

센서 네트워크에서 에너지 효율성을 고려한 two-tier 라우팅 프로토콜

안 은 철[†] · 이 성 협^{**} · 조 유 제^{***}

요 약

센서 네트워크에서 센서 노드는 제한된 배터리 용량을 가지기 때문에 에너지 효율적인 라우팅을 통한 네트워크 수명의 최대화가 매우 중요하다. 따라서 많은 라우팅 프로토콜들이 개발되었으며 이는 크게 평면 라우팅과 계층적 라우팅으로 분류된다. 최근 계층적 라우팅 방안에 초점을 맞추고 많은 연구가 이루어지고 있으며 대표적인 방안으로 LEACH가 있다.

본 논문에서는 LEACH의 문제점을 분석하고 이를 보완하기 위한 새로운 라우팅 방안으로 ENTER (ENergy efficient Two-tiEr Routing protocol)를 제안한다. ENTER는 LEACH에서 사용된 분산 알고리즘을 통해 클러스터를 형성하며 클러스터 헤드 간에 경로를 형성하여 싱크 노드로 통합된 데이터를 전송함으로써 에너지 손실을 줄이고 네트워크 수명을 증가시킨다. 시뮬레이션을 통해 LEACH와 ENTER의 성능을 비교하였으며, 제안된 ENTER가 더 효율적으로 에너지를 이용함으로써 네트워크 수명이 증가함을 알 수 있었다.

키워드 : 센서 네트워크, 계층적 라우팅, 클러스터링, 에너지 효율성, 네트워크 수명

Energy Efficient Two-Tier Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Eun-Chul Ahn[†] · Sung-Hyup Lee^{**} · You-Ze Cho^{***}

ABSTRACT

Since sensor node has a limited energy supply in a wireless sensor network, it is very important to maximize the network lifetime through energy-efficient routing. Thus, many routing protocols have been developed for wireless sensor networks and can be classified into flat and hierarchical routing protocols. Recent researches focus on hierarchical routing scheme and LEACH is a representative hierarchical routing protocol.

In this paper, we investigated the problems of the LEACH and proposed a novel energy efficient routing scheme, called ENTER(ENergy efficient Two-tiEr Routing protocol), to resolve the problem. ENTER reduces an energy consumption and increases a network lifetime by organizing clusters by the same distributed algorithm as in the LEACH and establishing paths among cluster-heads to transmit the aggregated data to the sink node. We compared the performance of the ENTER with the LEACH through simulation and showed that the ENTER could enhance the network lifetime by utilizing the resources more efficiently.

Key Words : Sensor Networks, Hierarchical Routing, Clustering, Energy Efficiency, Network Lifetime

1. 서 론

센서 노드는 제한된 처리 용량 및 메모리 크기를 가질 뿐 아니라, 무수히 많은 센서 노드들로 구성된 센서 네트워크에서는 새로운 센서 노드의 설치나 배터리 수명 혹은 장애에 따른 노드의 생사에 따라 토폴로지가 빈번히 바뀌는 특

성이 있다. 따라서, 필요에 따라 배터리 교체가 가능한 기존의 Ad Hoc 망과는 달리 센서 네트워크에서는 토폴로지의 빈번한 변화에 대응하기 위해 자율적인 망 구성 제어 및 라우팅, 효율적인 데이터 전달 프로토콜의 개발이 필수적이다 [1].

현재까지 제안된 센서 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜들은 크게 평면 라우팅(flat routing)과 계층적 라우팅(hierarchical routing) 방안으로 구분된다[9]. 평면 라우팅은 네트워크 내에 최적의 경로를 설정하여 데이터를 전송하는 방식으로 초기에 많은 연구가 이루어졌으며 SPIN, directed diffusion 등과 같은 프로토콜들이 개발되었다[2]-[4]. 그러나

* 본 논문은 한국과학재단 특정기초 (과제번호: R01-2003-000 10155-0) 지원 사업에 의해 수행되었음.

† 성 회 원 : 삼성전사 정보통신총괄

** 정 화 원 : 경북대학교 정보통신학과 박사과정

*** 정 화 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수

논문접수: 2005년 4월 6일, 심사완료: 2005년 12월 5일

복잡한 라우팅과 높은 지연, 노드 간의 에너지 불균형 등의 문제점 때문에 최근에는 상위 노드를 정한 뒤 데이터를 병합하여 싱크 노드로 전송하는 계층적 라우팅 방안이 많이 연구되고 있으며 LEACH, TEEN, PEGASIS 등의 방안이 있다[5]-[8].

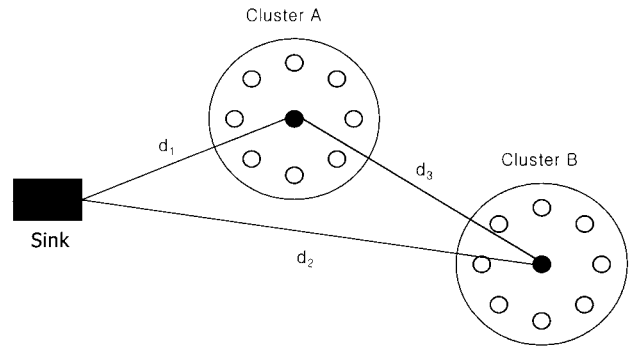
LEACH는 대표적인 계층적 라우팅 프로토콜로서 클러스터 헤드라는 상위 계층의 노드를 두어 클러스터를 형성한 뒤 클러스터 내의 노드들로부터 수신한 데이터를 병합하여 싱크 노드에게 전송한다[5]-[6]. 이는 전송 데이터 수와 전송 에너지를 감소시켜 네트워크의 수명을 증가시킨다. 또한 클러스터 헤드를 주기적으로 교체함으로써 특정 노드에게 많은 부하가 집중되는 것을 방지하고 모든 노드에서 균등한 에너지 소모를 발생시킨다. 그러나 전송 에너지는 거리의 a ($2 \leq a \leq 5$) 승에 비례하기 때문에 싱크 노드에서 거리가 멀수록 더 빠른 에너지 고갈이 발생하여 클러스터 헤드 간의 에너지 불균형이 생길 수 있는 문제점이 있다.

본 논문에서는 LEACH의 문제점을 보완하여 거리에 따른 에너지 불균형을 해소함으로써 네트워크의 수명을 증가시키기 위한 방안으로 ENTER (ENergy efficient Two-tiEr Routing protocol)를 제안한다. 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서 대표적인 계층적 라우팅 방안인 LEACH를 고찰하고 문제점을 분석한다. 3장에서는 앞 장에서 고찰한 문제점을 해결하기 위한 새로운 라우팅 방안으로 ENTER를 제안하고 동작 알고리즘을 설명한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안된 방안의 성능을 분석하고 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. LEACH의 문제점 분석

LEACH의 라우팅 과정은 라운드별로 이루어지며, 각 라운드는 클러스터가 구성되는 set-up 단계와 데이터가 전송되는 steady-state 단계로 구성된다. 먼저 set-up 단계에서는 클러스터 헤드를 선출한 후 클러스터 헤드들을 중심으로 모든 노드들이 각각의 클러스터에 가입하게 된다. 또한, 노드는 자신의 클러스터 헤드로부터 데이터 전송에 필요한 time-slot을 할당받게 된다. steady-state 단계에서 클러스터를 구성하는 노드들은 자신에게 할당된 time-slot 동안 클러스터 헤드에게 데이터를 전송하며, 클러스터 헤드는 수신한 데이터를 병합하여 1-홉으로 싱크 노드에게 전송한다.

