

무선 센서 네트워크상에서 센서간의 밀도를 고려한 클러스터 헤드 선정 알고리즘

정 의 현[†] · 이 성 호^{††} · 박 용 진^{†††} · 황 호 영^{††††} · 허 문 행^{†††††}

요 약

센서 기술의 발전으로 무선 센서 네트워크는 빠르게 발전하고 있으며, 다양한 분야의 적용이 예상되고 있다. 무선 센서 네트워크에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 네트워크를 에너지 효율적으로 운용하는 것이다. 이러한 목적을 위해 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 LEACH-C에서 제안한 클러스터 헤드 선정 알고리즘에 노드들의 밀도를 같이 고려한 향상된 클러스터 헤드 선정 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션 하였다. 제안된 알고리즘은 LEACH-C와 실행 속도는 거의 유사하면서 11% 이상의 성능 향상 결과를 제공하였다. 본 논문의 시뮬레이션 결과는 클러스터 헤드 선정 시에 헤드와 다른 노드들 간의 거리 뿐 아니라 밀도를 고려하는 것이 센서 네트워크의 에너지 이용에 보다 효율적임을 보여주었다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 클러스터 기반 라우팅, 에너지 효율성, 센서 밀도

A Cluster Head Selection Algorithm Adopting Sensor Density on Wireless Sensor Networks

Eui-Hyun Jung[†] · Sung-Ho Lee^{††} · Yong-Jin Park^{†††} · Ho-Young Hwang^{††††} · Moon-Haeng Hur^{†††††}

ABSTRACT

Due to the continuous development of sensor technology, Wireless Sensor Networks are rapidly growing and are expected to be applied to various applications. One of the most important factors in Wireless Sensor Networks is energy-efficient management of network resources. For this purpose, a lot of researches have been ongoing in the development of energy-efficient routing protocol. In this paper, a cluster head selection algorithm considering node density in addition to the cluster head selection algorithm of LEACH-C is proposed and simulated. This algorithm gives nearly the same computational speed compared to that of LEACH-C and shows improvement of network lifetime about 11% better than LEACH-C. The simulation result shows that consideration of density as well as distance between nodes in cluster head selection can be more energy-efficient than considering only the distance between nodes as LEACH-C in energy usage of Wireless Sensor Networks.

Key Words : Wireless Sensor Networks, Cluster-based Routing, Energy Efficiency, Sensor Density

1. 서 론

최근의 센서 기술의 발전으로 인하여 저비용, 저전력, 소형화된 센서 노드들이 개발되고, 이러한 센서 노드들로 구성된 무선 센서 네트워크는 기존의 무선 네트워크에서는 불가능했던 적용 범위를 제공할 수 있게 되었다.

센서들은 화산 활동 지역이나 화학 공장과 같은 극도로

위험한 환경, 핵폭발이 발생한 재난 지역, 접근이 어려운 지역, 또는 구조변경이나 위험을 감지하기 위해 우주비행선에 배치될 수 있다. 또한 무선 센서 네트워크는 군사, 의료, 교육, 상업, 홈 네트워크 등 여러 분야에 응용될 수 있다. 예를 들어, 군사적인 측면에서는 군대의 명령, 제어, 통신, 감시, 정찰, 목표물 시스템 등에 응용될 수 있으며, 의료분야에서는 센서 노드는 환자의 상태를 관찰하거나 장애인을 보조하는데 배치될 수 있다. 그 밖의 상업적인 응용으로는 재고 관리, 우편물 추적, 품질 관리에 사용될 수 있다.

그러나 무선 센서 네트워크(이하 센서 네트워크)의 다양한 응용가능성에도 불구하고, 센서 네트워크는 한정된 자원의 센서 노드들로 구성되어 있고, 한 번 구성된 후에는 유

† 정 회 원 : 안양대학교 디지털미디어 학부 전임강사
 †† 정 회 원 : 삼성전자 정보통신 총괄
 ††† 정 회 원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수
 †††† 종신회원 : 안양대학교 디지털미디어학부 조교수
 ††††† 종신회원 : 안양대학교 디지털미디어학부 부교수(디지털미디어 공학전공)
 논문접수 : 2006년 5월 31일, 심사완료 : 2006년 8월 11일

지 및 보수가 어렵다는 단점을 갖고 있다. 따라서 센서 네트워크에서는 에너지 소비를 최소화하고, 한정된 자원을 효율적으로 사용하여 네트워크 수명을 최대화하는 것이 중요한 문제이다. 현재 각 계층 별로 많은 연구가 진행되고 있으며, 네트워크 계층에 있어서는 자가 구성(self-organizing) 능력, 제한된 전력, 데이터 중심적인 특성 등을 고려하여 다양한 라우팅 프로토콜들이 제안되고 있다[1, 2].

현재까지 제안된 센서 네트워크 라우팅 프로토콜은 크게 평면 라우팅(planar routing)과 클러스터 기반 라우팅(cluster-based routing)으로 나눌 수 있으며, 에너지 효율적인 측면에 있어서 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜이 평면 라우팅 프로토콜에 비해 뛰어난 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다[3]. 클러스터 기반의 계층적 라우팅 프로토콜 중에서 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[4]는 클러스터 기반의 라우팅 분야에서 대표적인 연구로 간주되고 있다[5]. LEACH는 분산 알고리즘을 통해서 효율적인 클러스터 헤드 선정이 가능하게 하지만, 매 라운드마다 동일한 클러스터 헤드의 수를 보장할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 이에 비해 LEACH-C는 LEACH와 동일한 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜이지만 기지국의 통제 하에 클러스터 헤드가 결정된다는 차이점이 있다. 즉, 기지국에서 클러스터 헤드를 선정함으로써 클러스터 헤드의 개수를 보장받을 수 있는 장점이 있다.

