

# 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 최적 클러스터 크기

박병창<sup>o</sup> 이성렬 송유경 김중권  
 서울대학교 전기·컴퓨터공학부  
 {bcpark<sup>o</sup>, srlee, songyk, ckim}@poppeye.snu.ac.kr

## Energy-Efficient Optimal Clustering Size for Wireless Sensor Networks

Byoungchang Park<sup>o</sup>, Sungryoul Lee, Yukyoung Song, Chongkwon Kim  
 School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University

### 요 약

무선 센서 네트워크는 센서들을 무선으로 연결하여 데이터 교환을 통해 다양한 환경에서 정보를 수집할 수 있도록 하는 유용한 도구이다. 센서노드 간의 통신은 센서노드의 제한된 에너지를 효율적으로 이용하도록 만들어져야만 한다. 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅 기법은 클러스터 내의 노드들은 클러스터헤드와만 통신을 하게하고 클러스터헤드가 한꺼번에 싱크에게 통합된 정보를 보내게 하여 에너지를 절약하는 기법이다. 본 연구에서는 이러한 클러스터링 기반의 라우팅에서 에너지 효율을 높이기 위해 싱크와 클러스터헤드 사이의 거리에 따른 최적 클러스터 크기를 계산하고, 원형의 전체 토폴로지에서 계산된 값과 일치함을 확인해 보았다.

### 1. 서 론

최근 무선통신, 센서기술의 발달로 무선 네트워크를 통하여 연결될 수 있는 소형, 저가, 저전력의 센서 노드들이 개발되어 왔다. 이러한 센서노드들은 주위정보를 감지하는 센싱 부분, 센싱 정보를 처리하는 정보처리 부분, 주변 노드와의 통신을 위한 통신 부분으로 구성된다. 매우 많은 수의 센서 노드들은 관측하고자 하는 현상의 내부나 인접한 지역에 조밀하게 배치되어 무선 센서 네트워크를 형성하여 건강, 군사, 홈네트워크 등의 다양한 응용에 적용될 수 있다.[1]

무선 센서 네트워크는 센서들이 배치된 센서필드(Sensor-field)와 외부 망을 연결하는 싱크(Sink)로 구성된다. 사용자나 응용 프로그램은 싱크를 통해서 센서필드에 질의(Query)를 전달하거나 센서 필드에서 수집된 데이터를 전달 받을 수 있다.

센서 네트워크에서는 제한된 배터리 수명, 센서 노드의 임의 배치로 인한 교체 불가능 등의 문제점을 가지므로 에너지 효율적으로 디자인하는 것이 가장 큰 문제이다.

이러한 에너지 효율적 기법 중에 최근 부각되고 있는 것이 클러스터링(Clustering)에 기반한 방법이다. 클러스터(Cluster)를 형성하여 데이터를 통합한 후 한번에 전송해서 에너지를 효율적으로 사용하는 기법이다. 센서필드를 클러스터라는 작은 영역들로 나누고, 각 클러스터에는 클러스터헤드(Cluster Head, CH)가 존재하여 클러스터 멤버(Cluster Member, CM)로부터 데이터를 수집하고 이를 모아서 싱크로 전달하거나, 상위 계층 클러스터헤드로 전달하는 역할을 한다.

무선 센서 네트워크에서는 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달이 많기 때문에 에너지 낭비를 줄이기 위한 데이터 모음(data aggregation)이 필요하다. 이러한 특성을 고려할 때 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅 기법은 많은 장점을 가진다. 지역적 클러스터를 형성함으로써 인접한 지역에서 발생한 사건에 대한 유사한 정보를 클러스터헤드로 전송하고 클러스터헤드가 데이터 모음을 수행하여 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 하며, 클러스터헤드를 통한 질의(Query)와 데이터 전달로 데이터의 비효율적인 플러딩(Flooding)을 막을 수 있다.

