를 사용하지 않을 경우 PC 필드를 통해 송신 노드를 결정하는 과정을 보여준다.

그림 3에서 Sender(1)이 다섯 번째 Preamble을 전송한 이후에 Sender(2)가 첫 번째 Preamble을 수신 노드에게 전송하였다. 수신 노드가 활성 상태가 되어 Sender(2)의 두 번째 Preamble을 수신하고 이후 Sender(1)의 일곱 번째 Preamble을 수신하였다. 남은 활성 구간동안 Sender(1) 혹은 Sender(2)에서 Preamble이 수신 노드에게 전송되어도 수신 노드는 무시하고 각 노드의 첫 번째 Preamble만 비교 대상으로 삼는다. 수신 노드는 자신의 활성 구간동안 계속 Preamble을 수집하고 활성 구간이 끝나는 순간 수집한 각 노드의 Preamble 패킷을 비교하여 송신 노드를 결정한다. Sender(1)의 일곱 번째 Preamble이 우선순위가 높기

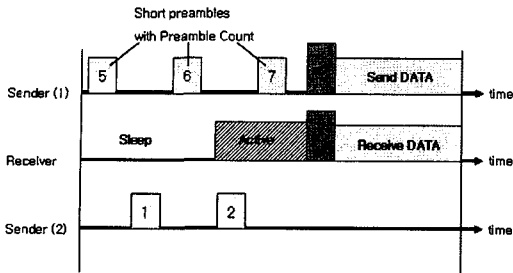


그림 3 Preamble Counting을 통한 송신 노드 선택

```

// start of active state
while (ACTIVE_STATE)
    if (read_preamble(&p))
        if (p.RXID==MY_ID) {
            p_set[i].ID=p.TXID;
            p_set[i].TX_PRI=p.TX_PRI;
            p_set[i].PC=p.PC;
            i++;
        }
// end of active state
if (p_set.count==0) start_sleep();
else {
    // select TX node
    for (i=0 ; i<p_set.count ; i++)
        if (p_set[i].TX_PRI > p_set[select].TX_PRI ||
            (p_set[i].TX_PRI == p_set[select].TX_PRI &&
             p_set[i].PC > p_set[select].PC)) select = i;
    // send ACK
    send_ack(p_set[select].TXID);
}
    
```

그림 4 수신 노드의 Preamble Counting 알고리즘

때문에 Receiver는 Sender(1)을 송신 노드로 결정하고 Sender(1)에게 ACK을 보내준다. ACK의 TargetID 필드를 통해 Sender(1)은 자신이 선택되었음을 알게 되어 즉시 데이터 전송을 시작하고 Sender(2)는 TX\_PRI 값을 높이고 재전송을 시도한다.

그림 4는 Short Preamble를 사용하는 MAC 프로토콜에서 수신 노드의 Preamble Counting을 통한 송신 노드 결정 알고리즘을 나타낸 것이다. Preamble Counting 알고리즘은 복잡도가 높지 않기 때문에 프로세싱 능력이 부족한 센서 네트워크 플랫폼에서도 구현이 용이하다.

이와 같이 스케줄링 정보가 부족한 경쟁 기반의 듀티 사이클 MAC에서 Preamble Counting 기법을 통해 Short Preamble의 순서 번호를 하나의 스케줄링 정보로 이용하여 통신 스케줄을 결정할 수 있다. 간단한 스케줄링을 통해 송신 노드간의 에너지 소모 균형을 이루

고 이에 따라 전체 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있으며 노드 간의 고른 데이터 처리를 통해 공정성을 높일 수 있다. 노드간의 공정한 데이터 전송은 센서 네트워크의 데이터 퓨전이나 위치 기반 시스템에서 비콘 스케줄링과 같이 여러 노드에서 일정량의 데이터를 수집하는 응용에 효율성을 높여준다. 또한 실시간 감시 응용에서의 센싱 데이터는 임계 시간 이상의 지연 후에는 쓸모없어지게 되는데 패킷의 우선순위 정보에 의해 네트워크 안에서 적당한 패킷 라이프타임을 보장해 줄 수 있다.

### 4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 논문에서 제안하는 Preamble Counting 기법의 성능 평가 실험 내용을 기술한다. 성능 평가를 위해 TinyOS에 Short Preamble과 Preamble Counting을 구현하여 실험을 통해 성능 비교를 수행하였다.

