

## 무선 센서 네트워크에서 효율적인 에너지 사용을 위한 클러스터링 알고리즘

나성원, 최승권, 이태우, 조용환\*

# Clustering Algorithm for Efficient Energy Consumption in Wireless Sensor Networks

Sung-Won Na , Seung-Kwon Choi , Tae-Woo Lee , Yong-Hwan Cho\*

### 요약

최근 무선 센서 네트워크(WSN)이 침입 탐지와 생태, 환경, 대기, 산업, 교통, 화재 감시 등에 다양하게 적용되어 사용되고 있다. 본 논문에서는 에너지 효율적인 클러스터링 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 수신전력을 바탕으로 하여 최적 위치의 클러스터 헤드를 선출하고 이를 통해 균일한 클러스터 사이즈를 가지도록 한다. 또한 최대 깊이가 제한된 MST를 이용한 라우팅 트리를 구성하고 멀티 홉 전송을 통해 센서 노드의 위치에 관계없이 균일한 에너지 소모를 유도하도록 하였다. 이를 통해 제안 알고리즘은 기존의 LEACH나 HEED에 비해 노드의 에너지 소모를 감소시키고 균등한 에너지 소모를 유도하여 네트워크 수명을 증대시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과 제안 알고리즘이 공평한 에너지 소모를 통해 네트워크 수명을 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

▶ Keywords : 무선센서네트워크, 클러스터링, 라우팅

### Abstract

Recently, wireless sensor networks(WSNs) are widely used for intrusion detection and ecology, environment, atmosphere, industry, traffic, fire monitoring. In this paper, an energy efficient clustering algorithm is proposed. The proposed algorithm forms clusters uniformly by selecting cluster head that optimally located based on receiving power. Besides, proposed algorithm can induce uniform energy consumption regardless of location of nodes by multi-hop transmission and MST formation with limited maximum depth. Through the above, proposed algorithm elongates

•제1저자 : 나성원 •교신저자 : 조용환

•투고일 : 2014. 4. 16. 심사일 : 2014. 4. 25. 게재확정일 : 2014. 5. 21.

\* 충북대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Engineering, Chungbuk National University)

※ 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

(This paper was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2012)

network life time, reduces energy consumption of nodes and induces fair energy consumption compared to conventional LEACH and HEED. The results of simulation show that the proposed clustering algorithm elongates network life time through fair energy consumption.

▶ Keywords : WSN, Clustering, Fouting

## I. 서 론

무선 센서 네트워크는 USN(Ubiquitous Sensor Network)을 구현하기 위한 기반 기술로서 다양한 지역의 환경을 감시하여 데이터를 수집하고 전송하는 목적으로 사용된다. 이러한 무선 센서 네트워크의 응용 분야로는 침입 탐지와 생태, 기후, 환경, 산업, 교통, 화재 모니터링 등을 들 수 있다[1][2].

무선 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드는 응용의 특성 상 저가의 노드를 대량으로 제작하여 배포하는 상황을 고려하므로 제한된 컴퓨팅 능력과 메모리를 가진다. 또한 일반적으로 전원 공급이 가능하지 않다고 가정하여 제한된 용량의 배터리로 동작하도록 구성한다[3]. 배터리는 충전이나 교체를 고려하지 않으므로 배터리의 수명이 센서 노드의 수명이라 할 수 있으며 이는 곧 네트워크의 수명과 같다.

이러한 무선 센서 네트워크의 에너지 문제를 고려하여 본 논문에서는 노드의 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 클러스터링 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 클러스터 헤드 선출을 통한 클러스터 자가 구성과 라우팅 트리 구성으로 이루어진다. 먼저 클러스터 헤드 선출은 균일한 크기의 클러스터를 구성하기 위하여 수신 전력을 통해 센서 노드간의 거리를 측정하고 이를 기반으로 최적 위치의 클러스터 헤드를 결정한다. 이를 통해 클러스터를 자율적으로 구성함과 동시에 균일한 크기의 클러스터를 구성하도록 하였다. 클러스터 헤드 선출과 구성이 완료되면 각 클러스터로부터 BS(Base Station)까지 라우팅 경로를 구성하며 이는 트리의 최대 깊이가 제한된 MST(Minimum Spanning Tree)를 이용한다. BS에서 클러스터 헤드로 직접 수집된 데이터를 전송하는 싱글 홉 전송의 경우는 클러스터 헤드의 출력 신호 전력을 많이 소모하며 BS에서 멀리 위치한 클러스터 일수록 에너지가 빠르게 소모되는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 상기의

라우팅 트리를 이용한 멀티 홉 전송을 이용하며 이를 통해 클러스터 헤드의 위치에 관계 없이 균일하게 에너지를 소모하도록 한다. 일단 클러스터가 형성되면 라우팅 트리가 구성되면 이를 이용하여 수집된 데이터를 BS로 전달하게 되며 클러스터 재선출은 기존에 형성된 클러스터 내에서만 이루어지게 된다. 제안 알고리즘을 통해 센서 노드들의 에너지 소모를 감소시킬 수 있음은 실험을 통해 확인하도록 한다.

## II. 관련 연구

무선 센서 네트워크가 활용되는 전형적인 분야는 원격 환경 감시이다. 이러한 환경에서 인접한 센서 노드들의 데이터는 서로 관련이 있기 때문에 동일한 이벤트에 대한 중복 데이터가 생성될 수 있다. 무선 센서 네트워크에서 중복 데이터를 효율적으로 제거할 수 있는 방법으로는 클러스터링 기법이 가장 효과적이며 대표적인 기법으로는 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)가 있다[4]. LEACH에서는 클러스터 헤드가 중복된 데이터를 병합하여 기지국으로 전송하도록 한다.

LEACH에서는 다음과 같은 사항을 가정하고 있다. 먼저 LEACH는 기본적으로 모든 노드들이 BS까지 직접 데이터를 전송할 충분한 전력을 가지고 있고 각 노드는 송신 전력을 변동할 수 있는 전력 컨트롤이 가능하다고 가정하고 있다. 이는 센서 필드의 어느 지역에 클러스터 헤드가 위치하더라도 BS와 직접 통신이 가능하여 효율적이라고 생각하였기 때문이다. 또한 노드들은 다양한 MAC 프로토콜을 지원하는데 필요한 계산 전력을 가지고 있고 신호 처리 함수를 수행하는데 필요한 계산 전력을 가지고 있다고 가정하여 노드의 에너지 상황을 유추할 수 있도록 하였다.

