

무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 클러스터 기반 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜

김 경 태[†] · 윤 희 용^{††}

요 약

다수의 센서로 구성된 무선 센서 네트워크는 다양한 환경에서의 정보수집을 목적으로 하며 현재 다양한 분야에 응용 및 활용이 되고 있다. 센서 네트워크를 구성하는 각 센서 노드들은 한정된 전력의 배터리로 동작하므로 에너지 효율성 및 장시간의 네트워크 수명을 제공하는 것이 센서 네트워크의 중요한 연구 목표 중 하나이다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 향상시키고 데이터 신뢰성을 보장하기 위해 새로운 클러스터 기반의 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜은 클러스터 내의 멀티홉 형성으로 센서 노드들의 데이터 전송을 위한 에너지 소비를 최소화하며 지역 클러스터 헤드 순환 기법을 통해 기존 클러스터링 기법에서 빈번한 클러스터 구성으로 인한 에너지 낭비를 효율적으로 관리한다. 시뮬레이션을 통해 기존에 제안되었던 LEACH, LEACH-C, PEACH와 비교해 전체 노드의 에너지 소모를 균등하게 하여 에너지 효율성을 향상시키고 네트워크 수명을 연장하였음을 확인하였다.

키워드 : 클러스터-헤드, 데이터 병합, 에너지 밸런스, 에너지 효율성, 네트워크 수명, 클러스터링, 무선 센서 네트워크

An Energy Efficient Cluster-Based Local Multi-hop Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Kim Kyung Tae[†] · Youn Hee Yong^{††}

ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSN) consisting of a largenumber of sensors aims to gather data in a variety of environments and is beingused and applied in many different fields. The sensor nodes composing a sensornetwork operate on battery of limited power and as a result, high energyefficiency and long network lifetime are major goals of research in the WSN. Inthis paper we propose a novel cluster-based local multi-hop routing protocolthat enhances the overall energy efficiency and guarantees reliability in thesystem. The proposed protocol minimizes energy consumption for datatransmission among sensor nodes by forming a multi-hop in the cluster.Moreover, through local cluster head rotation scheme, it efficiently manageswaste of energy caused by frequent formation of clusters which was an issue inthe existing methods. Simulation results show that our scheme enhances energyefficiency and ensure longer network time in the sensor network as comparedwith existing schemes such as LEACH, LEACH-C and PEACH.

Keywords : Cluster-Head, Data Aggregation, Energy Balance, Energy-Efficiency, Network Lifetime, Clustering, Wireless Sensor Networks

1. 서 론

최근 무선 통신기술과 칩 설계 기술, IT 기술의 급속한 발전은 사물의 지능화와 네트워크화를 골격으로 하는 유비쿼터스(Ubiquitous) 환경을 실현 가능하게 하고 있다. 특히, 유비쿼터스 환경을 실현하는 대표적인 기술로써 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks)가 대두 되고 있다.

무선 센서 네트워크는 주변의 물리적 현상을 감지 할 수 있는 센서 디바이스(device)에 기존의 네트워크 개념을 통합 하여 사물의 존재 여부, 변화, 위치 및 환경 정보 등 센싱(sensing)한 정보를 기존의 네트워크와 연동하여 실시간으로 모니터링(monitoring)하고 제어할 수 있는 개념이다[1,2]. 즉, 우리생활 공간의 필요로 하는 모든 사물에 센서 디바이스를 부착하고 이를 통해 기본적인 사물의 인식 정보는 물론, 주변의 환경 정보(온도, 습도, 오염정보, 균열정보 등)까지 탐지하여 이를 실시간으로 네트워크에 연결하고 관리함으로써 미래의 유비쿼터스 환경을 구축하게 하는 핵심 기술이라 할 수 있다.

이러한 무선 센서 네트워크는 반도체 기술, MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems), 나노 기술, 무선 통신 기술

※ This research was supported by the grant (07High Tech A01) from High-tech Urban Development Program funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs of Korean government.

† 준 회원 : 성균관대학교 컴퓨터공학과 박사과정

†† 종신회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수

논문접수 : 2008년 12월 23일

수정일 : 1차 2009년 2월 2일

심사완료 : 2009년 2월 2일

및 검출 기능, 프로세싱 기능, 무선 통신 기능, 배터리 등을 탑재한 초소형 마이크로 센서 하드웨어 기술의 지속적인 발전에 힘입어 다양한 기능을 가진 센서를 통해 각 분야에 맞는 네트워크의 구축이 가능하게 되었으며, 원격 정보 수집을 기본으로 군사용, 교통, 환경 감시, 의료 분야, 홈네트워크, 빌딩 제어 등 다양한 분야에 걸쳐 응용 및 활용이 가능하다[3-5].

센서 네트워크는 다수의 센서 노드(sensor node)들이 주어진 임무를 수행하기 위해 임의의 지역에 사용자와 독립적으로 배치되며 무선 환경에서 작동하고 서로 협력을 통해 목표 지역에 대한 정보를 수집한다[6-7]. 그러나 센서 노드들은 사용자와는 독립적으로 배치되고 센서 노드들의 수가 수백에서 수 만개에 달해 이를 유지 및 보수하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 특히, 센서 노드들은 초소형으로써 배터리 기반의 제한된 에너지로 동작하며 일반적으로 사람이 접근할 수 없는 지역이나 위험한 환경에 배치되기 때문에 배터리가 모두 소모된 노드의 재충전 및 교체가 불가능하다. 따라서, 센서노드의 수명은 배터리 수명과 같고 전체 네트워크 수명(network lifetime)에 영향을 준다. 또한, 수명이 다한 노드로 인해 데이터 전송의 신뢰성을 보장 받지 못한다. 그러므로, 센서 네트워크에서 센서 노드의 에너지 소비를 최소화하고 제한된 에너지를 효율적으로 사용하여 네트워크 수명을 최대화하는 것이 센서 네트워크의 중요한 연구 목표 중 하나이다.

센서 네트워크에서 에너지 효율성을 향상 시키고 네트워크의 수명을 연장하는 대표적인 방법으로 클러스터링(clustering) 기법이 있다[8-9]. 클러스터링 기법은 네트워크를 클러스터(cluster)라는 영역들로 분할하며 각 클러스터에는 클러스터 헤드(cluster-head)가 존재한다. 네트워크에 존재하는 모든 센서 노드들은 각 클러스터에 속하게 되며 클러스터에 포함되는 센서 노드들을 멤버 노드(member node)라 한다. 클러스터 내의 멤버 노드들은 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 클러스터 헤드에 전송한다. 멤버 노드들은 기지국(BS: Base Station or Sink)과 직접 통신하지 않고 클러스터 헤드와 통신함으로써 전송 에너지를 최소화 할 수 있다. 클러스터 헤드는 멤버 노드들로부터 수집된 데이터를 병합하여 최종 목적지인 기지국으로 전송한다. 많은 수의 노드가 배치되는 센서 네트워크에서 클러스터 헤드의 데이터 병합(data aggregation)은 중복되는 데이터의 전송을 방지하며 기지국까지의 데이터 전송 에너지 소모를 최소화하여 네트워크 수명을 연장 시키고 네트워크의 확장성(scalability)을 용이하게 한다.

