

무선센서 네트워크를 위한 LEACH 프로토콜의 에너지 효율 향상 방안

정회원 이상훈*, 석정봉**

Improvement of Energy Efficiency of LEACH Protocol for Wireless Sensor Networks

Sang-Hoon Lee*, Jung-Bong Suk** *Regular Members*

요 약

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 무선센서 네트워크의 가장 중요한 요구사항인 에너지 소비를 최소화하기 위해 제안된 대표적인 계층 기반 구조를 갖는 프로토콜이다. LEACH 프로토콜을 사용하는 센서 네트워크는 여러 클러스터로 구성되며, 각 클러스터는 데이터를 감지하는 멤버 노드와 멤버 노드로부터 전송된 데이터를 수집하여 기간망과 연동된 싱크 노드에게 전달하는 헤드 노드로 구성된다. LEACH의 헤드 노드는 멤버 노드의 전송 데이터 보유 유무에 관계없이 TDMA 슬롯을 할당함으로써 헤드 노드가 라운드 전 기간에 활성 모드로 동작하는 비효율성을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 송신 데이터를 보유하고 있는 노드에게만 슬롯을 할당함으로써 LEACH의 에너지 사용 효율을 향상시키는 방안을 제안한다. 제안 방식의 성능 확인을 위한 ns-2 시뮬레이터 기반의 모의실험 결과, 제안 방식이 기존 LEACH 방식과 비교하여 시간 경과에 따른 생존 노드 수 및 노드의 에너지 소비량 측면에서 LEACH 보다 우수함을 확인하였다.

Key Words : Wireless sensor network, LEACH, Energy efficiency, Ns-2 simulation

ABSTRACT

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) has been proposed as a routing protocol with a hierarchical structure, in order to achieve the energy efficiency that is of primary importance in the wireless sensor networks. A wireless sensor network adopting LEACH is composed of a few clusters, each of which consists of member nodes that sense the data, and head nodes that deliver the collected data from member nodes to a sink node that is connected to a backbone network. A head node in a cluster allocates TDMA slots to its member nodes without taking into account whether they have data to transmit or not, thus resulting in inefficiency of energy usage of head node that remains in active mode during the entire round time. This motivates us to propose a scheme to improve the energy efficiency of LEACH, by assigning TDMA slots only to those member nodes who have data to send. As a result, the head node can remain sleep during the period of no data transmission from member nodes, leading to the substantial energy saving. By using the ns-2 simulator, we evaluate the performance of the proposed scheme in comparison with the original LEACH. Experimental results validate our scheme, showing a better performance than original LEACH in terms of the number of outliving nodes and the quantity of energy consumption as time evolves.

* 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 정보통신망연구실 (sanghuni79@hanmail.net) **좌동 (jbsuk@yonsei.ac.kr)
논문번호 : KICS2008-01-016, 접수일자 : 2008년 1월 8일, 최종논문접수일자 : 2008년 2월 10일

I. 서론

최근 무선통신 기술, 센서 및 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술, 저 전력 RF 설계 기술의 발달로 무선 센서 네트워크가 등장하고 있다^[1]. 무선 센서네트워크는 기존의 인프라 기반 네트워크 또는 ad hoc 네트워크와 달리, 제한된 에너지 및 하드웨어 성능 때문에 배터리, 메모리 및 프로세서 등 모든 자원을 효율적으로 사용하여야 하며, 이를 위해 관련 통신 프로토콜도 저전력 소모를 달성할 수 있도록 설계 구현되어야 한다.

일반적으로 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜은 네트워크 구조에 의해 크게 평면 기반 라우팅(flat based routing), 위치 기반 라우팅(location based routing) 그리고 계층 기반 라우팅(hierarchical based routing) 기법으로 나눌 수 있다^[2]. 복잡한 라우팅과 높은 지연, 노드간의 에너지 불균형 등의 문제점 때문에 최근에는 노드간의 계층을 구별하여 데이터 병합이후 상위 계층의 노드를 통해 싱크 노드로 전송하는 계층 기반 라우팅 방안이 많이 연구되고 있으며, LEACH^[3] 프로토콜이 대표적이다.

