

---

# 노드간 에너지 소비를 효율적으로 분산시킨 PRML 메커니즘

정윤수\*, 김용태\*\*, 박남규\*\*\*, 박길철\*\*\*\*

Security Scheme for Prevent malicious Nodes in WiMAX Environment

Yoon-Su Jeong\*, Yong-Tae Kim\*\*, Nam-Kyu Park\*\*\* and Gil-Cheol Park\*\*\*\*

---

본 연구는 지식경제부 지역혁신센터 사업인 민군겸용 보안공학 연구센터 지원으로 수행되었음

---

## 요 약

제한된 배터리 전력을 이용하여 많은 노드들로 구성된 무선 센서 네트워크는 네트워크의 라이프타임을 연장하기 위해서 각 노드의 에너지 소비를 최소화해야 한다. 그리고, 무선 센서 네트워크의 민감성을 향상시키기 위해서는 각 센서 노드의 에너지 소비를 최소화하기 위한 효율적인 알고리즘과 에너지 관리 기술이 필요하다. 이 논문에서는 노드의 잔존 에너지와 연결도를 이용하여 각 센서 노드의 효율적인 에너지 소비대신 전체 센서 네트워크의 에너지 효율성을 극대화하면서 목적지 노드로 센싱 정보를 안전하게 전달할 수 있는 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜은 각 노드의 에너지 소비를 최소화하고 싱크 노드가 클러스터 내·외부에 위치하더라도 시스템의 생명주기를 연장할 수 있다. 제안 기법의 타당성을 검증하기 위해서 NS-2를 이용하여 현실 모델에 맞게 센서 네트워크를 구축하고, HEED, LEACH-C와 함께 전체 에너지 소비, 클러스터 헤드의 에너지 소비, 네트워크 확장성에 따른 에너지 소비 분포들을 평가한다.

## ABSTRACT

A wireless sensor network consisting of a large number of nodes with limited battery power should minimize energy consumption at each node to prolong the network lifetime. To improve the sensitivity of wireless sensor networks, an efficient scheduling algorithm and energy management technology for minimizing the energy consumption at each node is desired. In this paper, we propose energy-aware routing mechanism for maximum lifetime and to optimize the solution quality for sensor network maintenance and to relay node from its adjacent cluster heads according to the node's residual energy and its distance to the base station. Proposed protocol may minimize the energy consumption at each node, thus prolong the lifetime of the system regardless of where the sink is located outside or inside the cluster. Simulation results of proposed scheme show that our mechanism balances the energy consumption well among all sensor nodes and achieves an obvious improvement on the network lifetime. To verify propriety using NS-2, proposed scheme constructs sensor networks adapt to current model and evaluate consumption of total energy, energy consumption of cluster head, average energy dissipation over varying network areas with HEED and LEACH-C.

## 키워드

Energy-aware, Routing Protocol, WSN

---

\* 충북대학교 전자계산학과(제1저자)

접수일자 2008. 10. 27

\*\* 한남대학교 멀티미디어학부 강의전담 교수(교신저자)

\*\*\* 충북대학교 컴퓨터공학과

\*\*\*\* 한남대학교 멀티미디어학부 교수

## I. 서 론

컴퓨터와 통신 기술의 최근 발전은 무선 센서 네트워크(WSN : Wireless Sensor Network)의 확대를 용이하게 하고 있다. 무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 배터리를 통하여 전력을 획득하는 통합 센서 장치로 구성되며 데이터 처리 능력과 단거리 무선 통신이 가능한 특징을 갖는다. 최근에는 환경/생태 감시 분야, 에너지 관리 분야, 물류/재고 관리 분야, 전투 지역 관리 분야 및 의료 모니터링 분야 등 광범위하며, 이들 분야에서 무선 센서 네트워크에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[1, 2].

최근까지의 연구 기법들은 노드의 이동성과 망 변화에 초점을 맞추어 센서 노드의 에너지 효율성을 증가시키기 위하여 MAC(Multiple Access Control) 프로토콜과 라우팅 프로토콜 중심으로 제안되어 왔다[3, 4, 5]. 그러나 대부분의 경우 하나의 노드 입장에서 에너지 효율만을 고려하여 지속적인 다 대일 트래픽 패턴에 의한 네트워크 생명주기를 확장하지 못하고 있다는 단점을 가진다[6]. 무선 센서 네트워크는 센서 노드들의 협력 시스템이기 때문에, 에너지 효율성을 위해서는 MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜의 설계 시에 센서 네트워크를 구성하고 있는 각각의 노드들의 수명 연장은 물론 많은 노드들로 구성된 네트워크 전체의 수명 연장 및 네트워크의 확장성을 극대화하기 위한 기법이 필요하다. 특히 에너지 효율성을 극대화하기 위해서는 멀티 홉 안에 존재하는 센서 노드들이 자발적으로 클러스터링에 참여하여 클러스터 헤드가 센서 노드들의 에너지를 효율적으로 관리할 수 있는 클러스터링 방법과 중간 노드 역할을 하는 클러스터 헤드가 백본 역할을 하도록 하여 베이스 스테이션까지 전달해야 하는 데이터를 최소의 송·수신 에너지를 가지고 전달할 수 있는 멀티 홉 라우팅 방법 측면에서 서로 상호 보완적으로 에너지를 관리함으로써 확장성을 보장해야 한다.

