

# 응용 계층 정보 기반의 에너지 효율적인 센서 네트워크 토폴로지 제어 기법

김승목<sup>†</sup>, 김승훈<sup>\*\*</sup>

## 요 약

센서 네트워크의 수명은 이를 구성하는 많은 센서 노드들의 수명에 의존한다. 따라서 각 센서 노드는 에너지를 효율적으로 이용하며 동작하도록 설계하는 것이 네트워크 설계의 중요한 요소이다. 센서 노드들을 계층구조로 구성하는 토폴로지 제어 연구들이 에너지 효율적 측면에서 많이 제안되어 발전해 왔다. 그러나 기존의 연구에서는 센서 노드들이 취득한 응용계층 정보를 바탕으로 클러스터 구성에 활용하거나, 클러스터 내 멤버 노드의 전송을 위한 TDMA 스케줄링에 반영하는 연구는 활발하지 못하였다. 본 논문에서는 응용계층 데이터에 근거한 에너지 효율적인 센서 네트워크 토폴로지 제어기법을 제안한다. 센서노드 응용계층의 정보를 이용하여 데이터 유사성이 높은 인접한 노드들을 섹션으로 형성한 후 클러스터를 구성한다. 각 클러스터를 위한 클러스터 헤드를 선출하는 토폴로지 제어 기법뿐만 아니라 또한, 각 클러스터에서 멤버노드가 감지한 데이터와 클러스터 헤드의 데이터간의 유사지속 정도 및 유사 정도에 근거하여 데이터의 무결성을 크게 훼손하지 않으면서 불필요한 전송을 억제하는 기법도 제안한다. 이와 같은 기법을 통하여 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이고 전체 네트워크 수명을 연장 시킬 수 있다.

## An Energy-Efficient Topology Control Scheme based on Application Layer Data in Wireless Sensor Networks

Seungmok Kim<sup>†</sup>, Seung-Hoon Kim<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

The life time of a wireless sensor network composed of numerous sensor nodes depend on ones of its sensor nodes. The energy efficiency operation of nodes, therefore, is one of the crucial factors to design the network. Researches based on the hierarchical network topology have been proposed and evolved in terms of energy efficiency. However, in existing researches, application layer data obtained from sensor nodes are not considered properly to compose cluster, including issue that nodes communicate with their cluster heads in TDMA scheduling. In this paper, we suggest an energy-efficient topology control scheme based on application layer data in wireless sensor networks. By using application layer data, sensor nodes form a section which is defined as the area of adjacent nodes that retain similar characteristics of application environments. These sections are further organized into clusters. We suggest an algorithm for selecting a cluster head as well as a way of scheduling to reduce the number of unnecessary transmissions from each node to its cluster head, which based on the degree and the duration of similarity between the node's data and its head's data in each cluster without seriously damaging the integrity of application data. The results show that the suggested scheme can save the energy of nodes and increase the life time of the entire network.

**Key words:** Wireless Sensor Network(무선 센서 네트워크), Topology(토폴로지), Clustering(클러스터링), Cross Layer Design(계층간 설계)

※ 교신저자(Corresponding Author): 김승목, 주소: 경기도 용인시 수지구 죽전동 126번지(448-701), 전화: 031) 8005-2676, FAX: 031)8005-2677, E-mail: pekim@nate.com  
접수일: 2009년 3월 23일, 수정일: 2009년 5월 8일  
완료일: 2009년 6월 3일

<sup>†</sup> 중신회원, 단국대학교 컴퓨터과학과 박사 과정

<sup>\*\*</sup> 정회원, 단국대학교 컴퓨터학부 멀티미디어공학전공 부교수  
(E-mail: edina@dankook.ac.kr)

※ 이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

## 1. 서 론

최근 무선통신 기술과 전자 장비 발달로 인하여 소형, 저 전력의 저렴한 센서 노드들이 개발되어 왔다. 이러한 센서노드들은 주변 상황을 감지하는 감지 부분, 감지되어진 데이터를 처리하는 프로세싱 장치, 노드 간 통신을 위한 통신 부분으로 구성된다[1]. 이러한 센서 노드들을 통해서 구성되는 센서 네트워크는 환경, 국방 등 다양한 응용 개발에 활용 가능하다.

무선 센서 네트워크는 다수의 센서 노드로 구성되는 네트워크이다. 센서 네트워크에 구성된 센서 노드는 주변 환경정보를 측정, 수집하며, 수집된 정보는 사용자 또는 컴퓨터 디바이스를 통해서 사용된다. 임의 배치, 소형 디바이스의 특징으로 배터리 재충전 및 교체의 어려움이 있으므로 센서 네트워크는 에너지 효율적으로 구성되고 동작해야 한다.

센서 네트워크의 에너지 효율적인 동작을 위한 대표적인 기법이 센서 노드의 통신 범위를 제한하여 에너지 소모를 줄이는 클러스터링 기법이다. 대규모 센서 네트워크의 경우, 클러스터의 크기 또한 커지게 되어 클러스터를 계층적으로 구성하는 계층적 클러스터 기법이 사용된다[2,3]. 또 다른 대표적인 기법은 센서 노드의 통신 채널 사용 시간 이외에는 동작을 멈춤으로써 에너지 소모를 줄이는 기법이다. 즉, 노드의 상태를 동작 상황에 적합하도록 활성화하고 비활성화 상태에서는 에너지 소모를 줄이는 기법이다.

기존의 네트워크에서는 인터페이스 계층별로 독립적인 설계 및 구현이 되어 왔다. 이러한 접근 방법은 각 계층의 설계 및 구현이 타 계층과 독립적으로 이루어진다는 장점을 갖는다. 그러나 센서 노드에서는 상위 또는 하위 계층의 특성 및 상황에 맞도록 적응성을 지원하고 각 계층의 특성을 상호 고려한 Cross Layer 설계가 필요하다고 제기되었다[4,5,6].

본 논문은 각 센서 노드가 주기적으로 주변 정보를 감지하여, 감지한 응용계층(Application Layer) 데이터를 싱크로 전달하는 응용을 대상으로 한다. 측정하고자 하는 응용에 따라, 데이터 유사성이 높고 환경변화에 반응하는 특성이 같은 응용계층 데이터 값을 갖는 인접한 노드들을 섹션으로 형성하고, 그 섹션을 바탕으로 클러스터를 구성하는 토폴로지 제어 기법을 제안한다. 또한, 충분한 에너지 잔량을 유지하면서 데이터 유사 범위 중앙에 해당하는 데이터

값을 가지는 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 선출 기법도 제안한다.

