

# 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC/라우팅 프로토콜

김재현, 김석규, 이재용 (연세대학교 전기전자공학부)

## I. 서론

센서 네트워크의 궁극적인 목적은 인간의 오감을 대신하여 환경 및 관측하고자 하는 대상의 변화 상황에 대한 정보를 획득하고 그것을 사용자에게 제공하고, 더 나아가서는 이러한 스마트 환경을 이용하여 인간에게 보다 편리하고 풍요로운 세상을 열어주는 것이다. 센서 네트워크의 응용분야로는 산불, 홍수, 감시 등의 환경 감시, 건강관리, 전장에서 의 군사적인 목적과 최근에 대두되고 있는 홈 네트워킹 및 물류, 유통등 다양한 상업 및 공업 분야 등에 활용할 수 있으며, 그 효과는 기대 이상으로 매우 클 것이다.

무선 센서 네트워크는 기본적으로 작은 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되어 있어, 각 센서노드들은 배터리의 수명이 다하면 센서노드로서의 기능을 상실하게 된다. 그리하여 무선 센서 네트워크의 설계시 가장 우선시 고려되어야 할 사항은 각 노드들의 에너지 소모를 줄여 센서 네트워크의 전체적인 수명을 늘리는 것이다.

본고에서는 무선 센서 네트워크에서 에너

지 효율적인 측면을 고려하여 제안된 MAC 프로토콜 및 Routing 프로토콜을 다룬다.

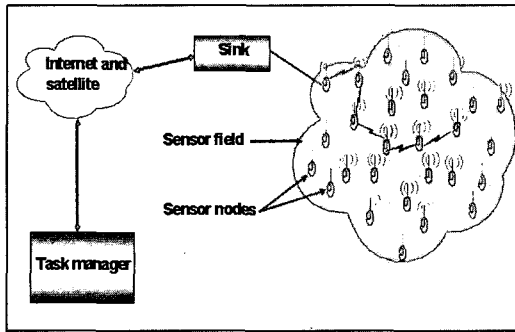
먼저 센서 네트워크 개요 및 프로토콜 설계시 고려사항에 대하여 알아보고, 현재까지 제안된 MAC프로토콜 및 라우팅 프로토콜에 대하여 자세히 알아본다.

## II. 무선 센서 네트워크의 개요 및 설계 고려 사항

### 1. 무선 센서 네트워크의 개요

센서 네트워크의 일반적인 통신구조는 <그림 1>과 같다. 관심 대상의 정보를 얻고자 하는 지역에 임의로 배포된 센서 노드는 사용자가 지정한 관심 대상의 정보를 센서 필드 구역에서 지속적으로 감지한다. 센서 노드에서 수집한 관심 대상 정보의 데이터는 사용자에 의해 정형화된 방법이 아닌, 멀티홉(multi-hop) 유동 기반 구조(infrastructureless)의 무선 통신 기법을 통해서 통해 싱크(sink)로 전달된다. 싱크에 전달된 데이터는 인터넷이나 위성 통신 등 기존 네트워크를 통해 사용자

와 직접 접속이 되어 있는 태스크 관리자(task manager)로 전달된다.

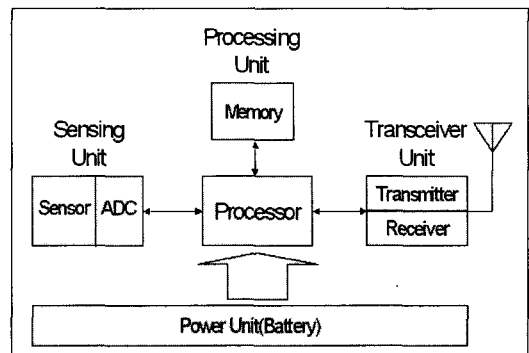


〈그림 1〉 Wireless Sensor Networks 구조

센서 노드의 하드웨어 구조는 〈그림 2〉와 같다. 센싱 하고자 하는 대상은 움직임, 빛의 밝기, 소리, 가스 등 아날로그 신호이다. 이 신호를 센서에서 감지하면, 후 처리부에서 디지털 처리를 위해 아날로그/디지털 컨버터(A/D Converter)가 아날로그 신호를 디지털로 변환한다. 변환된 디지털 신호는 센서 노드의 핵심이 되는 프로세서(processor)로 입력이 되는데, 프로세서는 데이터를 연산하고, 데이터화하며, 이웃 노드와의 통신을 위해 네트워크를 구성한다.

프로세서와 함께 동작하는 메모리에는 데이터를 처리하고, 네트워크를 구성하기 위한 알고리즘이 미리 저장되어 있으며, 입력된 데이터를 저장 받는다. 다른 노드와의 연결을 위해 트랜시버 유닛(transceiver unit)은 감지한 데이터나 네트워크 구성을 위해 필요한 신호를 전송하거나 수신한다. 전술한 모든 소자는 파워 유닛(power unit)으로부터 전력을 공급 받는다. 파워 유닛은 보통 배터리나 소형 자가발전 시스템이 될 수 있다.

센서의 각 부분의 동작 전압은 상황에 따라 소프트웨어에 의해 조정될 수도 있다. 예를 들어, 전송의 대상이 되는 상대 노드가 가까이 있는 경우는 송신단(transmitter)에서의 전력의 세기를 약하게 하고, 원 거리에 있는 경우 전력의 세기를 강하게 할 수 있다. 일반적으로 센서 노드는 각 유닛의 동작을 개별적으로 조정할 수 있으며, 경우에 따라서 전력 소모를 줄이기 위해 동작을 일부 혹은 완전히 정지시킬 수도 있다. 센서 노드는 무선 환경에서 동작되어 송신과 수신을 동시에 할 수 없으므로, 송신이나 수신 중 어느 한 기능만 수행하게 되는데 이 때 동작을 수행하지 않는 대기 모드에서는 전원을 정지시킬 수 있다. 센서 네트워크에서 각각의 노드 데이터는 그리 많지 않으므로 소비되는 전력을 줄여서 네트워크 전체 수명을 연장시키는데 매우 유용하다. 센서 노드의 또 한 가지 하드웨어 특징은 수신단(receiver)의 하드웨어 구조가 송신단 보다 더 복잡하기 때문에 소모하는 전력은 비슷하거나 수신단이 더 많다는 것이다. 따라서 네트워크 알고리즘을 설계시 전송 시간 뿐만 아니라, 수신 시간도 중요하다.



〈그림 2〉 센서 노드의 구조

## 2. Wireless Sensor Network 설계시 고려 사항

센서 노드의 크기가 가로세로 5mm이내로 되어야 하므로 내장된 배터리도 매우 작고, 한번 제작하여 설치하면 배터리를 재충전하기 매우 어렵다. 따라서 기존의 무선 통신과는 달리 배터리의 제약으로 인해 에너지 효율성(Energy Efficiency)이 최우선 목표가 된다. 단순히 전체 노드 가운데 살아 있는 노드수가 많다고 하여 네트워크로서 역할을 충족하는 것이 아니고, 관측 영역 전체적으로 비슷한 분포로 비슷한 수의 노드가 항상 동작할 수 있도록 해야 한다. 이러한 점을 고려하여, 네트워크 구성을 포함한 시스템 설계는 시스템 수명을 최대화할 수 있도록 에너지 효율성이 높아야 한다. 두 번째로, 센서 노드들은 응용계층의 목적에 따라 많은 차이가 있지만, 일반적으로 수백에서 수만 개의 노드가 하나의 네트워크로 설정 될 것이다. 기존의 무선 네트워크는 이렇게 많은 수의 노드로 구성된 네트워크를 고려하지 않으므로 센서 네트워크는 확장성(Scalability)을 지원해야만 한다. 셋째, 센서 노드는 관측자가 접근하기 어려운 원격 지역에 배치되므로 인해 네트워크는 노드들 간에 스스로 구성하는 자기 구성 능력(Self-Organization)이 요구된다.

