

무선 센서 네트워크에서 센싱 정밀도에 기반 한 그룹화 통신 프로토콜

준회원 정순규*, 이파원**, 정회원 유상조*

A Sensing Resolution-based Grouping Communication Protocol for Wireless Sensor Networks

Soon-Gyu Jeong*, Poyuan Li** Associate Members, Sang-Jo Yoo* Regular Member

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 센싱 정밀도에 기반 한 그룹화 통신 프로토콜 (SRG)을 제안한다. SRG는 센서 노드가 밀집해 있는 네트워크에서 응용계층이 요구하는 센싱 정밀도를 만족시키는 방법을 제공하는데, 그룹 헤더 노드를 매 round 마다 라운드-로빈 방식으로 교체하여 전반적인 센싱 정밀도를 높이고 각 노드가 소모하는 에너지를 비슷하게 되도록 만든다. 또한 라우팅 시에 소모되는 에너지를 줄이기 위해 그룹의 크기와 에너지 소모를 고려한 중계 노드를 선택 방법 제안하여 에너지 효율적인 통신이 이뤄지도록 한다. 성능평가를 위한 모의 실험 결과 제안한 SRG 프로토콜은 센서노드들의 에너지 소비량을 줄이고 네트워크의 생존시간을 늘리는 것을 알 수 있다.

Key Words : WSN, Sensing resolution, Energy efficiency, Grouping, Network lifetime

ABSTRACT

In this paper, we propose a Sensing Resolution-based Grouping(SRG) protocol for wireless sensor networks. SRG is intended for meeting the application's sensing objectives, where sensor nodes are densely deployed and have the determinate accuracy requirement. The primary contribution of this paper is active group header node selection and round-robin procedure, which increase the sensing accuracy and evenly distribute the node energy consumption. The second contribution is use of energy efficient intermediate node selection by considering group size and energy consumption. We present the design principle of SRG and provide simulation results.

I. 서론

무선 센서 네트워크(wireless sensor networks)는 다양한 목적의 응용으로 사용할 수 있는데, 특히 군사목적의 응용에서는 통신망의 급격한 변화에 강해야 하며 수많은 센서 노드들이 자율적인 연결과정을 통해 통신망을 빠르게 구성할 수 있어야 한다^[1]. 일

반적인 경우에 센서 네트워크에 참여하는 노드는 제한된 전력을 가지는 휴대용 배터리를 이용하여 통신을 하기 때문에 언젠가는 배터리를 전부 소모해서 더 이상 동작하지 않는 상황이 생길 수가 있다. 하지만 넓은 지역에 많은 수의 센서 노드가 배치된 센서 네트워크에서 센서 노드의 배터리를 일일이 교체해주는 것은 사실상 불가능한 일이기 때

※본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2005-C1090-0502-0030)

* 인하대학교 정보통신대학원 멀티미디어통신망 연구실 (na@sgyu.com, sjyoo@inha.ac.kr)

** Chongqing University of Posts and Telecommunications (li_py@hotmail.com)

논문번호 : KICS2006-01-038, 접수일자 : 2006년 1월 20일

문에 노드가 동작하는 시간을 늘리기 위해서는 각 노드가 소모하는 전력을 최소한으로 줄일 수 있는 방법이 필요하다. 또한 배터리를 전부 소모하거나 예기치 못한 상황으로 인해 노드가 더 이상 동작하지 못할 수도 있다. 이런 경우, 해당 노드가 위치한 곳의 정보는 더 이상 알 수 없게 되고 해당 노드를 통해 다른 노드와 통신을 하던 노드마저 통신하기 위한 통로를 잃게 된다. 따라서 이러한 상황에 대처해서 네트워크의 안정성을 높이는 방법이 필요하다.

SMAC^[2]은 각 노드의 에너지 소모를 줄이기 위한 방법으로 일정한 주기로 sleep 상태와 wakeup 상태를 반복하는 방식이다. sleep 상태의 시간과 wakeup 상태의 시간이 일정하게 고정된 듀티 사이클(duty cycle)을 사용하면 트래픽양이 많아질 때 지연시간이 길어지고, 트래픽양이 적어질 때 에너지 소모가 많아지는 등 트래픽양이 변화하는 상황에 유연하게 대처하지 못해 성능저하가 일어난다. TMAC^[3]에서는 듀티 사이클이 고정돼서 생기는 불필요한 에너지 소모를 줄이는 방법으로 지정된 시간 TA 동안에 CTS를 받지 못하면 sleep 상태로 들어가게 하였다.

TDMA와 CDMA를 혼합하여 사용하는 MAC 프로토콜인 LEACH^[6, 7]는 전체 네트워크를 서로 겹치지 않게 클러스터(cluster)로 나누고 클러스터간의 간섭을 없애기 위해서 각 클러스터는 각기 다른 CDMA 코드를 사용하여 통신을 한다. 클러스터에 속한 노드는 TDMA 방식을 사용해서 클러스터 헤더와 통신을 하고, 클러스터 헤더는 각 노드에게서 받은 데이터를 종합해서 싱크 노드에게 전송한다. 이후 일정시간이 지나면 클러스터 헤더를 새롭게 선정할 수 있는 방법을 제공해서 각 노드가 소모하는 에너지가 일정하게 되도록 만든다.

Muqattash와 Krunz는 무선 에드 혹 망에서 CDMA 방식을 사용할 경우에 큰 문제가 되는 near-far problem을 해결하기 위해 RTS와 CTS를 overhearing하여 채널 이득을 계산해서 주변 노드에게 간섭을 일으키지 않도록 송신 전력을 조정해서 사용하는 MAC 프로토콜을 제안하였다^[8].