#### 4.1 실험 환경

제안하는 Preamble Counting 기법의 성능을 평가하기 위해 범용 센서 플랫폼과 TinyOS의 기존 프로토콜을 사용하여 구현하고 실험을 수행하였다. 센서 플랫폼으로는 Moteiv의 TelosB[14]를 사용하였다. 그림 5와 같이 2 × 2m의 테이블 위에 하나의 수신 노드와 세 개의 송신 노드를 두어 싱글 홉 스타 토폴로지를 구성하고 세 개의 송신 노드가 하나의 수신 노드에게 송신을 하기 위한 채널 경쟁을 하도록 하였다.

위의 실험 환경에서 각 센서 노드는 Coordinator가 없는 비동기 방식의 듀티 사이클로 동작하면서 서로 협력하여 자율적인 망을 구성하게 된다. 따라서 IEEE 802.15.4[15] 표준과 같은 동기 방식의 MAC 프로토콜이 아닌 비동기 방식인 TinyOS의 B-MAC에 기반하여 Short Preamble과 Preamble Counting을 구현하였다. 그리고 Short Preamble을 사용한 기법과 Short Preamble에 Preamble Counting을 적용한 기법에 대한 실험 결과를 비교하여 Preamble Counting의 성능을 평가하였다. 듀티 사이클은 X-MAC과 동일하게 활성화 구간

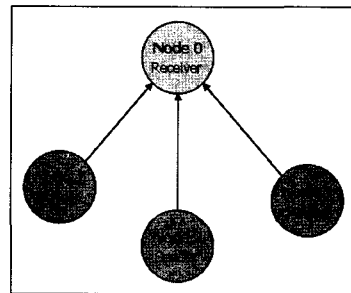


그림 5 네트워크 토폴로지

인  $D_{ACTIVE}$ 를 15ms, 수면 구간인  $D_{SLEEP}$ 을 500ms로 설정하였고 송신 노드의 전체 Preamble 전송 시간인  $D_{TOTAL\_PREAMBLE}$  역시 500ms로 설정하였다. 송신 노드의 Preamble 전송시간  $D_{PREAMBLE}$ 은 Short Preamble 패킷의 크기와 Symbol rate를 고려하여 가질 수 있는 최소값인 1ms로 설정하였다. 반면 ACK을 기다리는 시간인  $D_{WAIT\_ACK}$ 은 가질 수 있는 최대값을 고려하여 14ms로 설정하였다. 그 결과  $D_{TOTAL\_PREAMBLE}$  동안 Short Preamble을 전송하고 ACK을 기다리는 것을 34회 반복하게 된다.

각 센서 노드에는 매 1초마다 센싱 데이터를 전송하는 응용을 실행하였다. 노드상태에 따른 전력 소모량은 TelosB의 데이터시트를 참조하였다.

4.2 성능 평가

성능 평가를 위해 제안한 Preamble Counting 기법이 기존의 Short Preamble 기법보다 높은 패킷 수신율을 보이는지 실험하였고, 다음으로 각각의 기법에서 에너지 소모가 가장 컸던 노드들을 선택하여 에너지 소모율을 비교하였다. 또한 패킷 수신율의 비교를 위해 데이터 전송 간격을 달리하면서 실험을 수행하였다.

그림 6은 각각의 기법을 적용한 세 개의 송신 노드 수신 노드로 약 800초 동안 데이터를 전송하였을 때 수신된 누적 패킷 수를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림 7에서는 그림 6의 실험 결과를 각 노드별 수신 패킷수의 표준 편차를 계산하여 각 기법의 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 Short Preamble 기법의 실험 결과를 통해 초반에는 누적 수신 패킷 수의 차이가 크지 않았으나 시간이 지날수록 각 노드의 수신 패킷 수가 불균형하게 증가함을 알 수 있다. 반면 6(b)에서는 Preamble Counting의 패킷 수신 조절 기법에 의해 각 노드가 적절한 수신 패킷 수를 유지함을 보인다. 즉 Preamble Counting 기법이 Short Preamble을 사용하

