

센서 네트워크 저전력 네트워크 프로토콜 기술

김대영* 도윤미** 박노성* 서창우* 유성은*

◆ 목 차 ◆

- | | |
|------------|-----------------------|
| 1. 서론 | 4. 센서네트워크 프로토콜 표준화 동향 |
| 2. MAC 계층 | 5. 맺음말 |
| 3. 네트워크 계층 | 6. 참고문헌 |

1. 서론

센서 네트워크의 프로토콜 기술은 응용의 특성상 저가격의 저전력 무선 통신 기술, 저전력 라우팅 기술, 그리고 이종 센서 네트워크 및 인터넷과 같은 상위 네트워크와의 상호 운용성 등을 필요로 한다. 물리 계층은 간단하면서도 강력한 변조, 저전력 송신 및 수신 트랜시버 기술 등을 목표로 연구되고 있고, 다양한 환경에서 이동성을 가지고 동작하는 센서 노드의 특성 때문에 데이터 링크 계층 기능인 매체 액세스 기술(MAC)도 저전력 소모를 우선시하고, 충돌을 최소화하는 방안으로 연구되고 있다. 또한, 네트워크 계층은 최소 에너지 소모를 보장하는 라우팅 기법, 데이터 기반의 주소 기법을 활용한 데이터 기반 라우팅 기법, 그리고 센서 노드의 위치를 기반으로 하여 전력 소모를 최소화 시켜주는 위치 기반 라우팅 기법등이 많이 연구되고 있다.

센서 네트워크의 프로토콜을 설계할 시에는 다음 사항들이 고려되어야 한다. 센서 노드는 제한된 에너지를 가지는 배터리로 동작되며, 센서 네트워크 응용이 수개월에서 수년 동안 지속되어야 하므로, 초저전력 설계가 가장 중요하다. 센서 노드들은 배터리 방전이나, 물리적인 손상, 그리고 외부 환경 요인에 의해 정상적인 작동을 못할 수 있는 경우가 있으므로, 이들을 고려한 고장 감내 기능들이 프로토콜에 구현이 되

어 노드의 고장이 전체 센서 네트워크 응용에 미치는 영향을 최소화 하여야 한다. 그리고 기존의 인터넷 기반 Ad-Hoc 네트워크에 비해서 노드의 수가 훨씬 많으며, 또한 일정한 지역에 배치되는 노드들의 밀도가 높기 때문에 scalability를 고려해서 설계가 되어야 한다. 다양한 종류의 사물에 내장되는 센서 노드의 특성 때문에 센서 노드의 가격을 낮추기 위해서 무선 송수신기를 비롯한 네트워크 프로토콜 스택이 저가격으로 구현이 되어야 하며, 자동차 내부나 심해와 같은 열악한 환경에서 운용될 수도 있다는 것이 고려되어야 한다. 마지막으로 다양한 센서 네트워크 응용에 최적으로 사용될 수 있는 네트워크 토폴로지가 연구되어야 한다.

센서 네트워크와 관련된 표준화 동향으로는 저속의 저전력 무선 인터페이스인 IEEE 802.15.4 Low-Rate WPAN 프로토콜과 802.15.4를 활용한 산업체 표준 프로토콜인 ZigBee가 주목할 만하다.

본 논문에서는 센서 네트워크의 MAC 계층과 네트워크 계층 그리고 표준화 동향에 대해서 살펴보기로 한다.

2. MAC 계층

센서네트워크 응용에서는 기본적으로 센서 노드간의 신뢰성 있는 연결, 서비스 공평성, 높은 전송 효율을 요구한다. 특히, 센서 네트워크는 점대점 또는 점

* 한국정보통신대학교

** 한국전자통신연구원 텔레매틱스 연구단

대다수의 통신을 위하여 외부의 설정 없이 스스로 구성할 수 있어야 하며, 전력 사용 효율이 매우 높은 데이터 링크 계층을 필요로 한다. 이러한 센서 분야의 서비스 요구 조건을 만족시키기 위해, 무선 분야의 매체 접근 제어 계층(MAC : Medium Access Control) 기술이 활발히 연구되고 있다.

MAC 계층은 매체 접속 프로토콜을 사용하여 다중 전송 요구를 단일한 매체를 통하여 처리될 수 있도록 한다. 매체 접속 프로토콜의 종류는 크게 TDMA 같이 미리 통신 슬롯을 할당하는 방식, CSMA 같이 통신 슬롯을 미리 할당하지 않고 랜덤하게 매체를 사용하는 방식, polling 같이 CSMA에 기초하지만 접근 제어를 단일 베이스 노드에서 처리하는 방식으로 구분할 수 있다. 센서 노드는 이벤트가 불특정 시간 간격으로 발생하는 상황이 대부분으로 TDMA 방식의 경우는 전송 효율이 떨어져 센서 MAC 기술의 연구 과정에서 보완적으로만 사용되어 왔다. 센서 노드에서는 주로 CSMA 방식이 많이 사용되고 있다.

센서 네트워크 전용의 데이터 링크 계층 프로토콜 연구 분야에서는 UCLA의 S-MAC(Sensor-MAC)이 학계에서 널리 알려져 있다[1]. S-MAC의 설계 방향은 일차적으로 에너지 효율성을 극대화하고자 고안되었으며 부차적으로 자동 구성(self-configuration), 그리고 대역 효율성을 높이고자 하였다. S-MAC 이후 T. van Dam이 S-MAC의 고정된 듀티 사이클을 적응적으로 변환 시킨 T-MAC(Timeout-MAC)을 소개하였으며, T-MAC은 에너지 효율을 S-MAC 보다 개선하였으나 전송 성능이 S-MAC 보다 떨어지는 문제점을 내포하고 있다[2]. 그 후 Berkeley에서 제안한 B-MAC은 TinyOS v1.1.3에 backoff 방식을 변경하여 초기 backoff를 수행하지 않으며, 만약 매체가 사용 중이면 congestion backoff 구간을 binary exponential backoff 대신 임의의 작은 값으로 선택하여 매체에 접근한다. 또한 B-MAC은 RTS-CTS 처리나 노드간 동기화 작업을 MAC 계층에서 수행하지 않으며, 상위 계층에서 선택하여 처리하도록 하였다.[3] B-MAC은 [4]에서 제시된 LPL(Lower Power Listening)이라는 물리계층의 전력 저감 기술을 접목하여 S-MAC 보다 전력 소모 효율과 전송 효율을 개선하였다. B-MAC은 매체 접속 프로토콜 측면에서

새로운 기법이 고안되었다기 보다 TinyOS를 구현할 때, MAC 기능의 분할을 통하여 MAC 코드 용량을 줄이고 수행속도를 개선한 것으로 판단된다. 이후 절에서는 매체 접속 프로토콜인 S-MAC과 T-MAC의 세부 동작을 상세히 다룬다.

