

무선 센서 네트워크에서 패킷의 충돌과 전송지연을 감소시키는 MAC 프로토콜

정운표[○], 엄두섭
고려대학교 전자전기공학과
wpjung@korea.ac.kr, eomds@korea.ac.kr

MAC Protocol for Achieving Collision-free by Interference and End-to-end Delay Minimization in Wireless Sensor Networks

Woon-Pyo Jung[○], Doo-Seop Eom
Department of Electronic and Electrical Engineering
Korea University

요 약

무선 시스템에서는 수신도 송신처럼 에너지를 소모한다. 이러한 전력소모는 배터리를 전원으로 오랜시간 동작해야 하는 센서 망에서는 치명적이다. 특히 센서 네트워크를 위해 제안된 경쟁기반 방식의 MAC은 에너지 소모를 야기하는 패킷간의 충돌을 최소화 하고 전송지연을 줄이는 프로토콜이 필요하다. 본 논문에서는 adaptive S-MAC의 방식을 그대로 사용하면서 간섭에 의한 충돌을 줄이는 알고리즘을 이용하여 한 sync interval 내에서 최대 3홉까지 전송 가능한 MAC 프로토콜을 제안하였다. NS2의 시뮬레이션을 통해 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 기존 MAC과 비교하여 증명하였다.

1. 서 론

센서네트워크란 무수히 많은 매우 작은 센서노드를 우리가 살고 있는 곳곳에 설치해 노드 간에 무선으로 데이터를 주고받으며 인간과 상호작용 할 수 있도록 하는 기술이다.

최근에 이러한 응용 중에서 특히 감시정찰 센서네트워크의 경우, 군사적 또는 민수적 측면에서 그 개발의 필요성이 크게 대두되고 있다. 앞으로의 미래전쟁은 다양한 센서로부터 들어온 표적, 항적, 위치, 피아식별 등의 디지털 기술 정보를 가공하여 곧바로 타격하는 sensor-to-shooter 개념의 네트워크 중심전 양상을 지니게 되는데, 이 경우 기존 플랫폼 중심 무기체계에서 감지하지 못하는 각종 전술 정보를 실시간으로 수집할 수 있는 센서기반의 감시체계의 개발은 반드시 필요하다. 또한 민수 분야에서도 산불방지 시스템이나 교량, 도로 등 인간의 접근이 쉽지 않은 건축물에 대한 각종 원격 탐지 시스템에 감시정찰 센서네트워크 기술은 없어서는 안 될 중요한 기술이다.

센서 네트워크에서 센서노드의 에너지 소모를 줄여 네트워크의 수명을 늘리는 것이 가장 큰 이슈가 되고 있다. 무선시스템입장에서 에너지소모를 야기하는 요소를 살펴보면 간섭에 의한 collision, Overhearing, Idle listening, control packet overhead 등이다. 이러한 에너지소모 요소를 고려하여 센서노드용 MAC은 자신이 송신하거나 수신할 때만 깨어나고 나머지 시간에는 sleep하여

전원을 절약하는 기능을 기본적으로 지원한다[1]. IEEE 802.15.4에서는 비컨 메시지를 통해 Active/Inactive 구간의 길이와 CA P, CFP등을 설정하게 된다. Inactive 기간이 길고 beacon interval이 길수록 노드가 sleep하는 시간이 길어지기 때문에 노드의 수명은 늘어난다. 하지만 데이터를 전달할 시간이 늘어나고 군 환경이나 응급상황에서 실시간으로 급하게 전송해야 하는 경우 불리할 수 있다. 이를 극복하기 위해 센서네트워크를 위해 제안된 MAC은 CSMA/CA를 활용한 경쟁기반 방식, TDMA를 활용한 스케줄 기반 방식, 여러 개의 채널을 활용하는 방식, 여러 가지 방식을 혼합해서 사용하는 하이브리드 방식 등으로 분류할 수 있다. 하지만 이렇게 다양한 MAC 기술의 공통점은 저 전력을 위한 기술을 내포하고 있다는 점이다.

