

# 무선 센서 네트워크에서 RTS 통합을 이용한 에너지 효율성과 낮은 지연을 갖는 MAC 프로토콜

## (An Energy Efficient and Low Latency MAC Protocol Using RTS Aggregation for Wireless Sensor Networks)

이 동 호 \* 정 광 수 \*\*  
(Dongho Lee) (Kwangsue Chung)

**요약** 무선 센서 네트워크의 연구는 이벤트 기반과 주기적 모니터링 기반이라는 두 가지 응용의 형태에 맞추어 진행되었다. 두 가지 응용의 핵심적인 요구 사항은 다르지만 안정적인 운용을 위해 공통적으로 낮은 전송 지연의 요구가 존재한다. 하지만 기존의 무선 센서 네트워크의 프로토콜은 에너지 효율성을 중심으로 연구가 진행되었기 때문에 전송 지연에 대한 고려가 부족하였다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜인 RA-MAC(RTS Aggregation-Media Access Control) 프로토콜을 제안하였다. RA-MAC 프로토콜은 새로운 채널 접근 기법 및 RTS Aggregation 기법에 의해 에너지 효율성과 낮은 전송 지연을 이룰 수 있고 수신 노드의 전송 스케줄링에 의해 이벤트 기반과 주기적 모니터링 기반 응용의 요구 사항을 동시에 만족시킬 수 있다. 실험을 통해 RA-MAC 프로토콜은 기존에 제안된 에너지 효율적인 MAC 프로토콜과 비슷한 에너지 효율을 보이면서 좀 더 낮은 전송 지연을 이루고 전송률을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, MAC 프로토콜, RTS Aggregation

**Abstract** Wireless sensor networks have been studied with two typical applications called event-driven and periodic monitoring. Although these applications have different core requirements, they have the same low latency requirement. However, main issue of the protocol in wireless sensor networks was focused on an energy efficiency, so it has not considered the latency problem. In this paper, we propose the RA-MAC, an energy efficient and low latency MAC protocol using a new channel access mechanism and the RTS Aggregation scheme for wireless sensor networks. Our simulation results show that the RA-MAC provides energy savings and latency reduction.

**Key words** : Wireless Sensor Networks, MAC protocol, RTS Aggregation

### 1. 서론

최근의 무선 통신과 전자 공학의 진보는 저 비용, 저

전력의 무선 센서 네트워크 개발을 가능케 했다. 무선 센서 네트워크의 궁극적인 목적은 인간의 오감을 대신 하여 환경 및 대상의 상황이나 변화에 대한 정보를 획득하고 그것을 사용자에게 제공하여 인간에게 좀 더 편리하고 풍요로운 세상을 열어주는 것이다. 센서 네트워크의 응용 분야로는 산불, 홍수 등과 같은 환경에 대한 감시와 전장에서 경찰, 감시, 탐지 등의 군사적인 목적 또는 물류, 유통 및 공업 분야 등이 있다[1].

무선 센서 네트워크의 연구는 일반적으로 두 가지 응용의 형태에 맞추어 진행이 되어왔다. 첫 번째는 센서 필드에서 탐지한 이벤트를 센서 네트워크를 통해 사용자에게 알리는 이벤트 기반의 응용으로 목적물 탐지 등에 활용된다. 이와 같은 응용에서는 센서 노드에서 일시적으로 생성된 많은 양의 트래픽을 다중 홉 네트워크를 통해 신속히 싱크로 전송할 수 있는 능력이 요구된다

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 저능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

\* 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과

dhlee@adams.kw.ac.kr

\*\* 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수

kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2007년 11월 29일

심사완료 : 2008년 4월 25일

Copyright©2008 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 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 제4호(2008.8)

[2,3]. 두 번째는 여러 센서 노드의 센싱 정보를 주기적으로 모니터링 하는 주기적 모니터링 기반의 응용으로 오랜 시간에 걸쳐 특수한 환경을 관찰하기 위한 목적으로 활용된다. 이와 같은 응용에서는 고정된 적은 양의 트래픽이지만 다수의 노드로부터 주기적으로 발생하기 때문에 동시 다발적인 트래픽에 대한 안정적인 처리가 요구된다[4]. 주기적 모니터링 기반의 응용은 이벤트 기반의 응용과 같은 강한 실시간성이 요구되는 것은 아니지만 센서 노드에서의 센싱 정보가 적절한 패킷 수명 시간 내에 싱크노드로 도달될 수 있어야 한다.

무선 센서 네트워크는 기본적으로 작은 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되어 있어, 각 센서 노드의 배터리 수명이 다하면 그 기능을 상실하게 된다. 따라서 에너지 효율성은 센서 네트워크의 설계 시 가장 우선시 고려되어야 할 사항으로 많은 연구가 이루어져 왔다[5]. 그 중에서도 MAC(Media Access Control) 프로토콜에서의 낮은 듀티 사이클(Low Duty Cycle) 동작이 에너지 소모를 줄이는 효과적인 방법으로 널리 사용되고 있다[6,7]. 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 차단하는 방식으로 통신에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 하지만 낮은 듀티 사이클의 사용은 높은 전송 지연(Latency)의 문제를 유발한다. 즉 에너지 효율을 위해 수면 상태의 시간을 길게 가져갈수록 센서 노드에서 통신을 수행할 시간이 줄어들기 때문에 데이터 전송의 지연은 높아진다. 높은 전송 지연의 문제는 이벤트 기반 응용이나 주기적 모니터링 기반의 응용을 현실화하기 위해서는 반드시 극복해야할 문제이다.

본 논문에서는 낮은 듀티 사이클을 갖는 MAC 프로토콜에서 수면 상태로 인한 지연의 문제점을 해결하기 위한 RA-MAC(RTS Aggregation-Media Access Control) 프로토콜을 제안하였다. RA-MAC은 수신 노드에서 RTS Aggregation 기법을 이용하여 다수 노드의 데이터 전송 요구를 미리 파악하고 이에 따라 수면 상태의 시간을 적응적으로 조절하게 된다. 이를 통해 듀티 사이클로 인한 전송 지연의 문제를 해결할 수 있다. 또한 이벤트 기반 응용과 주기적 모니터링 기반 응용 각각의 요구사항을 동시에 만족시킬 수 있도록 고안되었다. RA-MAC을 통해 적은 에너지의 소모율과 낮은 전송 지연을 갖게 됨을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문의 2장에서는 낮은 지연을 갖는 프로토콜에 대한 관련 연구를 기술하였고 3장에서는 제안하는 RA-MAC 프로토콜에 대해 상세히 기술하였다. 4장에서는 실험을 통해 RA-MAC 프로토콜의 성능을 평가하였으

며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

## 2. 관련 연구

무선 센서 네트워크의 듀티 사이클 기법에 의한 전송 지연의 문제가 활발히 논의되면서 낮은 듀티 사이클에서도 낮은 전송 지연을 갖는 MAC 프로토콜의 연구가 활발히 진행되었다. 또한 고정된 듀티 사이클이 아닌 필요에 따라 듀티 사이클의 수면 상태 시간을 적응적으로 조정하여 사용할 수 있는 기법이 다수 제안되었다. 본 장에서는 무선 센서 네트워크의 듀티 사이클 MAC 프로토콜에서 전송 지연의 문제를 해결하기 위해 제안된 연구에 대해 소개하고 기존 연구들이 가지는 문제점에 대해서 기술하도록 한다.