LEACH의 데이터 전송 과정은 크게 일반 노드와 클러스터 헤드 간의 데이터 전송과 클러스터 헤드와 싱크 노드 간의 데이터 전송 과정으로 이루어진다. 전자의 경우 클러스터의 크기에 따라 그리고 클러스터 헤드와의 거리에 따라 각 노드마다 약간의 에너지 소모의 차이가 나지만 노드 간의 심각한 에너지 불균형을 초래할 만큼 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 후자의 경우 싱크 노드와 가까운 클러스터와 먼 클러스터 간의 에너지 소모가 많은 차이를 보이며 네트워크의 크기가 커질수록 이 차이는 점점 더 증가하여 클러스터 간의 극심한 에너지 불균형을 초래할 수 있다.



(그림 1) 싱크 노드와의 거리가 서로 다른 두 클러스터의 예

데이터 전송에 소모되는 에너지는 거리의 a ($2 \leq a \leq 5$) 승에 비례하기 때문에 (그림 1)에서 클러스터 A와 클러스터 B가 k 비트의 데이터를 싱크 노드에게 전송하기 위해 필요한 에너지를 각각 E_A , E_B 라고 하면 다음과 같은 식이 성립한다[5].

$$E_A = E_{trans} + E_{recv} = \{kE_{elec} + k\epsilon(d_1)^a\} + \{kE_{elec}\} = 2kE_{elec} + k\epsilon(d_1)^a$$

$$E_B = E_{trans} + E_{recv} = \{kE_{elec} + k\epsilon(d_2)^a\} + \{kE_{elec}\} = 2kE_{elec} + k\epsilon(d_2)^a \quad (1)$$

여기에서 E_{trans} , E_{recv} 는 각각 송·수신에 소모되는 에너지 양이며, E_{elec} 는 1 비트의 데이터 송·수신 시 소모되는 에너지, 그리고 ϵ 는 싱크 노드까지 전송을 위한 증폭에 필요한 에너지이다. 식 (1)에서 d_1 과 d_2 의 차가 커질수록 두 클러스터의 에너지 소모량의 차이는 기하급수적으로 증가하여 심각한 에너지 불균형이 발생하게 됨을 알 수 있다. 그 결과 클러스터 B는 클러스터 A에 비해 훨씬 더 빨리 에너지가 고갈되어 네트워크 전체에 큰 영향을 줄 것이다.

하지만 클러스터 B가 클러스터 A를 경유하여 싱크 노드에게 데이터를 전송함으로써 이 문제를 완화시킬 수 있다. 클러스터 B가 클러스터 A를 통해 싱크 노드까지 데이터를 전송하기 위해 소모되는 에너지를 E_B' 이라고 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$E_B' = E_{B-A} + E_{A-Sink}$$

$$= \{kE_{elec} + k\epsilon(d_3)^a\} + \{kE_{elec}\} + \{kE_{elec} + k\epsilon(d_1)^a\} + \{kE_{elec}\}$$

$$= 4kE_{elec} + k\epsilon(d_1)^a + k\epsilon(d_3)^a$$

식 (1)과 식 (2)에서 $E_B > E_B'$ 일 경우 즉,

$$k\epsilon(d_2)^a > 2kE_{elec} + k\epsilon(d_1)^a + k\epsilon(d_3)^a \quad (3)$$

식 (3)을 만족할 경우 클러스터 B는 클러스터 A를 경유하여 싱크 노드까지 데이터를 전송함으로써 에너지소모를 줄일 수 있다. 만약 네트워크의 규모가 크고 다수의 클러스터가 형성될 경우 싱크 노드로부터 가까운 클러스터와 먼 클러스터 간의 거리 차는 매우 크게 된다. 이 경우 싱크 노드로부터 상대적으로 먼 거리에 있는 클러스터는 싱크 노드까

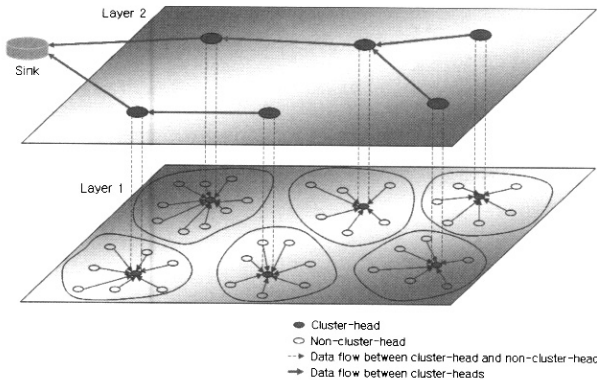
지 직접 데이터를 전송하지 않고 식 (3)을 고려하여 중간
의 여러 클러스터를 경유함으로써 많은 에너지를 절약하고 이에
따라 클러스터마다 균일한 에너지 소모가 이루어질 수 있다.

3. 제안된 에너지 효율적인 two-tier 라우팅 프로토콜

본 장에서는 LEACH의 문제점 해결을 통해 센서 네트워크의 생존 시간과 에너지 효율성을 향상시킨 라우팅 방안인 ENTER를 제안한다. ENTER는 기존의 라우팅 방안과는 달리 클러스터 헤드 간에 경로를 설정하고 두 번의 데이터 병합을 발생시킴으로써 에너지 효율성 및 네트워크의 생존 시간을 향상시켰다.

3.1 ENTER의 기본 개념

센서 네트워크의 에너지 효율성과 네트워크 생존 시간이 항상 비례하는 것은 아니다. 평면 라우팅의 경우 에너지 효율을 최대화하기 위해 네트워크 내에 최적의 경로를 설정하여 데이터 전송에 소모되는 에너지를 최소화하였다. 이 경우 에너지 효율은 매우 높아지지만 최적 경로 상의 노드에 많은 부하가 집중되어 다른 노드에 비해 에너지가 빨리 고갈된다. 반면 계층적 라우팅은 전송 에너지의 최소화보다 전체 노드의 균등한 에너지 소비에 중점을 두고 있으며 에너지 효율은 평면 라우팅에 비해 떨어지지만 네트워크의 생존 시간은 오히려 증가한다.