만일, 클러스터 헤드가 감지한 데이터와 멤버노드가 감지한 데이터가 완전히 동일하다면, 멤버노드는 동일한 정보를 보내지 않으므로 통신에 따른 에너지를 절약할 수 있다. 클러스터 헤드는 이러한 경우 자신과 동일한 데이터를 멤버 노드가 감지하였다고 판단할 수 있다. 만일, 두 노드 간에 데이터가 완전히 동일하지 않더라도 데이터 유사 범위 내에서 유사하다면 그 유사 정도에 비례하여 전송회수를 줄임으로써 에너지 소모를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 클러스터 멤버노드가 감지한 데이터와 클러스터 헤드가 감지한 데이터간의 유사지속정도 및 유사정도를 이용하여 두 노드간의 통신회수를 줄이는 기법을 제안한다. 이와 같이 응용계층 정보를 활용함으로써 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이고 전체 네트워크 수명을 연장 시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 논문에서 제안하는 기법과 관련된 기존의 연구에 대해 기술한다. 3절에서는 응용계층 정보 기반의 에너지 효율적인 토폴로지 제어 기법을 제안한다. 4절에서는 제안한 기법이 다른 기법들과 비교하여 더 우수함을 보이고, 5절에서는 결론을 기술한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 클러스터링 기법

많은 센서 노드들이 조밀하게 배치되어 있는 무선 센서 네트워크에서 인접한 센서 노드는 유사한 정보를 가지므로, 데이터 전달 및 처리 과정을 계층적으로 분리하기 위해 로컬 클러스터를 형성하고 클러스터 헤드에 의해 집약된 데이터를 싱크노드를 통해 전송하게 된다. 센서 네트워크에서는 노드의 에너지 효율적인 동작을 위하여 센서 노드의 통신 범위를 제한하여 에너지 소모를 줄이는 클러스터링 기법을 전형적으로 사용한다[2,3]. 클러스터링 기법은 센서 네트워크에 있는 노드들을 일정한 규모의 집합으로 나눈 클러스터를 구성한 후, 클러스터 내에서 멤버 노드들이 데이터를 클러스터 헤드로 전달하고 클러스터 헤드로서 수집된 데이터는 데이터 융합 과정을 거쳐 전송량을 줄인 후 싱크 노드로 전송하는 기법이다. 이와 같이 클러스터링 기법에서는 멤버 센서 노

드들의 통신 범위를 제한함으로써 멤버 노드들의 에너지 및 통신 자원의 효율성을 도모할 수 있다. 클러스터 헤드들은 다른 멤버 노드들에 비해 더 많은 에너지를 소모하게 된다는 문제점이 있으므로, 클러스터내의 노드 간에 균형적인 에너지 소모가 이루어지지 않는다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 LEACH는 클러스터 헤드를  $1/p$ 의 확률로 선출하는 방법을 제안했다[2].

클러스터는 구성된 후 클러스터 헤드와 멤버 노드 간에 TDMA 스케줄링 등에 의하여 지속적으로 통신이 일어난다. 클러스터를 구성하는 멤버 노드의 수가 적을 경우 각 멤버에 대한 Duty Cycle의 짧아지므로 각 멤버는 자주 통신하게 되어 그만큼 에너지 소모가 많아진다. 반면, 멤버 노드의 수가 많을 경우 Duty Cycle이 길어지므로 그 시간동안 멤버 노드의 무선 송수신 모듈을 비활성화 시켜 에너지 소비량을 절감할 수 있으나 감지한 데이터를 전달하는 간격은 길어지게 된다. 따라서, 클러스터를 구성하는 멤버노드는 이들을 고려하여 적절한 수로 구성되어야 한다[7].

GAF(Geographic Adaptive Fidelity) 프로토콜은 무선 센서 네트워크에서 센서 노드가 배치된 위치를 바탕으로 데이터의 전송을 제한하게 된다. 그림 1에서와 같이 센서 노드가 배치된 영역을 가상 그리드(Virtual Grid)로 구분하게 되고 그리드에 포함되어 있는 센서 노드 중 1개의 노드가 데이터 전달을 담당하게 된다. 가상 그리드는 센서 노드의 전송 범위에 의해서 결정되게 된다.

LEACH알고리즘의 성능은 매 라운드마다 일정한 수의 클러스터를 구성하고, 클러스터 헤드를 고르게 배치하는데 있으나, 자기 스스로 클러스터 헤드를 선출하는 방법으로는 이를 보장하기 힘들다, 따라서, BS(Base station)에서 위치정보와 에너지 보유량을 고려하여 클러스터 헤드와 클러스터를 결정하는 LEACH-C(LEACH-Centralized)기법을 제안하였다[8].

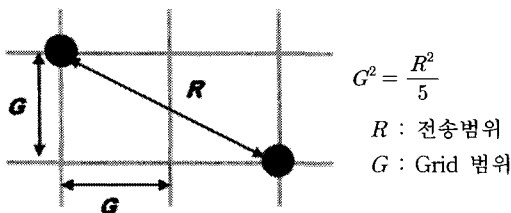


그림 1. GAF 프로토콜의 그리드 구성

LEACH-C의 경우 분산 클러스터링과는 다르게 BS에서 모든 노드의 잔여에너지 정보를 수집한 후 휴리스틱 알고리즘인 Simulated Annealing을 통해 근사 최적 클러스터링을 구성하기 때문에 보다 많은 데이터를 수집할 수 있도록한 중앙 집중형 클러스터링 기법이다. BS에서 모든 노드들의 에너지를 더해 평균 에너지를 구하고 이 평균 에너지 보다 높은 에너지를 가지는 노드를 클러스터 헤더로 결정한다.

## 2.2 계층 간(Cross-Layer) 설계

기존 네트워크에서 사용해 오던 계층기반의 설계(Layered Design)는 프로토콜의 각 계층 간의 연관성을 줄이기 위해서 독립적으로 동작하도록 설계되었다. 각 계층은 잘 정의되어 있는 기능을 올바르게 수행해야하고, 계층의 경계에서 인터페이스를 통해 전달되는 정보를 최소한으로 선택되어야 하고, 하나의 계층이 변하더라도 다른 계층은 변할 필요 없이 각각 독립적이라는 특징이 있다.

이 설계는 단순하고, 확장성이 있고, 표준화하기 쉽고, 새로운 프로토콜의 업그레이드가 쉽다는 장점이 있는 반면, 각 계층의 기능이 중복된 경우가 많아 효율성이 떨어진다는 단점이 있다. 무선에서는 희소 자원을 효율적으로 사용해야 하므로 계층기반의 설계보다 무선 네트워크에 적합한 설계를 필요로 한다. 무선 통신에서는 계층 간의 경계가 모호하여 물리계층과 다른 모든 계층이 연관되어 계층끼리 상호작용을 한다. 이런 특징을 살린 개념이 계층간 설계(Cross-layer Design)이다. 계층간 설계의 목표는 하나의 계층내의 정보를 다른 계층에서 사용가능하도록 하여 전체 네트워크 계층 성능을 개선하는 것이다. 이때 계층 간에 정보를 공유하기 위해서는 프로토콜 스택 디자인을 바꿀 필요가 있다[4,5].

