

논문 2007-44CI-3-3

클러스터 기반 센서 네트워크의 에너지 모델링 기법

(Energy Modeling For the Cluster-based Sensor Networks)

최진철*, 이채우**

(Jin-Chul Choi and Chae-Woo Lee)

요약

센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 제한적인 에너지를 가지고 있으며, 한번 배치되면 더 이상 에너지의 추가 공급이 어렵다. 따라서 제한적인 에너지를 효율적으로 이용하는 기법이 중요하다. 일반적으로 인접한 센서 노드는 유사한 정보를 가지므로, 유사한 정보의 중복 전송으로 인한 에너지 낭비가 크다. 따라서 로컬 클러스터를 형성하고, 클러스터 헤드가 자신의 클러스터 멤버로부터 수집된 데이터를 집약(data aggregation)하는 클러스터링 기법이 유사한 정보의 중복 전송을 예방할 수 있어 저전력 구동에 효과적이다. 그러나 클러스터링 기법의 성능은 클러스터 헤드의 선출 방법, 클러스터의 크기 및 수 등에 따라 달라진다. 따라서 클러스터링 기법의 에너지 절감 효과를 최대화하기 위해 이러한 요인들을 최적화해야 한다. 본 논문에서는 대표적인 클러스터링 알고리즘인 LEACH의 에너지 소비량을 모델링하고, 이를 바탕으로 최적의 클러스터 수를 구한다. 본 논문에서 도출한 모델링 기법은 시뮬레이션을 통해 측정된 실제 네트워크의 에너지 소비량과 비교할 때 최소 80% 이상의 정확도를 보여 기존의 모델링과 비교하여 우수하다.

Abstract

Wireless sensor networks are composed of numerous sensor nodes and exchange or recharging of the battery is impossible after deployment. Thus, sensor nodes must be very energy-efficient. As neighboring sensor nodes generally have the data of similar information, duplicate transmission of similar information is usual. To prevent energy wastes by duplicate transmissions, it is advantageous to organize sensors into clusters. The performance of clustering scheme is influenced by the cluster-head election method and the size or the number of clusters. Thus, we should optimize these factors to maximize the energy efficiency of the clustering scheme. In this paper, we propose a new energy consumption model for LEACH which is a well-known clustering protocol and determine the optimal number of clusters based on our model. Our model has accuracy over 80% compared with the simulation and is considerably superior to the existing model of LEACH.

Keywords : Wireless Sensor Network, Clustering Algorithm, Energy Model, Campbell Theorem, LEACH

I. 서론

센싱, 데이터 가공, 통신이 가능한 소형의 센서 노드로 구성된 무선 센서 네트워크는 다양한 환경 변화를 측정할 수 있는 유용한 수단이다. 매우 많은 수의 센서 노드들이 조밀하게 배치되어 무선 센서 네트워크를 형성하기 때문에 군사, 홈 네트워크, 재해 경보, 환경 감

시, 일기 예보 등의 다양한 응용에 적용될 수가 있다^[1].

센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 제한된 배터리 용량을 가지고 있으며 한번 배치되면 더 이상 에너지의 추가 공급이 어렵다. 또한 하나의 센서라도 전력을 모두 소비하면 네트워크의 연결이 단절되어 데이터 전송의 신뢰성을 보장받지 못할 수 있다. 따라서 센서 네트워크에서는 노드의 소비 전력을 최소화하고, 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 연구^[2-5]가 활발하게 이루어지고 있다.

센서 네트워크에서는 각 센서 노드가 수집할 수 있는 제한된 정보만을 전송하기 때문에 인접한 센서 노드들에서 발생한 데이터들은 서로 비슷한 경우가 많다. 이

* 학생회원, ** 정회원, 아주대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Ajou University)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었음.

접수일자: 2007년2월8일, 수정완료일: 2007년5월4일

러한 데이터의 유사한 성질을 모아 전송할 데이터의 양을 줄이는 것을 데이터 융합(data fusion) 또는 데이터 집약(data aggregation)이라 한다. 데이터 집약을 할 경우 그렇지 않을 때보다 전송데이터의 양이 많이 줄어들기 때문에 전력 소비가 줄어 네트워크의 수명이 길어진다. 일반적으로 전체 네트워크에 대한 효율적 데이터 집약이 어렵기 때문에 센서 노드들을 클러스터 단위로 구성하고 각 클러스터 헤드가 데이터 집약을 수행하는 클러스터링(clustering) 기법이 많은 장점을 가진다. 하지만 클러스터링 기법은 클러스터 헤드를 선출하는 방법, 클러스터의 수와 크기 등에 따라 에너지 절감 효과가 달라진다. 따라서 이러한 요인들을 최적화해야 클러스터링에 의한 에너지 절감 효과를 극대화할 수 있다.

센서 네트워크에서 데이터를 전송하기 위한 전송 전력은 두 노드간의 거리의 제곱 혹은 4제곱에 비례하기 때문에 노드들이 먼 거리에 위치할 경우 데이터 전송을 위해 과도한 에너지를 소모하게 된다^[6-7]. 따라서 클러스터 멤버보다 전송 거리가 먼 클러스터 헤드의 에너지 소비량은 상당히 크다. 그러므로 특정 노드가 클러스터 헤드로 계속 동작하게 된다면, 노드의 수명이 빨리 끝나 원활한 네트워킹이 이루어 질 수 없다.

