

# 무선 센서 네트워크에서의 그래프 컬러링 기반의 클러스터링 알고리즘

김재환<sup>○</sup> 장형수

서강대학교 컴퓨터공학과

{greensun00<sup>○</sup>,hschang}@sogang.ac.kr

## Graph Coloring based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network

J. H. Kim<sup>○</sup>, H. S. Chang

Department of Compute Science and Engineering, Sogang University

### 요 약

본 논문에서는 Wireless Sensor Networks상에서 전체 노드들의 lifetime을 증대시키기 위하여 "random한" 방식으로 cluster-head를 선출하는 LEACH 알고리즘이 가지고 있는 cluster-head 선출 과정에서 선출되는 수와 선출되는 노드들의 위치가 적절히 분산되지 않는 문제를 해결하기 위해 변형된 Graph Coloring 문제를 기반으로 노드의 위치 정보를 사용하지 않고 cluster-head를 적절히 분산하여 선출함으로써 효율적인 clustering을 하는 중앙처리 방식의 새로운 알고리즘 "GCCA : Graph Coloring based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks"을 제안한다. GCCA는 cluster-head가 선출되는 수를 일정하게 유지하고 선출되는 노드의 위치가 전체 network area에 적절히 분산되는 효과를 가져 옴으로 LEACH 알고리즘보다 에너지 효율이 증대됨을 실험을 통하여 보인다.

### 1. 서론

Wireless Sensor Networks(이하 WSNs)는 일반적으로 low-cost, low-power, small device, short distance for communication 등의 특징을 가지고 있다. WSNs에서 각 노드들은 에너지원으로 배터리를 사용하기 때문에 추가적인 전원 공급이 되지 않는다. 따라서 각 노드의 전력 사용은 WSNs에서의 가장 큰 논점이라고 할 수 있다. 효율적인 전력 사용은 각각의 노드의 생존 기간을 연장시켜줄 뿐 아니라 전체 network의 lifetime을 연장시켜줄 수 있기 때문이다.

Sensor 노드의 에너지 사용은 크게 두 부분에서 이루어진다. 하나는 sensing energy이며 또 하나는 communication energy이다. 일반적으로 sensor 노드가 sensing을 위해서 사용되는 energy는 communication에 사용되는 energy에 비해서 극히 미미하다고 할 수 있다. 따라서 communication energy를 줄이는 것은 중요하다.

Sensing된 data를 base station에 보내기 위한 방법으로 크게 세 가지 방법으로 나눌 수 있다[1]. 첫 번째는 각 노드가 base station과 직접통신(direct communication)을 하는 것이다. 두 번째 방법은 base station과 멀리 떨어져 있는 노드가 base station과 가까이에 있는 다른 노드를 거쳐서 통신하는 방법(Minimum Transmission Energy(MTE) protocol)이다. 마지막은 clustering을 하여 cluster-head가 대표로 data를 보내는 방법이다. Communication energy는 통신 거리의 제곱에 비례하기 때문에 마지막 방법이 가장 energy를 적게 사용한다는 것을 알 수 있다[1].

Clustering을 통하여 data를 전송하는 방법에 대하여 모든 노드들이 random한 방식으로 돌아가면서 cluster-head로 선출되는 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[1]라는 알고리즘이 WSNs에서 대표적인 방법으로 사용되고 있다. LEACH는 WSNs에서 고정된 cluster-head를 사용할 경우 cluster-head로 선출된 노드만 많은 energy를 소비하므로 전체적인 lifetime이 줄어드는 문제를 해결하였다.

LEACH 알고리즘은 노드가 스스로 cluster-head로 선출되기 위하여 threshold에 의거한 방식을 사용한다. WSNs를 구성하는 노드의 수가  $n$ 개이고 모든 노드의 집합을  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 이라고 할 때  $x$ 번째 노드에 대한 threshold 값은  $T(x)$ 으로 나타낸다.  $P$ 는 cluster-head로 뽑히길 원하는 확률이고  $G$ 는  $1/P$  round 동안 cluster-head가 되지 못한 노드의 집합이다. Threshold에 대한 식은 다음과 같다.

