

논문 2006-43TC-1-8

# 클러스터 기반 다중 흡 센서 네트워크의 모델링 기법

( Modeling of the Cluster-based Multi-hop Sensor Networks )

최 진 철\*, 이 채 우\*\*

( Jin-Chul Choi and Chae-Woo Lee )

## 요 약

센싱, 데이터 가공, 통신이 가능한 소형의 센서 노드로 구성된 무선 센서 네트워크는 다양한 환경 변화를 측정할 수 있는 유용한 수단이다. 센서 노드에서 측정된 데이터는 모든 데이터를 수집, 처리하며 사용자에게 전달하는 기능을 가진 프로세싱 센터에 전송된다. 이러한 과정은 에너지 제약을 가진 센서 노드를 고려하여 설계되어야 한다. 일반적으로 인접한 센서 노드는 유사한 정보를 가지므로, 로컬 클러스터를 형성하고 클러스터 헤드에 의해 집약된 데이터를 프로세싱 센터에 전송하는 클러스터링 기법이 저전력 구동에 효과적이다. 자동 구성능력을 지닌 기존의 다중 흡 클러스터 에너지 소비량 모델링 기법은 개별 센서 노드의 정확한 에너지 소비량을 예측할 수 없는 문제를 가지고 있었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 보완한 새로운 클러스터 에너지 소비량 모델링 기법을 제안한다. 제안된 모델링 기법은 보로노이 배열(Voronoi tessellation)을 이용하여 클러스터 헤드의 수에 따른 에너지 소비량을 모델링한다. 즉, 센서 필드의 면적, 분포된 센서 노드의 수와 통신 범위를 이용하여 전체 네트워크의 에너지 소비량을 클러스터 헤드의 수에 따라 정량적으로 나타낸다. 본 모델링 기법을 통해 전체 네트워크의 에너지 소비량이 최소가 되는 클러스터의 수를 예측함으로써 저전력을 실현할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 모델링 기법은 시뮬레이션을 통해 구성한 실제 네트워크의 에너지 소비량과 90% 이상의 정확도를 가지며, 기존 모델링의 60%대에 비춰볼 때 상당히 우수한 정확도를 지니고 있다. 또한, 센서 노드의 밀도가 증가할수록 에너지 소비량 정확도가 증가하는 효과를 확인하였다.

## Abstract

This paper describes a Wireless Sensor Network consisting of a number of small sensors with transceiver and data processor is an effective means for gathering data in a variety of environments. The data collected by each sensor is transmitted to a processing center that uses all reported data to estimate characteristics of the environment or detect an event. This process must be designed to conserve the limited energy resources of the sensor since neighboring sensors generally have the same data of similar information. Therefore, clustering scheme which sends aggregated information to the processing center may save energy. Existing multi-hop cluster energy consumption modeling scheme can not estimate exact energy consumption of an individual sensor. In this paper, we propose a new cluster energy consumption model which modified existing problem. We can estimate more accurate total energy consumption according to the number of clusterheads by using Voronoi tessellation. Thus, we can realize an energy efficient cluster formation. Our modeling has an accuracy over 90% when compared with simulation and has considerably superior than existing modeling scheme about 60%. We also confirmed that energy consumption of the proposed modeling scheme is more accurate when the sensor density is increased.

**Keywords :** Wireless Sensor Network, Clustering Algorithm, Cluster Modeling, Voronoi Tessellation

## I. 서 론

\* 학생회원, \*\* 정회원, 아주대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Engineering, Ajou University)  
※ 본 논문은 한국과학재단에서 지원하는 연구지원사업  
(R01-2003-000-10724-0)의 연구 결과입니다.  
접수일자: 2005년12월15일, 수정완료일: 2005년1월19일

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)란 센서가 달려있어 주변 환경의 변화를 센싱할 수 있고, 센싱된 정보를 가공할 수 있는 프로세서가 달려 있으며, 이를 전송할 수 있는 무선 송수신기를 갖춘 소형 장치 즉, 센서 노드로 구성된 네트워크를 의미하며, 기존의 네트워크와 다르게 의사소통의 수단이 아니라 환경에

대한 정보를 수집하는 것을 그 목적으로 한다. 무선 센서 네트워크는 센서 노드(sensor node)와 싱크 노드(sink node)로 구성된다. 센서 노드는 주변 환경을 센싱하고, 센싱된 이벤트의 데이터 가공 처리 후 싱크 노드로 전송하며, 싱크 노드는 센서 노드로부터 정보를 수집하고, TCP/IP와 같은 외부 네트워크로 전송하는 게이트웨이(gateway) 역할을 수행한다. 즉, 사용자는 싱크 노드를 통하여 센서 필드에 질의를 보내거나 센서 필드에서 수집된 데이터를 전달 받을 수 있다<sup>[1]</sup>.

센서 네트워크는 수많은 센서 노드로 구성이 되며, 사람의 접근이 용이하지 않은 환경에서 동작할 수 있다. 이는 핸드폰, PDA, 노트북 컴퓨터 등과는 달리, 센서 노드의 배터리의 교환이나 재충전이 어렵다는 것을 의미한다. 따라서 센서 노드의 저전력 동작을 위한 기법 개발이 매우 중요하다. 일반적으로 인접한 센서 노드들은 유사한 정보의 데이터를 가지고 있으므로, 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비가 크다. 이러한 특성을 고려할 때 클러스터링 기법이 효율적인 라우팅을 가능하게 하는 하나의 방법이 된다.

일반적인 클러스터링 기법의 동작은 다음과 같다. 각 클러스터 헤드에 의해 로컬 클러스터가 형성되고, 클러스터 멤버는 주위 환경에 대한 정보를 인지, 가공한 후 클러스터 헤드로 전송한다. 클러스터 헤드는 데이터 집약(data aggregation)을 수행하여 중복되는 정보의 전송을 방지하며, 사용자는 필요한 정보를 클러스터 헤드에 요청함으로써 비효율적인 질의의 플러딩(flooding)을 막을 수 있다.

대부분의 센서 네트워크 클러스터링 기법은 송수신 센서 노드의 직접적인 데이터 전송을 가정<sup>[2][3][4][5]</sup> 한다. 하지만, 무선 매체는 거리에 따른 감쇠 효과가 매우 크기 때문에, 프로세싱 센터에 데이터를 직접 전달하는 클러스터 헤드의 에너지 소비량은 매우 크다<sup>[6]</sup>. 그리고, 최근에는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 발달로  $1mm^2$  정도의 크기를 가진 스마트 더스트 센서 개발(The Smart Dust Project)<sup>[7]</sup>이 이루어지고 있다. 이렇게 작은 센서 제작을 위해 1 Joule 정도의 적은 용량을 가진 배터리가 탑재되는데, 이는 통신 범위(communication range)와 데이터 전송량의 제약을 가져온다. 이러한 센서 노드는 매우 제한된 거리 내의 센서 노드들과 통신할 수밖에 없다. 따라서 자신의 통신 범위 내에 있지 않은 다른 센서 노드들과 통신하기 위

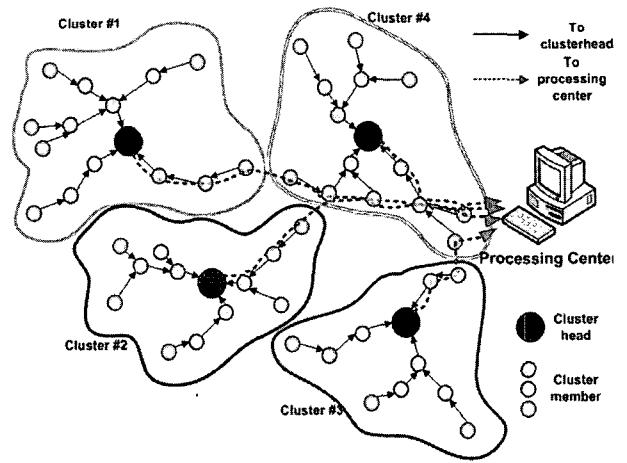


그림 1. 클러스터 기반의 다중 흡 센서 네트워크  
Fig. 1. The cluster-based multi-hop sensor network.