센서 네트워크의 수명을 결정하는 또 하나의 중요한 요인은 클러스터의 면적이다. 클러스터의 수가 너무 적으면 클러스터의 크기가 커져, 클러스터 멤버가 클러스터 헤드에게 전송하기 위해 많은 에너지를 소비해야 한다. 반대로 클러스터의 수가 너무 많다면 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드로 전송하는데 소비되는 에너지는 줄어들지만, 클러스터 헤드의 개수가 많아져 클러스터 헤드들이 싱크 노드에 전송하기 위해 많은 에너지를 소비한다. 따라서 에너지 소비량을 최소화하기 위한 최적의 클러스터 수 결정이 중요하다.

본 논문에서는 대표적인 클러스터링 알고리즘인 LEACH^[2]의 에너지 소비량을 모델링한다. LEACH는 노드들 스스로 클러스터를 구성하고, 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드를 균등하게 교체하여 네트워크의 수명을 증가시켰다. 본 모델링 기법을 통해 클러스터 수에 따른 센서 노드의 에너지 소비량을 예측할 수 있으며, 이를 바탕으로 네트워크의 에너지 소비량을 최소화하는 클러스터의 수를 결정할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 모델링 기법은 LEACH 프로토콜을 사용하는 네트워크의 에너지 소비량과 비교할 때 최소 80% 이상의 정확도를 가지며, 기존의 모델링 기법과 비교할 때 상당히 우수하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서 대표적인 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜인 LEACH의 특징과 모델링 기법(EMECs, Energy Model for Efficient Clustered Sensor network)을 소개하고 III장에서 제안하는 모델링 기법에 대해 구체적으로 살펴본다. 그리고 IV장에서 제안하는 모델링 기법의 정확도를 평가한 후 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

1. LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[2]

인접한 센서 노드들은 대개 유사한 데이터를 가지므로, 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비가 크다. 이러한 에너지 낭비를 막기 위해 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[2]는 클러스터링 기법을 사용한다. 클러스터 헤드에 의해 로컬 클러스터가 형성되고, 클러스터 멤버는 주위 환경에 대한 정보를 인지, 가공한 후 클러스터 헤드로 자신의 데이터를 직접 전송한다. 클러스터 헤드는 데이터 집약(data aggregation)을 수행하여 중복되는 정보의 전송을 방지한다. 그림 1은 이러한 LEACH 프로토콜에 의해 클러스터링 된 네트워크의 데이터 전송 과정을 보여준다.

LEACH는 데이터 집약을 수행하고, 이를 싱크 노드에 직접 전송하여 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드를 라운드(round)라는 시간 단위 마다 균등하게 교체하여 네트워크 수명을 연장한다. LEACH의 한 라운드는 클러스터를 구성하는 설정(set-up) 단계와 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성되는 안정 상태(steady-state) 단계로 구성된다. 설정 단계에서 센서 노드들은 0과 1 사이 임의의 수를 각각 선택하고, 만약 선택한 수가 임계값보다 작다면 클러스터 헤드로 선출된다. 이때 센서 노드의 임계값($T(n)$)은 매 라운드마다 다음과 같이 결정된다.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{P})} & , \text{ if } n \in G \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

위 수식에서 P 는 클러스터 헤드 선출 확률이며, r 은 현재 라운드, G 는 지난 $1/P$ 라운드에서 클러스터 헤드가 아니었던 센서 노드들의 집합을 뜻한다. 클러스터 헤드

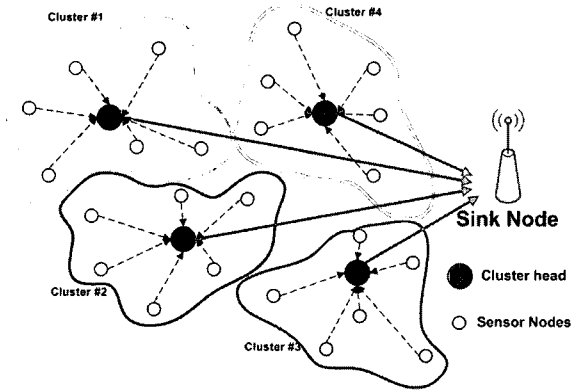


그림 1. LEACH 프로토콜의 데이터 전송 과정
Fig. 1. Data transmission for the LEACH Protocol.

로 선출되지 않은 노드는 자신으로부터 제일 가까운 클러스터 헤드의 멤버가 되어 클러스터를 구성한다. 수식 (1)의 임계값은 모든 센서 노드가 $1/P$ 라운드마다 1번씩 클러스터 헤드로 선출되도록 확률적으로 보장한다. 따라서 LEACH는 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드의 역할을 균등하게 순환시켜 네트워크 내 센서 노드들의 에너지 소비를 공평하게 분산시킨다. 그러므로 에너지 효율을 높여 네트워크의 수명을 연장시킨다.

LEACH는 송수신 거리에 따라 각 센서 노드의 전송 에너지 소비량(E_{Tx}), 수신 에너지 소비량(E_{Rx})을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2 \\ E_{Rx}(k) &= E_{elec}k \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 k 는 전송 데이터의 비트 수, d 는 송수신 노드의 거리, E_{elec} 는 비트 당 회로의 에너지 소비량, ϵ_{amp} 는 비트 당 송신 앰프의 에너지 소비량, λ 는 신호의 감쇠 지수를 뜻하며, 각 라운드마다 모든 센서 노드의 송수신 에너지 소비량을 모델링하여 네트워크의 최대 라운드 수를 결정한다.