이외의 추가적인 요구사항을 알아보면, 데이터 전송률(Throughput)과 지연 시간(Delay, Latency), 공정성(Fairness)은 기존 네트워크 프로토콜에서 가장 중요한 QoS(Quality of Service)와 밀접한 관련이 있으며, 최우선 요구사항의 에너지 효율성과는 상관관계(Tradeoff)에 있다. 그러나 응용계층

에 따라 QoS를 요구하는 부분에 대한 지원을 위해서 요구되는 특성들이다. 또한, 센서 노드는 주위의 물리적인 조건이나 전력의 부족으로 인해 손상되거나 폐쇄될 수 있다. 센서 노드는 대체가 어려우므로 일부 센서 노드의 고장이 전체 네트워크의 임무에 영향을 주어서는 안 되는 장애 허용성(Fault-tolerance) 및 정확한 정보를 최종 사용자에게 전달하는 신뢰성(Reliability)등이 있다.

## III. 무선 센서 네트워크를 위한 MAC 프로토콜

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 설계의 가장 큰 목적은 각 단말에서의 에너지 소모를 최소화하면서 통신하여 전체 네트워크의 수명을 최대화 하는 것이다. 이러한 관점에서 무선 통신을 위한 MAC 프로토콜에서의 에너지 낭비 요인은 다음과 같다.

첫째, 전송된 패킷 또는 데이터가 hidden terminal 및 exposed terminal 문제로 인해 손상되어 재전송이 요구되는 collision. 둘째, 다른 노드를 목적지로 하는 패킷을 엿듣게 되는 overhearing. 셋째, 불필요한 제어 패킷 전송에 따른 overhead. 마지막으로 자신은 전송할 데이터가 없음에도 불구하고 이웃 노드가 언제 데이터를 전송할지 모르기 때문에 자신의 전원을 항상 수신 모드로 유지하므로 발생하는 idle listening이 있다.

이러한 에너지 낭비 문제를 해결하기 위한 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 방식으로는 다음과 같이 세 가지 방식으로 요약될 수 있다.

경쟁기반(Contention-based)의 MAC 프로

토폴은 랜덤 액세스(Random Access) 방식이므로 노드간의 전송충돌로 인한 에너지 소모와 매체 접근을 위한 채널 감지(carrier sensing) 등으로 에너지 소모가 많은 방식이다. 그리하여 다른 노드들이 RTS/CTS와 같은 자신의 제어 패킷을 듣게 함으로써 송수신시 충돌을 피하며, idle listening문제를 해결하기 위하여 슬롯과 유사한 duty cycle 개념을 도입하여 활성구간 및 비활성구간으로 나누어 활성구간에서만 송수신을 함으로써 에너지 소모를 줄이는 방법이다.

또한, Idle listening으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하기 위한 또다른 방법으로는 duty cycle이 내장되어 노드의 패킷 전송시 충돌을 피할 수 있으므로 에너지가 보존되는 TDMA(Time Division Multiple Access)기반의 MAC 프로토콜이 있다. TDMA기반의 MAC 프로토콜은 각 노드마다 전송할 수 있는 타임 슬롯을 정해두고, 여기서만 데이터를 전송할 수 있게 한다. 따라서, 경쟁기반의 MAC프로토콜에 비해 충돌이 적으며, RTS/CTS같은 패킷이 필요하지 않으므로 오버헤드가 적다는 장점이 있다. 하지만, 센서 노드는 시간 스케줄(time schedule)을 유지해야 하므로 추가적인 메모리가 요구되며, 시간을 매우 작은 슬롯단위로 할당으로 인한 clock drift 문제가 발생하고, 하나의 cell을 형성하는 클러스터(cluster)간의 통신을 관리하는 헤드(head)가 존재해야 하며, 동적인 센서 네트워크의 토폴로지 변화에 적응(scalability)하기 힘들다는 단점이 있다.

센서 네트워크에서 에너지를 절감하기 위한 다른 방법은 노드간 통신을 위해 사용되는 라디오(Radio)와 분리된 'Wake-up' 제

어 신호를 사용하는 방법이다. 이 신호는 duty cycle을 사용하지 않고, 라디오를 꺼둔 상태에서 이웃 노드로 전송할 데이터가 발생하는 경우 이 신호를 이용하여 이웃 노드를 통신이 가능한 모드로 전환하여 통신을 수행한다. 이때 사용되는 신호는 별도의 프로세싱이 없으므로 소모되는 에너지는 매우 미약하다. 따라서 일반적으로 duty cycle을 사용하여 송/수신 전원을 주기적으로 켜두어야 하는 방식과 달리 데이터 전송이 필요한 시점에서만 전원을 사용하므로 에너지 효율성 측면에서 매우 뛰어나다.

그러나 이런 기법을 적용시 센서 노드에 추가적인 장치 및 데이터 송/수신용 주파수와 다른 별도의 채널 사용이 요구된다.

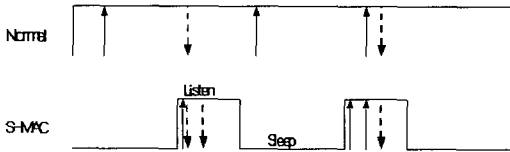
〈표 1〉 MAC protocols (Sensor Networks)

프로토콜	종류	에너지효율	비고
S-MAC	CSMA	good	duty-cycle
T-MAC	CSMA	good	duty-cycle
D-MAC	TDMA-slotted Aloha	good	작은 delay
ER-MAC		weak	노드의 에너지 고려
BMA-MAC	TDMA		클러스터
ECCA-MAC	TDMA	weak	재난등 위급상황시 유리

## 1. Sensor Medium Access Control (S-MAC)

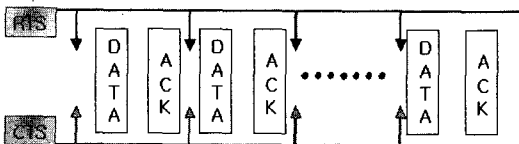
무선 센서 네트워크에서의 데이터 발생률은 매우 낮은 경우, 노드가 항상 Listening을 유지 하는 것은 idle listening으로 인한 에너지 낭비의 원인이 된다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위해서 Sensor MAC(이하 S-MAC이라함)<sup>2)</sup>은 duty cycle을 적용하여 노드가 주기적으로 sleep 모드로 들어가게 함으

로써 idle listening 시간을 줄일 수 있다. 예를 들어, 1초 동안에 노드가 0.5초는 sleep 상태이고, 0.5초는 listen 상태라면, duty cycle는 50%로 감소한다. <그림 3>은 S-MAC의 동작 절차를 일반적인 CSMA기법의 IEEE802.11과 비교하고 나타내고 있다.