해서는 센서 필드(sensor field) 내의 모든 센서를 통한 다중 흡(multi-hop) 방식<sup>[8]</sup>을 이용하는 것이 바람직 하다. 그러므로 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드와 센서 노드의 고정된 통신 범위를 고려하는 다중 흡 방식의 클러스터링 기법의 필요성이 제기되고 있다.

다중 흡 방식의 클러스터링 기법에서 클러스터의 크기 및 수는 네트워크 에너지 소비량을 결정하는 중요한 요인이다. 만약 클러스터의 수가 매우 적다면, 클러스터 헤드들의 에너지 소비량 총합은 적다. 하지만, 클러스터 헤드가 담당하는 클러스터 멤버의 수가 많기 때문에 클러스터 내부의 에너지 소비량이 매우 크다. 대조적으로 클러스터의 수가 매우 많다면 클러스터 내부의 에너지 소비량은 적지만, 많은 수의 클러스터 헤드로 인해 클러스터 헤드들의 에너지 소비량 총합이 매우 크다. 따라서 네트워크의 에너지 소비가 최소가 되는 적절한 클러스터 수 결정이 중요하다.

본 논문은 클러스터 기반의 다중 흡 센서 네트워크의 에너지 소비량 모델링 기법을 제안한다. 제안된 모델링 기법은 보로노이 배열(Voronoi tessellation)<sup>[9]</sup>을 이용하여 클러스터 헤드의 수에 따른 에너지 소비량을 모델링 한다. 즉, 센서 필드의 면적, 분포된 센서 노드의 수와 통신 범위를 이용하여 전체 네트워크의 에너지 소비량을 클러스터 헤드의 수에 따라 정량적으로 나타낸다. 본 모델링 기법을 통해 전체 네트워크의 에너지 소비량이 최소가 되는 클러스터의 수를 예측함으로써 저전력을 실현할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 클러스터링 알고리즘과 모델링 기법을 소개하고, 각 알고리즘의 문제점을 지적한다. III장에서는 II장에서 언

급한 모델링 기법의 문제점을 해결하는 새로운 모델링 기법을 제안하고, 분석한다. IV장에서는 제안한 모델링과 기존 모델링의 정확도를 비교, 분석하며, 마지막으로 V장에서 본 논문을 정리한다.

## II. 센서 네트워크의 클러스터링 알고리즘

기존의 애드 혹 네트워크(ad hoc network)에서 클러스터링 기법은 주로 클러스터 헤드의 선출에 중점을 두고 있다. 클러스터 헤드를 선출하는 방식은 이웃한 노드의 수에 따라 높은 등급을 부여하고, 부여된 등급에 따라 클러스터 헤드를 선출하는 (i)최고 등급 방식(highest degree method)<sup>[10]</sup>, 서로 다른 고유의 ID를 가진 노드들끼리 비교하여 최소 ID를 갖는 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 (ii)최저 ID 방식(lowest ID method)<sup>[11][12]</sup> 그리고, 클러스터 헤드가 되기 위한 적합성에 따라 정의되는 특유한 가중치를 고려하여 클러스터 헤드를 선출하는 (iii)노드 가중치 방식(node weight method)<sup>[13][14][15]</sup> 등이 대표적이다. 기존의 무선 애드 혹 네트워크를 위해 제안된 클러스터링 기법은 배터리의 충전이나 교환을 고려하여 에너지 제약을 크게 받지 않는 특징이 있으며, 많은 수의 노드를 가진 네트워크에는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 하지만 센서 네트워크는 애드 혼 네트워크에 비해 매우 제한적인 전력을 가지고 있으며, 매우 많은 수의 센서 노드로 구성되기 때문에(수백에서 수천 개 이상) 이를 고려한 새로운 클러스터링 기법이 요구된다. 본 장에서는 대표적인 센서 네트워크의 클러스터링 알고리즘과 에너지 소비량 모델링 기법을 소개한다.

### 1. LEACH<sup>[16]</sup>

인접한 센서 노드들은 대개 유사한 데이터를 가지므로, 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위해 클러스터 헤드는 데이터 집약(data aggregation)을 수행한다. LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 데이터 집약을 수행하고, 이를 프로세싱 센터에 직접 전송하여 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드를 라운드(round)라는 시간 단위마다 균등하게 교체하여 네트워크 수명을 연장한다. 하나의 라운드는 클러스터를 구성하는 설정(set-up) 단계와 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성되는 안정 상태(steady-state) 단계로 구성된다. 설정 단계에서 모든 센서 노드는 수식 (1)과 같은 임계값( $T(n)$ )에 따라 클러스터 헤드를 선출한다.

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

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. 센서 노드  $n$ 는 0과 1사이 임의의 수를 선택하고, 만약 선택한 수가 임계값보다 작다면 클러스터 헤드로 선출된다. 수식 (1)의 임계값은 모든 센서 노드가  $1/P$  라운드당 1번씩 클러스터 헤드로 선출되도록 확률적으로 보장한다. 즉, LEACH는 에너지 소비가 큰 클러스터 헤드 역할을 균등하게 순환시킴으로써 네트워크 내 센서 노드들의 에너지 소비를 공평하게 분산시킨다. 그러므로, LEACH는 고정 클러스터링 기법이나 다른 기존의 방법들보다 많은 에너지 절약을 이루며, 그에 따라 네트워크의 수명을 연장시킨다.

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

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

여기서  $k$ 는 전송 데이터의 비트수,  $d$ 는 송수신 노드의 거리,  $E_{elec}$ 는 비트당 회로의 에너지 소비량,  $\epsilon_{amp}$ 는 비트당 송신 앰프의 에너지 소비량,  $\lambda$ 는 신호의 감쇠지수를 뜻하며, 각 라운드마다 모든 센서 노드의 송수신 에너지 소비량을 모델링하여 네트워크의 최대 라운드 수를 결정한다.

LEACH는 클러스터 헤드 역할을 공평하게 순환시켜, 네트워크 수명 연장을 목표로 한다. 하지만 클러스터 헤드 선출 시 센서 노드의 잔여 에너지에 대한 고려가 없기 때문에 특정 센서 노드의 에너지가 고갈되는 경우가 많다. 그래서, 센서 노드의 에너지 잔량을 고려하여, 클러스터 헤드를 선출하는 임계값에 가중치를 주는 LEACH-C (LEACH-Centralized)<sup>[17]</sup> 기법과 체인 토플로지(chain topology)를 이용하여 가까운 센서 노드와의 전송만으로 데이터를 전달함으로써 LEACH에 비해 네트워크 수명을 연장한 PEGASIS<sup>[18]</sup>알고리즘이 제안되었다. 또한, 주기적으로 네트워크의 상태를 파악하는 사전적(proactive) 센서 네트워크 특성을 가진 LEACH와

달리 센서 노드들이 연속적으로 환경을 감지하여, 감지된 속성값의 갑작스런 변화에 즉시 반응하는 반응적(reactive) 센서 네트워크 특성을 가진 TEEN<sup>[4]</sup>과 사전적 센서 네트워크와 반응적 센서 네트워크의 단점을 최소화하면서 둘의 장점을 통합하는 하이브리드 네트워크를 제공하는 APTEEN<sup>[5]</sup>이 제안되었다.