본 논문에서는 경쟁기반 방식의 MAC에서 간섭에 의한 충돌을 최소화하고 전송지연을 줄여 수율을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같이 2장에서 기존 센서 네트워크 MAC 프로토콜을 살펴보고, 3장에서는 충돌과 전송지연을 최소화하는 MAC 알고리즘의 개념에 대하여 상세히 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 기존 MAC과 비교분석하고 5장에서 본 논문의 결론에 대해서 알아본다.

2. 관련 연구

2.1 기존 센서네트워크 MAC 프로토콜

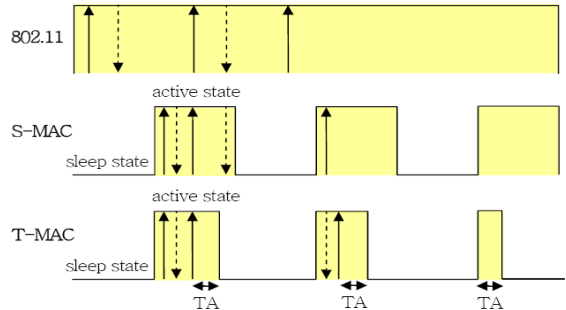
"본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITA-2008-C1090-0801-0013)

무선 센서 네트워크 환경에서 소모되는 전력을 줄이기 위한 여러 MAC 프로토콜들이 제안되었는데 현재 센서네트워크를 위해 제안된 MAC은 CSMA/CA를 활용한 경쟁기반 방식, TDMA를 활용한 스케줄 기반 방식, 여러 개의 채널을 활용하는 방식, 여러 가지 방식을 혼합해서 사용하는 하이브리드 방식 등으로 분류할 수 있다.

그중 본 논문에서 중점적으로 다룰 경쟁기반 프로토콜은 랜덤 액세스(random access) 방식이기 때문에 다른 노드와의 전송 충돌로 인한 에너지 소모와 매체 접근을 위한 채널 감지(channel sensing) 및 랜덤하게 수신되는 신호를 수신하기 위한 채널 감지로 인한 에너지 소모가 많다. CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 프로토콜이 그 예로 이 방식은 충돌을 가능한 피하는 방식이다[2]. 이웃 노드들이 자신의 제어 패킷을 도착하게 함으로써 송수신시 매체에 접근하는 것을 막아줌으로써 충돌을 피한다. 가능한 충돌을 피한다는 점에서 불필요한 에너지 소모를 줄일 수는 있으나 언제 수신될지 모르는 신호를 위해 계속 채널을 감지하고 있어야 하므로 에너지 효율이 크게 증가되지는 않는다. 이러한 단점을 보완하여 소모되는 전력을 줄이기 위해 여러 가지 다른 경쟁기반의 프로토콜들이 제시되었다. Hill과 Culler, El-Hoiydi는 각각 독자적으로 낮은 레벨 반송파(carrier)의 프리앰블 감지(preamble sensing) 기법을 통해 주기적으로 무선 통신을 위한 부분의 전원을 켜고 끄는 방법을 제안했다[3]. 이러한 방법은 모든 경쟁기반 MAC 프로토콜에 적용될 수 있는데 El-Hoiydi가 ALOHA 방식에 이 방법을 적용하여 Preamble Sampling[3]을 제안하였다. 최근에 제안된 B-MAC[4]에서는 프리앰블의 길이를 상위 계층에 변수로 제공하여 에너지 소모 감소와 성능 사이의 트레이드오프(tradeoff)를 통해 최적화된 값을 선택할 수 있게 하였다. El-Hoiydi는 Preamble Sampling을 한 단계 더 발전시켜 송신자가 수신자의 샘플링 스케줄을 알고 있을 때, 긴 프리앰블이 필요 없음을 이용하여 수신 노드가 채널 샘플링을 시작할 때부터 긴 프리앰블이 아닌 짧은 기본 길이의 프리앰블이 포함된 데이터를 보내는 WiseMAC을 제안하였다[5]. WiseMAC은 프리앰블 길이를 네트워크의 트래픽에 따라 유동적으로 변화시켜 프리앰블 길이의 최적화를 통해 불필요한 에너지 소모를 줄이게 된다.