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

Cluster-head를 선출하기 위하여 각 노드들은 0에서 1까지의 수를 random하게 생성하여 위의 수식과 같이 계산된 threshold  $T(x)$ 과 비교한다. 생성된 수가  $T(x)$ 보다 작으면 현재 cycle의 cluster-head가 된다. 이 때  $1/P$  round가 하나의 cycle이 되며 이 기간 동안 cluster-head로 선출되었던 노드는 집합  $G$ 에서 제외된다. Cluster-head로 선출될 확률은 round가 증가함에 따라 증가하여 해당 cycle의 마지막 round에는 1이 되기 때문에 모든 노드가 cluster-head로 한 번씩 선출되게 된다. 이렇게 모든 노드들이 확률적인 방식으로 cluster-head로 선출되므로 특정 노드가 cluster-head가 되어 에너지를 계속적으로 소모하지 않는 점에서 에너지 효율은 증대된다[1].

LEACH는 분산적인 energy 사용으로 인해서 앞의 두 가지 방식(직접 통신, MTE protocol)보다 훨씬 좋은 성능을 보인다. 하지만 LEACH에서 두 가지 단점을 가지고 있다. 확률적으로 선출되는 cluster-head의 위치가 고르게 분산되지 않을 가능성이 있다. 즉, cluster-head가 한 부분으로 몰리거나 서로 근접하게 위치하여 비효율적인 cluster가 구성될 가능성이 있다. 또 각 round 마다 cluster-head의 수가 일정치가 않아 이 또한 비효율적인 cluster가 구성될 가능성이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 중앙처리 방식인 LEACH-C [2]라는 알고리즘이 고안되었다. 이 알고리즘은 각 노드에서

위치와 energy정보를 base station으로 보내고 base station에서는 이 정보를 받아 어떠한 노드가 cluster-head로 적당한지 결정하게 된다. 이러한 방법은 WSNs가 가장 최적의 상태에서 통신할 수 있다는 장점은 있으나 각 노드의 위치 정보를 알고 있어야 한다. 그러기 위해서는 각 노드는 GPS를 가지도 있어야 하며 GPS를 장착하지 않은 sensor 노드로 구성된 WSNs에서는 적용하기 어렵다.

따라서 노드의 위치 정보를 이용하지 않고 기존 LEACH가 가지고 있는 문제를 해결하기 위하여 Graph Coloring을 이용한 중앙처리 방식인 새로운 알고리즘 "GCCA(Graph Coloring based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks)"을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 변형된 Graph Coloring 문제를 사용하여 clustering을 효율적으로 할 수 있는 방법에 대하여 설명할 것이다. 본 논문의 2장에서는 LEACH 알고리즘에 대하여 간략하게 소개한다. 3장에서는 LEACH가 가지고 있는 문제점을 보완할 수 있는 새로운 알고리즘인 GCCA에 대해 소개한다. 4장에서는 새로운 알고리즘을 실험을 통해 LEACH 알고리즘과 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서 논문의 결론을 내리고 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

2. Problem Setup

WSNs는 구축하는 방법에 따라서 여러 가지 다양한 환경을 만들어 낼 수 있다. 본 논문이 가정하고 있는 네트워크 환경은 sensor 노드 사이에 자발적인 무선 통신이 가능하고 각 sensor 노드는 base station과 직접 통신이 가능하다고 가정한다. 또한 모든 노드는 sensing이 되기 원하는 지역에 고르게 배치되어 있고 각 노드는 고정되어 움직이지 않는다고 가정한다. Base station은 1개이고 노드의 위치를 알 수 있는 GPS는 사용할 수 없다고 가정한다.

WSNs에서 전체 네트워크를 하나의 그래프  $G=(V,E)$ 로 나타내면 각 노드는 vertex라고 할 수 있다. 각각의 노드를 vertex  $v$ 라고 한다면  $n$ 개의 노드들은 vertex의 집합  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 로 표현할 수 있다.  $edge(v,u) \in E (u,v \in V)$ 는 vertex  $u$ 와  $v$ 의 연결 관계이며  $u$ 와  $v$ 가 통신 가능함을 나타낸다.

Clustering을 사용하는 WSNs는 모든 노드를 partition하는 것과 같다. 즉,  $s$ 가  $n$ 보다 작거나 같은 임의의 정수일 때  $V_1, V_2, \dots, V_s \subset V$ 이며  $V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_s = V$ 이고  $V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i, j \in \{1, \dots, s\}, i \neq j$ 이다.  $V_1, V_2, \dots, V_s$ 가 하나의 cluster라면 각 cluster마다 대표적으로 통신을 하는 cluster-head가 있다. 이를  $H(V_i) \in V_i, i = 1, 2, \dots, s$ 와 같이 나타낼 수 있고  $H(V_i)$ 는  $V_i$  cluster를 대표하는 cluster-head이다.