그러나 LEACH-C에서 최적의 클러스터 헤드 선정에 있어서는 센서 네트워크에 참여하는 각 센서 노드들의 거리를 계산하여 평균 거리가 가장 짧은 센서 노드를 찾아야 하는데, 이러한 과정을 짧은 라운드 교체 시간에 처리하는 것은 NP-Hard 문제에 속하게 되며, 이를 해결하기 위해 LEACH-C에서는 근사 알고리즘(approximation algorithm)인 Simulated Annealing Algorithm[6]을 사용한다. 이 알고리즘은 짧은 시간에 효율적인 클러스터 헤드를 선정할 수 있는 특징을 갖고 있지만, 근사 알고리즘의 특성상 선정된 헤드가 반드시 최적의 값이라 보장할 수 없다는 한계점을 안고 있다.

본 논문에서는 LEACH-C의 클러스터 헤드 선정 알고리즘에 센서간의 밀도를 고려한 요소를 추가하여, 보다 효율적인 클러스터 헤드 선정이 가능한 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 초기에 센서 노드들의 밀도 함수를 계산하여, 이를 매 라운드마다 기존 알고리즘과 밀도 함수를 결합한 새로운 평가치를 계산하여 클러스터 헤드를 선정하게 된다. 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비해서 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드들과의 평균 거리를 감소시키는 결과를 보여주었으며, 이것은 전체 센서 네트워크의 에너지 이용에 효율성을 높여주었다. 본 논문은 서론에 이어 2장에서 기존 라우팅 프로토콜의 간략한 소개와 LEACH 및 LEACH-C에 대해 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 에너지 효율 향상을 위한 클러스터 헤드 선정 알고리즘을 소개하고 4장에서는 제안한 알고리즘의 효율성에 관련된 시뮬레이션 결과 및 성능평가를 기술한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

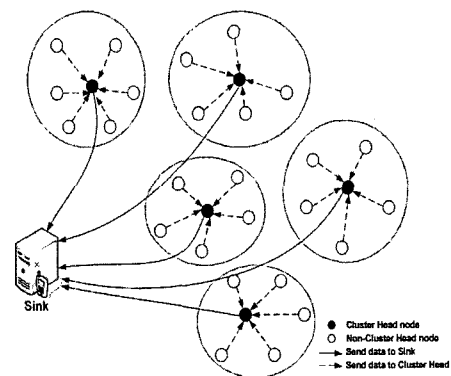
2.1 라우팅 프로토콜

센서 네트워크는 제한된 에너지를 가진 센서 노드들로 구성되고, 감시하는 지역에 무작위로 뿌려져 사용자의 직접적인 접근이 불가능하며, 자가 구성(self-organizing)을 통해 네트워크를 구성해야 한다. 이러한 특징 때문에 에너지 효율적으로 네트워크의 수명을 증가시킬 수 있는 라우팅 프로토콜에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 현재까지 제안된 라우팅 알고리즘은 크게 평면 라우팅 방식과 클러스터 기반(cluster-based) 방식으로 나눌 수 있다[3].

평면 라우팅 프로토콜은 네트워크를 구성하는 모든 센서 노드들이 동등하게 라우팅에 참여하고, 멀티 홉 라우팅(multi-hop routing)을 주요 특징으로 한다. 멀티 홉 라우팅에서는 정보를 센싱한 센서 노드가 기지국에 가까운 인접 센서 노드로 데이터를 보내는 과정을 반복하여 데이터를 전송하게 된다. 기존의 연구로는 협상을 통해 필요 없는 데이터 전송을 제거함으로써 에너지를 소비를 줄이는 SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)[7], Directed Diffusion[8]이 있다.

이에 비해 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 (그림 1)에서 볼 수 있는 것처럼, 센서 노드들을 그룹 단위로 묶어서 클러스터(cluster)를 구축하고, 클러스터 단위에서 데이터를 결합하여 기지국(base station)으로 전달하는 구조를 갖고 있다. 각 클러스터에는 기지국과 통신하는 클러스터 헤드(head)가 존재하고, 클러스터 내의 일반 센서 노드들은 클러스터 헤드와만 통신함으로써 전송 에너지를 최소화할 수 있게 된다. 또한 클러스터 헤드가 일정 시간마다 교체됨으로써 에너지 소비를 다른 센서 노드들로 분산시키는 결과를 얻게 된다. 따라서 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 에너지 소비와 데이터 수집 지연 문제에 대해서 효과적인 라우팅 프로토콜로 간주되고 있다[3].

대표적인 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에는 LEACH(Low - Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[4], LEACH-C ((Low - Energy Adaptive Clustering Hierarchy - Ce



(그림 1) 클러스터 기반 라우팅 프로토콜 기본 구조

entralized)[4] 와 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)[9]가 있다. 그 밖의 TEEN[10]과 APTEEN[11]은 LEACH를 근간으로 하는 클러스터 기반의 계층적 라우팅 프로토콜이며, BCDCP(Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol)[12]은 클러스터 헤드가 직접 기지국에게 데이터를 전송하는 대신에, 클러스터 헤드간의 멀티홉 방식을 통해 기지국에게 데이터를 전송하는 라우팅 프로토콜이다.