2.1 S-MAC

S-MAC의 설계 과정에서 고려한 동작 환경은 애드혹(ad-hoc) 환경으로 베이스 노드가 없는 노드간 통신을 가정하며, 응용 계층은 큰 시간의 휴지 구간(idle period)을 가지며, 통신 지연 시간에 민감하지 않다고 가정하였다. 센서 네트워크가 배치되는 다양한 형태와 영역을 고려할 때 이러한 가정은 적절한 설정이라 볼 수 있다.

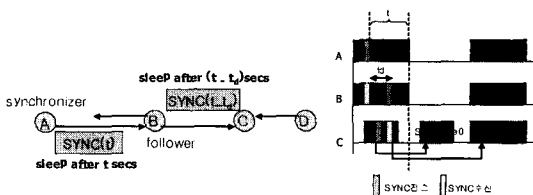
센서 노드가 트래픽이 없는 상태에서도 무선 매체의 상태를 지속적으로 검사하는 동작 상황을 idle listening이라 하며 수신부의 심각한 전력 낭비를 초래한다. 실제로 센서 노드의 전력 소모에서 idle listening이 차지하는 비율이 50 ~ 100%에 이르며, 트래픽 양이 적은 경우 이러한 현상은 더욱 심화된다. 상기 문제현상의 대책으로 S-MAC은 물리계층의 주기적 수신/슬립(periodic listen and sleep) 기법을 채택하였다. 두 번째 문제 현상은 임의의 접속(random access) 방식의 특성상 모든 센서 노드는 개별 프레임을 수신한 다음 프레임의 수신측 주소와 자신의 주소를 비교한다. 본 과정에서 정상 수신 노드가 아닌 경우, 불필요한 프레임을 수신하여 전력 낭비를 초래한다. 이러한 상황을 overhearing이라 하며 S-MAC은 대책으로 overhearing avoidance 기법을 사용한다. 세 번째는 매체 감지 과정에서 발생하는 hidden node 문제의 해결과 데이터 프레임의 충돌을 회피하기 위해 사용하는 RTS/CTS/ACK 제어 패킷 오버헤드 문제이다. 응용 계층에서 큰 길이의 메시지를 전송할 경우 분할된 다수의 패킷 전송 단위마다 덧붙여지는 제어 프레임으로 인한 전력 소모가 커지게 된다. S-MAC은 메시지 전달(message passing)이라는 기법으로 제어 프레임 오버헤드를 줄여 메시지 전송 지연시간과 전력 소모를 개선하였다.

다음에 S-MAC의 주기적 수신/슬립 기법, over-

hearing avoidance, 메시지 전달 기법을 자세히 살펴보기로 한다. S-MAC은 프레임을 active 부분과 sleep 부분으로 나누며, 프레임 시간 대비 active 시간 구간을 프레임 듀티 사이클로 정의한다. S-MAC은 가능한 듀티 사이클을 줄여, 즉 슬립시간을 길게 하여 에너지 소모를 적게 한다. 주기적 수신/슬립을 하기 위해 모든 S-MAC 노드는 on/off 시점이 동일하여야 하는데 이러한 처리를 위해 프레임 스케줄링을 수행 한다. 모든 S-MAC 노드는 고유의 프레임 듀티 사이클을 가질 수 있으며, 주변 노드와 듀티 사이클을 동기화하기 위해 SYNC 패킷을 방송한다. SYNC 패킷을 수신한 S-MAC 노드는 주변 노드의 스케줄을 고려하여 자신의 프레임 듀티 사이클을 수정하면서 센서 노드간 통신을 수행한다. 이러한 기본 동작을 이용하여 S-MAC은 센서 노드의 파괴나 고장 상황에서도 적응적으로 데이터 링크 계층에서 복구가 가능한 자동 구성 기능을 지원한다.

센서 노드간 동기화 메커니즘에서 모든 노드는 고유의 프레임 스케줄 테이블을 보유하고 있다. S-MAC에서 정한 일정 시간(동기화 주기) 동안 SYNC 패킷이 수신되지 않으면, 특정 노드가 자신의 주소와 자신의 슬립 시간을 SYNC 패킷에 실어 방송하고 그 노드를 synchronizer라 정의한다.

그림 1에서 노드 A는 synchronizer로 임의의 시간 t를 선택하여 SYNC 패킷에 실어 방송한다. 여기서 시간 t는 전송 종료 후 슬립 구간까지의 상대 시간이다. SYNC 패킷을 수신한 인접 노드는 자신의 스케줄을 조정한 후 임의 시간 t_0 이후에 SYNC 패킷에 자신의 주소와 슬립 시간 t_{sl} 를 방송한다. 이 노드를 follower라 정의한다. 이렇게 동일한 스케줄을 공유하는 synchronizer 노드와 follower 노드의 집합을 가상 클러스터라고 부른다.

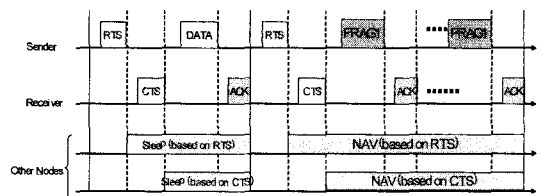


(그림 1) S-MAC 동기화 과정

특정 노드가 스케줄을 선택하여 SYNC 패킷을 방송한 후에 다른 스케줄을 가진 SYNC 패킷을 수신한 경우 그 노드는 두개의 스케줄을 적용하여 물리계층의 on/off 시점을 조정한다. 이러한 상황은 특정 센서 노드가 두개의 서로 다른 가상 클러스터 사이에 연결한 경우에 발생한다. 그림 1에서 노드 C가 임의의 노드로부터 이미 SYNC 패킷을 수신하여 스케줄-0를 선택한 상황에서 노드 A의 SYNC 패킷을 수신하여 스케줄-1을 선택한 노드 B의 SYNC 패킷을 수신한다면 노드 C는 두개의 스케줄을 동시에 적용하여 주기적 수신/슬립 동작을 수행하여야 한다. 센서 노드간 동기화 메커니즘을 지원하기 위해서 S-MAC은 프레임의 Active 구간을 SYNC 구간과 데이터 통신 구간으로 나누어 사용한다. SYNC 구간에 SYNC 패킷을 처리하고, 데이터 통신 구간에서 RTS/CTS 패킷 교환하면 데이터 패킷은 스케줄 정보에 기록된 슬립 시간에 관계없이 통신을 수행한다.