최근, Cross Layer Design에 대한 연구로써, Safwati는 라우팅과 MAC, 그리고 링크 계층을 고려하여 에너지 소모를 줄이는 결합적 설계를 통해 Convex 최적화 기법을 사용한 기법, MAC 계층과 네트워크 계층의 Cross Layer에서 에너지 소모를 줄이기 위해 ECPS(Energy-Constrained Path Selection) 방식과 E2LA(Energy-Efficient Load Assignment) 방식을 복합적으로 사용한 기법 등이 있다[4,9]. 또한, 물리계층, MAC 계층, 그리고 다른 모든 상위 계층들이 결합적으로 설계함을 보인 연구 등이 연구되

어져 왔다. 또한, 응용 계층에서 취득한 정보를 클러스터 헤드에서 감지한 데이터와 비교하여 그 유사성 정도에 따른 스케줄링 방식도 제안되었다[7].

CC-MAC(Correlation-based Collaborative-MAC) 프로토콜에서는 무선센서 네트워크에서 이벤트를 감지한 영역의 노드간의 공간적 상관을 활용하여 주어진 수준 이하의 데이터 왜곡을 만족하면서 채널 접근 지연을 줄이고 에너지 소비를 감소하는 방안을 제시하였다[10]. 즉 이벤트 발생영역의 모든 센서노드들이 전송을 하려고 함에 따라 생기는 중복을 줄이고, CSMA/CA 방식의 MAC을 사용함에 따라 전송을 시도하는 여러 노드간의 회선쟁탈 문제를 줄이기 위한 방법을 제안하였다.

CC-MAC 프로토콜에서는 이벤트 발생 지역을 다수의 지역으로 나누고 이를 상관지역(Correlation Region)으로 정의하였다. 각 지역 내에서는 단 한 개의 대표노드(Representative Node)만이 전송을 하고, 이 지역 내의 다른 센서노드는 상관관계이웃(Correlation Neighbor)이 되어서 전송을 하지 않게 한다. 상관관계이웃이 전송을 하지 않는다고 하더라도 정보의 왜곡에는 거의 영향을 주지 않으며 회선쟁탈 문제를 완화하여 이벤트 인식 지연을 증가하지 않게 되어 패킷드롭율을 향상시켰다. 상관지역과 각 지역 내에서 대표노드를 정하기 위하여, 그림 2와 같이 상관지역을 "Voronoi region"으로 표현하는 중앙 집중 알고리즘을 싱크노드에서 실행하였다.

CC-MAC 프로토콜에서 이벤트 영역에서 발생하는 정보는 중복성을 제거하였으므로 중간 노드에서

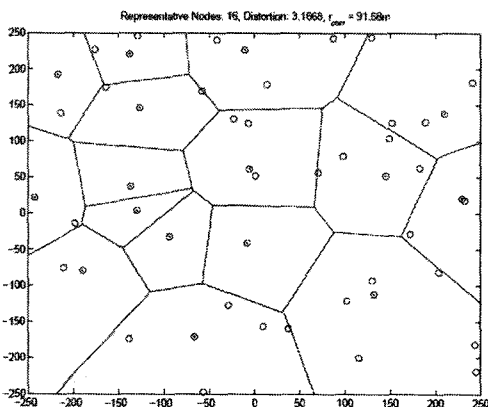


그림 2. VQ 알고리즘으로 선택된 대표노드와Voronoi 표현한 상관관계지역

분실하지 말아야하는 우선순위가 높은 정보이다. CC-MAC은 소스 노드가 이벤트 정보를 전달하기 위한 Event MAC(E-MAC)과 중간 노드가 수신 받은 정보를 경로상의 다음 목적지로 전달하기 위한 Network MAC(N-MAC)으로 구성된다. Event MAC (E-MAC)은 상관관계 정보를 필터링하고, Network MAC(N-MAC)에서는 라우팅 경로로 패킷을 우선순위에 따라 전송한다. 그림 3은 이벤트 발생영역과 그 이외 영역에서 적용되는 각 MAC과 각 상관지역 내의 대표노드 및 상관관계이웃을 보여준다.

이와 같이 CC-MAC 프로토콜은 이벤트 발생에 따라 상관지역을 일시적으로 구성하며 모든 상관지역의 반경은 동일하게 간주하였다. 또한 CC-MAC 프로토콜은 CSMA/CA 방식으로 다른 방식의 MAC에는 적합하지 않다. 그러나 본 논문에서 제안하는 기법은 이벤트 발생 이후에 정보를 전달하는 응용은 물론 주기적인 센서 정보를 전달하는 응용에도 특히 적합하다. 이벤트가 발생된 이후에 일시적으로 구성되는 상관지역이 아니라 응용계층 정보를 공간적은 물론 시간적으로 분석하여 이를 바탕으로 논리적인 정보의 내용에 따라 섹션으로 구성하며, 섹션은 다시 물리적인 전파 전달범위에 따라 클러스터를 구성하는 토폴로지 구성 기법을 제안한다. 본 기법은 CSMA/CA 방식의 MAC은 물론 기존의 다른 방식의 MAC과 연관하여 사용할 수 있다.

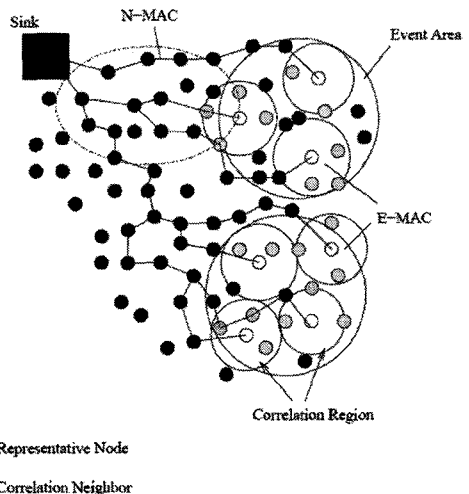


그림 3. E-MAC 와 N-MAC. 대표노드는 상관관계지역에 대해 자신의 기록을 전송, 모든 상관관계이웃은 전송을 억제.

### 3. 응용계층 데이터를 이용한 토폴로지 제어 기법

본 절에서는 본 논문을 제안하기 위한 기본적인 네트워크 모델을 설명하고, 응용계층 데이터에 기반한 에너지 효율적인 토폴로지 제어 기법을 제안한다. 논문에서 제안하는 토폴로지 제어 기법은 5 phase로 진행한다.