<그림 3> S-MAC의 주기적 sleep/listen 방안

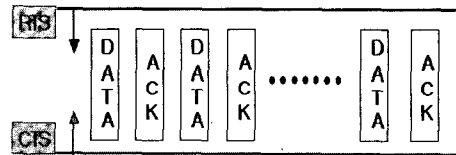
무선 통신에서 에너지 낭비원인 가운데 하나인 overhearding 문제를 해결하기 위해서 S-MAC에서는 overhearding avoidance 기법을 적용하고 있다. 두 노드간의 통신은 주변의 모든 노드에게 까지 전파되므로 인해 이웃노드는 불필요한 overhearding으로 인해 에너지를 낭비하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, <그림 4>와 같이 S-MAC에서는 두 노드간의 통신을 하기 위해 사용되는 RTS, CTS 제어 신호를 듣는 이웃 노드들은 두 노드간의 통신이 완료될 때까지 sleep 모드로 전환되어 overhearding으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하게 된다.



<그림 4> Wireless Networks의 제어 패킷 오버헤드

또한, 네트워크의 MTU (Maximum Transmission Unit)로 인해서 데이터의 길이가 긴 경우에는 분할(fragmentation)을 하여

데이터를 전송하게 된다. 이 경우 분할된 데이터를 전송할 때 각 데이터에 제어신호인 RTS, CTS가 요구되어 무선 통신에서 에너지 낭비원인인 제어 신호 과부하(Control Packet Overhead)가 발생하게 된다. S-MAC에서는 긴 메시지를 작은 단위로 분할하여 한꺼번에 전송하는 기법을 사용하고 있다. 즉, 분할된 모든 데이터 전송에 대해서 전송 매체를 예약하여 사용하므로, 제어 신호의 수는 통신을 시작하는 초기에만 사용하게 되므로 제어 신호 과부하로 인한 에너지 낭비 문제를 해결할 수 있다.

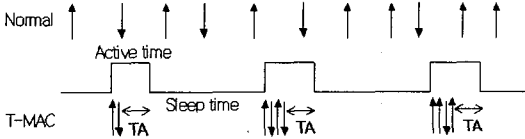


<그림 5> S-MAC의 제어 패킷 감소

## 2. Timeout MAC(T-MAC)

Timeout MAC(이하 'T-MAC'이라함) 프로토콜<sup>6)</sup>은 무선 센서 네트워크를 위한 경쟁 기반의 MAC 프로토콜이다. 센서 네트워크에서 에너지 효율성을 얻기 위해서 duty cycle을 적용하여 에너지 효율적인 기법이 앞에서 설명한 S-MAC 프로토콜이다. 하지만 S-MAC은 고정된 duty cycle을 적용하였지만, T-MAC에서는 adaptive duty cycle이란 새로운 기법을 제시하였다. 무선 센서 네트워크에서 에너지를 낭비하는 주된 요인으로는 앞서 언급했듯이, collision, overhearding, control overhead, idle listening이 있다. 이 가운데서 idle listening으로 인한 에너지 낭비 요인이 가장 큰 것으로 실험 결과 알 수 있었다.

T-MAC 프로토콜은 이러한 idle listening으로 인한 에너지 낭비 요인을 줄여 줌으로써 에너지 효율성을 극대화하기 위한 방법이다.



〈그림 6〉 T-MAC의 동작

T-MAC에서 동작하는 모든 노드는 이웃노드와 통신하기 위해 주기적으로 깨어나서, 전송할 데이터가 없으면 다음 프레임까지 sleeping 모드로 전환되며, 그 동안의 데이터는 큐에 저장된다. 노드들은 서로 통신을 하기 위해서 DFW-MAC에서와 같이 RTS, CTS, DATA, ACK 기법을 사용하여 충돌을 피하고, 데이터 전송에 있어서 신뢰성을 보장한다. 이러한 방식은 active 시간 앞에서 데이터를 한꺼번에 전송하고, 송수신 데이터가 없다면 일정한 시간만큼의 타이머(TA)를 동작시켜 S-MAC보다 일찍 sleep 모드가 가능하게 하므로 불필요한 idle listening을 줄일 수가 있다.

〈그림 7〉은 T-MAC에서 노드간의 데이터 전송의 흐름을 나타내고 있다. 노드 C는 노드 B의 CTS 패킷을 엿듣게 되고, 노드 A-B 간의 통신을 방해하지 않기 위해서 sleep 모드로 전환된다. 이때 sleep 모드로 전환하기 위해 일정한 타이머(TA)동안 만큼을 기다린 이후에 전환하게 된다.

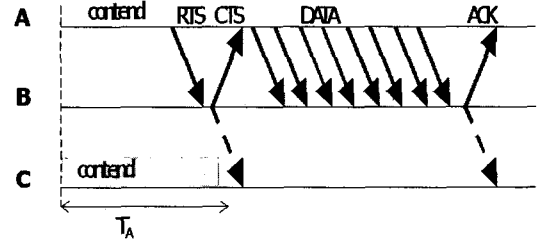
타이머 구간은 노드 C가 노드 A의 전송 범위 밖에 있기 때문에 RTS 패킷을 듣지 못하므로 타이머의 동작 시간은 노드 B가 CTS 패킷을 전송하는 시간 보다 커야만 한다.

$$T_A > C + R + T$$

C : Contention 구간

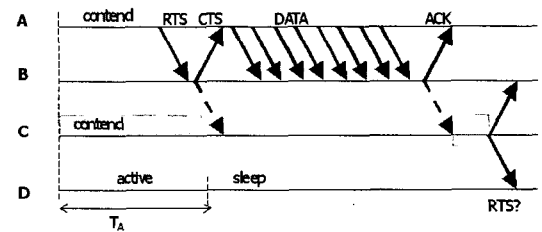
R : RTS packet 길이

T : Turn-around time(IEEE802.11의 SIFS구간)



〈그림 7〉 T-MAC의 Timer 결정 방법

T-MAC 프로토콜은 node-to-sink 통신 패턴의 단 방향 통신을 통해서 데이터를 전달하는 특성을 가진다. 그러나 〈그림 8〉과 같은 경우 이웃 노드에게 전송할 데이터가 있음에도 불구하고 이웃 노드가 일찍 sleeping 모드로 전환되므로 인해 데이터를 전달하지 못하는 문제가 발생하는데 이를 Early sleeping problem이라 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 T-MAC 프로토콜에서는 2가지 기법을 적용하여 문제점을 해결하였다.

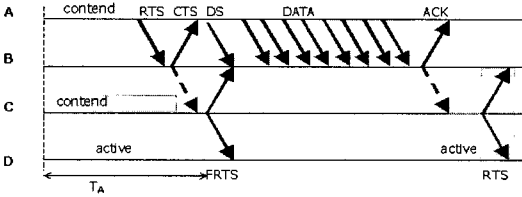


〈그림 8〉 Early Sleeping의 문제점

이 문제점을 해결하기 위한 첫 번째 기법은 F-RTS(Future Request-to-Send) 패킷을 사용하는 것이다. 〈그림 9〉와 같이 다른 노드를 목적지로 하는 CTS 패킷을 엿듣게 되었다면, 그 노드는 자신이 데이터를 전송하고자

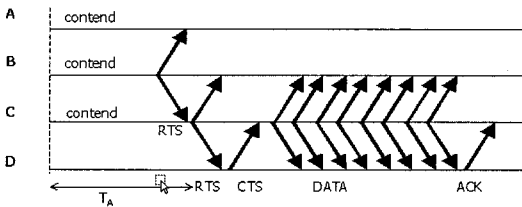
하는 노드로 F-RTS 패킷을 전송하게 된다.