센서 네트워크를 위한 클러스터링 기법의 장점으로 인해 다양한 연구가 이루어 졌으며 현재 대부분의 클러스터링 기법은 센서 노드와 기지국까지의 직접적인 데이터 전송을 가정한다[10-12]. 하지만, 클러스터링 기법에서 센서 노드의 데이터 전송 에너지 소비는 거리에 비례하기 때문에 일반적으로 멀리 떨어진 기지국까지 데이터를 직접 전달하는 클러스터 헤드는 비 클러스터 헤드(non-cluster-head) 노드에 비

해 에너지 소모가 매우 크다. 동일하게 클러스터 내에서의 멤버 노드들도 클러스터 헤드와의 거리가 멀수록 데이터 전송 시 더 많은 에너지를 소모한다. 또한, 클러스터 헤드의 에너지 소비는 클러스터내의 멤버 노드들의 수와 클러스터의 크기에 따라 직접적인 영향을 받는다. 이에 클러스터 헤드의 역할을 순환시켜 에너지 소모를 균등하게 하는 방법, 효율적인 클러스터 헤드 선출 방법 및 클러스터 크기와 클러스터 내의 멤버 노드들의 수를 고려한 클러스터 구성 방법들이 제안되었다[13-16]. 그러나, 네트워크 확장 시 노드간의 전송 거리에 따른 제약으로 클러스터 헤드의 에너지 소모가 더욱 커지며 클러스터 내의 멤버 노드들의 에너지 소모도 크게 증가하여 네트워크 수명을 단축한다. 또한, 클러스터 구성에 있어서 클러스터 헤드 선출 방법에 따라 불균형적인 클러스터를 구성할 수 있어 모든 센서 노드가 에너지를 균형적으로 소모하는 것을 보장 하지 못하고 빈번하게 클러스터를 구성하기 때문에 클러스터 구성할때마다 발생하는 에너지 소모는 상당히 비효율적이다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 향상 시키고 데이터 신뢰성을 보장하기 위한 새로운 클러스터 기반의 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜(cluster-based local multi-hop routing protocol)을 제안한다. 제안된 프로토콜은 클러스터 내의 멀티홉 형성을 통해 기존 클러스터링 기법들의 클러스터 헤드와 멤버 노드간의 데이터 전송을 위한 에너지 소비를 최소화하며 지역 클러스터 헤드 순환(local cluster-head rotation) 기법을 통해 기존 클러스터링 기법에서 빈번한 클러스터 구성으로 인해 발생하는 불필요한 에너지 소모를 효율적으로 관리한다. 이를 통해 제안된 프로토콜은 전체 노드의 에너지 소모를 균등하게 하여 에너지 효율성을 향상시키고 네트워크 수명을 연장하며 네트워크 확장성을 용이하게 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존에 제안된 클러스터 기반 라우팅 프로토콜 대한 설명과 문제점에 대해 논의한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 클러스터 기반의 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜에 대해 상세히 기술하고, 4장에서는 성능 평가 및 분석을 통해 제안된 프로토콜의 성능을 확인한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구 방향을 기술한다.

2. 관련연구

클러스터 기반의 라우팅 프로토콜은 클러스터 헤드를 효율적으로 선출하여 센서 노드들의 에너지 소모를 균등하게 한다. 또한, 중복된 데이터 방지와 전송 데이터를 줄이기 위한 데이터 병합을 통해 에너지 소모를 줄여 네트워크 수명을 연장한다. 본 장에서는 기존에 연구된 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜에 대해서 설명한다.

LEACH[11, 17]는 대표적인 클러스터 기반 라우팅 프로토콜로써, 클러스터가 구성된 후 클러스터 헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 수집하여 데이터 통합을 통해

수집된 데이터를 직접 기지국으로 전송한다. 이 기법은 모든 센서 노드들의 에너지 소비를 고르게 분산시키기 위하여 라운드(round)라는 시간마다 클러스터 헤드를 교체한다. 하나의 라운드는 클러스터를 형성하는 설정 단계(Set-up Phase)와 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성되어 데이터를 전송하는 안정 상태 단계(Steady-state Phase)로 구성된다.

설정 단계 동안, 각 노드는 현재 라운드에서 자신이 클러스터 헤드가 되는지 안 되는지 결정한다. 이를 위해 각 노드들은 0과 1사이에서 임의의 한 수를 선택한다. 그 수가 임계값 $T(n)$ 보다 작을 경우, 그 노드는 현재 라운드에서 클러스터 헤드로 선출된다. 클러스터 헤드 선출을 위한 임계값 $T(n)$ 은 다음과 같다.

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

여기에서 P 는 전체 노드들 중에서 클러스터헤드 선출 비율이고, r 은 현재 라운드고 G 는 지난 $1/P$ 라운드 내에 클러스터 헤드가된 적이 없는 노드의 집합이다. LEACH에서, 식 (1)에 의해 모든 노드는 $1/P$ 라운드 내에 어느 한 시점에서 1번씩 클러스터 헤드로 선출되도록 보장받고 $1/P$ 라운드 후에는 모든 노드가 다시 클러스터 헤드가 될 수 있는 자격을 갖게 된다. 따라서 LEACH는 다른 노드에 비해 에너지 소비가 높은 클러스터 헤드의 역할을 일정하게 분배하여 전체 네트워크의 노드들의 에너지 소비를 균등하게 분산시킨다. 그러므로 에너지 효율성을 높여 네트워크의 수명을 연장시킨다. 클러스터 헤드로 선출된 노드는 자신이 클러스터 헤드라는 것을 모든 노드들에게 알리기 위해 ADV 메시지(Advertisement message)를 브로드캐스팅 한다. 각 노드들은 ADV 메시지를 수신한 후 어느 클러스터 헤드에 속할 것인지 결정한다. 이 결정은 ADV 메시지의 신호 강도에 기반을 둔다. 자신이 속할 클러스터 헤드를 선택한 노드들은 join-request 메시지(Join-REQ)를 클러스터 헤드로 전송한다. 클러스터에 포함되기를 원하는 노드들로부터 메시지를 수신한 클러스터 헤드는 클러스터에 속한 노드들을 위한 TDMA 스케줄을 생성하고 멤버 노드들에게 전송한다. 안정상태 단계 동안 노드들은 센싱한 데이터를 자신에게 할당된 TDMA 슬롯(slot)동안 클러스터 헤드로 전송한다. 클러스터 헤드들은 멤버 노드들로부터 수신된 데이터를 통합하여 원격의 기지국에 통합된 데이터를 전송한다. LEACH는 확률적인 방법으로 클러스터 헤드를 선출하므로 불균형적인 클러스터를 구성할 수 있으며, 노드의 에너지 상태를 고려하지 않아 적은 에너지를 보유한 노드가 클러스터 헤드로 선출되어 자신의 역할을 못하는 경우가 생길 수 있다. 이는 모든센서 노드의 에너지를 균형적으로 소모하도록 하는 것을 보장하지 못한다.