2. LEACH-C(LEACH-Centralized)

LEACH는 매 라운드마다 일정한 수의 클러스터를 구성하고, 노드들의 공평한 클러스터 헤드 선출 횟수를 제공한다. 그러나 노드 스스로 클러스터 헤드를 선출하는 방법으로는 네트워크 수명의 최대화를 보장할 수가 없다. 그래서 싱크 노드가 센서 노드의 에너지 보유량을 고려하여 클러스터 헤드를 결정하는 LEACH-C^[3] 프로토콜이 제안되었다. [3]에서 모든 센서 노드는 자신의 위치 정보와 에너지 보유량을 주기적으로 싱크 노드

에 전송한다. 이러한 정보를 바탕으로 싱크 노드는 센서 노드의 에너지 보유량을 고려하여 클러스터 헤드를 선출함으로써 네트워크 수명을 최대화시킨다. $E_i(t)$ 가 노드 i 의 에너지 보유량일 때 클러스터 헤드 선출 확률은 다음과 같다.

$$P_i(t) = \min \left\{ \frac{E_i(t)}{E_{total}(t)} k, 1 \right\} \quad (3)$$

위 수식에서 $E_{total}(t)$ 은 모든 센서 노드의 보유 에너지 총합이다. 따라서 센서 노드는 자신의 에너지 보유량에 따라 각자 다른 클러스터 헤드 선출 확률을 가지며, 확률적으로 k 개의 클러스터 헤드가 선출된다. LEACH-C는 설정(set-up) 단계의 클러스터 헤드 선출 기법만 다르며, 안정 상태(steady-state) 단계는 LEACH와 동일하다.

또한 최적의 클러스터 헤드 수 k 를 결정하기 위하여 [3]은 네트워크의 에너지 소비량 모델링 기법을 제안하였고, 전체 에너지 소비량을 k 에 대하여 미분함으로써 네트워크의 에너지 소비량이 최소가 되는 최적의 클러스터 수를 결정하였다.

3. 기존의 에너지 소비량 모델링 기법

LEACH-C^[3]는 클러스터 헤드의 위치 정보 전송을 고려하여 클러스터 헤드의 에너지 소비량 모델링은 배제한 채 클러스터 멤버의 에너지 소비량만을 모델링하였다. 클러스터 멤버의 에너지 소비량은 클러스터 헤드와의 거리 제곱에 비례하므로, 클러스터 헤드와 클러스터 멤버간 거리의 제곱을 다음과 같이 모델링하였다.

$M \times M$ 의 면적에 N 개의 센서 노드가 임의적으로 분포될 때를 가정하자. (x, y) 좌표에 분포하는 센서 노드의 밀도가 $\rho(x, y)$ 일 때, 이 센서 노드와 원반(disc) 모양의 클러스터 중심에 위치하는 클러스터 헤드와의 거리를 d_{CH} 라고 정의하면, d_{CH} 의 제곱은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[d_{CH}^2] &= \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy \\ &= \iint r^2 \rho(r, \theta) r dr d\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

[3]은 모든 클러스터를 동일한 면적을 가진 원반(disc) 모양으로 가정하였다. 따라서 클러스터 헤드가 k 개, 클러스터의 반지름이 R 이라고 하면, 클러스터의 면적(πR^2)은 M^2/k 과 같으므로, 클러스터의 반지름 R 은

$M/\sqrt{\pi k}$ 이 된다. 또한, 클러스터에 존재하는 센서 노드가 일정한(uniform) 밀도로 분포한다고 가정하여, 센서 노드의 밀도를 $\rho = (1/(M^2/k))$ 으로 도출하여 d_{CH} 의 제곱을 다음과 같이 유도했다.

$$E[d_{CH}^2] = \rho \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{M/\sqrt{\pi k}} r^3 dr d\theta = \frac{\rho}{2\pi} \frac{M^4}{k^2}. \quad (5)$$

그러나 이러한 모델링은 클러스터 면적을 정확하게 도출할 수 없는 단점을 가지고 있다. [3]은 모든 클러스터를 동일한 크기의 원반(disc) 모양으로 가정하였지만, 실제로 클러스터의 모양은 불규칙적이며 크기 역시 일정하지 않기 때문에 실제 에너지 소비량보다 적은 에너지 소비량이 모델링될 것이다. 또한 서로 겹치지 않는 원반 모양의 클러스터로 사각형 모양의 센서 필드(sensor field)를 모두 감당할 수 없다.

이외에도 LEACH의 에너지 소비량 모델링 기법에 기반을 두고, 최적의 클러스터 반경을 유도하며 클러스터 헤드에서 집약되는 데이터의 압축 효율을 비교하는 BCM(Biological Clustering Method)^[8]이 있다. 그러나 BCM 역시 LEACH의 모델링 기법을 기반으로 하기 때문에, 모델링의 신뢰성이 떨어진다.

LLC(Low-Energy Localized Clustering)^[9]는 클러스터 헤드간의 거리 정보를 바탕으로 각 클러스터 반경의 교차 면적이 최소가 되는 모델링 기법을 제안했다. 하지만 LLC의 모델링은 상당히 많은 계산을 요구하기 때문에, 클러스터 헤드가 계산을 수행하기에는 에너지 소비와 지연(delay)이 큰 단점이 있다. 또한 각 클러스터는 여러 클러스터와 교차하므로 모든 면적을 감당하기 위해 모델링에 의한 반지름 중 최대의 반지름을 선택해야 하는 단점이 있다.