이 논문에서는 네트워크에 배치된 전체 노드들의 파워 소비의 균형을 유지함으로써 네트워크 생명주기를 최적화하기 위한 최적의 라우트 검색 처리를 수행하는 PRML (Power-aware Routing for Maximum Lifetime) 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 무선 센서 네트워크에서 동작하는 파워 소비를 최소화하면서 최종 목적지까지 데이터를 전달하는 최단 경로를 찾는 것을 목적으

로 한다. 또한 제안 프로토콜에서 게이트웨이 역할을 하는 중간 노드는 파워 레벨을 유지하면서 가장 인접한 노드에게 데이터를 전송하는 역할을 하며, 클러스터 헤드는 노드의 잔존 에너지와 노드들의 연결도를 이용하여 인접노드를 선택하는 역할을 한다. 시뮬레이션에서는 제안 기법이 네트워크상에서 에너지를 균형있게 소비하는 결과와 네트워크 생명주기를 향상시킬 수 있는지에 대한 결과를 나타내고 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선 센서 네트워크의 라우팅 기법과 클러스터링 기법에 대하여 분석한다. 3장에서는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 극대화하면서 중간 노드의 최소 안전성을 보장하는 라우팅 프로토콜을 제안하고, 4장에서는 제안 프로토콜에 대한 효율성에 대하여 분석·평가한다. 마지막으로 5장에서는 이 연구의 결과를 요약하고 향후 연구에 대한 방향을 제시한다.

## II. 관련연구

무선 센서 네트워크에서 클러스터의 필요성은 노드 증가에 따른 확장성(scalability), 안전성 증대, 효율적 자원 관리 및 네트워크 내에서 데이터 병합(data aggregation)등을 위해 언급되고 있다. 기존 무선 애드혹에서 제안되었던 클러스터링 알고리즘과 다르게 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율성이 매우 중요한 설계 요소이며 이를 위해 노드의 잔여 에너지와 인접 노드의 수 등이 클러스터 헤드 선정에 중요한 요소가 된다. HEED 프로토콜은 개별 노드에서 분산 처리를 통해 클러스터 헤드를 결정하는 알고리즘을 제안하였다[7]. HEED 프로토콜은 국부 데이터만을 이용하고 클러스터링을 위해 전송되는 데이터양이 많지 않아야 하며 일정 시간 내에 동작이 완료되어야 하는 제약 사항을 가지고 있다. HEED 프로토콜에서 노드의 잔여 에너지를 이용하는 헤드 선정 확률 함수는 (식 1)과 같다.

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (식 1)$$

$E_{max}$ 는 노드의 초기 에너지,  $E_{residual}$ 은 노드의 잔여 에너지,  $C_{prob}$ 는 전체 네트워크 노드 중 클러스터 헤드 노드의 비율을 의미한다. 클러스터 헤드 선정을 위해 잔여 에너지의 값이 같은 후보 노드가 존재하는지를 조사한 후에 동일한 후보가 존재할 경우 클러스터 내의 통신 비용을 두 번째 헤드 선정 기준값으로 이용한다.

통신 비용은 인접 노드의 근접성이나 클러스터의 밀집도를 나타내기 때문에 노드 자신의  $CH_{prob}$ 이 1이 될 때까지  $CH_{prob}$ 를 2배씩 증가시키거나 1이 된 인접 노드로부터 메시지를 수신할 때까지 반복한다. 이러한 방법을 수행하면 클러스터의 크기에 관계없이 일정 시간 내에 알고리즘이 종료되도록 할 수 있으며 인접 노드의 위치를 고려하지 않아도 된다.

센서 네트워크 구조의 특성상 다수의 네트워크 노드에서 싱크 노드로 데이터를 전송하면 싱크 노드에 인접한 노드들은 전송량이 많아져서 다른 지역의 노드보다 에너지 소모가 많아지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 LEACH 프로토콜은 네트워크를 구성하는 노드들의 에너지 소비를 균등하게 하여 네트워크 생존 시간을 최대화하기 위해 분산된 환경의 클러스터 기반의 네트워크 구조로 데이터를 전송한다[8, 9]. LEACH 프로토콜 동작 과정은 Advertisement 단계, Cluster Setup 단계, Schedule Generation 단계, 데이터 전송 단계로 구성된다. Advertisement 단계에서는 모든 노드가 (식 2)의 확률 함수를 사용하여 값을 구한다.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)} & : C_i(t) = 1 \text{ (식 2)} \\ 0 & : C_i(t) = 0 \end{cases}$$

(식 2)에서  $i$ 는 노드의 식별자,  $t$ 는 시간,  $N$ 은 전체 노드의 수,  $k$ 는 클러스터의 수,  $r$ 은 라운드를 나타낸다. (식 2)에서  $C_i(t)$ 는 라운드 동안 특정 노드가 클러스터 헤드로서 역할을 수행하였는지를 판별하는 값으로 사용한다. (식 2)의  $C_i(t)$ 는 최근  $r \bmod \frac{N}{k}$  라운드 동안 클러스터 헤드였다면 0이고, 아니라면 1이다. 즉, 최근  $r \bmod \frac{N}{k}$  라운드 동안 헤드를 한 번이라도 했다면 다

시 뽑힐 확률은 없게 된다. 이와 같은 확률 함수를 통해 자신이 클러스터 헤드가 되면 이를 주변의 인접 노드에게 브로드캐스트 한다. 모든 노드들로부터 데이터를 수신한 헤드 노드는 신호 처리 함수를 거쳐 데이터를 압축하여 싱크 노드로 송신한다. 미리 정해진 일정 시간이 지난 후, Advertisement 단계를 시작하여 다음 라운드가 시작된다.

Heinzelman et al.은 클러스터 구성을 싱크 노드에서 중앙 집중형으로 수행하는 LEACH-C (Centralized) 방식을 추가로 제안하여 LEACH에 비해 에너지 소모에 보다 효과적임을 검증하였다. 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 직접 전송하기에는 에너지 소모가 크며, 네트워크가 확장되었을 때 현실적으로 전송 거리가 미치지 못할 수 있기 때문에 클러스터에서 데이터를 수집한 후 이들이 네트워크의 백본(backbone)이 되어 멀티 홉 라우팅을 수행하는 방법에 대한 구체적인 연구를 필요로 한다.

