

멀티홉 무선 센서 네트워크 환경에서 성능 향상을 위한 플러딩 레벨 클러스터 기반 계층적 라우팅 알고리즘

정희원 홍성화*, 김병국*, 종신회원 엄두섭*

Flooding Level Cluster-based Hierarchical Routing Algorithm For Improving Performance in Multi-Hop Wireless Sensor Networks

Sung-Hwa Hong*, Byoung-Kug Kim* *Regular Members,*
Doo-Seop Eom* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 센서 노드의 에너지 소모의 효율성을 증대시키는 무선 센서 네트워크에 대한 라우팅 알고리즘을 제안한다. 각 센서 노드는 멀티 홉 센서 필드에서 최초의 플러딩 과정을 통해 싱크 노드로의 최소 홉수를 나타내는 플러딩 레벨 값을 얻는다. 이 값은 싱크 노드로의 연결을 보장하고 클러스터를 구성하는 동안 사용되며 라우팅 과정에서 효과적으로 사용되어 에너지 효율성을 증가시킨다. 이 알고리즘은 분석과 많은 실험을 통해 성능평가가 이루어진다.

Key Words : Clustering, Ad-Hoc, Sensor Network, Routing, NS2

ABSTRACT

In this paper, a routing algorithm for wireless sensor networks is proposed to improve the efficiency of energy consumption in sensor nodes. Each sensor node has the value called 'Flooding Level' obtained through the initial flooding from a sink node instead of sending beacon messages in multi-hop sensor field. This value can be used for guaranteeing the sensor nodes to connect with a sink node and determining the roles of cluster-head and cluster-gateway node efficiently and simply during the clustering. If different algorithms are added to our protocol, it will work better in the side of energyefficiency. This algorithm is evaluated through analysis and extensive simulations.

I. 서론

최근 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)와 같은 하드웨어 기술의 발전과 무선 통신기술의 괄목할 만한 발전은 무선 센서 네트워크(wireless sensor networks)의 출현을 가능하게 하였다. 소형

프로세서와 무선 인터페이스, 그리고 초소형 센서의 발전은 저가(low-cost), 저전력(low-power), 다기능장비(multifunctional device)의 생산을 가능하게 하였으며 이를 통해 나타난 무선 센서 네트워크는 많은 응용분야를 가진 새로운 무선 네트워크 환경으로 주목 받기 시작하였다.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원(IITA-2007-C1090-0701-0044)의 2007년도 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

* 고려대학교 전자컴퓨터공학과 미래정보망 연구실({amipro, dearbk, eomds}@final.korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2004-11-297, 접수일자 : 2004년 11월 30일, 최종논문접수일자 : 2008년 3월 5일

무선 센서 네트워크는 기본적으로 사람이 쉽게 접근할 수 없는 지역의 모니터링을 주요 목적으로 하고 있다. 센서를 이용한 대표적인 측정대상을 살펴보면 온도, 습도, 물체의 움직임, 빛의 밝기, 압력, 토질, 잡음 레벨, 물체의 유무, 이동 방향 등이 존재한다. 이런 다양한 종류의 센서들로 인해 그에 따른 응용분야 역시 매우 넓다. 여기에 각각의 다양한 상태를 감지하는 작은 센서 노드들의 '무선 연결'이라는 장점은 이를 이용한 많은 응용분야 창출의 가능성을 가지고 있다. 다양한 센서 네트워크의 응용 분야는 크게 몇 개의 범주로 나누어 진다.

군사적 응용분야(military applications)로 아군의 장비와 탄약 감지, 전투지역 감지, 적군 및 적진 정찰, 지능형 무기들의 목표물 조준, 전투손실 평가, 방사능 및 생물학적 그리고 화학적인 공격 감지와 정찰 등이 수행될 수 있으며, 환경적 응용분야(environmental applications)에서는 새, 곤충, 작은 동물들의 이동경로 추적, 농작물·가축·관개에 영향을 주는 환경적인 요소 감지, 큰 범위에서의 지구 모니터링, 행성 탐사, 해양탐사, 지질탐사, 대기 성분 분석, 산림화재 감지, 홍수 감지 등에 사용된다. 이 외에도 인간의 생리적인 데이터의 원격 감지, 병원에서의 의사와 환자의 위치추적 및 모니터링, 병원에서의 약 투여 등과 관련된 건강 응용분야(health applications)와 가정 자동화, 스마트 환경과 관련된 가정 응용분야(home applications) 등으로 나뉘며 다른 상업적인 응용분야로는 물품 관리, 생산품질 관리, 스마트 사무 공간(smart office space) 조성, 자동화 공정 환경에서의 로봇 조정, 상호 작용하는 장난감, 상호작용의 박물관, 공장과정 조정 및 자동화, 재해지역 감지, 차량도둑 감지, 센서노드가 내부에 장착된 지능적 환경 구성 등에 사용될 수 있다.

센서 네트워크는 무선 네트워크의 한 분야이지만 기존 ad hoc이나 셀룰라 네트워크와는 많은 차이점을 지니고 있어 이는 기존 네트워크 분야에서 제시되었던 많은 프로토콜들을 쉽게 적용시킬 수 없다. 그러므로 센서 네트워크가 지닌 특징과 제약점을 보완할 수 있는 새로운 알고리즘을 적용시켜야 할 것이다.

기본적으로 센서 노드의 저가, 저전력, 작은 크기라는 제약 조건은 센서 노드가 기존의 무선 이동 노드들에 비해 제한된 성능을 가지고 동작하게 만들었다. 특히 접근이 용이하지 못한 곳에 설치되기 때문에 전원의 재공급이 불가능하고 자신의 휴대

전원에 의해서만 전원을 공급받는 커다란 제약이 따르게 된다. 그러므로 이와 같은 제약을 가지고 있는 상태에서도 네트워크에 요구되는 성능을 만족시키기 위해서는 각 센서 노드들이 효율적으로 동작해야 함은 물론이고 각 노드간에도 매우 효율적인 상호 작용이 필요하다.

또한, 센서 네트워크는 기존의 무선 네트워크와 유사한 점도 있으나 그 응용분야 및 제어, 네트워크 구성 등에 있어서 매우 다른 특징을 가지고 있다. 전통적인 네트워크에서는 QoS(Quality of Service) 보장과 높은 대역폭 활용을 위해 모바일 노드들의 구성과 라우팅 그리고 이동성 관리 등을 중요시 여겼으나, 센서 네트워크는 특수한 상태의 감지가 필요한 환경, 즉 사람의 접근이 용이하지 못한 환경에서 매우 작고 많은 센서 노드들이 전력의 재공급을 받지 못하고 동작하게 되므로 센서 노드의 에너지 관리를 무엇보다 중요하게 생각하고 있다. 여기에 더하여 기존의 ad hoc과 같은 무선 환경에 비해 수백에서 수천, 수만에 이르는 많은 노드들이 밀집된 형태로 스스로 상호 작용하여 센서 네트워크를 형성하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 인프라 환경(infrastructure)이 없는 센서 필드(sensor field)에서 각 센서 노드의 수명은 전체 센서 네트워크의 수명을 좌우한다. 그렇기 때문에 무엇보다도 센서 노드의 수명을 연장시키고 전체 노드들이 균형적으로 에너지를 소비하는 것이 요구된다. 그러므로 에너지를 효율적으로 사용하는 프로토콜을 설계하여 센서 노드의 수명을 연장시켜야 한다.