다수의 노드가 지정된 영역에 임의로 배치되는 센서 네트워크에서는 노드의 밀집도가 지역에 따라 다를 수가 있다. 또한 이동하는 노드, 새롭게 배치된 노드, 갑자기 동작하지 못하는 노드로 인해 노드 밀집도의 변화가 생길 수 있기 때문에 전체네트워크에서의 밀집도는 일정하지 않을 것이다. 또한 응용계층이 요구하는 정보의 종류에 따라 비교적 넓

은 지역에서의 센싱 정보가 비슷한 값일 수도 있다. 예를 들어 네트워크에 참여하는 노드가 주기적으로 온도를 측정해서 싱크 노드에게 보내는 상황을 고려해보면 온도는 일정한 지역에서 거의 동일한 값을 나타내기 때문에 인접한 위치에 있는 노드의 온도 측정값이 거의 동일할 것이다. 이때 모든 노드가 동일한 데이터를 싱크 노드에게 송신하면 불필요한 전송으로 인한 에너지 소모와 각 노드 간에 간섭, 지연 등이 발생해서 전반적인 네트워크의 성능을 떨어뜨리게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 CSMAC^[9]은 응용계층이 요구하는 센싱 정밀도를 유지하면서 전력 소모를 줄이는 방법으로 중복된 노드의 전원을 차단하는 것을 제안하였고, 응용계층이 요구하는 센싱 정밀도를 Sensing Resolution(SR)으로 나타내었다.

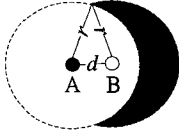
본 논문에서 제안하는 SRG 프로토콜은 에너지 소모를 줄이기 위해 센싱 정밀도에 기반 하여 인접한 노드들을 그룹으로 만들어서 한 노드만이 그룹을 대표해서 동작한다. 그리고 싱크 노드에게 센싱 데이터를 전송할 때 소모되는 에너지를 줄이기 위해 싱크 노드가 전송 반경 안에 있더라도 중계 노드를 이용하여 에너지 효율적인 데이터 전송을 할 수 있는 방법을 제시한다. 따라서 각 노드의 배터리 잔량이 비슷하도록 유지시킬 수 있고, 결과적으로 전체 네트워크의 지속시간은 길어진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 중복된 노드와 센싱 정밀도에 대한 설명을 하고, III장에서는 제안하는 SRG 프로토콜의 전체 동작과정을 설명한다. IV에서는 모의실험을 통해 제안하는 프로토콜의 성능을 분석하며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 중복된 노드

전형적인 무선 센서 네트워크는 응용계층의 요구에 따라 저가격의 수많은 센서 노드들이 서로 협력하여 넓은 영역을 커버하는 방식으로 이뤄진다. 그림 1에서 센싱 정밀도에 따라 한 노드가 커버하는 영역을 SR 영역이라 하면, 서로 인접한 노드들의 SR 영역이 겹칠 때 한 노드를 제외한 다른 중복된 노드의 전원을 차단해서 불필요한 전력소모를 줄일 수 있다. 또한 이렇게 전원이 차단된 노드는 차후에 전원을 켜서 다시 이용할 수 있기 때문에 전체 네트워크의 지속시간을 늘릴 수 있다.

d는 노드 A와 노드 B 사이의 거리이고, 노드 A



● Active node ○ Inactive node

그림 1. SR 영역에 따른 중복된 노드

와 노드 B가 서로의 SR 영역에 포함되어야 중복된 노드 관계가 성립하기 때문에 d는 한 노드의 SR 영역을 나타내는 반지름 r보다 작아야 한다. 여기서 SR은 센서의 물리적인 정밀도를 나타내지는 않는다. 일정 지역에서 비슷한 물리적 값을 나타내는 온도와 같은 경우에는 r을 크게 하여(SR을 낮추어) SR 영역을 확대할 수 있고, 반면에 건물내부에서의 화재감시와 같은 응용에서는 응용계층이 요구하는 정밀도를 충족시키기 위해 r을 적절한 수준까지 낮추어야 한다. 중복된 SR 영역을 가지는 노드들 중에서 한 노드만이 동작하기 때문에 노드 B는 전원을 차단하여 대기하다가 노드 A의 배터리 잔량이 특정한 값 이하가 될 때 노드 A를 대신하여 동작하는 백업 노드의 역할을 한다. 따라서 노드 A만 동작하는 시기에는 노드 A의 SR 영역과 겹치지 않는 노드 B의 SR 영역인 음영부분은 센싱할 수가 없어 센싱 정밀도가 응용계층이 요구하는 것보다 낮아진다. 그리고 노드 B가 동작하는 시기에는 노드 A가 더 이상 동작하지 않기 때문에 노드 A만 동작할 때와 마찬가지로 센싱 정밀도의 하락이 발생한다.

센싱 정밀도가 낮아지는 것을 그림 1과 같은 간단한 경우를 예를 들어 정리하면 식 (1), (2), (3)과 같다. 음영부분의 비율은 식 (3)을 이용하면 구할 수 있다.

$$\pi r^2 - 4 \times \left(\frac{\arccos\left(\frac{d}{2r} \times \pi r^2\right)}{2\pi} + \frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right) - 2 \times \left(\frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right) \quad (1)$$

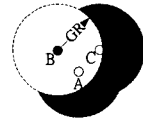
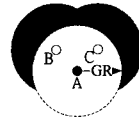
SR 영역(πr^2)에 대한 비율은,

$$1 - \frac{4}{\pi r^2} \times \left(\frac{\arccos\left(\frac{d}{2r} \times \pi r^2\right)}{2\pi} + \frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right) - \frac{2}{\pi r^2} \times \left(\frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right) \quad (2)$$

정리하면

$$1 - \left(\frac{\arccos\left(\frac{d}{2r}\right)}{\pi/2} + \frac{d \times \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}}}{\pi r^2} \right) \quad (3)$$

예를 들어 r이 2m이고 d가 1m이면 전체영역에서 음영부분이 차지하는 비율이 31.41%이다. 노드 사이의 거리가 멀어지면(d가 커지면) SR 영역이 중복되는 부분의 넓이가 줄어들기 때문에 음영부분의 비율은 계속 증가하여 센싱 정밀도는 계속 낮아지게 된다. d와 r이 같아지면 음영부분의 비율은 60.89%까지 증가하고 d가 r보다 커지면 두 노드는 더 이상 중복된 노드 관계가 아니다. 따라서 노드들이 밀집해 있거나 SR 영역이 넓어서 노드 간에 중복된 노드가 많이 존재한다면 에너지 소모는 많이 줄일 수 있지만 센싱 정밀도는 더 떨어지게 된다.