이러한 LEACH의 문제점을 해결하기 위해 LEACH-C[17]

가 제안되었다. LEACH-C에서 기지국은 클러스터 구성에 참여하게 된다. 클러스터 구성을 위해 네트워크의 모든 노드들은 각 라운드의 시작단계에서 자신의 위치 정보와 잔여 에너지 정보를 기지국에게 전송한다. 기지국은 노드들로부터 전송 받은 정보를 기반으로 최적의 클러스터 헤드를 선출하여 가장 적합한 형태의 클러스터를 구성한다. 이후, 기지국은 현재 라운드를 위한 클러스터 헤드노드 ID가 포함된 메시지를 노드들에게 전송한다. 메시지를 수신한 노드들은 자신의 ID와 같으면 클러스터 헤드로 선출되고 다르다면 데이터 전송을 위해 TDMA 슬롯을 결정한다. LEACH-C는 최적의 클러스터 헤드 수와 위치를 선정함으로써 효율적인 클러스터를 구성할 수 있다. 그러나, 이기법은 매 라운드마다 최적의 클러스터 구성을 위한 정보를 기지국에게 전송하기 위하여 모든 노드들이 기지국과 직접 통신을 함으로써 많은 에너지를 소비하고 자신의 위치 정보에 대한 처리를 해야 하는 추가적인 오버헤드가 발생한다.

PEACH[18]에서는 LEACH에서 발생하는 에너지에 의한 결함을 해결하기 위해 프록시 노드(proxy node)를 이용한 클러스터 기반의 프로토콜을 제안하였다. PEACH는 각 라운드에서 클러스터 헤드와 프록시 노드를 선출한다. 라운드가 지속되는 동안 노드들의 에너지는 계속 소모되게 된다. 따라서, LEACH에서는 에너지에 대한 고려가 없어 잔여 에너지가 적은 노드가 클러스터 헤드로 선출 될 수 있다. 이러한 클러스터 헤드는 에너지 부족으로 원격의 기지국에게 데이터 전송을 못하여 데이터 신뢰성을 떨어뜨리고 클러스터헤드 역할상 에너지 소모가 많아 빠르게 노드의 기능을 상실하게 된다. 이를 위해, PEACH에서는 임계값을 설정하여 클러스터 헤드가 임계값 이하일 때 클러스터 헤드의 기능을 프록시 노드로 위임하여 프록시 노드가 해당 라운드에서 클러스터 헤드의 역할을 담당하게 한다. 따라서, PEACH는 클러스터 헤드의 에너지 결함으로 인한 문제점을 해결하여 네트워크 수명을 연장하고 신뢰성을 향상시킨다. 하지만, PEACH의 클러스터 헤드의 선출 방법은 LEACH와 동일하여 불균형적인 클러스터를 구성할 수 있으며, 프록시 노드 선택 시 클러스터 헤드와 거리가 먼 노드가 선택되어 데이터 전송을 위한 추가적인 에너지 소비가 발생한다.

HEED(HybridEnergy-Efficient Distributed clustering) [12]에서는 클러스터 헤드의 선정을 개별 노드에서 분산 처리를 통해 결정하는 알고리즘이 제안되었다. HEED에서 노드의 잔여 에너지를 이용하는 헤드 선정 확률 함수는 식 (2)와 같다.

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (2)$$

식 (2)에서 E_{max} 는 노드의 초기 에너지, $E_{residual}$ 은 노드의 잔여 에너지, C_{prob} 는 전체 네트워크 노드 중 클러스터 헤드 노드의 비율을 나타낸다. HEED에서 노드의 잔여 에너지가 첫번째 선택 기준이 되며, 클러스터 내의 통신비용을 두 번

째 헤드 선정 기준값으로 이용하여 첫 번째 기준값이 같은 후보 노드가 있는 경우 두 번째 기준값으로 헤드 선정을 한다. 이 알고리즘은 초기에 CH_{prob} 와 절대값 $P_{min}(=10^{-4})$ 중 큰 값으로 시작하여 노드 자신의 CH_{prob} 이 1이 될 때까지 확률값(CH_{prob})을 2배씩 증가시켜 1이 되면 클러스터 헤드로 선출 되도록 한다. 이러한 방법은 클러스터의 크기에 관계 없이 일정 시간 내에 알고리즘이 종료되도록 하며 이웃 노드의 위치를 고려하지 않아도 되는 장점을 지닌다.

3. 클러스터 기반의 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 향상 시키고 데이터 신뢰성을 보장하기 위한 새로운 클러스터 기반의 지역 멀티홉 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜의 구조는 (그림 1)에서 보여준다.

제안된 프로토콜의 동작은 클러스터를 구성하고 클러스터 내의 각 노드들 사이에 멀티홉 경로를 구성하는 설정 단계(Set-up Phase)와 각 노드에서 데이터를 수집하고 전송하는 데이터 수집 및 전송 단계(Data collection and transmission phase)로 구성된다.

설정 단계에서, 전체 네트워크는 l 개의 클러스터로 구성된다. 제안된 프로토콜의 클러스터 헤드 선출을 위해 최적 클러스터 헤드 확률 모델(Optimal cluster-head probability model)[19]에서 제안된 기법을 사용하여 제안된 프로토콜을 위한 최적의 클러스터 헤드 선출 및 클러스터를 구성한다. 클러스터 헤드 선출 후, 클러스터는 구성되고 클러스터 내의 멤버 노드들은 클러스터 헤드로 멀티홉을 형성한다. 이 단계가 완료되면 데이터 수집 및 전송 단계가 시작된다. 데이터수집 및 전송 단계에서 각 노드는 감지된 데이터를 수집하여 멀티홉으로 연결된 이웃 노드에게 데이터를 전송한다. 각 노드들은 이웃 노드들에게서 수신된 데이터와 자신의 데이터를 병합하여 다른 이웃 노드들에게 전송한다. 최종적으로 클러스터 헤드는 멤버 노드들로부터 수신된 데이터를 통합하여 기지국으로 전송한다. 또한, 기존의 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 매 라운드마다 새로운 클러스터 헤

드를 선출하고 클러스터를 구성한다. 그러나 제안된 프로토콜에서는 매 라운드마다 클러스터를 구성할 때 발생하는 에너지 소모를 줄이기 위하여 수명이 다한 노드가 발생하기 전까지 클러스터를 재 구성하지 않고 구성된 클러스터 내의 멤버 노드들 사이에서 클러스터 헤드를 교체한다. 이 접근 방법은 클러스터 구성 시에 발생하는 불필요한 에너지 소모를 최소화하여 네트워크의 에너지 효율성을 향상시키고 네트워크 수명을 연장시킨다.