(그림 2) ENTER의 two-tier 라우팅 개념

ENTER는 (그림 2)와 같이 네트워크를 두 계층으로 나눠 뒤 각 계층 별로 서로 다른 데이터 전송 기법을 사용하는 계층적 라우팅 방안이다. 1계층에서는 네트워크 내에 여러 개의 클러스터를 형성한 뒤 클러스터 멤버들의 정보를 클러스터 헤드에서 수집하여 하나의 데이터로 병합한다. 2계층에서는 각 클러스터의 병합된 정보를 싱크 노드까지 전송하는 데, 클러스터 헤드 간에 형성된 경로를 통해 데이터가 전송된다. 또한, 클러스터 헤드 간 경로 설정 과정에서 기존의 방안을 그대로 적용시키는 것은 힘들다. 기존의 노드 간 경로 설정 시 각 노드가 이웃 노드의 정보(거리, 전송 전력, ID 등)를 알고 있다고 전제하지만, 이 방안에서는 클러스터

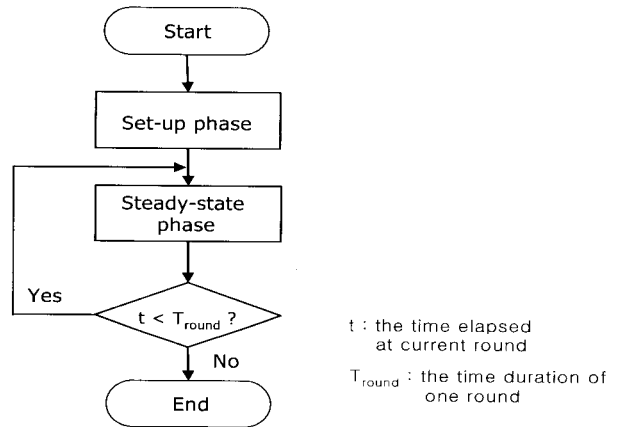
헤드가 라운드마다 바뀌어 이웃 노드(클러스터 헤드)의 정보를 알 수 없다. 따라서, 먼저 인접 클러스터 헤드의 정보를 확인하는 과정을 거친 후 기존의 라우팅 방안을 적용시키므로 상당한 오버헤드가 발생한다. 본 논문에서 이와 같은 특성을 고려하여 간단한 인접 클러스터 헤드 탐색 및 경로 설정 알고리즘을 제안한다.

3.2 ENTER의 기본 동작

ENTER의 동작 과정은 크게 데이터 전송 준비 과정인 set-up 단계와 데이터 전송 과정인 steady-state 단계로 구분된다. <표 1>은 ENTER에서 사용되는 메시지의 종류와 기능을 정의한 것이다.

<표 1> ENTER 메시지 종류 및 기능

메시지 종류	기능
HELLO	각 라운드의 초기에 싱크 노드가 네트워크 내의 모든 노드에게 전송. 이 메시지를 수신한 노드는 싱크 노드와 통신하기 위한 전송 소모 전력을 결정.
NCH_Discovery	자신보다 싱크 노드에 가까운 이웃 클러스터 헤드(NCH: Neighbor Cluster Head)를 찾기 위해 전송. 자신의 ID, 싱크 노드까지의 전송 전력을 포함.
ACK	NCH_Discovery 메시지를 수신한 클러스터 헤드 중 전송 노드보다 싱크 노드에 더 가까이 위치한 노드만이 응답을 전송. 자신의 ID, 싱크 노드까지의 전송 전력, 두 헤드 간 전송 전력을 포함.
ADV	클러스터 형성을 위해 클러스터 헤드가 네트워크에 브로드캐스팅하는 광고 메시지.
JOIN-REQ	센서 노드가 클러스터에 가입하기 위해 클러스터 헤드에게 전송.



(그림 3) ENTER의 동작 흐름도

(그림 3)은 ENTER의 한 라운드 동안의 동작 과정이며, 다음에서 각 단계별 세부적인 동작에 대해 구체적으로 살펴보기로 한다.

3.2.1 Set-up 단계

ENTER의 set-up 단계는 클러스터 헤드 선출, 클러스터 헤드 간 경로 설정, 클러스터 형성으로 구성된다. 이 때 사용자나 싱크 노드 등의 통제에 의해 클러스터 헤드가 선정되거나 클러스터가 형성되는 것이 아니라 네트워크 내의 모

든 노드가 클러스터 헤드 선정 알고리즘을 수행하여 스스로 클러스터 헤드로 선출되고 주위 노드들과의 메시지 송·수신을 통하여 스스로 클러스터를 형성하는 분산 알고리즘을 사용한다[8]. 이와 같은 분산 알고리즘은 클러스터 형성 시 모든 노드와 싱크 노드 간의 장거리 통신을 제거함으로써 에너지 손실을 줄일 수 있으며 클러스터 형성을 위해 모든 노드의 정확한 정보를 알 필요가 없다는 장점을 가진다.

(1) 클러스터 헤드 선출

센서 네트워크의 클러스터를 형성하기 위해서는 먼저 클러스터 헤드 선출이 필요하다. 클러스터 헤드는 이웃 클러스터 헤드를 통해 싱크 노드까지 데이터를 전송하기 때문에 다른 노드에 비해 에너지 소모가 많다. 그러므로 노드 간 에너지 균형을 위해 라운드마다 새로 선출되어야 하며 모든 노드는 클러스터 헤드가 되기 위한 동일한 확률 p 를 가진다. 즉 네트워크 내의 모든 노드는 $1/p$ 라운드 내에 한 번씩 클러스터 헤드로 선출되며, 클러스터 헤드 선출 과정은 LEACH와 동일하다[5].

클러스터 헤드는 각 노드별로 분산 알고리즘을 통해 결정되므로 라운드마다 선출된 클러스터 헤드 수가 동일하지는 않다. 따라서, 클러스터 헤드가 선출되지 않는 라운드가 발생할 수 있는데 이 경우 라운드를 종료하고, 즉시 새로운 라운드를 시작하여 모든 노드와 싱크 노드 간의 직접 통신에 의한 에너지 낭비를 방지한다.

(2) 클러스터 헤드 간 경로 설정

ENTER는 거리에 따른 노드 간의 심각한 에너지 불균형을 초래하여 네트워크의 생존 시간을 단축시키는 LEACH의 문제점을 해결하기 위해 클러스터 헤드 간에 경로를 설정한 뒤 다중 홉으로 싱크 노드까지 데이터를 전송한다.

우선 각 라운드 초기에 싱크 노드는 초기 전송 전력을 포함한 HELLO 메시지를 모든 센서 노드에게 브로드캐스팅한다. HELLO 메시지를 수신한 노드들은 자신이 수신한 신호의 세기와 메시지 내에 포함된 초기 전송 전력을 비교하여 자신과 싱크 노드 간의 전송 전력 $P_{\text{sink}}(n)$ 를 결정한다. 여기서 $P_{\text{sink}}(n)$ 이란 노드 n 과 싱크 노드 간의 데이터 전달에 필요한 전력 즉, 송신 노드 n 의 데이터 전송 및 싱크 노드의 데이터 수신에 필요한 전력의 합을 말한다. 클러스터 헤드 A는 자신보다 싱크 노드에 더 가까이 위치한 인접 클러스터 헤드를 찾기 위해 자신의 ID와 $P_{\text{sink}}(A)$, 그리고 현재 메시지의 전송 전력을 포함한 NCH_Discovery(Neighbor Cluster-Head Discovery) 메시지를 일정 반경 내에 전송한다. 이 때 NCH_Discovery 메시지를 수신한 노드 중 싱크 노드와의 통신에 헤드 A보다 더 적은 전력을 소모하는 노드 즉, 헤드 A보다 싱크 노드와 더 가까이 위치한 노드의 수 N 에 따라 동작 과정을 다음과 같이 구분할 수 있다.