이와 같은 무선 센서 네트워크 환경에서의 제약점을 극복하고 센서 노드의 수명을 연장시키는 것을 목표로 한 많은 프로토콜들이 개발되고 있다. 그 중에서 네트워크 계층의 라우팅 프로토콜은 여러가지 새로운 접근과 방법을 통하여 많은 발전을 이루고 있다. 본 논문에서는 이러한 라우팅 알고리즘 중의 하나로 에너지 효율성을 높이면서 보다 간단하고 새로운 접근을 시도하는 알고리즘은 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 센서 네트워크의 필요 요소를 살펴보고, III장에서는 무선 센서 네트워크의 기존 연구에 대해 분석해 본다. IV 장에서는 멀티홉(multi-hop) 무선 센서 네트워크 환경에서 동작하는 클러스터 기반 계층적 라우팅 알고리즘(cluster-based hierarchical routing algorithm)에 대해 설명할 것이다. V장에서 제안하는 알고리즘에 대한 분석 및 에너지 보존에 대하여 살펴볼 것이고 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 센서 네트워크의 필요 요소

일반적으로 센서 네트워크에서 네트워크 계층의 설계를 하는데 다음과 같은 것을 기본적으로 고려한다^[1].

- Power efficiency : 센서노드가 전력에 대한 제한을 가지고 있고 이는 센서 네트워크의 수명을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 라우팅에서도 전력을 효율적으로 사용하는 것을 가장 중요하게 생각한다.
- Data centric : 어떤 속성에 대한 데이터가 요청된다. 예를 들어 온도 30°C 이상인 지역을 찾는 형식으로 데이터를 요청한다.
- Data aggregation : 역시 전력 소비를 줄이기 위한 방법으로 요청된 데이터에 대한 정보를 가진 노드들이 인접해 있고 인접한 노드들끼리는 비슷한 정보를 가지고 있기 때문에 중복된 데이터의 전송을 발생시킨다. Data Aggregation 은 중복된 데이터 전송에 의한 많은 전력소비를 막는다.
- 여기에 추가적으로 이상적인 센서 네트워크는 attribute-based addressing 과 location awareness 를 가지고 있다.

이와 같은 기본적인 요구 사항을 만족하면서 매우 많은 노드 수, 노드의 메모리 및 처리 능력의 한계를 가진 센서 네트워크를 생각하면, Flat Routing Protocol은 사용에 많은 문제점을 가지고 있다. On-Demand 방식의 경우, 수백에서 수천의 노드들이 경로를 찾기 위해 경로요청 메시지들을 발생할 경우 많은 양의 메시지를 발생시켜 에너지 효율의 저하를 일으키며, 많은 지연이 발생하는 것은 당연한 일이다. 또한 Flat Routing Protocol에서 Table-driven 방식은 센서 노드가 네트워크 내의 노드들의 경로를 유지하는 데 한계가 존재한다. 센서 노드의 메모리 용량은 수백 킬로바이트 정도로 수백에서 수천 개에 이르는 노드들에 대한 정보를 가진 라우팅 테이블을 유지하고 관리하는 것은 사실상 힘들다. 따라서 매우 간단한 라우팅 알고리즘이 필요하다.

무선 센서 네트워크에서는 global addressing 보다 attribute-based addressing이 적합하다. 센서 네트워크에서 발생하는 Query는 주로 속성에 관련된 Query이므로 attribute-based addressing 이 필요하

며 그러므로 점대점 통신보다는 브로드캐스팅 또는 멀티캐스팅이 적합하다. 또한 센서 노드들로부터 수집된 정보는 싱크(싱크) 노드라고 불리는 노드를 통해 외부와 연결되어 인터넷이나 인공위성 등 다양한 중간 매개체에 의해 데이터를 요청한 사용자로 전달이 되는데, 이때 수집된 정보는 전달되는 과정에서 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위해서 data aggregation이 필요하다. 이런 특징들을 살펴볼 때, 무선 센서 네트워크에서는 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅이 가장 적합하다고 할 수 있다. 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅 알고리즘은 센서 네트워크에서 여러가지 이점이 발생한다. 위에서 살펴본 것처럼 로컬 클러스터를 형성함으로써 인접한 지역에서 발생한 사건에 대한 유사한 정보를 클러스터 헤드로 전송하여 클러스터 헤드가 data aggregation 을 수행함으로써 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 하며, 요청된 Query 에 대한 클러스터 헤드에 의한 전달로 비효율적인 Query 의 Flooding 을 막을 수 있다.

그러므로 무선 센서 네트워크의 네트워크 계층의 프로토콜은 클러스터에 기반한 계층적 라우팅 알고리즘이 적합하며, 보다 간단하고 효율적인 계층적 라우팅 프로토콜을 선택하기 위하여 기존의 알고리즘들과 비교 분석할 필요가 있다.

III. 기존 연구

무선 센서 네트워크라는 특수한 환경에서 현재까지 제기된 라우팅 프로토콜은 selforganization 의 특징과 energy-efficiency 측면에서 많은 성능 향상을 가져온 것으로 평가되고 있다^[13]. 그러나 이러한 평가는 현실적으로 고려해야 할 많은 부분들을 고려하지 않은 상태에서 이루어진 면이 적지 않다. 앞의 절에서 제시한 요구사항을 만족하는 기 제시된 클러스터 기반 라우팅 프로토콜들 역시 고려되어야 할 많은 부분들을 가지고 있다.

클러스터 기반 계층적 라우팅 프로토콜의 대표적인 것으로는 LEACH^[6]나 LEACHC^[7], TEEN^[8], 그리고 이를 수정한 APTEEN^[9]과 같은 프로토콜이 존재한다. 이와 같은 프로토콜은 기본적으로 LEACH 에서 가정한 네트워크 환경을 기반으로 하고 있다. 여기서 센서 필드내의 모든 센서 노드들은 멀리 떨어진 싱크노드나 임의의 센서 노드들과 직

접 통신이 가능하며 이로 인한 에너지 손실을 줄이기 위해 센서 노드는 자신이 보내려고 하는 노드로 정확한 전력제어를 통해 전송하여 에너지 효율을 높이고 있다. 또한 새로운 노드들이 들어오는 것이 불가능하며, 모든 노드들은 전송시에 전송에러를 가지지 않는다.