LEACH 프로토콜을 사용하는 센서 네트워크는 여러 개의 클러스터로 구성되며, 각 클러스터 내에는 그림 1과 같이 클러스터 헤드라는 상위 계층의 노드와 일반 멤버 노드로 구성된다.

LEACH은 네트워크 노드간의 에너지 소모를 균등하게 하기 위해서 확률 기반으로 노드 간 균등한 횟수로 클러스터 헤드를 선정한다. 클러스터 헤드는 멤버 노드에게 TDMA 스케줄을 작성하여 알려주고, 멤버 노드들의 데이터를 수신 받아 데이터 병합 후 싱크 노드에 전송하는 역할을 수행하며, 멤버 노드들은 클러스터 형성 후 단순히 자신의 타임 슬롯 동안에 감지된 데이터를 클러스터 헤드에게 전송하는 역할만을 한다. 클러스터 헤드와 싱크 노드 간의

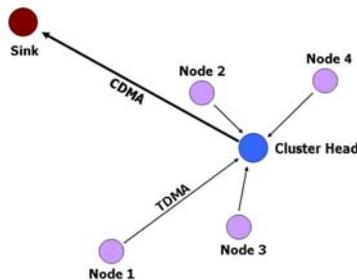


그림 1. LEACH 프로토콜의 클러스터 구조
Fig. 1 Cluster structure of LEACH protocol

데이터 송수신은 CDMA 방식으로 중간 노드 중계 없이 직접적으로 이루어진다. 또한 데이터 병합을 통한 전송 방법은 전송 데이터 수와 전송 에너지를 감소시켜 네트워크의 수명을 증가시키며, 클러스터 헤드를 주기적으로 교체함으로써 특정 노드에게 많은 부하가 집중되는 것을 방지하고 모든 노드에서 균등한 에너지 소모가 이루어지도록 설계되어 있다.

LEACH 프로토콜은 위와 같이 센서 네트워크의 가장 중요 목표인 저전력 소모를 위해 설계되었음에도 불구하고, TDMA 스케줄링을 수행하는 라운드 내 프레임마다 전송 데이터가 없는 노드를 포함한 모든 노드에게 타임 슬롯을 할당하고, 헤드 노드는 주어진 라운드가 끝날 때까지 활성화 상태로 남아 있게 된다. 따라서, 전송 데이터가 있는 노드에게만 타임 슬롯을 배정하여 헤드 노드가 활성화(active)화되는 시간을 줄이고 남은 시간은 휴지(sleep) 모드로 동작하도록 함으로서, 헤드 노드와 싱크 노드간의 통신으로 인한 에너지 소모를 줄여 각 노드의 에너지 사용 효율을 향상시키고자 하는 것이 본 논문의 동기이다.

II. 관련연구

2.1 클러스터 헤드 결정 알고리즘

LEACH는 네트워크상에 있는 노드간의 에너지 소모를 균등하게 하기 위해 클러스터 헤드(CH)를 확률 기반으로 랜덤하게 교체한다. 각 노드는 각 라운드 시작 시점에 $P_i(t)$ 라는 확률 값으로 자신이 헤드 노드로 동작할 것인지를 결정하게 되는데, $P_i(t)$ 값은 각 라운드의 클러스터 헤드 수 k , 즉 클러스터 수에 근거하여 전체 네트워크 노드 수가 N 인 경우 식 (1)과 같이 주어진다^[3]. 모든 노드가 같은 횟수만큼 클러스터 헤드가 되는 것을 보장하기 위해서는 각 노드가 평균적으로 N/k 마다 한 번씩 클러스터 헤드로 선정이 되어야 한다.

$$E[\text{헤드 노드 수}] = \sum_{i=1}^N P_i(t) * 1 = k \quad (1)$$

LEACH 프로토콜에서의 클러스터 선출과정에서, 각 노드는 식 (2)에 따라 스스로 클러스터 헤드로 선정될 확률을 구한다. 여기서 $C_i(t)$ 는 지시함수로서 최근 $r \bmod (N/k)$ 라운드 동안 해당 노드가 클러스터 헤드였다면 0이고, 아니면 1이다. 즉, 최근 $r \bmod (N/k)$ 라운드 동안 헤드를 한 번이라도 했다