### III. 가중치와 에너지 기반의 라우팅 프로토콜

이 장에서는 센서 노드를 구성하고 있는 네트워크의 전체 라이프타임을 연장하기 위한 방법으로 일정 비율로 노드들이 자발적으로 클러스터 헤드에 참여하여 센서 네트워크를 구성하고 게이트웨이 역할을 하는 중간 노드가 가장 가까운 이웃 노드의 연결도를 검색하여 최소 에너지를 가지고 데이터를 안전하게 하는 PRML(Power-aware Routing mechanism for Maximum Lifetime) 최적 경로 프로토콜을 제안한다. 제안한 PRML 라우팅 프로토콜에서는 적절한 클러스터링을 통해 센서의 낮은 프로토콜 파워를 유지하면서 이웃 노드의 연결도를 이용하여 최적의 에너지 경로를 탐색을 목적으로 한다. 또한, 센서 네트워크를 구성하는 구성 요소 중 게이트웨이 역할을 하는 중간 노드는 파워 레벨을 유지하면서 중간 노드와 가장 가까운 이웃 노드에게 최소 에너지를 사용하여 데이터를 안전하게 전송함으로써 센서 네트워크의 전체 라이프타임을 연장한다. 또한, PRML 라우팅 프로토콜은 클러스터에서 데이터를 수집한 후 클러스터 헤드가 네트워크의 백본이 되어 베이스 스테이션까지 멀티 홉 라우팅을 수

행하기 때문에 LEACH와 HEED보다 에너지 소비가 적은 특징이 있다.

### 3.1 클러스터 설정

제안 프로토콜은 클러스터를 형성하기 전에 이웃 노드들을 모두 검색하여 이웃 노드들의 정보(노드의 식별자, 최소 파워 세기, 연결도 등)를 획득한 후 자신의 정보를 멀티홉 반경의 이웃 노드들에게 전달한다. 모든 노드는 클러스터 헤드 노드의 선정에 필요한 정보를 중앙의 특정 노드로부터 받아들이지 않고 모든 정보는 멀티홉 반경에 있는 이웃 노드의 검색 과정과 자신의 상태 정보를 확인하는 것으로 수집하기 때문에 LEACH와 HEED보다 에너지를 효율적으로 사용한다. 그림 1은 이웃 노드를 검색하는 알고리즘을 의사코드로 나타낸다. 그림 1에서 각각의 노드는 비콘(beacon) 메시지를 사용하여 이웃 노드를 탐색하고, 노드는 응답하는 이웃 노드의 메시지를 받음으로써 이웃 노드에게 정보 전달을 위해 필요한 최소 신호 세기를 감지한다.

PRML 라우팅 프로토콜에서는 전체 네트워크 필드의 정보를 싱크 노드로 전송하기 위해서 반드시 모든 노드들이 클러스터 범위 안에 존재해야 한다. 만약 클러스터 헤드들이 만드는 클러스터 영역 이외의 지역에 노드가 존재할 경우, 전체 네트워크의 정보를 싱크 노드로 전송하기 위해서 클러스터 영역 외의 지역에 임의의 클러스터 헤드를 선정하여 모든 노드가 클러스터의 영역 내에 존재하도록 한다.

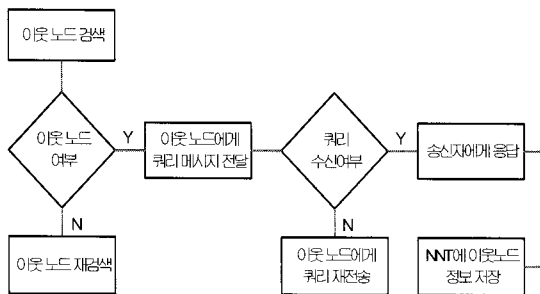


그림 1. PRML 라우팅 프로토콜의 이웃노드 검색 알고리즘

Figure 1. Neighbor node Search Algorithm of PRML Routing Protocol

### 3.2 클러스터 헤드 선택

이 절에서는 클러스터 헤드 노드를 선정하기 위한 요소로 노드의 잔존 에너지와 연결도를 고려한다. LEACH 기법에서는 노드의 잔존 에너지만을 이용하여 클러스터 헤드를 선정하지만 제안 프로토콜에서는 클러스터 헤드가 오버레이 역할을 수행할 수 있도록 연결도 항목을 추가하고 있다. 즉 전체 네트워크에 배치된 노드들 중에서 클러스터 헤드가 될 확률은 LEACH와 동일한 5% 비율을 유지하면서 주기적으로 클러스터에 참여하는 노드의 잔존 에너지와 연결도가 높은 노드를 선정한다. 이런 과정은 멀티 홉 내에 존재하는 노드들을 자발적으로 클러스터 헤드 선정에 참여하게 함으로써 전체 네트워크에서 사용하는 에너지 효율을 높이는 효과를 얻는다.