유롭게 전송매체를 사용할 수 있다.



〈그림 9〉 F-RTS를 이용한 Early Sleeping 문제 해결

두 번째는 full-buffer priority를 이용하는 기법이다. 이 기법은 노드의 전송 버퍼에 누적된 데이터의 양이 가득차 있어서 다른 노드로부터 데이터를 수신할 수 없으므로, 자신의 버퍼에 있는 데이터를 전송하는 방법이다.



〈그림 10〉 Full Buffer Priority를 이용한 Early Sleeping 문제 해결

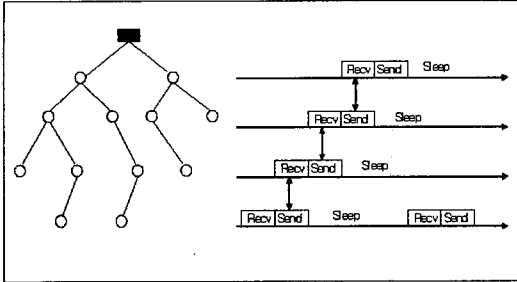
자신을 목적지로 하는 RTS 패킷을 받은 노드는 CTS 패킷을 전송하는 대신에 자신의 RTS 패킷을 다른 노드로 전송한다. 〈그림 10〉에서 전송매체를 확보하기 위한 경쟁결과 노드 C는 노드 B에게 졌음에도 불구하고 자신의 버퍼에 데이터가 가득 차 있는 상태이므로 수신된 RTS 패킷을 무시하고, 자신의 RTS 패킷을 노드 D로 전송할 수 있다. 결국 노드 B는 자신이 노드 C에게 전송하려 하였으나, 노드 C가 D로 모든 데이터를 전송할 때 까지 전송할 수 없다. 이때 노드 C는 자신의 버퍼에 누적된 데이터를 모두 전송할 때 까지 자

### 3. Data Gathering MAC(D-MAC)

센서 네트워크에서 발생하는 대부분의 데이터는 싱크 노드로 집중되는 방식이다. 따라서 센서 노드들의 이동성이 없다면 경로는 일정하게 유지된 상태가 될 것이다. 이런 상황에서 가장 효율적인 방법이 D-MAC 프로토콜이다. 센서 네트워크를 위해 제안된 S-MAC은 1홉 거리, 즉 이웃노드와 통신이 가능하고, 최대 2홉 거리까지 전송이 가능하다. 따라서 홉 수가 큰 경로상의 데이터들은 많은 프레임을 거쳐서 전송되므로 전송 지연이 상당히 크게 된다. 따라서 에너지 효율적이면서, 전송지연을 줄일 수 있는 방안이 D-MAC 프로토콜이다. S-MAC에서 두 노드간 전송이 이루어질 때, 수신 노드의 다음 노드는 Hidden terminal로 sleep 모드에 있게 된다. 따라서 1홉씩 전송될 때마다 매 프레임이 요구된다. Adaptive listening을 적용시킨 프레임 동안 2홉 거리까지 전송될 수 있으나, 엿듣기에 따른 부작용으로 동기화되지 않아 전송이 되지 않거나 에너지 소모가 커지는 등의 문제가 발생된다.

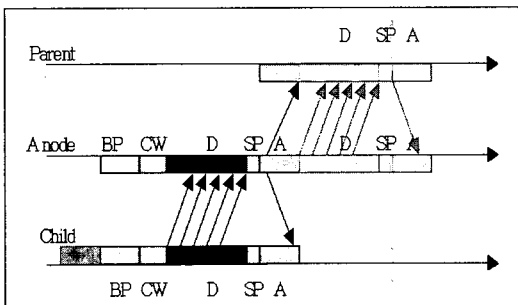
T-MAC은 S-MAC을 발전시킨 형태로 간섭거리를 전송거리의 두 배로 늘리는 문제가 있다. 따라서 전송범위와 간섭범위 사이의 노드들은 통신이 불가능하지만 active상태로 존재하게 된다. 그리고 이 노드들과 통신하고자 하는 노드들도 데이터 전송에 실패하게 된다. 전송 효율을 높이기 위해서 F-RTS 개념을 도입하여 한 번에 많은 패킷을 전송하며, 1홉 거리만큼 더 멀리 전송할 수 있게 되

었다. 하지만 그만큼 넓은 범위가 간섭범위가 되므로 부작용 또한 커지게 된다.



〈그림 11〉 Data aggregation scheme in D-MAC Protocol

D-MAC은 active구간이 두 부분으로 나누어져 있다. 전반부는 수신을 위한 부분으로 싱크 노드를 루트(Root)로 하는 경로의 트리(Tree)에서 자식노드(Child node)로부터의 전송을 받는 부분이고, 후반부는 송신을 위한 부분으로 부모 노드(Parent node)로 전송하기 위한 시간이다. 두 부분의 시간은  $\mu$ 로 같다.  $\mu$ 는 최소한 하나 이상의 패킷을 보낼 수 있는 시간으로 조절된다. 〈그림 11〉과 같이 active시간이 부모 노드로 향할수록  $\mu$ 시간만큼 어긋나게 되면 전송지연을 줄일 수 있다.



〈그림 12〉 D-MAC의 동작

〈그림12〉처럼 D-MAC에서는 Staggered

wake up 기법을 적용하므로 다음과 같은 장점을 갖는다. active/sleep에 따른 지연 없이 패킷을 연속해서 다음 노드로 전송할 수 있으므로, active시간이 늘어난 것과 같은 효과를 갖는다. 싱크 노드까지의 경로 가운데 중간 노드에서 데이터가 누적되지 않고 전송이 된다. 또한 active시간이 결정되면 채널 할당을 위한 경쟁이 줄어들어 충돌이 줄어들고, 경로상의 노드가 아니면 기본적인 active시간 동안만 동작하므로 에너지를 절감할 수 있다.

D-MAC에서는 RTS/CTS 제어 패킷 없이 Acknowledgement만으로 MAC계층에서의 전송이 이루어진다.

송신 노드가 통신을 시작할 때, Backoff 시간(BP)과 임의의 시간(CW)동안 기다린다. 임의의 시간은 최소한 하나의 패킷이 전송될 수 있는 시간 이상이며, 최대 크기를 Contention Window(CW)로 한다. 이후 바로 데이터를 전송하며, 전송이 끝나면 수신 노드는 짧은 시간(SP) 후에 ACK를 보낸다. 따라서 한번의 전송을 위해 걸리는 시간은 〈식 1〉과 같다.