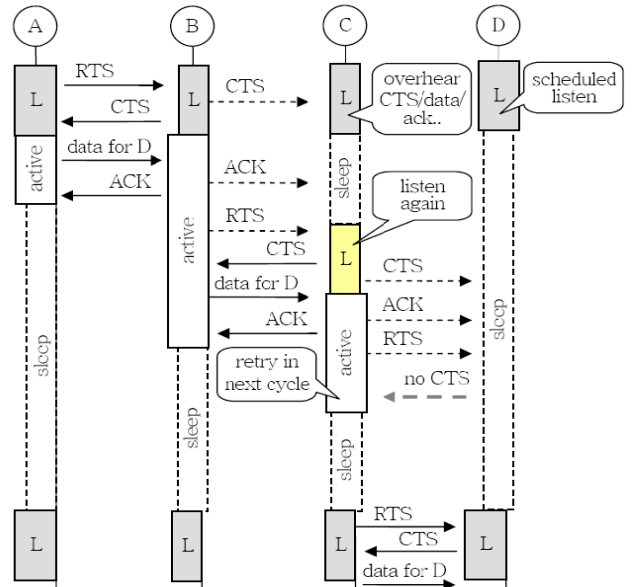
S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 특별히 고안된 방법으로 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다[6]. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간(active part)과 수면 구간(sleeping part)으로 나눈다. 수면 구간에서는 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 에너지 소모를 거의 하지 않는 상태로 활성 구간의 duty cycle을 줄임으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용한다. 하지만 수율(throughput)과 지연(delay)에 대한 성능 사이에 tradeoff를 해야 하는 문제가 있다. S-MAC의 고정된 duty cycle에 적응성을 추가한 프로토콜이 제안되었는데 이를 T-MAC이라고 한다[7]. T-MAC은 네트워크 트래픽의 변동에 유연하게 적응

할 수 있는 MAC 프로토콜로, 발생하는 트래픽을 한꺼번에 모아서 활성구간에 전송하고 수면 구간이 되기 전에 정해진 timeout시간 동안 노드 자신에게 송수신되는 신호가 없으면 수면 상태가 되는 방식으로 S-MAC 보다 에너지 관리의 효율이 조금 더 좋다.



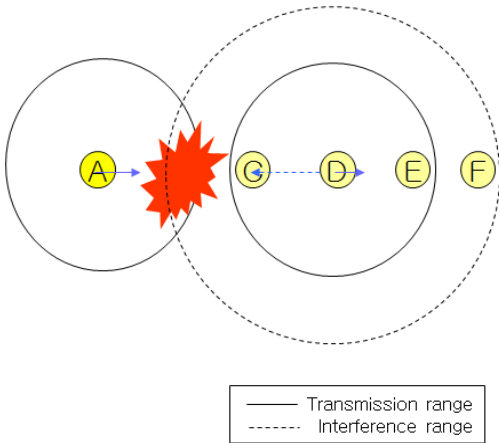
<그림 3> S-MAC과 T-MAC의 duty cycle

<그림 2>는 데이터 전송 지연을 최소화하기 위해 adaptive listen 시간[8]을 도입한 S-MAC의 동작 과정을 설명하고 있다. 기존 S-MAC에서는 sleep time동안 한 번의 데이터 전송이 완료된 후에는 다음 주기의 listen time이 시작되기 전까지 다른 노드에게 데이터를 보낼 수 없다. 이를 보완하기 위해 RTS, CTS를 받아 NAV를 설정한 이웃 노드들이 데이터 전송이 끝나는 시간이 맞추어 다시 깨어나도록 하고, 이때 깨어난 노드들 사이에서 RTS, CTS 교환이 가능하도록 adaptive listen시간을 두었다. 그림으로써 다음 listen time까지 기다리지 않고도 데이터를 전송할 수 있다. 그러나 listen time동안 전송되는 RTS, CTS를 들은 노드들만 (<그림 2>에서 노드 C) adaptive listen에 참여할 수 있기 때문에, 데이터 전송 지연의 감소는 소스 노드로부터 최대 2홉까지라는 한계점이 있다. <그림 2>에서 노드 C는 노드 B의 CTS를 듣고 NAV를 설정하여 adaptive listen시간에 참여할 수 있으나, 어떠한 컨트롤 패킷도 듣지 못한 노드 D는 다음 주기의 listen time이 될 때까지 계속 sleep 상태에 있게 된다.