2.2 LEACH와 LEACH-C

2.2.1 LEACH

LEACH는 클러스터 기반 라우팅 기법으로 클러스터 헤드가 클러스터에 포함된 센서 노드들로부터 데이터를 전송받아 데이터 결합(data aggregation)을 통해 데이터를 모아서 기지국으로 전송한다. 이 방식의 특징은 많은 에너지 소모가 발생하는 클러스터 헤드 역할의 편중을 피하기 위해 네트워크를 구성하는 모든 센서 노드들에 에너지 소비를 공정하게 분산시키는 방식을 택하고 있다는 것이다. 다시 말해 라운드(round)라는 시간 단위마다 네트워크를 구성하는 전체 센서 노드들 중에서 무작위로 클러스터 헤드를 선택하고 네트워크 전체적인 통신비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드에서 클러스터의 데이터를 결합하여 기지국으로 보내는 방식이다.

각각의 라운드는 클러스터의 구성이 이루어지는 셋업단계(set-up phase)와 각 센서 노드가 클러스터 헤드를 통해서 데이터를 기지국으로 전송하는 안정단계(steady state phase)로 구성된다. 셋업 단계에서 클러스터 헤드가 무작위로 선정되고 각 센서 노드가 선정된 클러스터 헤드가 보낸 ADV(advertisement message) 신호 강도를 바탕으로 인접한 클러스터 헤드를 선택함으로써 클러스터를 구성하게 된다. 안정 단계에서는 TDMA(Time Division Multiple Access) 스케줄에 따라 각 센서 노드들로부터 클러스터 헤드로 데이터의 전송이 이루어지고 클러스터 헤드에서 데이터 결합을 통해 생성된 정보가 기지국으로 전송되게 된다.

2.2.2 LEACH-C

LEACH의 분산 클러스터 구성 알고리즘은 클러스터 헤드의 선정과 클러스터 헤드 노드의 수를 보장하지 못하는 단점이 있다. 이것은 각 라운드의 셋업 단계에서 각 센서 노드가 자신의 클러스터 헤드 역할 수행 여부를 확률적으로 결정하기 때문이다. 따라서 에너지 효율을 높일 수 있는 최적의 클러스터 헤드를 선정하지 못할 가능성이 있으며, 또한 전체 네트워크의 에너지 소비를 최소화할 수 있는 적절한 개수의 클러스터 헤드가 존재하지 않는 라운드가 발생할 수 있다. LEACH는 전체 센서 노드수의 5%에 해당하는 개수의 클러스터 헤드가 존재할 때 가장 에너지 효율적인 결과를 보여준다[4].

LEACH-C (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy - Centralized)는 클러스터 헤드가 아닌 센서 노드들이 자신

이 속한 클러스터의 헤드에게 데이터를 전송하는 데 있어서 에너지를 최소화할 수 있는 최적의 클러스터 헤드를 기지국이 통제함으로써 효율적인 클러스터를 구성할 수 있다. 또한 최적의 클러스터 헤드를 선정함과 동시에 에너지 소비를 모든 센서 노드들에게 공평히 분산시키는 결과를 보여준다. LEACH-C는 클러스터 구성을 위해 기지국을 사용하며, 기지국은 각 라운드의 시작 단계인 셋업 단계에서 각 센서 노드에 대한 위치 정보와 남아있는 에너지에 대한 정보를 전송받는다. 그리고 전송받은 정보를 이용하여 네트워크 전체 센서 노드들의 평균 에너지를 계산하고 평균 에너지보다 낮은 에너지를 가진 센서 노드는 클러스터 헤드 선정에서 제외된다. 그리고 평균 에너지보다 높은 에너지를 가진 센서 노드들 중에서 근사 알고리즘인 Simulated Annealing Algorithm[6]을 이용하여 클러스터 헤드를 선정하고, 기지국은 현재 라운드에서 클러스터 헤드로 선정된 센서 노드의 ID를 포함한 메시지를 모든 센서 노드들에게 전송하게 된다.

3. 클러스터 헤드 선정 기법

이 장에서는 센서 네트워크를 구성한 각각의 센서 노드가 데이터를 센싱하고, 이를 기지국으로 전송하는데 소비되는 주요 에너지 소비 요소를 파악하고 네트워크 수명을 증가시키기 위한 클러스터 헤드 선정 알고리즘을 제안한다.

3.1 주요 에너지 소비 요소

한 라운드에서의 주요 에너지 소비 요소는 표 1과 같다. 먼저, 각 센서 노드에서 정보를 센싱하는 데 소비하는 에너지 $E_{sensing}$, 클러스터 헤드에서 데이터 결합과 기지국에게 데이터를 전송하는 데 소비하는 에너지인 E_{ch} , 각 클러스터 멤버가 클러스터 헤드에게 전송하는 데 소비하는 에너지 E_{tr} 이 있다. E_{tr} 은 E_{elec} 과 E_{amp} 로 구성되며, E_{elec} 은 데이터를 처리하는데 소비하는 에너지이고 E_{amp} 는 데이터를 헤드로 전송하기 위해 소비하는 에너지이다. 따라서 전체 에너지의 소비는 다음의 식 (1)을 따르게 된다.