## 2. 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘<sup>[19]</sup>

[19]에서 제안한 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘(An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm)은 기존의 LEACH<sup>[16]</sup>와 유사하다. LEACH의 저자는 송수신 센서의 거리에 따른 전송 파워 조절 능력 보유를 가정하여, 모든 센서 노드가 수집된 데이터를 클러스터 헤드 또는 싱크 노드 역할을 하는 프로세싱 센터(processing center)에 최소 신호 레벨로 직접 전송하도록 했다. 대조적으로 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘은 일정한 신호 레벨의 데이터 전송을 가정하였다. 따라서 모든 센서 노드의 통신 범위는 고정되므로 다중 흡 방식을 사용하여 수집된 데이터를 전송한다. 또한, 보로노이 배열(Voronoi tessellation)<sup>[9]</sup>을 이용하여 클러스터 헤드의 수에 따른 에너지 소비량을 모델링하고 네트워크에 존재하는 모든 센서의 에너지 소비량이 최소가 되게 하는 클러스터헤드 수를 결정하였다.

### 가) 보로노이 배열(Voronoi tessellation)<sup>[9]</sup>

보로노이 배열은 클러스터 헤드와 클러스터 멤버를 뜻하는 포와송 포인트 프로세스(Poisson point process)<sup>[20][21]</sup>

$\Pi_c$ 와  $\Pi_s$ 로 구성된다. 또한,  $\Pi_c$ 와  $\Pi_s$ 의 밀도는 각각  $\lambda_c$ 와  $\lambda_s$ 로 나타낸다. 분포된 포인트 프로세스  $\Pi_s$ 는 자신으로부터 가장 가까운 포인트 프로세스  $\Pi_c$ 의 멤버가 되어 클러스터를 구성한다. 이렇게 포인트 프로세스  $\Pi_c$ 에 대응하여 형성된 클러스터를 보로노이 셀(Voronoi cell)이라고 한다. 각 보로노이 셀에 속한 포인트 프로세스  $\Pi_s$ 의 수는 랜덤 변수(random variable)  $N_V$ 로, 그리고 각 보로노이 셀의 포인트 프로세스  $\Pi_c$ 에 연결된 모든 포인트 프로세스  $\Pi_s$ 의 길이 총합을 랜덤 변수  $L_V$ 로 정의하면,  $N_V$ 과  $L_V$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[N_V] = \frac{\lambda_s}{\lambda_c}, \quad E[L_V] = \frac{\lambda_s}{2\lambda_c^{3/2}} \quad (3)$$

### 나) 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘<sup>[19]</sup>의 에너지 소비량 모델링

계층적 저전력 클러스터링 알고리즘<sup>[19]</sup>에서 센서 노드는 한 변의 길이가  $2a$ 인 정사각형의 면적에 밀도  $\lambda$ 의 포와송 프로세스(Poisson process of density  $\lambda$ )에 따라 분포되어 있으며, 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 에 따라 클러스터 수가 결정된다. 또한, 1흡 거리에 있는 센서에 데이터를 전송하는데 사용하는 에너지 소비량을 1 unit으로 가정하고, 네트워크 전체 에너지 소비량을 모든 노드의 흡 수로 계산한다. 네트워크 전체의 에너지 소비량은 모든 클러스터 헤드로부터 프로세싱 센터 까지의 흡 수( $C_{CH}^{total}$ )와 모든 클러스터 멤버의 흡 수의 합( $C_{CM}^{total}$ )이라는 두 부분으로 나누어 계산하고 있다.

$D_i$ 를  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 에 위치하는  $n$ 개의 센서로부터 프로세싱 센터까지의 거리를 나타내는 랜덤 변수로 두고, 프로세싱 센터가 정사각형 센서 필드의 중심에 있다고 가정하면 평균적인  $D_i$ 는 다음과 같다.

$$E[D_i | N = n] = \int_A \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \left( \frac{1}{4a^2} \right) dA = 0.765a \quad (4)$$

센서 필드에 센서가  $n$ 개 존재하면 평균적으로  $np$ 개의 클러스터 헤드가 존재하므로, 모든 클러스터 헤드로부터 프로세싱 센터까지 거리의 총합은  $0.765npa$ 가 된다. 이 값에 센서 노드의 통신 범위를 나누면 모든 클러스터 헤드로부터 프로세싱 센터까지의 흡 수( $C_{CH}^{total}$ )를 구할 수 있으며, 이는 다음 수식과 같다.

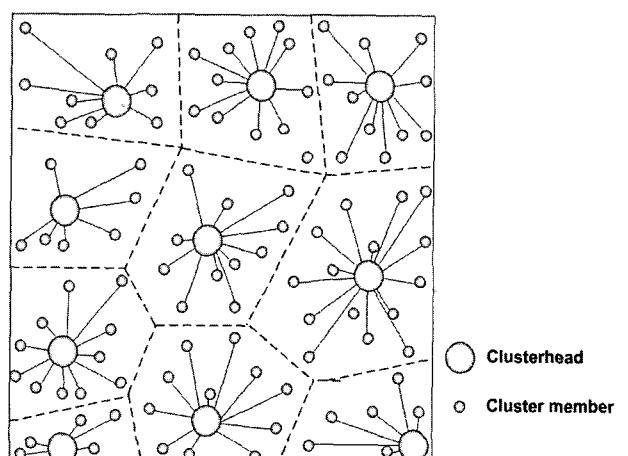


그림 2. 보로노이 배열  
Fig. 2. Voronoi tessellation

$$E[C_{CH}^{total} | N = n] = \frac{0.765npa}{R} \quad (5)$$

모든 클러스터 멤버의 흡 수의 총합( $C_{CM}^{total}$ )은 앞서 설명한 보로노이 베열을 이용한다. 클러스터 헤드가 될 확률이  $p$ 이므로, 센서 노드의 분포 밀도가  $\lambda$ 라면 클러스터 헤드의 밀도  $\lambda_c$ 와 비클러스터 헤드의 밀도  $\lambda_s$ 는 다음과 같다.

$$\lambda_c = p\lambda \quad \lambda_s = -p\lambda \quad (6)$$

하나의 클러스터 내에 존재하는 모든 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지 거리의 총합은 수식 (3)의  $E[L_v]$ 이며, 평균적으로  $np$ 개의 클러스터 헤드가 존재하므로 모든 클러스터 멤버의 흡 수의 합( $C_{CM}^{total}$ )은 다음과 같다.

$$E[C_{CM}^{total} | N = n] = \frac{np}{R} \cdot \frac{(1-p)}{2p^{3/2}\sqrt{\lambda}} \quad (7)$$

수식 (5)와 (7)에서 모든 센서 노드의 평균적인 총 흡 수, 즉 모든 센서 노드의 평균적인 에너지 소비량( $C_{NET}^{total}$ )은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[C_{NET}^{total}] &= E[E[C_{CH}^{total} | N = n] + E[E[C_{CM}^{total} | N = n]] \\ &= E[N]\left[\frac{0.765pa}{R} + \frac{1-p}{2R\sqrt{p\lambda}}\right] \\ &= \lambda A\left[\frac{0.765pa}{R} + \frac{1-p}{2R\sqrt{p\lambda}}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

위에서 설명한 과정에 따라 모든 센서 노드의 에너지 소비량을 구할 수 있지만, 구한 결과가 정확하다고 예측할 수는 없다. 그 이유는 모든 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지 거리 총합에 통신 범위를 나누어 흡 수를 구하는 방법은 각 클러스터 멤버의 흡 수를 정확하게 반영할 수 없기 때문이다. 예를 들어 통신 범위가 10이고, 클러스터 헤드까지 거리가 3, 11, 14, 24 인 클러스터 멤버가 있다면 실제 흡 수가 최소 8흡이지만, 위와 같은 계산 방법으로는 5.2가 되어 많은 오차를 예상 할 수 있다. 즉, 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘<sup>[19]</sup>에서 제안한 에너지 소비량 모델링 기법은 개별 센서

노드의 정확한 흡 수의 합을 구하지 못하고, 각 노드의 거리의 총합을 통해 총 흡 수를 계산함으로써 실제 흡 수와 상당한 오차를 가지고 있어, 네트워크의 에너지 소비량을 정확하게 모델링하지 못한다.