● Active node ○ Inactive node ● Active node ○ Inactive node

(a)

(b)

그림 2. 센싱 정밀도에 따른 GR

센싱 정밀도가 떨어지는 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 응용계층이 요구하는 센싱 정밀도 SR에 기초를 두는 Group Radius(GR)를 정의하고 동일한 GR 영역에 포함된 노드는 그룹을 이루도록 한다. 또한 한 그룹 안에서는 하나의 노드만이 동작하게 하고 다른 노드의 전원은 차단하여 전력소모를 줄이도록 한다. 그리고 한 노드가 동작하여 센싱을 하는 시기를 round 라 정의하고 그림 2와 같이 매 round 마다 그룹에서 동작하는 노드를 바꿔서 자신의 GR 영역을 센싱하게 한다. 이와 같은 과정을 통해, 특정 노드가 긴 시간 동안 자신의 GR 영역만을 센싱해서 다른 노드가 센싱하는 GR 영역의 정보를 알지 못해 발생하는 센싱 정밀도가 떨어지는 문제를 어느 정도 해결하도록 한다. 그리고 그룹화를 통해 각 노드의 배터리 잔량이 비슷해지도록 만들어서 특정 노드가 배터리를 다 소모해서 해당 노드의 SR 영역은 영원히 센싱하지 못해 센싱 정밀도가 떨어지는 문제를 해결할 수 있다. 그룹화 동작에 관한 자세한 설명은 III장에서 계속된다.

III. SRG 프로토콜

본 논문에서 제안하는 SRG 프로토콜은 다음과 같은 상황에서 효율적인 통신 방법을 제공하는 것을 목표로 한다. 1) 네트워크에 입방미터 당 20개 정도의 노드가 밀집되어 있어서 중복된 노드가 많이 생길 수 있다^[10]. 따라서 채널을 공유하는 노드 사이에서 간섭이 일어날 확률이 높아지며, 이러한 간섭은 통신망의 성능을 저하시키고 각 노드의 전력소모를 증가시킨다. 2) 네트워크에 중복된 노드가 많이 존재하는 경우 중복된 노드의 전원을 차단해서 많은 수의 노드가 밀집되어 있는 상황을 해결할 수 있는데^[9], 이때 센싱 정밀도가 줄어드는 상황이 발생할 수 있다. 3) 각 노드는 센싱 데이터를 일정한 주기로 싱크(sink) 노드에게 전송한다.

프로토콜의 동작방식에 대한 설명에 앞서 SRG 프로토콜에서 가정하는 세 가지 상황을 설명한다. 1) 네트워크에 참여하는 노드들은 이동성이 없다. 2) 각 노드는 송신전력을 조정하여 통신 환경을 조정할 수 있다. 3) 각 그룹은 각자 다른 PN code를 가지는 DS-CDMA 방식으로 통신을 수행해서 각 그룹 사이에서의 간섭은 발생하지 않는다.

SRG 프로토콜의 동작 흐름은 그림 3과 같고, group setup이 완료된 뒤에 round work가 계속 반복된다.

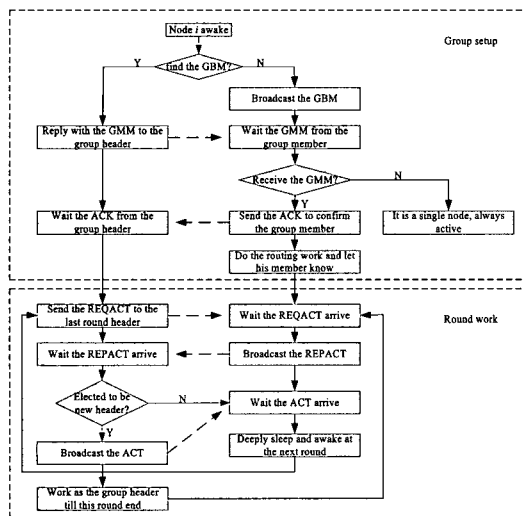


그림 3. SRG 프로토콜의 전체 흐름도

3.1 그룹 설정

일정 지역에 센서 노드가 무작위로 설치된 후 임의의 시간이 지나 노드의 전원이 켜지면 해당 노드

는 그룹 설정(group setup) 동작을 수행해야 한다. 전원이 켜진 노드는 T_{sense} 동안 브로드캐스트 채널(broadcast channel)을 감지해서 인접해 있는 노드가 Group Broadcast Message(GBM)를 송신하고 있는지를 파악한다. 만약 T_{sense} 동안에 GBM을 수신하지 못하면 인접한 노드 중에 먼저 전원이 켜져서 동작하고 있는 노드가 없는 것으로 판단해서 이 노드는 GBM을 송신하는 Group Header(GH)가 되고, GBM의 송신 전력은 응용계층에서 목표하는 센싱 정밀도를 만족시키는 영역 정도만을 커버할 수 있게 조정해서 불필요한 에너지 소모와 노드간의 간섭을 줄이도록 한다. GH는 자신의 GR 영역 안에 있는 노드를 그룹에 참여시켜서 그룹을 설정하는 역할을 하고, 그룹에 참여하는 노드는 Group Member(GM)라고 정의한다.