〈표 1〉 에너지 소모 요소

요소	설명
$E_{ch}(i)$	데이터 결합과 기지국에 데이터를 전달하기 위한 i 번째 클러스터 헤드의 에너지 소모량
$E_{tr}(i)$	일반 i 번째 센서 노드에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는데 필요한 에너지 소모량으로 E_{amp} 와 E_{elec} 의 합
$E_{sensing}$	센싱을 위해 필요한 에너지 소모량
E_{amp}	무선 전송을 위해 사용되는 신호 증폭(signal power amplification) 에너지 소모량
E_{elec}	무선 신호를 처리하기 위한 에너지 소모량
N_{ch}	클러스터 헤드의 수
$N_{sensing}$	센싱한 노드의 수, LEACH-C에서는 클러스터 헤드를 포함한 모든 센서 노드가 센싱한 것으로 가정함.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^{N_s} E_{ch}(i) + \sum_{i=1}^{N_{sensing}-N_s} E_{tr}(i) + N_{sensing} E_{sensing} \quad (1)$$

에너지 소비 요소 중에서 E_{ch} 와 E_{tr} 은 센서 노드의 지리적 위치에 따라서 많은 차이가 있게 된다. 일반적으로 E_{ch} 는 클러스터 헤드와 기지국간의 거리에 의해서 좌우되며, E_{tr} 은 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리에 비례하여 소비되는 에너지 요소이다.

센서 네트워크에서는 센서 노드의 통신은 통신 거리에 의존하여 자유공간(free space) 모델과 다중패스(multipath) 모델로 구분된다. 자유공간 모델에서는 통신 주체간의 거리(d)의 제곱(d^2)에 비례하여 전력이 소비되고 다중패스 페이딩(multipath fading)이 발생하는 모델에서는 거리의 네제곱(d^4)에 비례하여 전력이 소비된다. LEACH와 마찬가지로 본 논문에서도 자유공간 모델과 다중패스 모델을 구분하기 위한 척도로 threshold d_0 [4]를 사용한다. d_0 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$d_0 = \frac{4\pi\sqrt{L}h_r h_t}{\lambda} \quad (2)$$

- L : 시스템 손실 요소($L \geq 1$ 은 시스템 손실이 없으며 $L=1$ 로 가정)
- h_r : 수신자 안테나 길이
- h_t : 송신자 안테나 길이
- λ : carrier signal 의 파장

클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리 d 가 d_0 보다 작으면 자유공간 모델, 그렇지 않으면 다중패스 모델로 간주한다. LEACH에서 연구되었던 바와 같이 클러스터 내의 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드와의 통신은 자유공간 모델을 적용하고 클러스터 헤드와 기지국과의 통신은 다중패스 모델이 적용된다. 따라서 클러스터 헤드는 기지국에 가까울수록 E_{ch} 가 작아지며, 클러스터 헤드와 멤버간의 거리가 가까울수록 E_{tr} 이 작아짐을 알 수 있다. 클러스터 멤버 노드에서 클러스터 헤드로의 전송은 LEACH-C와 마찬가지로 TDMA를 사용하였다.

3.2 밀도에 따른 클러스터 헤드 선정

에너지 소비 요소의 분석에서 볼 수 있듯이, 클러스터 멤버들과 클러스터 헤드들이 작은 거리를 유지할 수 있도록 클러스터를 구성하는 것이 에너지 효율에 매우 중요함을 알 수 있다. 이를 위해서는 기지국에서 각 센서 노드들간의 상호 거리를 계산하여 각 노드들 간의 거리를 고려하여 최적의 클러스터 헤드를 선정해야 하지만, 짧은 시간인 셋업 단계에 이러한 헤드를 선정하는 것은 NP-Hard 문제를 야기하게 된다. 이를 해결하기 위해 LEACH[4]에서는 근사 알고리즘인 Simulated Annealing Algorithm을 이용한다. 이 근사

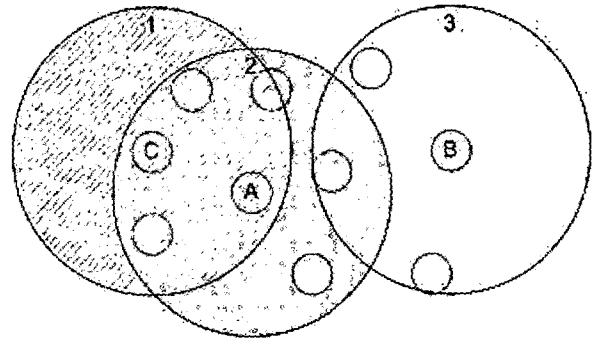
알고리즘은 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리를 최소화함으로써 클러스터 헤드로 전송되는 소비되는 에너지를 줄이도록 고안되었다. 그러나 이 알고리즘은 근사 알고리즘이므로 결과로 얻은 헤드가 최적의 클러스터 헤드라고 보장할 수 없다. 또한 이 알고리즘은 각 센서 노드들간의 거리만을 요소로 하고 있다.

본 논문에서는 Simulated Annealing Algorithm에 밀도 요소를 고려하여 보다 최적화된 클러스터 헤드를 선정하는 알고리즘을 제안한다. 각 센서 노드들의 밀도는 특정 센서 노드에서 인접한 이웃 센서 노드들의 수로 정의한다. 이렇게 밀도를 고려하여, 밀도가 높은 센서 노드를 클러스터 헤드 선정시에 우선권을 주게 된다면 각 센서 노드와 헤드간의 평균 거리를 줄일 수 있을 것으로 예측된다. 그리고 평균 거리의 감소는 전체 E_{tr} 의 감소로 이어지게 된다.