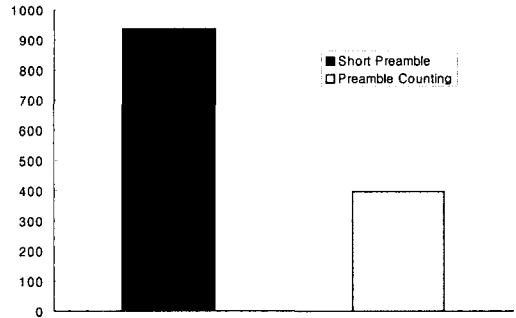
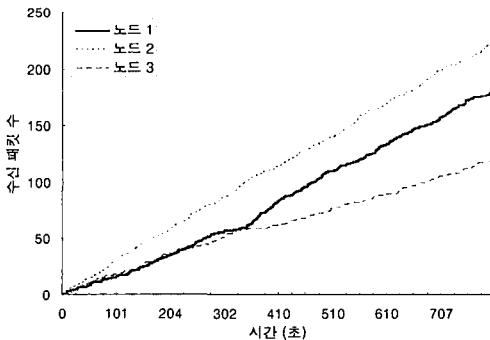


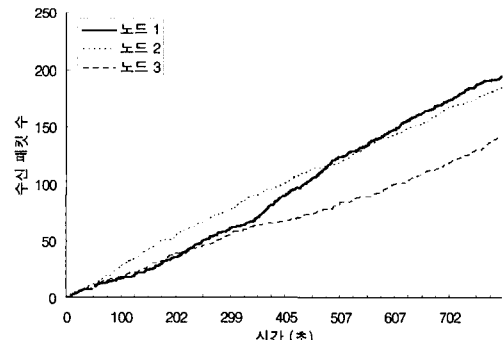
그림 7 각 기법의 패킷 수신을 표준 편차

는 노드간의 데이터 송수신에 공정성을 향상시킬 수 있다.

그림 7은 송신 노드에서 전송하는 데이터의 전송 주기를 달리하였을 때의 패킷 수신율 표준편차의 변화를 각 기법별로 나타낸 것이다. Short Preamble 기법은 대체적으로 데이터 전송 간격이 커질수록 노드간의 수신율 편차가 줄어들어간다. 그 이유는 데이터 전송 간격이 커짐에 따라 노드간의 채널 경쟁이 줄어들기 때문이다. 이에 따라 불공정한 경쟁의 문제의 발생 빈도도 줄어들게 되었다. 반면 Preamble Counting 기법은 어느 정도의 데이터 전송 간격 하에서는 적정 값의 패킷 수신율 표준편차를 보이지만 데이터 전송 간격이 커질수록 Short Preamble과 비슷한 값에 도달함을 알 수 있다. 그 이유는 Preamble Counting 기법의 적용 시간은 듀티 사이클의 주기의 영향을 받기 때문이다. 즉 듀티 사이클의 수면 주기 기간 이상의 데이터 전송 간격을 가지는 상황에서는 각 노드가 한 듀티 사이클 구간에서 경쟁하는 상황이 많이 발생하지 않기 때문에 Preamble Counting의 적용 빈도가 줄어들어간다. 이에 따라 Preamble Counting 기법의 결과가 Short Preamble 기법의 결과에 가까워지게 된다.