네트워크에 배치된 노드의 연결도는 각 노드의 통신 비용으로 계산하며 노드 자신의 통신비용을 알기 위해서는 그림 1에서와 같이 이웃 노드에 대한 탐색 과정이 반드시 필요하다. 클러스터 헤드 노드 선정을 위한 임계값( $T_i$ )는 (식 3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $E_i$ 는  $i$ 번째 노드의 잔존 에너지,  $E_{init}$ 는 노드의 초기 에너지,  $P_{max}$ 는 노드의 최대 신호세기,  $ACC$ 는 노드의 평균 통신 비용,  $P_b$ 는 전체 노드에서 클러스터 헤드 노드의 비율을 의미한다.

$$T_i = \frac{1}{2} \left( \frac{E_i}{E_{INIT}} + \frac{ACC}{P_{max}} \right) P_b \quad (식 3)$$

각 노드는  $T_i$ 의 임계값을 계산한 후에, 0과 1사이의 난수를 생성하여 임계값과 비교한다. 이 때, 임계값이 생성한 난수보다 크면 해당 노드는 스스로 클러스터 헤드로 결정한다. 그리고 이웃 노드들에게 자신의 클러스터 헤드라는 사실을 통지한다. 이와 같은 과정을 통해 PRML 라우팅 프로토콜은 클러스터를 구성하고 있는 노드의 잔존 에너지와 연결도를 계산하며, 노드의 잔존 에너지만을 이용하여 클러스터를 구성하는 기존 기법보다 에너지 효율성을 높이는 효과를 얻는다.

### 3.3 PRML 라우팅 프로토콜

PRML 라우팅 프로토콜에서는 네트워크를 구성는 모든 노드가 인터/인트라 클러스터 라우팅을 위해서 그림

2와 그림 3 같은 패킷 헤더 구조를 갖는다. 그림 2의 비콘 패킷에 대한 헤더 구조에서 Type은 비콘 신호(0)와 데이터 패킷 신호(1)를 구분하는 필드이고, NID는 이웃 노드의 식별자 필드이다. Clus\_Flag는 단일 클러스터 네트워크나 클러스터 사용 유무를 나타내는 필드이며, PS는 NID가 나타내는 노드까지 데이터 전송에 필요한 신호 세기를 의미하는 필드이다. Hier\_Level 필드는 노드들의 서로 다른 계층 레벨을 의미한다. PRML 라우팅 프로토콜에서는 직접 노드 간 신호 세기의 측정이 불가능하기 때문에 PS에 노드간 거리를 나타내는 값을 사용하며 PS에 기록된 거리를 전파 모델에 적용한다. LNK 필드는 이웃 노드 탐색 과정을 통해 얻은 이웃 노드의 최대수이며 CHID 필드는 노드의 클러스터 헤더에 대한 식별자이다. HC 필드는 클러스터 헤더까지의 홉 수를 나타낸다. S\_ID 필드는 소스 주소에 대한 식별자이고, D\_ID 필드는 최종 목적지에 대한 식별자이다. 마지막으로, D\_HC 필드는 목적지까지의 홉 수를 나타낸다.

PRML 라우팅 프로토콜은 베이스 스테이션이 중앙 집중식 알고리즘을 사용하여 라우팅 정보를 계산한다. 그 이유는 몇몇 구성요소가 제한된 자원을 가지고 있고 하나 이상의 구성요소가 계산 부하를 처리하는 강력한 시스템이기 때문이다. 노드들의 위치 정보를 알고 있더라도 라운드에서 소비된 노드의 에너지 양을 알 수 있기 때문에 베이스 스테이션은 주어진 비용 모델을 사용하기 위해 노드들의 잔존 에너지 레벨을 평가한다. 몇몇 특정 라운드의 수는 베이스 스테이션을 통과한 후 죽은 노드들을 배제한 라우팅 정보를 재계산한다. 재계산 후 베이스 스테이션은 각 노드에게 그 노드의 요구된 정보를 보낸다. 이 과정을 통해 새로운 라우팅 정보를 가지는 시스템의 셋업 비용은 단지 각 노드의 수신 회로소자에서 동작되는 비용의 합과 같다.

Type	NID	Clus_Flag	PS	Hier_Level	LNK	CHID	HC	S_ID	D_ID	D_HC
------	-----	-----------	----	------------	-----	------	----	------	------	------

그림 2. 비콘 패킷에 대한 헤더 구조  
Figure 2. Head Structure for Beacon Packet

Type	NID	Clus_Flag	PS	Hier_Level	CHID	S_ID	D_ID	D_HC
------	-----	-----------	----	------------	------	------	------	------

그림 3. 데이터 통신에 대한 헤더 구조  
Figure 3. Head Structure for Data Communication

센서 노드  $S_{i+1}$ 은 클러스터 형성을 위해 센서 노드  $S_i$ 로부터 전달 받은 클러스터 형성 신호를 다음 과정을 통해 수신 가능 여부를 결정한다.

■ 단계 1 :  $\forall S_i \in N(S_i)$ 에 대한  $e(S_i)$ 와  $p(S_i)$ 의 정보를 수집한다. 여기서  $N(S_i)$ 는 센서 노드  $S_i$ 의 이웃 노드 셋,  $e(S_i)$ 는 센서 노드  $S_i$ 을 위한 이웃 노드의 수 그리고  $p(S_i)$ 는 센서 노드  $S_i$ 의 파워 레벨을 의미한다.

PRML 라우팅 프로토콜은 클러스터내의 모든 센서들이 센싱기간 동안 자신의 상태를 측정하여  $e(S_i)$ 와  $p(S_i)$  정보를 수집한다.

■ 단계 2 :  $\max E \leftarrow \max_{S_i \in N(S_i)} P(S_i)$

최대 잔존 에너지는  $\max E$  처럼 표현한다. 선택한 센서 노드  $N(S_i)$ 는 이웃 노드들의 수를 체크하고 이웃 노드 수가 가장 큰 노드에게 라우팅 한다.