면 다시 뽑힐 확률은 없는 것이다.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k(r \bmod \frac{N}{k})} & : C_i(t) = 1 \\ 0 & : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 i 는 노드의 식별자, t 는 시각, N 은 전체 노드의 수, k 는 클러스터의 수 (k 는 시스템 파라미터), r 은 라운드를 나타낸다. 한 라운드 중에 임의의 노드가 헤드 노드로 선정은 이전 라운드에서 헤드 노드로 동작했던 노드를 제외한 노드들 중에서 균등하게 이루어지기 때문에 라운드 증가에 따라 $P_i(t)$ 값은 단순 증가하게 되며, 이러한 패턴은 N/k 주기로 반복되기 때문에 모든 노드가 헤드 노드로 선정되는 확률은 균등하게 된다.

2.2 LEACH 프로토콜의 구조

클러스터 형성 시 처음 각 노드는 스스로 식 (2)의 확률로 CH로 동작할 것인지를 결정하고, CH로 결정되었을 경우 non-CH들에게 브로드캐스팅 메시지를 통해 자신이 CH임을 알리게 된다. 이 메시지에는 CH의 노드 번호가 포함되어 있으며, 네트워크 상의 모든 노드가 수신할 수 있을 정도의 세기로 전송되어야 한다. 이 메시지를 받은 non-CH는 신호의 세기에 따라 자신에게 적합한 CH를 결정하고, 그 CH에게 클러스터 참여하겠다는 Join-Request 메시지를 전송한다. 이런 메시지를 통해 전체 네트워크는 다수의 클러스터로 구성된다.

이후 CH는 자신의 클러스터 멤버 노드에게 TDMA 스케줄을 생성하여 전송하게 되며, 이 과정까지를 set-up phase라고 한다. Set-up phase 다음에 나타나는 steady-state phase에서 멤버 노드들은 헤드 노드로부터 할당받은 슬롯을 통해 송신하고자 하는 데이터를 CH에게 전송하고, CH는 이를 수집하여 CDMA 방식으로 싱크 노드에 전달하게 된다.

위의 두 과정을 좀 더 구체적으로 살펴보면 LEACH 프로토콜의 운영 방식은 라운드(round)라는 일련의 시간 구분으로 구성된다. 각 라운드는 그림 2와 같이 헤드 선정과 클러스터 구성을 위한 set-up phase와 노드들의 데이터 전송을 위한 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성된 steady-state phase로 이루어지며, 보통 20 sec의 고정된 길이를 갖는다.



그림 2. LEACH 프로토콜의 라운드 구조
Fig. 2 Round format of LEACH protocol

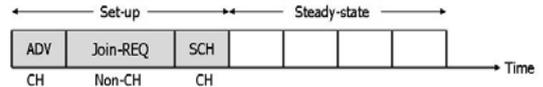


그림 3. LEACH 프로토콜의 set-up phase
Fig. 3 Set-up phase of LEACH protocol

Set-up phase 시작 시, 이전 라운드 동안 클러스터 헤드였는지의 여부와 이상적 클러스터 헤드 수를 기반으로, 각 노드는 자신이 현 라운드동안 클러스터 헤드가 될 수 있을지를 결정한다. 클러스터 헤드의 수는 시스템 파라미터로 LEACH 프로토콜에서는 클러스터 헤드의 수가 전체 노드 수의 5%일 때 가장 효율적이라고 언급하고 있다³⁾. 어떤 노드가 현 라운드 동안 클러스터 헤드가 되기로 결정한 경우, 이를 advertisement(ADV) 메시지를 이용해 방송한다. ADV 메시지를 수신한 비클러스터 헤드 노드들은 수신 강도 등의 파라미터를 기반으로 자신의 클러스터 헤드를 결정하며, 이를 Join-REQ 메시지를 이용해 결정한 클러스터 헤드로 전송함으로써 클러스터가 구성된다. 클러스터가 형성되면, 클러스터 헤드는 해당 멤버들의 데이터 전송 순서를 지시하는 TDMA 스케줄을 scheduling(SCH) 메시지를 통해 방송하고, steady-state phase로 들어간다.