GH는 T_{setup} 시간 동안 GBM을 주기적으로 송신하여 자신의 GR 영역 안에 있는 노드들이 Group Member Message(GMM)을 송신하기를 기다린다. 다른 노드가 전원이 켜져서 동작할 때 GBM을 수신할 수 있다면 인접한 지역에 GH가 있다는 것을 파악할 수 있다. 따라서 이 노드는 GM가 되며 해당그룹에 참여하기 위해 GH에게 GMM을 송신한다. GM가 GBM을 수신해서 GMM으로 응답하기 위해 대기하고 있는 중에 다른 GH가 보낸 GBM을 수신하면 둘 중에 수신 신호 전력의 세기가 높은 GH를 선택해서 해당 노드에게 GMM을 송신한다. 그룹 설정 단계에서는 모든 노드가 일정한 송신 전력을 가지는데, 각기 다른 노드가 보낸 신호의 전력 세기가 한 노드에서 다르게 나타난다는 것은 노드 사이의 거리의 차이나 채널환경의 변화 때문이라고 생각할 수 있다. 여기서 채널환경의 변화는 무시할 수 있다고 가정하면 수신 신호 전력의 세기차이는 거리에 의해 생긴다고 여길 수 있는데, 수신 신호의 세기가 더 큰 쪽의 GH를 선택하면 두 노드사이의 거리는 더 가까워서 GR 영역이 겹치는 부분이 더 많아질 수 있다. 따라서 센싱 정밀도의 저하를 막을 수 있고, GH와 GM은 서로 더 낮은 전력으로도 통신할 수 있기 때문에 전력 소모도 줄일 수 있다.

그림 4는 그룹 설정 동작의 예를 나타낸다. 노드 A와 B 사이의 거리가 GR보다 작아서 서로 통신할 수 있는 거리에 있다면, 먼저 깨어난 노드 A는 T_{sense} 기간 중에 GBM을 수신하지 못해 자신이 GH가 된다. 그리고 T_{setup} 기간을 GBM 송신구간(T)과 GMM 수신구간(R)의 쌍으로 나눠서 사용하는데, 노드 B가 노드 A보다 늦게 깨어나서 캐리어를 센

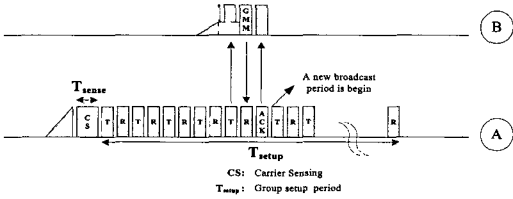


그림 4. 그룹 설정

상(CS)하는 중에 노드 A가 보낸 GBM을 수신하면 노드 B는 GM이 되고, 노드 A의 그룹에 참여하기 위해 노드 A에게 GMM을 보낸다. GMM을 수신한 노드 A는 노드 B를 Group List(GL)에 추가하고 ACK를 보내서 노드 B가 노드 A의 그룹에 포함되었음을 알린다. GH는 T_{setup} 기간이 끝날 때까지 앞의 동작을 계속 반복 수행 하면서 그룹에 참여하기를 원하는 노드가 있으면 해당노드를 그룹에 포함시킨다.

T_{setup} 기간 동안에 GMM을 받지 못한 노드는 주변에 중복된 노드가 없다고 파악할 수 있다. 따라서 이 노드는 Single Node(SN)가 되고, 해당 영역에 홀로 있기 때문에 전원을 켜 상태로 항상 동작해야 한다. 그리고 한 그룹에서는 GH만 동작하기 때문에 GM는 트랜시버와 센서장치들의 전원을 차단한 상태에서 지정된 시간에 깨어나기 위한 최소한의 회로에만 전원을 공급하는 sleep 상태에 들어가서 전력 소모를 줄일 수 있도록 한다.

3.2 그룹 헤더 변경

한 노드가 GH로 선택돼서 동작할 때 이 노드를 계속 GH로 사용한다면 다른 노드의 배터리는 가득 차 있는데 해당 노드만 배터리를 전부 소모해서 더 이상 동작하지 못하는 상황이 생길 것이다. 이런 상황을 피하기 위해 SRG에서는 매 round 가 끝날 때마다 그룹 헤더 선출기간을 두어 이 기간에 GH를 변경해서 각 노드별 에너지 소모를 일정하게 만드는 방법을 제공한다.

그룹 헤더 선출기간에 GH는 GM들이 깨어나기를 기다리고, GM들이 깨어나면 GH에게 CSMA/CA 방법으로 Request to Active(REQACT) 메시지를 보낸다. REQACT에는 해당 노드가 지금까지 GH로 선택된 횟수 n 과 배터리 잔량을 나타내는 E_{remain} 을 포함하여 다음 round 의 GH를 선출하기 위한 인자로 사용한다. 충분한 시간이 지나서 모든 GM가 GH에게 REQACT를 보내면 GH는 취합한 REQACT의 정보를 이용하여 다음 round 에서의 GH를 선출하는데, 먼저 GH로 선택된 횟수가 가장

```

GM = { m }
Each member node m has its counter m ( n )
m* = arg min [ m ( n ) ]
Compare m ( n ) in the all received REQACT
If ( m* is unique )
    Next round header = m*
Else
    Compare E_remain of the nodes that have the same min [ m ( n ) ]
    m** = arg max [ E_remain ( m* ) ]
    Next round header = m**
    
```

그림 5. 그룹 헤더 선출 알고리즘

작은(n 이 가장 작은) GM를 GH로 선출한다. 만약에 같은 n 을 가지는 노드가 존재한다면 에너지 잔량 E_{remain} 이 가장 큰 노드가 GH로 선출되도록 하며 선출된 GH 정보를 Reply to Active(REPACT) 메시지에 포함하여 브로드캐스트 한다. 그림 5는 본 논문에서 제안하는 그룹 헤더 선출 알고리즘을 나타낸다.