EEHCA(Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm)^[10]는 센서 노드들의 다중 홉(multi-hop) 전송을 고려하여 클러스터를 구성하고, 네트워크의 에너지 소비량을 모델링하였다. 또한 [10]의 에너지 소비량 모델링 기법을 수정하여 모델링의 정확도를 향상 시킨 클러스터 기반 다중 홉(multi-hop) 센서 네트워크의 모델링 기법^[11]이 제안되었다. 그러나 [10], [11]의 모델링 기법들은 센서 노드의 다중 홉 전송을 고려하여, 센서 노드의 전송 에너지 레벨을 제한하였다. 따라서 네트워크의 에너지 소비량은 센서 노드의 전송 홉 수에 의해 결정되므로, 센서 노드간 거리에 따라 에너지 소비량이 다른 센서 네트워크에는 적용할 수 없다.

III. 제안하는 에너지 소비량 모델링 기법

본 논문에서는 LEACH 클러스터링 알고리즘의 새로운 에너지 소비량 모델링 기법(EMECS, Energy Model for Efficient Clustered Sensor network)을 제안한다. 본 모델링을 통해 클러스터 수에 따른 에너지 소비량을 예측하며, 네트워크의 에너지 소비량을 최소화하는 클러스터의 수를 결정할 수 있다. 본 논문에서는 클러스터 헤드가 자신의 위치 정보를 미리 알고 있다고 가정하였다.

1. 클러스터 내의 클러스터 멤버들의 에너지 소비량

$M \times M$ 의 면적에 N 개의 센서 노드가 랜덤(random)하게 분포되어 있고, k 개의 클러스터가 있다고 가정하자. 클러스터 멤버 노드는 자신의 데이터 처리와 클러스터 헤드에 데이터를 전송하기 위해 에너지를 사용한다. 일반적으로 클러스터 멤버에서 자신의 클러스터 헤드까지의 거리(d_{CH})는 멀지 않기 때문에 자유 경로 모델(free-space model: d_{CH}^2 의 전력 손실)을 적용한다. 따라서 클러스터 멤버의 에너지 소비량은 다음과 같다.

$$E_{CM} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d_{CH}^2 \quad (6)$$

ϵ_{fs} 는 자유 공간 채널 무선 증폭 에너지, d_{CH} 는 클러스터 멤버와 자신이 속한 클러스터 헤드와의 거리이다.

본 논문에서는 클러스터 멤버의 에너지 소비량을 구하기 위해 새로운 모델링 기법을 제안한다. 그림 2는 클러스터 기반의 센서 네트워크를 보여준다. 그림에서 Cluster(1)의 클러스터 멤버가 되는 확률은 센서 노드와 Cluster(1)의 클러스터 헤드(CH_1)와의 거리가 멀수록 감소할 것이다. 따라서 클러스터 헤드와 클러스터 멤버의 거리에 관계없이 클러스터 멤버의 밀도가 일정하다고 할 수 없다. 그러므로 클러스터 멤버의 에너지 소비량을 구하기 위해, 클러스터 헤드로부터 거리에 따른 클러스터 멤버의 수를 먼저 구해야 한다.

그림 2의 Cluster(1)의 클러스터 헤드(CH_1)로부터 r 만큼 떨어진 클러스터 멤버가 폭이 $(b-a)$ 인 링에 존재할 때 이러한 노드들의 수를 구해 보자. 그림 3은 이러한 노드들이 존재하는 링을 나타낸다. 그림 3의 링은 노드와 클러스터 헤드의 거리 r 이 $a \leq r \leq b$ 일 때 정의된다. 따라서 $[a, b]$ 간격(interval)을 n 개의 동일한 부분간격(subinterval)으로 나누면, 그림 3의 링은 폭이 $\Delta r = (b-a)/n$ 인 여러 개의 링들로 구성된다. 그러

므로 그림 3의 링 면적($Area_{ring}^{[a,b]}$)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Area_{ring}^{[a,b]} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2). \quad (7)$$

비클러스터 헤드 노드의 밀도를 λ_{CM} 이라고 정의할 때, 링에 존재하는 클러스터 멤버의 평균수는 $\lambda_{CM} \cdot Area_{ring}^{[a,b]}$ 이라고 할 수 있다. 그러나 링에 존재하는 모든 노드가 $Cluster(1)$ 의 멤버 노드는 아니다. LEACH에서 비클러스터 헤드는 자신으로부터 가장 가까운 클러스터 헤드의 멤버가 되어 클러스터를 형성한다. 따라서 클러스터 헤드의 밀도가 높아질수록 링에 존재하는 노드가 $Cluster(1)$ 의 클러스터 멤버가 될 확률은 낮아진다. 왜냐하면 링 주변에 $Cluster(1)$ 의 클러스터 헤드(CH_1)보다 가까운 다른 클러스터 헤드도 존재할 확률이 높아지기 때문이다. 센서 노드가 CH_1 로부터 r 만큼 떨어져 있을 때, $Cluster(1)$ 의 클러스터 멤버 노드가 되는 확률을 $P\{(r, 1) \in Cluster(1)\}$ 이라고 정의하자. 따라서 CH_1 으로부터 r 만큼 떨어진 노드들 중 $Cluster(1)$ 에 속하는 클러스터 멤버 수는 Campbell Theorem^{[12][13]}에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[N_{CM}^{[a,b]}] &= \lambda_{CM} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2) \cdot P\left\{\left(\frac{r_{i+1} + r_i}{2}, 1\right) \in Cluster(1)\right\} \\ &= \lambda_{CM} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \pi \left\{ (r_i + \Delta r)^2 - r_i^2 \right\} \cdot P\left\{\left(\frac{2r_i + \Delta r}{2}, 1\right) \in Cluster(1)\right\} \\ &= \lambda_{CM} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \pi (2r_i \Delta r + \Delta r^2) \cdot P\left\{\left(\frac{2r_i + \Delta r}{2}, 1\right) \in Cluster(1)\right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

