

# 스케일이 큰 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 클러스터링을 위한 제어 메시지 전송반경<sup>+</sup>

## (Control Message Transmission Radius for Energy-efficient Clustering in Large Scale Wireless Sensor Networks)

최혜경<sup>1)</sup>, 강상혁<sup>2)\*</sup>

(Huiqing Cui and Sang Hyuk Kang)

**요약** 본 논문은 큰 스케일의 무선센서네트워크(Wireless Sensor Networks: WSN)에서 클러스터링을 위한 제어 메시지의 최적화된 전송반경을 사용하여 전체 네트워크의 수명을 증가시키는 방법을 제안한다. 또한 스케일이 큰 네트워크에서 노드들의 제어 메시지의 최대 전송반경과 에너지 소모에 대하여 고찰한다. 이를 위하여 일반 노드가 소모하는 에너지와 클러스터 헤드가 소모하는 에너지의 함수 형태로 제어 메시지 전송반경을 분석하고, 이를 바탕으로 최적의 전송반경을 구하는 방법을 제시한다. 제안한 방법을 이용하여 싱글 홉 및 멀티 홉 등의 여러 WSN 라우팅 환경에서 시행한 시뮬레이션 성능 분석 결과를 바탕으로, 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법들에 비하여 전체 네트워크의 수명을 더욱 길게 운용하는 것을 보였다.

**핵심주제어:** 센서 네트워크, LEACH 알고리즘, 라우팅, 전송반경, 클러스터링

**Abstract** Wireless sensor networks consist of a large number of tiny sensor nodes which have limited battery life. In order to maximize the network life span, we propose an optimal transmission radius,  $R$ , for control messages. We analyze the transmission radius as a function of the energy consumption of cluster head nodes and the energy consumption of member nodes to find the optimal value of  $R$ . In simulations we apply our proposed optimization of transmission range to LEACH-based single-hop and multi-hop networks to show that our proposed scheme outperforms other existing routing algorithms in terms of network life span.

**Keywords:** Sensor networks, LEACH, Routing, Transmission radius, Clustering

### 1. 서론

차세대 사물인터넷(IoT)의 중심인 무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Networks; WSN)는 정보를 측정하려는 지역에 작은 센서 노드들을 배치하여 원하는 정보를 얻는다 (Choi and Kim, 2017; Lee et al., 2016). 각 노드는 배터리로 에너지를 공급받으므로 노드들의 에너지 사용량을 줄

\* Corresponding Author: shkang@uos.ac.kr

+ 이 논문은 2019년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

Manuscript received November 27, 2019 / revised December 20, 2019 / accepted January 06, 2020

1) 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과, 제1저자

2) 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과, 교신저자

여 전체 네트워크의 수명을 최대화하여야 한다. 각 노드가 소모하는 에너지는 센싱 과정에서 소모하는 에너지와 통신에너지가 있다. 라우팅은 이 중에 통신에너지에 큰 영향을 준다. 이를 위하여 많은 라우팅 기술이 연구되어왔다 (Park, 2014; Kim et al., 2014; Singh, 2017; Kim, 2017).

WSN의 라우팅 프로토콜 중에 에너지 효율성이 뛰어난 계층기반 (Hierarchical) 라우팅에서는 노드들이 클러스터링을 통하여 계층을 형성한다. 하나의 클러스터는 클러스터 헤드 노드와 그의 멤버 노드들로 이루어진다. 멤버 노드는 자신이 센싱한 데이터를 클러스터 헤드에게 전송하고 클러스터 헤드는 멤버 노드로부터 수신한 데이터를 병합하여 최종적으로 싱크 노드에게 전송한다. LEACH (Low energy adaptive clustering hierarchy) 프로토콜은 가장 많이 인용되는 효율적인 계층기반 라우팅 프로토콜 중의 하나이다 (Heinzelman, 2002).

LEACH에서 클러스터 헤드는 싱크 노드에게 싱글 홉 (Single-hop)으로 직접 데이터를 전송하는데, 이 때 싱크 노드와 멀리 떨어진 노드들은 상대적으로 더 많은 에너지를 소모하게 된다. 그러므로 스케일이 큰 네트워크에서 전송에너지를 줄이기 위하여 LEACH를 멀티 홉으로 개선한 프로토콜들이 다음과 같이 연구되었다. Zhang et al. (2013)은 클러스터 내에서 멤버 노드가 클러스터 헤드에게 멀티 홉으로 데이터를 전송하며, 클러스터 헤드는 여전히 싱글 홉으로 싱크 노드에게 전송한다. Kumar et al. (2015)는 싱크 노드가 각 노드의 위치를 존(Zone)으로 나누어서 중계 노드를 정하는 중앙제어방식으로서, 원래 LEACH의 장점인 분산 제어 방식의 장점을 갖지 못한다. Kodali et al. (2014)는 잔여 에너지와 싱크 노드까지의 거리를 고려하였는데, 릴레이 노드의 선택기준이 싱크 노드까지의 단순 거리 비교이므로, 다중경로 환경을 적절히 모델링 하지 못한다.