S-MAC에 적용한 overhearing avoidance 기법은 모든 노드가 패킷의 수신측 주소와 duration 정보를 확인하여 다른 노드로 가는 트래픽일 경우 물리 계층을 슬립 상태로 천이시킨다. 이 동작에 적용하는 규칙은 송신 노드와 수신 노드에 바로 인접한 모든 노드는 RTS/CTS 패킷의 duration 필드를 탐색하여 특정 데이터 통신의 전송 시간을 확인한 후, 데이터 통신 구간 동안 슬립하고 통신이 끝나기 직전에 노드의 상태를 동작 상태로 바꾼다.

그림 2와 같이 첫 번째 데이터 패킷 전송에서 송신 노드와 수신 노드를 제외한 모든 노드는 데이터 전송 구간동안 슬립을 수행하고 두 번째 전송 시작 전에 동작 상태로 천이한다. 본 기법은 수신 구간에서 전력 소모를 줄이면서 동시에 주기적 수신/슬립 기법에서 파생되는 다중 홉 전송 지연을 줄일 수 있다.



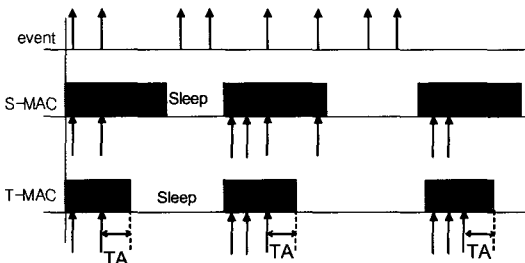
(그림 2) S-MAC의 패킷 송수신 기법

메시지 전달 기법은 그림 2의 두 번째 데이터 패킷 전송부터 적용 되었다. S-MAC은 응용 계층으로부터 받은 큰 길이의 메시지를 짧은 여러 개의 데이터 패킷으로 분할하여 한 개의 RTS/CTS만으로 채널을 예약한 후 데이터 패킷들을 보내게 된다. 데이터 패킷 교환 과정에서는 다른 노드의 패킷 전송은 허용되지 않는다. ACK 수신을 받지 못한 경우 데이터 패킷은 재전송되며, 채널은 추가 데이터 패킷만큼 더 예약한다. 이로써 제어 패킷에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있지만, 다른 노드들이 전체 메시지의 전송이 끝날 때까지 기다려야 하기 때문에 매체 사용의 공정성 (fairness)에 문제점을 내포하고 있다.

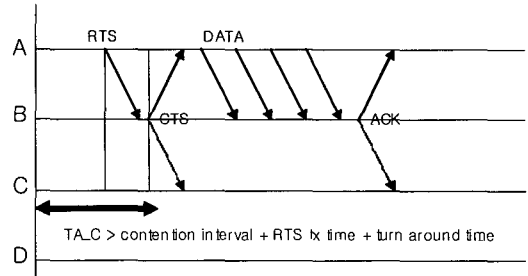
2.2 T-MAC

T-MAC(Timeout-MAC)은 S-MAC과 동일한 CSMA를 기반으로 주기적 수신/슬립 동작을 수행한다. S-MAC이 고정된 프레임 듀티 사이클을 사용하는 반면 T-MAC은 TA(Timeout of Active) 시간 카운터를 사용하여 가변적인 듀티 사이클을 지원한다. 그림 3과 같이 active 구간에서 TA 시간 동안 통신 이벤트가 없으면 T-MAC은 sleep 상태로 전이한다. T-MAC은 active 구간에서 누적된 메시지가 한번에 처리되므로 idle listening을 줄여 전력 소모를 S-MAC 보다 줄일 수 있지만, timeout에 의한 전송 지연은 증가한다.

다중 홉 전송시 T-MAC에서 TA값을 너무 작게 설정하면 송신 노드가 RTS 전송 후 중계 노드의 CTS의 응답을 확인하지 못하고 중계 후보 노드가 슬립하게 되어, 다음 active 구간에 패킷을 전송하여야 하는 문제 현상이 발생한다. 이와 같이 전송 지연 문제를 해



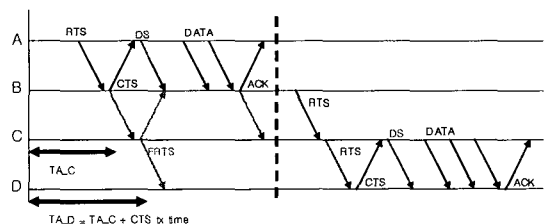
(그림 3) T-MAC 기본 동작



(그림 4) Early Sleeping 문제

결하기 위하여 그림 4와 같이 최소의 TA 값을 유지하여야 한다. 그리고 TA의 최소값을 유지하더라도 다중 홉 전송 상황에서 노드 C는 노드 B의 CTS를 확인하여 수신 대기 상태에 있을 수 있지만, 노드 D는 TA 만료로 슬립상태에 빠진다. 이러한 현상이 누적되어 다중 홉 전송에서 T-MAC의 throughput이 S-MAC의 절반 이하로 떨어지는 문제점이 발생하며 이를 early sleeping 문제라 한다.