### 2.1 낮은 지연을 갖는 MAC 프로토콜

DMAC[8]은 슬롯(Slot) 기반 프로토콜로써 SMAC [6]과 같은 기존의 동기화 된 슬롯 기반 프로토콜이 갖는 문제점을 해결하기 위해 고안되었다. 즉 모든 노드가 동일한 고정된 구간에서 데이터를 전송하거나 수면 상태로 변환에 따라 데이터 전송 구간에서는 충돌의 확률이 증가하게 되고 트래픽 양의 변화에 민감하지 못하며 데이터 전송이 필요한 경우에도 수면 구간의 시작에 의해 다음 사이클을 기다려야하는 Sleep Latency 문제가 발생하게 된다. 특히 다중 홉 전송의 경우 Sleep Latency는 홉 수가 증가함에 따라 비례적으로 증가하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 DMAC에서는 다중 홉에서 전송 순서에 따라 각 노드의 전송 구간과 수신 구간이 맞물리도록 하는 듀티 사이클 스케줄링을 제안하였다. 먼저 센서 네트워크의 토폴로지를 다중 홉 트리로 가정하고 노드는 트리의 깊이에 따라 다른 듀티 사이클의 시작 시간을 갖는다. 듀티 사이클은 수신 구간과 전송 구간, 그리고 수면 구간의 순서를 갖는다. 하위의 노드가 전송 구간일 때 그 부모 노드는 수신 구간으로 맞물리게 되므로 데이터 전송은 다중 홉을 거쳐도 수면 구간에 의한 Sleep Latency를 겪지 않고 싱크까지 전송이 가능하다. 또한 맞물리는 스케줄링에 의해 부모 노드 및 자식 노드의 통신 시 이웃 노드들은 충돌이나 전송 억제를 겪지 않는다. 그림 1은 DMAC의 듀티 사이클 스케줄링을 나타낸다. 하지만 DMAC에서는 슬롯 기반의 프로토콜이 갖는 시간 동기화에 따른 오버헤드가 여전히 존재하고 알고리즘의 복잡도가 커서 저 전력, 저 성능의 센서 노드에 실제 적용하기에는 어려움이 따른다.

X-MAC[9]은 BMAC[7]과 같은 비동기 듀티 사이클의 MAC 프로토콜이 가지는 단점을 해결하기 위해 고안되었다. 즉 수신 노드를 수면 상태에서 깨우기 위해 BMAC에서 사용하는 Long Preamble을 사용하지 않고 목적지 주소가 포함된 패킷화된 Short Preamble을 사

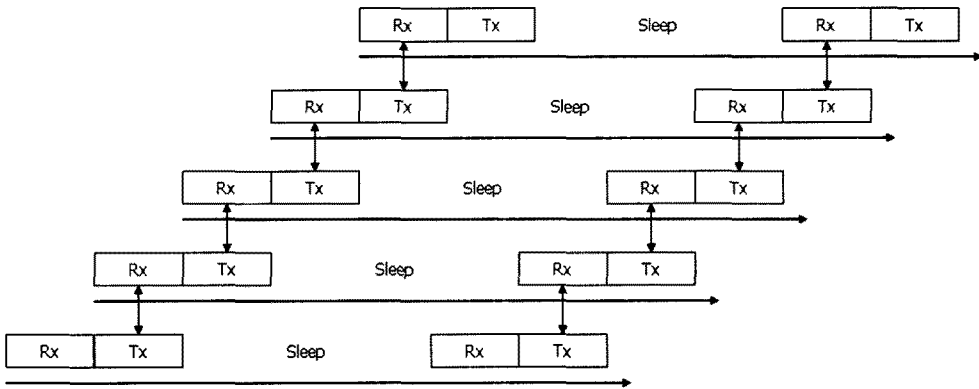


그림 1 DMAC의 듀티 사이클 스케줄링

용한다. Short 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. 이와 같은 방식을 이용하여 X-MAC은 채널 접근에 의해 발생하는 전송 지연을 감소시킬 수 있다. 그림 2는 BMAC의 LPL(Low Power Listening)과 X-MAC의 동작 방식을 비교해서 나타낸 것이다. LPL에서는 송신 노드의 Preamble을 모두 전송한 후에 데이터가 수신될 수 있기 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 전송 지연이 낮아지고 단위 시간당 데이터의 전송률은 높아지게 된다. 하지만 반복적인 Preamble 패킷의 전송 및 ACK 수신 대기 스케줄에 의해 채널 상태 판단의 오차가 발생할 수 있다. 또한 다수의 송신 노드가 채널에 접근하기 위

해 경쟁하는 상황에 대한 고려가 부족하여 이웃 노드의 수가 많아질수록 동작 오류의 확률이 높아진다.

2.2 적응형 듀티 사이클 기법

무선 센서 네트워크의 듀티 사이클 MAC 프로토콜에서 Sleep Latency를 줄이고 듀티 사이클을 트래픽의 상황에 따라 적용시키기 위해 많은 연구가 이루어져왔다. 첫 번째로 SMAC의 문제점 해결을 위해 송신 노드의 데이터에서 전송 후 짧은 시간 동안 Overhearing을 통해 주변의 데이터 전송을 감지하는 Adaptive Listening [10]기법이 제안되었다. Adaptive Listening에서는 Overhearing을 통해 자신에게로 향하는 패킷이 감지되었을 경우 곧바로 수면 상태로 전이하지 않고 데이터를 패킷을 수신하게 된다. 이를 통해 Sleep Latency의 문제를 다소 해결할 수 있다. 하지만 Overhearing 구간은 한정적이므로 모든 데이터 전송에 대해 감지할 수 없는 한계가 존재한다.

X-MAC에서는 수신 노드가 데이터 수신을 마친 후 곧바로 수면 상태로 전이하지 않고 일정 시간동안 채널 감지를 수행하는 기법을 제안하였다. 채널이 유휴 상태가 될 때까지 기다린 송신 노드는 Preamble을 전송하지 않고 임의의 백오프(Random Backoff) 시간 후에 곧바로 데이터를 전송하게 된다. 이를 통해 수신 노드를 깨우기 위한 Preamble 전송의 오버헤드를 줄일 수 있고 또한 채널 경쟁에서 패한 노드가 다음 듀티 사이클 기간 동안 전송을 하지 못하여 생기는 지연의 문제를 해결할 수 있다[9]. 하지만 백오프를 수행하는 송신 노드가 없는 경우에도 수신 노드는 일정 시간동안 채널을 감지해야 하는 오버헤드가 발생한다.