그러나 위에서 살펴본 가정들은 다음과 같은 내용을 검토할 때 그 효용성을 판단할 수 있다. 센서 노드들이 센서 필드 내에 있는 모든 노드들로 통신이 가능하려면 원거리 통신이 가능해야 한다. 그러나 센서 노드들은 센서 필드 내 한번 장착되면 수명을 다 할 때까지 사용되고 재사용이 현실적으로 불가능하므로 낮은 가격에 생산되어야 한다. 그러므로 원거리 통신을 가능하게 하는 고가의 고전력 증폭기가 내장된다는 것은 센서 노드의 비용을 증가시키게 된다. 또한 이런 가정은 센서 노드의 최대 전송 범위로 센서 필드의 범위를 한정시킨다. 최대 전송 범위를 가진 노드로 구성된 센서 필드의 크기는 센서 필드의 가장자리에 있는 센서 노드의 위치에 의해 센서 노드의 최대 범위로 한정된다. 그러므로 현실적으로 저전력을 요구하는 센서 노드의 경우 그 통신 거리는 그리 길지 않기 때문에 이렇게 제한된 지역의 센서 필드는 응용 분야의 제한을 발생시킨다.

여기에 정확한 전력제어는 회로의 복잡도와 단가를 높이는 외에도 시스템을 운영하는데 많은 오버헤드를 일으킨다. 전력제어는 많은 시그널링을 수반한다. 초기 전력제어를 위한 시그널링 이외에도 온도나 습도, 간섭 등 채널에 영향을 줄 수 있는 환경적인 요인을 고려할 때, 링크의 안정성을 제공하기 위해서는 일정 수준이상의 제어 메시지를 지속적으로 주고 받아야 한다. 그러나 클러스터 헤드로의 전력제어는 클러스터 헤드로의 전송 에너지 소비를 증가시키므로 고려해 봐야 할 것이다. 이외에도 새로운 노드가 센서 필드내에 삽입되는 경우, 앞에서 언급한 알고리즘에서는 기존의 센서 네트워크와는 상호 협력을 통해 동일한 망을 형성하는 것이 불가능하다. 여기에 센서 노드의 최대 통신가능 거리로 공간적으로 제약까지 더해진다면 센서 네트워크는 매우 낮은 확장성을 가지게 된다.

위에서 볼 수 있듯이 기존의 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜은 한계를 보이고 있다고 판단된다. 그러므로 새롭게 보다 일반적인 멀티홉 환경을 생각해 보아야 한다.

IV. FLCHA(Flooding-Level Cluster-based Hierarchical Routing Algorithm)

센서 네트워크의 라우팅 프로토콜은 센서 노드의 용량을 고려할 때, 간단해야 하며 에너지 효율적이어야 한다. 또한 self-organization 에 필요한 시그널링은 단순해야 하며, 무엇보다도 전송의 회수를 줄여 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다.

제안하는 알고리즘은 다음과 같은 시나리오로 동작한다. 센서 네트워크는 실제적으로 그림 1과 같은 모습으로 넓은 센서 필드 내에 많은 수의 센서 노드들이 밀집된 형태로 뿌려져 동작한다. 최초로 많은 수의 노드들이 뿌려지게 되고 센서 노드들에 전원이 공급되기 시작하면서 센서 노드들은 스스로 계층적 멀티홉 네트워크를 형성한다. 여기서 센서 필드 내의 모든 노드들은 이동성의 거의 없는 정적인 노드라 가정한다. 그 뒤 센서 노드들은 싱크 노드로부터 요청 query를 받아 응답하며 원하는 데이터를 가진 노드들은 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 이 과정에서 에너지 효율을 높이기 위해 data aggregation을 수행하고 적당한 데이터 링크 계층 프로토콜을 선택하여 보다 효율적으로 동작한다.

이동성의 거의 없는 정적인 노드라 가정한다. 그 뒤 센서 노드들은 싱크 노드로부터 요청 query를 받아 응답하며 원하는 데이터를 가진 노드들은 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 이 과정에서 에너지 효율을 높이기 위해 data aggregation을 수행하고 적당한 데이터 링크 계층 프로토콜을 선택하여 보다 효율적으로 동작한다.

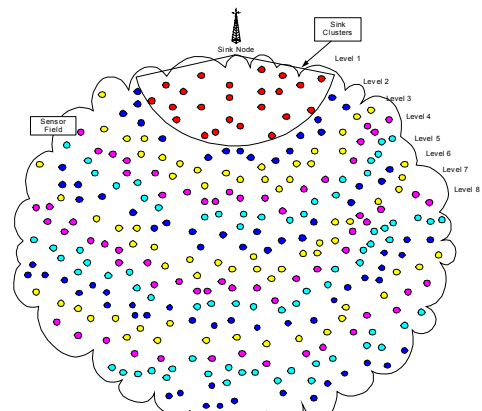


그림 1. 멀티홉 센서 필드 토폴로지

4.1 제안한 알고리즘

기본적으로 기존의 네트워크가 설치되어 있지 않은 지역에 새로운 센서 네트워크가 설치되면 센서 노드는 그림 1과 같은 형태로 임의의 위치에 설치되고 다음과 같은 단계를 거쳐 간단하게 네트워크를 형성한다.

4.1.1 1단계: 초기 플러딩 과정(Initial Flooding Phase)

데이터를 전달하기 위해서는 전원이 공급되기 시작하면서 이웃노드간 통신이 가능한지를 확인하기 위해 제어 메시지가 전달된다. 센서 네트워크의 데이터 흐름은 싱크 노드에서 센서 필드 내에 있는 센서 노드들로 데이터를 요청하는 형태의 interest라 불리는 query와, 이에 응답하거나 설치 전 설정된 문턱값에 의해 감지된 데이터를 싱크 노드로 보내는 형태로 크게 구분할 수 있다. 그러므로 감지된 데이터가 전송 가능하기 위해서는 각 노드에서 싱크 노드로의 경로가 확보되어야 하는데, 반대로 이를 확인하기 위해서는 싱크 노드로부터 시작된 최소 플러딩 신호를 받을 수 있어야 한다. 즉, 이 과정에서 플러딩 신호를 받지 못한 노드는 이웃하는 노드들과 연결을 할 수 없는 고립된 노드임에 틀림없다.

이와 같이 센서 노드들의 연결성을 확인하기 위해서도 플러딩 과정은 필요하다. 이 신호를 받지 못한 노드가 이웃 노드들과의 연결만을 확인하고 데이터를 전송하는 것은 의미없이 에너지를 소모하는 일이다. 이 플러딩 과정을 이용하여 센서 노드들은 자신이 싱크 노드와의 연결이 보장되고 자신의 동작이 에너지를 낭비하는 것이 아님을 확인함과 동시에 싱크 노드로의 레벨을 획득할 수 있다. 싱크 노드로부터 신호를 직접 받은 노드들은 자신의 레벨을 1로 놓는다. 자신의 레벨이 1인 노드들은 자신의 레벨을 싱크로부터의 플러딩 메시지에 담아 이를 이웃노드로 전달한다. 이를 받은 이웃노드들 중에 자신의 레벨이 1이 아닌 노드는 자신의 레벨을 2로 정하고 이를 다시 이웃노드로 플러딩한다. 이와 같은 방법으로 전파된 레벨을 통해 이웃노드간 존재를 확인함과 동시에 싱크 노드와의 연결을 보장 받을 수 있고 데이터 흐름의 방향을 알 수가 있게 된다. 그리고 추가적으로 클러스터를 형성함에 있어서 클러스터 게이트웨이를 쉽게 설정하고 데이터 흐름의 방향과 일치하게 정할 수 있는 등 클러스터 제어에 사용될 수 있다. 이 과정을 통해 노드들은 자신의 이웃하는 노드에 대한 정보를 얻을 수도 있다.