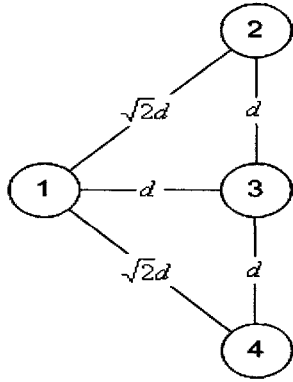
일반적으로 무선 센서 네트워크가 구성될 때, 센서 노드들은 무작위로 배치된다. 각각의 센서 노드들은 주변의 센서 노드와 함께 센서 네트워크를 구성한다. 비록 각각의 센서 노드들이 무작위로 배치되었다 할지라도 어떤 센서 노드는 주변의 센서 노드가 많이 밀집된 지역에 배치될 것이고 어떤 센서 노드는 센서노드가 드문 지역에 배치될 것이다.

(그림 2)는 배치된 센서 노드에 따른 일정거리 내 이웃 센서 노드들의 수, 밀도를 나타내고 있다. 원 1,2,3은 동일한 크기의 원이며, 원 1은 센서 노드 C를 중심으로, 원 2는 센서 노드 A를 중심으로, 원 3은 센서 노드 B를 중심으로 그려진 원이다. 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 사이의 거리는 자유공간 모델이 적용된다고 가정하면 E_{tr} 은 거리의 제곱에 비례하여 에너지가 소비된다. 따라서 센서 노드 B나 센서 노드 C가 클러스터 헤드로 선정되는 것보다는 센서 노드 A가 클러스터 헤드로 선정되는 것이 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리를 줄일 수 있고 이에 따라 E_{tr} 의 소비를 줄일 수 있다.

(그림 3)은 (그림 2)를 설명하기 위해 간략화한 그림으로써 각 센서 노드들이 밀도에 따라 클러스터 헤드로 선정될 경우 나머지 센서 노드들과의 거리에 차이가 있음을 나타내고 있다.



(그림 2) 센서 노드 배치에 따른 밀도



(그림 3) 밀도에 따른 거리 비교

- 센서 노드 1 : $2d^2 + 2d^2 + d^2 = 5d^2$
- 센서 노드 2 : $2d^2 + d^2 + 4d^2 = 7d^2$
- 센서 노드 3 : $d^2 + d^2 + d^2 = 3d^2$
- 센서 노드 4 : $2d^2 + d^2 + 4d^2 = 7d^2$

(그림 3)에서 보는 것과 같이 밀도가 높은 중심에 있는 센서 노드 3이 클러스터 헤드로 선정되었을 경우 나머지 센서 노드들과의 거리의 합이 가장 작다는 것을 알 수 있다.

3.3 밀도를 고려한 알고리즘

3.3.1 클러스터 헤드 선정 알고리즘

LEACH-C에서는 기지국이 모든 센서 노드들부터 위치정보를 전송받아 센서들의 에너지 잔량과 위치 정보를 보유하게 된다. 이 정보를 바탕으로 에너지 잔량이 많은 센서 노드 후보군 중에서 다른 센서 노드와의 거리가 가장 짧은 것으로 예상되는 센서 노드를 골라 클러스터 헤드로 선정한다. 이 과정에서 센서 노드들 간의 거리를 계산하기 위해 근사 알고리즘인 Simulated Annealing Algorithm을 사용하게 된다.

Simulated Annealing Algorithm에서는 이전 상태의 클러스터 헤드의 집합을 C , 현재 상태의 클러스터 헤드 집합을 C' 로 정의한다. 평균 에너지보다 높은 에너지를 가진 센서 노드들 중에서 C' 는 이전 상태의 C 에 속한 각각의 클러스터 헤드의 좌표 (x, y) 에 -10과 10사이의 임의의 값을 더한 후, 새로 생성된 (x', y') 과 가장 가까운 위치의 센서 노드를 원소로 가진다. 그 후에 집합 C' 는 $f(C')$ 라는 비용함수(cost function)를 집합 C 는 $f(C)$ 의 비용함수를 가진다. LEACH-C에서의 $f(C)$ 는 식 (3)과 같이 정의된다. 이때, $f(C)$ 의 값이 작을수록 주변 센서 노드들 간의 거리가 작기 때문에 클러스터 헤드로 뽑힐 가능성이 높아지게 된다.

$$f(C) = \sum_{i=1}^N \min_{c \in C} d^2(i, c) \quad (3)$$

이 비용 함수는 최종적으로 클러스터 헤드를 선정하는 확률값 p_k 에 이용되며, 식은 (4), (5)와 같다.

$$p_k = \begin{cases} e^{-(f(C')-f(C))/\alpha_k} & : f(C') \geq f(C) \\ 1 & : f(C') < f(C) \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_k = 1000e^{-\frac{k}{20}} \quad (5)$$

앞에서도 언급한 것과 같이 이러한 근사 알고리즘은 최적의 헤드를 선정한다는 보장을 가질 수 없으므로, 본 논문에서는 배치된 센서 노드의 밀도와 거리의 두 요소를 고려하는 방식을 제안한다. 이를 위해 기존 비용함수에 밀도 요소를 추가하여 식 (6)과 같은 새로운 비용함수를 설정하였다.

$$f(C) = \sum_{i=1}^N \min_{c \in C} \frac{d^2(i, c)}{\text{density}(i)} \quad (6)$$

식 (3)과 비교하여 식 (6)은 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리 뿐만 아니라 일정 거리 내의 이웃 센서 노드의 수의 밀도를 고려한 $(1/\text{density}(i))$ 요소를 통해, 밀도가 높은 센서 노드에게 비용을 작게 부여함으로써 밀도가 높은 센서 노드가 클러스터 헤드로 선정될 확률을 높였다.