#### 3.1 네트워크 모델

본 논문에서 제안하는 응용계층 정보기반의 센서 네트워크 토폴로지 제어 기법을 위하여 다음과 같은 네트워크 모델을 가정한다. 환경정보 수집을 위한 일정 영역에 센서 노드들이 임의로 분산 배치되어 있다. 배치된 노드는 밀집되어 있으며, 각 노드는 배치된 이후에 위치가 자율적으로 변동되지 않는다. 즉, 노드들은 이동성이 없다. 모든 센서 노드들은 직접 혹은 다른 센서 노드를 경유하여 싱크 노드까지 데이터를 전송할 수 있다. 센서 노드는 주기적으로 환경정보를 감지하며, 감지된 응용계층 데이터를 싱크로 전달한다. 센서 노드는 자신의 에너지 잔량을 확인 가능하며, 모든 센서노드들의 초기 에너지는 동일하다.

본 논문은 각 센서 노드가 주기적으로 환경정보를 감지하여, 감지된 응용계층 데이터를 싱크로 전달하는 센서네트워크 응용을 대상으로 한다. 이를 위하여 각 클러스터 내에서 클러스터 헤드와 멤버 노드 간에 TDMA 스케줄링 등에 의하여 지속적으로 통신이 일어난다.

클러스터가 구성되고, TDMA 스케줄에 의한 한 라운드 시간  $T_{round}$ 는 각 클러스터의 Duty cycle의 길이에 따라서 정해지게 된다. 멤버노드가 클러스터 헤드로 정보를 전송하는 단위 시간인 슬롯 시간(time slot)을  $T_{ts}$ 라 하자. 이제, 클러스터  $x$ 에서 멤버 노드 수를  $N_x$ 이라 할 경우, 멤버노드  $i$ 가 클러스터 헤드에 전송하는 수  $F_{x_i}^{allocated}$ 는 다음 식(1)과 같다.

$$F_{x_i}^{allocated} = \frac{T_{round}}{T_{ts} \times N_x} \quad \text{식 (1)}$$

#### 3.2 [Phase 1] 초기 응용계층 데이터 전달 단계

센서 네트워크에서 각 센서 노드는 주변 환경을 감지하여 감지한 데이터를 싱크 노드로 전달한다. 아

직 클러스터가 구성되지 않았으므로 단순히 플러딩 등의 간단한 방식에 의하여 감지한 응용계층 데이터를 싱크 노드로 전달한다.

#### 3.3 [Phase 2] 섹션 형성 단계

싱크 노드는 센서 네트워크의 모든 센서 노드로부터 응용계층 정보를 전달받아 환경정보를 수집할 일정 영역을 대상으로 데이터 유사성 및 환경변화 반응 특성에 근거하여 섹션들을 형성한다. 섹션(section)은 다음과 같이 정의한다.

[정의 1 : 섹션] 측정하고자 하는 응용에 따라, 데이터 유사성이 높고 환경변화 반응특성이 같은 응용계층 데이터 값을 갖는 인접한 노드들로 형성된 측정 지역

센서노드들이 감지한 정보들이 어떤 범위일 경우 서로 유사한가는 고려중인 환경정보에 따라 다르며 산업표준자료를 참고하여 결정할 수 있다. 예를 들어, 일반 사무실의 조도 데이터 유사 범위를 고려한다면, 조도 표준 KSA 3011에서 일반 사무실의 조도를 700~1500 Lux로 정의하고 있으므로 그 평균인 1100 Lux를 기준으로 상하 400 Lux 범위는 서로 유사한 범위라 할 수 있다. 특정 빌딩의 조도를 감지하

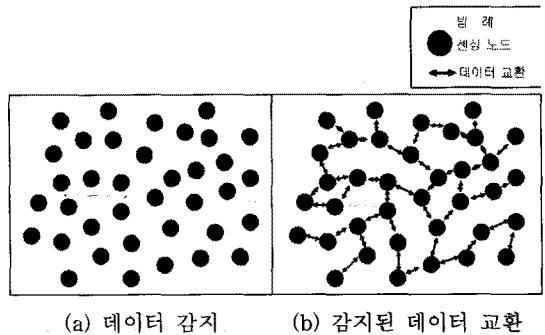


그림 4. 환경 감지 및 초기 데이터 전달

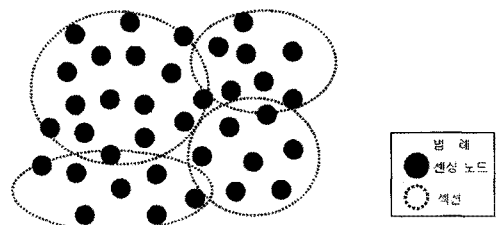


그림 5. 섹션 형성

는 응용의 경우, 그 건물의 로비, 각 사무실, 여러 종류의 복도, 강당, 식당 등의 조도는 서로 상이할 것이고, 각 공간은 별도의 섹션으로 설정될 수 있다. 그림 6은 데이터 유사범위 평균값을 중심으로 데이터 유사범위 내의 값으로 응용계층 데이터를 전송한 인접한 센서노드들이 섹션 범위 내에 있는 상황을 보여준다. 편의상, 데이터 유사범위는 데이터 유사범위 평균값을 중심으로 좌우대칭이라고 가정한다, 즉  $D_{left} = D_{right} = D_{range}$  이 된다.

또한 일정 시점에서의 응용계층 데이터를 이용하는 것은 물론, 일정 기간 동안의 데이터를 기반으로 센서노드들의 측정 특성(characteristics)을 추출하여 섹션을 형성할 수 있다. 위의 특정 빌딩의 조도를 감지하는 응용의 경우, 각 공간을 구성하는 노드들은 환경변화에 같은 반응을 보일 것으로 기대된다. 즉, 사무실의 스위치가 ON에서 OFF으로 혹은 OFF에서 ON으로 바뀔 때, 해당 공간을 구성하는 센서노드들은 같은 시각에 같은 반응을 보일 것이다. 각 공간의 스위치는 다른 공간의 스위치와 별도로 작동하므로 이러한 특성을 추출하면 섹션 형성에 활용할 수 있다.

3.4 (Phase 3) 클러스터 구성 단계

이제 형성된 섹션을 바탕으로 클러스터를 구성한다. 클러스터는 클러스터 헤드와 멤버간의 효율적인 통신을 위하여 적당한 수의 멤버로 구성되어야 하며 이를  $n$ 개라 하자. 이전 단계에서 형성된 섹션은 단지 응용계층 데이터의 유사성에 의하여 형성되므로 섹션내의 노드수가 상당히 가변적이다. 따라서 섹션을 그대로 클러스터로 구성하기에는 어려움이 있다. 섹션을 구성하는 노드 수에 따라 다음과 같은 경우로

분류할 수 있다.