위의 두 가지 적응형 듀티 사이클 기법은 암시적인 방식을 사용하기 때문에 불필요한 오버헤드를 유발하고 데이터 송신 요청 수락에 대한 한계를 지닌다. 따라서 본 논문에서는 채널 경쟁에서 비롯되는 Sleep Latency

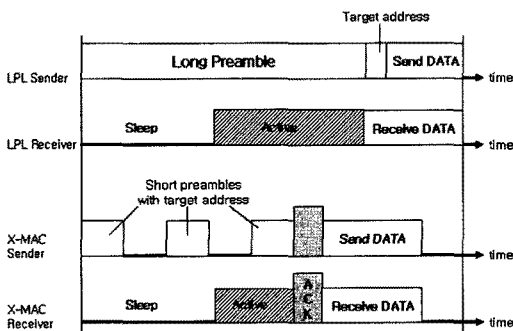


그림 2 LPL과 X-MAC의 동작 방식 비교

문제 해결을 위해 명시적인 적응형 듀티 사이클 기법을 제안하였다. 명시적인 접근 방법을 통해 좀 더 명확히 송신 노드의 요청을 파악할 수 있고 불필요한 오버헤드의 문제를 해결할 수 있다.

### 3. RA-MAC 프로토콜

본 장에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율성과 낮은 전송 지연을 위해 설계된 MAC 계층 프로토콜인 RA-MAC(RTS Aggregation-Media Access Control) 프로토콜에 대해 기술한다. RA-MAC에서는 에너지 효율을 위해 낮은 듀티 사이클을 사용하면서 이에 발생할 수 있는 수면 상태로 인한 지연의 문제를 해결하고자 한다. 또한 무선 센서 네트워크의 대표적 응용 분야인 이벤트 기반과 주기적 모니터링 기반의 상이한 요구사항에 대해 모두 만족시킬 수 있도록 설계되었다. RA-MAC은 비동기 방식의 듀티 사이클 MAC 프로토콜로써 짧고 반복적인 RTS(Request to Send) 패킷의 사용과 RTS Aggregation 기법을 통한 다수 노드의 RTS 요청 통합이 특징이다. 통합된 RTS 패킷을 수신한 노드는 CTS(Clear to Send) 패킷을 통해 데이터 송신 스케줄을 주변 노드에게 전달한다. 이는 명시적으로 듀티 사이클을 트래픽 상황에 맞게 적용시킬 수 있는 방법으로 사용된다.

#### 3.1 채널 접근 기법

무선 센서 네트워크의 채널 접근 기법은 크게 동기 방식과 비동기 방식으로 나뉘어 연구가 진행되었다. S-MAC[6], T-MAC[11], D-MAC[8] 등이 주기적인 동기 신호에 따라 듀티 사이클을 관리하는 대표적인 동기 방식의 프로토콜이고 B-MAC[7], WiseMAC[12]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 Preamble를 사용함에 따라 전송 지연의 문제가 발생할 수 있고, 잠재적 수신 노드들의 Overhearing으로 인해 추가적인 에너지 소모 문제가 발생할 수 있다[9].

RA-MAC의 채널 접근 기법은 실제 센서 노드에 구현하기 적합한 비동기 방식을 사용한다. 또한 비동기 방식의 MAC 프로토콜에서 Long Preamble로 인한 불필요한 전송 지연 및 에너지 소모를 줄이기 위해 XMAC의 Short Preamble과 유사한 짧고 반복적인 RTS 패킷을 통하여 수신 노드에게 전송 요청을 전달한다. 짧고 반복적인 RTS 패킷의 사용은 비동기 방식 MAC 프로

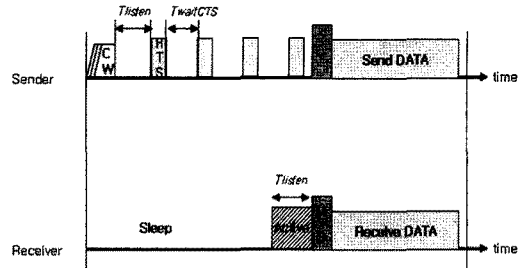


그림 3 RA-MAC의 채널 접근 기법

토콜의 성능 향상과 3.2절에서 기술한 RTS Aggregation 기법을 사용하기 위해 반드시 필요하다.

RA-MAC의 채널 접근 기법의 동작 과정은 다음과 같다. 먼저 송신 노드가 전송할 데이터가 있을 경우 임의의 백오프 과정을 거친 후  $T_{listen}$  시간 동안 채널의 상태를 판단한다. 채널이 유휴 상태라고 판단이 될 경우 송신 노드는 RTS 패킷을 전송하고  $T_{waitCTS}$  동안 수신 노드의 응답인 CTS 패킷을 기다린다. 만약 CTS가 전송되지 않았을 경우 다시 RTS 패킷을 전송하고 CTS 패킷을 기다리는 것을 듀티 사이클의 수면 상태 시간인  $D_{SLEEP}$  동안 반복한다. 만약 수신 노드가 활성 상태가 되어 RTS 패킷을 수신하였을 경우 즉시 CTS 패킷을 전송하게 된다.  $T_{waitCTS}$  구간 내에서 CTS 패킷을 수신한 송신 노드는 수신 노드와의 데이터 교환을 시작한다. 그림 3은 RA-MAC의 채널 접근 기법을 나타낸 것이다.