LEACH에서는 여러 센서 노드들이 모여 하나의 클러스터를 구성하며 클러스터 내의 센서 노드들 중 하나는 클러스터 헤드가 된다. 모든 멤버 노드들은 자신의 데이터를 클러스

터 헤드에게 보내고, 클러스터 헤드는 이 데이터들을 수신한 후 병합하여 기지국으로 전송한다. 여기서 하나의 센서 노드가 계속해서 클러스터 헤드의 역할을 수행한다면 이 노드는 클러스터 내의 다른 노드들에 비해 매우 빠르게 에너지를 소모하게 될 것이다. 따라서 LEACH에서는 센서 노드들의 에너지 소모를 균등하게 하기 위하여 클러스터 헤드를 라운드마다 랜덤하게 선출하여 교체한다. 다음의 식은 클러스터 헤드 재선출을 위한 식이다.

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

여기서,  $T(n)$ 은 클러스터 헤드 선출을 위한 임계값,  $P$ 는 전체 노드 중 클러스터 헤드의 비율,  $r$ 은 현재 라운드, 그리고  $G$ 는 클러스터 헤드가 아닌 센서 노드들의 집합을 나타낸다. 노드가  $r \bmod 1/p$  라운드 동안 클러스터 헤드였다면 클러스터 헤드 후보에서 제외되며 클러스터 헤드 후보 중 계산된 임계값  $T(n)$ 와 0과 1사이에서 생성된 난수 값과 비교하여 임계값이 더 큰 경우 클러스터 헤드로 선정된다. 한번 클러스터 헤드로 선택된 노드는  $r \bmod 1/p$  라운드 이후에 다시 클러스터 헤드가 될 수 있다. LEACH에서 클러스터 헤드의 비율  $P$ 는 0.05 인 것으로 나타나 있다. 즉, 전체 노드의 5%가 클러스터 헤드일 때 최적의 성능을 보여준다.

그림 1은 LEACH에서 동작하는 세부적인 타임 라인의 예를 보여주고 있다. 각 라운드는 크게 클러스터가 구성되는 설정(setup) 단계와 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성되는 지속 상태(steady-state) 단계로 이루어진다. 셋업 단계를 형성하는 시간은 안정 단계를 수행하는 시간에 비해 아주 적은 시간이 소요된다. 안정 단계는 여러 개의 프레임으로 구성되며, 각 프레임에는 클러스터를 형성하는 센서 노드들이 수집한 정보를 자신들에게 할당된 정해진 시간에 클러스터에 송신한다.

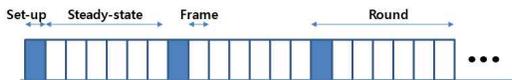


그림 1. LEACH의 타임 라인  
Fig 1. Time line of LEACH

### III. 클러스터링 알고리즘 제안

#### 1. 제안 기법 개요

센서 네트워크의 노드들은 항공기나 이동 차량을 통해 빠르게 분산 배치될 수 있으며 노드들은 BS로부터의 거리나 상대적인 위치에 대한 정보를 전혀 가지지 못하고 전체 네트워크에 대한 지식이 없는 상태로 클러스터 헤드를 선출하고 클러스터를 구성해야 하는 문제가 있다[5]. 물론 위치 측정을 위한 별도의 장비를 배치하거나 개별 노드에 GPS를 장착하는 방법도 고려해 볼 수 있으나 가격과 네트워크 오버헤드의 문제로 현실적인 방법은 아니다.

또한 대표적인 클러스터링 기반의 계층적 라우팅 프로토콜인 LEACH는 싱글 홉 방식으로 데이터 패킷을 BS로 전송한다. 하지만 센서 노드가 데이터를 전송할 수 있는 범위는 출력 전력의 제약으로 인해 응용에 따라서는 클러스터 헤드나 싱크 헤드가 전송 범위를 벗어나 직접 데이터를 전송하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 멀티 홉 전송을 이용하는 라우팅 방법이 필요하다.

이러한 문제를 고려하여 본 장에서는 에너지 효율적인 클러스터링 알고리즘을 제시하고자 한다. 제안 알고리즘은 센서 필드 전반에 걸쳐 클러스터 헤드가 균등한 거리를 유지하면서 선출되도록 한다. 이는 모든 클러스터 헤드의 부하를 동등하게 유지하도록 하여 네트워크의 수명을 증대시킬 수 있다. 또한 센서 노드들은 어떠한 중앙 집중적인 BS의 제어 없이 자율적으로 클러스터 구성을 수행할 수 있도록 하였으므로 위치 측정 장비나 알고리즘이 필요하지 않다. 이러한 방식으로 적은 에너지 소비와 작은 오버헤드로 지역적 클러스터링을 가능하게 하고 하나의 노드 또는 클러스터에 문제가 발생하더라도 이를 극복하고 센서 네트워크 본연의 기능을 수행할 수 있도록 한다.

자율적인 클러스터 헤드 선출과 클러스터 구성이 완료된 후에 노드들이 수집한 데이터를 전송할 때는 미리 결정되어 있는 라우팅 경로를 이용한다. 제안 기법은 기존의 기법들과 달리 라운드마다 클러스터 재구성을 수행하지 않는다. 즉 네트워크 토폴로지에 변화가 없으므로 고정된 경로를 이용해 데이터를 전달할 수 있다. 이를 위해 라우팅 트리의 생성 방법을 제안한다.

본 장에서 제안하는 클러스터링 기법은 IEEE 802.15.4와 802.11x 프로토콜 표준에 적용할 수 있다. 802.15.4의

경우 저속 개인 영역 네트워크를 위한 프로토콜로 0-25dBm 까지 전력을 조절할 수 있으며 이러한 특성을 활용하여 제안 기법은 멀티홉 전송을 통해 전송 거리를 줄이고 출력 전력을 낮추어 에너지 소비를 감소시킬 수 있다.

## 2. 클러스터 구성

클러스터 구성을 위한 헤드 선출은 제안하는 클러스터링 알고리즘의 첫 단계로, 초기 BS에서 시작하여 인접한 클러스터 헤드와 각 클러스터의 범위에 기반한 상대적 거리를 이용하여 점진적으로 클러스터를 형성하여 가는 방법이다. 클러스터 헤드들은 가능한 동등한 부하를 가지도록 하였으며 한번 형성된 클러스터를 지속적으로 이용하도록 하였다. 이를 통해 매 라운드마다 클러스터링을 수행해야 하는 다른 기법들에 비해 클러스터링의 횟수를 줄여 이에 따른 오버헤드와 에너지 소모를 감소시키고자 한다.