[Case A] 1~2개의 소수 노드로 섹션 구성

해당 섹션의 공간이 매우 작으며, 인근 센서노드간의 응용 계층 데이터 유사성이 거의 없는 경우이다. 따라서 [phase 5]에서의 응용계층 정보 유사성을 이용한 전송회수 감소를 기대하기 어려우며, 계속되는 통신의 결과 해당 노드의 에너지는 다른 노드에 비하여 빨리 고갈될 것이다. 이는 해당 섹션이 공간적으로 매우 작거나, 해당 섹션에 센서 노드를 적게 배치하여 분포 밀도가 지나치게 낮은 결과이다. 본 논문에서는 센서노드들의 배치 문제(deployment)를 다루고 있지는 않으며 임의로 분산 배치되어 있다고 가정한다. 그러나 이러한 영역은 센서노드를 추가로 배치하도록 권고하도록 본 논문이 활용될 수 있다.

[Case B]  $1 \sim 2 < \text{섹션구성 노드 수} \leq n$

해당 섹션을 구성하는 멤버노드의 수가 클러스터 헤드와 멤버간의 효율적인 통신을 위하여 적당한 수보다 같거나 적을 경우이다. 따라서 해당 섹션을 단일 클러스터로 구성할 수 있으므로 클러스터 구성이 간단한 경우이다. 클러스터 헤드는 각 멤버 노드로부터의 응용계층 정보를 싱크 노드로 전달한다.

[Case C] 섹션구성 노드 수  $> n$

해당 섹션의 공간이 광범위하여 섹션을 구성하는 멤버노드의 수가 클러스터 헤드와 멤버간의 효율적인 통신을 위하여 적당한 수보다 클 경우이다. 따라서 섹션을 다수의 클러스터로 구성하는 것이 효율적이며, 같은 섹션내의 클러스터들로 계층적 클러스터링을 구성한다. 이는 빌딩의 대강당이나 현관과 같은 큰 공간이 해당될 것이다.  $n$ 개 센서 멤버로 한 클러스터를 구성하는  $k$ -계층 클러스터링은 최대  $n^k = S$ 개의 센서멤버를 가질 수 있다. 따라서, 섹션을 구성하는 노드 수,  $\hat{S}$ , 가 주어지면  $\hat{k}$  계층으로 클러스터를 구성한다. 여기서  $\hat{k} = \lceil \log_n \hat{S} \rceil$  이 된다.

이와 같이 환경정보 수집을 위한 전체 영역은 응용계층 데이터에 근거하여 비슷한 데이터 값과 특성을 가지는 노드들로 구성된 섹션들로 형성된다. 섹션을 형성하는 센서노드들의 수에 따라서 하나 혹은 그 이상의 섹션들이 하나의 클러스터를 구성하기도 하며,

- $D_c$  : 데이터 유사범위 평균값
- $D_{left} \ D_{right}$  : 데이터 유사 범위
- ↑ : 센서노드들이 측정한 응용계층 데이터
- : 섹션 범위

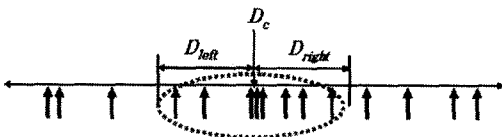


그림 6. 데이터 유사범위 및 섹션형성 범위

한 섹션을 단일 클러스터로 구성하기도 하고, 한 섹션을 다수의 계층적 클러스터로 구성하기도 한다.

전체 노드들 중에서 실제로 데이터를 전송하는 대표노드의 수에 대한 Vuran의 연구에 따르면, 50개의 노드로 구성된 센서 네트워크에서 대표노드의 수가 50개에서 15개로 감소할 때 정보의 왜곡이 상대적인 상수로 유지하였다[10]. 이는 센서 노드들이 서로 인근에 배치되면서 상당한 수준의 중복성에 따른 결과였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 본 논문에서 고려하는 섹션도 정보의 왜곡이 증가하지 않을 최소 수준인 15개 이상으로 구성하는 것이 좋을 것이다.

### 3.5 (Phase 4) 클러스터 헤드 선출 단계

이제 구성된 각 클러스터에서 클러스터 헤드를 선출한다. 클러스터 헤드는 클러스터를 구성하는 노드들의 에너지 잔량을 고려하는 등 기존의 많은 논문들에서 제안된 기법을 그대로 사용할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 클러스터를 구성하는 기준이 응용계층 데이터의 유사성에 근거하였으므로, 평균값에 가장 가까운 클러스터내의 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 것이 유리하다. 본 논문에서는 클러스터 각 센서노드의 에너지 잔량과 클러스터내 응용계층 정보의 평균값과의 차이를 이용하여 헤드를 선출하도록 다음과 같이 제안한다.

즉, 클러스터  $x$ 에서 노드  $i$ 의 응용계층 데이터 값과 에너지 잔량을 각각  $D_{x_i}$ 와  $E_{x_i}$ 라 할 경우, 클러스터 헤드가 될 수 있는 확률  $P_{x_i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{x_i} = \alpha \left( 1 - \frac{|D_c - D_{x_i}|}{D_{range}} \right) + (1 - \alpha) \frac{E_{x_i}}{E} \quad \text{식 (2)}$$

여기서,  $D_c$ 는 데이터 유사범위 평균값이며,  $E$ 는 센서노드의 초기 에너지로 모든 노드가 동일하다고 가정하였다.  $\alpha$ 는 응용계층 데이터 값을 이용하여 헤드를 선출하는 가중치이며 0.5와 1사이에서 선택한다, 즉  $\frac{1}{2} < \alpha \leq 1$ 이 된다.

다음에 클러스터 헤드 선출 알고리즘을 제시한다. 이 알고리즘은 각 클러스터에서 병렬로 수행되며, 각 노드들의 확률 계산 역시 병렬로 수행할 수 있다. 최대 확률에 의한 헤드 결정은 현 클러스터 헤드에서 수행될 수 있으며, 센스네트워크 설치 초기단계의 경우 임의의 노드에서 수행될 수 있다. 클러스터  $x$ 에서 멤버 노드수를  $N_x$ 이라 할 경우, 알고리즘의 시간 복잡도는  $O(N_x)$ 가 된다.