■ 단계 3 :  $CandidateNode \leftarrow \{ S_k | p(S_k) \geq \max E - \Delta E, S_k \in N(S_i) \}$ ,  $\Delta E$ 는 사전 명시된 에너지 한도 값

수집된 정보를 기반으로  $CandidateNode \leftarrow \{ S_k | p(S_k) \geq \max E - \Delta E, S_k \in N(S_i) \}$ 처럼 센서들의 잔존 에너지에 대해서 센서 노드들의 가장 큰 잔존 에너지를 보유하고 있는 센서 노드를 선택한다. 잔존 에너지 레벨이 높은 노드들은 주기적으로 LREQ 패킷을 브로드캐스트한다. 노드들과 클러스터 사이의 균형을 만들기 위한 중요한 3가지 구성 요소로 노드의 잔존 에너지, 노드 사이의 거리, 클러스터 멤버의 수를 사용한다.

■ 단계 4 :  $e(S_i) \geq \max \{ e(S_k) | S_k \in CandidateNode \}$ 에 의한  $SelectedNode \leftarrow S_i$

이웃 노드의 수가 가장 많은 선택 노드  $S_i$ 는  $e(S_i) \geq \max \{ e(S_k) | S_k \in CandidateNode \}$ 에 의해 표현 가능하다. 이 라우팅 프로토콜은 각 센서 노드의 에너지 소비가 동일하다면 센서 네트워크의 라이프 타임

을 확장하고 낮은 통신 오버헤드를 유지하기 위한 역할을 한다.

PRML 라우팅 프로토콜의 인트라 클러스터 라우팅은 낮은 제어 오버헤드와 공유 장비의 인터페이스를 감소하기 위해서 클러스터와 노드의 다음 홉에서의 브로드캐스트 범위를 제약하기 위해서 인접 클러스터들의 에지 노드들이 라우트 쿼리 패킷을 수신할 때까지 모든 노드들에게 라우트 패킷 쿼리를 브로드캐스트한다. 인트라 클러스터 라우팅 알고리즘은 그림 4에서 나타내고 있다.

클러스터 사이의 관계는 클러스터 에지로부터 인접한 클러스터의 다음 홉 노드들이 클러스터 내에 포함되는 동안 지역 라우팅 테이블로부터 추출한다. 라우트가 요구될 때 인트라 클러스터 라우트 복구를 수행하는 것은 인트라 클러스터 라우팅을 유지하는 오버헤드를 감소한다. 인트라 클러스터 라우트가 발생할 때 소스 노드는 인접한 클러스터의 인트라 클러스터 라우팅 정보를 얻기 위해서 에지 노드들에게 유니캐스트 모드로 인트라 클러스터 RREQ를 전송한다.

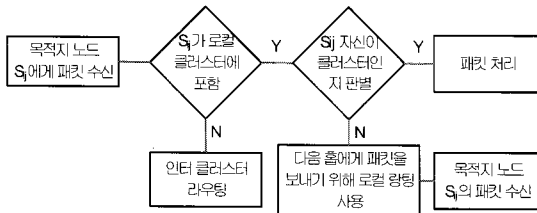


그림 4. 인트라 클러스터 라우팅 알고리즘  
Figure 4. Routing Algorithm of Intra Cluster

그림 5은 인트라 클러스터 라우팅 알고리즘의 동작 과정을 나타낸다. 그림 5의 PRML 기법에서는 인트라 클러스터 라우트의 요구가 발생할 때 소스 노드는 인접 클러스터의 인트라 클러스터 라우팅 정보를 얻기 위해 에지 노드들에게 유니캐스트 모드로 인트라 클러스터 RREQ 패킷을 전송한다. 이렇게 함으로써 인트라 클러스터 라우트를 생성한다.

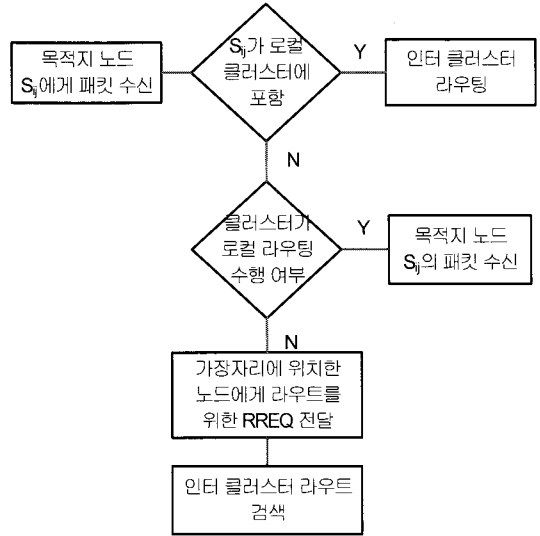


그림 5. 인트라 클러스터 라우팅 알고리즘  
Figure 5. Routing Algorithm of Inter Cluster

#### IV. 성능평가

이 장에서는 PRML 라우팅 프로토콜의 타당성 검증 을 위해서 NS-2을 이용하여 실험 모델을 구현하고 그 결과 분석을 통하여 PRML 라우팅 프로토콜의 최적화 방안을 제시한다. PRML 라우팅 프로토콜의 최적화 방안 목적은 센서 네트워크에서 PRML 기법이 현실 모델에서 효율적으로 동작하는 것이다.

##### 4.1 환경설정

PRML 라우팅 프로토콜의 실험을 위하여 표 1의 실험 시나리오를 통해 임의적으로 생성되는 모델을 사용한다[9]. 실험에서 설정된 센서 필드의 크기는  $100 m^2$  이며 센서 노드의 개수는 100개이다. 소스 노드는 초당 1개의 데이터 패킷을 싱크 노드에게 전송한다. 셀 사이즈는  $20 m^2$ 으로 설정하고 600초 동안 실험을 수행한다. 그리고 각 센서의 초기 에너지는 1 줄(Joule)의 에너지를 가지는 것으로 가정하고 버퍼의 크기는 100패킷의 크기를 가진다. 만약 노드의 에너지 레벨이 0줄이 되면 노드는 동작하지 않는다.