만약 GH가 그룹 헤더 선출기간동안 REQACT를 받지 못하면 GM들이 어떤 이유에 의해서 동작하지 못하거나 채널 환경의 불안정으로 인해서 REQACT가 올바르게 전달하지 못하는 상황이라고 판단해서 현재 round의 GH가 다음 round 에서도 계속 GH로 동작한다. 이와 비슷하게 GH가 예기치 못한 상황 때문에 동작을 멈추거나 REPACT를 올바르게 전달하지 못해서 GM가 REQACT를 전송하고도 REPACT를 수신하지 못하는 경우라면, 이런 상황이 미리 정의한 round 횟수 보다 커지면 인접한 영역에 참여할 수 있는 다른 그룹이 있는지 찾아보고 없으면 자신이 GH가 된다.

다음 round의 GH로 선출된 노드는 현재 round의 GH에게서 REPACT를 받으면 Active(ACT) 메시지를 브로드캐스트해서 자신이 GH로 선출되었다는 사실을 다른 GM에게 알린다. REPACT를 수신한 노드는 어떤 노드가 GH로 선출되었는지 알 수 있기 때문에 GH가 아닌 노드는 에너지 소모를 줄이기 위해 다음 round 에서 sleep 상태로 들어간다. REPACT를 수신했으나 ACT는 수신하지 못한 노드는 다음 round의 GH의 통신 반경에 해당 노드가 포함되지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음 round 의 그룹 헤더 선출기간에 GH는 해당 노드가 보낸 REQACT를 받지 못해 해당 노드는 GH가 될 수 있는 기회를 놓치게 된다. 특정 노드가 GH로 선택되지 못하는 기간이 길어지는 것을 막기 위해

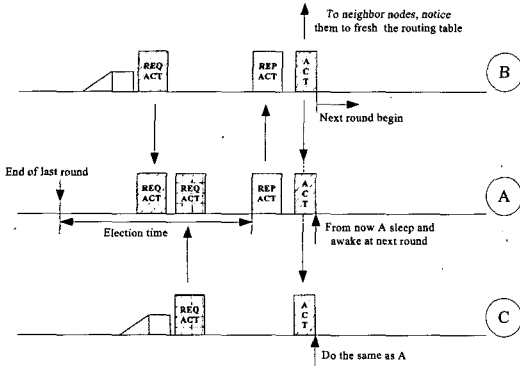


그림 6. 그룹 헤더 변경

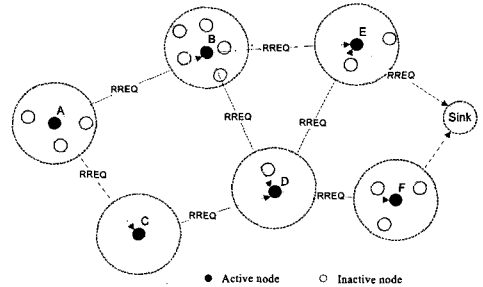
이런 상황이 미리 정의한 횟수보다 많이 발생하면 주위에 참여할 수 있는 다른 그룹이 있는지 찾아보고 없으면 자신이 GH가 되도록 한다. 그림 6은 그룹 헤더 변경 동작의 예를 나타낸다.

3.3 에너지 효율적인 패킷 중계를 위한 중계 노드 선택방법

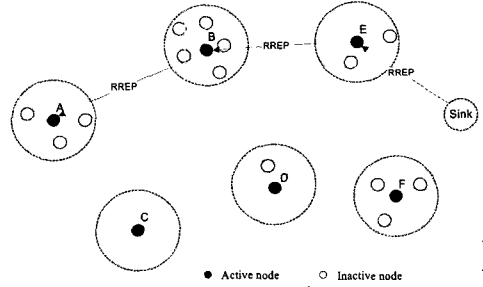
무선 통신에서 두 노드사이의 거리가 d 만큼 떨어져 있을 때 전송 시에 소모되는 에너지는 dk 에 비례한다. 여기서 k 는 path loss이며 2에서 6사이의 값으로 사용되고, 두 노드사이의 거리가 멀어짐에 따라 통신에 소요되는 에너지는 지수 비례로 증가하기 때문에 두 노드 사이에 있는 노드를 중계노드로 사용해서 필요한 만큼의 전력만을 사용해서 패킷을 중계하면 직접 전송할 때보다 에너지 소모를 줄일 수 있다^[11, 12].

한 노드가 다른 노드에게 전송하기 위해서는 다른 노드에게까지 가는 경로를 설정해야 한다. AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing)^[14]와 같은 애드 호크 라우팅 프로토콜은 경로를 결정하기 위해 홉 수를 이용하고, MTE 라우팅^[6]은 여러 경로 중에서 소모되는 에너지가 최소인 경로를 선택한다. 하지만 홉 수나 최소 전송 에너지만을 고려해서 경로를 선택하면 전력소모가 특정 노드에게 집중될 수 있어 해당 노드의 배터리가 모두 소모되어 더 이상 동작하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 네트워크 분할 등이 일어날 수 있고 특정영역의 센싱 정밀도가 급격히 나빠지는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 그룹화 기법을 이용하여 전송 에너지를 줄이면서 에너지 소모는 각 노드에게로 분산시키는 최적 경로 설정 방법을 제안한다.

센싱한 데이터를 주기적으로 싱크 노드에게 송신



(a) RREQ 전송 경로



(b) RREP 전송 경로

그림 7. 에너지 효율적인 전송을 위한 최적 경로 설정 과정

하기 위해서는 각 노드에서 싱크 노드까지 가는 경로를 설정해야 한다. 그림 7-a에서 소스 노드 A가 싱크 노드에게 데이터를 송신하려고할 때 먼저 자신의 라우팅 테이블에 싱크 노드까지의 경로가 설정되어 있는지를 살펴본다. 경로가 설정되어 있지 않다면 노드 A는 경로를 설정하기 위해 Routing Request(RREQ) 메시지를 최대 송신 전력(P_{max})으로 브로드캐스팅 한다. RREQ 메시지를 받은 노드 (B, C)는 식 4의 방법으로 최소 송신 전력(P_{min})을 계산해서^[13] 라우팅 테이블에 저장한다. P_{min} 은 어떤 노드가 송신한 신호가 수신 노드에서 정상적으로 받아들여지기 위한 송신전력의 최소 한계 값을 말한다. 그리고 P_r 은 수신 노드가 수신한 신호의 전력 세기이고, R_{thresh} 는 수신 노드에서 요구하는 E_b/N_0 를 만족시키기 위해 요구되는 수신 신호전력의 최소 한계 값이다.