### 3.6 (Phase 5) 각 클러스터에서 정보전송 단계

[phase 1]부터 [phase 4]를 통하여 이제 각 클러스터는 응용계층 데이터 유사성이 높은 노드들로 구성되어 있으며, 노드들 중에서 평균에너지보다 높은

**algorithm** *SelectClusterHead*( $D_c, D_{range}$ )

```
{
  //  $D_c$  and  $D_{range}$  depend on applications, so receive them from sink node
  for (each cluster  $x$ ) do // performed at each cluster concurrently
  {
    let the current header be  $h$ 
    for ( $\alpha = 1$  to  $0.5$  down to  $0.1$ ) do // relaxation
    {
      for (each member node  $i$ ) do // performed at each member concurrently
      {
        Get Data  $D_{x_i}$  and RemainingEnergy  $E_{x_i}$ 
        Compute  $P_{x_i} = \alpha \left( 1 - \frac{|D_c - D_{x_i}|}{D_{range}} \right) + (1 - \alpha) \frac{E_{x_i}}{E}$ 
        Send  $P_{x_i}$  to  $h$ 
      }
      let  $\hat{h}$  be the node that maximize  $P_{x_i}$  for all  $i$ 
      if(  $\hat{h}$  is adequate for new head) then break
      // check its distances to the other nodes, its energy level, and so on
    }
    let  $\hat{h}$  be the new cluster header
  }
}
```

값을 갖고, 데이터 유사범위 중앙에 해당하는 데이터 값을 가지는 노드가 클러스터 헤드로 선출되었다.

3.1절에서 클러스터  $x$ 의 멤버노드  $i$ 가 클러스터 헤드로 전송하는 전송회수  $F_{x_i}^{allocated}$ 는 멤버노드  $i$ 가 클러스터 헤드로 데이터를 전송하기 위하여 한 라운드에 할당받은 전송회수이다. 본 논문에서는 응용계층 데이터에 근거하여 멤버노드의 응용계층 데이터가 클러스터 헤드의 데이터와 일치함으로써 실제로 전송할 필요가 없는 비율  $R_{x_i}^{inactive}$ 을 제안한다. 할당된  $F_{x_i}^{allocated}$ 중에서 실제 전송 회수  $F_{x_i}^{active}$ 는 이제 식(3)과 같이 감소한다. 이와 같이, 각 노드의 불필요한 전송을 줄임으로써 에너지 소모를 억제할 수 있다.  $R_{x_i}^{inactive}$ 는 멤버 노드  $i$ 가 클러스터 헤드와 얼마나 지속적으로 같은 범위의 데이터를 감지했는가를 위한  $R_{x_i}^{duration}$ 과, 얼마나 유사한 정도로 일치하는가를 위한  $R_{x_i}^{similarity}$ 로 나누어 고려된다.

$$F_{x_i}^{active} = F_{x_i}^{allocated}(1 - R_{x_i}^{inactive}), \text{ where } 0 \leq R_{x_i}^{inactive} \leq 1 \quad \text{식(3)}$$

$$R_{x_i}^{inactive} = R_{x_i}^{duration} \times R_{x_i}^{similarity}, \text{ where } 0 \leq R_{x_i}^{duration}, R_{x_i}^{similarity} \leq 1 \quad \text{식(4)}$$

[정의 2 : 유사 지속정도,  $R^{duration}$ ] 각 클러스터 내에서 각 멤버 노드가 클러스터 헤드와 데이터 유사범위 내에서 얼마나 오랫동안 같은 범위를 지속했는가를 나타내는 정도. 이는 0부터 1사이의 값으로, 1에 가까울수록 오랫동안 지속적으로 일치했음을 나타낸다.

유사 지속정도는 여러 가지 방식으로 제안할 수 있으며 다음에 한 방식을 제안한다. 최초 라운드, 즉  $r$ 이 0일때 유사 지속정도 역시 0의 값을 가진다. 스케줄링의 매 라운드  $r$ 이 진행하면서, 클러스터 헤드와 데이터가 일치할 때마다 유사 지속정도를 점차적으로 증가한다. 만일 범위  $D_{range}$ 밖으로 판단되면  $r$ 이 0일때의 상태로 돌아가며, 이러한 과정을 반복한다.

$$R_{x_i}^{duration} = 1 - \frac{1}{2^r}, \text{ where } r = 0, 1, 2, \dots \quad \text{식(5)}$$

[정의 3 : 유사정도,  $R^{similarity}$ ] 각 클러스터 내에서 각 멤버 노드가 클러스터 헤드와 어느 정도로 유사한가를 나타내는 정도. 이는 0부터 1사이의 값으로, 1에 가까울수록 헤드의 값과 일치했음을 나타낸다.

데이터 유사 정도 역시 여러 가지 방식으로 제안할 수 있으며 다음에 한 방식을 제안한다. 데이터 유사범위  $R$ 은 고려중인 환경정보에 따라 변화하게 된다. 따라서 이를 정규화하기 위하여 유사정도  $R^{similarity}$ 를 1부터 0까지의 값으로 정의한다. 클러스터 헤드와 동일한 값이면 1의 값을 가지며, 데이터 유사 범위 밖이면 0의 값을 가진다. 또한, 클러스터 헤드의 값과 근사한 값을 가질수록 1에 근사한 값을 가진다.

클러스터  $x$ 에서 클러스터 헤드  $h$ 의 응용계층 데이터 값을  $D_{x_h}$ 라 하자. 멤버 노드  $i$ 는 자신의 환경정보 감지 데이터  $D_{x_i}$ 와 비교하여 환경정보 유사정도  $R_{x_i}^{similarity}$ 를 결정되게 된다. 유사정도  $R_{x_i}^{similarity}$ 는 식(6)과 같이 정의한다.

$$R_{x_i}^{similarity} = \begin{cases} 1 & , \text{ if } D_{x_i} = D_{x_h} \\ 1 - \frac{|D_{x_i} - D_{x_h}|}{D_{range}} & , \text{ if } D_{x_h} - D_{range} \leq D_{x_i} \leq D_{x_h} + D_{range} \\ 0 & , \text{ if } D_{x_i} < D_{x_h} - D_{range} \text{ or } D_{x_i} > D_{x_h} + D_{range} \end{cases} \quad \text{식(6)}$$

### 3.7 토폴로지 제어기법 전체 구조

[phase 1]부터 [phase 3]은 센서 네트워크 최초 배치 시 수행되거나 센서네트워크 전체를 재구성하고자 할 때 수행된다. 또한 [phase 1]부터 [phase 3]은 센서 네트워크 배치에 활용될 수 있다. 섹션의 공간적 범위가 클 경우 해당 섹션의 노드 분포 밀도는 낮게 배치하며, 반면 섹션의 공간적 범위가 작을 경우 해당 섹션의 노드 분포 밀도는 상대적으로 높게 배치하도록 하는 것이 싱크노드에서 응용계층 데이터를 활용하는 측면에서 유리할 것으로 기대된다[참조 그림 7].