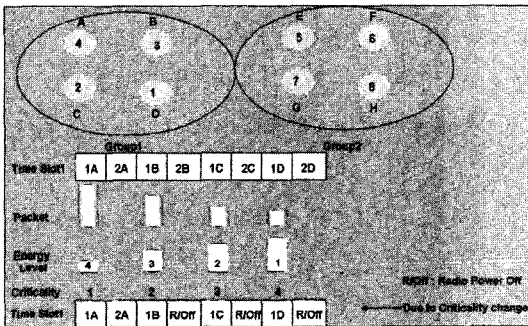
$$\mu = BP + CW + DATA + SP + ACK \quad (1)$$

D-MAC은 싱크 노드로 데이터를 수집하는 특정한 상황에서 활용되므로, 적용 범위가 한정된다는 단점을 가지고 있다. 또한 라우팅(Routing)이 고정되어 노드의 움직임이 없어야 하므로 노드의 이동성(mobility)을 지원하지 못하는 점에서도 크게 고려해야 할 사안이다.



#### 4. ER-MAC (Energy and Rate MAC)

ER-MAC<sup>[4]</sup>은 S-MAC에서의 주기적인 활성 및 수면 구간을 이용한다. 여기에 보유 에너지양과 패킷이 통과하는 비율(Criticality)을 이용하여 선거 모드에서 리더를 선출하며, 이 노드의 타임슬롯을 늘림으로써 에너지 절약을 하도록 한다.



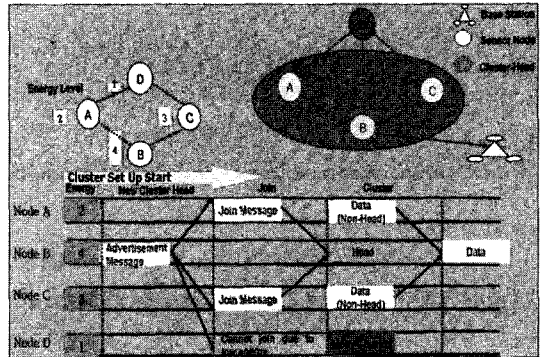
〈그림 13〉 ER - MAC 프로토콜

〈그림 13〉은 4개의 노드들로 구성된 2개의 Group을 나타내고 있는데 보유 에너지양과 패킷이 통과하는 비율(Criticality)에 따라서 A 노드가 리더로 선출되는 것을 알 수 있다. 그래서 A 노드에 대한 타임슬롯이 주변의 나머지 노드들에 비해서 2배로 늘어남을 알 수 있다.

#### 5. BMA(Bit Map Assisted Energy Efficient) MAC

〈그림 14〉와 같이 BMA MAC은 전송하고자 하는 노드가 해당하는 bit에 설정하면, 이를 바탕으로 클러스터 헤드가 전송할 타임슬롯을 결정하여 이를 cell내의 모든 노드들에게 알려준다. 이렇게 함으로써 한 세션 내에

서 전송되는 데이터가 있는 동안만 필요한 노드의 전원이 켜지며, 이 후 나머지 기간 동안은 모든 노드의 전원이 꺼지게 함으로써 에너지 소비를 줄이도록 하였다.

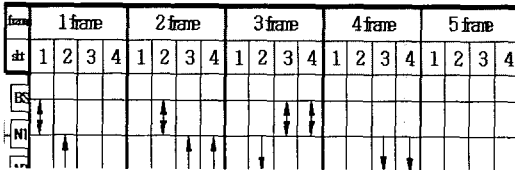


〈그림 14〉 BMA - MAC 프로토콜 (Steady상태 단계)

#### 6. ECCA-MAC (Enhanced Communication Scheme Combining Centralized and Ad-hoc Networks)

ECCA는 평상시 환경에서는 각 노드가 cellular mode를 이용하여 BS로 데이터를 바로 전송하지만, 재해가 발생하여 직접 BS로의 데이터 전송이 불가능해지면, ad-hoc mode로 전환하여 이웃 노드를 통해 BS로 전달한다. 이 때에는 비상 데이터가 많은 노드에서 발생하므로 이를 혼잡에 의한 지연 없이 전송하기 위하여 TDMA방식을 이용한다. 하지만, 일반적인 TDMA와는 달리 소스 노드에서 발생한 데이터를 중간 노드에서 전달할 때는 자신의 타임슬롯이 아닌 소스 노드의 타임슬롯을 이용한다. 이렇게 함으로써 동시에 많이 발생한 데이터를 지연 없이 기 대하는 시간에 전달할 수 있게 된다.

〈그림 15〉에서는 이런 멀티 홉 통신에 대한 ECCA MAC 프로토콜의 동작을 나타내었다.



〈그림 15〉 ECCA MAC 프로토콜

이 프로토콜은 모든 노드에서 데이터가 한꺼번에 발생하더라도 지연 없이 기대하는 시간에 전송 및 응답 패킷의 수신을 마칠 수 있으며, BS는 응답 패킷을 보내줌으로써 패킷이 도착함과 타임슬롯이 비었다는 것을 알려 주어 다음 데이터를 보낼 수 있도록 한다.

#### IV. 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크는 다수의 노드로 구성되어지며, 이동성을 고려한 경우 네트워크의 토폴로지의 빈번한 변화로 인해 루트 정보의 갱신을 필요로 하며 이러한 오버헤드의 발생은 에너지 소모와 직접적인 연관이 있다. 무선 센서 네트워크는 전송거리의 제약이 큰 많은 노드들이 원거리 노드들간 통신을 위해서 멀티-홉 통신방식을 기본 전제로 라우팅을 하게 된다. 이 노드들은 제한된 용량의 배터리를 사용하기 때문에 에너지 상태를 고려한 통신이 필요하다. 이러한 노력은 MAC 이나 Physical 계층뿐 아니라 네트워크 계층에서도 이루어져야 한다. 특히 센서 네트워크에서는 에너지 소모가 가장 큰 이슈인

〈표 2〉 Sensor Networks의 Routing Protocols

프로토콜	방식	에너지효율	비고
SPIN	flooding	bad	간단하나 에너지 소모가 많음
Directed-Diffusion	Gradient	bad	Multi - sink, source
Rumor	flooding (partially)	good	작은 토폴로지에 유리
LAR	Geographic	good	위치인식필요
GPSR	Geographic	good	위치인식필요. 단일경로
LEACH	Clustering	good	클러스터

만큼 라우팅 프로토콜들도 네트워크의 전체적인 에너지 소모에 초점을 맞추고 있다. 이를 위해 데이터나 control packet의 중복되는 전달을 피할 수 있는 방법이나, 각각의 에너지 상태를 파악하여 이에 따른 루트 정보 갱신을 이용한 방법 등을 사용하고 있다. 이외에도 네트워크의 여러 계층을 고려한 Cross Layer 설계에 대한 연구도 필요하다.

무선 센서 네트워크에서 라우팅 프로토콜을 크게 Data-Centric 라우팅 프로토콜, 위치기반 라우팅 프로토콜, 클러스터링기반 라우팅 프로토콜로 나눌 수 있다

Data-Centric은 기본적으로 Sink가 데이터를 얻고자 할 때 네트워크에 원하는 데이터가 무엇인지를 알리고 데이터를 얻어오는 On-demand방식의 프로토콜이다. 이러한 특징 때문에 데이터 Aggregation과 Caching이 가능한 특징을 가진다. 이로 인해서 네트워크의 전체적인 수명을 늘릴 수 있게 된다. 이에 SPIN, Directed Diffusion, Rumor Routing등이 있다.