Steady-state phase는 여러 개의 프레임으로 구성되며, 각 프레임은 다수의 타임 슬롯 구성된다. 각 멤버 노드들은 자신의 타임 슬롯 시간에 활성 모드로 전환하여 데이터를 전송하고 나머지 슬롯들에서는 sleep 모드로 전환되어 전력 소모를 줄이게 된다. steady-state phase에서 발생하는 프레임의 길이는 클러스터 멤버 노드의 수에 따라 할당되는 타임 슬롯 수만큼의 길이이기 때문에 클러스터마다 다르며, 또한 고정된 라운드 타임을 가지고 있기에 발생하는 프레임의 수 또한 차이가 발생한다.

2.3 LEACH 프로토콜의 문제점

LEACH에서는 전체 네트워크의 생성과 소멸까지, 즉 라운드 기간 내내 모든 일반 노드들은 전송해야 할 데이터를 항상 가지고 있다는 사실을 가정하고 있으나, 이러한 가정은 실제적으로 적합하지 않다. 즉, LEACH는 확률적 방법에 의해 클러스터를 구성하기 때문에, 고정된 라운드 시간 (20초) 동안의 프레임 수는 클러스터 내에 존재하는 노드 수에 따라 달라지고, 한 라운드 시간 동안 한 노드에 배정되는 슬롯의 수는 클러스터 내에 존재하는 노드 수 반비례하게 된다. 이에 따라, 노드에 배정된 슬롯의 주기와 노드의 데이터 센싱 주기가 일치하

지 않게 되어, 노드에 배정된 슬롯 시간에 전송 데이터가 없는 경우 슬롯이 비워지게 되고 노드는 휴지 상태로 모드 전환을 하여야 한다. 특히, 클러스터내의 노드 수가 적은 경우 노드 당 슬롯 할당이 많게 되어 빈번한 모드 전환 및 그로 인한 에너지 소모도 증가하게 되고, 전체 노드간의 에너지 불균형 문제도 심화될 수 있다. 또한, 헤드 노드는 라운드 기간 동안 항상 활성 상태로 있어야 하고, 싱크 노드로의 지속적인 데이터 전송 등의 작업 수행으로 인해 많은 에너지를 소비하게 된다.

III. 제안 방식

본 논문에서는 LEACH의 성능을 개선하여 에너지 효율을 높이기 위해 기본적인 LEACH의 라운드 구조에 decision phase를 새로이 추가하여 에너지 성능을 향상시키는 방안을 제시한다. Decision phase은 set-up phase 이전 단계에서 실행되며, 클러스터 헤드가 아닌 일반 노드들의 데이터 유무를 판단하게 된다. Decision phase에서 생성된 정보를 통해 클러스터 헤드는 새로운 TDMA 스케줄을 생성하여 합리적인 타임 슬롯 할당을 함으로서 노드들의 불필요한 모드 전환 및 불필요한 에너지 소모를 방지하도록 한다.

제안 방식에서는 기존 LEACH 프로토콜의 set-up phase 내에 그림 4와 같이 decision phase를 추가 하여 헤드 노드가 멤버 노드의 전송 데이터 보유 유무를 확인할 수 있도록 하였다. 즉, 전송하고자 하는 데이터를 가지고 있는 노드들은 기존의 LEACH와 동일하게 JOIN-REQ 메시지를 전송하게 되며, 전송할 데이터를 가지고 있지 않은 노드들은 새롭게 정의된 JOIN-REQ-EMPTY라는 새로운 메시지를 전송함으로써 헤드가 각 클러스터 내에서의 노드들의 데이터 존재 유무를 구별하게 된다. 각 헤드 노드들은 이 정보를 바탕으로 새롭게 TDMA 스케줄을 작성하며 전송할 데이터를 가지고 있는 노드들에게만 TDMA 스케줄을 부여하여 steady-state phase에서 데이터 전송을 할 수 있도록 한다.