Case 1 : N = 0

NCH_Discovery 메시지의 전송 반경 내에 이웃 클러스터

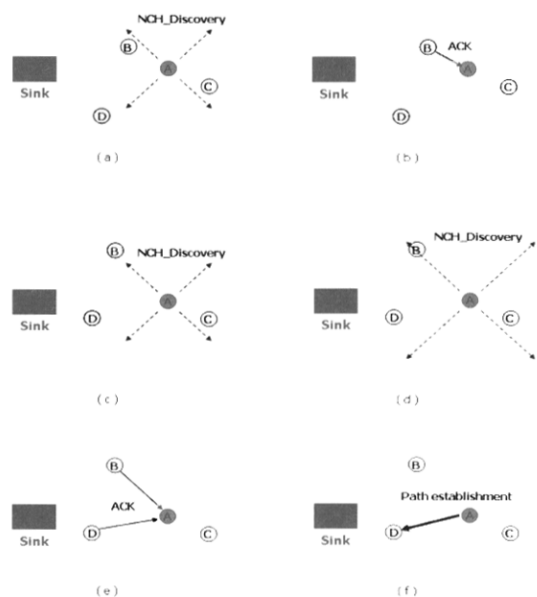
헤드가 없거나 클러스터 헤드 A보다 전력 소모가 더 큰 이웃 헤드만이 존재하는 경우로서 헤드 A는 전송 전력을 한 단계 높여 NCH_Discovery 메시지를 재전송한다.

Case 2 : N = 1

NCH_Discovery 메시지를 수신한 클러스터 헤드 중 헤드 B만이 헤드 A보다 더 작은 통신 전력을 가질 경우 헤드 B는 헤드 A에게 ACK 메시지를 전송한다. 이 때 ACK 메시지는 클러스터 헤드 B의 ID, $P_{\text{sink}}(B)$ 와 클러스터 헤드 A와 B 사이의 통신 전력 $P_B(A)$ 를 포함한다. ACK 메시지를 수신한 클러스터 헤드 A는 클러스터 헤드 B를 통해 싱크 노드와의 통신에 소모되는 총 통신 전력 $\{P_{\text{sink}}(B) + P_B(A)\}$ 과 자신이 직접 싱크 노드와 통신하는 데 필요한 통신 전력 $\{P_{\text{sink}}(A)\}$ 을 비교한 뒤 클러스터 헤드 B를 경유하는 것이 더 작은 통신 전력이 소모될 경우 클러스터 헤드 B를 자신의 NCH(Neighbor Cluster-Head)로 선정한다. 그렇지 않을 경우 클러스터 헤드 A는 case 1과 같이 NCH_Discovery 메시지의 전송 전력을 한 단계 높여 더 큰 반경 내에 NCH_Discovery 메시지를 전송한다.

Case 3 : N > 2

NCH_Discovery 메시지를 수신한 클러스터 헤드 중 둘 이상의 헤드가 A보다 적은 통신 전력을 가질 경우 A보다 더 적은 통신 전력을 가지는 모든 헤드는 A에게 ACK 메시지를 전송한다. 둘 이상의 ACK 메시지를 수신한 헤드 A는 각각의 이웃 헤드를 경유하여 싱크 노드와의 통신 전력을 계산한 뒤 가장 적은 통신 전력이 소모되는 헤드를 NCH로 선정한다. 예를 들어 헤드 B와 C가 A에게 ACK 메시지를 전송하였을 경우 헤드 A는 $\{P_{\text{sink}}(B) + P_B(A)\}$ 와 $\{P_{\text{sink}}(C) + P_C(A)\}$ 를 비교하여 더 적은 값을 가지는 헤드를 NCH로 선



(그림 4) 클러스터 헤드 간 경로 설정 과정

정한다. 이 과정을 통해 모든 클러스터 헤드는 이웃 클러스터 헤드를 결정하고 싱크 노드까지 데이터 전송을 위한 경로가 형성된다. (그림 4)는 이와 같은 클러스터 헤드 간 경로 설정 과정의 예이다.

- (a) 클러스터 헤드 A는 NCH를 찾기 위해 일정한 반경 내에 NCH_Discovery 메시지를 브로드캐스팅한다.
- (b) 클러스터 헤드 B와 C는 클러스터 헤드 A가 전송한 NCH_Discovery 메시지를 수신 후 각각 자신의 통신 전력과 클러스터 헤드 A의 전송 전력을 비교한다.

$$P_{sink}(B) < P_{sink}(A) \tag{4}$$

$$P_{sink}(C) > P_{sink}(A) \tag{5}$$

위 식 (4)와 (5)로 부터 클러스터 헤드 B는 A보다 싱크 노드까지 더 적은 통신 전력을 가지지만 C는 A보다 더 큰 통신 전력을 가지는 것을 알 수 있다. 그러므로 클러스터 헤드 B만이 A에게 ACK 메시지를 전송한다. 클러스터 헤드 A는 ACK 메시지를 수신한 후 수신 강도를 기반으로 클러스터 B를 통해 싱크와 통신하는 데 필요한 총 통신 전력을 계산하여 아래의 식 (6)을 만족할 경우 클러스터 헤드 B를 NCH로 선정한다.

$$P_{sink}(B) + P_B(A) < P_{sink}(A) \tag{6}$$

(c), (d) ACK가 수신되지 않거나 수신되더라도 위 식 (6)을 만족하지 않을 경우 클러스터 헤드 A는 전송 전력을 높여 NCH_Discovery 메시지를 브로드캐스팅한다.

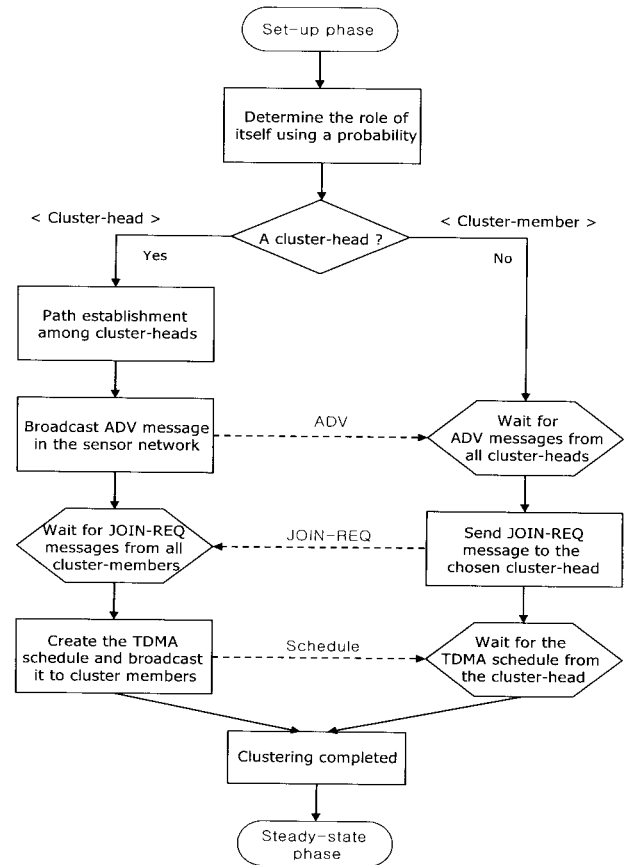
(e) ACK 메시지가 두 개 이상 수신되고 클러스터 헤드가 식 (6)을 만족하는 경우 싱크 노드와의 총 통신 전력이 가장 적은 클러스터 헤드를 자신의 NCH로 선정한다. 그림에서 클러스터 헤드 B와 D로부터 ACK 메시지를 수신하였지만 아래의 식 (7)에서 클러스터 헤드 D를 거치는 것이 B를 거치는 것보다 더 적은 전력이 소모되므로 클러스터 헤드 D를 클러스터 헤드 A의 NCH로 선정한다.

$$P_{sink}(D) + P_D(A) < P_{sink}(B) + P_B(A) \tag{7}$$

(f) 모든 클러스터 헤드는 위의 (a)~(e)의 과정을 통해 자신의 NCH를 결정하고 클러스터 헤드 간의 경로를 설정한다.