LEACH 및 그의 파생 알고리즘 100여 편에 대한 최근의 조사 문헌 (Singh et al., 2017)에 지적한 바와 같이, 큰 스케일의 센서 네트워크를 위한 멀티 홉 방식은 홉의 거리 (Hop range)가 알고리즘의 에너지 효율의 성패를 좌우한다. 그런데, LEACH에서 클러스터 헤드는 클러스터 헤드 선출을 위한 Advertisement (ADV) 메시지와 TDMA

스케줄을 전송할 때 전송반경을 전체 네트워크로 한다. 이러한 방법은 앞에서 인용한 기존의 참고문헌들을 포함한 많은 LEACH 기반의 후속 논문들에서 계속적으로 그대로 차용되었으며, 결과적으로 네트워크의 크기가 수백 미터 이상으로 커질수록 제어 메시지의 전송전력 소모가 거리의 4제곱의 형태로 커지는 상황에서 네트워크의 수명을 급격하게 단축시킨다. 즉, 멀티 홉 알고리즘에서 홉 거리 (Hop range)를 결정하는 1차적인 요소인 센서 노드의 전송반경 (Transmission radius) 또는 전파 범위 (Radio range)에 대한 연구를 찾아보기가 힘들다. 네트워크의 크기가 커지더라도 제어 메시지의 전송범위는 일정한 크기를 가지거나 최대치 이하를 가지도록 제한하는 것을 고려한 연구에 대한 필요성이 본 논문의 동기이다.

센서 네트워크의 운용에서 메시지의 전송의 종류는 제어 메시지 전송과 센싱 데이터 전송의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 본 논문에서는 센서 필드의 사이즈가 큰 경우 제어 메시지들의 전송반경,  $R$ 에 대한 최적값을 찾는 방법을 제안한다. 이로써 불필요한 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 늘릴 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방법은 LEACH 프로토콜의 클러스터 헤드 선출 단계에서 적용된다. LEACH 프로토콜에서 제어 메시지 전송이 필요한 헤드 선출 단계가 끝난 후에 이루어지는 센싱 데이터의 전송단계에서는 각 클러스터 헤드가 직접 싱크 노드에게 전송하는 싱글 홉 방법이 사용될 수도 있고, 클러스터 헤드 간에 멀티 홉 라우팅이 사용될 수도 있다. 만약 멀티 홉 라우팅이 사용된다면, 본 논문에서 제안하는 최적의  $R$  값은 자연스럽게 중계를 담당하는 클러스터 헤드 노드 간의 거리를 결정하게 된다.

## 2. 클러스터링과 에너지 모델링

기본적인 LEACH 프로토콜에서 센서 필드는 클러스터들로 나누어 지며 각 클러스터는 하나의 클러스터 헤드와 멤버 노드들로 이루어져 있다. 멤버 노드는 자신이 센싱한 데이터를 클러스터 헤드에게 전송하고 클러스터 헤드는 멤버 노드들로부터 수신한 데이터들을 병합하여 싱크

노드에게 싱글 홉으로 전송한다.

LEACH에서  $l$ [bit] 메시지를  $d$ [m]거리만큼 전송하는데 소모하는 에너지[Joule]는 식 (1)과 같다

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_e + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_e + l\epsilon_{mp}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기에서 임계값  $d_0$ 은 식(2)와 같다.

$$d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}} \quad (2)$$

식 (1)에서 회로 소모에너지  $E_e = 50$  [nJ/bit], 자유공간 감쇄율  $\epsilon_{fs} = 10$  [pJ/bit/m<sup>2</sup>], 멀티패스 감쇄율  $\epsilon_{mp} = 0.0013$  [pJ/bit/m<sup>4</sup>]은 참고문헌을 인용하였다(Heinzelman, 2002). 한편,  $l$ [bit] 메시지를 수신하는데 소모하는 에너지[Joule]는 식 (3)과 같다.

$$E_{Rx}(l) = lE_e \quad (3)$$

식 (1)에서 보듯이 전송 거리가 크면 데이터를 전송할 때 소모하는 에너지는 거리의 네제곱의 형태로 커지는 것으로 모델링한다.

LEACH에서 노드들 사이 주고받는 메시지는 클러스터 헤드가 자신이 클러스터 헤드가 되었다는 것을 선포하는 ADV (Advertisement) 메시지, 일반 센서 노드가 클러스터에 가입하기 위하여 클러스터 헤드에게 보내는 Join-request 메시지, 클러스터 헤드가 전송 스케줄을 자신의 멤버 노드들에게 방송하는 TDMA schedule 메시지 등과 같은 여러 종류의 제어 메시지들이 있고, 마지막으로 센싱 데이터를 전송하는 DATA 메시지가 있다.

일반 노드는 자신과 제일 가까운 클러스터 헤드를 선택하여 멤버로 가입하므로, 멤버 노드와 클러스터 헤드 사이의 거리는 상대적으로 가깝고 Join-request 메시지의 전송 거리도 짧다. 그런데 기존의 LEACH에서 클러스터 헤드의 ADV 메시지와 TDMA schedule 메시지, 그리고 일반 노드의 Joint-request 메시지에 대하여

전송반경을 전체 네트워크에 도달할 수 있도록 최대화하는 것은 불필요한 에너지를 소모하는 것이다. 그러므로 본 논문에서는 클러스터 헤드 선출시의 제어 메시지들, 즉 ADV 메시지, Join-request 메시지, TDMA schedule 메시지 등의 제어 메시지들의 전송반경 또는 전파범위를 최대  $R$ [m]로 설정한다고 가정한다.