각 패킷은 패킷 전송동안 매 패킷 에너지를 계산하기 위해 갱신되는 에너지 필드를 가지며, 이때 패킷 드롭 확률은 0.01과 같다.

표 1. 성능 평가 환경변수  
Table 1. Parameter of Performance Analysis

환경 변수	값
네트워크 크기	(0,0)×(100,100)
임계거리	80m
데이터 병합 에너지	5 nJ/bit
ThreshUpper	$N/C+(N/C)/2$
ThreshLower	$N/C-(N/C)/2$
데이터 패킷 크기	100 bytes
쿼리 패킷 크기	25 bytes
헤더 패킷 크기	25 bytes
무선 회로부에너지( $E_{elec}$ )	50 nJ/bit
무선 증폭 에너지( $<\epsilon_{amp}$ )	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
무선 증폭 에너지( $=\epsilon_{amp}$ )	0.013pJ/bit/m <sup>2</sup>
노드의 초기에너지( $E_{mit}$ )	1 J
싱크 노드의 위치	(100,100), (50,100)

4.2 시뮬레이션 결과

그림 6은 임의로 선택된 15개의 라운드에서 클러스터 헤더에 의해 소비된 에너지 량의 변화를 나타내고 있다. PRML 라우팅 프로토콜은 네트워크에 배치된 전체 노드들의 균등있는 에너지 소비를 할 수 있도록 노드의 잔존 에너지와 연결도를 이용하기 때문에 다른 기법에 비해 클러스터 헤드 사이의 에너지 소비가 균형이 있고, LEACH-C는 소비된 에너지량의 변화가 높게 나타났다. PRML 라우팅 프로토콜의 변화는 클러스터의 안전성에 의해 꾸준히 유지된다.

그림 6에서 LEACH-C의 변화는 HEED보다 더 높게 나타나고 있다. 이러한 변화가 나타나게 된 주요 원인은 단일 노드만을 가지는 클러스터가 LEACH-C에 더 존재하여 클러스터가 비균형적으로 분포되기 때문이다. 이것은 LEACH-C가 핫스팟 문제로 인해 야기된 클러스터 헤드 사이의 에너지 소비 비균형 문제를 생각하고 있지 않기 때문이다.

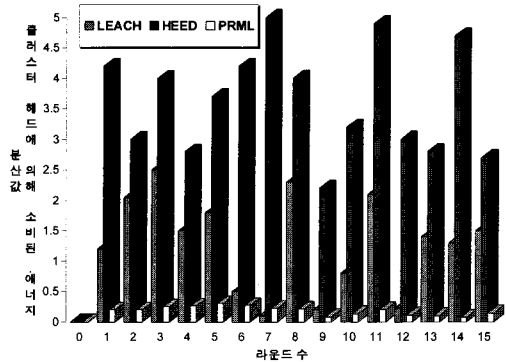


그림 6. 클러스터 헤더에 의해 소비된 에너지 량 변화

Figure 6. Consumed Energy Rate for Cluster Head

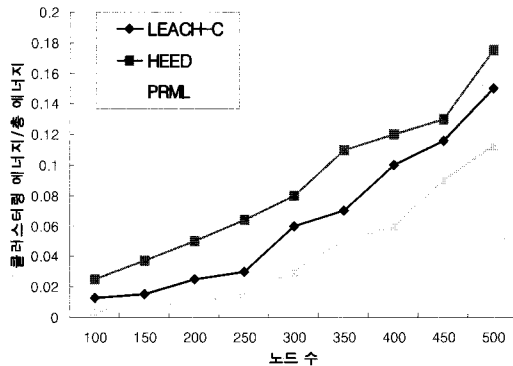


그림 7. 전체 에너지 소비량 대비 클러스터링에 소비된 에너지 비율

Figure 7. Total Energy Consumption vs. Clustering Energy Consumption Rate

그림 7은 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜에서 클러스터 구성에 따른 오버헤드를 평가하기 위해 노드에서 소비한 전체 에너지 대비 클러스터 구성에 소비한 에너지의 비율을 나타내고 있다. 노드 수가 100개일 경우 클러스터링에 의해 소비한 에너지의 비율은 0.02% 범위 이내로 비슷하지만 노드 수가 증가함에 따라 클러스터링에 의해 소비된 에너지 비율이 모두 증가하였다. 이것은 클러스터의 구성을 유지하지 못했기 때문에 클러스터링 에너지 비율이 증가되는 결과에서 나타나는 현상이다. 노드 수가 증가하더라도 클러스터링 알고리즘은 지속적으로 성능을 유지할 수 있어야 하며, 센서

네트워크의 노드 수는 수백 개에서 수십만 개까지 증가할 수 있으므로 네트워크의 범용성은 매우 중요한 평가 요소이다. 그림 7의 결과에서 PRML 라우팅 프로토콜은 노드 수가 증가할수록 다른 기법보다 오버헤드가 8% 낮았다.

그림 8은 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜에서 사용되는 노드들의 수에 따른 생존시간을 알아보기 위해 네트워크의 생존 시간 중 첫 번째 노드가 소멸되는 시간을 나타내고 있다. LEACH-C는 노드 수가 증가함에 따라 노드들의 네트워크 분포가 조밀하게 분포되어 있지 않아 노드들의 에너지 소비가 다른 기법에 비해 높아진다. 그 결과 확률적 클러스터의 구성 편차가 커지는 원인이 되어 노드들의 에너지 소비 불균형이 심화되며 LEACH-C는 HEED 기법과 PRML 기법에 비해 네트워크 생존 시간이 제일 낮게 나타나고 노드 수가 100에서 300 사이일 때 노드 생존 시간 변화가 HEED 기법과 PRML 기법에 비해 일정 유지되는 결과를 보이고 있다. 그림 8의 결과 네트워크의 노드 수를 500개로 구성하였을 경우 LEACH-C의 첫 번째 노드가 소멸하는 시간이 HEED나 PRML에 비해 최대 1.7배 차이가 나는 결과를 얻었다.