3.3.2 밀도 함수 계산

각 센서 노드들의 밀도를 구하기 위해서는 각 노드 주변 일정 거리 내에 몇 개의 이웃 센서 노드들이 있는지 알아야 하는데, 이를 위해서는 우선 각 센서 노드에서 어느 범위까지를 밀도 영역으로 할 것인지를 결정하기 위해, 자신을 중심으로 하는 동심원의 크기를 결정해야한다. LEACH에서는 100m x 100m의 네트워크 크기에서 5개의 클러스터 헤드가 선정되기 때문에 거리 범위를 선정하는 영역 거리 r 은 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$10000 \text{ m}^2 = 5\pi r^2 \quad (7)$$

$$r = 25.2313\text{m} \quad (8)$$

이 계산에 의하면, 각 센서 노드들로부터의 영역 거리는 약 25m로 계산되며, 본 논문에서는 $20\text{m} < r < 30\text{m}$ 사이의 값을 변경해가며 시뮬레이션을 하였으며, 시뮬레이션을 통한 최적의 영역 거리는 25m라는 것을 확인하였다.

영역 거리를 정한 이후에 식(6)에서 사용되는 각 센서 노드의 밀도 $\text{density}(i)$ 는 다음의 의사코드(pseudo code)로 계산될 수 있다.

```

for(node ID(i), i = 1,2,...,n) {
  for(node ID(j), j = 1,2,...,n-1) {
    distance(i,j) = sqrt((xi-xj)2+(yi-yj)2);
    if(distance(i,j) <= range_distance) {
      density(i)를 1씩 증가;
    }
  }
}
    
```

의사코드에 의하면 각 센서 노드가 다른 모든 센서 노드들에 대해서 영역 내에 위치하는지를 확인하여 밀도 값을 계산하도록 되어 있다. 그러나 각 라운드마다 모든 센서 노드에 대한 밀도를 매번 새롭게 계산한다고 하면 기지국이 계산해야하는 연산은 $O(n^2)$ 를 갖게 된다. 이러한 연산은 기지국의 처리능력과 관계없이 NP-Hard 문제를 발생시키게 된다.

따라서 본 논문에서는 밀도 계산의 효율성을 높이기 위해 다음의 의사코드를 사용하였다.

```

if(초기화 시점) {
for(node ID(i), i = 1,2,...,n) {
for(node ID(j), j = 1,2,...,n-1) {
distance(i,j) = sqrt((xi-xj)2+(yi-yj)2);
if(distance(i,j) <= range_distance) {
density_node_list(i)에 node ID(j) 추가;
}
}
}
}
else if ("정상 라운드" AND "dead node 발생") {
for(node ID(i) = 1,2,...,n) { // n은 살아 있는 노드
density_node_list(i)에서 dead node ID 제거;
}
}
}
    
```

제안된 의사코드를 사용하는 경우에 처음 네트워크가 구성되는 시점에서는 $O(n^2)$ 의 연산이 필요하지만, 일단 초기화 후에는 각 센서 노드들이 영역 내의 센서 노드들을 리스트로 갖고 있게 되며, 밀도 함수 density(i)는 리스트의 크기로 계산이 가능하다. 따라서 초기화 이후의 각 라운드에서는 각 센서 노드의 밀도 값을 간단히 계산할 수 있으며, 라운드가 진행함에 따라서 에너지를 소진하여 센서 노드의 이탈이 발생하는 경우에는 각 센서 노드들의 밀도 리스트에서 해당 노드를 리스트에서 제거함으로써, 밀도 함수의 재연산 없이 각 센서 노드들의 밀도를 간단히 얻을 수 있다. 이러한 방식은 클러스터 헤드를 선정하는데 있어서 밀도 정보와 센서 노드 사이의 거리를 모두 고려함에도 처리 시간은 기존 LEACH-C와 큰 차이가 없도록 해준다. 즉, 초기화 이후에는 처리시간의 손실 없이 최적의 클러스터 헤드를 선정하는데 이득을 얻을 수 있게 된다. 이렇게 밀도를 클러스터 헤드 선정시에 고려하게 됨으로써, 기존 LEACH-C에 비해서 E_{avg} 을 줄일 수 있으며, 이는 시뮬레이션 결과로 확인할 수 있다.

4. 성능분석

4.1 시뮬레이션 환경

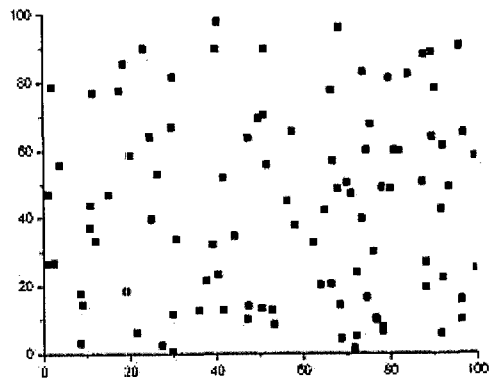
제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여, NS-2 시뮬레이터[13]를 사용하였다. 표 2는 시뮬레이션 환경을 나타내

고 있다. 100m x 100m 의 네트워크 크기에 100개의 센서 노드를 임의로 배치하였다. 기지국은 가로 50m 세로 175m 지점에 위치하며, 각 센서 노드들은 초기에 2J의 에너지를 보유하고 있다. 클러스터 헤드의 수는 LEACH[4]에서 연구된 바와 같이 5%로 최적화 하였다. 각 센서 노드가 보내는 데이터와 헤더의 크기는 각각 500바이트와 25바이트이며, 각 센서 노드가 데이터를 500바이트 크기의 데이터를 일정 시간 별로 생성한다고 가정하였다.