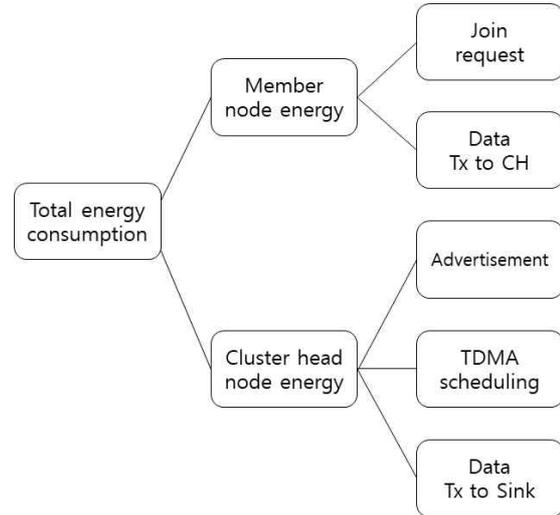


Fig. 1 Energy Consumption Structure

$R$ 이 너무 작으면 센서 노드들이 ADV 메시지를 듣지 못하고 클러스터에 가입하지 못하므로 클러스터링이 잘 이루어지지 않는다. 그러나  $R$ 이 너무 크면 LEACH와 같아지게 되며 ADV 메시지와 TDMA schedule을 전송하는데 소모하는 불필요한 에너지를 효율적으로 절약할 수 없다. 이와 같이  $R$ 의 크기에 따라 trade-off가 있으므로, 최적의  $R$ 값을 구하는 것이 중요하다.

LEACH 기반 라우팅 프로토콜에서 한 라운드 당 노드가 소모하는 에너지의 합은 Fig. 1과 같이 멤버 노드가 소모하는 에너지와 클러스터 헤드가 소모하는 에너지가 있다. 노드들은 데이터를 수신할 때보다 데이터를 전송할 때 훨씬 많은 에너지를 소모한다. 그래서 멤버 노드가 소모하는 에너지는 클러스터 헤드에게 Join-request를 송신하는데 소모하는 에너지와 클러스터 헤드에게 센싱한 데이터를 전송하는데 소모하는 에너지의 합으로 볼 수 있다. 한편 클러스터 헤드가 소모하는 에너지는 ADV 메시지를 방송하는데 소모하는

에너지, TDMA 스케줄 메시지를 방송하는데 소모하는 에너지와 병합한 센싱 데이터를 싱크 노드에게 전송하는데 소모하는 에너지의 합으로 볼 수 있다. 다음 절에서는  $R$ 의 변화에 따른 멤버 노드가 소모하는 에너지의 변화,  $R$ 의 변화에 따른 클러스터 헤드가 소모하는 에너지의 변화를 구하여 최종적으로  $R$ 과 전체 노드가 소모하는 에너지의 관계를 살펴본다.

### 3. 제어 메시지 전송반경( $R$ ) 최적화

에너지 소모를 모델링 하기 위하여 센서 필드를 반경  $L$ [m]인 원으로 모델링한다. 클러스터 기반 라우팅에서 센서 노드는 클러스터 헤드 노드와 일반 노드로 나뉘어진다. 매 라운드마다 일반 노드와 클러스터 노드는 확률적으로 바뀐다. 이때, 제어 메시지의 전송반경을  $R$ 이라 하면, 기존의 LEACH 기반 프로토콜들에서는  $R = 2L$ 이라는 최대값으로 정하여 항상 제어 메시지가 송신 노드의 위치에 상관없이 전체 네트워크에 도달하도록 하였다. 그러나 이는 큰 스케일의 네트워크에서 에너지 효율이 크게 떨어지며 네트워크의 수명에 치명적인 영향을 준다. 본 논문의 목표는  $R$ 를 ( $L/2 \leq R \leq 2L$ )의 범위 안에서 최적화하는 것이다.

#### 3.1 일반 노드가 클러스터에 가입하지 못할 확률

먼저 일반 노드가 소모하는 에너지를 분석한다. 일반 노드는 클러스터 헤드가 방송한 ADV를 수신하고 그중 제일 가까운 클러스터 헤드를 선택하여 멤버 노드로 가입한다. 그러나 전송반경  $R$ 이 매우 작은 경우 클러스터 헤드가  $R$ 만큼만 ADV를 방송하므로 일반 노드는 자신으로부터  $R$ 범위 내에 클러스터 헤드가 하나도 없어 아무런 ADV 메시지도 수신하지 못하고, 결국 클러스터에 가입하지 못할 수 있다. 이때 일반 노드는 데이터를 센싱한 후 데이터를 클러스터 헤드에게 전송하는 것이 아니라 직접 싱크 노드에게 전송한다. 싱크 노드에게 직접 데이터를 전송할 경우 훨씬 많은 에너지를 소모할 수 있

으므로 클러스터에 가입하지 못한 확률은 성능 분석에 중요한 요소이다.

노드의 주위의  $S$ [m<sup>2</sup>]의 면적을 가지는 공간에 클러스터 헤드가  $n$ 개일 확률은 센서 노드가 균일 랜덤 분포를 한다고 가정하여 식(4)와 같이 공간 포아송 과정 (Spatial Poisson process)을 이용하여 모델링 한다.

$$P_n = \frac{(\lambda S)^n}{n!} e^{-\lambda S} \quad (4)$$

여기에서  $\lambda$ 는 클러스터 헤드의 단위면적당 밀도인데, 식(5)와 같이 주어진다.

$$\lambda = \frac{k}{\pi L^2} \quad (5)$$

일반 노드가 클러스터에 가입하지 못하였다는 것은 그 일반 노드 주위의 거리  $R$ 이내에 클러스터 헤드가 하나도 없다는 것을 말하며  $S = \pi R^2$ 로 놓으면 이러한 확률은  $P_0$ 인 것이다. 이 경우에 노드는 스스로 멤버 노드가 없는 클러스터 헤드가 되며 자신이 센싱한 데이터를 직접 싱크 노드에게 전송한다.