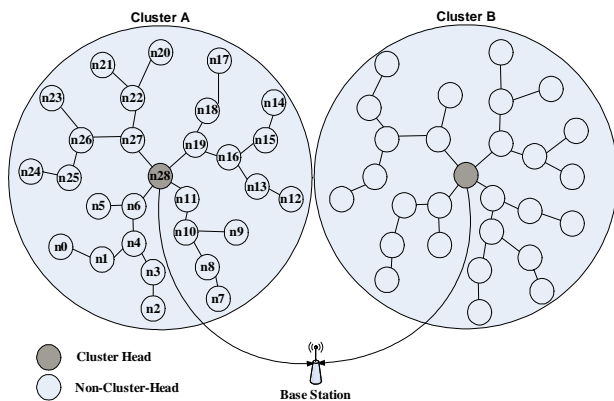
3.1 최적의 클러스터 헤드 확률 결정

제안된 프로토콜은 클러스터 내의 멤버 노드들간의 멀티홉 방식을 사용하기 때문에 클러스터의 크기 및 수는 중요한 문제이다. 클러스터 기반 프로토콜에서 클러스터 헤드 수와 클러스터 수는 일치한다. 즉 하나의 클러스터 내에 하나의 클러스터 헤드가 있다. 제안된 프로토콜에서 클러스터 헤드 수가 적다면 클러스터 수도 작아지기 때문에 클러스터 내의 멤버노드 들의 수가 많아지며 클러스터 내부 에너지 소비를 높게된다. 반면에 클러스터 헤드 수가 많다면 클러스터 내부의 에너지 소비량은 적지만, 많은 수의 클러스터 헤드로 인해 클러스터 헤드들의 에너지 소비량 총합이 매우 크다. 따라서 제안된 프로토콜을 위해 적절한 클러스터 수를 결정하는 클러스터 헤드 선출 확률이 매우 중요하다.

LEACH는 각 노드의 에너지 소모를 균등하게 분산시키기 위하여 클러스터 헤드를 확률 기반으로 선출하여 각 라운드마다 교체한다. 그러나 이 방식은 클러스터 헤드를 확률적으로 선출하므로 클러스터 헤드가 특정지역에 인접하면 불균형적인 클러스터를 구성 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 LEACH와는 다르게 최적의 클러스터를 구성하기 위하여 [19]에서 제안된 최적의 클러스터 헤드 확률(P_{opt}) 모델을 사용한다. 이 모델은 전체 네트워크의 최소 에너지 소모를 가능하게 하는 클러스터 헤드 수를 결정하여 네트워크의 에너지 효율성을 향상 시키고 균형된 클러스터를 구성한다. 센서 네트워크에서 각 노드의 데이터 전송을 위한 에너지 소모는 거리에 비례하고 클러스터 헤드에서 기지국까지의 거리와 센서로부터 클러스터 헤드까지의 거리는 센서 네트워크에서 센서의 수, 클러스터의 수, 영역(region)의 크기에 의존한다. 따라서, 최적 클러스터 헤드 확률 모델은 클러스터 헤드와 노드들간의 예상 거리, 클러스터 헤드의 무선 거리(radiorange)와 센서 에너지 분산 분포를 모델링 하여 네트워크에서의 통신 오버헤드를 고려한 최적의 클러스터 헤드 선출 확률을 제시하였다. 이 모델을 사용하여 제안된 프로토콜에서의 모든 센서 노드는 클러스터 헤드가 되기 위한 최적 클러스터 헤드 확률 (P_{opt})값을 가지며 이를 기반으로 클러스터 헤드가 선정된다.

3.2 클러스터 및 멀티홉 설정 단계

이 단계에서는 클러스터 헤드 선출 및 클러스터 구성과 형성된 클러스터내에서 헤드까지 각 노드간의 멀티홉 경로를 형성한다.



(그림 1) 센서 네트워크를 위한 제안된 프로토콜 구조

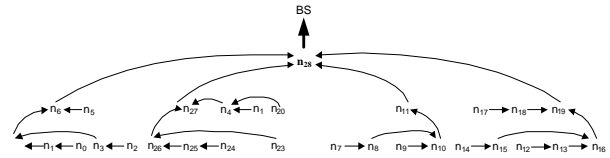
클러스터 헤드 선정을 위해 각 센서 노드들은 0과 1사이에서 임의의 수를 생성한다. n 번째 센서 노드가 생성한 수가 임계값 $T_{new}(n)$ 보다 작다면 그 노드는 해당 라운드의 클러스터 헤드로 선출된다. 임계값 $T_{new}(n)$ 은 다음과 같다.

$$T_{new}(n) = \frac{P_{opt}}{1 - P_{opt} \times (r \bmod \frac{1}{P_{opt}})}, \quad \forall n \in G \quad (3)$$

$$T_{new}(n) = 0, \quad \forall n \notin G \quad (4)$$

여기서 r 은 현재 라운드, G 는 이전 $1/P$ 라운드 동안 클러스터 헤드로 선출 되지 않은 노드들의 집합을 의미하고 P_{opt} 는 제안된 프로토콜에서 사용된 클러스터 헤드 비율이다. 클러스터 헤드 선출 후, 각 클러스터 헤드는 통지메시지(advertisement message)를 통해 자신이 클러스터 헤드로 선출되었음을 이웃 노드들에게 알린다. 통지 메시지를 수신한 각 노드들은 신호 세기를 비교하여 가장 강도가 높은 신호를 전송하는 클러스터 헤드를 자신이 속할 클러스터 헤드로 선택한다. 이후 각 노드는 자신의 위치(location) 및 잔여 에너지(remaining energy) 정보가 포함된 join-request 메시지(Join-REQ)를 선택한 클러스터 헤드에게 전송한다. 이 절차가 완료되면 클러스터 구성이 완료되고 클러스터 내의 멀티홉 형성을 시작한다.