### III. 제안하는 센서 네트워크 클러스터 모델링

기존의 에너지 소비량 모델링 기법은 센서 노드간 거리의 총합에 통신 범위를 나누어 센서 노드의 총합을 구함으로써 상당한 오차를 가지고 있다. 본 논문에서는 각 센서 노드의 정확한 흡 수를 예측하여 네트워크의 에너지 소비량을 예측하는 새로운 에너지 소비량 모델링 기법을 제안한다.

본 모델링 기법은 (i) 클러스터 멤버들이 클러스터 헤드에게 데이터를 전송하는데 사용하는 에너지 소비량, (ii) 클러스터 헤드들이 프로세싱 센터에 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지 소비량의 단계로 이루어지며 최종적으로 (i)과 (ii)의 과정을 통해 전체 네트워크의 에너지 소비량을 유도한다. 본 장에서는 제안하는 모델링의 클러스터 구성 기법과 모델링의 단계별 세부 과정을 구체적으로 살펴본다.

#### 1. 클러스터링 알고리즘

본 논문의 클러스터 헤드 결정은 센서 필드에 단일 센서 노드를 분포시킨 후 일정 비율  $p$ 만큼 클러스터 헤드를 선출하도록 한다. 즉, 모든 센서들은 클러스터 헤드가 되는 일정한 확률  $p$ 를 가지고 있으며, 각 센서들이 0과 1사이 임의의 수를 선택하여 확률  $p$ 보다 작거나 같다면 자신을 클러스터 헤드로 선출한다. 따라서, 센서 노드의 수가  $n$ 이라면, 평균적으로  $np$ 개의 클러스터 헤드가 선출된다. 센서 노드가 위의 과정에 의해 클러스터 헤드로 선출된 후, 자신이 클러스터 헤드임을 알리는 메시지를 통신 범위 내에 있는 센서 노드들에게 브로드캐스트한다. 메시지를 받은 센서 노드들은 자신의 클러스터 헤드 여부를 확인하고, 클러스터 헤드가 아니라면 가장 가까운 클러스터 헤드의 클러스터 멤버가 된다.

예외적으로 자신이 클러스터 헤드도 아니며, 어떠한 클러스터에도 속해있지 않은 센서는 비연결 클러스터 헤드(unconnected clusterhead)가 된다. 또한, 클러스터 헤드로 선출되었다 하더라도 자신의 통신 범위 내에 있는 센서 노드를 통해 집약된 데이터를 프로세싱 센터로 전송할 수 없으면 비연결 클러스터 헤드가 된다. 이러

한 비연결 클러스터 헤드는 수집된 데이터를 프로세싱 센터까지 전송할 수 없으므로, 비연결 클러스터 헤드의 에너지 소비량은 0으로 간주한다.

본 클러스터링 기법은 분산형 알고리즘(distributed algorithm)이며, 센서 노드들의 동기화(synchronization)는 필요하지 않다.

## 2. 클러스터의 모델링을 위한 가정

본 논문에서 제안하는 클러스터 모델링은 다음과 같은 가정을 따른다.

- 네트워크의 센서 노드들은 한 종류로 구성되며, 초기에 같은 에너지가 부여된다.
- 센서 노드들이 분포된 센서 필드는 반지름  $r$ 인 평면상의 원이며, 밀도  $\lambda$ 의 포와송 프로세스(Poisson process of density  $\lambda$ )<sup>[20]</sup>에 따라 분포되어 있다.
- 분포된 센서 노드들은 평균적으로  $p$ 의 비율만큼 클러스터 헤드로 선출된다.
- 데이터를 수집, 저장 및 가공하는 프로세싱 센터(processing center)는 지속적인 전력이 공급되며, 센서 필드의 중심에 위치한다.
- 모든 센서 노드는 동일한 파워 레벨을 가지고 있기 때문에 같은 통신 범위(communication range)를 가진다.
- 두 개의 센서 노드들이 송수신하는 데이터는 통신 범위 내에 있는 또 다른 센서 노드들에 의해 포워드(forward)되며, 라우팅 구조는 미리 정해져 있다.
- 클러스터 헤드로 선출된 센서 노드는 직접적으로 데이터를 프로세싱 센터에 전송할 수 없으며, 센서 필드내의 다른 센서 노드들을 통해 다중 흡 방식으로 전송한다.
- $k$ 흡 거리에 있는 센서 노드에 데이터를 전송할 때,  $k$  unit의 에너지를 소비하며, 수신 에너지 소비량은 무시한다.
- 클러스터 헤드는 클러스터 멤버로부터 수신된 데이터량에 관계없이 1 unit의 데이터로 집약(aggregation)하여 프로세싱 센터로 전송한다.
- 통신환경은 경쟁(contention)에 기반하며, 데이터 전송시 에러는 없다(error-free).

모든 센서 노드로부터 수집된 데이터를 프로세싱 센터로 전송하는 데 사용되는 에너지는 클러스터의 수에 의존한다. 본 논문에서는 위의 가정을 따르며, 모든 센서의 에너지 소비량을 정량적으로 나타낼 수 있는 클러

스터 기반의 다중 흡 센서 네트워크를 모델링하고, 네트워크 에너지 소비량에 직접적인 영향을 끼치는 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 에 따른 네트워크의 에너지 소비량을 구한다. 네트워크의 최적 클러스터 수를 도출하는 근본적인 아이디어는 네트워크상의 모든 센서 노드가 프로세싱 센터로 데이터를 전송하는데 소비하는 총 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )을 정의하는 식으로부터 출발한다. 즉, 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 에 따른 네트워크의 총 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )를 모델링함으로써 네트워크의 총 에너지량의 최소값에 대응하는 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 를 결정하여 최적의 클러스터 수를 결정한다.

## 3. 네트워크의 에너지 소비량 모델링

가) 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )의 계산:

가정에 따르면, 센서 노드가 분포된 센서 필드는 평면상의 원이며, 센서 노드는 밀도  $\lambda$ 의 포와송 프로세스(Poisson process of intensity  $\lambda$ )에 따라 분포되어 있다. 따라서 반지름이  $a$ 인 원(면적  $A = \pi a^2$ )에 존재하는 센서 노드의 수는 평균적으로  $\lambda A$ 이다. 센서 필드에  $R$ 의 통신 범위를 가지는 센서 노드가  $n$ 개 존재하는 경우를 가정하자.

1흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^1$ )는 Campbell Theorem<sup>[20][21]</sup>에 의해 클러스터 헤드의 밀도와 1흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 2흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^2$ ) 역시 클러스터 헤드의 밀도와 2흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적의 곱이므로 흡 수에 따른 클러스터 헤드의 분포 면적을 구해야 한다.