이를 효과적으로 설명하기 위하여 Fig. 2와 같이  $O$ 를 중심으로 하고 반경이  $L$ 인 원모양의 센서 필드를 가정한다. 전송 메시지의 반경  $R$ 로 만들어

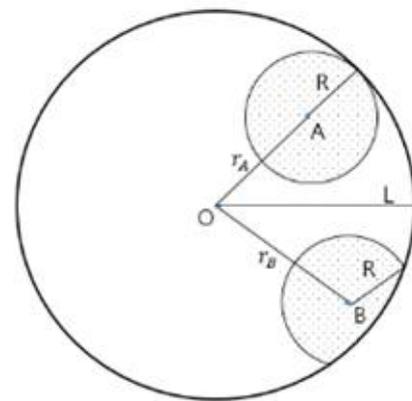


Fig. 2 Sensor Field and Control Message Transmission Radius,  $R$

지는 영역  $S$ 는 Fig. 2와 같이 센서 노드가 센서 필드에 있는 위치에 따라 크기가 달라진다. 센서 필드에 위치한 노드 A와 노드 B에 대하여, 노드 A로부터 중심까지의 거리  $r_A$ 은  $(L-R)$ 이고 노드 B에서 중심까지의 거리  $r_B$ 는  $(L-R)$ 보다 크다.

노드의 측정범위는 노드 자신으로부터  $R[m]$ 의 범위의 영역의 면적이다. 노드의 측정범위의 면적은 노드의 위치에 따라 2가지 경우로 나눌 수 있다. 즉 노드로부터 센서 필드의 중심까지의 거리를  $r$ 로 하면  $0 \leq r \leq L-R$ 과  $L-R < r < L$ 인 두 가지 경우이다. 각 경우에 따라 측정범위도  $S_A$ 과  $S_B$ 로 하며 식(6)으로 정리할 수 있다.

$$S(R) = \begin{cases} S_A(R), & 0 \leq r \leq L-R \\ S_B(R), & L-R < r < L \end{cases} \quad (6)$$

여기에서, 노드 A의 측정범위를  $S_A(R)$ 라고 할 때 노드 A를 중심으로 하고 반경이  $R[m]$ 인 원은 센서 필드 안에 들어오므로  $S_A(R)$ 는 식(7)과 같다.

$$S_A(R) = \pi R^2 \quad (7)$$

한편, 노드 B의 측정범위를  $S_B(R)$ 라고 하면, 노드 B를 중심으로 하고 반경이  $R[m]$ 인 원은 센서 필드 안에 다 있지 않고 일부만 센서 필드의 안에 있다. 그러므로  $S_B(R)$ 는 노드 B를 중심으로 한 반경이  $R$ 인 원의 내부 면적 중에 센서 필드 내의 부분만으로 계산된다. 이때,  $S_B(R)$ 는 식(8)과 같다.

$$S_B(R) = R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R^2+r_B^2-L^2}{2Rr_B}\right) - \frac{1}{2}R^2 \sin\left[2\cos^{-1}\left(\frac{R^2+r_B^2-L^2}{2Rr_B}\right)\right] + L^2 \cos^{-1}\left(\frac{L^2+r_B^2-R^2}{2Lr_B}\right) - \frac{1}{2}L^2 \sin\left[2\cos^{-1}\left(\frac{L^2+r_B^2-R^2}{2Lr_B}\right)\right] \quad (8)$$

노드가 센서 필드 위에 있는 위치는 극좌표로 표시하면 분석에 편리하며, 이때, 네트워크의 위치에 조건화하지 않은 임의의 일반 노드가 클러

스터에 가입하지 못할 전체 확률  $P_0$ 은 원점으로 부터의 거리 랜덤변수  $r$ 과 각도 랜덤변수  $\theta$ 의 함수의 기대값으로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_0 = \frac{\int e^{-\frac{k}{\pi L^2} S(R)} dS(R)}{\pi L^2} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{L-R} e^{-\frac{k}{\pi L^2} S_A(R)} r dr d\theta}{\pi L^2} + \frac{\int_0^{2\pi} \int_{L-R}^L e^{-\frac{k}{\pi L^2} S_B(R)} r dr d\theta}{\pi L^2} \quad (9)$$

위의 식 (9)에 의해  $R$ 과 일반 노드가 클러스터에 가입하지 못할 확률과의 관계를 다음과 같이 분석할 수 있다.  $R$ 이 충분히 크지 않을 때는 일반 노드 주위에 클러스터 헤드가 없을 확률이 높으므로 클러스터에 가입하지 못하는 확률도 높다. 한편,  $R$ 이 점점 커짐에 따라 일반 노드 주위에 클러스터 헤드가 있을 확률도 커지므로 클러스터에 가입하지 못한 확률은 줄어든다. 그러다가  $R$ 이 일정 수치까지 커지게 되면 클러스터에 가입하지 못한 확률은 0으로 되게 된다. 예를 들어, 반경  $R$ 로 이루어진 영역이 전체 네트워크를 포함한다면, 일반 노드가 클러스터에 가입하지 못할 확률은 0이다.

### 3.2 일반 노드가 소모하는 에너지와 R의 함수관계 분석

일반 노드가 소모하는 전체 에너지는 클러스터에 가입한 노드들이 소모하는 에너지와 클러스터에 가입하지 못한 노드들이 소모하는 에너지의 합이다. 일반 노드가 클러스터에 가입했을 경우 소모하는 에너지는 클러스터 헤드에게 Join-request 메시지와 Data를 전송하는데 소모하는 에너지이다. 일반 노드가 클러스터에 가입하지 못했을 경우 소모하는 에너지는 싱크 노드에게 직접 Data를 전송하는데 소모하는 에너지이다.