위치기반 라우팅 기술은 노드의 지리적인 위치 정보를 이용하여 라우팅을 하는 기술이다. 위치기반 기술을 이용하면 라우팅이 용이하고, 빈번한 네트워크 토폴로지의 변화에

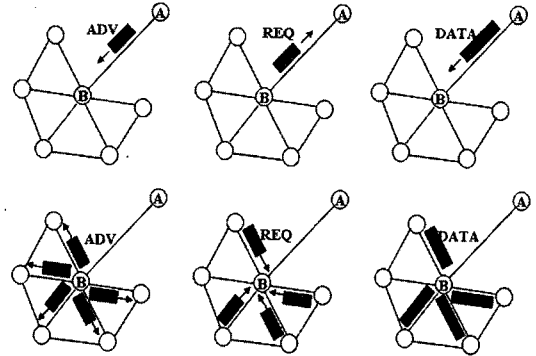
도 쉽게 적용할 수 있으며, 각각의 노드는 자신의 이웃 노드의 정보만 유지하고, 네트워크 전체에 해당하는 flooding 사용이 없어 네트워크의 확장성이 좋다. 위치기반 라우팅에는 LAR, GPSR 등이 있다

클러스터 기반 라우팅 기술은 센서네트워크의 밀집된 많은 노드를 지역적으로 여러개의 단위로 묶어 관리하여 전체적으로 자원을 균등하게 할당 할 수 있는 장점이 있으며, LEACH가 대표적이며 위치 인식 기반과 클러스터 개념을 모두 사용하는 TTDD등이 있다.

### 1. SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

SPIN은 Data-Centric기반의 라우팅 프로토콜 중 가장 먼저 제안된 알고리즘이다. <그림 16>에서 보면, A노드가 자신이 수집한 데이터가 있을 때 자신의 주변 노드들에게 수집한 데이터가 무엇인지 알려주는 ADV 메시지를 브로드캐스트 한다. A노드로부터 정보를 받기를 원하는 B노드가 A노드에게 REQ 메시지를 보내면 A노드는 B노드에게 데이터를 보내주게 된다. 데이터를 받은 B노드는 다시 ADV 메시지를 주변의 노드들에게 브로드캐스트하고, 이를 받은 노드들 중 데이터를 받기를 원하는 노드들은 B노드에게 REQ 메시지를 보내어 데이터를 받아오게 된다.

SPIN의 장점으로는 네트워크의 토폴로지 변화가 1홉 안에만 영향을 준다는 점이다. 하지만 네트워크 전체에 데이터를 전달하지 못할 수도 있다.



<그림 16> SPIN

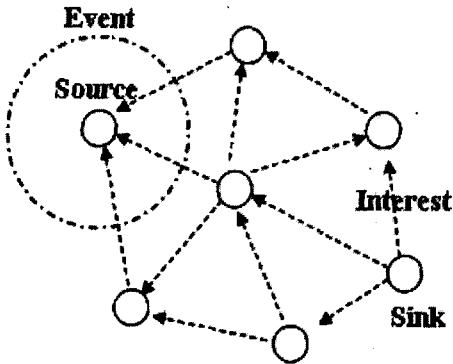
### 2. Directed-Diffusion

Directed-Diffusion<sup>[6]</sup>은 Data-Centric기반의 라우팅 프로토콜에 획기적인 발전을 가져온 프로토콜이다. Sink는 네트워크로부터 데이터를 얻어오기 위해서 <그림 17> (a)에서 보논바와 같이 Interest메시지를 모든 네트워크에 뿌리게 된다.

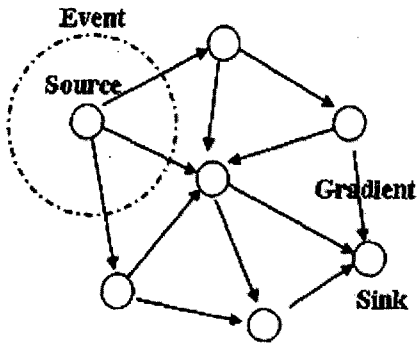
Interest메시지를 받은 노드들은 <그림 17> (b)에서와 같이 자신에게 메시지를 준 노드에 대해서 Gradient를 설정한다. 이렇게 되면 각각의 노드들은 자신이 설정한 Gradient로 데이터를 보내게 되면 결국 Sink로의 라우팅 경로를 설정할 수 있게 된다.

이렇게 해서 라우팅 경로를 찾고 난 이후 소스는 자신이 수집한 데이터를 Sink에게 보내게 된다. 이 과정에서 데이터는 여러 개의 경로를 거쳐서 Sink에게 도달하게 되며 <그림 17> (c)에서와 같이 Sink는 이 경로들 중 한 경로를 통해서 reinforcement메시지를 보내 최적의 경로를 설정할 수 있다.

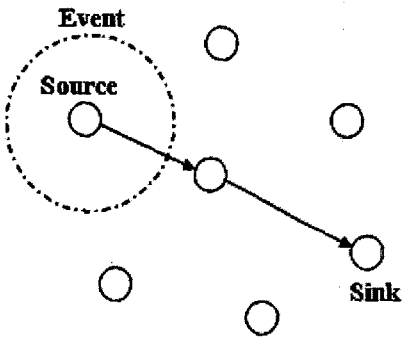
Directed-Diffusion의 장점으로는 각각의 노드가 데이터에 대한 aggregation과 caching을 수행할 수 있다는 것과, Multiple-Source,



(a) Interest Propagation



(b) Initial gradients setup



(c) Data delivery along reinforced

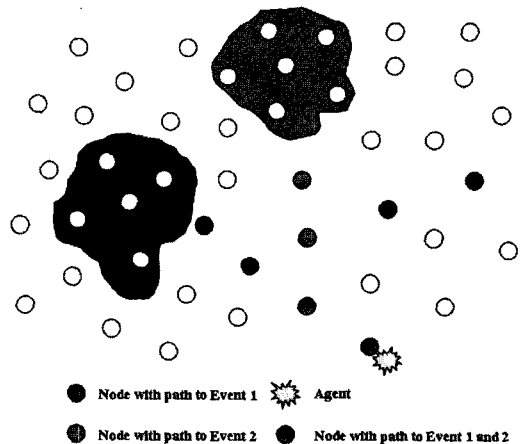
〈그림 17〉 Directed-Diffusion

Multiple-Sink의 상황에서도 잘 동작한다는 점이다. 하지만 Interest메시지를 네트워크 전체에 뿌리는 오버헤드가 크다는 단점이 있다.

### 3. Rumor Routing

Rumor Routing<sup>7)</sup>은 Directed-Diffusion이 가지고 있는 Interest메시지에 의한 오버헤드를 줄이기 위해서 제안된 알고리즘이다. Directed-Diffusion에서는 Interest메시지를 모든 네트워크에 뿌리기 때문에 이로 인해서 발생하는 오버헤드가 상당히 크다. Rumor Routing에서는 〈그림 18〉과 같이 소스에서 수집한 데이터를 자신의 일정 주변 영역의 노드들에게 알려줌으로써 Interest메시지가 네트워크 전체에 뿌려지지 않더라도 데이터를 Sink에게 알려주도록 하는 방법을 사용하고 있다.