프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적은 프로세싱 센터로부터 통신 범위  $R$ 을 반지름으로 하는 원으로 생각할 수 있다. 또한, 프로세싱 센터까지 2흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적은 프로세싱 센터로부터 2배의 통신 범위  $2R$ 를 반지름으로 하는 원에서 프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적의 차로 생각할 수 있다. 위와 같이 프로세싱 센터까지  $k$ 흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하는 면적은 프로세싱 센터로부터  $k$ 배의 통신 범위  $kR$ 을 반지름으로 하는 원에서 프로세싱 센터까지  $k-1, k-2, \dots, 1$  흡을 갖는 클러스터 헤드가 존재하

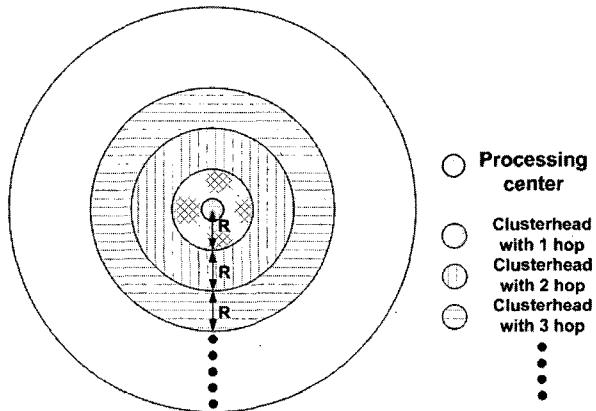


그림 3. 프로세싱 센터까지 흡 수에 따른 클러스터 헤드의 분포 면적

Fig. 3. The distribution area of clusterheads according to hop count from processing center.

는 면적들, 즉  $(k-1)R$ 을 반지름으로 하는 원의 차로 생각할 수 있다. 이와 같은 방식은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

클러스터 헤드의 밀도는  $p\lambda$ 이므로, 프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^1$ )는 다음과 같다.

$$E[N_{CH}^1] = p\lambda \int_0^R 2\pi a da = \pi p\lambda R^2 \quad (9)$$

원점에 있는 프로세싱 센터까지  $k$ 흡을 갖는 클러스터 헤드는  $k$  unit의 에너지를 소비한다. 따라서, 프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 전체 클러스터 헤드의 에너지 소비량( $C_{CH}^1$ )은 프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^1$ )와 이 클러스터 헤드들의 흡 수의 곱이므로, 프로세싱 센터까지 1흡을 갖는 전체 클러스터 헤드의 에너지 소비량( $C_{CH}^1$ )은 다음과 같다.

$$E[C_{CH}^1] = 1 \cdot E[N_{CH}^1] = \pi p\lambda R^2 \quad (10)$$

그리고, 프로세싱 센터까지 2흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^2$ )는 다음과 같다.

$$E[N_{CH}^2] = p\lambda \int_R^{2R} 2\pi a da = 3\pi p\lambda R^2 \quad (11)$$

또한, 프로세싱 센터까지 2흡을 갖는 전체 클러스터 헤드의 에너지 소비량( $C_{CH}^2$ )은 프로세싱 센터까지 2흡을 갖는 클러스터 헤드의 수( $N_{CH}^2$ )와 이 클러스터 헤드들의

흡 수의 곱이므로, 프로세싱 센터까지 2흡을 갖는 전체 클러스터 헤드의 에너지 소비량( $C_{CH}^2$ )은 다음과 같다.

$$E[C_{CH}^2] = 2 \cdot E[N_{CH}^2] = 2 \cdot 3\pi p\lambda R^2 \quad (12)$$

위의 방법을 이용하여 네트워크의 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터로 전송하는데 소비되는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[C_{CH}^{total}] &= 1 \cdot E[N_{CH}^1] + 2 \cdot E[N_{CH}^2] + 3 \cdot E[N_{CH}^3] + \dots \\ &= \pi p\lambda R^2 + \dots R^2 + \dots R^2 + \dots \\ &= \pi p\lambda R^2 \sum_{k=1}^h k \cdot k - R^2 \\ &= \pi p\lambda R^2 \sum_{k=1}^h k^2 - \sum_{k=1}^h k \\ &= \pi p\lambda R^2 \frac{h(h+1)(4h-1)}{6} \quad \text{단 } h = a R \end{aligned} \quad (13)$$

나) 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )의 계산 :

클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지의 에너지 소비량은 보로노이 배열을 이용한다. 계층적 저전력 클러스터링 알고리즘<sup>[19]</sup>에서 사용한 방법은 각 클러스터 멤버 노드의 흡 수를 정확하게 반영할 수 없으므로, 새로운 접근방법이 필요하다.

클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량을 유도하는 근본적인 아이디어는 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량을 유도하는 방법과 유사하다. 이러한 방법을 사용하기 위해서는 클러스터 헤드까지 흡 수에 따른 클러스터 멤버들의 분포 면적을 구해야 한다.

#### (1) 클러스터 내의 평균적인 센서 노드의 수

클러스터 내의 평균적인 센서 노드의 수를 구하기 위해 0의 식별자를 가진  $T(0)$ 이라는 클러스터를 가정하자. 일반적으로 클러스터는 클러스터 헤드로부터 일정 거리의 반경을 지닌 원으로 생각할 수 있으므로  $T(0)$ 는 반지름이  $r$ 인 원으로 나타낼 수 있다. 클러스터 내의 평균적인 센서 노드의 수를 구하기 위해 먼저  $T(0)$  클러스터의 원주에 존재하는 센서 노드의 수를 구해야 한다. 이전과 같은 방식으로 클러스터의 원주에 존재하는 센서 노드의 수는 원주의 면적과 클러스터 멤

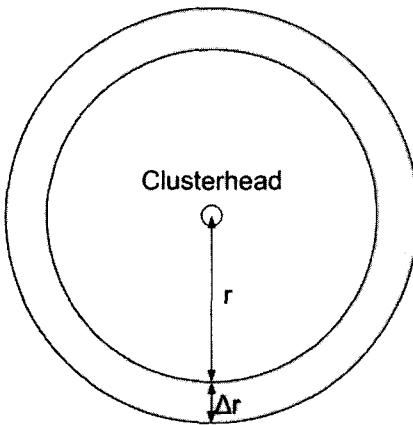


그림 4. 평균적인 클러스터 멤버 수 도출을 위한 클러스터 모델

Fig. 4. Cluster model for deriving the mean number of cluster members

버의 곱으로 나타낼 수 있으며, 클러스터 멤버가 다른 클러스터에 중복되지 않고,  $T(0)$  클러스터에만 포함되는 확률을 추가적으로 곱해야 한다.  $T(0)$  클러스터의 원주는  $\Delta r$ 의 아주 작은 값의 폭을 지닌 도넛 모양으로 가정하자. 이는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

그림 4에서  $T(0)$  클러스터 원주의 면적은  $\pi\{(r+\Delta r)^2 - r^2\}$ 이다. 클러스터 멤버의 밀도는  $\lambda_s$ 이며, 클러스터 멤버가 다른 클러스터에 속하지 않고 오직 반지름  $r$ 인  $T(0)$  클러스터에만 속하는 확률은  $P\{(r, 0) \in T(0)\}$ 라고 정의하자.