일반 노드가 클러스터 헤드에게 Join-request 메시지를 보낼 때에는 제어 메시지 최대 전송

거리  $R$ 에 해당하는 전력으로 보내며, 본 논문에서는 큰 스케일의 네트워크를 가정하므로  $R > d_0$ 이라고 가정할 수 있다. 그러므로 일반 노드가 Join-request 메시지를 보낼 때 소모하는 에너지는 식(10)과 같이 모델링 한다.

$$E_{join}(R) = (N-k)(1-P_0)l_{join}(E_c + \epsilon_{mp}R^4) \quad (10)$$

LEACH를 제안한 Heinzelman (2002)의 접근 방법을 확장하여, 반경이  $r_C$ 인 클러스터  $k$ 개의 면적을 합하면  $k\pi r_C^2 = \pi L^2$ 와 같이 전체 면적이 되므로, 이를 이용하여 클러스터의 평균 반경  $r_C$ 을 식(11)과 같이 모델링 한다.

$$r_C = \frac{L}{\sqrt{k}} \quad (11)$$

만약  $r_C < d_0$ 로 작다면 자유공간 감쇄율  $\epsilon_{fs}$ 만 사용하면 되겠지만,  $L$ 이 커서  $r_C > d_0$ 가 된다면 일반 노드들 중에서는 자유공간 감쇄율  $\epsilon_{fs}$ 과 멀티패스 감쇄율  $\epsilon_{mp}$ 을 적용받는 노드들이 혼재해 있을 것이다. 이를 고려하여 일반 노드가 클러스터 헤드 노드에게 센싱 데이터를 전송할 때 소모하는 에너지를 식(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$E_{dCH}(R) = (N-k)(1-P_0)l_d(E_c + \epsilon_{fs}\overline{d_{CH}^2} + \epsilon_{mp}\overline{d_{CH}^4}) \quad (12)$$

여기에서  $l_d$ 는 센싱 데이터의 크기이며  $d_{CH}$ 는 일반 노드와 클러스터 헤드 사이의 거리를 나타내는 랜덤변수이며, 그 제곱 및 네 제곱의 기댓값  $\overline{d_{CH}^2}$ ,  $\overline{d_{CH}^4}$ 은 각각 식(13)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \overline{d_{CH}^2} &= \frac{2\pi}{\pi r_C^2} \int_0^{\min(r_C, d_0)} r^3 dr = \min\left(\frac{L^2}{2k}, \frac{d_0^2}{2}\right) \\ \overline{d_{CH}^4} &= \frac{2\pi}{\pi r_C^2} \int_{d_0}^{\max(r_C, d_0)} r^5 dr = \max\left(\frac{L^6 - k^3 d_0^6}{3k^2 L^2}, 0\right) \end{aligned} \quad (13)$$

한편, 큰 스케일의 네트워크에서 싱크 노드 또는 Base Station (BS) 노드까지의 거리는  $d_0$ 를 넘는 부분이 우세하다고 가정하고 일반 노드가 직접 싱크 노드에게 센싱 데이터를 전송할 때 소모하는 에너지는 식(14)와 같이 모델링 한다.

$$E_{dBS}(R) = (N-k)(1-P_0)l_d(E_c + \epsilon_{mp}\overline{d_{BS}^4}) \quad (14)$$

여기에서 싱크 노드까지의 거리의 네 제곱의 기댓값  $\overline{d_{BS}^4}$ 를 구하기 위하여 센서 필드의 중앙을 원점으로 한 좌표에서 싱크 노드의 좌표를  $(G, 0)$ 이라고 할 때 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \overline{d_{BS}^4} &= \frac{1}{\pi L^2} \int_{G-L}^{G+L} 2r^5 \cos^{-1}\left(\frac{r^2 + G^2 - L^2}{2rG}\right) dr \\ &= G^4 + 2G^2L^2 + \frac{L^4}{3} \end{aligned} \quad (15)$$

최종적으로 한 라운드당 전체 일반 노드가 소모하는 에너지  $E_{member}(R)$ 은  $R$ 의 함수로서 식(16)과 같이 주어진다.

$$E_{member}(R) = E_{join}(R) + E_{dCH}(R) + E_{dBS}(R) \quad (16)$$

### 3.3 클러스터 헤드가 소모하는 에너지와 R의 함수관계분석

한 라운드에서 클러스터 헤드가 소모하는 에너지는 클러스터 헤드가 ADV 메시지를 통신 거리  $R$ 만큼 전송하는데 소모하는 에너지  $E_{adv}(R)$ , TDMA Schedule을 통신 거리  $R$ 만큼 전송하는데 소모하는 에너지  $E_{TDMA}(R)$ , 일반 노드로부터 받은 센싱 데이터를 싱크 노드까지 전송하는데 소모하는 에너지들의 합이다.

본 논문에서는 큰 스케일의 네트워크 환경을 고려하므로 ADV 메시지와 TDMA 메시지 등의 제어 메시지를 전송할 때 전송 거리  $R$ 은  $L/2 \leq R \leq 2L$ 의 범위에서 최적화하는 것이 목표이다. 이때 네트워크의 반경  $L$ 은 최소 200[m]

이상을 고려하므로, 자연히  $R > d_0$ 이며 멀티패스 감쇄율  $\epsilon_{mp}$ 을 적용받는다. 그러므로  $k$ 개의 클러스터 헤드들이 ADV 메시지와 TDMA schedule 메시지를 전송하는데 소모하는 에너지는 각각 식(17), (18)과 같다.

$$E_{adv}(R) = kl_{adv}(E_e + \epsilon_{mp}R^4) \quad (17)$$

$$E_{TDMA}(R) = kl_{TDMA}(E_e + \epsilon_{mp}R^4) \quad (18)$$

여기에서  $l_{adv}$ 와  $l_{TDMA}$ 는 각각 ADV 메시지와 TDMA schedule 메시지의 크기이다. 그리고 클러스터 헤드가 싱크 노드에게 센싱 데이터를 전송하는데 소모하는 에너지는 식(19)와 같다.

$$E_{dCHBS}(R) = kl_d(E_e + \epsilon_{mp}\overline{d_{BS}^4}) \quad (19)$$

여기에서  $\overline{d_{BS}^4}$ 는 식 (15)에서 이미 계산되었다.