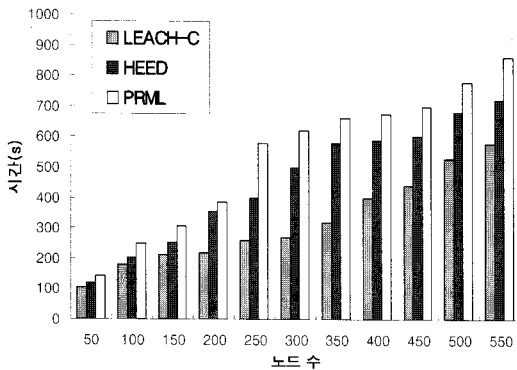


그림 8. 네트워크 생존시간 비교 (First Node Die: FND)  
Figure 8. Compare for Network Alive Time (First Node Die: FND)

그림 9은 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜의 네트워크 생존 시간을 알아보기 위해 네트워크의 생존 시간 중 마지막 노드가 소멸되는 시간을 나타내고 있다. 노드

수가 증가할수록 PRML 라우팅 프로토콜의 마지막 노드 생존시간이 다른 기법에 비해 평균 4% 더 마지막 노드가 생존하였다. 이 같은 결과는 PRML 라우팅 프로토콜이 연결도와 잔존 에너지를 사용하여 데이터를 멀티 홉 방식으로 전송하였기 때문에 전체 에너지 소비 측면에서 다른 기법보다 더 좋은 효율성을 얻었다.

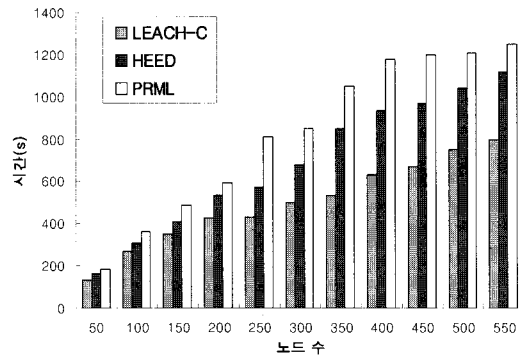


그림 9. 네트워크 생존시간 비교 (Last Node Die: LND)  
Figure 9. Compare for Network Alive Time (Last Node Die: LND)

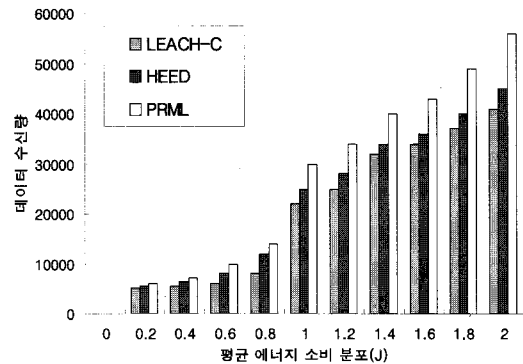


그림 10. 평균 에너지 소비 분포에 따른 베이스 스테이션의 데이터 수신량  
Figure 10. Received Data Rate of Base Station through Average Energy Consumption

그림 10은 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜의 평균 에너지 소비 분포에 따른 베이스 스테이션의 데이터 수신량을 나타내고 있다. PRML 기법은 LEACH와



LEACH-C 기법보다 에너지 단위당 가장 많은 데이터 메시지를 전달함을 명확하게 나타낸다. 이와 같은 결과는 PRML 라우팅 프로토콜이 소스 노드에서 베이스 스테이션까지 데이터를 전달함에 있어 중간 노드의 역할이 중요하게 작용하였기 때문이다. 특히, 클러스터 형성 이후에 베이스 스테이션은 클러스터간 홉-대-홉 통신을 통해 중간 노드가 최소 에너지를 가지고 베이스 스테이션까지 중복 데이터를 최소화하도록 전달함으로써 베이스 스테이션의 데이터 수신량을 증대하였다. 그림 10에서 데이터 전송 성공률은 (식 4)로 구할 수 있다.

$$\text{전송 성공률} = \frac{\text{데이터 수신량}}{\text{총 데이터 전송량}} \quad (\text{식 4})$$

(식 4)을 이용해서 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜의 평균 데이터 전송 성공률을 구하면 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜이 각각 92.7%, 95.1% 98.5%로 나타났다.

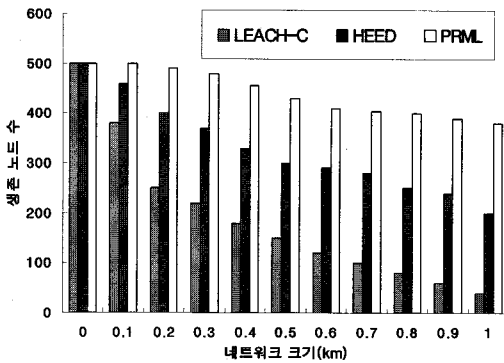


그림 11. 네트워크 범위에 따른 생존 노드의 수  
Figure 11. Number of Alive Node through Network Size

그림 11은 일정시간 동안 동작되는 LEACH-C, HEED, PRML 프로토콜들이 네트워크범위에 따라 네트워크에서 생존하는 노드수의 변화를 평가하고 있다. 그림 11의 결과에 의하면 PRML 라우팅 프로토콜은 대규모 네트워크 지역에 정보를 수집하는 무선 센서 응용에 효율성이 있다. 이 같은 이유는 센서 노드 500개를 1km<sup>2</sup>에 배치한 후 600초 동안 실험한 결과 생존 노드의 수가 403개

존재하여 PRML 라우팅 프로토콜이 전체 노드의 80%가 1km<sup>2</sup> 이내의 네트워크에서 생존하였다. 동일한 방법으로 LEACH-C와 HEED를 평가한 결과 LEACH-C는 12%로 평가되었으며, HEED는 26%로 평가되었다. 이러한 결과는 동작하지 않는 센서 노드의 수가 네트워크 범위가 넓어질수록 급격하게 떨어졌기 때문에 나타난 결과이다. 이러한 분석을 통해 PRML 라우팅 프로토콜은 네트워크 범위가 넓은 지역에서 좋은 성능을 제공함을 증명하고 있다.