따라서, 반지름이  $r$ 인  $T(0)$  클러스터의 원주에 존재하는 클러스터 멤버의 수  $N_r$ 은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} N_r &= \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lambda_s \cdot \pi((r+\Delta r)^2 - r^2) \cdot P\{(r, 0) \in T(0)\} \\ &= \lambda_s \cdot \pi r \lim_{\Delta r \rightarrow 0} P\{(r, 0) \in T(0)\} \end{aligned} \quad (14)$$

그러므로, 반지름이  $r$ 인 클러스터에 존재하는 평균적인 클러스터 멤버의 수는 다음과 같다.

$$E[N] = 2\pi\lambda_s \int_0^\infty r \cdot P\{(r, 0) \in T(0)\} dr \quad (15)$$

$P\{(r, 0) \in T(0)\}$ 은 Palm distribution<sup>[9][21]</sup>에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$P\{(r, 0) \in T(0)\} = \exp\{-\lambda_c \pi r^2\} \quad (16)$$

수식 (16)을 수식 (15)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$E[N] = 2\pi\lambda_s \int_0^\infty r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr = \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \quad (17)$$

## (2) 하나의 클러스터 내 모든 멤버의 흡 수

클러스터 헤드로부터 통신 범위 내에 있는, 즉 1흡을 갖는 클러스터 멤버의 수( $N_{CM}^1$ )는 수식 (17)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[N_{CM}^1] = 2\pi\lambda_s \int_0^R r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr = \frac{\lambda_s}{\lambda_c} (1 - e^{-\lambda_c \pi R^2}) \quad (18)$$

따라서, 클러스터 헤드까지 1흡을 갖는 클러스터 멤버들의 에너지 소비량( $C_{CM}^1$ )은 노드 수와 이들의 흡 수와 같으므로 다음과 같다.

$$E[C_{CM}^1] = 1 \cdot E[N_{CM}^1] \quad (19)$$

클러스터 헤드까지 2흡을 갖는 클러스터 멤버들의 수( $N_{CM}^2$ )는 수식 (18)과 같은 방식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[N_{CM}^2] &= 2\pi\lambda_s \int_R^{2R} r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr \\ &= \frac{\lambda_s}{\lambda_c} e^{-\lambda_c \pi R^2} - e^{-\lambda_c \pi (2R)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

클러스터 헤드까지 2흡을 갖는 클러스터 멤버들의 에너지 소비량( $C_{CM}^2$ ) 역시 같은 방식으로 구할 수 있다.

$$E[C_{CM}^2] = 2 \cdot E[N_{CM}^2] \quad (21)$$

위와 같은 방식으로 한 클러스터 내 모든 멤버들의 에너지 소비량( $C_{CM}^{single}$ )은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} E[C_{CM}^{single}] &= 2\pi\lambda_s \left( 1 \cdot \int_0^R r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr + 2 \cdot \int_R^{2R} r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr \right. \\ &\quad \left. + \cdots \int_{2R}^{3R} r \cdot \exp(-\lambda_c \pi r^2) dr + \cdots \right) \\ &= \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \left( e^{-\lambda_c \pi R^2} + e^{-\lambda_c \pi (2R)^2} + e^{-\lambda_c \pi (3R)^2} + \cdots \right) \\ &= \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\lambda_c \pi (kR)^2} \end{aligned} \quad (22)$$

$C_{CM}^{single}$ 는 하나의 클러스터 내 데이터 전송 에너지 소비량을 뜻하며, 노드가  $n$ 개 존재하는 네트워크에서 클러스터는  $np$ 개 존재하므로, 이때 모든 클러스터들의 내부 에너지 소비량( $C_{CM}^{single}$ )은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} E[C_{CM}^{Total} | N = n] &= npE[C_{CM}^{Single}] \\ &= np \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\lambda_c \pi(kR)^2} \end{aligned} \quad (23)$$

따라서, 모든 클러스터 내부의 평균적인 에너지 소비량( $E[C_{CM}^{total}]$ )은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[C_{CM}^{Total}] &= E[E[C_{CM}^{Total} | N = n]] \\ &= \lambda A - p \sum_{k=0}^{\infty} e^{-p\lambda\pi(kR)^2} \end{aligned} \quad (24)$$

다) 전체 네트워크에서 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )의 계산 :

전체 네트워크에서 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )은 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )과 모든 클러스터 멤버가 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E[C_{NET}] &= E[C_{CH}^{Total}] + E[C_{CM}^{Total}] \\ &= \pi p \lambda R^2 \frac{h(h+1)(4h-1)}{6} + \lambda A(1-p) \sum_{k=0}^{\infty} e^{-p\lambda\pi(kR)^2} \\ (\text{단, } h = a/R) \end{aligned} \quad (25)$$

네트워크의 최적 클러스터 헤드 선출 확률은 전체 네트워크 에너지 소비량( $C_{NET}^{total}$ )의 최소값에 대응하는 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 가 된다.

#### IV. 모델링의 정확도 분석

본 장에서는 시뮬레이션을 이용해 본 논문에서 제안하는 모델링과 기존 모델링 기법과의 정확도를 비교, 분석한다. 모델링의 정확도 분석을 위해 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지, 모든 클러스터 내의 데이터 전송 에너지 소비량을 센서 수( $n$ )에 따라 비교한다.

표 1. 정확도 분석을 위한 파라미터 가정 값  
Table 1. The parameter values for accuracy analysis.

기호	정의	가정값
$n$	노드의 수 (개)	500, 1000, 1500
$a$	네트워크의 반지름( $m$ )	50
$A$	네트워크의 면적( $m^2$ )	$2500\pi$
$R$	통신 범위( $m$ )	10

#### 1. 시뮬레이션 시나리오

네트워크의 정확한 흡수 분석을 위해 사용된 시나리오는 비교적 간단한 네트워크 토폴로지(topology)를 이용하여 구성한다.  $N \times N$ 의 격자를 구성한 후, 포와 송분포를 따르도록  $n$ 개의 노드를 분포시킨다. 실제 센서 네트워크에서는 시뮬레이션에서 가정한  $N \times N$ 의 정형화된 토폴로지로 반드시 구성되지 않지만, 충분한 격자의 해상도(resolution)를 사용함(본 논문에서는  $200 \times 200$ 의 격자를 사용)으로써 본 논문에서 제안한 모델링과 기존 모델링 기법과의 정확도 확인 및 비교가 가능하다.

각 센서 노드는 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 에 따라 자신이 클러스터 헤드임을 확인하고, 자신이 클러스터 헤드이면 통신 범위 내에 있는 비클러스터 헤드 센서 노드에게 자신이 클러스터 헤드임을 알리는 데이터를 브로드캐스트 한다. 데이터를 받은 비클러스터 헤드 센서는 자신으로부터 최소 흡이 되는 클러스터 헤드의 멤버가 되며 이를 라우팅 캐시에 기록한다. 프로세싱 센터 역시 자신이 프로세싱 센터임을 알리는 데이터를 브로드캐스트하고, 모든 센서는 프로세싱 센터까지 최소의 흡을 가지는 경로를 자신의 라우팅 캐시(routing cache)에 기록한다.

이러한 라우팅 방식을 이용하여 모든 센서 노드들은 자신의 클러스터 헤드까지 최소 흡수 경로와 프로세싱 센터까지 최소 흡수 경로에 대한 라우팅 정보를 가지고 있다. 단, 프로세싱 센터까지 데이터를 전송할 수 없는 클러스터 헤드의 흡수는 0으로 한다. 논문에서 가정하는 시뮬레이션 에너지 소비량은 모든 센서의 라우팅 테이블에 저장된 흡수를 합산하여 구한다.

<표 1>에 시뮬레이션에서 사용된 환경을 정리했다.

#### 2. 결과 분석

시뮬레이션을 통한 성능 분석은 앞서 언급한 기존의 클러스터 모델링 기법<sup>[19]</sup>과 본 논문에서 제안한 모델링

기법, 시뮬레이션 시나리오에서 제시된 기법으로 구한 에너지 소비량을 같은 시뮬레이션 환경에서 비교한다.