클러스터 형성 후에, 클러스터 내의 멤버 노드들은 클러스터 헤드로 향한 멀티홉 경로를 형성한다. 멀티홉 경로 구성을 위해, 클러스터 헤드는 각 멤버 노드들의 최상의 경로 및 멀티홉 형성을 위한 오버헤드를 최소화하기 위하여 최단 거리 알고리즘(shortest path algorithm)을 적용한다. 서브섹션 3.2에서 각 비 클러스터 헤드 노드들은 자신의 위치정보를 Join-REQ 메시지와 함께 클러스터 헤드에게 전송하였다. 클러스터 헤드는 이 정보를 기반으로 각 노드를 연결한다. 첫 번째로 클러스터 헤드는 멤버 노드들에서 가장 멀리 떨어진 노드(Farthest Node: FN)를 선택한다. 멤버노드들의 집합을 $M_S(\text{Set of Member nodes}) = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_i\}$ 하면 $FN = \text{Maximum Distance (MS)}$ 이다. 다음 단계에서 클러스터 헤드는 선택된 FN을 정점으로 멤버 노드들 중 FN의 최단 거리 노드를 결정한다. 이때, FN의 최단 거리로 선택된 이웃 노드는 데이터 전송 단계 시 FN이 데이터를 전송할 노드이며 섹션 3.3의 스케줄 정보의 {next_node}가 된다. 이후, 최단 거리 이웃 노드 선택을 완료한 FN은 CS(Set of Completed nodes)에 포함된다. CS는 이웃 노드 선택을 완료한 노드들의 집합이다. 모든 단계가 완료되면 클러스터 헤드는 집합 CS에 포함되지 않는 노드들 중 가장 먼 노드를 선택하여 위의 과정을 반복한다. 이때, 최단 거리 노드 검색 시 집합 CS에 포함되는 노드들을 제외한 멤버 노드들을 검색한다. 이 작업이 반복되어 각 클러스터에서는 최종 목적지가 클러스터 헤드가 되는 경로를 완료한다. (그림 2)



(그림 2) 제안된 프로토콜의 클러스터 내에서의 멀티홉 구성

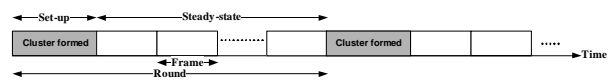
는 (그림 1)의 클러스터 A를 기반으로 제안된 프로토콜의 클러스터 내 멀티홉 구성을 보여준다. 제안된 프로토콜의 각 클러스터 내에서의 멀티홉 구성은 기존 멀티홉 구성(전체 네트워크에서의 멀티홉 형성) 의한 데이터 전송 딜레이(delay)를 최소화한다.

3.3 지역클러스터 헤드 순환

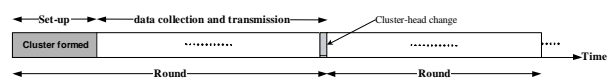
기존의 클러스터 기반 알고리즘에서 클러스터는 각 라운드마다 노드들의 에너지 분산을 위하여 재구성되고 이 과정에서 상당한 양의 에너지가 소모된다. 그러므로, 제안된 프로토콜에서는 0 라운드에서 클러스터를 구성한 후, 네트워크에 변경 사항(즉, 죽은 노드 발생)이 발생 할 때까지 클러스터의 재구성 없이 이미 구성된 클러스터내의 멤버 노드들로 클러스터헤드를 순환시킨다. 이 접근 방법은 네트워크의 에너지 효율성을 크게 증가 시킨다. (그림 3)에서는 기존의 클러스터 기반 프로토콜과 제안된 프로토콜의 타임라인(time line)을 보여준다.

(그림 3-a)의 기존의 클러스터 기반의 프로토콜에서는 데이터 전송이 완료된 후 다시 클러스터 구성을 하며 이는 매 라운드마다 반복된다. LEACH, LEACH-C와 PEACH에서 클러스터 헤드 선출 및 클러스터 구성 방법은 다를 수 있지만 매 라운드 클러스터 구성이라는 측면에서 유사하다. 반면에 제안된 프로토콜을 나타내는 (그림 3-b)에서는 데이터 전송이 완료된 후 단순히 클러스터 헤드의 변경 만을 통하여 클러스터의 재 구성없이 다음 라운드(next round)로 진행된다. 즉, 클러스터 헤드가 기지국에 최종적으로 데이터를 전송한 후 클러스터 헤드 변경 토권이 전송됨으로써 클러스터의 멤버 노드들은 클러스터 헤드의 변경을 알 수 있다.

클러스터 구성 및 멀티홉 형성이 완료된 후에, 클러스터 헤드는 클러스터 내에서 클러스터 헤드 순환 순서를 결정한다. 클러스터 헤드 순환 순서는 클러스터 헤드에 수신된 각

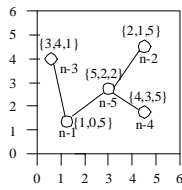


(a) 기존 프로토콜

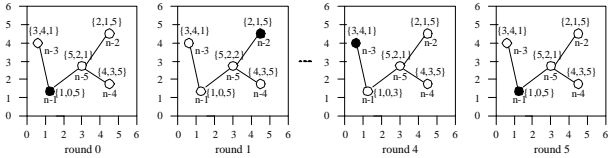


(b) 제안된 프로토콜

(그림 3) 기존 프로토콜과 제안된 프로토콜의 time line



(a) 클러스터



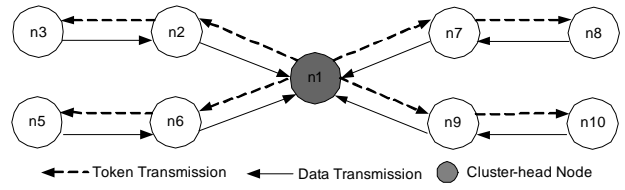
(b) 클러스터 헤드 순환

(그림 4) 제안된 프로토콜의 클러스터 헤드 순환 과정

멤버 노드들의 잔여 에너지를 기반으로 한다. 즉, 다음 라운드의 클러스터 헤드는 가장 많은 에너지를 보유한 노드가 된다. 그 후, 클러스터 헤드들은 순환 스케줄(rotation schedule)정보를 클러스터 내의 멤버 노드들에게 전송한다. 이 스케줄 정보는 {node_id, rotation_number, next_node}로 구성된다. 여기서 node_id는 각 노드의 고유 ID이며, rotation_number는 멤버 노드들이 클러스터 헤드가 되는 순서이며, next_node는 데이터를 전송하는 이웃 노드이다. 예를 들어, {20, 5, 16}는 node-20이 클러스터 내의 멤버 노드들 중 5번째에 클러스터 헤드가 되며 비 클러스터 헤드(non-cluster-head)일 때는 node-16에게 데이터를 전송한다. (그림 4)는 제안된 기법에서 클러스터내의 클러스터 헤드 순환 과정을 보여준다.