통신을 위해서 사용되는 에너지는 노드간의 거리의 제곱에 비례한다.  $dist(edge(u,v)) (s.t. u,v \in V)$ 를  $edge(u,v)$ 의 거리라고 했을 때 본 논문에서는  $\sum_{i=1}^s \sum_{v_j \in V_i, v_j \neq H(V_i)} dist(edge(H(V_i), v_j))^2$

의 값을 최소화 시키는 문제를 풀고자 한다. 이는 cluster의 개수  $s$ 가 정해져있고 모든 노드가 에너지가 충분하여 다른 노드와 통신이 가능하다고 가정한다면 각 cluster에서 cluster-head와 cluster-head가 아닌 노드 사이의 거리를 일정하게 만드는 것과 같다.

3. Graph Coloring based Clustering Algorithm

3.1. Basic idea

우리의 목적은 clustering 과정에서 cluster-head로 선출된 노드의 위치가 전체 network 공간에 적절히 분산되고 각 round(한 round는 구성된 cluster를 바꾸지 않고 통신하는 시

간이다. 임의의 시간으로 정해질 수 있다.)마다 선출되는 cluster-head의 수가 일정하게 만드는 것이다. 이를 위해서는 각 cluster-head들 사이의 거리가 어느 정도 떨어져서 선출이 될 수 있도록 해야 한다. Cluster-head들 사이의 거리를 적당히 떨어뜨리고 한 round에 뽑히는 cluster-head의 수를 일정하게 유지한다면 각 cluster-head의 위치를 분산시키는 효과를 가져 올 수 있다. 아래 그림(그림2)과 같이 분포되어 있는 WSNs가 있고 검정색으로 표시된 노드를 기준으로 그려진 큰 원 안의 노드들(검정색 노드와 적당한 거리를 유지하지 못하는 노드들)은 검정색으로 표시된 노드와 같은 round에 cluster-head로 동시에 선출될 수 없다면 cluster-head들 사이의 거리를 유지할 수 있게 된다. 또한 한 round에 뽑힐 수 있는 cluster-head의 수를 5개로 일정하게 유지한다고 가정하자. 그렇다면 각 노드가 그리는 큰 원의 범위에 들지 않는 노드 5개를 선정하기 위해서는 다음 그림(그림3)과 같이 cluster-head들이 넓게 분산되도록 뽑힐 수밖에 없다. 최악의 경우이라도 cluster-head간의 거리는 큰 원의 반지름보다는 크다. 즉, cluster-head 사이의 최소한의 거리를 보장해 준다.

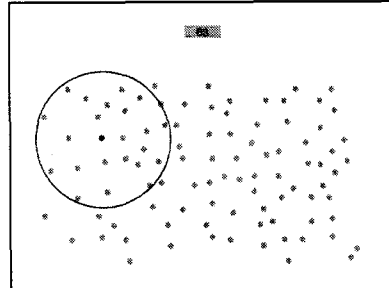


그림2. 하나의 노드에 대한 이웃 노드

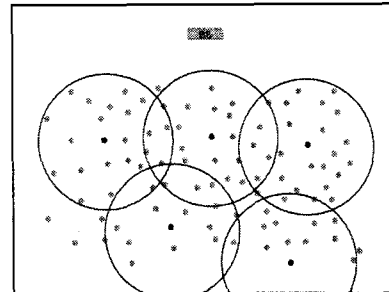


그림3. 서로의 범위를 위반하지 않는 배치

큰 원이 최소한의 거리를 보장해 주는 것이기 때문에 원의 반지름은 sensor 노드들이 배치된 공간과 관계가 있다. Sensor 노드들이 골고루 배치되었다고 가정하고 전체 면적이 넓다면 원의 반지름도 길어야 할 것이다. 이를 정확히 수학적으로 구하기는 어렵지만 간단한 수식으로 최적에 가까운 크기로 정할 수 있다. 전체 공간의 가로를  $w$ , 세로를  $l$ 로 놓고 원의 반지름을  $x$ 로 놓는다면  $\pi x^2/wl$ 을 일정 비율로 정할 수 있고 그 비율을  $k$ 라고 한다면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$x = \sqrt{k(wl/\pi)} \tag{2}$$

여기서 상수  $k$ 를 어떻게 정하느냐에 따라서 알고리즘의 효율이 달라진다. 적절한 cluster-head 선출 비율을  $p\%$ 라고 한다면 큰 원이 전체 공간을 빈 공간 없이 채우기 위해서는 큰 원의 넓이  $\pi x^2$ 는 전체 공간  $wl$ 의  $1/p$ 보다 크거나 같아야 한다. 따라서  $k$ 값이  $1/p$ 보다 크거나 같다면 좋은 효율을 기대할 수 있을 것이다.