4.1.2 2단계: 클러스터링 과정(Clustering Phase)

• 클러스터 헤드(Cluster-head) 선정

플러딩 과정에서 얻은 플러딩 레벨(flooding level)을 가진 노드들은 임의의 시간을 기다리면서 이웃 노드들 중에서 클러스터 헤드를 선언하는 노드가 있는 지를 듣고 있다. 어떤 클러스터에도 속하지 않은 노드들 중 하나가 임의의 시간을 기다리는 동안 이웃하는 노드들 중에 클러스터 헤드를 선언하는 노드가 발생하지 않으면 임의로 자신을 스스로 클러스터 헤드라고 선언하고 이웃 노드에게 이를 알린다.

이웃하는 노드들은 이 신호를 받은 경우 이를 기록하고 미리 정한 임의의 시간동안 클러스터 헤드를 선언하는 노드를 다시 기다린다. 그 시간 동안에 더 이상 클러스터헤드를 선언하는 노드가 존재하지 않으면, 클러스터 헤드를 선언한 노드가 생성한 클러스터의 멤버로 가입을 한다. 기다리는 동안 다른 노드로부터 클러스터헤드를 선언 메시지를 받는 경우, 이를 수신한 노드는 클러스터 헤드 신호 중에서 가지고 있는 에너지가 많은 노드를 선택하여 가입한다. 임의의 시간이 지나도록 클러스터 헤드를 선언하는 메시지를 받지 못한 노드들은 스스로 자신이 예비 클러스터 헤드임을 선언하고 클러스터를 형성하기 시작한다. 클러스터 헤드 역시 클러스터 헤드 선언 메시지를 보낸 후 일정 시간을 기다린 다음 클러스터의 게이트웨이를 선택하는 과정을 시작한다.

• 게이트웨이(gateway) 선정

게이트웨이 선정과정이 시작되면, 클러스터 헤드는 자신의 클러스터 멤버들 중에 자신보다 상위 플러딩 레벨, 즉 자신의 레벨보다 작은 크기의 레벨을 가진 상위 레벨 노드에게 클러스터의 상위 게이트웨이 노드가 될 수 있는 지를 요청하는 메시지를 보낸다. 이 신호를 받은 상위 게이트웨이 노드 후보들은 다시 임의의 시간을 기다린 후 클러스터 헤드에게 자신이 상위 게이트웨이 노드가 될 것임을 선언하고 메시지를 보낸다. 이를 받은 클러스터 헤드는 게이트웨이 선언 노드 중 하나를 선택하여 상위 게이트웨이 노드로 선언하고 이를 다시 알린다. 이로써 클러스터의 상위 게이트웨이가 생성된다. 그러나 상위 게이트웨이 선언만으로 클러스터간 연결이 완성되는 것은 아니다. 클러스터간 연결을 완

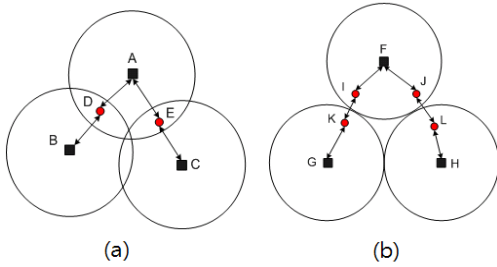


그림 2. 클러스터 게이트웨이 노드를 통한 클러스터 연결

료하기 위해서는 클러스터 헤드간 연결이 보장되어야 한다.

앞서 선택된 클러스터의 상위 게이트웨이 노드는 두가지 경우를 접하게 된다. 그림 2(a)와 같이 상위 클러스터의 게이트 노드 D와 E는 상위 레벨 노드로 클러스터 헤드를 가지고 있다. 이 경우 클러스터 헤드A에게 자신이 하위 레벨 게이트웨이가 될 것임을 알리고 D와 E는 자신의 상위연결로 A를 가진다. 그림 2(b)는 상위 게이트웨이 노드 K와 L은 자신의 이웃 노드들 중 상위 레벨 노드로 다른 클러스터에 속한 노드 I와 J를 가지게 된다. 이 경우 노드 K와 L은 I와 J에게 자신의 상위 연결을 위한 게이트웨이가 되어줄 것을 요청하고 이를 받은 I와 J는 F에게 자신이 하위 게이트웨이 노드가 될 것임을 알려 연결이 성립된다.

그림 2(a)와 같이 B, C의 상위 게이트웨이 노드인 D나 E가 자신의 1홉에 클러스터 헤드를 갖는 경우, 연결요청 신호를 보내고 이를 받은 클러스터 헤드 노드 A는 즉시 D와 E에게 A의 하위 게이트웨이임로 지정되었음을 알리는 메시지를 보낸다. 2(b)에서처럼 1홉 내에 상위 레벨을 가진 클러스터 헤드 노드가 없는 경우, 상위 노드들, I나 J는 임의의 시간을 기다려 자신이 하위 클러스터에 대한 상위 연결이 될 것임을 알려 자신이 게이트웨이 노드가 되었음을 알리고 자신은 자신의 클러스터 헤드에게 하위 클러스터 헤드가 되었음을 알려 연결을 완성한다. 클러스터 게이트 웨이를 선택하기 위한 제어 메시지 전송과정은 그림 3과 같다.

클러스터 헤드는 단지 상위 게이트웨이만을 정하는데 에너지를 사용한다. 그리고 클러스터 헤드가 정한 상위 게이트웨이는 다시 그 상위 연결만을 설정하고 그 상위는 다시 상위 연결만을 설정한다. 그리고 상위 연결로 설정된 노드들은 자신의 하위 연결만을 기록해 두었다가 이후에 싱크 노드로부터

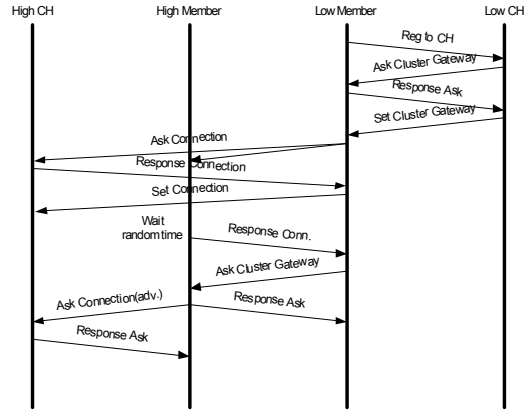


그림 3. 클러스터간 링크 설정 과정

query가 도착했을 때 이를 하위 연결 노드로 전송한다. 이 경우 하위 연결은 그림 2에서 볼 수 있듯이 상위 연결은 단지 한개만 존재하나, 하위 연결은 여러 개일 수 있다.