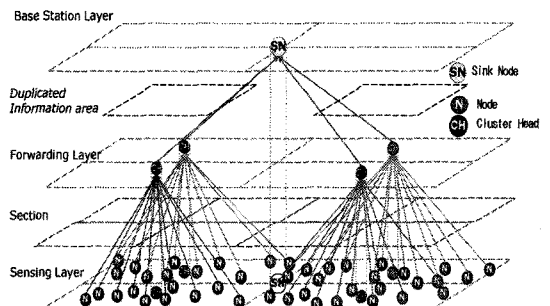


그림 7. 토폴로지 제어 기법 전체 구조도



```

algorithm TopologyControl()
{
  repeat
  {
    perform [Phase 1] at each sensor node
    perform [Phase 2] at sink node
    perform [Phase 3] at sink node
  } until ( clustering is appropriate )

  for (each cluster  $x$ ) do // performed at each cluster concurrently
  repeat
  {
    SelectClusterHead( $D_c, D_{range}$ )
    let the cluster header be  $h$ 
    for (each member node  $i$ ) do // performed at each member concurrently
    {
       $r = 0$ 
      for (each round) do
      repeat
      {
         $R_x^{duration} = 1 - \frac{1}{2^r}$ 
        compute  $R_{x_i}^{similarity}$ 
         $R_{x_i}^{inactive} = R_{x_i}^{duration} \times R_{x_i}^{similarity}$ 
        communicate with cluster head  $h$  during that round with rate  $(1 - R_{x_i}^{active})$ 
        if ( $D_{x_i}$  is close to  $D_{x_h}$  in range of  $D_{range}$ ) then  $r = r + 1$  else  $r = 0$ 
        if (remaining energy at  $h$  is not enough) break
      } forever
    }
  } forever
}

```

[phase 4]는 센서 네트워크 최초 배치 시 혹은 전체를 재구성하고자 할 때 모든 클러스터 내에서 각각 수행된다. 또한 현재 클러스터 헤드의 에너지 잔량이 일정 수준 이하일 경우, 해당 클러스터 내에서 단독으로 새로운 클러스터 헤드를 선출하기 위하여 수행될 수 있다. [phase 5]는 각 클러스터 내에서, 각 멤버 노드가 자신의 헤드에 응용계층 데이터를 전송하기 위하여 실행된다. 다음과 같이 토폴로지 제어기법 전체 구조를 위한 알고리즘을 제시한다.

#### 4. 성능분석

본 절에서 응용계층 정보기반의 토폴로지 제어기법의 예측되는 성능을 제시하며, 성능 평가를 위한 모의실험을 통하여 성능을 분석한다.

##### 4.1 각 클러스터에서 멤버의 통신에 따른 에너지 분석

이전 절에서 제시한 알고리즘에 따라, 센서네트워

크를 위한 토폴로지가 형성되고 각 클러스터의 헤드가 선출되면, [phase 5]에서는 클러스터 멤버노드가 감지한 데이터와 클러스터 헤드가 감지한 데이터간의 유사성을 이용하여 두 노드간의 불필요한 전송을 줄임으로써 에너지 소모를 억제할 수 있다. 그림 8은 식(4)와 식(5)에 따라 TDMA 스케줄링 라운드가 지속되면서, 클러스터  $x$ 에서 멤버 노드  $i$ 가 데이터 유

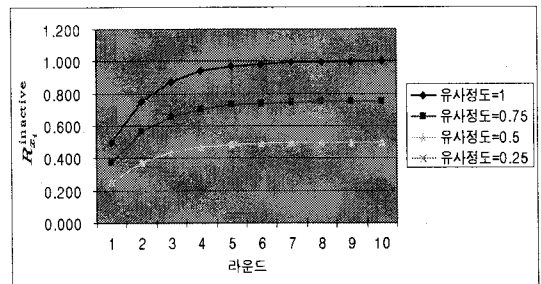


그림 8. 데이터 유사정도  $R^{similarity}$ , 유사 지속정도에 따른  $R_{x_i}^{active}$

사범위 내에서 일치함에 따른  $R_{x_i}^{\in active}$ 를 나타낸다.  $R_{x_i}^{\in active}$ 는 유사정도  $R_{x_i}^{\in ilarly}$ 가 각각 1, 0.75, 0.5 및 0.25에 대하여 나타내었다.  $R_{x_i}^{\in active}$ 는 멤버노드의 응용계층 데이터가 클러스터 헤드의 데이터와 일치함으로써 실제로 전송할 필요가 없는 비율이며, 식(3)에 따라 멤버 노드의 데이터 전송을 억제하는 구체적인 수치가 계산되며 송신전력에 필요한 에너지를 절약할 수 있다.

4.2 모의실험 분석

본 논문에서 제안된 기법의 모의실험은 NS-2 (Network Simulator 2)를 이용하였다. 대표적인 클러스터링 방법인 LEACH 및 LEACH-C 프로토콜과 에너지 효율성을 비교하기 위하여 NS-2에 구현된 에너지 모델을 사용하였다.

본 논문에서는 센서 노드의 초기 에너지의 양을 2J로 설정하였다. 센서 필드의 크기는 100 m × 100 m이며 센서 필드 안에 전개된 센서 노드의 개수는 100개이다. 센서 노드에서 측정하는 정보는 산업표준 KSA3011에서 정하는 실내의 조도를 측정한다고 가정하여 모의실험 하였다.

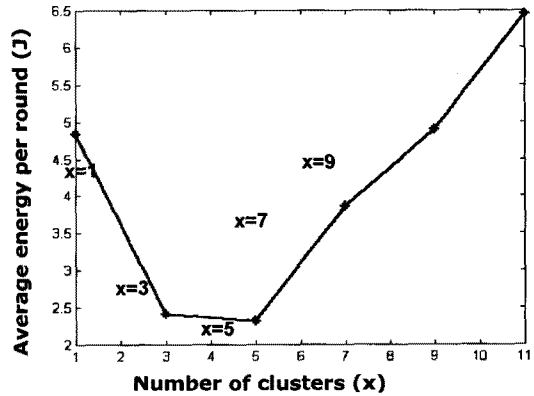
x개의 클러스터가 있다고 하면 N/x개의 클러스터 멤버로부터 수신된 데이터를 처리, 집약, 집약된 데이터를 싱크로 전송하기 위해서는 많은 에너지 소비하게 된다. 에너지 소비량은 기본적으로 무선 특성상 노드와 싱크간의 거리 제곱에 가장 큰 영향을 받으므로, 최적한 된 클러스터의 위치와 개수는 LEACH 알고리즘의 식(7)를 이용한다.

$$x_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{sp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}} \quad \text{식 (7)}$$

N : 노드,  $\epsilon_{sp}$  : 다중경로 채널 모델에서 무선증폭에너지지  
 M : 거리,  $\epsilon_{fs}$  : 자유공간 채널 모델에서 무선증폭에너지지  
 $75 < d_{toBS} < 185$

그림 9에서 처럼 제안하는 알고리즘에서는 싱크는  $M \times M$ 의 정 중앙에 있다고 가정하고, 최적의 클러스터 헤더 수를 4 또는 5개로 모의실험 하였다.