클러스터의 구성은 BS에서 시작한다. 앞에서 언급한 바와 같이 제안 기법은 중앙 집중형 클러스터 구성은 아니므로 BS가 센서 필드 내의 센서 노드들에 대한 정보를 알고 있어야 할 필요는 없다. BS는 클러스터 구성(FORM\_CLUSTER\_MSG) 신호를 통해 클러스터 구성의 시작을 알린다. 센서 필드내의 센서 노드들은 배치된 직후 listen 상태로 BS 또는 선정된 클러스터 헤드로부터 FORM\_CLUSTER\_MSG 신호가 수신되기를 기다린다. FORM\_CLUSTER\_MSG는 BS에서 시작하여 이웃 노드들로 브로드캐스트되며 여기에는 자신의 노드 ID, 클러스터 ID, 라우팅을 위한 BS에서 클러스터 멤버 노드까지의 최대 홉 수를 포함하고 있다.

BS와 인접한 노드들은 브로드캐스트 신호를 수신하고 수신 신호의 강도를 결정한다. 이들 중 수신 신호의 강도  $E_r$ 이 다음의 식을 만족하는 노드가 새로운 클러스터 헤드 후보로 선정된다.

$$E_{2cr} - \alpha < E_r < E_{2cr} + \alpha \quad (2)$$

여기서  $cr$ 은 클러스터의 반경이며  $2 \times cr$ 은 다음 클러스터 헤드의 최적 위치이다. 따라서 수신신호의 강도  $E_r = E_{2cr}$ 인 노드는 다음 클러스터 헤드가 될 수 있다.

그러나 실제 노드는 무작위로 배치되므로 한 노드에서 정확하게  $2cr$ 만큼 떨어진 위치에 다른 센서 노드가 존재할 확률은 희박하다. 따라서  $2cr + \alpha$ 와  $2cr - \alpha$  사이에 위치하는 노드들을 클러스터 헤드 후보로 볼 수 있으며 여기서  $\alpha$ 는 노드의 밀도에 따라 결정되는 거리 상수이다.

이에 따라  $E_{2cr} + \alpha$ 은 클러스터 헤드로 선출될 수 있는 수신 신호의 최대값,  $E_{2cr} - \alpha$ 는 수신 신호의 최소값이다. 이는 새로운 클러스터 헤드가 BS로부터  $2cr + \alpha$ 와  $2cr - \alpha$  사이의 거리에 위치하는 것을 보장한다.  $E_{2cr} + \alpha$ 와  $E_{2cr} - \alpha$ 는 고정된 프로토콜 파라미터로 다음과 같이 거리의 제곱에 반비례하여 결정된다.

$$E_{2cr} \pm \alpha \propto 1 / (cr \pm \alpha)^2 \quad (3)$$

여기서 전력은 거리의 제곱에 반비례하므로 고정 출력에서  $cr + \alpha$ 와  $cr - \alpha$ 의 제곱에 환경에 따른 적절한 값을 곱해 빼주면 최적의 클러스터 헤드를 찾기 위한 수신 출력 값의 범위가 나오게 된다. 새로운 클러스터 헤드 후보가 결정된 후에 각 후보들은 새로운 클러스터 멤버들을 탐색하기 위해  $cr$  범위 내로 클러스터 헤드 선정 신호(HEAD\_ADV\_MGS)를 전송한다.

센서 노드들은 선정 신호를 수신하고 이를 클러스터 헤드로 받아들인다. 그리고 클러스터 헤드에 자신의 노드 ID를 포함한 확인응답(ACK) 신호를 전송한다. 이들은 클러스터 헤드까지의 거리를 수신 신호의 에너지 레벨을 통해 대략적으로 추측할 수 있다. 한번 클러스터 헤드 후보 노드와의 거리를 알게 되면 이 거리에 적합한 데이터 율과 출력 전력을 조절하고 슬립 모드로 변환하여 에너지를 보존한다.

만일 두 개의 클러스터 헤드가 서로의 HEAD\_ADV\_MGS 신호를 수신하였다면 둘 다 클러스터 헤드가 되기에는 너무 가까이 위치한 것이다. 따라서 이중 하나는 제거될 수 있으며 노드가 두 개 이상의 클러스터 헤드로부터 선정 신호를 수신하면 이중 수신 전력이 높은 신호의 노드를 선택한다. 두 개의 클러스터 헤드가 근접하여 위치하더라도 멤버 노드의 수가 작은 클러스터는 후에 해체되며 클러스터 헤드를 포함한 모든 노드들은 다시 자신의 클러스터 헤드를 찾아 멤버로 가입하게 된다.

확정된 클러스터 헤드는 새로운 클러스터 헤드 후보 노드를 찾기 위해 탐색 신호를 전송하며 계속해서 다음 단계의 클러스터를 구성하기 시작한다.

이미 클러스터 헤드로 선정되었거나 멤버로 결정된 노드들은 클러스터 헤드 탐색이나 선정 신호를 수신하면 이를 무시한다. 이러한 과정은 모든 노드들이 클러스터에 소속될 때까지 수행된다.

클러스터의 크기는 클러스터 헤드 선정 신호의 도달거리  $cr$ 에 영향을 받는다. 따라서 일반적으로 반지름  $cr$ 을 가지는 클러스터가 생성될 것이나 하나의 클러스터 내에 멤버 노드의

개수는 센서 필드의 노드 밀도에 따라 달라진다. 클러스터 멤버 노드의 최소 개수는 클러스터 멤버 노드의 수가 미리 정해진 최소 클러스터 수보다 작다면 클러스터를 해체하고 이 클러스터 내의 모든 노드들은 멤버십 탐색 신호 (MEMBERSHIP\_SEARCH\_MSG)를 전송한다. 이 신호를 수신한 가장 가까운 클러스터 헤드는 응답 신호를 전송하여 새로운 클러스터에 멤버로 가입하면 된다. 또한 미리 정해진 Timeout 시간까지 어떠한 신호도 받지 못한 노드들도 MEMBERSHIP\_SEARCH\_MSG를 전송하여 가장 가까운 클러스터 헤드를 찾아 이 클러스터의 멤버로 가입한다.