Rumor Routing의 장점은 Directed-Diffusion과 비교했을 때 Interest메시지에 대한 오버헤드를 크게 줄였다는 점이다. 하지만 이와 같은 장점은 네트워크의 사이즈가 작은 경우에만 명확히 나타난다.

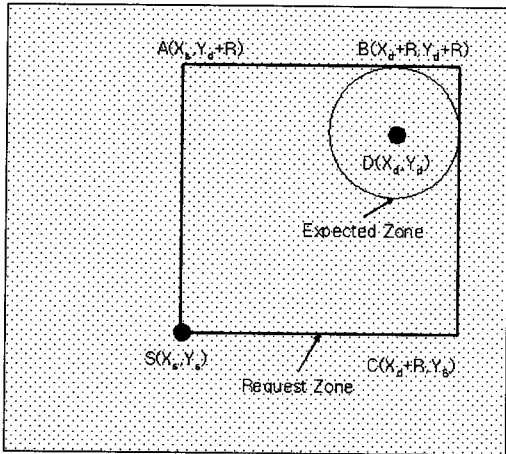


〈그림 18〉 Rumor Routing

### 4. LAR(Location-Aware Routing)

중간에서 경로 요청 메시지를 전달하는 이

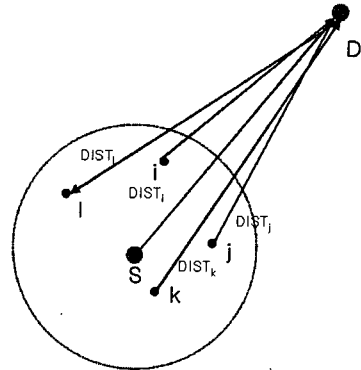
웃 노드를 네트워크 전체가 아닌, 일정 지역이나 요구영역을 결정하여 수를 제한함으로써 라우팅 오버헤드 및 경로 탐색 지연을 줄일 수 있다.



〈그림 19〉 LAR (1) 영역 설정 방법

〈그림 19〉과 같이 노드 S(source) 의 노드 D(destination) 에 대한 예상영역의 중심은 노드 D의 좌표인(Xd,Yd) 이며, 요구영역은 4개의 모서리를 가진 노드 S와 노드 D에 대한 예상영역을 모두 포함한 X와 Y축으로 이루어진 사각형이다. 브로드캐스팅에 의해 경로 요청 메시지를 수신한 중간 노드는 자기 자신의 위치가 메시지 내에 포함된 좌표의 4개 모서리 안에 들어있는 경우인 요구영역 내에 있는 경우에만 받은 메시지를 포워딩한다. 따라서 그림 안의 사각형 바깥의 노드들은 경로 요청 메시지를 포워딩 하지 않는다.

〈그림 20〉과 같이 노드 S가 자신의 위치와 노드 D(Xd,Yd)에 대한 거리차인 DISTs 를 계산하여 경로 메시지에 포함하고 이를 브로드 캐스트한다. 경로요청 메시지를 받은 여러 개의 이웃노드 중에서 각각의 노드는 D의



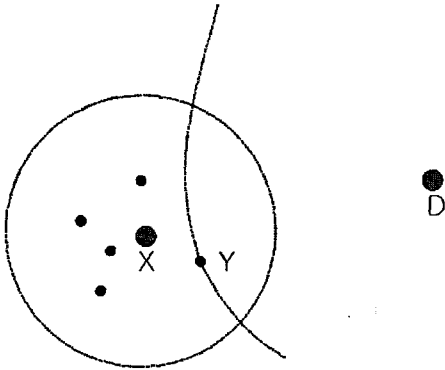
〈그림 20〉 LAR (2)

좌표와 자신의 좌표와의 거리차 DISTi를 계산하여 DISTs > DISTi 를 만족하는 경우에만 경로요청 메시지 내에 있는 DISTs를 DISTi 로 바꾸어 포워딩하고, 이를 만족하지 않는 경우에는 포워딩하지 않는다.

### 5. GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR<sup>[8]</sup> 기법에서는 패킷을 수신한 노드는 이웃 노드의 위치 정보와 패킷의 목적지 정보를 사용하여 점진적으로 패킷 포워딩을 결정하고, Greedy 포워딩 방법을 사용한다.

〈그림 21〉과 같이 패킷을 수신한 노드는 자신과 인접한 이웃 노드 중에서 목적지 노드에 가장 가까이 위치한 노드로 패킷을 전송한다. 노드 X는 노드 D를 목적지 노드라 할 때 자신의 주변의 이웃 노드들 중에서 가장 D와 근접한 Y를 선택하여 패킷을 포워딩한다. 패킷이 Greedy 포워딩이 불가능한 영역에 있는 경우에는 그 영역 주변에서 다시 새로운 경로를 찾아낸다. 중복된 경로로 되돌아가지 않도록 하기 위해서 오른손의 법칙을 사용하여 한쪽 방향으로만 경로를 재설정



〈그림 21〉 GPSR 선택적 패킷 포워딩

하도록 한다. 이러한 방법을 사용하기 위해 노드들은 주기적인 위치 정보 메시지를 주고 받아야 하며, 이웃 노드에 대한 최신의 정보를 유지한다. 이 방법의 경우 네트워크 토폴로지 정보들만 유지하게 되므로 빈번한 네트워크 토폴로지의 변화에도 쉽게 적응하며, 네트워크의 확장성에서도 유리하다. 하지만 밀집된 네트워크일수록 성능이 좋기 때문에 밀집도가 낮은 네트워크에서는 사용하기 어려운 단점이 있다.

## 6. LEACH

Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)<sup>6)</sup>는 네트워크에서 센서 노드들이 스스로 지역적인 클러스터를 형성하고 에너지 소모를 고르게 분산시켜 단순히 하나의 노드의 수명을 고려한 것이 아닌, 네트워크 전체적인 수명을 고려하여 적응성이 있는 클러스터링을 사용하는 프로토콜이다. 지역 클러스터 당 한 개의 노드가 클러스터 헤드로 동작하게 되는데 이는 클러스터 중에서 가장 에너지가 많은 노드를 기준으로 선발되게 된다. 이때 클러스터 헤드를 담당하

는 노드는 다른 노드들에 비하여 에너지 소모가 많기 때문에 헤드를 다른 노드들과 번갈아 가면서 담당하도록 동작하여 전체적인 에너지 소모를 고르게 해 주는 방법을 사용한다. 클러스터를 구성한 후에는 일반 노드는 각자 헤드에게 데이터를 전송하고, 헤드는 데이터를 모으고 이를 합하여 베이스 스테이션으로 전송한다. 일반 노드는 가까운 거리만 전송하고 멀리 있는 BS(Base Station)까지 전송은 일부 헤드만 부담하게 하여 에너지를 절약하게 된다. 데이터 전송은 할당받은 TDMA 스케줄에 따라서 자신의 타임슬롯에서 전송하고 나머지 시간은 송수신기를 끌 수 있으므로 에너지를 절약할 수 있다. LEACH에서는 클러스터를 이용한 에너지 절감 방법을 제안하였지만, 클러스터의 설정과 헤드의 선출방법에 있어서 별도의 알고리즘이 필요하다.