3.4 데이터수집 및 전송 단계

설정 단계가 완료된 후, 데이터 수집 및 전송 단계를 시작한다. 이 단계에서 각 노드는 데이터를 수집하고 클러스터 내에서의 멀티홉 구성에 따라 자신의 이웃 노드에게 데이터를 전송하며 클러스터 헤드는 멤버 노드들에게서 수신된 데이터를 기지국에게 전송한다. 제안된 프로토콜에서는 데이터 전송을 위해 토큰 패싱 메커니즘(tokenpassing mechanism)을 사용한다[20]. 데이터 전송 시작을 위해, 클러스터 헤드는 데이터 전송을 위한 토큰을 종단 노드들에게 전송한다. 종단 노드는 토큰을 수신 한 후 센싱된 데이터를 전송하기 시작한다. 각 노드는 이웃 노드로부터 데이터를 수신하고 자신의 데이터와 병합하여 연결된 이웃 노드에게 데이터를 전송한다. 최종적으로 클러스터 헤드는 수신된 데이터를 통합하여 기지국에게 전송한다. 여기서, 토큰의 크기는 매우 작기 때문에 토큰 전송에 따른 비용은 무시 할만한 수준이다[20]. (그림 5)에서는 제안된 프로토콜의 토큰 패싱 메커니즘을 보여준다. (그림 5)에서 노드 n1은 클러스터 헤드이다. 클러스터 헤드 n1은 형성된 경로를 통해 노드 n2를 거쳐 노드 n3에게 토큰을 전달한다. 토큰을 수신한 노드 n3는 노드 n2에게 데이터를 전송한다. 노드 n2는 노드 n3로부터 데이터를 수신하고 자신의 데이터와 노드 n3로부터 수신된 데이터를



(그림 5) 제안된 프로토콜의 토큰 패싱 메커니즘

병합한다. 즉, 제안된 프로토콜은 형성된 멀티홉의 종단 노드들을(end nodes)를 제외한 모든 노드에서 데이터 병합을 수행한다. 노드 n2는 데이터 병합 수행 후 병합된 데이터를 클러스터 헤드 n1에게 전송한다. 노드 n2, n3로 형성된 경로부터 데이터를 수신한 클러스터 헤드 n1은 같은 방법으로 형성된 경로를 통해 노드 n5에게 토큰을 전달하고 데이터를 수신한다. 이와 같은 방법으로 클러스터 헤드는 클러스터의 모든 멤버 노드들로부터 데이터를 수신하고 기지국에 데이터를 전송한다.

4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 성능 평가를 통해 제안된 프로토콜의 에너지 효율성을 평가한다. 이를 위해 대표적인 클러스터 기반의 프로토콜인 LEACH, LEACH를 개선한 PEACH 및 LEACH-C와 성능 비교 및 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 프로토콜의 우수성을 확인하였다.

4.1 에너지 소비 모델

본 논문에서는 제안된 프로토콜의 성능을 평가하기 위하여 기존 클러스터 기반 프로토콜에서 제안된 에너지 소비 모델을 사용한다[11, 17, 18]. 각 센서 노드들은 센싱된 데이터를 일정한 주거나 요청에 의해 형성된 멀티홉을 통해 클러스터 헤드로 전송하고 클러스터 헤드는 수신된 데이터를 기지국으로 전송한다. 제한된 자원을 가진 센서 노드들이 k 비트 메시지를 거리 d까지 송신하기 위해 소비되는 에너지 소비량(E_{Tx})과 k비트 메시지를 수신하기 위해 소비되는 에너지 소비량 (E_{Rx})은 다음과 같다.

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d < d_o \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & \text{if } d \geq d_o \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{Rx}(k, d) = E_{Rx-elec}(k) \quad (6)$$

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec}$$

여기서 k는 전송 데이터의 비트 수, d는 송수신 노드의 거리, E_{elec} 는 비트당 회로의 에너지 소비량을 나타내고, $\epsilon_{fs}(pJ/bit/m^2)$ 와 $\epsilon_{mp}(pJ/bit/m^4)$ 는 무선 송신을 위해 사용

되는 신호 증폭(signal power amplification) 에너지 소모를 나타낸다. 식 (5)에서 송신 에너지 소모는 전송 거리에 따라 자유 공간(free space)모델과 다중 경로(multipath)모델로 구분된다. 자유 공간 모델에서는 전송거리(d)의 제곱에 비례하여 전력이 소모되고, 다중 경로 모델에서는 전송거리(d)의 네 제곱에 비례하여 전력이 소모된다. 자유공간 모델과 다중 경로모델의 구분은 $d_{crossover}$ 값(d_0)을 사용한다. 클러스터 헤드와 멤버 노드간의 거리가 d_0 보다 작으면 자유 공간 모델, 크다면 다중 경로 모델로 간주한다.

4.2 실험 환경

제안된 프로토콜을 평가 하기 위해 100m x 100m 크기의 영역 내에 100개의 센서 노드를 분포시켰고 기지국은 (65, 140)에 위치한다고 가정하였다. 센서 노드의 초기 에너지는 각각 0.5J과 1.0J로 설정하여 실험하였다. 본 실험에서 송수신 회로에서 소모되는 에너지 소비량은 LEACH, LEACH-C와 PEACH에서 제시된 값과 동일하게 사용하였고, 각 센서 노드들이 데이터 병합을 위해 소비하는 에너지는 5 nJ/bit/signal이다. 또한, 모든 데이터 패킷들은 같은 사이즈라 가정하며 데이터 전송 시 에러는 고려하지 않았다. 실험을 위해 사용된 파라미터는 <표 1>과 같다.

<표 1> 실험에 사용된 파라미터

parameter	Value
Network size	100 x 100
Base station location	(65, 140)
Nodes	100
Initial energy	0.5J/1.0J
E_{elec}	50nJ/bit
ϵ_{fs}	10pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.00013pJ/bit/m ⁴
E_{DA}	5nJ/bit/signal
Data packet size	2000 bits

4.3 성능 평가

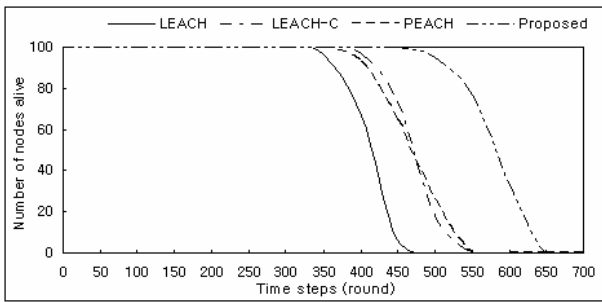
<표 2>는 네트워크에서 센서 노드가 처음 죽기 시작하는 라운드와 마지막 노드가 죽는 라운드를 보여준다. 제안된 프로토콜의 성능평가를 위해 0.5J과 1.0J의 서로 다른 센서 노드 초기화 에너지 값을 할당하여 실험하였고 제안된 프로토콜이 LEACH, LEACH-C와 PEACH보다 일관되게 에너지 효율성이 향상 되었음을 확인하였다. 센서 네트워크에서 가장 신뢰성 있고 정확한 정보를 수집할 수 있을 때는 모든 센서 노드가 정상적으로 작동 할 때이다. 즉, 네트워크에서 에너지 소모로 재 기능을 못하는 센서 노드가 발생한다면 수집된 데이터의 신뢰성에 영향을 끼치게 되므로 네트워크에서 첫 번째로 죽은 노드가 발생하는 시점은 매우 중요하