본 연구에서는 클러스터링에서 더 나은 에너지 효율을 보장하

기 위해, 싱크부터 클러스터헤드까지의 거리에 따른 클러스터 크기를 최적화해 보았다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구에 대해 살펴보고, 3절에서는 최적 클러스터 크기를 계산을 통해 구해보고, 원형 전체토폴로지를 가정해 앞에서 구한 결과값을 확인해 보았다. 마지막 4장에서는 결론을 맺도록 하겠다.

### 2. 관련 연구

센서 네트워크의 특성 때문에 다양한 클러스터링 알고리즘이 제안되었다. 이러한 클러스터링 알고리즘은 일정한 수의 클러스터를 구성하고 에너지 소모를 분산시켜 네트워크의 수명을 연장시키는 것을 목표로 하고 있다.

LEACH[2]는 클러스터를 형성하는 설정 단계(Set-Up Phase)와 센싱정보를 전송하는 전송 단계(Steady-State phase)로 구성되는 라운드가 반복된다. 매 라운드마다 클러스터헤드를 변경함으로써 에너지 소모를 분산시킨다. 전송 단계에서는 TDMA로 전송을 하고 자신의 주기가 아닌 노드들은 그 동안 sleep을 하여 에너지 소모를 줄인다. 하지만 클러스터헤드 선정 시 확률값에만 의존하기 때문에 적절한 클러스터헤드가 선정되지 못할 수 있는 문제가 있고, 처음 시작 시 동일한 에너지를 가진다고 가정하고 있어 그 응용성이 떨어진다.

HEED[3]은 LEACH를 기본으로 하면서 LEACH를 개선하여 나온 방법이다. HEED 역시 설정 단계와 전송 단계로 구성된 라운드를 반복해서 에너지 소모를 분산시킨다. 하지만 클러스터헤드를 선정함에 있어서, 노드의 잔여 에너지(Residual Energy)값을 일차적 기준으로 삼고, 두 번째 기준으로 Intra-Cluster Communication Cost를 고려하여 최종 클러스터헤드를 선정한다. 여기서 Intra-Cluster Communication Cost는 클러스터멤버로부터 클러스터헤드까지 데이터를 한번 전송하는데 드는 총 에너지를 뜻한다. 남은 에너지가 많은 노드들 중에서도 communication cost가 가장 작은 노드를 클러스터헤드로 선정하게 된다. 또한 제안한 알고리즘을 통해 클러스터헤드의 균일한 분포를 어느 정도 보장하고, 알고리즘이 끝나면 모든 노드가 클러스터에 참여하는 것도 보장해 준다. HEED는 지역적으로 에너지 소모가 가장 작은 클러스터를 형성하여 에너지 효율적인 클러스터링 방법을 지원하는 알고리즘을 제안하

고 있지만, 전체 네트워크의 에너지 소모나 라이프 타임(lifetime)등의 정확한 기준값을 제시하고 있지는 않다.

[4]에서는 클러스터링을 하고 한번 데이터를 전송하는데 소모되는 에너지의 합을 계산하여 데이터 전송을 위해 소모되는 에너지를 최소화시키는 매개 변수를 결정한다. 클러스터헤드가 될 확률값을 계산하여 최적의 클러스터 개수를 정하였고, 클러스터 크기를 클러스터헤드에서부터의 홉 수를 통해 정해주었다. 하지만 클러스터헤드가 될 확률값과 클러스터의 크기가 모든 노드마다 동일하다고 가정하기 때문에 최적의 에너지 효율을 고려하지는 못하였다.

본 논문에서는 네트워크에서 소비되는 에너지를 최소화하는 클러스터 크기를 싱크에서 클러스터헤드까지의 거리를 바탕으로 구하고자 한다.