제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 측정 기준은 센서 노드들의 생존 기간이다. 본 실험에서는 클러스터 내 멤버 노드를 대상으로 클러스터 생존 기간을 실험하였다. 그림 10과 같이 구성 초기에는 세 기법



최적의 클러스터헤더 수 :  $2 < x_{opt} < 6$

그림 9. 통신 거리를 고려한 LEACH 최적의 클러스터 헤더 수

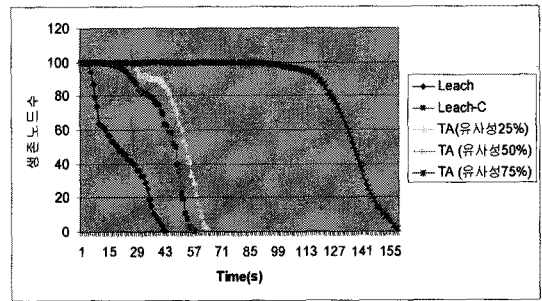


그림 10. 데이터 유사정도  $R^{similarity}$ 에 따른 네트워크 수명 측정

의 차이가 없지만, 시간이 지날수록 제안하는 기법 (TA)의 노드 수명이 길어지는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 11, 표 1과 같이 시간이 지날수록 제안하는 기법의 평균 에너지 잔량이 많은 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 결과는 유사정도가 클수록 그 효과가 큰 것을 알 수 있다.

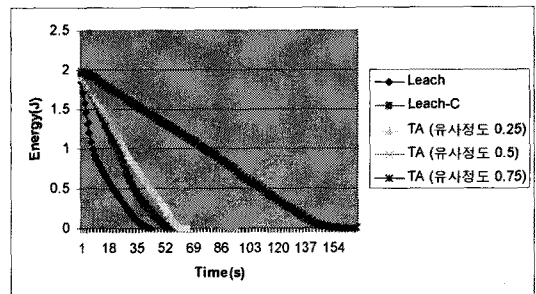


그림 11. 데이터 유사정도  $R^{similarity}$ 에 따른 노드 에너지 잔량

표 1. 프로토콜별 노드의 생존 시간

Energy (J/Node)	Protocol	25 번째 라운드에서 죽은 노드수	50번째 라운드에서 죽은 노드수	75번째 라운드에서 죽은 노드수	100번째 라운드에서 죽은 노드수	150번째 라운드에서 죽은 노드수
2	Leach	58	100	100	100	100
	Leach-C	0	100	100	100	100
	EECS (유사성 25%)	0	36	100	100	100
	EECS (유사성 50%)	0	1	63	100	100
	EECS (유사성 75%)	0	0	0	2	88

### 5. 결 론

본 논문에서는 각 센서 노드가 주기적으로 감지한 응용계층 데이터 유사성이 높은 응용계층 데이터 값을 갖는 인접한 노드들을 색선으로 형성한 후 클러스터를 구성하는 기법을 제안하였다. 충분한 에너지 잔량을 유지하면서, 데이터 유사 범위 중앙에 해당하는 데이터 값을 가지는 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 선출 기법도 제안하였다.

각 클러스터 멤버노드는 자신이 감지한 데이터와 클러스터 헤드가 감지한 데이터간의 유사성에 근거하여, TDMA 스케줄링에서 자신에게 할당된 전송 기회를 중에서 일부만을 사용함으로써 데이터의 무결성을 크게 훼손하지 않으면서도 불필요한 중복전송을 억제할 수 있다. 본 논문에서는 각 멤버 노드가 클러스터 헤드와 얼마나 지속적으로 같은 범위의 데이터를 감지했는가와, 얼마나 유사한 정도로 일치하는가를 별도로 고려하는 기법을 제안하였다. 이러한 기법을 통하여 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이고 전체 네트워크 수명을 연장 시킬 수 있음을 보였다.

### 참 고 문 헌

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, pp. 102-114, 2002.

[2] W.R. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol.1, No.4, pp. 660-670, 2002.

[3] O. Younis and S. Fahmy, "HEED : A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks," *IEEE Transaction On Mobile Computing*, Vol.3, No.4, pp. 366-379, 2004.

[4] 황호영, 정윤원, 김민정, 정찬영, 권재균, 성단근, "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 동향 및 분석," *SK Telecommunication*, 제14권, 제6호, pp. 918-933, 2004.

[5] A. Safwati, H. Hassanein, and H. Mouftah., "Optimal cross-layer designs for energy-efficient wireless ad hoc and sensor networks," *IEEE in Proc. GLOBECOM 2004*, Vol.4, pp.2805-2811, 2004.

[6] 안성현, 소수환, 김승목, 김승훈, "무선 센서 네트워크를 위한 응용 데이터를 이용한 에너지 효율적인 토폴로지 제어 기법," *한국문화콘텐츠 기술학회*, 제4권, pp. 85-89, 2006.

[7] 안성현, 김승훈, "환경정보 시스템에 적합한 클러스터 기반 에너지 효율적인 스케줄링 기법," *멀티미디어학회논문지*, 제11권, 제5호, pp. 101-108, 2008.

[8] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H.B. Balakrishnan, "An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, Vol.1, No.4, pp.660-670, 2002.

[9] Y. Xu, J.S. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," *ACM/IEEE International Conference MOBICOM*, pp. 70-84, 2001.

[10] M.C. Vuran and I.F. Akyildiz, "Spatial Correlation-based Collaborative Medium Access Control in Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.14, No.2, pp.316-329, 2006.



김 승 목

1988년 2월 한양대학교 전자공학과 (학사)  
1998년 2월 포항공과대학교 정보통신학과 (석사)  
2005년 3월~현재 단국대학교 컴퓨터학과 박사 과정  
1991년~1997년 포스데이터 대리

1997년~1999년 9월 엔트라시스 차장  
1999년~2001년 5월 3Com 부장  
2001년 6월~2003년 Avaya Korea Co., 부장  
2004년~현재 Alcatel-Lucent Korea, 이사  
관심분야 : 센서네트워크, 멀티미디어 통신, QoS, 라우팅



김 승 훈

1985년 2월 인하대학교 전자계산학과 졸업(이학사)  
1989년 8월 인하대학교 전자계산학과 졸업(이학석사)  
1998년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)

1998년 3월~2001년 8월 상지대학교 컴퓨터정보공학부 조교수  
2001년 9월~현재 단국대학교 컴퓨터학부 멀티미디어 공학전공 부교수  
관심분야 : 센서네트워크, 멀티미디어 및 모바일 통신, 멀티미디어응용