<표 2> 다른 초기화 에너지에 따른 노드의 수명

Energy (J/node)	Protocol	The round a node begins to die	The round all the nodes die
0.5	LEACH	339	459
	LEACH-C	387	512
	PEACH	365	538
	Proposed	463	627
1.0	LEACH	546	923
	LEACH-C	645	1035
	PEACH	621	1062
	Proposed	736	1174

다. 본 논문에서는 첫 번째로 에너지 소모로 죽은 노드를 FND(First Node Dies)라 하고 가장 마지막에 죽은 노드를 LND(Last Node Dies)라 한다. <표2>에서 각 센서 노드의 에너지를 0.5J로 할당하였을 때 FND가 발생하는 라운드는 LEACH가 339, LEACH-C가 387, PEACH 365이고 제안된 프로토콜이 463이다. 즉, 제안된 프로토콜이 기존의 기법들보다 가장 정확한 데이터 신뢰성을 보장할 수 있는 모든 노드가 살아 있는 기간을 연장하여 데이터 신뢰성을 향상시켰음을 확인할 수 있다. 또한, 마지막 죽은 노드가 발생하는 라운드 수는 제안된 프로토콜이 각 센서 노드의 초기화 에너지를 0.5J로 할당하였을 때 LEACH, LEACH-C와 PEACH보다 각 36%, 22%, 16%가 향상되었음을 알 수 있다. <표 2>의 결과는 제안된 프로토콜이 LEACH, LEACH-C와 PEACH 보다 전체 네트워크 수명을 연장하고 네트워크 안정성을 향상시켰음을 보여준다.

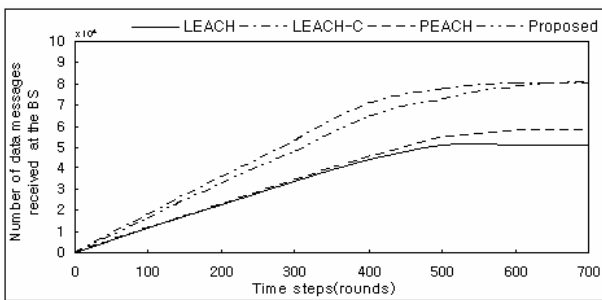
(그림 6)은 각 센서 노드에 0.5J의 초기 에너지를 주었을 때 라운드가 경과함에 따라 살아 있는 노드 수의 변화를 보여준다. 센서 네트워크에서 생존 노드 수는 신뢰성 있는 데이터 전달을 위한 센서 네트워크의 중요한 요소이며, 또한 전체 네트워크 수명에도 직접적으로 연관된다. 즉, 라운드 경과 시 생존 노드 수가 많다는 것은 보다 정확한 데이터를 사용자에게 전달하여 데이터 신뢰성을 높이며 네트워크 수명이 연장된다는 것을 의미한다. LEACH와 PEACH에서 클러스터 헤드는 확률적으로 랜덤하게 선출된다. 따라서, 클러스터 헤드가 인접되게 선출될 수 있으며, 이는 비 효율적인 클러스터 구성을 유발하여 특정 노드가 클러스터 헤드와 멤버 노드, 클러스터 헤드와 기지국과의 통신 시 많은 에너지를 소모한다. (그림 6)에서 나타나듯이 LEACH의 경우 라운드가 경과함에 따라 죽는 노드가 급격히 발생된다. LEACH-C는 각 센서 노드들로부터 정보를 받아 LEACH다 효율적으로 클러스터를 구성하지만 센서 노드들이 클러스터 구성 시마다 기지국과 통신해야 하므로 상당한 통신 비용을 초래한다. 또한, PEACH는 잔여 에너지가 부족한 클러스터 헤드의 역할을 이웃 노드에게 위임함으로써 LEACH와 LEACH-C에서 발생하는 클러스터 헤드의 에너지 결함에 의한 문제점을 해결하여 LEACH와 LEACH-C에 비해 네트워크



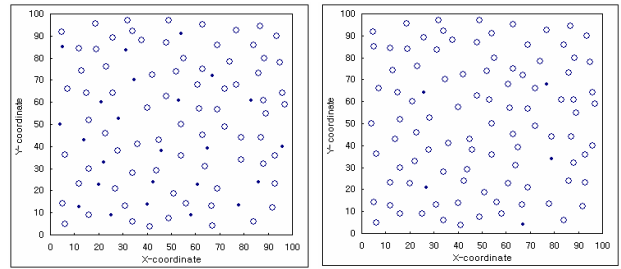
(그림 6) 네트워크 수명 비교

크 수명이 연장되었다. 그러나, PEACH는 LEACH와 동일한 클러스터 구성 단계를 사용함으로써 비 효율적인 클러스터 구성을 유발하고 매 라운드마다 클러스터를 재구성함으로써 상당한 에너지 소모를 가져온다. 제안된 프로토콜은 최적의 클러스터 헤드 확률과 클러스터 내에서의 클러스터 헤드 교체 기법으로 노드간의 에너지 소비를 균등하게 달성하고 클러스터 재구성 단계를 줄임으로써 에너지 소비를 최소화하였다. 또한, 클러스터 내의 멤버 노드들 간의 멀티홉 전송으로 노드들의 데이터 전송 시 에너지 소모를 줄여 네트워크 수명을 연장하였으며 망의 수명이 늘어남에 따라 보다 많은 데이터 전송을 통해 데이터 신뢰성을 향상시켰다. (그림 6)에서는 제안된 프로토콜이 LEACH, LEACH-C와 PEACH에 비해 네트워크 수명이 향상되었음을 보여준다.

센서 네트워크는 정보 수집을 목적으로 하며 이를 위해 정확한 정보를 획득하기 위한 데이터 전송은 중요한 문제이다. (그림 7)은 각 프로토콜의 라운드에 따른 기지국에 수신된 총 데이터량을 보여준다. LEACH-C의 경우 센서 노드들에서 전송받은 정보를 기반으로 가장 적합한 형태의 클러스터를 구성하여 LEACH와 PEACH에 비해 보다 많은 데이터 전송이 이루어지며 PEACH는 클러스터 헤드의 데이터 전송 실패를 방지함으로써 LEACH보다 우수한 성능을 보여준다. (그림 7)에서 제안된 프로토콜이 LEACH와 PEACH보다 더 많은 데이터 전송이 이루어지며 라운드가 길어질수록 LEACH-C와 유사한 데이터 전송량을 확인할 수 있다. 이것은 최적의 클러스터 헤드 확률에 따라 균형적인 클러스터를 구성하고 클러스터 내 멀티홉 형성과 클러스터 구성 시 에너지 소모를 최소화하여 네트워크 수명을 연장한 결과이다.



(그림 7) 라운드에 따른 기지국에 전송한 데이터량



(a) PEACH

(b) 제안된 프로토콜

(그림 8) 800 라운드 후의 생존 노드 분포

또한, 이 결과를 통해 제안된 프로토콜이 기존 기법들보다 데이터 신뢰성에서 향상되었음을 확인할 수 있다.