상기의 과정을 통하여 BS에서 시작한 클러스터의 구성은 BS에서 가장 멀리 위치한 노드들로 계속해서 확장하여 나간다. 각 노드들은 둘 이상의 클러스터 범위 내에 중복되거나 어느 클러스터에도 포함되지 않을 수도 있지만 이는 수신 전력을 통한 클러스터 선택과 멤버십 탐색을 통해 해결할 수 있다. 이러한 과정을 통해 모든 노드들이 클러스터에 가입하면 클러스터의 구성이 완료된다.

클러스터 구성 단계를 정리해보면 그림 2와 같다.

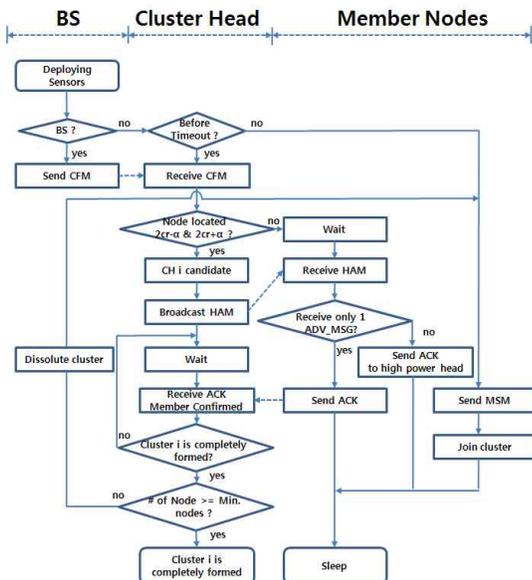


그림 2. 헤드 선출을 통한 클러스터 구성 단계  
Fig 2. Cluster formation phase through head election

### 3. 라우팅 트리 구성 및 클러스터 헤드 재선출

초기 클러스터 헤드 선출과 클러스터 구성이 완료되면 다음 단계로 클러스터 헤드를 경유하여 BS까지 연결되는 라우팅 트리를 구성하게 된다. LEACH의 경우처럼 클러스터 헤

드가 직접 BS로 데이터를 전송하는 방법이 있으나 이는 BS에서 멀리 위치한 클러스터일수록 최대 전력으로 데이터를 전송해야 하므로 에너지의 낭비가 심하다. 이에 반하여 라우팅 트리를 구성하여 데이터를 전송하는 멀티 홉 방법을 사용하면 각 클러스터 헤드들은 데이터를 수집하여 다음 클러스터 헤드까지만 데이터를 전송하면 되므로 훨씬 작은 전력으로 데이터 전송이 가능하다. 또한 이러한 멀티 홉 전송은 센서 필드가 큰 경우 등에서는 필수적으로 사용될 수밖에 없다.

본 논문의 제안 기법은 클러스터의 구성이 완료되면 이를 최적의 클러스터 구성으로 간주하고 LEACH나 HEED(6) 등의 기법들과 달리 다시 클러스터링을 수행하지 않는다. 이는 클러스터를 재구성하는데 소요되는 시간과 에너지를 절약하기 위함이다. 라운드와 함께 클러스터의 구성이 변경되면 라우팅 테이블도 매번 다시 생성해야 하므로 기존 기법들은 라우팅 없이 바로 BS로 데이터를 전송하는 방식을 사용하였다. 그러나 제안 기법은 한번 생성된 클러스터를 라운드에 따라 재구성하지 않고 계속 이용하므로 멀티 홉 전송을 적용하면서 라우팅 테이블을 생성하고 이를 이용하는 것이 가능하다.

경로의 생성은 클러스터 단위로 이루어지며 하나의 클러스터 내에 위치하는 노드들은 모두 동일한 라우팅 테이블을 가진다. 즉 데이터 전송의 경로는 클러스터 단위로 유지되고 이는 클러스터 헤드가 변경되더라도 데이터를 포워딩해야 할 다음 클러스터는 같다는 의미이다. 다음의 그림 3은 제안 기법에서 사용하는 라우팅 경로의 개념을 보이고 있다.

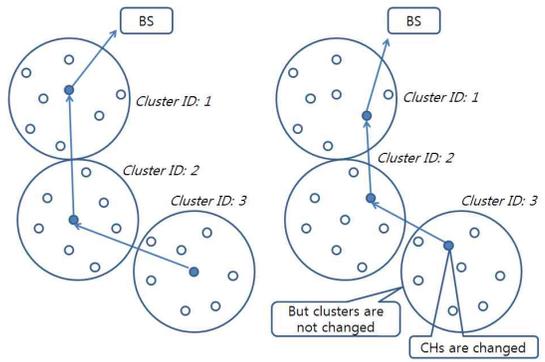


그림 3. 클러스터 헤드 재선출 후의 라우팅 경로  
Fig 3. Routing path after cluster head re-election

라우팅 트리의 생성 과정은 다음과 같다. 일단 클러스터의 구성이 완료 되면 각 클러스터 헤드는 자신의 클러스터 ID를 이웃 클러스터 헤드들에게 브로드캐스트 한다. 이를 수신한 이웃 클러스터 헤드는 수신 신호의 강도를 고려하여 다른 클

러스터들과의 경로에 대한 비용함수  $C_{ij}$ 를 다음의 식4과 같이 설정한다.

$$C_{ij} = Er_{ij} \quad (4)$$

여기서  $Er_{ij}$ 는 클러스터 헤드 i와 j간의 수신 전력이다. 제안하는 분산 클러스터링의 클러스터 구성과정에서 가능한 균등한 크기로 클러스터를 구성하였으나 최대 상수  $2\alpha$  만큼 클러스터의 반경에 차이가 있을 수 있다.  $\alpha$  값이 증가하면 클러스터의 크기 편차도 증가하므로 각 클러스터 헤드마다 거리는 많은 차이를 보일 수도 있다. 따라서 노드의 에너지 소모와 직접적인 연관이 있는 두 클러스터 간의 전송 에너지를 트리 구성의 비용함수로 사용함이 적절할 것이다. 비용의 계산이 완료되면 각 이웃 클러스터 헤드들과의 상대적인 거리와 연결 정보를 알 수 있게 된다.