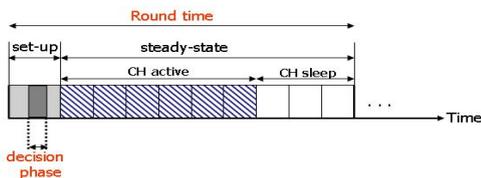


그림 4. 제안 방식의 라운드 구조
Fig. 4 Round format of proposed scheme

Steady-state phase에서 전송할 데이터가 없는 노드는 타임 슬롯을 할당 받지 못하였으므로 해당 라운드 동안 불필요한 모드 전환이 제거되고, 지속적인 휴지 상태를 유지하게 됨으로서 에너지 낭비를 방지할 수 있다.

LEACH의 steady-state phase에서는 각 노드는 해당 라운드가 종료될 때까지 라운드 시간동안 매 프레임마다 전송 데이터 보유 유무에 상관없이 슬롯을 할당받게 된다. 반면, decision phase를 추가한 제안 프로토콜에서는 주어진 라운드 기간 동안 전송 데이터를 보유한 노드에게만 슬롯을 할당하기 때문에, LEACH와 비교하여 더 많은 프레임을 생성하고 각 노드에게 더 많은 수의 타임 슬롯을 할당하게 된다. 따라서 LEACH와 동일한 프레임 수를 할당하기 위해서는 라운드 별 프레임 발생 수를 결정하는 과정이 필요하며, 이 과정을 통해 한 라운드 시간동안 LEACH와 동일한 수의 프레임만을 발생시키고 프레임 발생이후 잔여 라운드 시간 동안에는 모든 노드들의 휴지 상태로 전환함으로써 에너지 낭비를 줄일 수 있게 된다.

IV. 제안방식의 성능 분석

제안 방식의 성능을 확인하기 위해 기존 LEACH 방식과 더불어 ns-2 시뮬레이터^[4]를 이용한 모의실험을 수행하였다. 전체 노드 중 전송 데이터를 보유하고 있는 노드의 수를 변경시키면서, 시간 경과에 따른 생존 노드의 수 및 노드의 에너지 소비량의 변화를 관측하였다. 모의실험을 위한 센서 노드의 배치는 (x=0, y=0)과 (x=100, y=100) 좌표 사이에 100개의 노드를 랜덤하게 분포시켰으며, 싱크 노드는 (x=0, y=0) 좌표에 배치하였다. 각 노드의 초기 에너지는 2J, 각 라운드별 시간은 20sec로 설정하였으며 전체 시뮬레이션의 시간은 모든 노드의 에너지 고갈을 위해 충분한 시간을 설정하였다. 또한, 전파 및 에너지 소비 모델은 무선 센서네트워크 환경에서 통상적으로 사용하는 모델을 적용하였다^[5]

4.1 생존 노드의 수

전체 네트워크의 부하 상태를 반영하기 위해 전체 노드 중 전송 데이터를 보유하고 있는 노드의 수를 10%, 50%, 90% 즉 대표적인 저부하, 중부하, 고부하의 각 상황에서, 시간 경과에 따른 생존 노드의 수를 관측한 결과는 그림 5~그림 7에 나타난 바와 같다. 여기서 생존 노드란 초기 설정한 에너지가