### 3. 싱크에서 클러스터헤드까지의 거리에 따른 최적 클러스터의 크기

#### 3.1. 가정

- a) 모든 센서는 2차원 상에 intensity가  $\lambda$ 인 homogeneous spatial Poisson process를 따라 분포한다.
- b) 모든 센서는 같은 파워레벨로 전송을 하므로 동일한 전송반경  $r$ 을 갖는다.
- c) 라우팅은 잘 되고 있다. 전송의 목적이 정해지면 라우팅이 잘 이뤄져 원하는 노드로 데이터를 전송한다.
- d) 한 센서와 그 클러스터헤드 사이의 거리가  $d$ 이면 홉 수는  $\lceil d/r \rceil$ 과 같다.
- e) 1 unit의 데이터를 전송하는 데는 1 unit의 에너지를 소모된다.
- f) 통신환경에서 contention과 error가 없다. 그러므로 데이터의 재전송은 없다.
- g) 클러스터헤드는 클러스터멤버들이 전송해 준 센싱정보를 모아 데이터 모음을 수행하여 한 번에 전송을 한다.

#### 3.2. 계산

클러스터헤드가 선택되면 클러스터헤드로부터 거의 원모양의 클러스터를 구성한다고 볼 수 있다. 위치정보를 통해서나, 홉 수의 제한을 통해 [4] 원모양의 클러스터를 구성한다.

아래의 그림 1은 싱크와 클러스터헤드사이의 거리가  $D$ 이고 그 때의 클러스터 반지름이  $r$ 인 원으로 나타내고 있다. 클러스터헤드에서부터 거리가  $r$ 보다 작은 곳에 위치한 센서노드들이 이 클러스터의 클러스터멤버가 된다.

그림 1

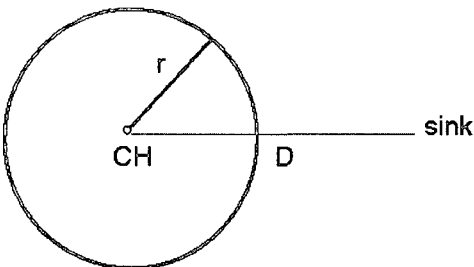


그림 1과 같이 클러스터를 구성했을 때의 에너지소모를 고려해서  $D$ 에 따르는 최적의 클러스터 반지름  $r$ 을 구해보겠다. 클러스터 내부의 노드가 모두 1 unit의 데이터를 클러스터헤드로

전송하여 그것을 클러스터헤드가 받아 데이터모음을 하여 싱크로 보내는 에너지 소모를 구한다. 그 값을 클러스터 내부의 노드 개수로 나누어 각 노드마다 최소의 에너지를 소모시키는 하는 최적 반지름  $r$ 을 구해보겠다. 가정에 따라 클러스터헤드는 클러스터멤버들의 1 unit 데이터를 모두 모아 데이터 모음을 통해 1 unit 데이터로 만들어 싱크로 보낸다. 그리고 계산을 쉽게 하기 위해  $r$ 을 1이라고 본다. 그러면 거리의 upper bound가 홉 수(hop count)가 된다. 홉 수는 에너지 소모에 비례하게 된다. 곧 전체 전송 거리를 구하는 것이 에너지 소모를 구하는 것이 된다.

○ 반지름  $r$ 인 클러스터 내의 센서노드개수 =  $\lambda\pi r^2$

노드가 균일하게 spatial Poisson process를 따라 분포되므로 random Poisson variable  $\lambda$ 에 넓이를 곱하면 노드의 개수가 나온다.

○ CM들로부터 CH까지의 평균 거리 =  $2r/3$  (원 내부의 점에서 중심까지의 평균거리와 같다.)

○ 클러스터멤버들에서 클러스터헤드로 전송할 때의 에너지 소비  $E_1 = \lambda\pi r^2 \cdot 2r/3$

○ 클러스터헤드에서 싱크로 전송할 때의 에너지 소비  $E_2 = D$

○ 한 번 전송하는 데 드는 에너지 소비의 총합  $E = E_1 + E_2 = \lambda\pi r^2 \cdot 2r/3 + D$

이것은 이 클러스터 내부의 모든 노드들의 에너지 소모이므로 노드개수로 나누어 노드 각각의 에너지 소모를 구해주어야 한다. 이러한 평균 소모를 가장 적게 하는 것이 노드들마다 최소의 에너지를 소모하게 하는 것이므로 가장 최적해가 된다.