(3) 클러스터 형성

클러스터 헤드 간의 경로 설정이 완료되면 클러스터 헤드로 선출된 노드들은 이번 라운드 동안 클러스터 헤드임을 네트워크 내의 모든 노드들에게 ADV 메시지로 알려준다. ADV 메시지로 일반 노드들은 자신의 클러스터 헤드를 결정해야 한다. 각 노드는 수신한 신호 강도를 기반으로 최소의 통신 에너지가 소모되는 클러스터 헤드를 자신의 클러스

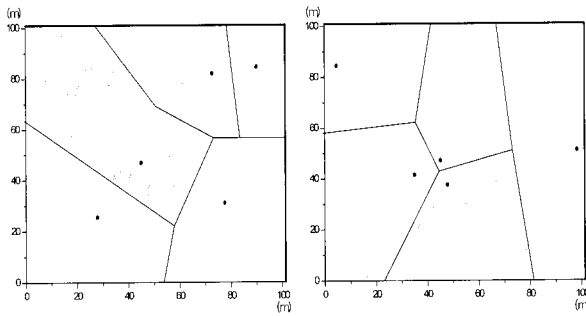


(그림 5) ENTER의 set-up 단계의 흐름도

터 헤드로 결정한다.

(그림 5)는 ENTER의 set-up 단계의 동작 흐름도를 나타낸 것이다. 각 노드는 자신의 클러스터 헤드를 결정한 후, 클러스터에 참여의사를 밝히는 JOIN-REQ (Join request) 메시지를 전송한다. 이 메시지는 자신의 ID, 클러스터 헤드의 ID 그리고 클러스터 가입 메시지임을 알려주는 헤드를 포함한다. JOIN-REQ 메시지를 수신한 클러스터 헤드는 자신에게 JOIN-REQ 메시지를 전송한 노드들을 구성원으로 하는 클러스터를 형성한다. 클러스터 헤드는 TDMA 전송 스케줄을 작성한 후 클러스터 내의 모든 노드에게 전송한다. 각 노드는 수신한 TDMA 스케줄에 따라 자신에게 할당된 시간에만 데이터를 전송한다. 따라서, 클러스터 내의 모든 노드들이 클러스터 헤드에게 정보를 전송하는 동안 충돌이 일어나는 것을 방지한다. 또한 각 노드는 자신의 전송 시간 외에는 자신의 송·수신기 전원을 꺼두어 idle 구간에서의 불필요한 에너지 소모를 줄인다. 이 과정이 끝나면 steady-state 단계로 천이되어 라운드가 끝날 때 까지 실제 데이터 전송이 이루어진다.

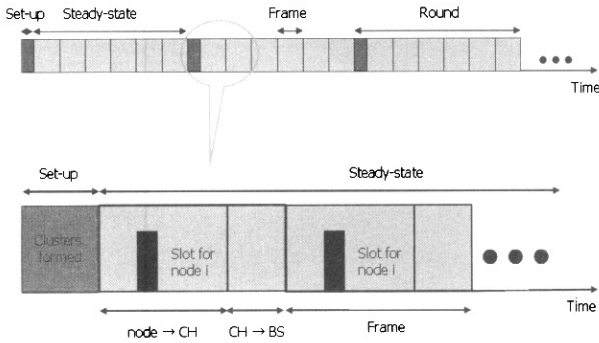
(그림 6)은 제안한 방안에서 100개의 센서 노드에 대해서로 다른 두 라운드 동안 형성된 클러스터의 예를 보여주고 있다. 그림에서 ●는 각 클러스터 헤드를 나타내며 같은 클러스터 내의 노드들은 동일한 기호로 표시된다. 라운드마다 클러스터 헤드가 랜덤하게 선출되어 클러스터가 동적으로 형성됨을 알 수 있다.



(그림 6) 다른 두 라운드 동안의 동적 클러스터 형성 예

3.2.2 Steady-state 단계

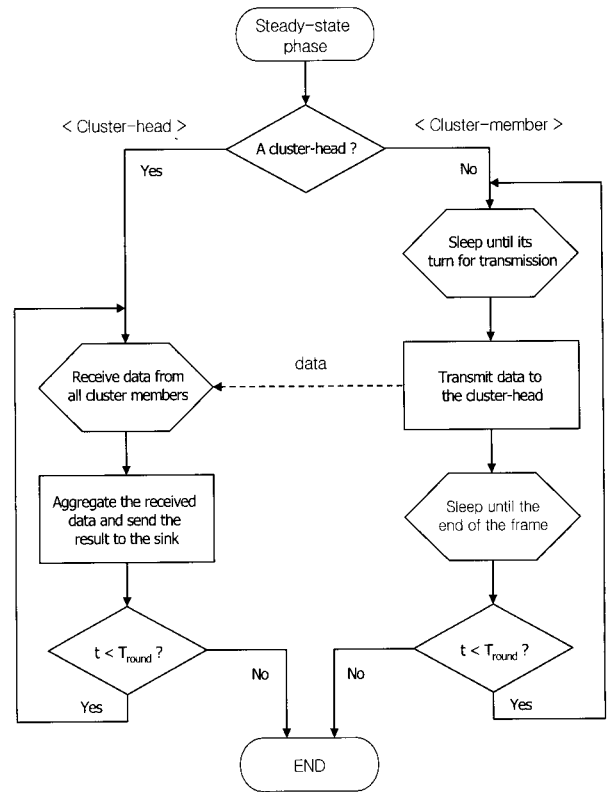
Steady-state 단계는 클러스터 헤드와 클러스터 멤버들 간의 데이터 통신과정과 클러스터 헤드에서의 데이터 병합 과정으로 구성된다.



(그림 7) ENTER의 steady-state 단계에서의 프레임 구성도

(그림 7)은 steady-state 단계의 프레임 구조이며 각 프레임은 클러스터 멤버들이 클러스터 헤드에게 데이터를 전송하는 시간과 클러스터 헤드가 싱크 노드에게 데이터를 전송하는 시간으로 구분된다. 각 노드는 동일한 데이터 전송시간을 가지므로 한 프레임의 길이는 클러스터 내의 노드 수에 의존한다. 하지만 분산 알고리즘을 통한 클러스터의 형성은 각 라운드마다 동일한 수의 클러스터 헤드 선출을 보장하지 않으며 각 클러스터 내의 노드 수도 동일하지 않다. 따라서, 한 프레임의 길이는 각 라운드마다 바뀌며 가장 많은 수의 노드를 가진 클러스터에 의존적이다.