수식 (8)에서 n 은 무한대로 증가하므로 Δr 은 매우 작아진다. 따라서 Δr^2 을 무시할 수 있으며, $(2r_i + \Delta r)/2$ 를 r_i 로 간주할 수 있다. 따라서 $N_{CM}^{[a,b]}$ 은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} E[N_{CM}^{[a,b]}] &= 2\pi\lambda_{CM} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n r_i \Delta r \cdot P\{(r_i, 1) \in Cluster(1)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

수식 (9)를 통해 클러스터 헤드로부터의 거리에 따른 클러스터 멤버의 수를 구할 수 있다. 각 클러스터 멤버의 d_{CH}^2 는 자신의 r_i^2 과 동일하므로 링에 있는 모든 클

러스터 멤버의 d_{CH}^2 총합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{nodes \in ring} d_{CH}^2\right] &\approx 2\pi\lambda_{CM} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n r_i^3 \Delta r \cdot P\{(r_i, 1) \in Cluster(1)\}. \end{aligned} \quad (10)$$

그러므로 적분의 정의에 의해 수식 (10)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{node \in Cluster(1)} d_{CH}^2\right] &= 2\pi\lambda_{CM} \int_0^{\infty} r^3 \cdot P\{(r, 1) \in Cluster(1)\} dr \end{aligned} \quad (11)$$

만약 $a = 0$, $b = \infty$ 가 되면 수식 (11)은 한 클러스터에 존재하는 모든 클러스터 멤버의 d_{CH}^2 총합이 된다. 그리고 $P\{(r, 1) \in Cluster(1)\}$ 은 $Cluster(1)$ 의 클러스터 헤드로부터 r 만큼 떨어진 노드가 $Cluster(1)$ 의 클러스터 멤버가 되는 확률인데 이것은 r 과 클러스터 헤드의 밀도가 증가할수록 감소하게 된다. 따라서 $P\{(r, 1) \in Cluster(1)\}$ 은 Palm distribution^{[11][12]}에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$P\{(r, 1) \in Cluster(1)\} = \exp\{-\lambda_{CH}\pi r^2\} \quad (12)$$

위의 식에서 λ_{CH} 는 클러스터 헤드의 밀도이다. 수식 (11)과 (12)에 의해 한 클러스터 내의 모든 멤버들의 d_{CH}^2 총합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{node \in Cluster(1)} d_{CH}^2\right] &= 2\pi\lambda_{CM} \int_0^{\infty} r^3 \exp\{-\lambda_{CH}\pi r^2\} dr = \frac{\lambda_{CM}}{\pi\lambda_{CH}^2} \end{aligned} \quad (13)$$

$M \times M$ 의 면적에 N 개의 노드가 랜덤하게 분포되어 있으므로, k 개의 클러스터 헤드가 선출되었다면, λ_{CH} 와 λ_{CM} 는 다음과 같다.

$$\lambda_{CH} = \frac{k}{M^2}, \quad \lambda_{CM} = \frac{N-k}{M^2}. \quad (14)$$

그러므로 수식 (6), (13), (14)로부터 클러스터 내의 모

든 클러스터 멤버들의 에너지 소비량(E_{CM})을 구할 수 있다.

$$E_{CM} = l \left(\frac{N}{k} E_{elec} + \epsilon_{fs} \frac{\lambda_{CM}}{\pi \lambda_{CH}^2} \right) \quad (15)$$

$$= l \left(\frac{N}{k} E_{elec} + \epsilon_{fs} \frac{M^2(N-k)}{\pi k^2} \right).$$

2. 클러스터 헤드의 에너지 소비량

$M \times M$ 의 면적에 N 개의 센서 노드가 랜덤하게 분포되어 있을 때, k 개의 클러스터 헤드가 있다면 평균적으로 하나의 클러스터에 N/k 개의 센서 노드가 있다(1개의 클러스터 헤드와 $(N/k) - 1$ 개의 클러스터 멤버). 클러스터 헤드는 N/k 개의 클러스터 멤버로부터 수신된 데이터를 처리, 집약 그리고, 집약된 데이터를 싱크 노드에 전송하기 위해 에너지를 소비할 것이다. 또한 싱크 노드까지의 전송 거리(d_{SN})가 비교적 멀기 때문에 다중 경로 모델(multipath model: d_{SN}^4 의 전력 손실)을 적용한다. 따라서 클러스터 헤드의 에너지 소비량은 다음과 같다.

$$E_{CH} = l E_{elec} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + l E_{DA} \frac{N}{k} + l E_{elec} + l \epsilon_{mp} d_{SN}^4 \quad (16)$$

l 은 데이터 패킷의 크기(bits)이며, E_{elec} 는 비트 당 데이터 처리 에너지이다. 또한, E_{DA} 는 비트 당 데이터 집약 에너지, ϵ_{mp} 는 다중 경로 채널 무선 증폭 에너지, d_{SN} 는 클러스터 헤드로부터 싱크 노드까지의 거리이다.