○  $F = E / \lambda\pi r^2 = \frac{\lambda\pi r^2 \cdot 2r/3 + D}{\lambda\pi r^2} = \frac{2r}{3} + \frac{D}{\lambda\pi r^2}$

$F$ 의 최소값을 구하려면  $\frac{dF}{dr} = 0$ 을 이용해 구할 수 있다. 그 결과, 최소값을 갖는 반지름은

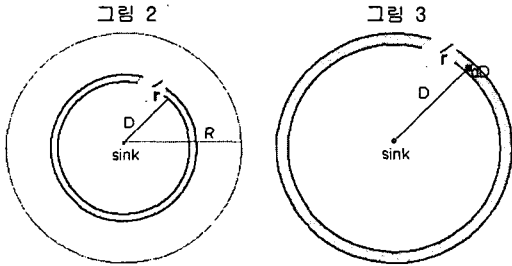
○  $r = \sqrt{3D} \frac{3D}{\lambda\pi}$  (1)

가 된다.

#### 3.3. 원형의 전체 토폴로지에서의 확인

반지름이  $R$ 인 원형의 토폴로지에서 다시 최적 클러스터 반지름을 구해 위의 (1)식이 옳은지를 확인해 보겠다.

원형의 토폴로지 중심에 싱크가 있다고 가정하겠다. 아래의 그림 2는 반지름  $R$ 인 원형 토폴로지 내부에, 싱크에서  $D$ 만큼 떨어진 곳에서 반지름이  $r$ 인 클러스터를 이루는 것을 나타내고 있다.



싱크와 클러스터헤드사이의 거리에 따른 최적 클러스터 반지름이므로,  $r$ 을  $D$ 의 관계식인  $r=kD^\alpha$ 로 가정한다. 전체 에너지 소모가 최소가 되는  $k$ 와  $\alpha$ 를 구하여 최적 클러스터 반지름의 값을 구해보도록 하겠다.

그림 2의 안쪽에 반지름  $D$ 인 원을 확대한 것이 그림 3을 나타낸다. 적분을 위해 싱크로부터 거리  $D$ 에,  $dD$ 의 매우 작은 너비를 갖는 띠를 생각할 수 있다. 이 띠 내부의 클러스터 개수를 구하고 그것들의 에너지 소비를 계산한다. 그리고 거리  $D$ 를 0에서부터  $R$ 까지 반지름을 따라 적분하면 전체 토폴로지 내에서의 에너지 소비량을 구할 수 있다. 이 과정을 나타내면 다음과 같다.

- $D$  거리에 있는 얇은 띠 넓이 =  $2\pi D \cdot dD$

매우 얇은 띠이므로 중간을 끊어 늘여서 생각하면 사각형이라 볼 수 있다.

- 거리가  $D$ 인 클러스터헤드의 최적 클러스터 반지름을  $r$ 이라 하자. 그러면  $\lambda\pi r^2$ 개 중 하나가 클러스터헤드가 되는 것이므로 얇은 띠 내의 클러스터헤드의 개수는  $(\lambda \cdot 2\pi D \cdot dD) \cdot 1/\lambda\pi r^2$  이 된다.

- 클러스터 내부의 에너지 소비 (클러스터멤버들로부터 클러스터헤드까지의 데이터전송)

$$E(\text{sensors} \rightarrow \text{CHs}) = (CM \rightarrow CH) \times \text{클러스터개수} \quad (2)$$

$$= (\lambda\pi r^2 \cdot 2\pi r/3) \cdot (2DdD/r^2)$$

- 클러스터헤드들에서 싱크까지의 에너지 소비

$$E(\text{CHs} \rightarrow \text{싱크}) = D \times \text{클러스터개수} \quad (3)$$

$$= D \cdot 2DdD/r^2$$

- 띠의 전체 에너지 소비

$$E = (2) + (3) = (2\lambda\pi r^3/3 + D) \cdot 2DdD/r^2 \quad (4)$$

- (4)의  $D$ 를 0에서부터  $R$ 까지 정적분을 하면 전체토폴로지의 에너지 소비를 구할 수 있다. 하지만  $r$  역시  $D$ 에 관계식이란 것을 알고 있다.  $r=kD^\alpha$ 를 (4)식에 대입하여 적분값을 구한다.