모든 클러스터 헤드들이 라우팅을 위한 정보를 수집하였다면 BS는 클러스터 헤드들을 따라 라우팅 트리를 생성할 수 있다. 라우팅 트리의 생성은 미니멈 스패닝 트리(MST)를 이용하며 BS에서 시작하여 트리를 구성하며 이 과정은 Prim의 알고리즘을 이용한다. 다만 라우팅 트리의 깊이가 증가하면 중간 경유노드들이 많아지게 되며 이는 각 노드에서 데이터를 처리하는데 필요한 에너지가 증가함을 의미한다. 따라서 최대 트리 깊이를 제한해야 할 필요가 있으며 이는 다음의 식과 같이 결정된다.

$$\text{Max. tree depth} = \lfloor \frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{2cr} \times r \rfloor \quad (5)$$

```

// MST Generation
// Assume that the network has minimum 1 node

Routing_Tree = {BS} // Starting from BS, path is empty
for (T = 0; # of path of T < n-1 ; add (CHi) to T)
{
    Let CHi be a least-cost path such that CHi ∈
    Routing_Tree
    & CHi !∈ Routing_Tree
    If (Path=0
    break)
    If (Routing Tree Depth > Max. depth
    add CHi to CHi-1 of Routing_Tree as a child)
    Else (add CHi to Routing_Tree)
}
If (# of path of T < (n-1)
"There is no MST")
    
```

그림 4. 라우팅 트리 구성  
Fig 4. Routing tree formation

식 5에서  $x$ 는 센서 필드의 가로 길이,  $y$ 는 센서 필드의 세로 길이이고  $r$ 은 클러스터 중첩 상수이다. 식 5의 분자는 센서 필드의 최대 대각 거리를 나타내며 이를 클러스터의 평균 지름으로 나누면 센서 필드내의 최대 거리에 위치할 수 있는 클러스터의 수를 구할 수 있다. 여기서 트리의 깊이는 정수이므로 floor function을 사용하여 최대 트리 깊이를 정수로 만들어 사용한다. 따라서 라우팅 트리의 최대 깊이는 센서 필드 내에서 가장 긴 거리에 위치하는 클러스터의 수와 같고 이를 통해 불필요하게 라우팅 트리의 깊이가 증가하는 것을 방지한다. 라우팅 트리의 구성은 그림 4와 같다.

클러스터 헤드 재선출은 LEACH와 유사하게 이전에 클러스터 헤드 역할을 수행하였는지를 기반으로 선출한다. 다만 제안 기법은 전체 클러스터를 재구성하지 않으므로 하나의 클러스터 내에서만 클러스터 헤드 재선출이 수행되며 선출된 클러스터 헤드는 상위 클러스터 헤드에 자신의 노드 ID 등의 정보를 알려주고 TDMA 슬롯을 할당 받아 데이터를 전송한다.

#### IV. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 제안 알고리즘에 대한 성능 평가를 위한 환경과 실험 결과에 대한 분석을 기술한다.

##### 1. 실험

실험을 위한 센서 노드의 에너지 모델은 그림 5와 같다. 송신을 위한 에너지 모델은 두 가지의 채널로 분류할 수 있는데 하나는 자유 공간 모델(Free space model)이고 다른 하나는 다중경로 페이딩 모델(Multi-path fading model)이다. 거리가 임계값  $d_0$ 보다 작을 경우에는 자유 공간 모델을 사용하고 이보다 큰 경우에는 다중경로 페이딩 모델을 사용한다.

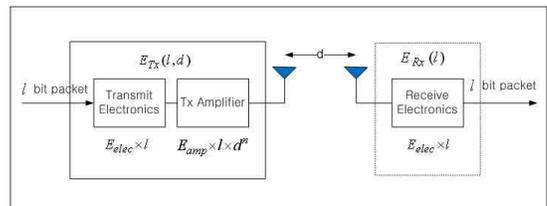


그림 5. 무선 센서 노드의 에너지 소비 모델  
Fig 5. Energy consumption model of WSN

데이터 전송과 수신에 필요한 에너지는 다음과 같다[4].

$$E_{Tx}(l,d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l,d)$$

$$= \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{fs} d^2, & d < d_0 \\ l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l \times E_{elec} \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 전송거리,  $l$ 은 전송하려는 비트 수, 그리고  $E_{elec}$ 은 디지털 코딩, 변조, 필터링 그리고 신호의 스프레딩에 의존한다.  $fs$ 는 자유공간 채널 모델,  $mp$ 는 다중경로 채널 모델을 나타낸다(7). 임계값  $d_0$ 는 식 8과 같다.

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (8)$$

상기 식을 이용하여 계산한  $d_0$ 의 한계 값은 약 8.7m이고 이  $d_0$ 값을 이용하여 에너지 소모량 계산을 위한 자유공간 채널 모델을 사용할 것인지, 다중경로 채널 모델을 사용할 것인지를 결정한다.

실험을 위한 가정은 다음과 같다. 무선 센서 네트워크에 대한 가정으로는 매체는 무선(Wireless Channel, Wireless Physical), MAC 프로토콜은 802.15.4, 트래픽 발생 모델은 CBR(Constant Bit Rate)로 가정하고 전송되는 패킷의 크기는 4000 Bit로 설정하였다.

노드와 센서 필드에 대해서는 초기 전력은 0.5J, 센서 필드 영역은 100m×100m, 노드의 수는 400개를 사용하였다.

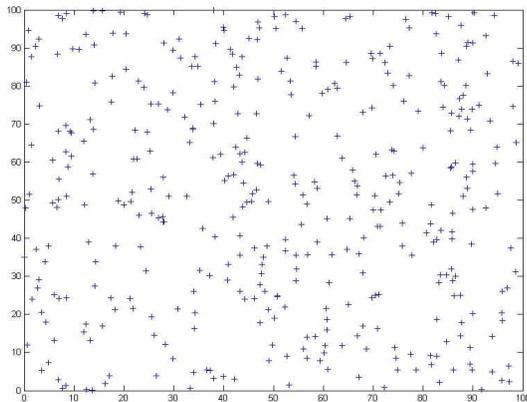


그림 6. 센서 노드의 배치도(100m×100m, 노드 수 400개)  
Fig 6. Sensor nodes deployment(100m×100m, number of nodes=400)

클러스터의 수는 30개를 기본으로 하였다. LEACH에 의하면 클러스터 수는 전체 노드 수의 5%가 최적인 것으로 알려져 있으나 제안 기법은 멀티 홉 전송을 이용하는 차이가 있으며 최적의 클러스터 수는 후에 설명하기로 한다. 이에 따른 클러스터 형성 예시는 그림 7에 나타내었다.