3. 모든 센서 노드의 에너지 소비량

한 라운드 당 모든 센서가 소비하는 에너지량(E_{total})은 k 개 클러스터가 소비하는 에너지량과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total} = k E_{cluster} = k (E_{CH} + E_{CM})$$

$$= l (2N \times E_{elec} + E_{DA} N + k \epsilon_{mp} d_{SN}^4 + \epsilon_{fs} \frac{M^2(N-k)}{\pi k}). \quad (17)$$

수식 (17)을 k 에 대하여 미분함으로써 네트워크의 에너지 소비량이 최소가 되는 최적의 클러스터 수를 구할

수 있다. 따라서 최적의 클러스터 수(k_{opt})는 다음과 같이 계산된다.

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{N}{\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \frac{M}{d_{SN}^2}. \quad (18)$$

IV. 모델링의 정확도 분석

여기에 본 장에서는 제안한 모델링 기법과 기존의 모델링 기법을 실제 시뮬레이션을 통해 측정된 실제 에너지 소비량을 비교하여 제안한 모델링 기법(EMECS)의 정확도를 분석한다.

1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 위해 사용된 시나리오는 비교적 간단한 네트워크 토폴로지(topology)를 이용하여 구성한다. ($x=0, y=0$) 와 ($x=100, y=100$) 사이에 1000×1000 의 격자를 구성한 후, 일정 수의 노드를 분포시킨다. 실제 센서 네트워크에서는 시뮬레이션에서 가정한 $N \times N$ 의 정형화된 토폴로지로는 반드시 구성되지 않지만, 충분한 격자의 해상도(resolution)를 사용함으로써 본 논문에서 제안한 모델링과 기존 모델링 기법과의 정확도 확인 및 비교가 가능하다.

분포된 센서 노드들 중에서 클러스터 헤드 선출 확률에 따라 임의의 센서 노드를 클러스터 헤드로 선출하고, 클러스터 헤드로 선출되지 않은 노드는 자신으로부터 제일 가까운 클러스터 헤드의 멤버가 되어 클러스터를 구성한다. 이러한 시뮬레이션 시나리오에 의해 노드

표 1. 시뮬레이션을 위한 파라미터
Table 1. The parameter values for simulation.

| Parameter | Value |
|--|-----------------------------|
| 센서 노드 수 | 100 |
| 네트워크 크기 | $100m \times 100m$ |
| 싱크 노드 위치 | (50, 150) |
| 데이터 패킷 크기(l) | 1 kbits |
| 데이터 처리 에너지(E_{elec}) | 50 nJ/bit |
| 데이터 집약 에너지(E_{DA}) | 5 nJ/bit |
| 자유 공간 채널 모델 무선 증폭 에너지(ϵ_{fs}) | 1 nJ/bit/m ² |
| 다중 경로 페이딩 채널 모델 무선 증폭 에너지(ϵ_{mp}) | 0.065 pJ/bit/m ⁴ |

의 개수, 클러스터 선출 확률을 변화시키며, 모든 노드의 에너지 소비량 총합을 구하였다. 시뮬레이션에 사용되는 파라미터 값은 표 1에 나타냈으며, 시뮬레이션에서 데이터 전송 시 에러는 고려하지 않았다(error-free).

2. 시뮬레이션 결과

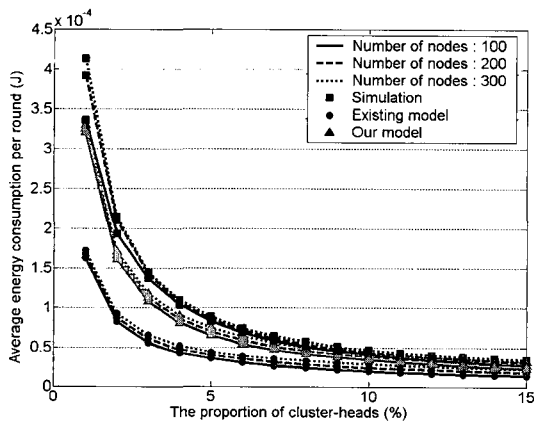
그림 4는 모든 클러스터 멤버 노드들의 에너지 소비량 총합을 보여준다. 예상한 바와 같이 클러스터 수가 많을수록 클러스터 멤버들의 에너지 소비량을 줄어든다. 왜냐하면 클러스터의 수가 많을수록 클러스터 멤버와 클러스터 헤드의 평균거리가 줄어들기 때문이다. 그림 4,5에서 보듯이 제안하는 모델링 기법이 기존의 모델링 기법보다 정확함을 알 수 있다. 모델링의 에너지 소비량이 실제 에너지 소비량보다 낮게 나오는 이유는 클러스터를 원 모양에 가깝게 모델링하기 때문이다. 그러나 기존 모델링 기법^[3]은 동일한 면적의 정형화된 원

반 모양으로 단순화해서 모델링하기 때문에 정확도가 상당히 낮다. 만약 센서가 분포되는 필드가 사각형 모양이 아니라 원 모양이라면 제안하는 모델링의 정확도는 좀 더 높아지게 될 것이다. 그림 4-(b)는 사각형 모양이 아니라, 지름이 100m인 원 모양의 센서 필드(sensor field)에 센서를 분포시킨 후 에너지 소비량을 비교한 결과이다. 그림에서 센서 필드가 원 모양 일 때 모델링의 정확도가 높음을 알 수 있다.