Early Sleeping 문제에 대한 대책으로 T-MAC은 FRTS(Future RTS) 패킷 전송 기법과 버퍼가 만료되어 가는 노드의 패킷 우선 전송 기법을 도입하였다. 그림 5의 점선 왼쪽 시간 영역에서 노드 C는 노드 B의 CTS를 확인하고 FRTS를 전송한다. 노드 D는 FRTS를 수신하여 TA 값을 재조정 하여 메시지가 도착할 때까지 슬립 상태에 빠지지 않게 된다. 하지만, FRTS의 전송은 노드 B의 수신 과정을 방해하므로 노드 A는 DS(data-sent) 패킷을 더미로 전송한다. 이러한 FRTS 기법을 적용하여 T-MAC은 throughput을 기존 대비 75% 개선하였다. 그림 5의 점선 오른쪽 시간 영역에서 노드 C의 패킷 버퍼가 full이 되는 상황에서는 노드 B의 RTS를 수신하더라도 노드 D로 RTS를 전송하여 패킷 버퍼에 쌓인 데이터 패킷을 먼저 전송한다.



(그림 5) Early Sleeping 대책

T-MAC은 에너지 효율을 극대화하기 위하여 설계 되었지만, TA 값의 선정에 따른 전송 성능의 변화가 심한 문제점을 갖고 있다.

3. 네트워크 계층

센서 네트워크는 기존의 Ad-Hoc 네트워크 보다 더 가혹한 제약사항을 가지고 있으며, 독특하고 다양한 응용 분야를 대상으로 하고 있다. 이러한 이유로 기존의 방법들과는 다른 형태의 프로토콜을 필요로 하게 되었다. 센서 네트워크의 응용 분야가 광범위한 만큼 아직 모든 응용을 만족시키는 프로토콜은 나오지 않은 상태이며, 많은 연구 결과들이 지엽적으로 풀고자 하는 목표와 가정들 아래에서 산출되었다. 본 장에서는 센서 네트워크가 다른 기존의 네트워크와 구별되는 차이점, 설계시의 요구사항 등에 대해서 알아보고, 대표적인 라우팅 프로토콜들을 특성에 따라 분류하고 설명한다.

센서 네트워크는 노드들이 스스로 네트워크를 구성해야 하는 자동구성 특징과 라우터와 데이터 소스의 두 가지 역할을 동시에 수행한다는 점에서는 Ad-Hoc 네트워크의 일종이라고 볼 수 있다. 그러나 센서 네트워크는 아래와 같은 차별적인 다양한 특성을 지닌다.

- 제한된 노드 자원 : 보통 센서 노드는 작은 크기를 가지며, 계산 처리와 저장, 통신 능력도 기존의 인터넷 기반의 네트워크에 사용된 노드들에 비해서 현격하게 제한된다.
- 배터리 의존성 : 센서 노드는 응용의 특성상 개개의 노드에 전원을 공급하거나 충전하는 것이 매우 힘들다. 따라서 센서 노드와 센서 네트워크의 수명은 배터리에 의존적이게 되며, 초저전력 설계가 매우 중요한 요구사항이 된다.
- 이동성 : 센서 노드는 MANET의 노드와는 달리 정적인 경우도 있지만, 응용에 따라 노드 또는 네트워크 자체가 움직일 수도 있다.
- 데이터 전송 모델 : 센서 노드들은 IP 주소와 같이 특정 노드를 구분 짓는 글로벌ID를 가지지 않으며, 노드가 제공하는(또는 할 수 있는) 데이터가 다른 노드들과 구분시켜 준다. 즉, 사용자는 특정 주소를 가진 노

드에게 데이터를 요구하는 것이 아니라 특정 요구사항을 만족하는 노드들에게 데이터를 요구한다. 예를 들어 “온도가 30도 이상인 노드들은 보고해라!”하는 방식으로 데이터를 전송해야할 노드들을 지칭한다. 이러한 방식을 데이터 중심(Data centric) 주소 지정 방법이라고 한다.

- 데이터 집중/융합 (Data Aggregation/Fusion) : 어떤 이벤트가 발생하면, 주위의 다수의 노드들이 동일한 이벤트를 감지하게 되고 (Overlap), 불필요하게 동일한 데이터가 베이스 노드에게 여러 번 전송 되는 비효율성을 가지고 있다 (Implosion). 이러한 중복된 데이터를 제거하거나, 필요에 따라 최대, 최소, 평균값 등을 구하여서 최종적으로 하나의 데이터만을 베이스 노드에게 전송하는 것을 데이터 집중이라고 한다. 시그널 프로세싱 기술을 이용해서 수행되는 데이터 집적을 특별히 데이터 융합이라고 한다.
- 데이터의 실시간 특성 : 이 특성은 응용 분야에 밀접하게 연관된 것으로서 데이터의 효용가치가 시간이 지남에 따라 급격하게 감소하는 실시간 특징을 가진다.
- 센서 데이터 베이스 : 센서 네트워크는 일반적으로 사용자가 지시하는 쿼리와 센서 노드들이 감지하는 이벤트에 의해서 작동된다. 사용자가 원하는 쿼리에 대한 데이터들이 센서 노드들에 분산되어 있는 데이터 베이스라고 보는 관점도 존재한다.

다음절에서는 센서 네트워크 라우팅 프로토콜을 데이터 중심, 클러스터링/계층구조, 플랫폼구조(flat)/저전력, QoS/실시간, 센서 데이터베이스 등으로 분류하여 대표적인 프로토콜들을 기술한다.

3.1 데이터 중심

대량으로 배치되고, 배터리에 의존적이고, 상대적으로 제한된 자원을 가지는 모든 노드들에게 글로벌ID를 부여하는 것은 어렵다. 그로인해 특정 노드들을 구분하기 위한 다른 방법이 필요하게 되었으며, 이를 위해서 등장한 것이 데이터 중심 개념이다. 노드들은 자신이 제공할 수 있는 데이터에 의해서 지칭된다. 이를 위해서 사용자는

속성기반의 네이밍 (attribute based naming)을 이용하여 쿼리 (interest라고도 부른다.)를 기술하고, 노드들에게 전송한다. 수신된 Interest와 일치하는 이벤트를 감지한 노드들만이 데이터를 베이스 노드로 전송함으로써 데이터를 전송해야 할 노드들을 그 외 다른 노드들과 구분할 수 있게 된다.