송신 노드의 채널 상태를 판단하는 시간 및 수신 노드의 RTS 패킷을 수신하는 시간인  $T_{listen}$ 은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 즉 RTS 패킷의 전송 시작 시간을 알 수 없기 때문에  $T_{listen}$ 은 두 RTS 패킷 전송 시간의 차이만큼의 충분한 시간이 필요하다. 두 RTS 패킷 사이의 전송 시간은 RTS 전송 시간인  $D_{RTS}$ 와 CTS 패킷을 기다리는 시간인  $T_{waitCTS}$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$T_{listen} = D_{RTS} + T_{waitCTS} \quad (1)$$

송신 노드는 수신 노드에서 전송하는 CTS 패킷을 수신하기 위한 시간인  $T_{waitCTS}$  동안 충분히 CTS 패킷을 수신하여 처리할 수 있어야 한다. 즉, 식 (2)와 같이 CTS 전송 시간인  $D_{CTS}$ 와 SIFS(Short Interframe Space)만큼의 간격을 고려하여 정의한다.

$$T_{waitCTS} = SIFS + D_{CTS} + SIFS \quad (2)$$

#### 3.2 RTS Aggregation 기법

IEEE 802.11 MAC에서 RTS/CTS 기법은 Hidden Node Problem의 방지 및 데이터 전송을 위해 채널을

예약하는 기능을 수행한다. 즉, 송신 노드의 RTS 패킷을 수신한 이웃 노드들은 데이터 전송이 예약되었음을 알고 패킷 전송을 적절한 시간 중지하여 충돌의 가능성을 막을 수 있다. 무선 센서 네트워크의 비동기 MAC 프로토콜에서 사용하는 Long Preamble 또한 채널을 예약하는 RTS와 같은 기능을 수행하게 된다. 하지만 낮은 듀티 사이클 환경에서는 Long Preamble에 의해 데이터의 송신이 억제되었을 경우 다음 전송 기회를 위해 오랜 시간을 대기해야 한다. 특히 수신 노드의 활성 구간 내에 패킷 전송을 못한 노드의 경우 다음 활성 구간이 돌아올 때까지 대기해야 하므로 높은 전송 지연이 발생하게 된다.

짧고 반복적인 RTS 패킷으로 Long Preamble를 대체한 RA-MAC에서는 RTS에 의한 채널 예약이 다소 유연하게 적용될 수 있다. 짧고 반복적인 RTS 패킷 전송은 송신 노드가 지속적으로 RTS 패킷을 전송하는 것이 아닌 전송 상태와 수신 상태가 반복되는 방식으로 동작하기 때문에 수신 상태에서 이웃 노드들은 기본적인 채널 접근 기법을 방해하지 않는다면 전송이 억제되지 않고 다른 전송 작업을 수행할 수 있는 기회를 가질 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 다수의 송신 노드에서 동일 수신 노드로 향하는 RTS 패킷을 하나의 패킷으로 통합하여 전송하는 RTS Aggregation 기법을 제안하였다.

RTS Aggregation 기법의 동작 방식은 다음과 같다. 전송할 데이터가 있는 Sender(1)은 먼저  $T_{listen}$  구간에서 다른 노드의 데이터 전송 혹은 동일 수신 노드로 향하는 RTS 패킷이 있는지 확인한다. 채널이 유휴 상태인 경우 RTS 패킷 통합의 기준이 되는 MainRTS 패킷을 전송하고  $T_{waitCTS}$  구간에서 수신 노드의 CTS 패킷 혹은 SubRTS 패킷을 기다린다. 늦게 전송을 시도하는 Sender(2)는  $T_{listen}$  구간에서 Sender(1)의 MainRTS 패킷을 수신하게 된다. MainRTS 패킷의 필드를 검사하여 자신과 동일한 수신 노드로 향할 경우 CTS 패킷과의 충돌을 방지하기 위해 DIFS(Distributed Inter-frame Space) 만큼의 시간을 기다린 후 RTS 패킷의 통합 요청을 위해 SubRTS 패킷을 Sender(1)에게 전송한다.  $T_{waitCTS}$  구간에서 Sender(2)의 SubRTS 패킷을 수신한 Sender(1)은 자신의 MainRTS 패킷에 전송 받은 SubRTS 패킷의 정보를 추가하고 갱신된 MainRTS 패킷을 다시 수신 노드에게 전송한다. 갱신된 MainRTS 패킷을 수신한 Sender(2)는 MainRTS 패킷의 정보를 통해 자신의 RTS 정보가 통합되었는지 확인한다. 만약 통합이 되지 않은 경우 다시 SubRTS 패킷을 전송하여 통합을 시도하고 통합이 된 경우엔 CTS 수신을 위한 대기 상태로 전이한다. 이와 같은 확인 과정을 통해 정

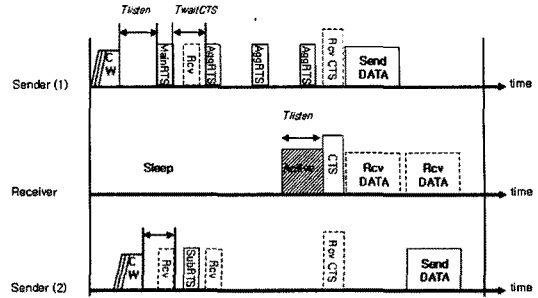


그림 4 RTS Aggregation 기법

쟁하는 송신 노드간의 SubRTS 패킷 충돌이 일어났을 경우에도 다음  $T_{waitCTS}$  구간에서 재시도가 가능하다. 수신 노드가 활성 상태가 되어 통합된 RTS 패킷을 수신한 경우 다수 노드의 전송 요청을 종합하여 스케줄링 정보를 작성하고 이를 CTS를 통해 브로드캐스팅한다. CTS를 수신한 Sender(1)과 Sender(2)는 스케줄링 정보에 따라 적절한 시간에 수신 노드에게 데이터를 전송한다. CTS 패킷의 전송으로 인해 RTS Aggregation을 수행하지 못한 노드는 다음 듀티 사이클에서 재시도하게 된다. 그림 4는 RTS Aggregation 기법의 동작과정을 나타낸 것이다.

송신과 수신이 빈번히 일어나는 RTS Aggregation 기법의 특성으로 인해 정교한 패킷 전송 정책 및 시간 간격의 정의가 필요하다. 특히  $T_{waitCTS}$  구간에서는 CTS 패킷의 수신은 물론 SubRTS 패킷의 수신도 가능하기 때문에 DIFS를 사용하여 우선순위에 차별을 둔다. SubRTS 패킷을 수신하기 위한 시간으로써의  $T_{waitCTS}$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{waitCTS} = DIFS + D_{RTS} + SIFS \quad (3)$$

RTS Aggregation 기법을 사용할 경우 한 듀티 사이클 내에서 다수의 노드에게 데이터 전송의 기회를 줄 수 있기 때문에 듀티 사이클로 인한 높은 전송 지연의 문제를 해결할 수 있다. RTS Aggregation의 성능을 수식을 통해 살펴보면 다음과 같다.  $D_{SLEEP}$ 을 듀티 사이클의 수면 시간,  $D_{ACTIVE}$ 를 듀티 사이클의 활성 시간,  $D_{DATA}$ 를 데이터 전송 시간,  $START_n$ 을  $n$ 노드의 전송 시작 시간으로 보았을 때, 식 (4)는 RTS Aggregation을 사용하지 않았을 경우  $n$ 개 노드의 평균 전송 지연을 나타낸 것이다. 즉, RTS Aggregation을 사용하지 않을 경우, 경쟁하는 노드 수가 늘어남에 따라 전송 지연은  $D_{SLEEP}$ 과 비례하여 증가하게 된다. 식 (5)는 RTS Aggregation을 사용할 경우  $n$ 개 노드의 평균 전송 지연을 나타낸 것으로 전송 지연이  $D_{DATA}$ 와 비례하여 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 센서 네트워크에