(그림 8)은 ENTER의 steady-state 단계의 동작 흐름도를 나타낸 것이다. 우선 클러스터 멤버들은 자신에게 할당된 전송 시간 전까지 sleep 상태로 대기한 후 자신의 전송 시간이 되면 자신의 클러스터 헤드에게 데이터를 전송한다. 자신의 전송 시간이 끝나면 현재 프레임이 끝날 때까지 다시 sleep 상태로 대기한다. 즉, 자신의 전송 시간 외에는 계속 sleep 상태를 유지함으로써 불필요한 에너지 손실을 방지한다. 클러스터 헤드는 클러스터 내의 모든 멤버들로부터 데이터를 수신한 후 데이터를 병합한다. 병합된 데이터는 싱크 노드로 전송되며, 이 때 싱크 노드까지의 경로 상에 다른 클러스터 헤드가 존재할 경우에는 다시 한 번 데이터 병



(그림 8) ENTER의 steady-state 단계의 흐름도

합이 이루어진다. 싱크 노드까지의 데이터 전송이 완료되면 한 프레임이 끝나며 현재의 경과 시간과 한 라운드의 시간을 비교한 후 현재의 경과 시간이 더 작을 경우 이 과정이 반복되며 그렇지 않으면 현재 라운드가 종료되고 새로운 라운드가 시작된다.

4. 시뮬레이션을 통한 성능 분석

센서 네트워크는 랜덤하게 분포된 수많은 노드들로 구성되며 노드들 간의 거리나 분포 상태에 따라 시스템의 성능이 달라질 수 있기 때문에 하나의 모델링을 통한 해석적인 분석은 사실상 불가능하다. 그러므로 시뮬레이션을 통해 기존 방안과의 성능 비교를 하고자 한다. 본 장에서는 LEACH와 ENTER의 성능을 비교 및 분석하기 위해 C 언어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 네트워크 생존 시간, 에너지 소모량과 총 전송 패킷 수 등의 평가 항목별로 성능을 분석하여 ENTER의 우수성을 입증하였다.

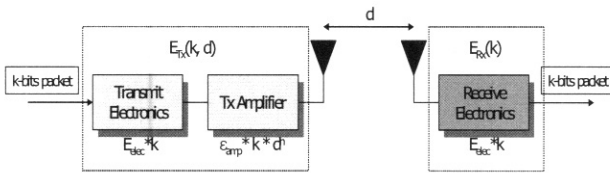
4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서 제안한 방안과 LEACH와의 성능 평가를 위해 C 언어를 이용하여 시뮬레이터를 구현하였다. 시뮬레이션을 위해 앞 장의 (그림 6)과 같이 (x = 0, y = 0)와 (x = 100, y = 100) 좌표 사이에 100개의 노드를 랜덤하게 분포시켰으며 싱크 노드는 (x = 50, y = 175)의 좌표에 배치하였다. 각 노드의 데이터 처리 시간은 25μs, 각 노드의 초기 에

너지는 2J로 설정하였으며 에너지가 고갈될 때까지 주기적으로 데이터를 전송하는 것으로 가정하였다. <표 2>는 실험에 사용된 각종 파라미터 값을 나타내는 것으로 LEACH에서 시뮬레이션과 동일하다[6].

<표 2> 시뮬레이션을 위한 파라미터 값

파라미터	값
노드 수	100
네트워크 크기	100m × 100m
싱크 노드 위치	(50, 175)
제어 패킷 크기	5bytes
클러스터 헤드 선출 확률	0.05
각 노드의 초기 에너지 (Einitial)	2J
Radio electronic energy (Eelec)	50nJ/bit
데이터 병합 에너지 (EDA)	5nJ/bit
자유 공간/ 다중 경로 페이딩 채널 모델 사이의 거리 임계값 (d0)	87m
자유 공간(free-space) 모델 무선 증폭 에너지 (efs)	10pJ/bit/m2
2파(two-ray) 모델 무선 증폭 에너지 (emp)	0.0013pJ/bit/m4



(그림 9) 무선 에너지 소비 모델

모든 노드들이 동일한 초기 에너지를 가지기 때문에 네트워크 구성 초기에 각 노드는 동일한 클러스터 헤드 선출 확률을 가진다. 네트워크 내의 최적 클러스터 헤드 비율은 0.05 즉, 5%로 설정하였으며, 라운드가 진행됨에 따라 클러스터 헤드로 선출되지 않은 노드의 선출 확률은 증가하게 된다. 즉, 20 라운드($\frac{1}{0.05} = 20$)가 지나면 모든 값은 초기화되어 이전 과정을 반복하게 되며 모든 노드는 20 라운드 동안 오직 한 번만 클러스터 헤드로 선출된다. 한 라운드는 20 프레임으로 구성되며 한 프레임의 길이는 해당 라운드의 클러스터의 수에 따라 동적으로 설정되도록 시뮬레이션을 수행하였다.

(그림 9)는 본 논문의 시뮬레이션에 사용된 송·수신 노드의 에너지 소비 모델이다. 송신 노드는 데이터를 송신하는데 소모되는 에너지 외에 데이터가 수신 노드까지 전송되도록 증폭하기 위한 에너지가 추가적으로 소모된다. (그림 9)에 따르면 두 노드의 거리가 d일 경우 k-bit의 데이터를 전송하는 데 필요한 송·수신 에너지는 다음과 같다[1].

• 송신 에너지

$$E_{Tx}(k, d) = E_{T_{elec}}(k) + E_{T_{amp}}(k, d) \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_f d^2 & \text{for } d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp} d^4 & \text{for } d > d_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

• 수신 에너지

$$E_{Rx}(k) = E_{R_{elec}}(k) = kE_{elec} \quad (4.6)$$

4.2 시뮬레이션 결과 및 분석

앞 절에서 설명한 시뮬레이션 환경에서의 실험 결과를 통해 LEACH와 ENTER의 성능을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 과정에서 각 노드는 데이터 송수신과 데이터 병합 과정의 에너지 소모로 인해 에너지 잔여량이 0이 되면 노드는 기능을 상실하게 된다. ENTER와 LEACH의 성능 평가는 시간에 따른 생존 노드의 수, 노드 생존율에 따른 라운드와 패킷 수, 시간에 따른 총 소비 에너지와 전체 에너지에 대한 전송 데이터 패킷 수 등의 순으로 수행하였으며, 특히 네트워크의 생존 시간에 중점을 두고 성능을 분석하였다. 여기서 네트워크 생존 시간은 네트워크 내의 첫 번째 노드의 에너지가 고갈되는 시간을 의미한다. 또한 노드 간의 거리나 분포 상태 등 다양한 네트워크 환경에 따라 성능 차이가 크기 때문에 보다 정확한 결과를 얻기 위해 서로 다른 환경에서 10번의 시뮬레이션을 수행한 후 그 평균으로 두 방안의 성능을 비교하였다. 또한, 센서 노드들이 균일하게 분포되는 네트워크 환경과 불균일하게 분포되는 네트워크 환경을 모두 고려하여 ENTER의 성능을 평가하였다.