<그림 4> S-MAC with adaptive listening

2.2 무선 시스템의 간섭에 의한 충돌문제 해결 방안



<그림 5> 간섭범위 안에서 hidden terminal 문제

CSMA/CA를 활용한 경쟁기반 방식에서 RTS/CTS 교환을 사용했을 때 간섭에 의한 충돌이 발생한다는 사실은 [9]에서 제시하였다. [9]에서는 간섭을 일으킬 수 있는 파워가 전송에 필요한 파워보다 작고 따라서 전송 범위에 속해있지 않은 노드에서 전송을 시작할 경우에도 간섭을 일으켜 데이터 충돌이 발생할 수 있다는 사실을 밝혔다. 또한 수학적 모델을 이용해 간섭거리는 전송거리의 1.78배가 됨을 밝혔다. 여기서 제시한 해결 방안은 RTS를 받은 수신노드가 자신이 (1/1.78)*전송거리에 속해 있으면 CTS를 보내고 그렇지 않은 경우 CTS 응답을 하지 않는다는 것이다. 그러나 이 방식은 전송 범위 내에 속함에도 불구하고 CTS 응답을 하지 않아 전송을 할 수 없는 경우가 발생해 실제 전송 범위를 0.57배 줄이는 효과가 발생한다.

Deferrable MAC[10]에서도 간섭에 의한 충돌 문제를 이야기하였다. 간섭범위가 전송 범위의 대략 2배가 되기 때문에 패킷이 전송될 때에 한 홉을 거치는데 걸리는 시간을 계산하여 먼저 전송된 패킷이 3홉을 건너갈 시간까지 새로운 패킷 전송을 늦추어 간섭이 일어나지 않도록 한다. 하지만 이 방식은 라우팅 측면에서 문제를 해결하기 때문에 MAC에서는 직접 구현할 수 없는 단점이 있다.

3. 제안하는 MAC 프로토콜

일반적으로 센서 네트워크에서 발생한 데이터 트래픽은 multi-hop을 통해 소스 노드로부터 sink 노드로 전달되기 위한 것이 대부분이다. 특히 S-MAC에서 sleep time이 큰 경우, 노드와 노드 간 데이터 전송지연이 커지고, 무선 환경에서 간섭에 의한 충돌이 발생하면 multi-hop 데이터 전송 시 지연시간은 더욱 증가한다. 이를 위해 본 논문에서는 무선 센서네트워크에서 데이터 전송 시 간섭범위안의 충돌을 최소화하는 방안을 이용하여 한 sync interval 내에서 전송 가능한 홉 수의 범위를 증가시키는 다음 알고리즘을 제안한다.