서의  $D_{SLEEP}$ 은  $D_{DATA}$ 에 비해 큰 시간이기 때문에 RTS Aggregation을 사용할 경우 낮은 전송 지연을 보임을 수식을 통해 확인할 수 있다.

$$\frac{\sum_{k=1}^n ((D_{SLEEP} - START_n) + ((k-1) \times D_{SLEEP}) + D_{DATA})}{n}$$

$$= D_{SLEEP} - START_n + \frac{D_{SLEEP} \times (n-1)}{2} + D_{DATA} \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^n ((D_{SLEEP} - START_n) + D_{ACTIVE} + k \times D_{DATA})}{n}$$

$$= D_{SLEEP} - START_n + D_{ACTIVE} + \frac{D_{DATA} \times (n+1)}{2} \quad (5)$$

RTS Aggregation 기법의 사용을 위해 적절한 RTS 패킷 포맷의 정의가 필요하다. RA-MAC의 RTS 패킷의 필드 구성은 그림 5와 같다. Preamble과 Sync 필드는 기본적인 Preamble 및 동기화 필드이고 Type 필드는 RTS의 타입을 나타내는 것으로 MainRTS 및 SubRTS를 구분 짓는다. RXID는 수신 노드의 아이디로써 패킷의 목적지 정보 및 동일 수신 노드로 향하는 RTS 패킷임을 판단하기 위한 수단으로 사용된다. TX\_Info 필드는 송신 노드의 정보를 나타내는 것으로 2바이트로 표현된다. TX\_Info 필드는 배열을 사용하여 여러 노드의 전송 정보를 담게 되는데 배열의 크기는 네트워크 환경에서 존재하는 최대 밀집도를 고려한  $D_{MAX}$  값을 사용한다.  $D_{MAX}$ 의 값이 커질수록 통합 가능한 RTS 패킷의 수는 늘어나게 되어 RTS Aggregation의 효율은 증가하나 RTS 패킷의 크기도 늘어나기 때문에 에너지 소모가 커지게 된다. 따라서 실제 환경에 맞는 적절한 값으로 정의해야 한다.

RTS 패킷의 TX\_Info를 통해 다수 노드의 전송 정보가 수신 노드에게 전달될 수 있다. MainRTS를 생성한 노드는 첫 번째 TX\_Info 필드에 자신의 전송 정보를

담게 되고 SubRTS에 의해 얻은 다른 노드의 정보는 두 번째 TX\_Info 필드부터 하나씩 순서를 늘려가면서 담게 된다. 2바이트로 표현되는 TX\_Info에는 송신 노드의 아이디인 TXID와 수신 노드에서 우선순위를 판단하기 위한 근거가 되는 세 필드로 구성된다. max\_depth 필드는 전송 패킷의 근원지에 해당하는 트리 깊이 정보를 반영하는 것으로 자신이 전송할 패킷 중에서 최대 깊이의 값을 사용한다. 트리 깊이 정보를 통해 패킷이 생성된 시기를 짐작하여 사용할 수 있다. packets 필드는 노드가 전송할 패킷의 수를 나타내는 것으로 기본 값은 1로 적용된다. 이는 센서 네트워크의 이벤트 기반 응용과 같이 다수의 데이터가 일시적으로 발생할 경우 수신 노드에서 연속적으로 처리가능 하도록 돕는다. retry 필드는 데이터 전송 실패 및 RTS Aggregation 실패 등으로 인해 데이터가 한 듀티 사이클 내에 처리되지 못한 경우 그 값을 증가시켜 우선순위를 높이기 위해 사용된다.

무선 센서 네트워크에서 싱크 노드 및 데이터 수집 노드는 다수의 노드에서의 동시다발적인 패킷 전송에 의해 혼잡이 발생하게 되고 또한 높은 전송 지연을 겪게 된다. 본 논문에서 제안하는 RA-MAC의 RTS Aggregation 기법을 통해 다수의 노드에서 한 노드로 데이터 전송을 시도할 경우 다수의 요청을 통합하여 수신 노드에게 전송할 수 있고 수신 노드는 이를 한 듀티 사이클 주기 내에서 처리할 수 있기 때문에 높은 전송 지연 문제를 해결할 수 있고, 이에 따라 데이터의 전송률도 높아지게 된다.

### 3.3 수신 노드의 전송 스케줄링

RTS Aggregation 기법을 통해 다수의 전송 정보를 수신한 노드는 우선순위 판단을 통해 각 송신 노드의 전송 순서 및 시간을 결정하고 이를 CTS 패킷을 통해 모든 송신 노드에게 전달한다. 우선순위 판단은 FCFS (First Come First Serve) 관점에 따라 먼저 전송을 시작한 노드에게 우선권을 준다. 이는 센서 네트워크의 주기적 모니터링 기반 응용의 요구사항인 네트워크 내에서 적절한 패킷 수명을 보장하기 위함이다. 이러한 관점

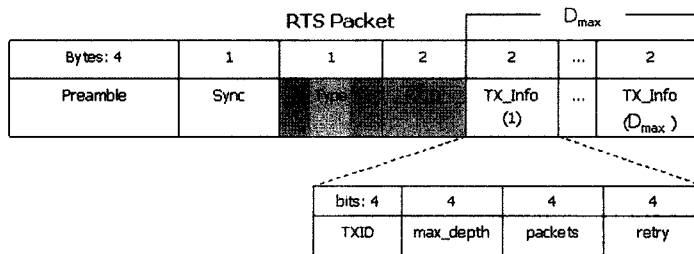


그림 5 RA-MAC의 RTS 패킷 포맷

으로 다음의 네 가지 스케줄링의 원칙에 따라 송신 노드의 우선순위를 판단한다. 첫째, RTS 패킷의 TX\_Info 필드에서 retry 값이 큰 노드가 우선순위를 갖는다. 즉, retry 값이 클수록 전송 지연이 높은 패킷이기 때문에 송신 노드 중 가장 먼저 데이터를 전송하도록 한다. 둘째, TX\_Info 필드에서 max\_depth 값이 큰 노드가 우선순위를 갖는다. 즉, 다중 홑 트리 토폴로지에서 깊이 값이 클수록 오랜 전송 시간을 겪게 되므로 송신 노드 중 가장 먼저 데이터를 전송하도록 한다. 셋째, Main-RTS를 전송한 노드가 SubRTS를 전송한 노드보다 빠른 우선순위를 갖는다. 이는 제안하는 채널 접근 기법에서는 MainRTS가 SubRTS보다 먼저 전송을 시작하므로 MainRTS를 전송한 노드가 송신 노드 중 가장 먼저 데이터를 전송하도록 한다. 넷째, 위의 세 가지 원칙을 판단하였을 때 우선순위가 같은 경우 TX\_Info 필드의 packets 값을 비교하여 전송할 패킷수가 더 많은 노드가 우선순위를 갖는다. 이는 이벤트 기반 응용에서 발생할 수 있는 다수의 패킷을 적절히 처리하기 위해 전송할 패킷 수가 많은 노드에게 우선권을 주기 위한 원칙이다. 이와 같은 네 가지 스케줄링 원칙을 첫 번째 원칙부터 단계적으로 비교하여 각 송신 노드의 우선순위를 판단하게 된다. 만약 한 송신 노드의 우선순위가 적정 순위 안에 들지 못하는 경우, 해당 노드는 전송을 포기하고 retry 값을 높인 후 다음 듀티 사이클에서 재전송을 시도한다.