<표 3> 각 라운드 당 평균 소비 에너지 비교

구분	LEACH		ENTER	
	250bytes	500bytes	250bytes	500bytes
E_{round}	511.6	1034.5	435.3	867.7
E_{CM-CH}	414.5	827.1	413.9	825.4
$E_{CH-Sink}$	89.3	180.0	20.5	41.3

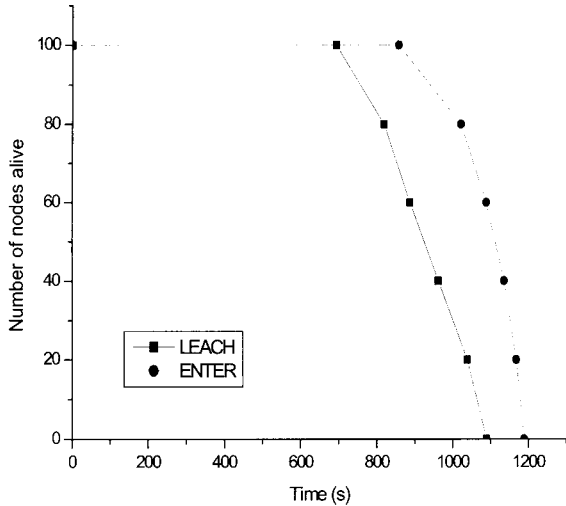
E_{round} : 각 라운드에서 소비되는 평균 에너지

E_{CM-CH} : 클러스터 멤버와 클러스터 헤드 간 데이터 전송에 소비되는 평균 에너지

$E_{CH-Sink}$: 클러스터 헤드와 싱크 노드 간 데이터 전송에 소비되는 평균 에너지

<표 3>에서는 시뮬레이션 수행 후 얻은 결과로서 각 라운드마다 소비되는 평균 에너지를 비교하였다. 데이터 전송에 소모되는 에너지는 크게 클러스터 멤버들과 클러스터 헤드 간의 데이터 전송에 소모되는 에너지(E_{CM-CH})와 클러스터 헤드와 싱크 노드 간 데이터 전송에 소모되는 에너지($E_{CH-Sink}$)로 구분할 수 있다. 또한, E_{CM-CH} 의 경우 두 방안 모두 비슷한 결과를 보이지만 $E_{CH-Sink}$ 의 경우 ENTER가 LEACH에 비해 에너지 소모가 훨씬 적음을 알 수 있다. 이는 클러스터 헤드에서 싱크 노드까지 경로를 형성하여 데이터를 전송함으로써 에너지 손실을 감소시켰으며, 이는 제안된 방안의 효율성을 입증하는 결과이다. 또한, 클러스터 헤드 간의 라우팅 경로 설정에 필요한 제어 메시지들로 인해 발생하는 오버헤드 비율을 고려해서 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 라우팅 테이블 구성과 경로 설정에 따른 에너지 소모량도 성능 평가 및 분석에 포함되었다. 시뮬레이션 결과를 보면 데이터 크기가 250 바이트인 경우 LEACH는 한 라운드 동안 클러스터 헤드와 싱크 노드의 통신에 소모되는

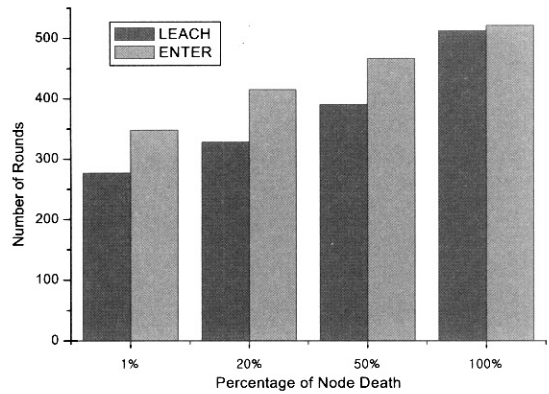
평균 에너지는 89.3mJ인데 반해 ENTER는 평균 20.5mJ의 에너지가 소모된다. 이는 LEACH의 23%에 해당되는 값으로써 에너지 효율성을 상당히 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.



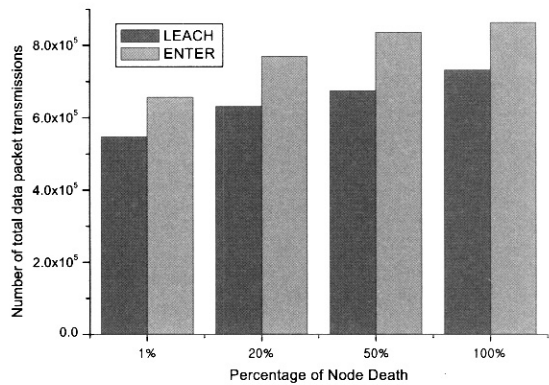
(그림 10) 시간에 따른 생존 노드의 수 (데이터 크기=250bytes)

(그림 10)은 시간 경과에 따른 생존 노드의 수를 나타내며, 제안한 방안이 LEACH에 비해 전반적으로 우수함을 알 수 있다. 그 이유로는 LEACH의 경우 모든 클러스터 헤드가 싱크 노드와의 장거리 통신으로 인해 많은 에너지를 소비하는 반면 ENTER는 클러스터 헤드들 간에 경로를 설정한 뒤 데이터를 전송하므로, LEACH에 비해 에너지 손실을 크게 줄이기 때문이다.

(그림 11)은 데이터의 크기가 250 바이트일 때 평균 라운드 수와 싱크 노드로 전송된 패킷 수를 나타내고 있다. 전체 노드 중 1%, 20%, 50%, 100%의 노드 수명이 다했을 경우에 대해 결과를 비교하였다. (그림 11) (a)에서 전반적으로 LEACH에 비해 ENTER의 라운드 수가 더 많음을 알 수 있다. 그러나 마지막 노드가 죽을 때까지의 라운드 수를 보면 LEACH가 ENTER와 비슷하다. 이것은 LEACH의 성능이 다른 두 방안과 유사하기 때문이 아니라, 각 노드가 가진 에너지를 균등하게 사용하지 못함으로써 발생한 결과이다. 네트워크 내의 노드들이 가진 총 에너지는 모든 노드가 살아있을 경우 가장 많이 소비되며 이 때 에너지를 얼마나 효율적으로 사용하느냐에 따라 네트워크 수명에 영향을 미친다. 결과에서 보듯이 LEACH는 1%의 노드가 죽을 때까지 라운드 수가 ENTER에 비해 적으며 이는 노드 간의 에너지 균형이 떨어지거나 에너지 효율이 낮음을 의미한다. 또 다른 이유로 LEACH에서 소수의 노드가 생존할 경우 ENTER에 비해 한 라운드에 소비되는 에너지가 더 적으며 같은 양의 에너지로 더 많은 라운드동안 동작한다. 이는 대부분의 노드가 죽은 후이므로 라운드 수만을 증가시킬 뿐 네트워크의 생존 시간 등의 전체 시스템의 성능에는 큰 영향을 미치지 못한다.