여기서 클러스터 게이트 웨이를 선택할 때 플러딩 레벨을 이용하는 것은 중요하다. 앞서 가정했듯이 센서 필드 내에 있는 센서 노드들은 대부분이 정적인 상태로 이동성의 거의 없다. 이런 고정된 센서 노드들과 싱크 노드는 데이터의 흐름의 방향이 거의 일정하다. 데이터는 센서 노드는 항상 싱크 노드로 데이터를 전송하기를 원하고 싱크노드는 데이터 요청을 모든 노드들로 알리기를 원한다. 그러므로 클러스터의 게이트웨이를 선택할 때 플러딩 레벨을 이용하여 클러스터의 게이트웨이를 선택하는 것은 클러스터의 데이터가 싱크 노드 방향으로 최단거리로 전송되는 것을 보장한다. 예를 들어 이런 형태로 데이터 전송이 이루어지지 않는 경우, 싱크 노드로의 전송의 홉수가 증가할 것이며, 이는 에너지의 효율성을 감소시킨다.

4.1.3 3단계: 데이터 전송 과정

형성된 클러스터는 기본적으로 클러스터 헤드에 의해 모든 동작들이 제어가 된다. 그리고 클러스터 내에서 감지되어 얻은 정보는 클러스터 헤드로 전송되고 이를 수신한 클러스터 헤드는 data aggregation 과정을 통해 압축되어 상위 게이트웨이 노드로 전송한다. 이를 받은 게이트웨이 노드는 선정한 상위 연결로 이 데이터를 전송하기만 하면 된다. 이를 통해 상위 연결을 설정하는 것이 보다 간단해졌으며 무엇보다도 클러스터의 상위 게이트웨이가 싱크 노드로 향하고 있다는 것이다.

4.2 제안하는 알고리즘의 특징

이와 같은 구조를 하는 이유는 다음과 같다.

먼저, 앞에서 언급한 **data aggregation** 이 용이하며, 불필요한 전송을 막아 로드가 싱크 노드와 가까운 상위로 편중되는 것을 줄여 에너지 효율을 높일 수 있다. 또한, 클러스터 유지 및 관리하는데 매우 편리하다. 클러스터의 멤버 노드들은 모두 1 홉 내에 있기 때문에 클러스터 헤드의 제어를 쉽게 받을 수 있다. 클러스터헤드가 에너지를 모두 소모하거나 고장으로 인해 동작을 하지 못할 때, 클러스터는 해체된다. 이런 현상이 발생하였을 경우 멤버들이 이를 빠르게 감지하여 이웃하는 클러스터의 멤버가 되거나 클러스터 헤드를 선출하는 과정으로 들어갈 수 있다.

MAC을 결정하거나 적용하기가 매우 용이하다. 클러스터가 1홉을 형성하므로 성능향상을 위해 TDMA 와 같은 방식을 적용하기 쉽다. 새로운 노드가 센서 필드에 삽입되었을 경우, 간단하게 이웃하는 노드로부터 Flooding 레벨을 받고 이웃하는 노드들 중에 클러스터 헤드를 찾거나 이를 찾지 못하는 경우에는 스스로 클러스터 헤드가 되어 간단하게 연결을 설정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 무엇보다도 이 방법은 클러스터 형성에 간단한 시그널링을 이용하며, data aggregation 을 용이하게 하여 불필요한 전송을 막음을 통해 에너지 효율을 높이고 싱크 방향으로의 로드를 분산시켜 센서 네트워크의 수명을 증가시키는데 있다.

V. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 제안한 알고리즘에 대한 성능평가를 위하여 C++를 사용하여 제작한 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜 시뮬레이터를 이용하였다. 센서 필드에서 센서 노드간 연결을 위해 필요한 노드 수 및 밀도, 클러스터 헤드 및 게이트웨이 노드, 일반 노드간 에너지 소비량 비교, 센서 노드들의 수명 비교 이 세 가지 경우에서의 성능 분석을 수행하였다. 제안한 알고리즘의 성능의 우수함을 검증하기 위한 비교 대상으로 LEACH와 APTEEN과 같은 프로토콜은 사용하지 못한다. 기본적으로 가정하고 있는 네트워크 환경의 차이, 즉, 멀티홉 센서 네트워크가 아니라는 점에서 두 알고리즘은 비교될 수 없으므로 비교 대상에서 제외시켰다. 비교할 만한 멀티홉 클러스터 구조의 라우팅 알고리즘을 찾기 어려워 대신 전송간 각 노드의 에너지 소비를 최소화하는 알고리즘인 MTE(Minimum-

Transmission -Energy)를 사용한 경우와 비교하였다. 성능 분석 비교는 최초에 같은 에너지를 가진 노드들이 같은 수의 센서 노드들이 센서 필드에 뿌려지고 self-organization과정을 통하여 상호간 연결을 설정 및 라우팅을 위한 경로를 찾게 된다. 이후 센서 노드는 일정크기의 데이터를 싱크노드로부터 전송 받으며, 보낸 데이터가 존재하는 노드들은 싱크노드로 전송을 실시한다. 센서 필드 내 모든 노드들은 동일한 확률로 분산되어 위치하게 되고, 각 노드는 고정되어 있다고 가정한다. 싱크노드는 CBR(continuous bit rate) 소스에 의해 트래픽을 발생시키며 이를 브로드캐스트한다. 센서 노드는 센서 필드에 비해 전송범위가 작고, 싱크노드의 요청에 항상 응답하므로 센서 노드 전체의 전원이 공급되고 있는 경우를 전제하고 있으며, 전송범위가 넓어 라우팅에 필요한 노드만 에너지 소비를 할 때를 고려하여 비교를 실시하였다.

그림 4에서 원은 중심의 흰색으로 표시된 센서 노드의 1홉 전송범위를 나타내는 것이며, 주위의 다른 색으로 표시되는 노드들은 전송범위 내에 있는 이웃 노드들을 표시하고 있다. 각 노드는 균일한 확률로 센서 필드 내에 설치되어 고정된다. 제안하는 데이터 전송 시나리오에서는 연결의 보장을 위해 일정 크기 이상의 밀도를 가지고 동작한다.

데이터는 싱크노드에서 발생하고 이에 따른 응답, 즉 모든 센서 노드는 싱크노드에서 보낸 interest와 같은 query에 보낸 데이터를 가지고 있어 전송하는 것을 반복하는데 앞서 언급한 것과 같이 CBR 에 의해 발생한다. 패킷의 크기는 1024bytes를 기본적으로 사용하고 있으며, CBR은 100ms 마다 interest를 11Mbps로 전송한다.