$$P_{min} = \frac{P_{max}}{P_r} \times R_{thresh} \quad (4)$$

각 노드는 RREQ를 수신할 때마다 P_{min} 과 $P_{hop(i)}$ (식 5)을 계산한다. 여기서 i 는 소스 노드에서 현재 노드까지의 홉 수이고, $P_{min(i-1)}$ 은 현재 노드에게 패킷을 송신한 한 홉 거리에 있는 노드가 현재 노드에게 송신할 때 필요한 최소 전송 전력이

다. 그리고 $P_{\min(0)}$ 일 때는 소스 노드를 나타낸다. 매 round에 동작하는 노드는 GH와 SN이다. SN는 해당 노드가 배터리를 다 소모해서 동작하지 않을 때 대신 동작할 수 있는 백업 노드가 없기 때문에 백업 노드를 가질 수 있는 GH에 비해서 에너지 소모에 민감하다. 멤버가 많은 그룹의 헤더를 중계 노드로 사용하면 에너지 소모를 많은 노드에게 분산시킬 수 있기 때문에 $P_{\min(i-1)}$ 을 $N_{G(i)}$ 로 나눠서 해당 그룹에서 소모되는 에너지가 그룹의 멤버들에게 분산되는 것을 나타내도록 한다. 따라서 송신 에너지만 고려하는 MTE 라우팅과는 달리 그룹에 멤버가 많이 있어서 에너지 소모를 분산시킬 수 있는 경로를 선호하도록 만들 수 있다.

$$P_{hop(i)} = \frac{P_{\min(i-1)}}{N_{G(i)}}, i \geq 1 \quad (5)$$

RREQ에는 $P_{path-total}$, 지나온 노드, 홉 카운트를 포함해서 브로드 캐스팅 한다. 그리고 싱크 노드는 여러 경로를 통해 도착한 RREQ를 비교해서 $P_{path-total}$ 이 가장 작은 경로를 선택한다.

$$P_{path-total} = \sum_{i=1}^H P_{hop(i)} \quad (6)$$

그림 7-b와 같이 경로가 선택되었을 때 싱크 노드는 Routing Reply(RREP)에 선택한 경로와 노드 E가 싱크 노드에게 송신할 때 사용할 수 있는 최소 송신 전력(P_{\min})을 포함해서 보낸다. RREP를 받은 노드 E는 이전에 계산해서 저장해 두었던 P_{\min} 을 RREP에 포함해서 노드 B에게 보내고, 이러한 동작은 RREP가 노드 A에게 도착할 때까지 계속 된다. RREP가 노드 A에게 도착하면 이제 노드 A에서 싱크 노드까지 가는 경로가 만들어져서 노드 A는 데이터를 송신할 때 해당 경로를 이용할 수 있다.

IV. 모의실험

본 논문에서 제안하는 SRG 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 모의실험을 통해 MTE와 비교하였다. 노드 밀집도에 따른 성능 차이를 구하기 위해 ($x=100m, y=100m$) 영역에 100개의 노드와 150개의 노드를 임의로 배치해서 실험하였다. 그리고 싱크 노드는($x=50, x=175$)에 두었고, 응용계층에서 요구하는 바에 따라 달라지는 GR는 2m에서 7m 까지 1m씩 증가시키면서 실험하였다. 각 노드는 초기

에 2J의 에너지를 가지며 GH는 525 바이트의 패킷을 주기적으로 싱크 노드에게 송신하는 환경을 가정한다. 본 실험에서 사용한 라디오 모델은 [7]을 따르며 그림 8에 본 논문에서 사용한 에너지 소모 모델에 대한 하드웨어 구성 모델을 나타내었다.

표 1. 에너지 모델 파라미터

Parameter	Attribute	Values
E_{elec}	Electronics energy	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	Free space transmit amplifier	10 pJ/bit/ m ²
ϵ_{mp}	Multipath transmit amplifier	0.0013 pJ/bit/ m ⁴

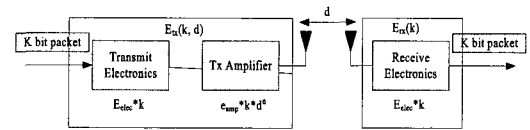


그림 8. 라디오 에너지 소모 모델

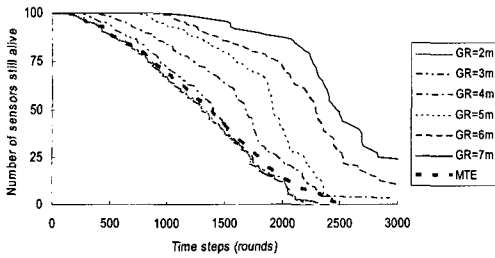
채널 모델(channel model)은 자유공간($\alpha = 2$)과 다중경로($\alpha = 4$) 페이딩(fading)을 고려한다. 노드간의 거리가 d_0 (본 실험에서는 $d_0=1m$)보다 미만이면 자유공간 모델(fs)을 이용하고, d_0 이상이면 다중경로 모델(mp)을 사용한다. 따라서 1-bit 메시지를 d만큼 떨어져 있는 노드에게 송신하는데 소요되는 에너지는 식 7로 정의하고, 수신하는데 소요되는 에너지는 식 8로 정의한다.