(그림 4)는 시뮬레이션에서 사용된 100개 센서 노드들의 임의로 배치된 위치를 나타내는 그림이다.

<표 2> 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 조건	
네트워크 크기	100m x 100m
센서 노드의 수	100개
처리 지연 시간	50μs
초기 에너지	2 J
기지국 위치	(50, 175)
데이터 크기	500 bytes
무선 속도	1Mbps
클러스터의 수	5개
비트 전송률(Rb)	1 Mbps
무선 송신 전력 (자유공간 모델 적용)	10pJ/bit/m ² x Rb x d ²
무선 송신 전력 (다중패스 모델 적용)	0.0013pJ/bit/m ⁴ x Rb x d ⁴



(그림 4) 100개의 센서 노드 위치

4.2 성능 평가

<표 3>은 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 평균 거리를 보여주고 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 LEACH-C 보다 평균 거리가 약 2m 정도 짧다는 것을 알 수 있다.

이는 앞에서 언급한 것과 같이 자유 공간 모델에서 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 거리의 제곱에

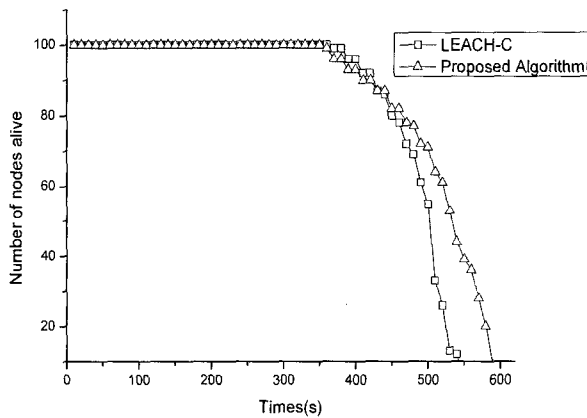
<표 3> 평균거리

기법	평균 거리
LEACH-C	18.93183 m
제안된 알고리즘	17.02042 m

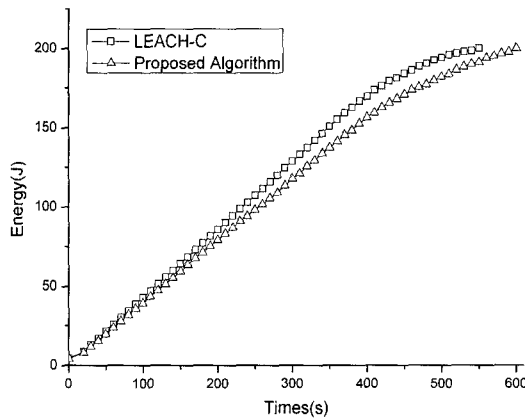
비례한 에너지 소모가 발생한다는 관점에서 주목할 수 있다. 평균적으로 LEACH-C에서는 각 센서 노드에서 클러스터 헤드와 거리의 평균 거리인 $(18.93183 m)^2$ 에 비례한 E_{tr} 의 에너지가 소모되는 반면, 제안된 알고리즘은 평균 거리인 $(17.02042 m)^2$ 에 비례한 E_{tr} 의 에너지가 소모될 것이다.

(그림 5)는 시뮬레이션 네트워크에서 시간에 따른 생존한 센서 노드 수의 변화를 나타낸 그래프이다. 기존의 LEACH-C의 네트워크 수명이 약 540초인데 반해, 제안 알고리즘의 네트워크 수명은 약 600초로 약 11.11%의 성능이 향상되었다.

(그림 6)은 시간에 따른 네트워크 전체의 센서 노드가 소모한 에너지를 나타낸 그림이다. 각 센서 노드의 초기 에너지가 $2J/node$ 로 전체 센서 노드 100개가 자신의 에너지를 다 소비했을 경우 200J을 나타내고 있다. (그림 6)에서 보듯이 에너지 소모의 기울기가 기존 LEACH에 비해서 완만함을 알 수 있다. 이는 제안된 알고리즘이 밀도와 거리를 고려함으로써, LEACH-C보다 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드 사이의 평균 거리를 줄임으로써, 전송 에너지 E_{tr} 을 감소시켜 전체 네트워크의 에너지 효율을 높인 것을 보여준다.