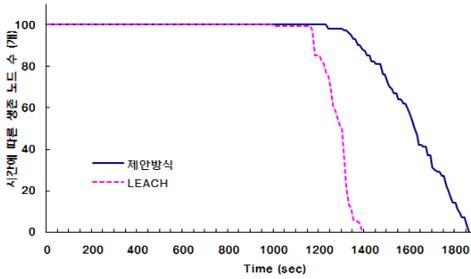


그림 5. 10% 부하시 생존 노드 수
Fig. 5 Numbers of survived nodes under 10% loads

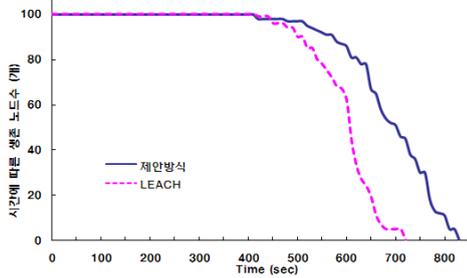


그림 6. 50% 부하시 생존 노드 수
Fig. 6 Numbers of survived nodes under 50% loads

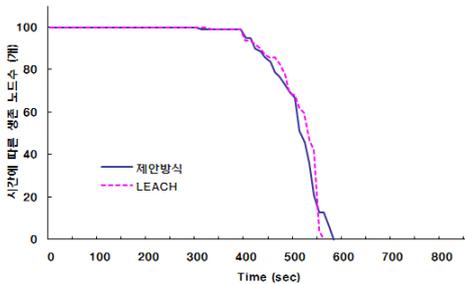


그림 7. 90% 부하시 생존 노드 수
Fig. 7 Numbers of survived nodes under 90% loads

모두 고갈되지 않은 노드를 의미한다.

실험결과, 제안방식 및 LEACH 프로토콜 두 경우 모두 부하 상태가 적을수록 일정 시점 이상 생존하는 노드 수는 증가함을 보이고 있다. 또한, 데이터를 발생하는 노드의 수가 적을수록 LEACH 프로토콜과 비교하여 제안방식의 경우, 일정시간 이상 생존하는 노드의 수가 증가하고, 데이터를 발생하는 노드의 수가 많아지면 두 방식의 성능 차이는 비슷해짐을 보이고 있다. 즉, 제안방식은 전체 네트워크의 부하가 크지 않은 경우 LEACH 프로토콜보다 현저히 우수한 성능을 보이고 있다.

이러한 현상은 제안방식의 경우 LEACH의 라운드 구조를 노드가 데이터 전송을 위해 활성화되는

구간과 휴지 기간으로 구분함으로써 노드가 휴지 상태에 머무르는 시간을 증가시켜 에너지 소비를 감소시킬 수 있었기 때문이다. 즉, 고정된 TDMA 라운드는 멤버 노들로부터 전송된 데이터를 담은 프레임들로 구성되는 앞 부분과 빈 프레임들로 구성되는 뒷 부분으로 구분되고, 헤드 노드는 앞 구간에서만 활성 모드로 동작하고, 뒷 구간에서는 휴지 모드로 남게 되어 에너지 소비를 줄이게 된다.

4.2 에너지 소비량

그림 8~그림 10는 전송 데이터를 보유하고 있는 노드의 수를 전체 노드의 50%로 한 경우, 시간 경과에 따른 각 노드의 에너지 소비량에 대한 실험결

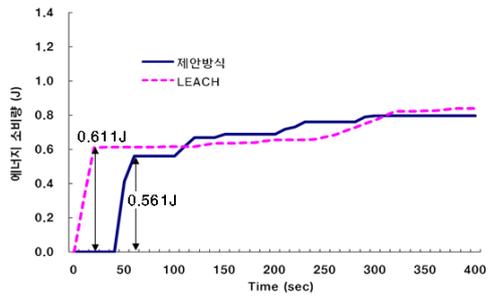


그림 8. 좌표 (12.8, 0.3) 노드의 에너지 소비량
Fig. 8 Energy consumption of the node at (12.8, 0.3)

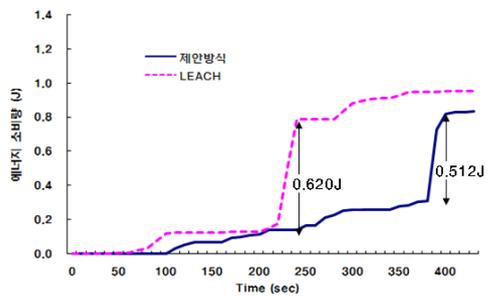


그림 9. 좌표 (47.0, 48.3) 노드의 에너지 소비량
Fig. 9 Energy consumption of the node at (47.0, 48.3)

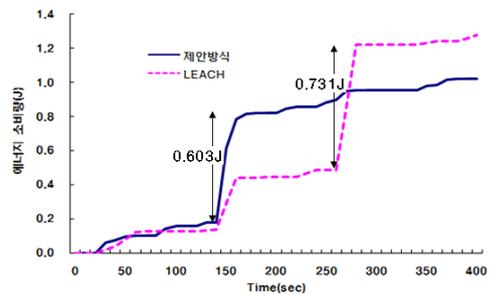


그림 10. 좌표 (96.2, 84.7) 노드의 에너지 소비량
Fig. 10 Energy consumption of the node at (96.2, 84.7)

과를 나타내며, 각 그림은 랜덤하게 위치하는 노드 중 싱크노드에 가장 가까이 위치한 노드, 중간 정도에 위치한 노드 및 가장 멀리 위치한 노드의 각 경우에 해당된다.