3.1 간섭에 의한 충돌을 줄이며 다중 홉을 지원하는 알고리즘

전송할 데이터가 있는 노드(이하 전송 노드)는 DIFS를 기다린 후에 Random backoff를 한 후 RTS를 보낸다. 데이터의 목적지가 되는 노드(이하 목적 노드)는 자신이 RTS를 받은 파워를 측정하고 CTS에 이 정보를 함께 실어 SIFS 후에 전송 노드에 보낸다. 이때 RTS를 엿들은 노드는 NAV를 설정하여 전송을 미루어 데이터에 충돌이 발생하지 않게 한다. CTS를 엿들은 이웃 노드들은 자신이 CTS를 받은 파워와 CTS 패킷 안에 적혀있는 목적 노드가 RTS를 받은 파워로 목적 노드에서의 SIR(Signal To Interference Ratio)을 계산한다. SIR은 (데이터를 받는 파워/간섭을 일으킬 수 있는 다른 데이터를 받는 파워)로 네트워크상에서 모든 노드는 균등하다고 가정하기 때문에 목적 노드에서의 SIR은 (전송 노드로부터 데이터를 받는 파워/이웃 노드로부터의 간섭 파워) = (RTS를 받은 파워/이웃 노드가 CTS를 받은 파워)로 계산된다. 목적 노드에서의 수신 파워 값은 전파 전송모델에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^2}$$

그리고 목적 노드에서의 SIR은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\text{Data Receiving Power}}{\text{Interference Power as neighbor}} = \frac{P_{RTS}}{P_{CTS}} = SIR_{destination}$$

(P_{RTS} = CTS 패킷 안에 적혀있는 목적 노드가 RTS를 받은 파워, P_{CTS} = CTS를 받은 파워)

이때 SIR이 SIR 임계값보다 클 경우에는 간섭에 의한 충돌이 일어날 확률이 적으므로 NAV만을 설정하고 작을 경우에는 NAV를 설정하면서 이웃 노드에 STS(Sure To Send) 패킷을 전송한다. STS 패킷 안에는 CTS를 받은 파워 정보와 CTS패킷 안에 적혀있는 RTS를 받은 파워 정보를 함께 적어 보낸다.

STS를 받은 노드는 STS 패킷 안에 적혀 있는 파워정보와 자신이 STS를 받은 파워를 이용하여 다음과 같이 SIR을 계산한다.

$$SIR_{neighbor} = \frac{STS\text{receivingpower}(=Data\text{receivingpower})}{\text{WhenSTSreceivingnode\text{transmit, receivingpowerof destination}}}$$

$$= \frac{P_{RTS}}{P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{(d_1 + d_2)^2}}$$

여기서 d_1 은 전송노드에서 목적노드 사이의 거리이고 d_2 는 목적노드와 STS를 받은 노드와의 거리다.

따라서

$$d_1 = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{P_{CTS}}} \quad d_2 = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{P_{STS}}} \text{ 이다.}$$

STS를 받은 노드의 SIR은

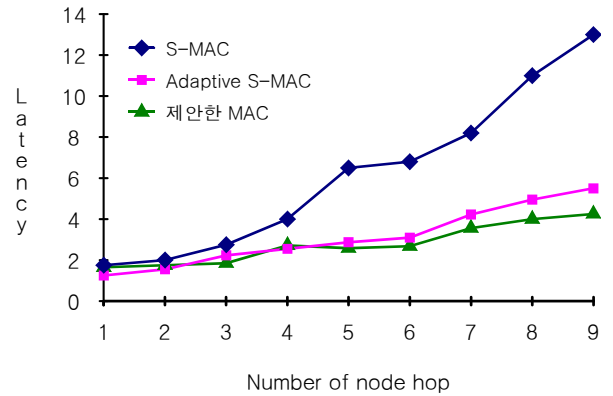
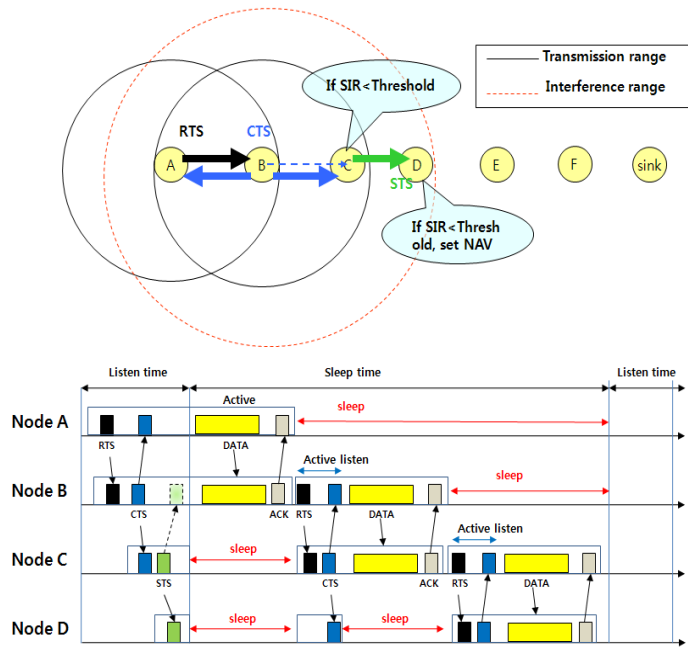
$$= P_{RTS} \left(\frac{1}{P_{CTS}} + \frac{6}{\sqrt{P_{CTS} * P_{STS}}} + \frac{1}{P_{STS}} + \frac{4}{\sqrt[4]{P_{CTS}^3 * P_{STS}}} + \frac{4}{\sqrt[4]{P_{CTS} * P_{STS}^3}} \right)$$