무선 환경에서 사용된 파라미터들은 [4]에서 정의된 내용을 참조하여 이용하였으며 NS-2와 MATLAB 2012를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 제안 기법과의 비교를 위하여 LEACH[4]와 HEED[6] 기법을 함께 구현하여 실험 결과를 비교하였다.

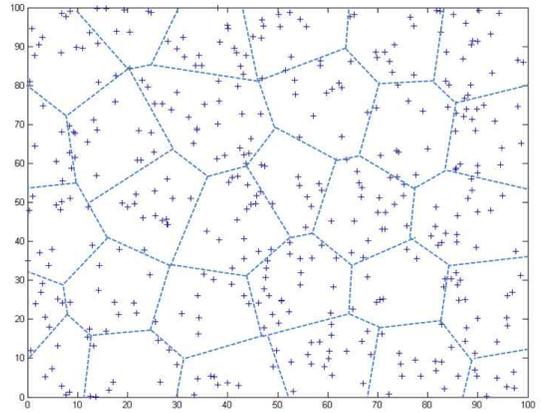


그림 7. 클러스터 형성 예시(100m×100m, 노드 수 400개, 클러스터 수 30개)

Fig 7. Example of cluster formation(100m×100m, number of nodes=400, number of cluster =30)

제안 알고리즘의 성능은 노드의 에너지 잔량, 생존 노드 수, 그리고 BS에서 수신한 데이터의 총량 등에 대한 실험을 통해 확인해 보았다.

## 2 결과 및 분석

### 2.1 라운드별 노드의 에너지 잔량

다음의 그림 8, 9, 10은 제안 알고리즘의 10라운드, 200라운드, 750라운드의 노드별 에너지 잔량을 보인 것이다. 초기 에너지는 0.5J로 동일하게 시작하지만 클러스터 구성과 클러스터 헤드 역할을 수행하는 노드들은 더 많은 에너지를 사용하게 된다. 라운드가 증가할수록 노드의 에너지는 점점 더 감소할 것이며 제안 기법의 경우 약 780라운드에서 모든 노드의 에너지가 소모되는 것으로 나타났다.

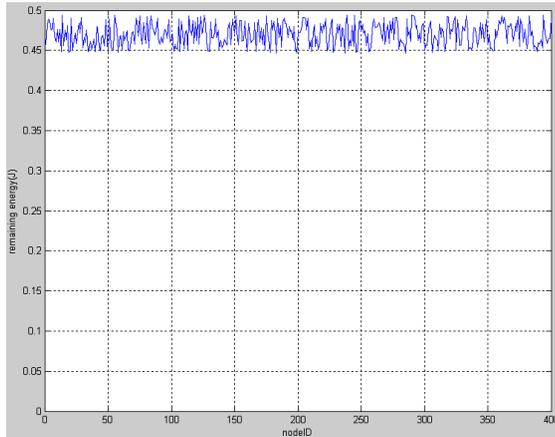


그림 8. 10라운드 후의 노드별 에너지 잔량  
Fig 8. Energy remains of each node after 10 rounds

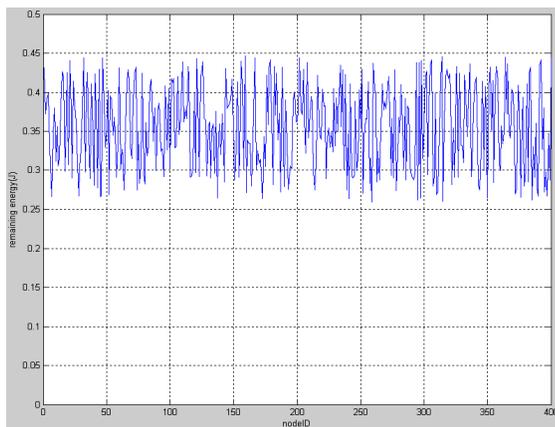


그림 9. 200라운드 후의 노드별 에너지 잔량  
Fig 9. Energy remains of each node after 200 rounds

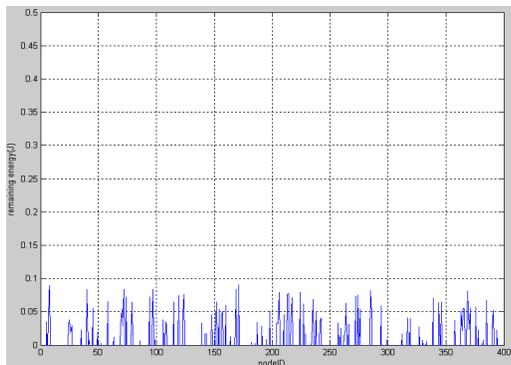


그림 10. 750라운드 후의 노드별 에너지 잔량  
Fig 10. Energy remains of each node after 750 rounds

### 2.2 클러스터 수에 따른 네트워크 수명

다음의 그림 11은 클러스터의 수를 증가시키면서 네트워크 수명을 라운드 단위로 측정된 것이다. 여기서 노드의 수는 400 노드와 600 노드의 두 가지 경우에 대하여 실험해 보았으며 처음으로 수명이 다한 센서 노드가 발생하는 시점을 기준으로 하였다. 이는 동일한 센서 필드(100m×100m)에서 노드 밀도에 따른 변화를 알아보기 위함이다. 제한한 분산 클러스터링 기법에서 클러스터의 수는 클러스터의 반경  $cr$ 을 조절함으로써 결정될 수 있다.

최적의 클러스터의 수는 네트워크의 크기, 노드 밀도 등에 영향을 받으며 특히 제한 기법과 같이 멀티 홉 전송을 사용하는 경우 라우팅 트리의 깊이(depth)와 관련이 있다. 클러스터의 수가 많으면 데이터 전송시 작은 전력으로 다음 노드로 데이터를 전송할 수 있으나 트리의 깊이가 깊어지면서 경우노드의 수가 증가하게 된다. 반대로 클러스터의 수가 작으면 데이터 전송시 더 큰 전력으로 패킷을 보내야 하지만 경우노드의 수가 작아지므로 몇몇 노드의 에너지만 사용하면 된다. 이러한 이유로 클러스터의 수는 많거나 적다고 성능이 우수하다고 할 수는 없으며 클러스터링 기법에 따라 모두 다른 최적의 클러스터 수를 보이게 된다. 예를 들어 LEACH의 경우 전체 노드 수의 5%의 클러스터를 가질 때 가장 성능이 좋은 것으로 나타나 있다.