Directed Diffusion은 데이터 중심 방식의 라우팅 중에 가장 대표적인 것이다[5]. Directed Diffusion은 속성값으로 이루어진 쌍을 이용하여, 데이터와 쿼리를 기술한다. 속성은 감시하려는 개체의 특징, 감시 대상의 지리 정보, 감시 주기 등을 의미하며, 이러한 속성들에 원하는 값을 지정해서 쿼리를 만들어 센서 노드들에게 interest를 배포한다. 노드들은 수신한 interest를 보관하고, 어떤 interest를 수신했을 때 기존에 수신한 것과 같은지 비교할 때나 이벤트가 발생했을 때 그와 일치하는 interest가 저장되어 있는지 판별하는 용도 등으로 사용된다. 센서 노드들은 기존에 수신하지 않은 새로운 interest를 수신했을 때만 해당 interest를 방송한다. 만약 저장된 interest와 일치하는 이벤트를 감지하면 그 interest가 방송된 경로들의 역순 (gradient, interest 수신시에 그 interest를 보낸 노드 쪽으로 그래디언트를 설정한다.)을 따라서 베이스 노드에게 보고한다. 베이스 노드는 그래디언트에 의해 결정되는 다수의 경로 중 가장 최적의 것을 선택해서 이벤트를 감지한 소스노드에게 그 선택된 경로를 이용해서 데이터를 전송

하라는 강화(reinforcement) 작업을 수행한다.

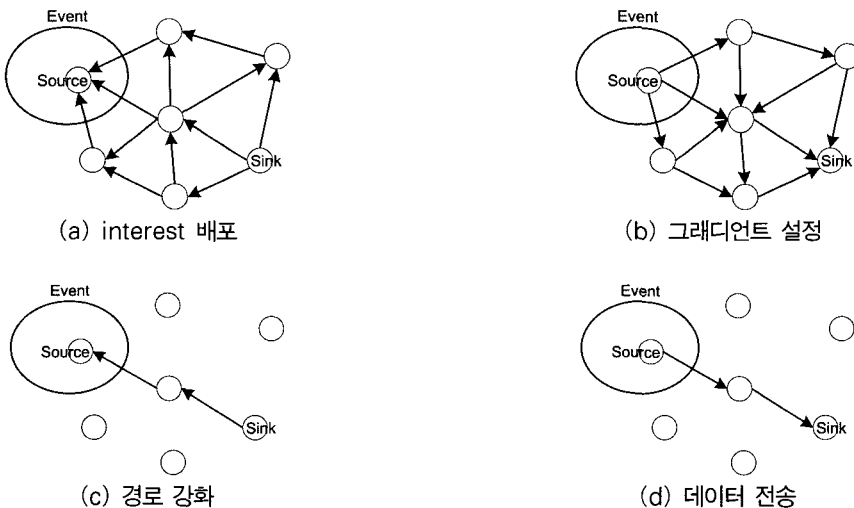
3.2 클러스터링/계층구조

클러스터링/계층구조 방식은 본질적으로 데이터 집중/융합에 유리한 장점이 있으며, 클러스터 헤드 노드의 관리에 의해서 하위 노드들을 조정하여 전력소모도 낮출 수 있다. 그러나 최적의 클러스터를 만드는 것은 NP-Hard에 해당하는 문제로써 이루기 상당히 어렵다. 따라서 많은 프로토콜들이 제안되었으며, 그 중 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)가 가장 대표적인 프로토콜이다[6].

LEACH에서 매 라운드마다 각 노드들은 0과 1 사이의 임의의 값을 생성한다. 그리고 아래의 수식에 의해서 정해진 임계값보다 생성된 값이 작다면 스스로 클러스터 헤드 가 됨을 결정한다.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot \left(r \bmod \frac{1}{p}\right)} & \text{if } n \in S \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

p 는 헤드가 되고자 하는 비율, r 은 현재 라운드, S 는 지난 $1/p$ 라운드 동안 헤드가 되지 않은 노드의 집합을 의미한다.



(그림 6) Directed Diffusion

헤드가 된 노드들은 헤드가 되었음을 주위 노드들에게 방송하고, 이를 수신한 노드들은 가장 강한 신호를 보낸 헤드의 클러스터에 참가한다. 헤드는 베이스 노드와는 단일-홉 통신을 하고 하위 노드들에게는 타임 슬롯을 할당하는 TDMA 방식의 통신을 이용해서 하위 노드가 불필요하게 RF 트랜시버를 작동하여 전력을 소모하는 것을 방지한다. 특정 시간이 경과하며 현재의 라운드를 종료하고, 처음부터 다시 위의 과정을 반복하는 새로운 라운드를 시작한다.

전체 노드들 중 5%가 헤드가 될 경우가 가장 최적임을 밝혔으며, 네트워크의 수명을 크게 늘릴 수 있음을 보였다. 그러나 모든 노드가 베이스 노드와 단일-홉 통신을 할 수 있다는 가정 때문에 광범위한 지역에 노드들을 배치하는 응용에는 사용할 수 없는 단점이 있다.

3.3 플랫폼구조/저전력

플랫폼구조 방식은 기존의 네트워크와 가장 비슷한 것으로 그 중에는 Ad-Hoc 네트워크와 센서 네트워크 모두에서 이용 가능한 것도 있다. 각 노드들은 서로 간의 라우팅 정보 교환으로 다음노드를 찾으며, 균일한 배터리 소모 등을 위해서 우회로를 이용하는 등의 방법을 취할 수 있다. 대부분의 플랫폼구조 방식이 적은 배터리 소모와 네트워크 수명 연장을 목표로 하고 있다.

Energy-Aware Routing (EAR)은 네트워크 수명을 늘리기 위해서 다중 경로들을 상황에 맞게 번갈아 가면서 사용한다[7]. 이 프로토콜에서 핵심이 되는 부분은 경로의 비용과 그 경로가 선택될 확률을 부여하는 부분이다. 노드는 이웃노드가 보낸 비용과 그 이웃노드의 확률의 곱을 모두 더한 기대비용을 인접노드들에게 전파한다. 이 기대비용을 수신한 노드는 기대비용과 그 기대비용을 전송한 노드로의 매트릭을 더해서 그 노드로의 중간비용으로 정의한다. 이때 이웃노드 i 를 위한 확률을 아래와 같이 정의된다.

$$P_i = \frac{1/IC_i}{\sum_{k=1}^n 1/IC_k}$$

n 은 이웃노드의 수, IC_k 는 k 로의 중간비용을 의미한

다. 그리고 한 노드의 기대비용은 위에서 말한 것처럼 다음과 같이 정의된다.