네 가지 스케줄링의 원칙에 따라 결정된 스케줄링 정보는 CTS 패킷을 통해 송신 노드들에게 전달된다. CTS 패킷의 포맷은 그림 6과 같다. Preamble과 Sync 필드는 기본적인 Preamble 및 동기화 필드이고 Type 필드는 패킷 타입이 CTS임을 나타낸다. RXID는 수신 노드의 아이디로써 기존의 CTS 패킷과 달리 다수의 전송 요청 노드에게 브로드캐스트 형식으로 전달하기 위해 사용한다. RX\_Info 필드는 송신 노드의 스케줄링 정보를 배열 형식으로 나타낸 것으로 각각 2바이트로 표현된다. RX\_Info 필드의 배열의 크기는 수신 노드의 최

대 큐잉 사이즈를 고려한  $Q_{MAX}$  값을 사용한다.

CTS 패킷의 RX\_Info를 통해 다수의 송신 노드에게 전송 스케줄링 정보가 전달될 수 있다. RX\_Info 필드 배열은 가장 먼저 전송이 이루어지는 노드의 순으로 채워지게 된다. 각각의 RX\_Info 필드는 전송을 수행할 노드의 아이디인 TXID 필드와 전송의 순서를 나타내는 slot\_start 필드, 그리고 전송할 패킷의 수를 나타내는 slot\_length 필드로 이루어진다.

RA-MAC 프로토콜은 3장의 각 절에서 살펴본 바와 같이 짧고 반복적인 RTS 패킷을 이용한 채널 접근 기법과 RTS Aggregation 기법, 그리고 수신 노드의 전송 스케줄링에 의해 두 노드간의 데이터 전달이 이루어진다. RA-MAC 프로토콜의 송신단의 전체적인 동작 흐름도는 그림 7과 같다.

RA-MAC 프로토콜은 비동기 듀티 사이클 MAC 프로토콜에서 에너지 효율적이고 낮은 전송 지연을 갖는 Short Preamble 기법에 근간을 두고 있다. 하지만 RTS Aggregation 기법을 통해 기존의 Short Preamble MAC 프로토콜과 유사한 에너지 효율성을 가지면서 좀 더 낮은 전송 지연을 이룰 수 있다. 이러한 특징은 주변 노드의 수가 증가하여 채널 경쟁이 심해질수록 더 많은 RTS Aggregation 기회가 생기기 때문에 더욱 뚜렷이 나타난다. 또한 수신노드의 전송 스케줄링에 의해 이벤트 기반 응용과 주기적 모니터링 기반 응용간의 지연에 관련된 상이한 요구사항을 동시에 만족시킬 수 있다.

#### 4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 논문에서 제안하는 RA-MAC 프로토콜의 성능 평가 실험 내용을 기술한다. 성능 평가를 위해 TinyOS[13] 상에 동일한 듀티 사이클을 가지는 Short Preamble MAC 프로토콜과 RA-MAC 프로토콜을 구현하여 실험을 통해 성능 비교를 수행하였다. 성능 평가의 기준은 전송 지연과 전송률, 그리고 에너지 효율이다.

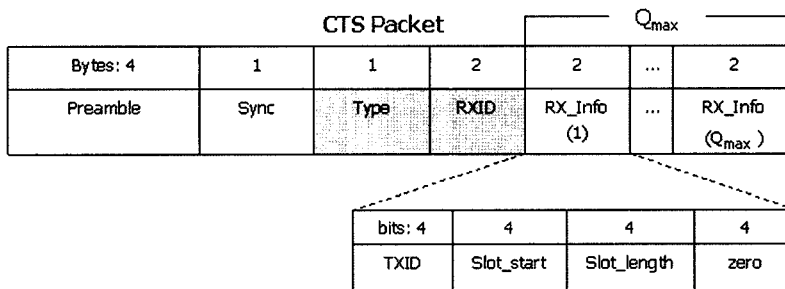


그림 6 RA-MAC의 CTS 패킷 포맷

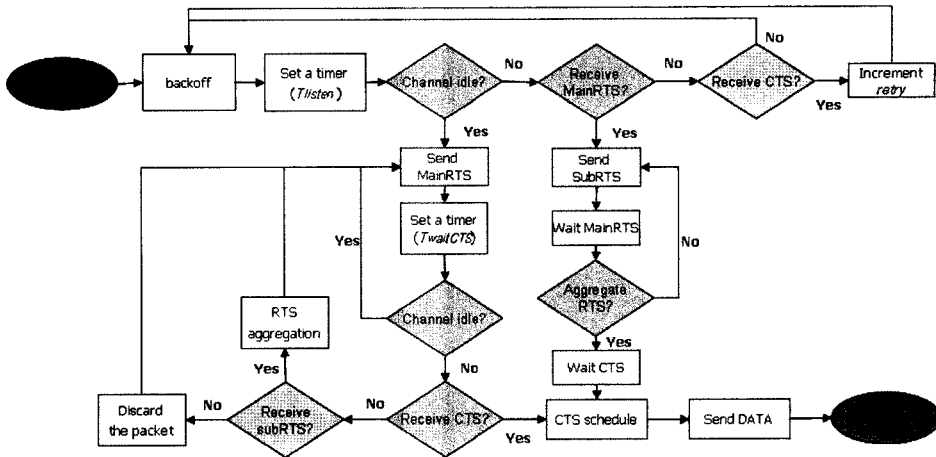


그림 7 RA-MAC에서 송신 노드의 동작 흐름도

4.1 실험 환경

제안하는 RA-MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 범용 센서 네트워크 플랫폼인 Crossbow사의 MICAZ [14]에 센서 네트워크용 운영체제인 TinyOS의 MAC 프로토콜을 수정하여 실험을 수행하였다. 실험 환경은 그림 8과 같이 2 × 2m의 테이블 위에 하나의 수신 노드와 5개의 송신 노드를 두어 싱글 홉 스타 토폴로지를 구성하였다.