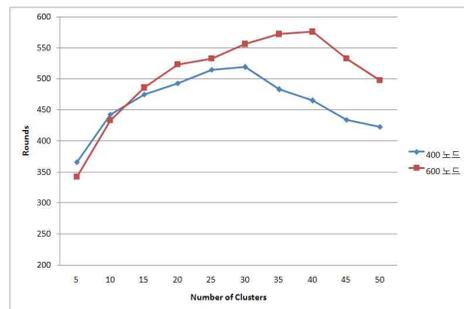


그림 11. 클러스터 수의 변화에 따른 네트워크 수명  
Fig 11. Network life time according to the number of cluster changes

상기의 그림은 전체 노드 중 첫 번째 노드의 수명이 다하는 시간을 라운드 단위로 측정된 것으로 400 노드인 경우 클러스터의 수가 25~30개 정도일 때, 600 노드인 경우 클러스터의 수가 35~40개 정도일 때 가장 긴 수명을 보여주었다. 이는 LEACH에 비하면 17~50% 정도 많은 클러스터 수이다.

이러한 결과를 보여주는 이유는 멀티 홉 전송을 들 수 있

다. LEACH의 경우 에너지 효율성을 위해 한 번에 많은 데이터를 멤버 노드들로부터 수집하고 BS로 전송해야 하는데 반하여 제안 기법은 멀티 홉 전송을 사용하여 전송하므로 여러 개의 클러스터 헤드들이 더 작은 전력으로 데이터를 전송하게 된다. 제안 기법의 경우 최적의 클러스터 수의 결정은 매우 중요한데 클러스터의 크기가 크면 인트라 클러스터 라우팅에서 에너지 소모가 크고 인터 클러스터 라우팅에서는 에너지 소모가 작은 경향을 보인다. 또한 반대로 클러스터의 크기가 작으면 인트라 클러스터 라우팅에서의 에너지 소모는 작고 인터 클러스터 라우팅의 에너지 소모는 증가하게 된다. 그러나 인터 클러스터 라우팅의 경우 클러스터의 수가 많으면 클러스터 헤드의 수도 많고 에너지 소모를 많은 클러스터 헤드들이 분담하므로 개별 노드의 에너지 소모는 그다지 크지 않다. 따라서 제안 기법의 경우 LEACH에 비해 더 작은 클러스터에서 더 작은 전력으로 라우팅 경로 상의 다음 노드로 데이터를 전송하는 것이 더 효율적인 것을 알 수 있다.

또한 노드 밀도가 높은 경우 클러스터 수에 따른 노드들의 에너지 소모량이 영향을 더 많이 받는 것을 볼 수 있었다. 이는 동일한 영역에서 많은 노드들이 배치될 경우 클러스터의 수가 작으면 작을수록 하나의 클러스터에 포함되는 노드의 수는 많아지게 된다. 같은 클러스터 내의 노드들을 동일한 이벤트를 감지하고 데이터를 전송하는데 에너지를 소모하며 클러스터 헤드는 이를 수신하고 처리하는데 더 많은 에너지를 소모하게 된다. 이에 따라 400 노드일 때 보다 600 노드일 때 클러스터 수가 10개 이하인 경우 오히려 수명이 더 짧아진 것으로 나타났다.

### 2.3 라운드별 생존 노드 수 비교

다음의 그림 12는 시간에 따라 변경되는 생존 노드의 수를 제안 알고리즘과 LEACH, HEED와 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 LEACH, HEED, 제안기법의 노드가 처음으로 사망하는 시간은 각각 480라운드, 510라운드, 520라운드의 결과를 보였다. 마지막 노드가 사망하는 시간은 역시 각각 740라운드, 770라운드, 780라운드로 나왔다. 이는 전체 구간에서 기존의 LEACH나 HEED에 비해 약간 우수한 결과를 보여주고 있다. 제안 알고리즘은 전체 센서 필드에 걸쳐 균일한 클러스터를 구성하여 사용하며 클러스터링의 메시지 오버헤드를 기존 기법들에 비해 줄여 에너지 효율을 높일 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

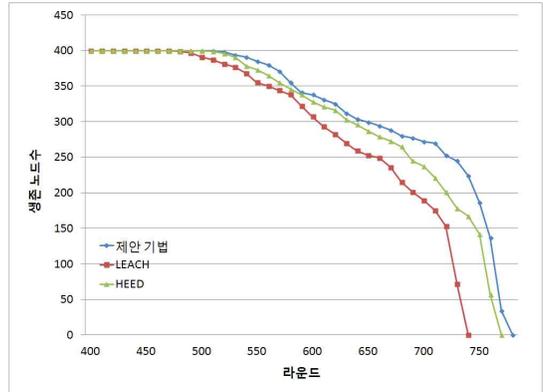


그림 12. 라운드 별 생존 노드수 비교  
Fig 12. Comparison of alive nodes in each round

### 2.4 BS에서의 데이터 수신량 비교

다음은 800라운드 동안 기지국으로부터 수신된 데이터 량을 보인 것으로 LEACH 및 HEED와 비교해 볼 때 제안 알고리즘이 가장 많은 데이터를 BS로 전송한 것을 알 수 있다. 기존의 평면 라우팅 기법의 경우 이벤트 발생시 여러 인접 노드에서 수집한 이벤트 정보가 중복되어 전송되는 문제점이 있었다. 그러나 계층적 라우팅인 LEACH와 HEED, 그리고 제안 알고리즘은 클러스터 헤드에서 중복 이벤트 데이터를 병합하여 하나의 데이터를 BS로 전송하게 된다. 즉 데이터 퓨전을 통해 중복 이벤트에 대한 데이터를 없앨 수 있다. 따라서 BS는 하나의 이벤트에 대하여 하나의 데이터만을 수신하므로 동일한 확률로 이벤트가 발생한다고 가정할 때 BS에서의 데이터 수신량은 많은 것이 성능이 우수하다고 할 수 있다.