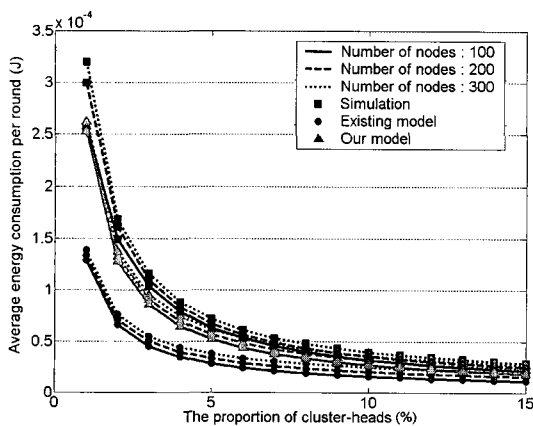
그림 5에서 제안하는 모델링 기법과 기존 모델링 기법의 클러스터 멤버 노드들의 에너지 소비량 정확도를 비교하였다. 에너지 소비량 정확도(η)는 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \frac{\text{모델링의 에너지 소비량}}{\text{시뮬레이션의 에너지 소비량}} \quad (19)$$

그림에서 보듯이 제안하는 모델링 기법의 정확도는 80% 이상이며, 기존 모델링의 정확도 보다 우수하다.

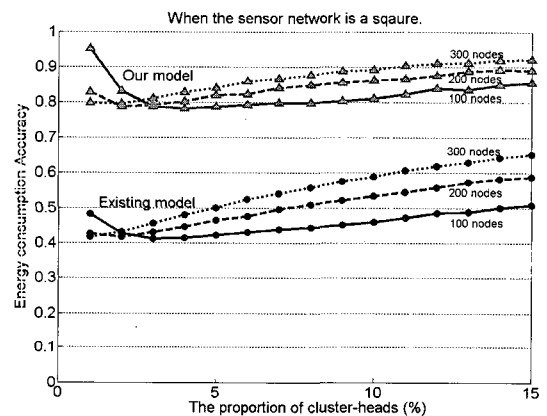


(a) 센서 필드가 사각형 일 때

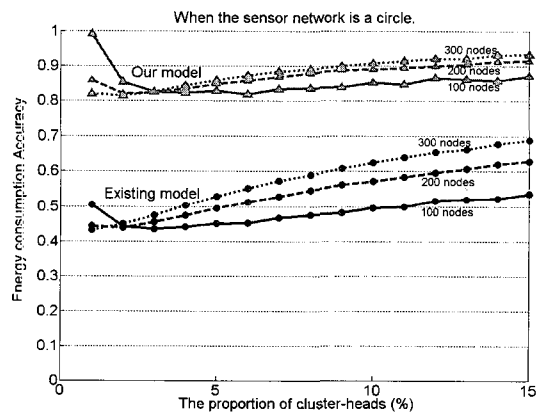


(b) 센서 필드가 원 일 때

그림 4. 클러스터 헤드의 비율에 따른 클러스터 멤버들의 에너지 소비량
Fig. 4. Energy spent of the cluster-members vs. the proportion of the cluster-heads.



(a) 센서 필드가 사각형 일 때



(b) 센서 필드가 원 일 때

그림 5. 클러스터 헤드의 비율에 따른 클러스터 멤버들의 에너지 소비량 정확도
Fig. 5. The accuracies of the model vs. the proportion of the cluster-heads.

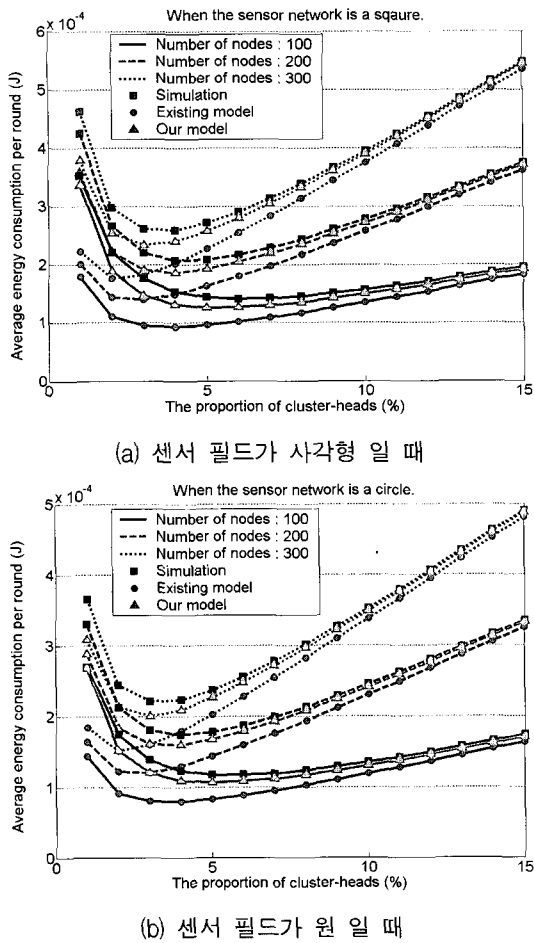


그림 6. 클러스터 헤드의 비율에 따른 모든 센서 노드들의 에너지 소비량

Fig. 6. Total energy spent in the network vs. the proportion of the cluster-heads.

그림에서 클러스터의 수가 증가할수록 모델링의 정확도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 클러스터의 수가 증가할수록 센서 노드의 전송 에너지 소비량은 줄어들지만, 센서 내부의 데이터 처리 에너지 소비량이 센서 노드의 에너지 소비량에 더 큰 비중을 차지하기 때문이다.