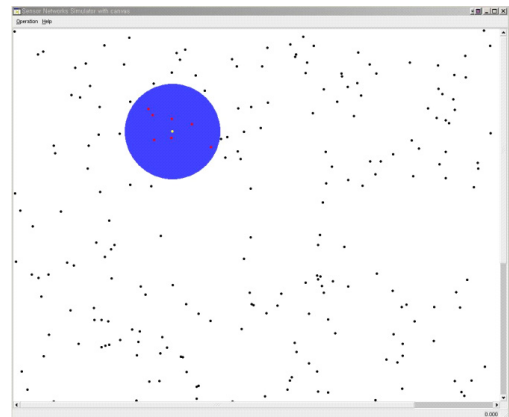


그림 4. 시뮬레이션 센서 필드

5.1 에너지 모델

에너지 모델은 기본적으로 LEACH^[6]에서 사용하고 있는 에너지 모델을 사용한다. 각 센서 노드는 전송 시와 수신 시 에너지를 소비하게 되는데, 각 노드 각각 다음과 같이 에너지를 사용하게 된다.

전송 시,

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (1)$$

수신 시,

$$E_{Rx}(k, d) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec} \times k \quad (2)$$

의 에너지를 소모한다. 단, $E_{elec} = 50nJ/bit$,

$\epsilon_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ 이다.

가정에 의해 센서 노드들은 모두 일정한 전송범위를 가지고 전송하게 되므로, 전송할 때나 수신할 때 일정한 크기의 에너지를 소모하게 된다.

5.2 노드 밀도에 따른 싱크노드와 연결 보장에 관한 분석 - 시뮬레이션 1

5.2.1 연결률과 밀도의 관계

가정한 멀티홉 센서 필드 내에서는 싱크노드와의 연결을 보장하게 하는 센서 노드의 수가 센서 네트워크에서는 매우 중요한 요소가 된다. 연결이 보장되지 않는 경우, 센서 네트워크의 큰 문제점으로 발생한다. 다시 말해 싱크노드로 연결이 되지 않는 노드는 쓸모없는 노드가 되는 것이고 그 노드들이 수집한 데이터는 사용할 수 없는 데이터이다. 그러므로 에너지 효율성을 살펴보기 전에 센서 필드 내에 싱크노드와의 연결을 보장하기 위해서는 최소 노드의 경우보다 어느 정도 노드가 추가적으로 더 필요한지를 살펴봐야 한다. 어느 정도 이상의 연결률이 보장되기 위해서는 노드의 1홉 내에 추가적인 노드가 발생하여야 하며, 이 추가적인 노드를 제어함으로써 에너지 측면에서 어떤 이점이 발생하는 지를 계층적으로 클러스터를 형성하는 경우가 평면적으로 형성하는 경우에 대해 비교할 수 있게 된다.

그림 5와 6에서는 1000m × 1000m와 500m × 500m의 센서 필드 내에서 노드수에 따른 연결률에 대한 비교를 하였다. 여기서 센서 필드 내에 대한 노드의 밀도는 연결률과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다. 센서 노드들의 임의의 평균 연결률 이상을 연결되기를 원할 경우, 그에 해당하는 밀도 이상의 노드가 필요하게 된다. 그림 7은 밀도에 따른 노드

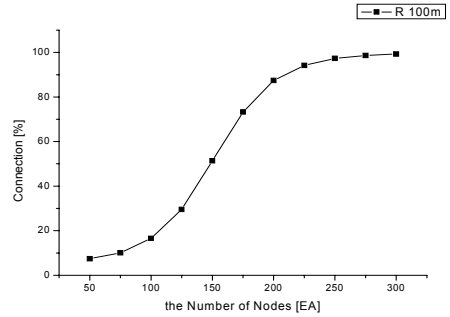


그림 5. 센서필드 1000m X 1000m에서 센서 노드에 따른 싱크노드로 연결성공률

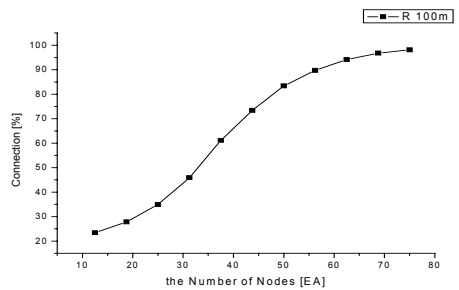


그림 6. 센서필드 500m X 500m에 대한 결과

연결률의 관계를 보여준다. 여기에 추가적으로 센서 노드들의 연결률은 센서 노드들의 전송 범위의 크기와 연관성이 있다는 추론할 수 있다. 전송 범위가 작은 경우, 센서 노드의 연결률은 당연히 감소할 것으로 예상된다. 즉, 센서 노드의 밀도는 이는 센서 노드의 1 홉 범위 내에서의 밀도와도 연관이 있다. 예를 들어, 전송범위 100m과 50m 인 경우에 대해 비교해 보자. 전송 범위가 100m인 노드는 50m인 노드에 비해 넓은 전송범위를 가지고 있다. 2배의 전송범위를 가지므로 50m에 비해 더 적은 수의 노드들로도 같은 연결률이 보장된다. 다시 말해 적은 밀도로 50m와 같은 효과를 기대할 수 있다는 뜻이다. 그러므로 밀도의 측면에서 살펴 보면, 연결률은 밀도와 매우 밀접하며 밀도는 면적에 의한 것이고 전송 범위의 제곱에 비례하므로, 1홉 내의 밀도비가 연결률과 밀접한 관계가 있다는 결론을 얻게 된다. 그림 8은 이를 보여주고 있다. 전송범위가 2배 작은 센서 노드는 비슷한 연결률을 보장하기 위해 4배의 밀도가 필요하다.

그림 8에서 전송 범위가 50m로 적은 노드가 같은

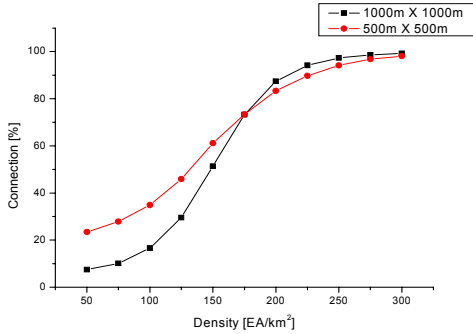


그림 7. 밀도에 따른 연결 성공률 비교

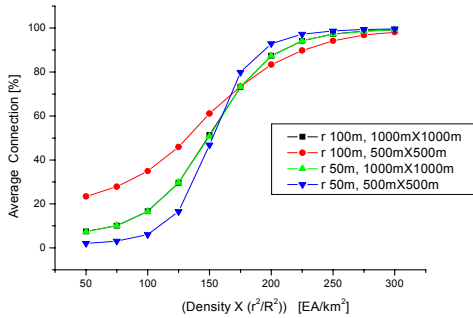


그림 8. 전송범위에 따른 연결성공률 비교(기준 전송범위 R=100m)

비교 밀도에서 더 좋은 연결률을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 비교 밀도에 의한 것이다. x축의 값은 전송범위 100m를 기준으로 하였을 경우의 비교 밀도이다. 예를 들어 100m의 전송범위를 갖는 센서 노드의 경우, 200 [개/km²]의 밀도를 가질 때 같은 비교 밀도를 가지기 위해서 전송 범위를 1/2인 50m로 갖는 센서 노드의 밀도는 그의 4배의 밀도를 가질 때 같은 비교 밀도를 가질 수 있다. 즉, 센서 노드의 수가 4배가 많아야 비슷한 연결률을 가지게 된다. 이것은 확률적으로 생각해 볼 때, 전송범위는 1/2로 적지만 4배의 증가된 노드로 인하여 연결 확률이 높아져 그래프가 급격히 변하는 것이다.