이 된다. 그리고 이 SIR이 임계값보다 작으면 NAV를 설정하여 간섭에 의한 충돌이 발생하지 않도록 한다.

전송 노드는 CTS를 받고 나서 Listen time 후에 데이터를 전송한다. 그리고 데이터 전송이 끝나면 목적노드는 SIFS를 기다린

후에 ACK을 보내 전송이 성공적으로 이루어 졌음을 알리고 전송 노드는 ACK를 받고 Sleep모드로 전환된다. 여기서 STS 패킷은 Listen time기간에만 적용되고 각각의 RTS, CTS, STS 패킷 안에는 데이터 전송에 필요한 Duration이 기록되어 있어 전송이 완료된 시점에 이를 수신한 노드는 깨어날 수 있다. 이런 방식으로 노드 A와 B의 전송이 끝나는 시간에 맞추어 CTS를 엿들은 노드 C와 STS를 엿들은 노드 D는 다시 깨어나 RTS와 CTS를 교환하여 데이터를 전송한다. 여기서 노드 D는 다시 CTS를 엿듣고 데이터 전송이 끝나는 시점에 다시 깨어나 노드 C와 데이터를 교환한다. 이 과정을 다음 <그림 4>에 나타내었다.

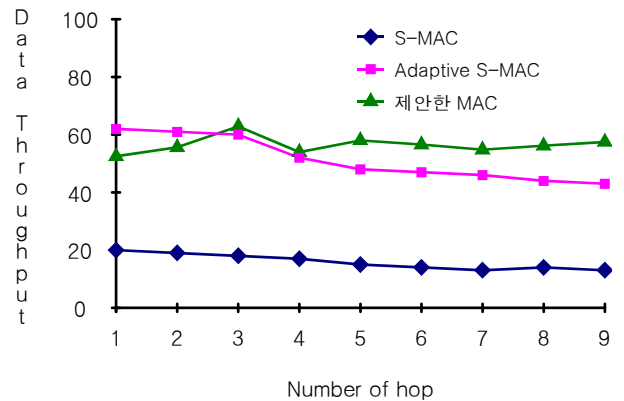
4.75mW, 수신시 13.5mW이고 수면상태에서의 평균 전력 소모는 15μW로 가정하고 S-MAC의 duty cycle은 10%로 설정한다. <그림 5>는 노드의 홉 수에 따른 평균 전송지연 시간의 결과를 보여주고 있다. 추가 패킷(STS)를 보내기 때문에 제안한 MAC이 1-2홉에서는 지연이 증가하나 3홉 이상에서는 전송지연 감소 효과를 보인다. 그리고 <그림 6>에서 제안한 MAC이 기존 MAC보다 수율이 좋은 것으로 나타났다. 물론 전송지연 감소 효과도 있겠지만 노드간의 간섭에 의한 충돌을 조금이나마 줄였기 때문이라고 생각된다. 물론 간섭에 의한 영향이 얼마나 작용하는지 직접 확인해 보지 못했지만 시험결과 제안한 MAC이 지연시간 감소와 수율을 더욱 향상시킴을 알 수 있다.