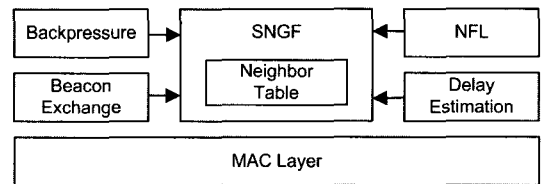
$$EC = \sum_{k=1}^n P_k \cdot IC_k$$

이러한 기초 셋업단계가 종료되면, 이웃노드들에 부여된 확률들의 합은 1이 되므로 주어진 확률을 가지고 임의로 다음 노드를 선택해서 전송한다.

3.4 QoS/실시간 특징

현재 센서 네트워크에서 거론되고 있는 QoS는 대부분 종단 간의 전송 지연에 대한 것이다. 이는 몇몇 응용 분야에서의 데이터의 실시간 특성을 위한 것으로, 멀티-홉 네트워크에서는 하드 리얼타임을 지원하기는 어렵다.

SPEED는 센서 네트워크에서의 실시간 통신을 위하여 설계되었다[8]. 라우팅 테이블을 유지하는 등의 오버헤드를 없애고, 분산된 방법으로 종단 간의 소프트 리얼타임 통신을 지원한다. SPEED는 아래의 그림 7과 같은 모듈들로 구성되어 있다.



(그림 7) SPEED 아키텍처

The Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding algorithm (SNGF)는 핵심이 되는 모듈로서 위치정보를 이용하여 다음노드를 정한다. 다음노드는 위치적으로 목적지에 더 가까운 노드들 중에 속도가 특정 값보다 높은 노드들 중에 선택된다. 이웃노드로의 속도는 현재 노드에서 목적지 노드로의 거리에서 이웃노드에서 목적지 노드로의 거리를 뺀 값을 지연 시간으로 나눈 값으로써, 단위시간당 목적지 노드에 어느 정도로 가까워지는 가를 의미한다. 주기적인 비컨 교환을 통해서 이웃 노드들을 파악하고, 통신 링크의 지연을 기준으로 혼잡도에 다른 경로를

찾는다. 링크의 지연은 타임스탬프를 표시한 패킷을 보내고, ACK 받는 과정을 통해서 걸린 시간을 측정함으로써 이루어진다. NFL은 중계 비율을 조절하여 속도를 유지하도록 하는 핵심적인 기능을 수행한다. 혼잡이 발생하면 속도가 떨어지고, 혼잡이 일어난 링크와 연결된 노드는 백프레시 기법을 이용하여 다른 노드들에게 알려서 혼잡이 일어난 노드로의 경로를 선택하지 않도록 유도한다.

3.5 센서 데이터베이스

센서 네트워크를 분산된 데이터베이스로 보는 견해는 사용자의 쿼리에 의해서 노드들의 데이터를 모은다는 점에서 데이터 중심 개념과 비슷한 점이 있다. 그러나 이러한 데이터베이스로 보는 견해는 쿼리의 효율적인 처리에 대해서도 관심을 두고 있다. 일반적인 데이터 중심 프로토콜과는 다르게 저전력으로 쿼리를 처리하기 위한 독립된 계층을 가지고 있기도 하다.

COUGAR가 센서 네트워크를 분산된 데이터베이스로 보는 대표적인 프로토콜이다[9]. 이 프로토콜은 선언적

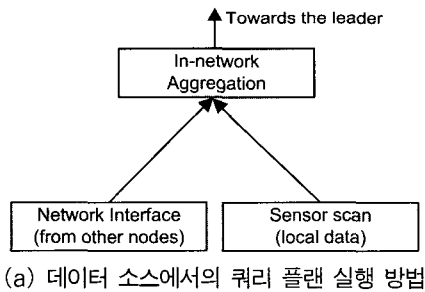
크 계층으로부터 추상화시키고, 데이터 집중 등의 방법을 쿼리 (declarative queries)를 이용해서 쿼리 처리를 네트워크 사용하여 전력소모를 줄이는 방식을 취했다. 쿼리 처리의 추상화를 위해서 네트워크 계층과 응용 계층 사이에 독립된 쿼리 계층을 추가하였다. 새로운 쿼리가 발생하면 게이트웨이는 쿼리를 최적화한 다음 새로운 데이터가 쿼리를 처리하기 위해서 필요하다면 쿼리 플랜을 만든다. 쿼리 플랜에는 데이터가 모이는 리더 노드를 선정하는 방법과 필요한 데이터의 종류 등이 들어 있다. 리더 노드가 아닌 노드들은 감지한 데이터를 리더노드 쪽으로 보내게 되고, 전송되는 중간에 지속적으로 자신이 감지한 데이터와 다른 노드에게서 받은 데이터를 데이터 집중 방법을 사용해서 처리한다. 리더 노드는 그렇게 모인 데이터를 최종적으로 가공해서 게이트웨이로 전송함으로써 쿼리의 처리를 종료한다.

4. 센서네트워크 프로토콜 표준화 동향

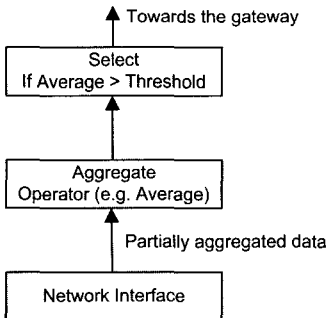
IEEE 802.15에서는 무선 개인 영역 네트워크 (Wireless Personal Area Network) 표준화 작업을 하고 있으며, 이 중 2003년 10월에 제정된 저속 무선 표준인 IEEE 802.15.4는 PHY 및 MAC 계층을 표준화 하였는데, 센서 네트워크를 포함한 다양한 응용에서 사용되고 있다. 그리고 현재 대체 PHY 계층을 위한 IEEE 802.15.4a와 MAC 계층의 확장을 위한 IEEE 802.15.4b에 대한 표준화 활동이 활발히 진행 중이다. 이러한 IEEE 802.15.4의 표준안 상위에 네트워크 계층, 응용 계층과 보안에 대한 표준화 작업을 산업체 표준 단체인 ZigBee에서 주도하고 있다. 본장에서는 이 두 가지 표준에 대해서 소개를 하기로 한다.