(그림 5) 시간에 따른 생존 센서 노드 수



(그림 6) 시간에 따라 소비된 에너지

5. 결론

무선 센서 네트워크는 한정된 자원을 효율적으로 사용하는 것이 매우 중요하며, 한정된 자원을 효율적으로 사용하기 위해 센서 네트워크의 각 계층 별로 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜에 초점을 맞추고 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있는 에너지 효율적인 클러스터 헤드 선정 기법을 제안하였다. 기존의 주요한 연구인 LEACH-C에서는 센서 노드간의 거리만을 고려하여 최적의 클러스터 헤드를 구하고자 시도하였으나, 제한시간 내에 근사 알고리즘을 통해서 구해진 결과치는 최적의 값을 보장할 수 없는 한계점을 갖고 있었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 기존 LEACH-C의 클러스터 헤드 선정 알고리즘에 밀도 요소를 추가하여 연산 속도의 손실 없이, 보다 최적화된 클러스터 헤드를 구하는 방식을 제시하였다. 시뮬레이션 결과는 제안된 방식이 기존 방식에 비해 네트워크 성능 향상에 이득을 줄 수 있음을 보여주었으며, 본 연구 결과는 클러스터 기반 라우팅 알고리즘에서 밀도 요소를 고려하는 것이 최적의 클러스터 헤드를 선정하는데 중요한 요소가 될 수 있음을 보여주었다. 향후에는 밀도 외의 센서 네트워크의 에너지 사용에 영향을 미치는 다른 요소에 대해서도 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Jamil Ibrqi and Imad Mahgoub, "Cluster-based Routing in Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges," Proceedings of the 2004 Symposium on Performance Evaluation of Computer Telecommunication Systems, pp.759-766, July, 2004.
- [2] Ian F.Akyldiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," In IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, pp.102-114, Aug., 2002.
- [3] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey," IEEE Wireless Communications, Vol.11, No.6, pp.6-28, Dec., 2004.
- [4] Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on wireless communications, Vol.1, No.4, pp.660-670, Oct., 2002.
- [5] 김대영 외 6명, "센서 네트워크 기술", 정보처리학회지, 제 10권 제4호, pp.85-96, 2003.
- [6] W. Heinzelman, "Application-Specific Protocol Architec

tures for Wireless Networks,” PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

- [7] J. Kulik, W. R. Heinzelman, H. Balakrishnan, “Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks,” ACM Wireless Networks, Vol.8 , No.2/3, pp.169-185, March-May, 2002.
- [8] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, “Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking,” IEEE/ACM Transactions On Networking, Vol.11. No.1, pp.2-16, Feb., 2003.
- [9] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, “PEGASIS: Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems,” In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Vol.3, March, 2002.
- [10] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, “TEEN : A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks,” in the Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April, 2001.
- [11] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, “APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks,” in the Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, Ft. Lauderdale, FL, April, 2002.
- [12] Siva D. Muruganathan, Daniel C. F. Ma, Rolly I. Bhasin, and Abraham O. Fapojuwo, “A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” Communications Magazine, IEEE, Volume 43, Issue 3, pp.8-13, March, 2005.
- [13] K. Fall and K. Varadhan, “ns Notes and Documentation” The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, available from “http://www.isi.edu/nsnam/ns/”, Dec., 2003.



정 의 현

e-mail : jung@anyang.ac.kr
 1992년 한양대학교 전자공학과(학사)
 1994년 한양대학교 전자공학과(석사)
 1999년 한양대학교 전자공학과(박사)
 1999년~2002년 대우통신 선임연구원
 2002년~2003년 SCT 연구소장
 2004년~현 재 안양대학교 디지털
 미디어학부 전임강사

관심분야: 시맨틱웹, 센서 네트워크, 웹 2.0



이 성 호

e-mail : ego5710@hanmail.net
 2004년 아주대학교 전자공학부(학사)
 2006년 한양대학교 대학원 전자통신
 컴퓨터공학과(석사)
 2006년~현 재 삼성전자 정보통신 총괄
 관심분야: 무선 센서 네트워크



박 용 진

e-mail : park@hyuee.hanyang.ac.kr
 1969년 일본 와세대학교 전자통신학과
 (학사)
 1971년 일본 와세대학교 전자공학전공
 (석사)
 1978년 일본 와세대학교 전자공학전공
 (박사)

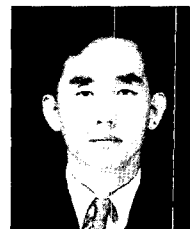
1983년~1984년 University of Illinois, Urbana-Champaign,
 Visiting Associate Professor
 1990년~1991년 Computing Laboratory, University of Kent,
 Canterbury, England, Research Fellow
 1978년~현 재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수
 관심분야: 차세대 인터넷, 초고속 네트워크



황 호 영

e-mail : hyhwang@anyang.ac.kr
 1993년 서울대학교 컴퓨터공학(학사)
 1995년 서울대학교 컴퓨터공학(석사)
 2003년 서울대학교 전기컴퓨터공학공학
 (박사)
 2003년~현 재 안양대학교 디지털미디어
 학부 조교수

관심분야: 정보통신, 무선통신망, 멀티미디어시스템 등.



허 문 행

e-mail : moonh@anyang.ac.kr
 1979년 숭실대학교 전산학과(학사)
 1989년 연세대학교 전산학과(석사)
 2003년 충북대학교 전산학과(박사)
 2003년 멀티미디어 기술사
 1980년~1984년 한국전자통신연구원
 선임연구원

1983년~1984년 스웨덴 ERICSSON 파견연구원
 1984년~2000년 KT 연구개발원 책임연구원
 2001년~2004년 한국소프트웨어진흥원 단장
 2004년~현 재 안양대학교 디지털미디어학부 부교수
 (디지털미디어 공학전공)
 관심분야: 디지털콘텐츠, 디지털컨버전스, 유비쿼터스, IT산업정책