결과적으로 하나의 라운드 동안에 클러스터 헤드 노드들이 소모하는 총 에너지는 식(20)과 같이 주어진다.

$$E_{CH}(R) = E_{adv}(R) + E_{TDMA}(R) + E_{dCHBS}(R) \quad (20)$$

### 3.4 전체노드가 소모하는 에너지의 분석

위에서 설명한 일반 노드와 클러스터 헤드의 각각의 에너지 소모의 함수 형태로  $R$ 를 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저, 전체 노드가 한 개 라운드에서 소모하는 에너지는 전체 클러스터 헤드가 소모하는 에너지와 전체 일반 노드가 소모하는 에너지의 합과 같으며 식(21)로 표현된다.

$$E(R) = E_{member}(R) + E_{CH}(R) \quad (21)$$

식 (21)로 부터 센서 필드에서 전체 노드가 소모하는 에너지와 전송반경  $R$ 사이의 관계를 구할 수 있으며 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 센서 필드는 반경  $L=200[m]$ 의 원이고 싱

크 노드의 위치는 원의 오른쪽 끝  $(200, 0)$ 에 위치한다고 가정하며, 전체 노드의 개수는  $N = 400$ 이고 클러스터 헤드의 개수는  $k = 20$ 이다.

Fig. 3에서 보면 처음  $R$ 이 작을 때는 소모하는 에너지가 많은데 이는  $R$ 이 작을 때 일반 노드들이 클러스터에 가입하지 못하고 직접 싱크 노드한테 데이터를 전송하므로 많은 에너지를 소모하기 때문이다. 그러다가  $R$ 이 커지면 클러스터에 가입한 일반 노드가 점점 많아지고 어느 순간부터는 클러스터에 가입하지 못한 일반 노드가 없게 된다. 일반 노드는  $R$ 이 커짐에 따라 소모하는 에너지가 작아지다가  $R$ 이 일정치로 커지면 변하지 않게 된다. 그러나 클러스터 헤드의 경우는  $R$ 이 커짐에 따라 ADV와 TDMA 메시지를 전송하는 범위가 넓어지고 따라서 소모하는 에너지가 많게 된다. 즉 클러스터 헤드는  $R$ 이 커짐에 따라 소모하는 에너지가 커진다. 일반 노드와 클러스터 헤드가 받는 영향을 더하면 결과적으로  $R$ 과 노드들이 소모하는 에너지는 Fig. 3의 형태로 나타난다.

### 3.5 R값에 대한 최적화

앞의 절에서 최종적으로 구한 식 (21)의 에너지 함수  $E(R)$ 는 매우 복잡한 형태이므로 미분을 사

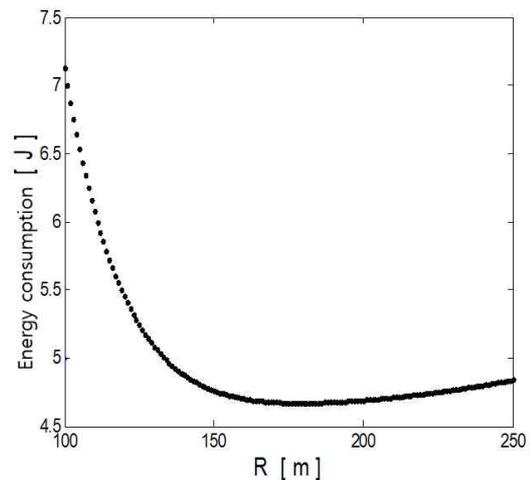


Fig. 3 Total Energy Consumption E(R) in a Round as a Function of R

용하여 최적의  $R$ 값을 구하는 것은 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 미분을 사용하지 않은 수치 해석적인 최적화 방법들 중에서 Nelder-Mead Simplex 최적화 방법을 적용하여 최적의  $R$ 값을 식(22)와 같이 구하였다 (Gao and Han, 2012; Lagarias et al., 1998).

$$R_{opt} = \arg \min_R E(R) \quad (22)$$

Nelder-Mead Simplex 알고리즘을 적용하기 위하여서는 초기 꼭지값 세 개,  $v_1, v_2, v_3$ 을 정하여야 하는데, 본 논문에서는 여러 시뮬레이션의 경험으로 식(23)과 같이 초기값을 rule-of-thumb으로서 제안한다.

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{3L}{2} \\ v_2 &= \frac{3L}{2} + \Delta_R \\ v_3 &= \frac{3L}{2} - \Delta_R \end{aligned} \quad (23)$$

여기에서  $\Delta_R$ 은  $3L/2$  값의 5%에 해당하는 값이다.

이러한 최적화 계산은 센서 노드들이 수행하는 것이 아니다. 네트워크를 디자인 하는 초기에 네트워크 설계자가 충분한 컴퓨팅 능력으로 계산하는 것이다. 그리고 에너지 소모의 제약을 받지 않은 싱크 노드가 최적의  $R$ 값을 전체 센서 노드들에게 전송한다. 본 논문에서는 성능평가 절에서 MATLAB을 이용하여 Nelder-Mead 최적화 알고리즘을 수행하였는데, 3.1GHz로 동작하는 CPU를 가진 컴퓨터에서 50ms 안에 알고리즘의 수렴값이 나오는 수준으로 빠르게 계산되므로 충분히 실용적이라 할 수 있다. Fig. 3의 환경에서 Nelder-Mead Simplex 알고리즘으로 구해진 최적의  $R$ 값은  $R_{opt} = 178[m]$ 이다.