4.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15 내의 TG4는 단거리, 저전력, 낮은 전송율의 무선 기기에 대한 표준 활동을 하고 있으며 국제적으로 사용상 라이선스 제약이 없는 868MHz, 915MHz, 2.4 GHz 주파수 대역을 사용한다. 응용 분야로서는 센서, 액추에이터, 대화형 장난감, 스마트 배지, 건강상태 모니터링, 컴퓨터 주변장치, 원격 제어,



(a) 데이터 소스에서의 쿼리 플랜 실행 방법

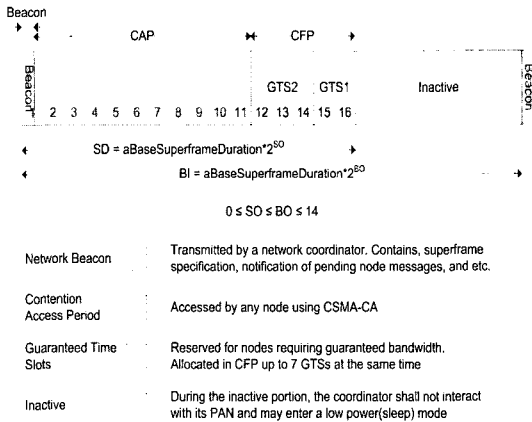


(b) 리더 노드에서의 쿼리 플랜 실행 방법

(그림 8) COUGAR의 쿼리 처리

산업 네트워크, 홈 자동화 등이 있다. 표준 단체의 최종적인 목적은 배터리의 수명이 수개월부터 수년까지 가능한 저전력 무선 기기의 PHY 계층 및 MAC 계층을 정의하는 것에 두고 있으며 2003년 10월에 표준 문서가 발표되었다[10].

IEEE 802.15.4 MAC은 기본적으로 CSMA/CA방식을 사용하며, 그림 9와 같이 비컨 기반의 수퍼 프레임 구조를 지원한다. 이 수퍼 프레임은 활성 영역(active region)과 비활성 영역(inactive region)으로 나뉜다. 수퍼 프레임 구조에서는 시간 보장 슬롯(GTS)을 이용해서 실시간 통신을 할 수 있으며, 비활성 영역에서 라디오를 끄으로써 전력 소모를 줄일 수 있다.



(그림 9) 비컨 기반 슈퍼 프레임 구조

물리계층은 물리계층 데이터 서비스와 물리계층 관리 서비스를 제공한다. 물리계층은 물리적 라디오 채널을 통해 물리 계층 프로토콜 데이터 유닛(PPDU)의 송신과 수신을 가능하도록 하며, 라디오 송수신기의 활성화와 비활성화, 채널 선택, 빈 채널 검출(Clear Channel Assessment), 링크 성능 표시(LQI), 에너지 검출(ED) 등의 기능을 수행한다.

MAC 계층은 물리 계층 데이터 서비스를 통해서 MAC 프로토콜 데이터 유닛(MPDU)의 송신과 수신을 담당하며, 또한 비컨 관리, 채널 접속, 시간 보장 슬롯 관리, 프레임 검증, ACK 프레임 전송, 네트워크 가입 및 탈퇴 등의 기능을 수행한다. 표 1에 IEEE 802.15.4 표준의 특징을 요약하였다.

(표 1) IEEE 802.15.4 표준안의 특징

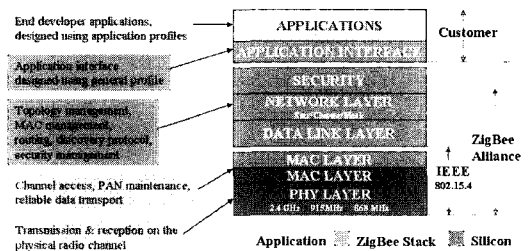
IEEE 802.15.4 표준안의 특징	
데이터 전송률	2.4GHz (250 kbps), 915MHz (40 kbps), 868MHz (20 kbps)
채널수	2.4GHz (16 채널), 915MHz (10 채널), 868MHz (1 채널)
토폴로지	스타, Peer to Peer, 하이브리드
무선 도달 거리	30 - 70 m
MAC	CSMA/CA
실시간 보장	GTS (Guaranteed Time Slot) 제공
주소	64비트 IEEE 주소 또는 16비트 내부 주소

4.2 ZigBee

ZigBee Alliance는 2002년 8월에 신뢰성 및 기기간의 상호 연동을 보장하며, 저비용으로 저전력을 소모하는 무선 통신의 구체적인 활용 및 응용을 목적으로 세계적인 산업 체 간에 결성된 비영리 협력 모임이다.

특히, 유수의 반도체 제조 업체 및 기술 파급의 역할이 큰 기관들이 참여하여 현재 급속한 성장을 보이고 있으며, 2003년 IEEE 802.15.4의 제정과 함께 IEEE 802.15.4를 ZigBee Alliance의 표준으로 승인하였다. PHY 및 MAC 계층에 대한 표준을 기반으로 MAC 계층 이상의 프로토콜 스택 및 응용 영역에 대하여 표준화를 추진하는 동시에 관련 칩 생산 및 제품화에 박차를 가하면서 더욱 활기를 띠고 있다.

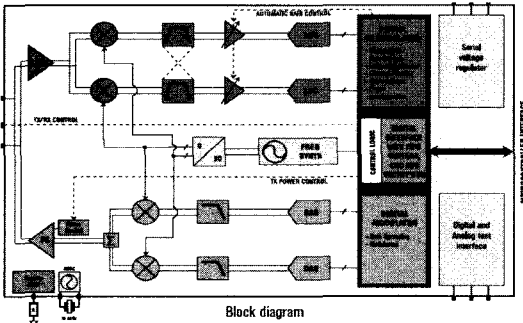
ZigBee의 통신 모드가 마스터-슬레이브 방식을 기본으로 하고 있지만 'Mesh Mode'라 불리는 점대점 방식의 네트워킹이 가능하고 네트워크 안에서 하나