#### 가) 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )

반지름이 50인 원모양의 면적에 10의 통신 범위를 가지는 센서 노드를 각각 500, 1000, 1500개 분포시킨 후, 즉 센서 필드의 면적은 일정하기 때문에 센서 노드의 밀도를 변화시키며 에너지 소비량을 비교한다. 센서 노드가 1홉 거리에 있는 다른 센서 노드에게 데이터를 전송하는데 사용하는 에너지량은 1unit으로 일정하기 때문에 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )은 각 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 흡 수의 총합으로 나타낼 수 있다.

그림 5는 센서 노드의 수에 따라 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )을 비교한 결과이다. 시뮬레이션의 에너지 소비량은 100번 실행의 평균이며, 본 논문에서 제시한 모델링 기법은 수식 (13)에 의해 계산된다. 그림에서 보듯이 시뮬레이션에 의해 계산된 에너지 소비량과 비교할 때 기존 모델링보다 높은 정확도를 보인다. 주목해야 할 점은 본 시뮬레이션에서 센서 노드의 밀도가 일정 이하로 떨어질 경우 통신이 불가능한 노드가 급격히 증가하기 때문에 적정 이상의 센서 노드 밀도가 필수적이다. 시뮬레이션의 에너지 소비량과 논문에서 제안한 모델링 기법과의 정확도( $\eta$ )는 다음과 같이 정의 한다.

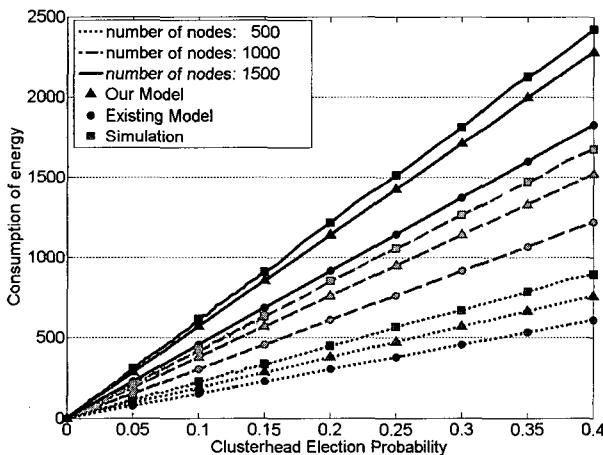


그림 5. 센서 노드 수에 따른 에너지 소비량  $C_{CH}^{total}$

Fig. 5. Energy consumption  $C_{CH}^{total}$  according to the number of nodes

표 2. 에너지 소비량 정확도

Table 2. Energy consumption accuracy.

센서의 수	제안하는 모델링	기존의 모델링
500	0.85	0.68
1000	0.90	0.72
1500	0.94	0.75

$$\eta = \frac{\text{모델링의 에너지 소비량}}{\text{시뮬레이션의 에너지 소비량}} \quad (26)$$

센서 노드의 수에 따라 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )의 정확도( $\eta$ )는 <표2>에 나타냈다.

센서 노드의 밀도에 따라 에너지 소비량 정확도( $\eta$ )는 일정하게 유지되며, 센서 노드의 밀도가 증가할수록 시뮬레이션의 에너지 소비량에 근접한다. 노드의 밀도가 작을 때 에너지 소비량 정확도가 낮은 이유는 프로세싱 센터로부터 비교적 멀리 있는 클러스터 헤드의 정확한 흡 수를 예측하기 힘들기 때문이다. 예를 들어, 분포된 센서의 밀도가 높을 경우에 프로세싱 센터로부터 거리가  $a$ 만큼 떨어진 클러스터 헤드의 흡 수는  $b/R$ 로 예측할 수 있지만, 노드의 밀도가 낮을 경우에는  $b/R$  이상의 흡 수를 가지는 경우가 많기 때문이다.

#### 나) 모든 클러스터 멤버가 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )

같은 조건에서 모든 클러스터 멤버가 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )을 비교하였다. 앞선 결과와 마찬 가지로 시뮬레이션의 에너지 소비량은 100번 실행의 평균이며, 본 논문에서 제시한 모델링 기법은 수식 (24)에 의해 계산된다.

그림 6는 센서노드의 수에 따라 모든 클러스터 멤버가 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )을 비교한 결과이며, 본 논문에서 제시된 모델링의 정확도( $\eta$ )는 센서의 밀도에 관계 없이 1에 가까움을 알 수 있다. 반면 기존의 모델링 기법의 정확도( $\eta$ )는 0.5 이하로 시뮬레이션의 에너지 소비량과 상당한 오차를 가지고 있다. 이는 2장에서 언급한 것과 같이 클러스터 멤버와 클러스터 헤드간 거리의 총합에 통신 범위를 나누어 흡 수를 계산하는 방법은 각 센서 노드의 정확한 흡 수를 반영할 수 없기 때문이다.

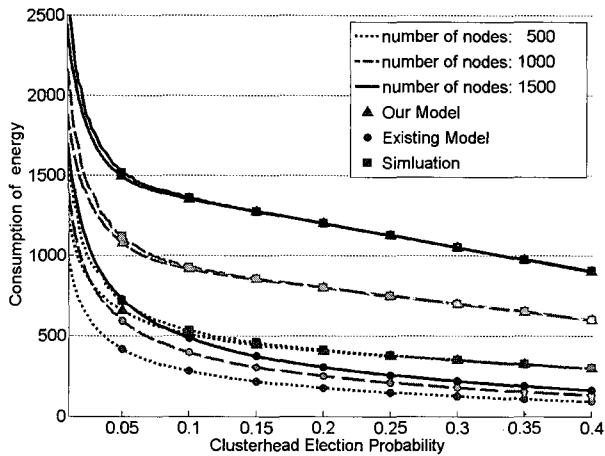


그림 6. 센서 노드 수에 따른 에너지 소비량  $C_{CM}^{total}$   
Fig. 6. Energy consumption  $C_{CM}^{total}$  according to the number of nodes.

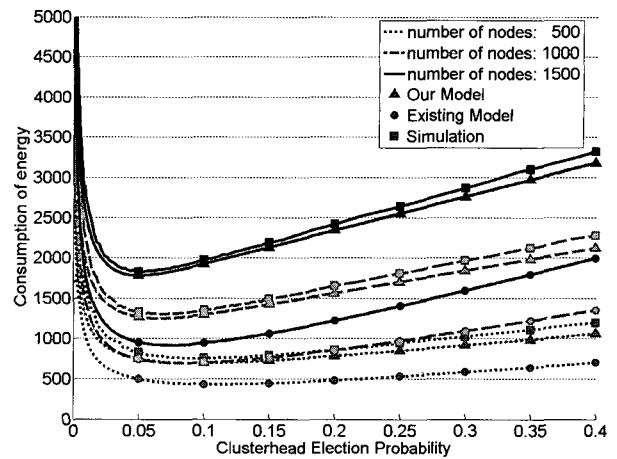


그림 7. 센서 수에 따른 에너지 소비량  $C_{NET}^{total}$   
Fig. 7. Energy consumption  $C_{NET}^{total}$  according to the number of nodes.

다) 전체 네트워크에서 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )

전체 네트워크에서 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )은 모든 클러스터 헤드가 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )과 모든 클러스터 멤버가 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CM}^{total}$ )의 합이며, 본 논문에서 제시한 모델링 기법은 수식 (25)에 의해 계산된다.

그림 7은 센서 노드 수에 따른 전체 네트워크에서 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{NET}^{total}$ )을 비교한 결과이며, 그림 8은 전체 네트워크 에너지 소비량 모델의 정밀도를 나타내었다.