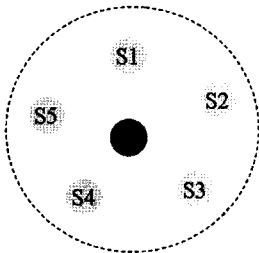


그림 8 네트워크 토폴로지

위의 실험 환경에서 비동기 방식의 Short Preamble 을 사용하는 MAC 프로토콜과 제안하는 RA-MAC 프로토콜에 대한 실험 결과를 비교하여 성능 평가를 수행하였다. DMAC, SMAC과 같은 동기 방식의 프로토콜의 경우 노드 간 시간 동기화에 따른 알고리즘의 차이로 인해 동등한 조건에서 성능 비교가 불가능하므로 비교 대상에서 제외하였다. 비교 대상인 Short Preamble MAC은 XMAC에서 제안된 채널 접근 기법을 사용하지만 적용형 듀티 사이클 기법은 사용하지 않는다. 실험에서의 듀티 사이클은 X-MAC의 실험과 동일하게 활성 구간인  $D_{ACTIVE}$ 를 15ms, 수면 구간인  $D_{SLEEP}$ 을 500ms로 설정하였고 송신 노드의 RTS 패킷 전송 반복

시간 역시 500ms로 설정하였다. 송신 노드의 RTS 패킷 전송 시간  $D_{RTS}$  및 수신 노드의 CTS 전송 시간  $D_{CTS}$ 는 패킷의 크기와 IEEE 802.15.4[15] 표준에서 정의된 Symbol rate를 고려하여 0.9ms로 설정하였다. 송신 노드에서 CTS 패킷을 기다리는 시간인  $T_{waitCTS}$ 는 14.1ms로 설정하였고  $T_{listen}$ 은 식 (1)에 의해 15ms 로  $D_{ACTIVE}$ 과 동일하게 적용하였다.  $D_{MAX}$ 는 실험 환경에서 최대 밀집도인 5를 적용하였고  $Q_{MAX}$  또한 5로 설정하였다. 다양한 실험을 위해 노드 수 및 송신 노드에서의 패킷 주입률을 변화시키면서 각 송신 노드 당 100개의 패킷을 전송할 때까지 실험을 수행하였다.

4.2 전송 지연 성능 평가

본 실험에서는 전송 패킷의 평균 지연 시간에 대한 성능을 평가하였다. 4.1절에서 기술한 실험 환경을 기반으로 노드 수를 1에서 5까지 변화시키면서 각 노드에서 100개의 패킷을 전송하여 패킷 당 평균 전송 지연 시간을 측정하였다. 각 노드의 데이터 전송 간격은 0.5초로 설정하였다. 그림 9는 노드 수에 따른 평균 지연의 결과를 나타낸 것이다. 노드 수가 1일 때는 Short Preamble MAC 프로토콜과 RA-MAC의 실제적인 동작의 차이가 없기 때문에 평균 지연 시간도 비슷한 값을 갖는다. 하지만 노드 수가 증가함에 따라 Short Preamble MAC 프로토콜의 평균 지연 시간은 큰 폭으로 증가하지만 RA-MAC 프로토콜은 증가 폭이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 RA-MAC 프로토콜은 RTS Aggregation 기법에 의해  $D_{MAX}$  값인 5 이하의 동시적인 전송 요청도 한 듀티 사이클 내에서 처리 가능하기 때문이다. 표 1은 노드 수에 따른 Short Preamble MAC 프로토콜과 RA-MAC 프로토콜의 패킷 당 평균 지연 시간을 자세히 나타낸 것이다.



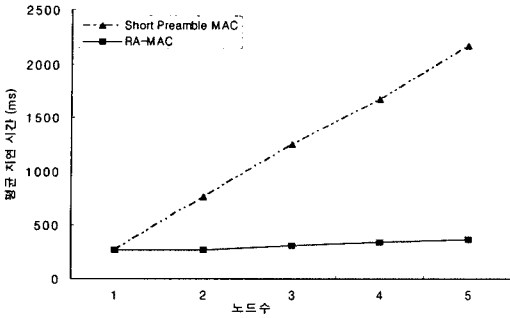


그림 9 노드 수에 따른 평균 지연 시간 비교

표 1 패킷 당 평균 지연 시간 (단위: ms)

방식 \ 노드 수	1	2	3	4	5
Short Preamble MAC	264.07	762.38	1251.32	1671.36	2164.99
RA-MAC	263.95	267.25	309.97	339.51	362.52

패킷 주입률과 전송 지연과의 관계를 알아보기 위해 송신 노드 3개를 두고 데이터 전송 간격을 0.2초, 0.4초, 0.6초, 0.8초, 1초로 변경하면서 100개의 패킷을 전송하여 패킷 당 평균 전송 지연 시간을 실험하였다. 그림 10은 패킷 주입률에 따른 평균 지연의 결과를 나타낸 것이다.

Short Preamble MAC 프로토콜은 패킷 주입률이 높을 때 듀티 사이클로 인한 높은 전송 지연을 겪는다. 반면 RA-MAC 프로토콜은 RTS Aggregation 기법에 의해 패킷 주입률에 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 지연 시간을 갖는다. RA-MAC에서 데이터 전송 간격이 0.2초일 때 다소 지연이 높은 이유는 듀티 사이클 주기인 0.5초 보다 빠른 패킷 주입률로 인한 RTS Aggregation의 실패가 발생하기 때문이고 데이터 전송 간격이 1에 가까워질 때 지연이 높아지는 이유는 패킷 주입률이 낮아져서 RTS 패킷 통합의 기회가 줄어들었기 때문이다.

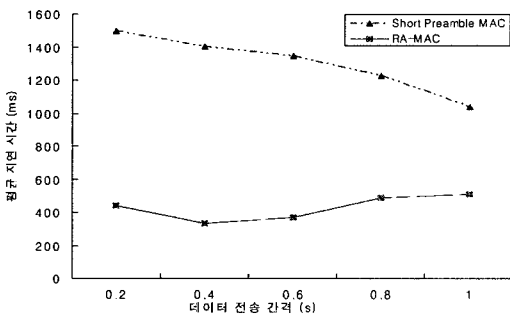


그림 10 패킷 주입률에 따른 평균 지연 시간 비교

### 4.3 전송률 성능 평가

본 절에서는 Short Preamble MAC 프로토콜과 RA-MAC 프로토콜간의 전송률을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 송신 노드는 3개를 두고 데이터 전송 간격을 0.2초, 0.4초, 0.6초, 0.8초, 1초로 변경하면서 30초 동안 패킷 전송을 수행하여 초당 평균 수신 패킷의 수를 비교하였다. 그림 11은 패킷 주입률에 따른 평균 수신율을 나타낸 것이다.