위 그림에서 에너지 소비량이 어느 시간 점에서 갑자기 증가하는 것은 그 시점에서 해당 노드가 20초의 라운드 기간 동안 헤드 노드로 동작하는 나타나는 현상이다. 즉, 헤드노드는 멤버노드에서 수집한 데이터를 싱크노드로 전송하여야 하는데 이때 많은 양의 에너지 사용이 필요로 하기 때문이며, 이 구간에서의 에너지 변화율은 클러스터 헤드 성능 비교의 중요한 척도가 된다.

제안 방식 및 LEACH 프로토콜 두 경우 모두, 좌표 (0.0, 0.0)에 위치한 싱크 노드로부터 멀어질 수록 헤드 노드의 에너지 사용량은 커짐을 보이고 있는데, 이것은 헤드 노드에서 싱크 노드로의 데이터 전송은 중계없이 한 홉으로 이루어지기 때문에 거리가 커질 수록 많은 양의 에너지가 소모되기 때문이다.

헤드 노드로 동작으로 인한 에너지 소비량은 모든 경우에서 제안 방식이 LEACH보다 우수함을 보이고 있는데, 이는 제안방식의 경우 헤드는 싱크노드로 데이터 전송이 이루어지는 라운드의 앞 부분에서만 활성화되고, 데이터 전송이 없는 라운드의 뒷 부분에서는 휴지 상태로 들어가 에너지 소모가 줄어들기 때문이다. 또한, 그림 8~그림 10는 시간 경과에 따라 제안방식이 LEACH 프로토콜 보다 에너지 소비가 적음을 보이고 있으며, 이의 결과로 그림 5~그림 7에서 관찰된 생존 노드의 수가 증가하게 된다.

V. 결 론

본 논문은 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 기법으로 제안된 LEACH 프로토콜의 에너지 사용 비효율성 문제를 지적하고, 이를 해결하기 위한 방안을 제안하였다. 전송 데이터 보유 유무에 관계없이 TDMA 슬롯을 할당하는 기존의 LEACH 프로토콜과 달리, 제안방식에서는 송신 데이터를 보유하고 있는 노드에게만 슬롯을 할당함으로써 노드의 에너지 사용 효율을 향상시키고자 하였다. 이를 위해, 라운드 기간 중 멤버 노드가 송신 데이터 보유 유무를 헤드 노드에게 통보할 수 있는 decision phase를 추가하고, 이를 통해 TDMA 라운드는 전송된 데이터를 담은 프레임들로 구성되는 부분과 빈 프레임들로 구성되는 부분으로 구분하여, 노드의 휴지 시간을 증가시킴으로써 에너지 사용 효율을 높이도록 하였다.

참 고 문 헌

- [1] I. A. Akyildiz, W. Su, Y. S. Subramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] J. N. Al-Karaki, and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [3] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *Proc. of the IEEE Wireless Communications*, vol. 1, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [4] UCB/LBNL/VINT Network Simulator 2, <http://www.isi.edu/vint/nsnam/>
- [5] W. Heinzelman, "Application Specific Protocol Architectures for Wireless Networks," *Ph. D. thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

이 상 훈(Sang-Hoon Lee)

정회원



2007년 2월 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 학사
2008년 2월 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 석사
2008년 2월~현재 한국통신 <관심분야> 임베디드시스템, 무선 센서네트워크

석 정 봉(Jung-Bong Suk)

정회원



1979년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
1981년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1989년 5월 미국 Univ. of Massachusetts, Amherst 전기 및 컴퓨터공학과 박사

1981년 3월~1993년 2월 한국전자통신연구원 책임연구원
1993년 3월~현재 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 교수
<관심분야> 통신망 성능분석, 무선 LAN 및 센서네트워크