$$E_{TX}(l, d) = E_{TX-elec}(l) + E_{TX-amp}(l, d) \quad (7)$$

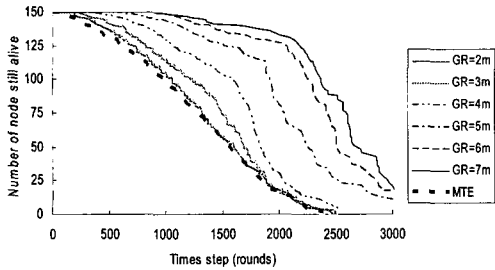
$$= \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0; \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0. \end{cases}$$

$$E_{RX}(l) = E_{RX-elec}(l) = lE_{elec} \quad (8)$$

그림 9는 GR와 노드 밀집도가 네트워크의 지속 시간에 어떤 영향을 미치는지를 보여준다. 노드 밀집도가 일정할 때 GR가 증가하면 GR 영역이 넓어지기 때문에 전체 그룹의 수는 감소하여 일정한 시간이 지났을 때 생존 노드의 수가 더 많아지고, 따라서 전체 네트워크의 지속시간은 증가한다. 하지만 GR가 2~3m 정도로 아주 작을 때는 그림 9에서 보는바와 같이 제안한 SRG 프로토콜의 성능이 MTE와 거의 비슷하게 나타난다. 이는 GR가 작으면 그룹에 포함된 노드의 수가 적어져서 그룹에 포함된 노드의 전원을 차단하여 에너지 소모를 줄이는

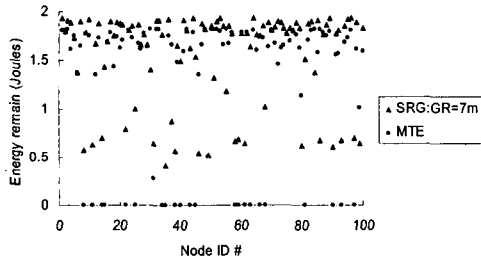


(a) 노드 100개

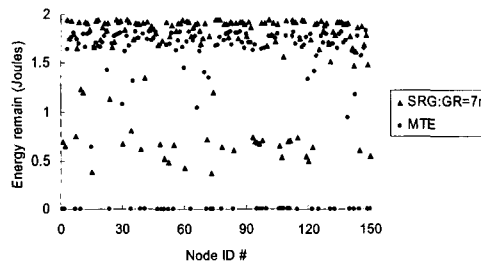


(b) 노드 150개

그림 9. GR의 변화에 따른 MTE와 SRG 프로토콜의 생존 노드 수 비교



(a) 노드 100개



(b) 노드 150개

그림 10. 800 round 후에 각 노드의 남은 에너지 양

SRG 프로토콜의 장점을 살릴 수 없기 때문이다. 따라서 노드의 밀집도를 높이거나 GR을 크게 하여 사용한다면 그룹 안에 포함된 노드의 수가 많아져서 SRG 프로토콜의 장점을 잘 이용할 수 있어 전체 시스템에서의 성능 향상을 기대할 수 있다.

SRG 프로토콜을 사용했을 때 각 노드가 소모하는 에너지가 비교적 일정하다는 것을 보여주기 위

해서 GR를 비교적 큰 값인 7m으로 하고, 800 round 가 지난 뒤에 각 노드의 남은 에너지를 측정 하였다. 그림 10은 실험한 결과를 나타내는데, SRG 프로토콜을 사용했을 때 MTE 라우팅을 사용했을 때 보다 각 노드에서 소모되는 에너지와 특정 노드가 에너지를 전부 다 사용해서 동작하지 않는 경우가 줄어들었음을 알 수 있다.

제안한 최적 경로 선택방법을 평가하기 위해서 다음의 세 가지 방법을 비교하였다.

- MTE: 그룹화 기법은 사용하지 않으며, 센싱한 데이터는 MTE 라우팅을 이용해서 싱크 노드에 전달한다.
- SRG with MTE: 제안한 그룹 헤더 선택방법을 사용하고, 그룹화 기법을 이용해서 매 round 마다 그룹 헤더를 바꾸는 방식으로 동작한다. 하지만 그룹 헤더 사이의 경로설정은 MTE 라우팅을 이용한다.
- SRG: 제안한 그룹 헤더 선택방법과 최적 경로 선택 방법을 사용한다.

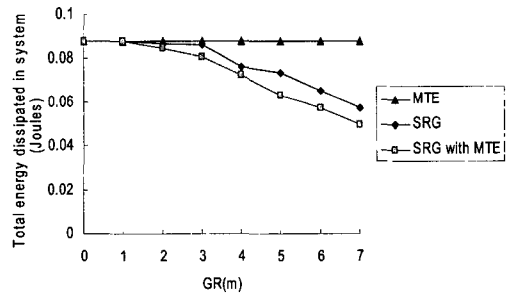


그림 11. MTE 라우팅, MTE 라우팅을 사용한 SRG, 원래의 SRG 프로토콜에서 GR의 변화에 따른 시스템에서의 전체 에너지 소모량

100개의 노드를 사용하여 세 가지 경우에 대한 시스템에서의 전체 에너지 소모량을 비교한 그림 11을 보면 MTE 라우팅을 사용한 SRG의 경우가 에너지 소모량이 가장 적고, MTE 라우팅은 GR가 증가해도 에너지 소모량의 변화가 없어서 세 가지 방법 중에서 가장 좋지 않은 결과를 보인다. SRG 프로토콜의 경우는 GR가 증가할수록 에너지 소모가 줄어들지만 MTE 라우팅을 사용한 SRG 보다는 조금 더 많은 에너지를 소모하는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 12에서 보는바와 같이 round 가 지남에 따라 생존해 있는 노드의 수는 SRG의 경우가 제일 많은 것을 알 수 있다.