5.3 에너지 효율 비교 및 에너지 균형적 소비 비교 분석 - 시뮬레이션 2

시뮬레이션 2에서는 전송범위 100m를 가진 센서 노드들이 균일한 확률로 500m×500m의 센서 필드 내에 설치되는 것을 기본으로 한다.

5.3.1 MTE과 에너지 효율 비교

그림 9는 플러딩 레벨 클러스터 기반 계층적 라우팅 알고리즘을 사용한 경우와 앞서 언급한 것처럼 MTE 라우팅 알고리즘을 사용한 경우를 비교하였다. MTE와 비교하여 최초 클러스터링에 사용된 에너지로 인해 가지고 있는 평균 에너지의 양은 적게 시작한다. 그러나 시간이 지날수록 4초까지 매우 좋은 에너지 효율을 보여준다. 이것은 클러스터 구조가 MTE에 비해 data aggregation이 뛰어나기 때문이다. 그러나 4초 이후에는 갑자기 MTE의 효율이 좋아지는 것으로 나타나고 있다. 이것은 그림 10을 보면 알 수 있듯이 노드의 에너지 소모로 인하여 노드가 정지했기 때문에 발생한다. 에너지가 적었던 노드가 정지함과 동시에 노드의 수가 감소하여 평균에너지 잔여량이 증가하는 것처럼 보이는 것이다. 이는 클러스터 구조에 비해 data aggregation 과정이 원활하지 못하기 때문이다. 싱크 노드와 인접한 노드는 센서 필드로부터 전송된 데이터를 지속적으로 싱크 노드로 중계해야 하기 때문에 그만큼 에너지 소비가 많아지게 되고 다른 노드에 비해 빨리 에너지를 써 동작을 멈추게 된다. 이

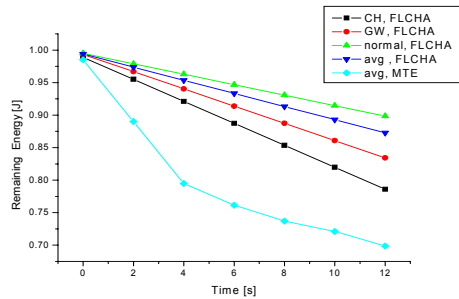


그림 9. 클러스터 기반 계층적 라우팅 알고리즘에서 각 노드별 에너지 평균 잔여량과 MTE에서 노드의 평균 에너지

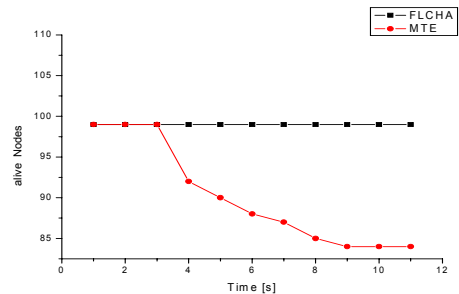


그림 10. 센서 노드 수의 변화

와 같은 현상이 지속적으로 발생하면 싱크 노드와 인접한 노드들은 빨리 에너지를 소비하여 수명을 다하게 되고 이는 센서 네트워크의 수명을 줄이는 현상과 직결된다. 여기서도 알 수 있듯이 수많은 센서 노드 수로 인하여 data aggregation은 효과적으로 수행되어야 하며, 그로 인해 클러스터 구조의 에너지 균형적 사용이 요구된다.

5.3.2 균형적 에너지 사용

그림 11은 제안한 알고리즘에서 각 노드별 평균 에너지 잔여량을 나타내고 있다. 여기서 7초 이후에 클러스터헤드 노드가 잔여 에너지 증가 현상을 보이는 것은 클러스터 헤드 노드 중에 많이 에너지를 소비한 노드가 클러스터헤드를 선언할 때 정한 에너지 문턱값(남은 에너지의 1/2) 이하로 에너지가 떨어지는 경우, 현 클러스터를 해체하고 클러스터를 재형성되어 많은 에너지가 남은 노드가 클러스터헤드가 되기 때문이다. 재형성 과정을 통해 에너지를 많이 소모하는 노드가 역할을 바꿈으로써 에너지 소비의 균형을 맞추게 된다. 이와 같은 균형적 에너지 소비로 센서 네트워크의 수명을 연장시킨다.

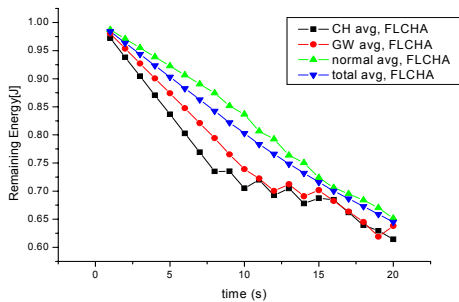


그림 11. 제안한 알고리즘에서 각 노드 별 평균 에너지 량

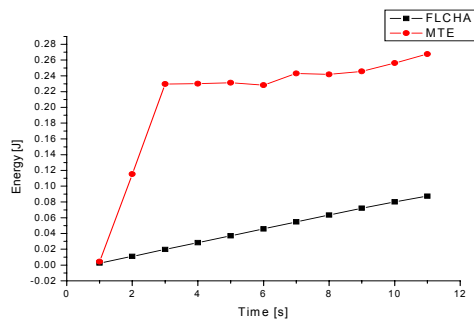


그림 12. 제안한 알고리즘과 MTE의 평균 표준편차

센서 노드들의 잔여 에너지 표준편차에 대해 살펴보면 그림 12와 같다. 센서 노드간 에너지 표준편차로 MTE의 경우 에너지 표준편차가 커 빨리 죽는 노드가 발생 가능성이 제안한 알고리즘에 비해 매우 크다. 이에 비해 제안한 알고리즘은 균형적인 에너지 소비를 하는 모습을 볼 수 있다. 연결률의 측면에서 볼 때, 에너지의 불균형적인 사용은 센서 노드의 수를 감소시켜 밀도를 줄이고, 이는 센서 네트워크의 수명을 단축시키고 네트워크의 범위를 축소시킨다.

그림 13은 제안한 알고리즘에서 각 노드별 에너지 표준편차를 보여주고 있다. 일반 노드가 초기에 매우 적은 편차를 보이다가 클러스터 재형성 과정을 겪으면서 에너지를 많이 사용한 클러스터헤드 노드가 일반노드가 되고 일반노드 중 많은 에너지가 남은 것이 클러스터헤드가 되면서 전체 표준편차에 가까운 값으로 이동하게 된다. 이는 역시 균형적인 에너지 소비를 나타내고 있다.