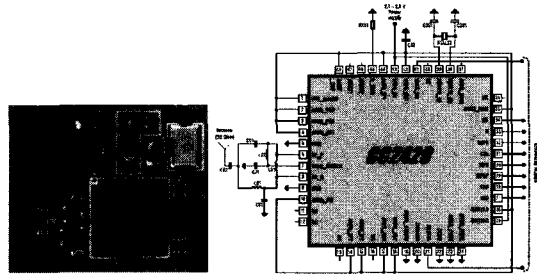
(그림 10) ZigBee 프로토콜 스택

(표 2) ZigBee working group 및 주요업무

워킹 그룹	주요 업무
Marketing WG	ZigBee 시스템이 활용될 응용을 서비스하기 위한 전체 서비스 모델을 정립하고, 구체적인 응용 서비스 도출을 통한 시장 범위 도출 및 OEM을 위한 세부 규칙을 정의하는 작업이 주목적
Architecture Framework WG	응용 계층에서 사용될 profile에 대한 세부정의를 주목적으로 진행되는 작업그룹
Network WG	네트워크 계층과 응용 하위계층에 대한 드래프트 작업
Qualifications WG	상호 연동 시험에 대한 계획 및 세부 시험 방안에 대한 도출을 목적
Security WG	네트워크 계층과 응용 하위 계층에서의 보안/인증을 위한 보안 Toolbox 개발을 주목적으로 함 세부적으로 키 설정, 키 전송, 데이터 보호화 및 인증에 관련된 메커니즘 도출과 해당 메커니즘을 포함하는 Toolbox



(그림 11) Chipcon CC2420 블록도



(그림 12) CC2420 칩과 간단한 주변회로

의 기기를 네트워크 조정자 (Network Coordinator)로 명하여 다른 기기들을 제어하는 일련의 방식을 채택하였다. 또한 이러한 네트워크 조정자 들간의 통신이 가능하며 특정의 기기가 Mesh 모드의 네트워크 상의 다른 모든 기기를 인식하지 못할 때에도 네트워크를 스스로 구성할 수 있다.

ZigBee 멤버중의 하나인 Philips는 2005년에 500만 개 이상의 ZigBee IC가 시장에 팔릴 것이라고 예측하였으며, 2003년의 ZigBee 모듈의 단가는 \$5 이며, 최종적으로 대량 양산의 시기정도에는 \$1까지 내려갈 것으로 예상된다. 그림 11과 그림 12는 대표적인 2.4GHz IEEE802.15.4 compliant RF 송수신기로서 2003년 11월 말에 Chipcon사에서 발표된 CC2420 칩이다. CC2420 칩은 250kbps 속도를 가지는 2400~2483.5MHz대의 RF 송수신기로서, IEEE802.15.4와 ZigBee에 의해 정의된 FFD(Full-Function Devices)와 RFD(Reduced-Function De-

vices) 제품에 사용될 수 있다.

5. 맺음말

센서 네트워크는 미래의 유비쿼터스 네트워크를 구성하는 중요한 요소 기술이며, IT839 프로젝트의 3대 인프라스트럭처중의 하나로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그리고 다양한 상용 서비스를 목표로 연구 개발이 활발히 진행 중인 분야이다. 하지만 본 논문에서 살펴본바와 같이 아직까지 국제적으로 경쟁력있는 네트워크 프로토콜 스택이 부재하며, IEEE 802.15.4와 ZigBee가 그중 가장 가까이 근접하였으나, 다양한 센서 네트워크 응용을 지원하기에는 아직 많이 부족하다. 그러므로 센서 네트워크를 위한 네트워크 프로토콜 기술에 대한 상용화와 표준화를 위한 노력이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

참고문헌

- [1] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in Proceedings of the IEEE Infocom, New York, NY, June 2002, pp. 1567-1576.
- [2] T. van Dam and K. Langendoen. "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Nov. 2003.
- [3] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," SenSys'04, November, 2004,
- [4] J. Hill and D. Culler. "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks," IEEE Micro, 22(6): 12-24, November 2002.
- [5] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, August 2000.
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks," Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000.
- [7] M. Younis, M. Youssef and K. Arisha, "Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks", Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, October 2002.
- [8] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. F. Abdelzaher, "SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks," Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems, May 2003.
- [9] Y. Yao and J. E. Gehrke, "The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks," Sigmod Record, Volume 31, Number 3, September 2002.
- [10] "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)", IEEE Std 802.15.4-2003, IEEE Computer Society, 01 October 2003

● 저자 소개 ●



김 대 영

1990년 : 부산대학교 전산통계학과 졸업(학사)

1992년 : 부산대학교 대학원 전산통계학과 졸업(석사)

2001년 : University of Florida 컴퓨터공학과 졸업(박사)

1992~1997 : 한국전자통신연구원 연구원

1999~1999 : AlliedSignal Aerospace 연구소 방문 연구원

2001~2002 : Arizona State University 컴퓨터공학과 연구 조교수

2002~현재 : 한국정보통신대학교 조교수

관심분야 : Sensor Networks, Real-Time and Embedded Systems, Ad-Hoc Networks



도 윤 미

1989년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(학사)
1991년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
2003년 : University of Florida 컴퓨터공학과 졸업(박사)
1991년~1997년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
2001년~2003년 : Arizona State University 컴퓨터공학과 방문 연구원
2003년~2004년 : 한국정보통신대학교 연구교수
2004년~현재 : 한국전자통신연구원 텔레매틱스연구단 RFID/USN연구팀
관심분야 : RFID, Sensor Networks, Power Aware and Low Power Computing, Real-Time and Embedded Systems, Ad-Hoc Networks



서 창 우

1993년 : 울산대학교 전자 및 전산기공학과 졸업(학사)
1995년 : 울산대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2004년~현재 : 한국정보통신대학교 대학원 공학부 박사과정
1995년~현재 : 삼성전자 중앙연구소, 삼성종합기술원 재직
관심분야 : 무선 통신 MAC 기술, 4세대 이동 통신



박 노 성

2003년 : 숭실대학교 컴퓨터학과 졸업(학사)
2003년~현재 : 한국정보통신대학교 대학원 공학부 석사과정
관심분야 : Sensor Networks, Real-Time and Embedded Systems, Ad-Hoc Networks



유 성 은

2003년 : 한양대학교 전자전기공학과 졸업(학사)
1999년~2002년 : (주) 파인디지털 근무
2003년~현재 : 한국정보통신대학교 대학원 공학부 석사과정
관심분야 : Sensor Network Protocols, WPAN, Real-Time Scheduling