## V. 결론

무선 센서 네트워크에서는 임의의 센서 노드의 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우에도 네트워크의 전체적인 동작에는 영향을 미치지 않는 장점이 있지만 무선 매체의 저속, 오류가 심한 전송 특성 및 제한된 전원 공급, 센서 노드의 임의 배치로 인한 교체 불가능 등의 문제점을 가진다. 이 논문에서는 계층적으로 센서 노드를 구성하고 있는 네트워크의 전체 생존시간을 연장하기 위한 방법으로 일정 비율로 노드들이 자발적으로 클러스터 헤드에 참여하여 센서 네트워크를 구성하고 있는 전체 노드들의 파워 소비를 감소시키는 최적 경로 검색 프로세스를 수행하는 PRML 기법을 제안하였다. 제안된 PRML 기법에서는 노드의 잉여 에너지와 연결도를 고려함으로써 클러스터 헤드의 부하 분산이 가능해졌으며, 노드 간 통신 횟수를 감소시킨다. 또한, 클러스터 헤드 노드의 수가 많아지면 클러스터 헤드 노드가 싱크 노드로 데이터를 전달하기 위해 멀티 홉 라우팅을 사용하였다. 시뮬레이션에서는 PRML 기법의 타당성을 검증하기 위해서 NS-2를 이용하여 현실 모델에 맞게 센서 네트워크를 구축하여 LEACH-C, HEED 기법과 함께 평가하였다. LEACH-C, HEED 기법들과 비교 분석 결과, PRML 기법은 전체 에너지 소비 측면에서 평균 8%, 클러스터 헤드의 에너지 소비 측면에서 평균 6.4%의 효율성을 얻었고, 네트워크 확장성에 따른 에너지 소비 분포는 LEACH-C, HEED 기법보다 7.5%의 효율성을 얻을 수 있었다. 향후 연구에서는 PRML 기법을 실제 환경에 적용하여 확장성을 고려한 에너지 소비 문제를 개선

하고 중간 노드의 보안 역할을 강화하여 데이터 전송 시 여러 보안 공격에 안전한 기법 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

[1] R. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. Peh, D. Rubenstein, "Energy-Efficient computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet," in Proceedings of ASPLOS, October 2002.

[2] N. Xu, S. Rangwala, K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, D. Estrin, "A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring," In Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 2004.

[3] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," Proc. of IEEE INFOCOM, pp. 1713-1723, 2003.

[4] B. Kawadia and P. R. Kumar, "Power Control and clustering in Ad Hoc Networks," Proc. of IEEE INFOCOM, pp. 459-465, 2003.

[5] T. Ohta, S. Inoue, and Y. Kakuda, "An Adaptive Multihop Clustering Scheme for Highly Mobile Ad Hoc Networks," Proc. of the Sixth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems(ISADS'03), pp. 293-300, 2003.

[6] F. Ye, et al., "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks," Proc. Tenth International Conference on Computer Communications and Networks, pp.304-309, 2001.

[7] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach," Proc. of IEEE INFOCOM, vol.1, pp.629-640, Mar. 2004.

[8] W. B. Heinzelman, "Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks," Ph. D. dissertation, Mass. Inst. Tech., Cambridge, 2000.

[9] W. B. Heinzelman et al., "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp.660-670, Oct. 2002.

저자소개



정윤수(Yoon-Su Jeong)

1998. 청주대학교 전자계산학과 학사  
2000. 충북대학교 대학원 전자계산학과 석사

2008. 충북대학교 대학원 전자계산학과 박사  
2008.3 ~ 현재 충북대 및 한남대 시간강사  
※관심분야: 유·무선통신보안, 암호이론, 정보보호, Network Security, 이동통신



김용태(Yong-Tae Kim)

1984. 한남대학교 계산통계학과 학사.  
1988. 숭실대학교 전자계산학과 석사.

1995. 충북대학교 전산학과 박사수료.  
2002. 12. ~2005.2 (주)가림정보기술이사  
2006. 3 ~ 현재 한남대학교 멀티미디어 학부 강의전담교수  
※관심분야: 멀티미디어, 모바일 웹서비스, Real-time Multimedia Communication



박 남규(Nam-kyu Park)

2000. 충북대학교 정보통신공학과 공학사  
2004. 충북대학교 산업대학원 전기전산공학과 공학석사

2007. 3 ~ 현재: 충북대학교 컴퓨터공학과 박사 수료  
※관심분야: 차세대통신망, 이동통신, IPTV, 암호학, 슈퍼컴퓨팅 및 병렬프로그래밍



박 길철(Gil-Cheol Park)

1983. 한남대학교 전자계산학과  
학사.

1986. 숭실대학교 전자계산학과  
석사.

1998. 성균관대학교 전자계산학과 박사.

2006. UTAS, Australia 교환교수

1998. 8. ~ 현재 한남대학교 멀티미디어학부 교수

2005. 2. 한국정보기술학회 이사 멀티미디어 분과  
위원장

※ 관심분야 : multimedia and mobile communication,  
network security