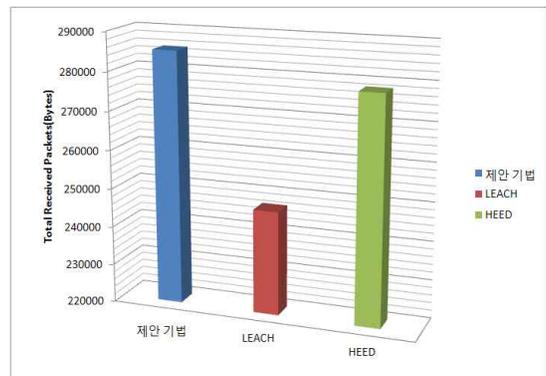


그림 13. BS에서의 데이터 수신량 비교  
Fig 13. Comparison of received data at BS

그림 13에서 볼 수 있듯이 LEACH의 경우 랜덤한 클러스

터 구성으로 노드의 수명도 짧고 높은 전력으로 BS에 직접 데이터를 전송하므로 전체 데이터 전송량이 작을 수 밖에 없다. HEED의 경우 에너지 잔량에 기반한 클러스터 헤드 재선출로 LEACH에 비해 많은 데이터를 BS로 전송할 수 있었다. 제안 기법은 클러스터 헤드 재선출 과정에서 전송할 데이터가 있는 노드를 높은 확률로 클러스터 헤드로 선정하여 에너지를 효율적으로 사용하며 네트워크의 수명이 다할 때 까지 더 많은 데이터를 BS로 전송할 수 있다.

상기의 실험 결과에서 보는 바와 같이 제안 알고리즘은 거리에 따른 헤드 선출을 이용한 자율적인 클러스터 구성, 라우팅 트리를 이용한 멀티 홉 전송 등의 방법을 통해 노드의 에너지를 효율적으로 사용할 수 있음을 확인하였으며 네트워크의 수명도 증대시킬 수 있음을 보였다. 또한 매 라운드 마다 클러스터를 재구성하는 LEACH와 HEED에 비해 초기에 균등한 크기로 구성된 클러스터를 지속적으로 유지하여 클러스터 재구성에 따른 오버헤드를 감소시키고 더 많은 데이터를 BS로 전송할 수 있었다.

## V. 결론

본 장에서는 제안 알고리즘에 대한 성능 평가를 위 클러스터 기반의 무선 센서 네트워크 환경에서는 제한적인 에너지를 보유하고 있는 노드들로 구성되기 때문에 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 배경에 따라 본 논문에서는 네트워크 전체의 정보를 알지 못하더라도 거리 정보에 따라 클러스터 헤드를 선출하고 이를 기반으로 균등한 크기의 클러스터를 형성하여 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안 기법은 시뮬레이션을 통해 노드의 에너지 소모량, 최적의 클러스터 수, 노드의 수명, BS가 수신한 전체 데이터 량 등을 기존의 LEACH 및 HEED와 비교하여 보았다. 실험 결과 센서 필드내의 각 노드들이 균일하게 에너지를 소모하고 있음을 확인하였으며 라운드별 생존 노드의 수는 LEACH에 비해 5.4%, HEED에 비해서는 1.3%의 성능 개선을 보였다. BS가 수신한 데이터 총량은 LEACH에 비해 15.6%, HEED에 비해서는 2.5% 더 많은 데이터를 수신한 것으로 나타났고 이는 네트워크 수명의 증가로 인해 더 오랜 기간 동안 이벤트 수집이 가능했음을 볼 수 있었다. 이러한 실험 결과를 통하여 제안 알고리즘이 기존의 연구들에 비하여 노드들 간의 균형있는 에너지 소모를 유도하고, 전체 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있음을 확인하였다.

향후 연구 과제로는 장애물이 존재하는 센서 필드에서의

클러스터링에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. 본 논문에서 제안한 기법은 수신 전력을 기반으로 다른 노드와의 거리를 계산하였으나 장애물이 존재할 경우 수신 전력만으로는 정확하게 거리를 계산할 수 없고 클러스터의 크기도 예상할 수 없다. 따라서 다양한 환경에 대한 적용과 센서 노드와 BS와의 거리에 따른 차별화된 전송 방식에 관한 심화된 연구가 필요할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Ehsan Ullah Warriach, Tuan Anh Nguyen, Marco Aiello, Kenji Tei, "A Hybrid Fault Detection Approach for Context-aware Wireless Sensor Networks," 2012 IEEE 9th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), pp. 281-289, Oct. 2012.
- [2] Rathna. R, Sivasubramanian. A, "Improving Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks Through Scheduling and Routing," International Journal Of Advanced Smart Sensor Network Systems(IJASSN), Vol 2, No.1, pp. 21-27, Jan. 2012.
- [3] Stefano Savazzi, Sergio Guardiano, Umberto Spagnolini, "Wireless Sensor Network Modeling and Deployment Challenges in Oil and Gas Refinery Plants," International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2013, 2013.
- [4] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Vol. 8, 2000.
- [5] Mohamad Ramazany, Zynolabedin Moussavi, "Localization of Nodes in Wireless Sensor Networks by MDV-Hop Algorithm," ARPANet Journal of Systems and Software, Vol.2, No.5, May 2012.
- [6] O. Younis, S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach," IEEE INFOCOM 2004, 2004.

- [7] V. Mhatre, and C. Rosenberg, "Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation," Ad Hoc Networks Journal, Elsevier Science, Vol. 2, No. 1, pp45-63, 2004.

**저 자 소 개**



**나 성 원**  
 2013: 충북대학교  
 컴퓨터공학과 공학박사  
 현 재: 충북대학교 컴퓨터공학과 강사  
 관심분야: USN, 네트워크  
 Email : nasung77@daum.net



**최 승 권**  
 2001: 충북대학교  
 컴퓨터공학과 공학박사  
 현 재: 서원대학교 컴퓨터교육과 강사  
 관심분야: USN, 분산시스템, 게임기획  
 Email : idhong@korea.ac.kr



**이 태 우**  
 2011: 충북대학교  
 컴퓨터공학과 공학박사  
 2004-2008 : (주)LG전자 단말연구소  
 선임연구원  
 현 재: 충북대학교 컴퓨터공학과  
 강의전담교수  
 관심분야: 임베디드시스템, USN  
 Email : dickgap@gmail.com



**조 용 환**  
 1989: 고려대학교 통계학과 이학박사  
 1978-1980: 한국전자통신연구원  
 (ETRI) 선임연구원  
 현 재: 충북대학교 컴퓨터공학과 교수  
 (사)신진한국정책충북연구원 원장  
 관심분야: 엔테테인먼트기술,  
 USN, 멀티미디어통신,  
 정보통신정책  
 Email : yhcho@cbnu.ac.kr