<그림 5> 노드의 홉 수에 따른 전송지연 시간측정

<그림 4> 간섭에 의한 충돌을 줄이며 다중 홉을 지원하는 알고리즘

이렇게 각 노드들의 sync interval이 같다고 가정한다면 <그림 4>와 같이 각 노드간의 간섭에 의한 충돌을 줄이면서 Sync Interval간 최대 3홉까지 데이터를 전송하여 지연을 감소시킬 수 있다. 물론 노드 C에서 SIR이 SIR 임계값보다 클 경우(간섭에 의한 충돌이 일어날 확률이 적은 경우)에는 STS 패킷을 보내지 않기 때문에 기존 adaptive S-MAC과 같다.



<그림 6> 각 홉에서 데이터 수율 측정

4. 성능평가

본 논문에서는 멀티 홉 환경에서 전송 지연 시간과 수율(throughput)을 측정하여 기존 S-MAC[6], adaptive S-MAC[8]과 비교 어느 정도 성능 향상을 보여줄 수 있는지 NS-2[version2.33] 환경에서 SMAC을 수정하여 실험하였다. 10개의 노드들을 30m 간격으로 linear한 형태로 배열하고 데이터(100Kbytes)는 5초 간격으로 발생하여 첫 번째 노드(source node)에서 마지막 노드(sink node)로 전송된다. NS-2 시뮬레이션에 RX threshold parameter는 3.652e-10(40m)로 데이터 전송 범위를 정하고 에너지 소모 모델은 adaptive S-MAC[8] 논문을 참고하여 센서 노드의 활성상태에서 소모되는 평균 전력 소모는 초당 송신시 2

5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 adaptive S-MAC[8]의 방식을 그대로 사용하면서 간섭에 의한 충돌을 줄이는 알고리즘을 이용하여 한 sync interval 내에서 최대 3홉까지 전송 가능한 MAC 프로토콜을 제안하였다. NS-2의 시뮬레이션을 통해 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 기존 MAC과 비교하여 증명하였다. 기존 S-MAC과 유사한 전력을 소비하면서도 데이터 전송 시 지연을 감소시켜 센서네트워크에서 에너지 효율적이며 수율을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. 이는 군 환경 및 긴급 의료서비스 등에 필요한 프로토콜이며 향후 다양한 멀티 홉 환경에서 심층적인 성능평가를 통해 더욱 전력 소비량을 줄이고 지연시간을 줄이는 방안에 대해 연구할 계획이다.

6. 참고문헌

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol.40, no.8, pp.102-114, August 2002
- [2] IEEE Standard 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," 1999.
- [3] A. El-Hoiydi, "Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks," in *Proc. IEEE ICC 2002*, Vol. 5, Apr. 2002, pp. 3418-3423.
- [4] J. Polastre and D. Culler, "B-MAC: An adaptive CSMA layer for low-power operation," *Technical Report*, Dec. 2003.
- [5] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz and E. Le Roux, "Poster abstract: WiseMAC, an Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Network" in *Proc. ACM Sensys 003*, Nov. 2003.
- [6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2002*, Vol. 3, Jun. 2002, pp. 1567-1576.
- [7] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. ACM Sensys 2003*, Nov. 2003, pp.171-180.
- [8] 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, June 2004, pp.493-506.
- [9] Kaixin Xu, Mario Gerla, Sang Bae, "How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks?" *GLOBECOMM 2002 - IEEE Global Telecommunications Conference*, no. 1, pp.72-77, November 2002
- [10] Alex Varshavsky, Eyal Lara, "Alleviating Self-Interference in MANETs" *LCN 2004 - IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 642-649
- [11] 김지은, 김세한, 정운철, 김내수, "USN 센서노드 기술 동향", *전자통신 동향분석 제22권제 3호*, 2007년 6월