(a) Short Preamble 기법



(b) Short Preamble에 Preamble Counting을 적용한 기법

그림 6 각 기법의 송신 노드별 수신 패킷 수

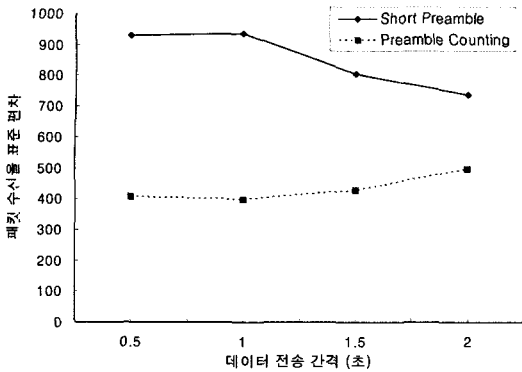


그림 8 패킷 주입률에 따른 패킷 수신을 표준 편차 비교

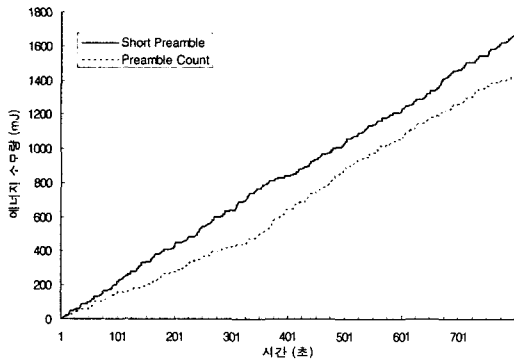


그림 9 각 실험에서 에너지 소모가 가장 큰 노드의 에너지 소모량

그림 9는 그림 6의 실험에서 가장 에너지 소모가 많은 노드를 각각 선택해 에너지 소모량을 비교한 그래프이다. Short Preamble만을 사용한 노드의 에너지 소모량이 Short Preamble에 Preamble Counting 기법을 적용한 노드의 에너지 소모량보다 큰 것을 볼 수 있다. 그 이유는 Preamble Counting을 통해 특정 노드만 많은 패킷을 전송할 수 없도록 패킷 수신을 조절하기 때문이다. 무선 센서 네트워크에서 하나의 노드의 에너지가 먼저 고갈되면 나머지 노드에 부하가 더해지게 되어 나머지 노드의 에너지 고갈을 가속화 시키고 결국 전체 네트워크 수명이 감소시키는 결과를 초래한다. 따라서 센서 노드 간 에너지 소모에 있어서 균형을 이루도록 프로토콜을 설계하는 것이 에너지 효율을 위한 중요한 방법이다. Preamble Counting 기법의 패킷 수신 조절을 통해 노드 간 에너지 소모의 균형을 이룰 수 있음을 해당 실험을 통해 알 수 있다.

### 5. 결론 및 향후 과제

제한된 배터리를 갖는 노드로 구성되는 무선 센서 네

트워크에서는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 연구가 활발히 진행되고 있고 그중 비동기 방식의 듀티 사이클을 사용하는 MAC이 실제 무선 센서 네트워크 구현에 많이 이용되고 있다. 비동기 방식의 듀티 사이클 MAC에서 수신 노드를 깨우기 위한 Preamble 사용 기법 중 짧고 반복적인 Preamble 패킷이 에너지 소모, 지연 등을 줄이고 성능 향상을 이룰 수 있다. Preamble Counting 기법은 Short Preamble 사용 시 Preamble에 송신 상태 정보를 추가함으로써 수신 노드에서 송신 노드를 선택할 수 있는 기법이다. Short Preamble 기법에 Preamble Counting 기법을 추가함으로써 스케줄 정보가 부족한 경쟁 기반의 MAC의 단점을 보완할 수 있고, 에너지 소모 및 전송률에 균형을 가져올 수 있다. 실험을 통해 Preamble Counting 기법을 사용하였을 경우 에너지 소모 및 데이터 전송률의 노드 간 차이가 줄어들었음을 확인하였다.

향후 Short Preamble MAC에서 일시적이고 연속적인 트래픽 발생 시 컨트롤 패킷 오버헤드 문제를 해결할 수 있는 Preamble 스케줄링 기법을 연구하고자 한다.

### 참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communication Magazine, Aug. 2002.
- [2] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," in Proc. SenSys'06, Nov. 2006.
- [3] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Trans. Networking, Jun. 2004.
- [4] T. van Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in Proc. SenSys'03, Nov. 2003.
- [5] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," in Proc. IPDPS'04, Apr. 2004.
- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," in Proc. SenSys'04, Nov. 2004.
- [7] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks," in Proc. ISCC'04, Jun. 2004.
- [8] S. Liu, K. Fan and P. Shnha, "CMAC: An Energy Efficient MAC Layer Protocol Using Convergent Packet Forwarding for Wireless Sensor Networks," in Proc. SECON'07, Jun. 2007.
- [9] TinyOS, <http://www.tinyos.net>.



- [10] M. Avvenuti, P. Corsini, P. Masci and A. Vecchio, "Increasing the efficiency of preamble sampling protocols for wireless sensor networks," MCWC'06, Sep. 2006.
- [11] L. van Hoesel and P. Havinga. "A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches," in Proc. INSS'04, Jun. 2004.
- [12] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC protocols for wireless sensor networks: a survey," IEEE Communications Magazine, Apr. 2006.
- [13] A. Woo and D. Culler, "A Transmission Control Schemes for Media Access in Sensor Networks," The 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom 2001), Jul. 2001.
- [14] Moteiv telosb motes, <http://www.moteiv.com>.
- [15] IEEE Computer Society, "IEEE Std. 802.15.4-2003," Oct. 2003.



이 동 호

2006년 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 학사. 2006년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 박사(석박통합) 과정. 관심분야는 무선센서네트워크, 임베디드시스템, ad-hoc 네트워크

정 광 수

정보과학회논문지 : 정보통신  
제 35 권 제 1 호 참조