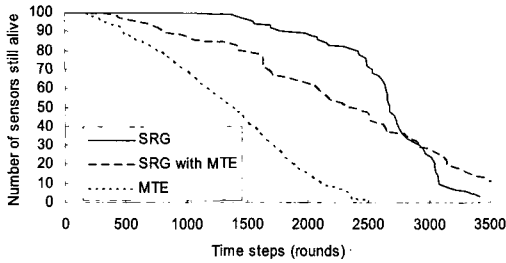


그림 12. MTE 라우팅, MTE 라우팅을 사용한 SRG, 원래의 SRG 프로토콜에서 GR이 7m일 때 전체 네트워크의 지속시간

그림 12는 각각의 방법에 따라 *round* 가 지나면서 생존해 있는 노드의 수를 나타낸다. 송신 전력이 최소인 경로를 찾는 방법인 MTE 라우팅은 그룹화 방법을 사용하지 않고 모든 노드가 항상 깨어있기 때문에 불필요한 에너지 소모가 많아져서 *round* 가 지날수록 생존 노드의 수가 꾸준히 줄어든다. 하지만 SRG 프로토콜을 사용하는 경우는 1500 *round* 까지는 거의 모든 노드가 생존해 있고 2500 *round* 가 지난 뒤부터 생존 노드의 수가 급격히 감소하는데, 이는 개별 노드가 소모하는 에너지가 비슷해서 비교적 긴 시간 동안 일정한 수의 노드가 생존해 있다가 비슷한 시기에 개별 노드의 배터리가 모두 소모되기 때문이다. 3000 *round* 근처에서 부터는 MTE 라우팅을 사용한 SRG 프로토콜의 생존노드 수가 더 많아지는데, 이는 그림 11에서 나타낸바와 같이 시스템에서의 전체 에너지 소모량은 MTE 라우팅을 사용한 SRG의 경우가 가장 적기 때문에 거의 모든 노드의 배터리가 소모되는 3000 *round* 이후에는 MTE 라우팅을 사용한 SRG 프로토콜의 생존노드의 수가 더 많아지게 된다.

V. 결론

무선 센서 네트워크의 프로토콜을 설계할 때 센싱 정밀도와 에너지 소모량, 그리고 전체 네트워크의 지속시간에 대한 고려를 하는 것은 중요하다. 따라서 SRG 프로토콜은 이런 점을 고려하여 설계하였고, 에너지 소비를 줄이기 위해 중복된 노드를 응용계층이 요구하는 센싱정밀도에 맞게 그룹화 시켜 중복된 노드를 sleep 상태로 만들어서 전반적인 에너지 소모를 줄일 수 있었다. 그리고 매 *round* 마다 라운드-로빈 방식으로 그룹 헤더를 변경해서 각 노드가 소모하는 에너지를 일정하게 하여 전체 네트워크의 지속시간을 길게 할 수 있었다. 센싱 데이

터를 싱크 노드에게 보낼 때 소모되는 에너지를 줄이는 방안으로 최적 라우팅 알고리즘을 제안하여 싱크 노드에게 직접 데이터를 보낼 때 보다 에너지 소모를 줄일 수 있었고, 각 노드가 소모하는 에너지의 양이 비슷하도록 만들 수 있었다.

모의실험 결과 본 논문에서 제안하는 방법을 통해 노드 밀집도가 높아지고 그룹 반경이 커질수록 한 그룹에 포함되는 노드가 더 많아져서 에너지 소모가 줄어드는 것을 알 수 있었고 MTE 라우팅과의 비교를 통해 기존의 방법과는 다르게 각 노드가 소모하는 에너지가 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] B. Ames, "Electronics are central to 21st century warfare tactics", *Military and Aerospace Electronics*, Jan. 2004.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE Proc. Infocom*, pp.1567-1576, June 2002.
- [3] T. V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *SenSys'03*, Los Angeles, pp.171-180, Nov. 2003.
- [4] G. Lu, B. Krishnamachari and C. Raghavendra, "An adaptive energy -efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks," in *proc. International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, pp.26-30, 2004.
- [5] A. Woo, and D. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," *ACM MobiCom 2001*, pp.221-235, 2001.
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," *Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences*, vol. 2 pp.10-19, Jan. 2000.
- [7] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application -Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless*

Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, October 2002.

- [8] A. Muqattash, M. Krunz, "CDMA-Based MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks", *Proceedings of MobiHoc'03*, pp. 153-164, 2003.
- [9] B.H. Liu, *et al.*, "A Self-Organizing, Location-Aware Media Access Control Protocol for DS-CDMA Sensor Networks", 1st IEEE Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor System, pp. 528-530, Oct. 2004.
- [10] Shih *et al.*, "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks," *Proc. ACM MobiCom '01*, pp. 272-286, July 2001.
- [11] M. Ettus, "System capacity, latency, and power consumption in multihop-routed SS-CDMA wireless networks," in *Proc. Radio and Wireless Conf.(RAWCON)*, Colorado Springs, CO, pp. 55-58, Aug. 1998.
- [12] Shepard, "A channel access scheme for large dense packet radio networks," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 219-230, Aug. 1996
- [13] T. A. ElBatt, S. V. Krishnamurthy, D. Connors, and S. Dao. "Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad-Hoc Networks." In IEEE International Conference on Communications, pp. 1506-1513, 2000.
- [14] C. E. Perkins, and E. M. Royer, "Ad hoc on-demand distance vector routing", *proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.90-100, Feb. 1999.

정 순 규 (Soon-Gyu Jeong)

준회원



2005년 2월 인하대학교 컴퓨터 공학과(공학사)
2005년 2월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
<관심분야> WSN, WPA, RFID

이 파 원 (Poyuan Li)

준회원



2005년 2월 Chongqing University of Posts and Telecommunications(공학사)
2005년 2월~현재 Chongqing University of Posts and Telecommunications 석사과정
<관심분야> WSN

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)

정회원



1988년 2월 한양대학교 전자통신학과(공학사)
1990년 2월 한국과학기술원 전 기및전자공학과(공학석사)
2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
1990년 3월~2001년 2월 KT 연

구개발본부

2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수
<관심분야> 인터넷 QoS, 초고속 통신망 구조, 멀티미디어 네트워킹, 트래픽 엔지니어링