(a) 노드 생존율에 따른 총 수행 라운드 수



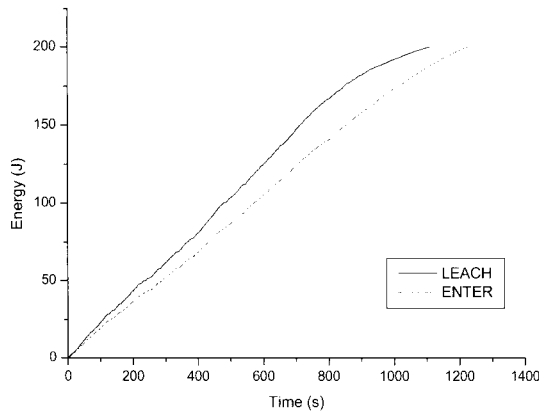
(b) 노드 생존율에 따른 총 전송 패킷 수

(그림 11) 노드 생존율에 따른 총 전송 패킷 수

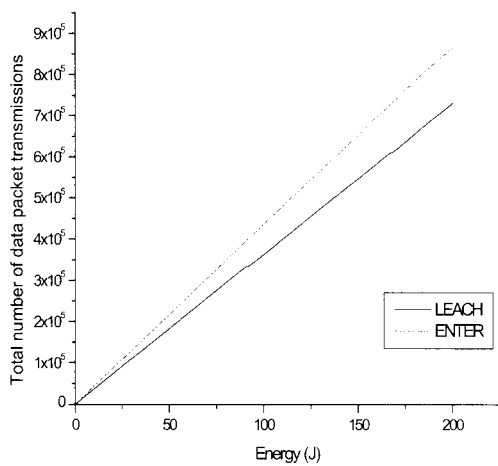
(그림 11) (b)에서 노드의 생존 비율이 감소할수록 총 데이터의 전송을 측면에서 ENTER가 LEACH에 비해 우수함을 알 수 있다. 또한, 위에서 설명한 LEACH의 에너지 비효율성을 입증하는 결과로서 모든 노드의 수명이 끝날 때 라운드 수는 LEACH가 ENTER와 비슷하지만 총 전송 데이터 수는 ENTER에 비해 현저히 낮다. 또한 총 전송 데이터의 약 80%가 모든 노드가 생존할 경우 전송되고 반 이상의 노드가 죽은 뒤에 전송되는 데이터 수는 5% 정도에 그친다. 따라서 전체 노드의 1/2 이상이 죽은 뒤의 라운드 수는 전체 성능에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

(그림 12)에서 시간이 경과함에 따라 ENTER는 LEACH에 비해 항상 에너지 소모량이 더 적음을 보이고 있다. 따라서 네트워크 내의 모든 에너지가 고갈될 때까지 걸리는 시간 또한 LEACH에 비해 ENTER가 더 긴 것을 알 수 있다. 또한, 에너지 효율성을 향상시키는 경우를 보다 명확하게 확인하기 위해서 에너지 사용에 따른 총 전송 데이터 수를 비교 분석하였다.

(그림 13)에서는 ENTER와 LEACH의 에너지 효율성 측면을 확실하게 비교하기 위해서 동일한 에너지 소모량에 따른 데이터 패킷의 전송 수를 분석하였다. 에너지 소모량이



(그림 12) 시간에 따른 총 소비 에너지



(그림 13) 전체 에너지에 따른 총 전송 패킷 수

증가할수록 ENTER가 LEACH에 비해 더 많은 데이터 패킷을 전송함을 알 수 있다. 이는 ENTER가 클러스터 헤드와 싱크 노드간의 통신 시 많은 에너지를 절약하여 그 에너지 만큼 더 많은 데이터를 전송하기 때문에 발생하는 결과로서 ENTER가 LEACH에 비해 에너지 효율성 면에서 더 우수함을 입증하는 결과이다.

5. 결론

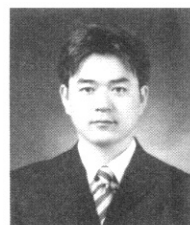
본 논문에서는 노드 간의 균등한 에너지 소모를 통해 네트워크의 생존 시간을 증가시키는 대표적인 계층적 라우팅 방안인 LEACH의 데이터 전송 과정에서의 문제점을 분석하고, 이를 보완하기 위한 새로운 라우팅 방안으로 ENTER를 제안하였다.

시뮬레이션을 통해 분석한 결과 제안한 방안이 LEACH에 비해 에너지 소모가 적으며 동일한 에너지로 더 많은 패킷을 전송함을 알 수 있었다. 특히 클러스터 헤드와 싱크 노드 간의 데이터 전송 시 LEACH의 23% 만큼의 에너지만

이 소모되었으며 이로 인해 많은 성능 향상이 이루어졌다. 이는 클러스터 헤드 간 경로를 형성한 뒤 데이터를 전송하는 것이 각 클러스터 헤드에서 직접 싱크 노드에게 데이터를 전송하는 것보다 더 효율적임을 잘 보여준다. 이를 통해 ENTER가 LEACH에서 나타나는 거리에 따른 클러스터 간 에너지 불균형을 개선하여 효율적으로 데이터를 전송하고 네트워크의 생존 시간을 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] L. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," in *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, pp.102~114, Aug., 2002.
- [2] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of ACM MobiCom*, pp.174~185, Aug., 1999.
- [3] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of ACM Wireless Networks*, Vol.8, pp.169~Mar., 2002.
- [4] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," in *IEEE/ACM ToN*, Vol.11, No.1, pp.2~16, Feb., 2003.
- [5] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks," in *Proc. of IEEE HICSS*, Jan., 2000.
- [6] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," in *Proc. of IEEE WC*, Vol.1, pp.660~670, Oct., 2002.
- [7] A. Manjeshwar, D. P. Agrawal, "TEEN : A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of IEEE PDPS*, pp.2009~2015, Apr., 2001.
- [8] S. Lindsey and C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information System," in *Proc. of IEEE AC*, Vol.3, pp.1125~1130, Mar., 2002.
- [9] J. Qiangfeng, and D. Manivannan, "Routing Protocols for Sensor Networks," in *IEEE CCNC*, pp.93~Jan., 2004.



안은철

e-mail : eunchul.ahn@samsung.com

2003년 경북대학교 전자공학과(학사)

2005년 경북대학교 전자공학과(공학석사)

2005년~현재 삼성전자 정보통신총괄

관심분야: 센서 네트워크, 이동통신



이 성 협

e-mail : tenetshlee@ee.knu.ac.kr
1999년 경일대학교 전자공학과(학사)
2000년 경북대학교 정보통신학과(공학석사)
2002년~현재 경북대학교 정보통신학과 박사과정
관심분야 : 센서 네트워크, 차세대 이동통신



조 유 제

e-mail : yzcho@ee.knu.ac.kr
1982년 서울대학교 전자공학과(학사)
1983년 한국과학기술원 전기및전자공학과
(공학석사)
1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과
(공학박사)
1989년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
1992년~1994년 Univ. of Toronto, 객원교수
2002년~2003년 미국 국립표준연구소(NIST), 객원연구원
관심분야 : 차세대 이동네트워크, BcN, 센서 네트워크