(그림 8)은 각 노드의 초기화 에너지를 $1.0J$ 로 할당하였을 때 800 라운드에서 PEACH와 제안된 프로토콜의 살아있는 노드(small circle)의 분포를 보여준다. PEACH는 에너지 결함이 발생할 수 있는 클러스터 헤드를 미리 교체함으로써 네트워크 수명을 연장하여 LEACH에 비해 생존 노드 수가 더욱 향상되었다. 제안된 프로토콜은 PEACH에 비해 생존 노드 수가 95개로 더욱 많아 졌으며 PEACH의 죽은 노드(dot)가 인접 지역에 집중 현상을 나타내는데 반해 제안된 프로토콜의 죽은 노드는 네트워크 내에서 균등하게 분포되었다. 이것은 본 제안된 기법이 사용한 최적의 클러스터 헤드 확률과 클러스터 내 클러스터 헤드 교체 기법을 사용하여 노드의 균등한 에너지 소모를 유도하고 클러스터 내의 멤버 노드 사이의 멀티홉 통신을 통해 전송 거리를 줄임으로써 달성된다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 향상 시키고 데이터 신뢰성을 보장하기 위한 새로운 클러스터 기반의 멀티홉 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 클러스터 구성 후 클러스터 내에서의 멤버 노드들은 멀티홉으로 연결된다. 또한, 기존의 클러스터 기반의 프로토콜과 다르게 제안된 프로토콜은 클러스터 구성과 클러스터 내의 멀티홉 형성이 매 라운드마다 수행되지 않는다. 즉, 첫 라운드에서 클러스터 구성과 멀티홉 형성이 수행되고 전체 네트워크에서 죽은 노드가 발생할 때까지 클러스터내의 노드들이 순차적으로 클러스터 헤드로 교체되고 클러스터 헤드의 역할을 담당한다. 전체 네트워크에서 죽은 노드가 발생하면 새롭게 클러스터 구성 및 멀티홉 형성을 수행한다. 이 접근 방법은 매 라운드마다 클러스터 구성 시 발생하는 에너지 소모를 줄임으로써 각 센서 노드 및 네트워크의 에너지 효율성을 향상 시켰다. 또한, 클러스터 내에서의 노드간의 멀티홉 연결은 노드간의 통신 거리를 줄임으로써 데이터 전송 시 에너지 소비를 최소화하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 프로토콜이 기존의 클러스터 기반의 프로토콜인 LEACH, LEACH-C와 PEACH와 비교하여 효율적으로 데이

터를 전송하고 16%~36%의 네트워크 수명이 연장되었음을 확인하였다. 특히, 제안된 프로토콜은 무선 센서 네트워크가 넓은 지역에 배치되고 기지국이 네트워크로부터 멀리 떨어질수록 더욱 효과적으로 네트워크 확장성이 우수할 것으로 판단된다.

향후에는 각 노드의 잔여 에너지를 기반으로 클러스터 내의 멀티홉 형성을 통한 네트워크 에너지 효율성 향상을 측정하는 연구가 필요하다. 또한, 체인과 트리 구조를 이용한 클러스터 기반의 보다 향상된 구조 연구와 제안된 프로토콜을 기반으로 하는 실제 응용에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Ian F. Akyildiz et al., "A survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, Aug. pp.102-114, 2002.
- [2] David Culler, Deborah Estrin, and Mani Srivastava, "Overview of Sensor Network," IEEE Computer Society, August 2004.
- [3] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D Culler, and J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring". Wireless Sensor Networks & applications, pp.88-97, 2002
- [4] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S.Kumar, "Scalable Coordination in Sensor Networks," Proc. Mobicom, pp.263-270
- [5] J.Kahn, R. Katz, and K. Pister, "Mobile Networking for Smart Dust", Proc.Mobicom, pp. 271-278, Aug. 1999.
- [6] D. Li, K. D. Wong, Y.H. Hu, and A.M. Sayeed, "Detection, Classification and Tracking of Targets," IEEE Signal Processing Magazine, Vol.19, pp. 7-29, March 2002.
- [7] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein and W. Hong, "TAG: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks," OSDI, December 2002.
- [8] J.N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", IEEE Wireless Communications, Vol.11, No.6, Dec. 2004.
- [9] Jamil Ibriq and Imad Mahgoub, "Cluster-based Routing in Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges," SPECTS '04, pp. 759-766, 2004.
- [10] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", Proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, pp.2009-2015, Apr. 2001.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro-sensor Networks", In Proceedings of the Hawaii International Conference on System Science, Maui, Hawaii, 2000.
- [12] Younis. O, Fahmy. S, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for adhoc sensor networks," Mobile Computing, IEEE Transactions on Volume 3, pp. 366-379, Oct. Dec. 2004
- [13] G. Gupta and M. Younis, "Load-balanced clustering of wireless sensor networks," IEEE ICC, pp.1848-1852, May 2003.
- [14] S. Bandyopadhyay and E. Coyle, "An Energy-Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of IEEE INFOCOM, April. 2003.
- [15] M.J. Handy, M. Haase, and D. Timmermann, "Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection," MWCN, pp.368-372, Sept. 2002.
- [16] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," IEEE Personal Commun., 7(5):16-27, Oct. 2000.
- [17] W.B. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 1, No. 4, Oct 2002, pp. 660-670.
- [18] K. T. Kim and H. Y. Youn, "PEACH: Proxy-Enable Adaptive Clustering Hierarchy for Wireless Sensor network", Proceeding of the 2005 International Conference On Wireless Network, June 2005, pp. 52-57.
- [19] K.T. Kim, H.S. Kim, and H.Y. Youn, "Optimized Clustering for Maximal Lifetime of Wireless Sensor Networks," EUC2006, LNCS 4097, pp. 465 - 474.
- [20] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in IEEE Aerospace Conference, pp.1125-1130, March 2002.



김 경 태

e-mail : ktkim@ece.skku.ac.kr

2003년 수원대학교 컴퓨터학과(학사)

2005년 성균관대학교 정보통신공학부 컴퓨터공학과(공학석사)

2005년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야: USN, IPTV, 이동 통신 시스템, 유비쿼터스 컴퓨팅



윤 희 용

e-mail : youn@ece.skku.ac.kr

1977년 서울대학교 전기공학과(학사)

1979년 서울대학교 전기공학과(석사)

1988년 Univ. of Massachusetts at Amherst
컴퓨터공학과(박사)

1988년~1991년 Univ. of North Texas.
조교수

1991년~1999년 Univ. of Texas at Arlington 부교수

1999년~2000년 ICU 교수

2000년~현 재 성균관대학교 정보통신공학부 교수 및 유비쿼
터스 컴퓨팅기술연구소 소장

관심분야: 모바일 컴퓨팅, 분산처리, 유비쿼터스 컴퓨팅