그림 7과 8에서 보듯이 제안된 모델링 기법의 에너지 소비량은 시뮬레이션을 통해 구성한 실제 네트워크의 에너지 소비량과 비교할 때 90% 이상의 정확도를 가지며, 기존 모델링의 60% 대에 비춰볼 때 상당히 우수한 정확도를 지니고 있다. 또한, 센서 노드의 밀도가 증가 할수록 우수한 정확도를 보여준다. 다만, 앞서 지적한 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )의 오차가 전체적인 에너지 소비량 정확도 오차의 주된 원인이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존의 센서 네트워크 클러스터링 알

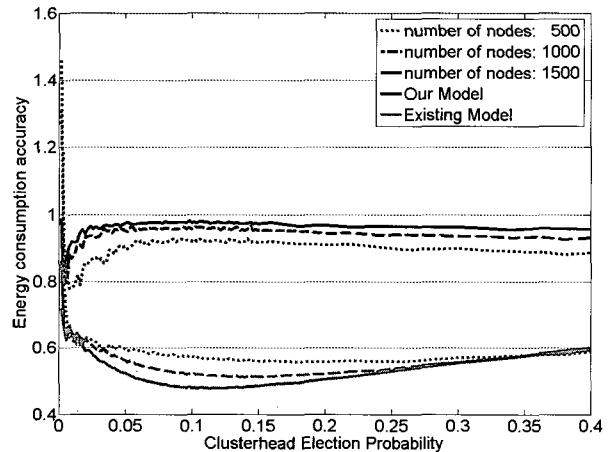


그림 8. 에너지 소비량 정확도  
Fig. 8. Energy consumption accuracy.

고리즘 소개와 함께 기존 모델링에서 정확하게 반영하지 못했던 개별 센서의 흡수 오차를 줄임으로써, 실제 네트워크 에너지 소비량을 예측하여 최소 에너지 소비 클러스터 헤드 수를 결정하는 새로운 다중 흡수 클러스터링 모델링 기법을 제안하였다.

클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지 거리 총합에 통신 범위를 나누어 흡수를 구하는 기존의 모델링 기법은 각 클러스터 멤버의 흡수를 정확하게 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 이러한 오차를 줄이기 위해 클러스터 헤드로부터 각 통신 범위에 속하는 센서 노드의 수를 구하고, 각 센서 노드가 속한 흡수를 곱함으로써 전체 클러스터 멤버의 총 흡수 수를 구하였다.

본 논문에서 제안한 모델링 기법은 에너지 소비량을 클러스터 헤드 선출 확률  $p$ 에 따라 나타내고, 에너지

소비량 정확도( $\eta$ )를 제안하여 기존 모델링 기법과 실제 에너지 소비량의 오차를 확인해 구분하였다. 특히 제안된 모델링 기법은 센서 노드의 밀도가 비교적 크고, 센서 노드의 통신 범위가 클수록 실제 에너지 소비량과 유사한 결과를 보인다.

본 논문에서는 클러스터 헤드 결정 확률에 따른 에너지 소비량 모델에 중점을 두고 서술하였다. 앞으로의 연구에서 모든 클러스터 헤드에서 프로세싱 센터까지 데이터를 전송하는데 소비하는 에너지량( $C_{CH}^{total}$ )의 오차를 줄일 수 있는 방안과 본 논문에서 제시된 모델링 기법을 이용하여 네트워크의 수명 최대화 기법 등이 계속적으로 연구되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. Akyildiz; W. Su; Y. Sankarasubramaniam; E. Cayirci. "A survey on sensor network" IEEE Communications Magazine, 40(4): 102-114, 2002
- [2] W. Heinzelman; A. Chandrakasan ; H. Balakrishnan "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks" in Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Page(s) : 3005-3014.
- [3] S. Toumpis; A.J. Goldsmith, "Capacity regions for wireless ad hoc networks", Wireless Communications, IEEE Transactions on Volume 2, Issue 4, Jul 2003 Page(s) : 736-748
- [4] A. Manjeshwar; D.P. Agrawal, "TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks" Parallel and Distributed Processing Symposium., Proc. 15th International 23-27 Apr.2001 Page(s) : 2009-2015
- [5] A. Manjeshwar; D.P. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks" Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS Apr. 2002 Page(s) : 195-202
- [6] E. J. Duarte-Melo; M. Liu. "Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks" In Proc. of IEEE Globecom, Taipei, Taiwan, 2002.
- [7] B. Warneke; M. Last; B. Liebowitz; K. Pister, "SmartDust : Communicating with a Cubic Millimeter Computer", IEEE Computer, January 2001, Page(s) : 2-9.
- [8] S. Toumpis; A.J. Goldsmith, "Capacity regions for wireless ad hoc networks", Wireless Communications, IEEE Transactions on Volume 2, Issue 4, Jul 2003 Page(s) : 736-748
- [9] S.G. Foss and S.A. Zuvey, "On a certain segment process with Voronoi clustering". INRIA, Rapport de Recherche No. 1993.
- [10] M. Geria; J.T.C. Tsai, "Multicluster, Mobile, Multimedia Radio Network" ACM/Baltzer Journal of Wireless Networks. vol. 1, (no. 3), 1995, Page(s) : 255-265
- [11] D. Baker; A. Ephremides, "The Architectural Organization of a Mobile Radio Network via a Distributed Algorithm" Communications, IEEE Transactions on Volume 29, Issue 11, Nov 1981 Page(s) : 1694-1701
- [12] A. Ephremides.; J.E Wieselthier; D.J. Baker "A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling" Proceedings of the IEEE Volume 75, Issue 1, Jan. 1987 Page(s) : 56-73
- [13] S. Basagni, "Distributed clustering for ad hoc networks", in: Proc. of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks 1999. Page(s) : 310-315
- [14] S. Basagni, "Distributed and Mobility-Adaptive Clustering for Multimedia Support in Multi-Hop Wireless Networks" Proceedings of Vehicular Technology Conference, VTC 1999-Fall, Page(s) : 889-893
- [15] M. Chatterjee; S.K. Das; D. Turgut, "WCA : A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad hoc Networks", Journal of Cluster Computing, Special issue on Mobile Ad hoc Networking, No.5,2002, Page(s) : 193-204
- [16] W. Heinzelman; A. Chandrakasan ; H. Balakrishnan "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks" in Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Page(s) : 3005-3014.
- [17] W.Heinzelman; A.Chandrakasan; H.Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks", Wireless Communications, IEEE Transactions on Volume 1, Issue 4, Oct. 2002 Page(s) : 660-670
- [18] S. Lindsey; C.S. Raghavendra "PEGASIS : Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems" Aerospace Conference Proc.2002. IEEE Volume 3, 2002 Page(s) : 3-1125 - 3-1130 vol.3
- [19] Seema Bandyopadhyay; E.J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks" Infocom 2003; IEEE

Volume 3, 30 March-3 April 2003 Page(s):  
1713-1723 vol.3

- [20] D. Stoyan ; W.S. Kendall; J. Mecke (1987)  
"Stochastic geometry and its applications", John Wiley & Son
- [21] J. Kingman; Poisson Processes, volume 3 of Oxford studies in probability. Oxford University Press, New York, 1993.

---

저자소개

---



최진철(학생회원)  
 2005년 아주대학교 전자공학과  
 학사  
 2005년 3월~현재 아주대학교  
 대학원 전자공학과 석사  
 과정

<주관심분야 : Ubiquitous Sensor Networks, Ad Hoc Networks>



이채우(정회원)  
 1985년 서울대학교 제어계측 학사  
 1988년 한국과학기술원 전자공학과  
 석사  
 1995년 University of Iowa 박사  
 1985년 1월~1985년 12월 (주)금성  
 통신 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>