Short Preamble MAC은 패킷 주입률에 상관없이 초당 평균 2개의 패킷을 수신하였다. 그 이유는 고정된 듀티 사이클에 의해 패킷을 처리할 수 있는 시간이 한정되어 있기 때문이다. 반면 RA-MAC 프로토콜은 대체적으로 패킷 주입률이 높을 때 높은 평균 수신율을 보였다. 그 이유는 RTS Aggregation에 의해 한계점 이하의 패킷 주입률에서는 대부분의 패킷을 듀티 사이클에 의한 전송 지연을 겪지 않고 처리할 수 있기 때문이다. 데이터 전송 간격이 0.2초일 때는 RTS Aggregation의 실패가 발생하여 0.4초의 경우 보다 낮은 평균 수신율을 보였다.

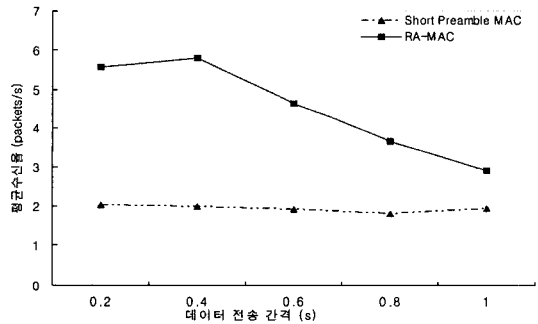


그림 11 패킷 주입률에 따른 평균 전송률 비교

### 4.4 에너지 효율 성능 평가

본 절에서는 Short Preamble MAC 프로토콜과 RA-MAC 프로토콜간의 에너지 효율을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 송신 노드는 3개를 두고 데이터 전송 간격은 1초로 하여 시간의 경과에 따른 에너지 소모량을 비교하였다. 에너지 소모는 듀티 사이클의 활성화 구간과 패킷 전송 시에 가장 많이 발생하므로 듀티 사이클 주기를 기준으로 데이터 패킷 및 컨트롤 패킷의 전송량 비교를 통해 에너지 효율을 평가하였다. 그림 12는 시간에 따른 평균 데이터 전송량을 나타낸 것이다.

Short Preamble MAC과 비교하여 RA-MAC의 데이터 전송량은 전체적으로 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 RA-MAC에서는 RTS Aggregation에 의해 한 듀티 사이클 내에서 처리하는 데이

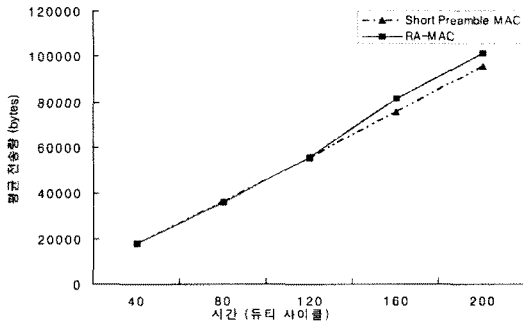


그림 12 시간에 따른 데이터 전송량 비교

타의 양은 증가하지만 재전송에 따르는 오버헤드가 감소하기 때문이다. 또한 컨트롤 패킷은 큰 오버헤드 없이 간단한 SubRTS 패킷만 추가되기 때문에 기존의 듀티 사이클 MAC 프로토콜과 비교하였을 때 에너지 소모의 차이는 크지 않게 된다.

### 5. 결론 및 향후 과제

무선 센서 네트워크의 연구는 이벤트 기반과 주기적 모니터링 기반이라는 두 가지 응용의 형태에 맞추어 진행되었다. 두 가지 응용의 핵심적인 요구 사항은 다르지만 안정적인 운용을 위해 공통적으로 낮은 전송 지연의 요구가 존재한다. 하지만 기존의 무선 센서 네트워크의 프로토콜은 에너지 효율성을 중심으로 연구가 진행되었기 때문에 트레이드오프(Tradeoff) 관계인 에너지 효율과 낮은 전송 지연을 동시에 만족시키기 힘들다.

본 논문에서 제안하는 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜인 RA-MAC은 낮은 듀티 사이클을 사용하여 에너지 효율성을 가지면서도 듀티 사이클로 인해 발생하는 높은 전송 지연의 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 짧고 반복적인 RTS 패킷과 RTS Aggregation 기법을 사용하였다. 또한 수신 노드의 전송 스케줄링을 통해 상이한 이벤트 기반과 주기적 모니터링 기반 응용의 요구 사항을 동시에 만족시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 실험을 통해 기존에 제안된 Short Preamble MAC 프로토콜과 비슷한 에너지 효율을 보이면서 좀 더 낮은 전송 지연을 이루고 전송률을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

향후 연구 과제로는 데이터 전송이 각 노드에서 다중 홉을 거쳐 싱크로 전달되는 상황에서 제안된 RA-MAC 프로토콜에 대한 성능 검증이 필요하며, 이러한 상황에서 발생할 수 있는 다중 홉 전송 지연의 해결 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 무선 센서 네트워크에서 MAC 계층과 라우팅 계층을 동시에 고려한 통합 계층에 관한 연구를 하고자 한다.

### 참고 문헌

- [1] 김재현, 김석규, 이재용, "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC/라우팅 프로토콜," 전자공학회지, 제32권 7호, pp. 57-73, 2005.
- [2] S. Liu, K. Fan, and P. Shnha, "CMAC: An Energy Efficient MAC Layer Protocol Using Convergent Packet Forwarding for Wireless Sensor Networks," IEEE SECON'07, 2007.
- [3] S. Du, A. Saha, and D. Johnson, "RMAC: A Routing-Enhanced Duty-Cycle MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE INFOCOM'07, 2007.
- [4] A. Woo and D. Culler, "A Transmission Control Schemes for Media Access in Sensor Networks," ACM MOBICOM'01, 2001.
- [5] I. Akyildiz, W. Su Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communication Magazine, Vol. 40, Issue 8, pp. 102-114, 2002.
- [6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE INFOCOM'02, 2002.
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," ACM SENSYS'04, 2004.
- [8] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," IPDPS'04, 2004.
- [9] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," ACM SENSYS'06, 2006.
- [10] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 12, Issue 3, pp. 493-506, 2004.
- [11] T. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," ACM SENSYS'03, 2003.
- [12] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks," ISCC'04, 2004.
- [13] TinyOS, <http://www.tinyos.net>
- [14] Crossbow MICAz motes, <http://www.xbow.com>
- [15] "IEEE 802.15.4 Std: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," IEEE Computer Society Press, pp. 1 679, 2003.

이 동 호

정보과학회논문지 : 정보통신  
제 35 권 제 2 호 참조

정 광 수

정보과학회논문지 : 정보통신  
제 35 권 제 1 호 참조