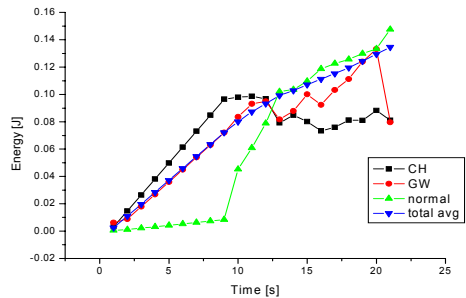


그림 13. 제안한 알고리즘에서 노드 별 에너지 표준편차

VI. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 보다 일반적인 환경인 멀티홉 환경에서 에너지 효율을 높이기 위한 클러스터 기반 계층적 라우팅 알고리즘을 제안하고 있다. 제안한 알고리즘에서 멀티홉 환경에 대한 가정은 센서 네트워크의 범위를 확장시켜 많은 응용분야 창출을 가능하게 하는 매우 중요하면서도 일반적인 형태이다. 여기에 더불어 계층적 라우팅 알고리즘은 data aggregation을 효과적으로 수행할 수 있게 하여 높은 밀도를 가진 센서 네트워크에서 에너지 효율을 높여준다. 또한 싱크노드로의 연결보장이 필요한 센서 노드는 이를 확인하는 과정에서 얻을 수 있는 플러딩 레벨을 이용하여 보다

간단하게 싱크노드로 경로를 잡을 수 있게 해준다. 센서 필드 내에 설치된 센서 노드들은 모니터링을 주요 임무로 하고 있는데, 데이터의 흐름은 싱크노드에서 센서 필드로, 센서 필드에서 싱크노드의 방향으로 흐른다. 이와 같은 특징을 가진 센서 네트워크에서, 제안한 플러딩 레벨을 이용하는 알고리즘은 좋은 경로를 쉽게 찾을 수 있게 해준다. 또한 싱크노드 방향으로 상위 연결만 설정함으로써 연결이 가능하기 때문에 inter-cluster 라우팅이 매우 간단한 특징을 지닌다. 즉, 클러스터간 라우팅을 위한 별도의 라우팅 과정이 불필요하다.

클러스터를 형성하며 에너지 기준에 의하여 클러스터 내에서 역할을 바꿔 수행함으로써 에너지를 균형적으로 소비한다. 균형적인 에너지 소비는 센서 노드의 전체적인 수명을 연장시키는 것이고 이는 네트워크 전역에 있는 노드들을 효과적으로 사용하는 것이므로 매우 중요하다.

또한 추가적으로 어플리케이션에 따라 클러스터 헤드와 게이트웨이 노드를 제외한 일반 노드들은 Sleep 모드와 같은 에너지를 사용하지 않는 모드로 전환시키는 것이 가능하므로 에너지 효율을 증대시킬 수 있다. 여기에 추가적으로 에너지 효율적인 MAC 계층의 알고리즘을 사용함으로써 더욱 효과적인 에너지 소비를 예상할 수 있다.

제안한 알고리즘은 위와 같은 특징과 장점을 지니면서 멀티홉 환경을 가정하고 있기 때문에 보다 센서 네트워크의 여러 응용분야에서 사용될 수 있을 것으로 여겨진다. 그러나 이 역시 센서 네트워크의 많은 응용분야 중 일부분인 앞서 가정한 환경에 적용시킬 때만 효율적일 것이다. 많은 영역에서 사용되며 수많은 환경적, 응용적 요소를 가진 센서 네트워크의 무한한 가능성에 비추어 볼 때, 앞으로 보다 효과적인 에너지 소비를 수행하면서 더욱 많은 응용분야에도 효과적으로 동작할 수 있는 많은 알고리즘들에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks* 38 (2002)

[2] Praveen Rentala, Ravi Musunnuri, Shashidhar Gandham, Udit Saxena, "Survey on Sensor Networks"

[3] K. Sohrabi, Jay Gao, V. Ailawadhi, Gregory J.

Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network." *IEEE Personal Communications*, Vol. 7 Issue 5, pp. 16-27, 2000

[4] C. Perkins. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing. Internet-Draft, draft-ietf-man-etaadv-04.txt, pp. 3 - 12, October 1999, Work in progress.

[5] V. Park and S. Corson. "Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version 1 functional specification," INTERNET-DRAFT, draft-ietf-man-ettora-spec-02.txt, October 1999. Work in progress.

[6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks" *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Science*, pp. 1-10, Jan, 2000

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

[8] A. Manjeshwar, D. P. Agrawal, "TEEN: a routing protocols for enhanced efficiency on wireless sensor networks." *International Proceedings of 15th Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp. 2009-2015, 2001

[9] A. Manjeshwar, D. P. Agrawal, "APTEEN: A Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, April 2002.

[10] W. R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks" *Proceedings of ACM MobiCom 99*, Seattle, WA, pp. 174-185, 1999

[11] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. "Embedding the internet: wireless integrated network sensors," *Communications of the ACM*, 43(5), pp. 51 - 58, May 2000.

[12] S. Singh and C. Raghavendra. "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for ad

hoc networks,” ACM Computer Communication Review, 28(3), pp. 5 - 26, July 1998.

- [13] S. Singh, M. Woo, and C. Raghavendra. “Power aware routing in mobile ad hoc networks,” *In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 181 - 190, October, 1998.
- [14] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. “An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks,” *In Proceedings of the IEEE Infocom*, pp. 3 - 12, New York, USA, June 2002.
- [15] 한우영, 인정식, 이종훈, 엄두섭, “멀티홉 무선 센서 네트워크 환경에서 플러딩 레벨 클러스터 기반 라우팅 알고리즘,” *한국통신학회 추계종합 학술지*, vol. 28, pp. 55, 2003

홍 성 화 (Sung-Hwa Hong) 정회원



1996년 2월 고려대학교 컴퓨터학과 졸업
 2002년 8월 항공대학교 정보통신학과 석사
 2004년 9월~현재 고려대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
 <관심분야> 센서네트워크, 모바일

컴퓨팅, 무선 홈네트워킹

김 병 국 (Byoung-Kug Kim) 정회원



2002년 8월 원광대학교 컴퓨터정보통신공학부 졸업
 2004년 8월 고려대학교 통신시스템기술협동과정 석사
 2004년 9월~현재 고려대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
 <관심분야> 센서네트워크, 모바일 컴퓨팅, 모바일 미들웨어

엄 두 섭 (Doo-Seop Eom) 종신회원



1987년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업
 1989년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
 1999년 2월 일본 오사카대학교 정보컴퓨터과학과 박사
 1999년 9월~2000년 원광대학교

컴퓨터정보통신공학부 전임강사
 2000년 9월~현재 고려대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> Ad-Hoc 네트워크, 센서네트워크, 유비쿼터스 네트워크, 인터넷 QoS