가정에 의해 클러스터 헤드는 자신의 위치 정보를 알고 있다. 따라서 클러스터 헤드의 에너지 소비량은 수식 (16)에 의해 클러스터 헤드와 싱크 노드의 거리 정보를 통해 계산된다. 전체 네트워크에서 데이터를 소비하는데 사용되는 에너지량은 모든 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 에너지 소비량의 합이다. 그림에서 전체 네트워크의 에너지 소비량을 최소화 시키는 최적의 클러스터 헤드 수는 시뮬레이션과 제안하는 모델링의 그것과 같다. 따라서 수식 (18)로부터 k_{opt} 를 계산하면, 최적의 클러스터 헤드 수를 결정할 수 있다.

본 시뮬레이션의 시나리오는 센서 노드의 이동성을 고려하지 않았지만, 고정된 센서 네트워크에서 클러스터링이 이루어 질 때, 제안하는 에너지 모델링 기법 (EMECS)을 통해 전체적인 에너지 소비량이 최소가 되는 클러스터 수를 유도할 수 있다는데 의의를 둔다.

V. 결 론

본 논문에서는 클러스터 기반 센서 네트워크의 에너지 소비량을 모델링하였다. 클러스터 기반 센서 네트워크의 에너지 소비량은 클러스터의 수와 크기 면적 등에 의해 달라진다. 따라서 최적의 클러스터를 구성하게 위해 네트워크의 에너지 소비량에 대한 이해가 필요하다. 본 논문에서 제안하는 모델링 기법은 시뮬레이션의 에너지 소비량과 정확하게 일치하지는 않지만, 기존 모델링 기법보다 정확도를 높였으며 최적의 클러스터 수가 시뮬레이션의 그것과 일치한다. 그러므로 센서 노드의 밀도를 알 수 있다면 본 모델링 기법을 이용하여 네트워크의 최대 수명 및 최적의 클러스터 수를 예측할 수 있다. 본 논문에서 센서 노드의 에너지 소비량은 전송 거리에 큰 영향을 받는다. 하지만 센서 노드의 종류, 분포 장소, 측정된 데이터의 종류 등에 따라 노드들의 에너지 소비량은 달라질 것이다. 또한, 클러스터 헤드가 자신의 위치 정보를 알고 있다고 가정하여 클러스터 헤드의 모델링은 배제하고 클러스터 내의 에너지 소비량만을 모델링하였다. 앞으로의 연구에서 모든 센서 노드의 에너지 소비량을 좀 더 정확하게 측정할 수 있는 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A survey on sensor network," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, pp. 102-114, 2002.
- [2] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, January 2000.
- [3] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications,

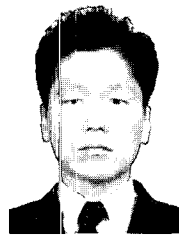
- Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, 2002.
- [4] Y. Chang, Z. Lin and J. Chen, "Cluster based self-organization management protocols for wireless sensor networks" IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 52, No. 1, pp. 75-80, February 2006.
- [5] V. Mhatre, C. Rosenberg, R. Mazurndar and N. Shroff, "A Minimum Cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint" IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 4, No. 1, pp. 4-15, January 2005.
- [6] E. J. Duarte-Melo and M. Liu, "Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of IEEE Globecom, Vol. 1, pp. 21-25, November 2002.
- [7] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks" in Proceedings of IEEE Infocom, Vol. 3, pp. 1567-1576, June 2002.
- [8] K. Leibnitz, N. Wakamiya, M. Murata and M.A. Remiche, "Analysis of energy consumption for a Biological clustering method in sensor network" in Proceedings of SenMetrics, Vol. 1, pp. 158-165, July 2005.
- [9] J. Kim, E. Kim, S. Kim, D. Kim, and W. Lee, "Low-Energy Localized Clustering: An Adaptive Cluster Radius Configuration Scheme for Topology Control in Wireless Sensor Networks" in Proceedings of IEEE VTC, Vol. 4, pp. 2446-2550, May 2005.
- [10] S. Bandyopadhyay and E.J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks" in Proceedings of IEEE Infocom: Vol. 3, No. 30, pp. 1713-1723, April 2003.
- [11] 최진철, 이채우 "클러스터 기반 다중 홉 센서 네트워크의 모델링 기법" 대한전자공학회논문지, 제43권 TC편 1호, pp. 57-70, 2006.
- [12] S. G. Foss and S.A. Zuvey, "On a certain segment process with Voronoi clustering," INRIA, Rapport de Recherche No. 1993.
- [13] J. Kingman; "Poisson Processes" Vol. 3, Oxford University Press, 1993.
- [14] D. Stoyan, W.S. Kendall, J. Mecke "Stochastic geometry and its applications", John Wiley & Son, 1987

 저 자 소 개



최진철(학생회원)
 2005년 아주대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2007년 아주대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2007년 3월~현재 아주대학교
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : Ubiquitous Sensor Networks,
 MANET, RFID, Traffic Engineering>



이채우(정회원)
 1985년 서울대학교 제어계측
 학사 졸업.
 1988년 한국과학기술원
 전자공학과 석사 졸업.
 1995년 University of Iowa 박사
 졸업.

1985년 1월~1985년 12월 (주)금성통신 연구원.
 1988년 9월~1999년 3월 한국통신 선임연구원.
 1999년 3월~2001년 9월 Lucent Technologies
 Korea 이사.
 2001년 9월~2002년 2월 한양대학교 겸임교수
 2002년 3월~현재 아주대학교 전자공학과
 부교수.

<주관심분야 : 광대역 통신망, Ubiquitous
 networking, Traffic Engineering>