#### 4. 성능평가

본 논문에서 제안하는 방법의 성능을 평가하기 위하여 C Programming을 이용하여 순수한

LEACH, 멀티 홉을 적용한 EEM-LEACH (Singh et al., 2017), LEACH-CHT (Choi and Kang, 2014) 세 가지 방법 각각에 대하여 본 논문에서 제안하는 제어 메시지 전송반경 최적화가 얼마나 성능의 향상을 가져오는지 비교하였다.

클러스터 헤드가 데이터를 병합하는데 사용되는 에너지는  $5[nJ/bit/signal]$ 이고 노드들의 초기 에너지 값은  $4[J]$ 로 설정하였다.

먼저 Fig. 4와 같이 시뮬레이션으로 통신 거리  $R$ 과 노드들의 평균수명과의 관계를 그려보았다. 그래프에서 가로축은 통신 거리  $R$ 이고 세로축은 노드들의 평균 수명이며 그래프는 100번의 평균값이다. 노드들의 평균수명은 통신 거리  $R$ 의 변화에 따라 점점 커지다 다시 또 작아진다. 최적의 통신 거리  $R$ 은 Nelder-Mead 최적화 알고리즘에 의해 구한 최적의 통신 거리  $178[m]$ 와 거의 비슷하게 나오며 그 값은  $175[m]$ 이다. 이 값은 본 논문에서 가정한 여러 가지 통신환경 변수들을 적용하였을 때의 값이므로, 실제 센서 네트워크에서는 현장 상황에 맞는 변수들을 적용하여 구하여야 한다.  $R$ 에 영향을 줄 수 있는 통신환경 변수들은 네트워크의 크기, 에너지 소모 모델, 그리고 라우팅 프로토콜상에서 전달되는 제어 메시지들의 크기 등 다양하다.

본 논문에서는 식(22)에 의해 구해진 최적의 통신 거리  $175[m]$ 를 클러스터 헤드들의 통신 범

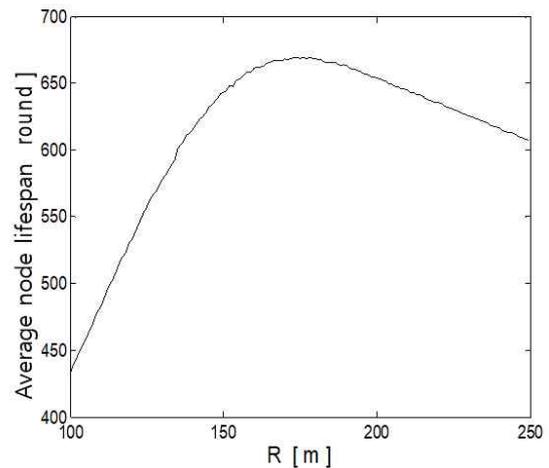


Fig. 4 Transmission Radius  $R$  versus Average Node Lifespan

위로 정한다. Fig. 5는 원래의 LEACH 방법과 본 논문이 제안한 제어 메시지 전송반경을 LEACH에 대하여  $R = 175[m]$ 를 이용한 전송반경 최적화 후 100회 시뮬레이션의 평균을 취한 결과인 LEACH(R)을 그래프로 나타내었다. 그림에서 가로축은 라운드이고 세로축은 살아 있는 노드의 개수이다. Fig. 5에서 LEACH에 본 논문에서 제안하는 방법을 적용한 결과 노드들의 수명이 크게 연장된 것을 볼 수 있다.

한편, 센서 필드가 큰 경우 LEACH를 멀티 홉으로 확장한 방법들이 많이 연구되었다. 그 중 두 가지 멀티 홉 기반 라우팅 방법인 LEACH-CHT (Choi and Kang, 2014)와 EEM-LEACH (Singh et al., 2017)에 대하여 전송반경 최적화에 따른 성능 향상을 Fig. 6에 비교하였다. 본 논문의 최적화를 적용한 결과는 각각 LEACH-CHT(R)과 EEM-LEACH(R)이라고 표시된 그래프이다. 그 결과 두 멀티 홉 프로토콜 모두 전송반경 최적화를 한 경우가 처음 죽는 노드가 더 늦게 나타나고 따라서 네트워크의 수명도 50% 이상 더 길어져 멀티 홉 LEACH에 대하여 본 논문의 효율성이 아주 높다는 것을 보여주었다.

본 논문에서는 클러스터의 평균 개수  $k$ 가 정해졌다는 가정하에 제어 메시지의 전송범위  $R$ 에 대한 최적화 방법에 대하여 연구하였다. 그러나 클러스터의 개수  $k$ 도 최적화에 의하여 결정되어야 하는 시스템 변수이며 따라서 최적의 전송범위  $R$ 에 영향을 미친다. 본 연구의 후속연구에서는 본 논문의 결과를 확장하여 에너지 소모를 위한  $(k, R)$ 의 결합최적화 (Joint Optimization)에 관하여 연구한다.