$$C(\alpha, k) = \int_0^R \left( \frac{2\lambda\pi r^3}{3} \cdot \frac{2D}{r^2} + \frac{2D^2}{r^2} \right) dD$$

( $r = kD^\alpha$ 를 위식에 넣어 적분)

$$= \frac{4\lambda\pi k}{3} \cdot \frac{R^{2+\alpha}}{2+\alpha} + \frac{2}{k^2} \cdot \frac{R^{3-2\alpha}}{3-2\alpha} \quad (5)$$

- (5)에서  $C$ 를 최소로 하는  $k$ 와  $\alpha$ 를 구하는 것이 최적의  $r$

을 구하는 것이다. (5)을  $k$ 와  $\alpha$ 로 각각 편미분을 한다. 그 식들이 0이 되는 식을 연립방정식을 해서  $k$ 와  $\alpha$ 를 구하면  $C$ 가 최소가 되는  $k$ 와  $\alpha$ 가 구할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial k} = \frac{4\lambda\pi}{3} \cdot \frac{R^{2+\alpha}}{2+\alpha} - \frac{4R^{3-2\alpha}}{(3-2\alpha)k^3} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \frac{-4(3-2\alpha)R^{3-2\alpha} \ln R + 4R^{3-2\alpha}}{k^2(3-2\alpha)^2} + \frac{4}{3} \pi \lambda k \cdot \frac{R^{2+\alpha}(2+\alpha) \ln R - R^{2+\alpha}}{(2+\alpha)^2} = 0 \quad (7)$$

- 전체 토폴로지의 반지름  $R$ 과 Poisson random variable  $\lambda$ 에 임의의 값을 넣어주고, (6)과 (7)을 연립하여 해를 구하면  $k=3/\lambda\pi$ ,  $\alpha=1/3$ 가 나오게 된다.

- 최적의 반지름  $r = \sqrt[3]{3\alpha \frac{2D}{\lambda\pi}}$ 이므로 (1)과 동일한 해가 나오는 것을 볼 수 있다. 결국 전체 토폴로지에서도 해가 일치를 알 수 있다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 싱크와 클러스터헤드 사이의 거리에 따른 최적의 클러스터 크기를 구해 보았다. 싱크와 클러스터헤드 사이의 거리에 따라 최적의 클러스터크기가 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 최적 클러스터 반지름은 싱크와 클러스터헤드 사이 거리의 1/3승에 비례를 한다. 최적 클러스터의 반지름은 토폴로지가 작고 싱크와 클러스터헤드의 거리가 짧을수록 영향을 적게 받지만, 토폴로지가 커지고 싱크와 클러스터헤드의 거리가 멀어질수록 많은 영향을 받게 된다. 실제로 넓은 지역에서 조밀하게 분포되는 무선 센서 네트워크인 경우는 (1)식에 따라 클러스터의 크기를 다르게 해 줄 필요가 있다.

또한 싱크로부터 1 홉 내에 있는 센서노드들은 클러스터링을 할 필요가 없다. 클러스터링을 하게 되면 오히려 클러스터헤드에서 싱크로 보내는 에너지가 낭비되기 때문이다.

#### 5. 참고문헌

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", in IEEE Communication Magazine, vol.40, No.8, pp.102-114 August 2002.

[2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", in Proceedings of IEEE HICSS, January 2000.

[3] Ossama Younis and Sonia Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach", in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2004.

[4] Seema Bandyopadhyay and Edward J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks", in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2003.