## V. 무선 센서 네트워크에서의 Cross Layer 설계 기술

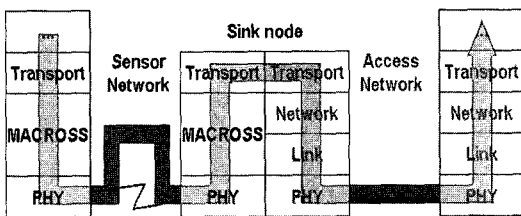
무선 센서 네트워크에서는 각 센서 노드 당 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하지만, 이와 더불어 네트워크 전체의 수명 차원에서 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 네트워크의 여러 계층을 고려한 Cross Layer 설계에 대한 연구가 필요하다.

최근, Cross Layer 설계에 대한 연구로써, 라우팅과 MAC, 그리고 링크 계층을 고려하여 에너지 소모를 줄이는 결합적 설계를 convex 최적화 기법을 사용한 기법, MAC 계층과 네트워크 계층의 Cross Layer에서 에너지 소모를 줄이기 위해 ECPS(Energy-

Constrained Path Selection) 방식과 E2LA (Energy-Efficient Load Assignment) 방식을 복합적으로 사용한 기법 그리고 물리계층, MAC 계층, 그리고 다른 모든 상위 계층들이 결합적으로 설계함을 보인 연구등이 연구 되어져 왔다. 이 가운데, 간단하면서도 에너지 효율적인 MAC과 라우팅 계층의 Cross Layer 개념의 프로토콜인 MACROSS를 소개한다.

### 1. MACROSS

센서 네트워크에서 에너지 효율성을 위한 프로토콜 설계중 네트워크 계층의 신호전달 (signalling), 메모리 등을 고려하여 cross layer 설계 방법이 있다. MACROSS(Medium Access Control and ROuting for SenSor Network)<sup>[10]</sup>는 움직임이 요구되거나, 에너지 측면에서 신뢰성이 떨어지는 부분을 고려하여 에너지 효율성과 신뢰성을 제공하는 MAC/Routing cross layer 프로토콜이다. MACROSS의 구조는 <그림 22>와 같은 구조를 갖고, S-MAC을 기반으로 한다.



<그림 22> MACROSS의 위치

따라서, MAC은 S-MAC으로 동작하고, 라우팅은 S-MAC 기반으로 에너지 효율성과 신뢰성 있는 라우팅을 제공한다. 이를 위해 S-MAC의 SYNC 프레임의 헤더 1byte의 변수 r\_lth(routing length)가 포함되고, SYNC

프레임은 주위의 모든 노드가 들을 수 있으므로 노드의 r\_lth를 쉽게 확인 할 수 있다. 또다른 하나는 LLO(Link LOss)프레임으로 헤더 타입은 '0101'로 지정하고, uplink로 3번의 데이터를 보낸 후 응답이 없으면 송신 node는 다른 경로를 찾기 위해 주위의 node에게 LLO를 보내 다른 경로를 찾는다. MACROSS의 라우팅은 RIP과 유사한 방식으로, 목적지인 Sink 노드까지의 경로를 홉 수를 이용하여 찾아낸다. 모든 노드는 라우팅을 위해 새로운 변수 r\_lth를 이용하는데 이 값은 Sink 노드에서부터의 거리를 홉수로 표현한 값으로 Sink노드가 0이 되고 Sink 노드에 바로 연결된 노드는 1이 된다. 센서 노드들은 자신의 r\_lth보다 작은 값을 갖는 하나의 이웃 노드(이하 상위 노드)에 데이터를 전송하고, 이웃 노드에서 받은 데이터는 상위 계층으로 전달하지 않고 상위 노드로 전송한다. 이 작업이 반복되면 자연스럽게 Sink 노드로 데이터가 전달된다. 성능 분석 결과 MACROSS는 MAC/Routing간의 inter signalling 감소로 signalling 소모 에너지가 802.11+AODV보다 약 60% 이상 절약되고, rerouting 지연은 거의 갖지 않는 장점을 갖는다. 반면, end-to-end 지연은 다소 길어지는 단점을 갖는다. 결국, MACROSS 기법은 계층간의 오버헤드뿐만 아니라 효율적인 MAC 및 라우팅 기법으로 불필요한 에너지 소모를 크게 줄일 수 있다.

### VI. 결론

본 고에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 측면을 고려하여 제안되어온

MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜에 대하여 논하였다.

무선 센서 네트워크에서 각 센서노드들이 수집한 정보는 각 응용에 따른 지연 조건을 만족하면서 센서노드의 에너지 소모를 최소화하여 센서 네트워크 전체의 에너지 효율을 높이기 위해서는 센서 노드의 프로토콜 설계에서 MAC 및 라우팅 프로토콜 설계시 두 계층 및 물리계층까지 고려한 Cross-layer에 대한 연구가 필요하다. 본 고에서는 MAC 및 라우팅 프로토콜에서 고려되어야 할 사항에 대하여 논하였으며, 이것을 바탕으로 향후 전체 센서 네트워크의 수명 및 효율성을 극대화 할 수 있도록 계층간의 영향을 고려한 프로토콜에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] L. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, August 2002
- [2] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.12, No.3, June 2004
- [3] T. V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks," in Proc. ACM Sensys 2003, November 2003
- [4] R. Kannan, Ram Kalidindi, S.S. Lyengar, "Energy and Rate Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," SIGMOD Record, Vol.32, No.4, December 2003
- [5] W. Heinzelmann, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transaction Wireless Communications, Vol.1, No.4, October 2002
- [6] Chalermek Intanagonwiwat, John Heidemann, et al., "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.11, No.1, February 2003
- [7] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," in Proc. ACM WSNA 2002, Sep. 2002, pp. 22-29.
- [8] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," Proc. of the international conf. on Mobile computing and networking, Aug., 2000, pp.243-254.
- [9] 황호영, 정윤원, 김민정, 정창영, 권재균, 성단근, "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 동향 및 분석," SK Telecommunications Review, 제14권 6호, 2004년 12월, pp.918-933
- [10] Seungwoon Yang, "MAC & Routing Protocol for Sensor Network," M.Sc. Thesis 2004

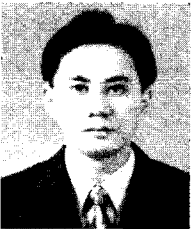


저자소개



김재현

2003년 9월 - 2004년 4월 SK텔레텍 연구원  
2004년 9월 - 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사  
과정  
주관심 분야 Ad-hoc/Ubiquitous Sensor Network  
Multicast/Mobile Multicast/Reliable Multicast



김석규

1997년 9월 - 2004년 3월 : SK텔레콤 선임연구원  
2004년 3월 - 현재 연세대학교 IT연구단 연구교수  
주관심 분야



이재용

1977년 3월 - 1982년 6월 국방과학연구소 연구원  
1987년 7월 - 1994년 8월 포항공과대학교 전산학과  
조교수/부교수  
1997년 3월 - 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수  
주관심 분야 Next Generation Mobile network  
Architecture QoS Management for Wired/  
Wireless Network Ad-Hoc/Ubiquitous Sensor  
Network