### 5. 결론

LEACH 프로토콜은 클러스터 구성을 통하여 에너지 사용을 효율적으로 하였으나 센서 필드가 큰 경우에는 클러스터 헤드가 ADV메시지와 TDMA 메시지를 전송하는데 불필요한 에너지를 많이 소모하게 된다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 노드들의 제어 메시지 통신 범위를 기존의 방식처럼 전체 네트워크가 아닌 일정

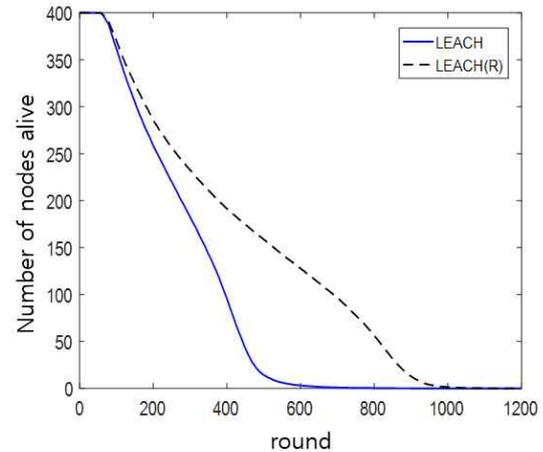


Fig. 5 Network Lifetime Comparison Between LEACH with and without Optimized  $R$

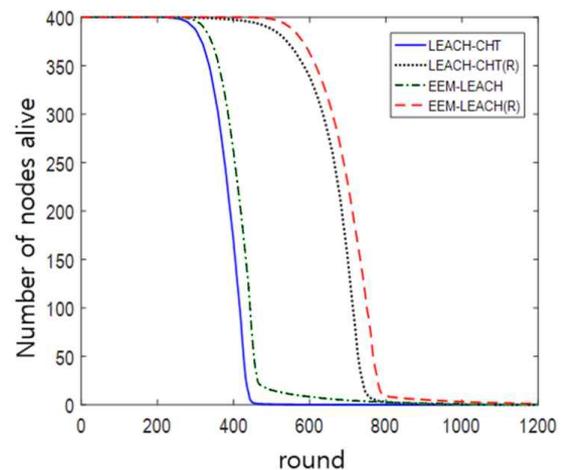


Fig. 6 Network Lifetime Improvement for Multi-hop Protocols

거리  $R[m]$ 로 제한하였다.  $R$ 과 일반 노드가 소모하는 에너지의 관계,  $R$ 과 클러스터 헤드가 소모하는 에너지의 관계를 분석하여 노드들의 전체 에너지 소모를 분석하고 이에 관한 최적화 포인트가 있음을 분석결과와 시뮬레이션을 통하여 보였다. 이 최적의  $R$ 값을 적용하였을 때, 기존의 LEACH 방법과 이들의 멀티 홉 변형 방법들에 대입한 결과 모두 네트워크의 수명이 향상되었다.

## References

- Choi, H. and Kang, S. H. (2014). A Method for Constructing Multi-hop Routing Tree among Cluster Heads in Wireless Sensor Networks, *Korea Information and Communications Society*, 39B(11), 763-770.
- Choi, Y. H. and Kim, Y. R. (2017). Research Regard to Necessity of Smart Water Management Based on IoT Technology, *Journal of the Korea Industrial Systems Research*, 22(4), 11-18. <https://dx.doi.org/10.9723/jksis.2017.22.4.011>
- Gao, F. and Han, L. (2012). Implementing the Nelder-Mead Simplex Algorithm with Adaptive Parameters, *Computational Optimization and Applications*, 51(1), 259-277.
- Heinzelman, W. (2002). An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Micro Sensor Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660-670.
- Kim, H. (2017). Dual Mode-AODV for the Hybrid Wireless Mech Network, *Journal of the Korea Industrial Systems Research*, 22(1), 1-9. <https://dx.doi.org/10.9723/jksis.2017.22.1.001>
- Kim, S., Kim, C., Cho, H., Yim, Y. and Kim, S. (2014). Continuous Moving Object Tracking using Query Relaying in Tree-based Sensor Networks, *Korea Information and Communications Society*, 39B(5), 271-280.
- Kodali, R. K. and Aravapalli, N. K. (2014). Multi-level LEACH Protocol Model using NS-3, *2014 IEEE International Advance Computing Conference*, Feb. 21-22, Gurgaon, India, pp. 132-137.
- Kumar, P., Singh, J. P., Kumar, D., and Singh, M. P. (2015). Energy Efficient Multi-Hop Routing based on Improved LEACH-CE for Wireless Sensor Networks, *Tencon 2015-IEEE Region 10 Conference*, Nov. 1-4, Macao, China, pp. 1-6.
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., and Wright, P. E. (1998). Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal on Optimization*, 9, 112-147.
- Lee, S. H., Kim, J.-Y., and Kim, S.-Y. (2016). Implementation of Indoor Environment Monitoring and Automatic Control System based on Internet of Things, *Journal of the Korea Industrial Systems Research*, 21(6), 71-80. <https://dx.doi.org/10.9723/jksis.2016.21.6.071>
- Park, W. (2014). Fast Link-setup Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks, *Korea Information and Communications Society*, 39C(3), 247-254.
- Singh, S. K., Kumar, P., Singh, J. P. (2017). A Survey on Successors of LEACH Protocol, *IEEE Access*, 5, 4298-4328.
- Zhang, L., Wang, D., and Sun, Y. (2013). Research on Cluster-based Routing Protocol with Multi-Hop, *Third International Conference on Instrument, Measurement, Computer, Communication and Control*, Sept. 21-23, Shenyang, China, pp. 1578-1581.



**최혜경 (Huiqing Cui)**

- 정회원
- 중국연변대학교 전자전기컴퓨터공학과 공학사
- 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 공학석사
- (현재) 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
- 관심분야: 무선통신, 센서 네트워크



**강상혁 (Sang Hyuk Kang)**

- 정회원
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
- (현재) 서울시립대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 정교수
- 관심분야: 데이터 네트워크, 무선통신, 통신방송 융합 네트워크