위의 이론과 같이 cluster-head를 선출한다면 고른 분포로 cluster-head를 선출할 수 있다. 위치 정보를 알고 있지 않은 상태에서 위와 같이 고른 분포로 cluster-head를 선출하기 위한 방법으로 약간 변형된 Graph Coloring 방법을 사용하고자 한다.

각 노드의 위치 정보는 알 수 없더라도 식(2)에서 결정된  $x$  값을 사용하여 일정 세기로 전파를 보내어 자신의 근처에 있는 이웃 노드의 정보는 알 수 있다. 즉, 위의 그림(그림2)에서 큰 원 안의 노드들이 점점 노드의 이웃 노드라고 설정할 수 있다. 모든 노드들이 이러한 이웃 노드의 정보를 가지고 있다면 이 정보를 취합해 하나의 커다란 그래프  $G$ 를 만들 수 있다. 방향성이 없는 그래프  $G=(V,E)$ 에서  $V$ 는 vertex들의 집합이며 WSNs에서의 노드가 되고  $E$ 는 edge들의 집합이며 WSNs에서의 이웃 노드와의 연결 관계가 된다. Vertex의 수를  $n$ 이라 하고 색(color)의 수를  $m$ 라고 하자. 기존 Graph Coloring Problem은 이러한 그래프  $G$ 에서  $edge(u,v) \in E$ 라면  $f(u) \neq f(v)$ 의 조건을 만족하는 함수  $f: V \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$ 에 대하여 가장 작은 색의 수  $m$ 을 찾는 것이 목적이다. 하지만 우리가 원하는 문제는 기존 Graph Coloring Problem과 달리 위와 정의된 함수  $f$ 에 대하여  $m$ 이 상수로 정해져 있고  $\Omega_i = \{f(v) = i | v \in V\}, i=1, \dots, m-1$ 이라고 할 때 0과  $m-1$ 사이의 모든  $i$ 에 대하여 집합  $\Omega_i$ 의 원소의 개수가  $n/m$ 과 같거나 비슷해지게 만드는 함수  $f$ 를 찾는 것이 목적이다. 이를 식으로 표현하면

$$g = \sum_{i=0}^{m-1} |n/m - |\Omega_i|| \quad (3)$$

이고 제약 사항( $edge(u,v) \in E$ 라면  $f(u) \neq f(v)$ )을 만족하면서  $g$ 를 최소화 시키는 문제와 같다. 여기서  $|S|$ 는 집합  $S$ 의 원소의 개수를 나타낸다.

즉, 일정한 수의 색을 사용하여 하나의 색이 칠해지는 노드의 수를 일정하게 만드는 것이다. 여기서 상수로 정해지는  $m$ 은 전체 노드의 개수  $n$ 을 cluster-head 선출비율(LEACH에서는 5%가 적당하다고 하고 있다[1])로 나누면 구해진다.

이러한 문제는 기존 Graph Coloring보다 더 적은 시간에 풀 수 있다. 여러 가지 Combinatorial Optimization Problem에 대한 알고리즘을 사용하여 풀 수 있으며 본 논문에서는 유전자 알고리즘[3]을 사용하였다.

변형된 Graph Coloring을 통하여 지정되는 노드에 대한 색은 cluster-head를 선출하는데 사용한다.  $\Omega_i$ 를  $i$ 의 색을 가진 노드들의 집합이라고 한다면  $\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_{m-1} \subset V$ 이며  $\Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \dots \cup \Omega_{m-1} = V$ 이고  $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \forall i, j \in \{1, \dots, m-1\}, i \neq j$ 이다. 한 round를 수행하는데  $d$ 시간이 걸린다고 하자.  $t_1$  시간에  $\Omega_x$ 에 속하는 노드가 cluster-head로 선출되었다면  $t_1 + d$ 시간에는  $\Omega_{(x+1) \bmod m}$ 에 속하는 노드가 cluster-head로 선출되게 된다. 같은 집합  $\Omega_x$ 에 속하는 노드들은 이웃 노드가 될 수 없으므로 이와 같은 방식으로 cluster-head를 선출한다면 각 cluster-head 사이의 일정한 거리가 유지되며 전체적으로 분산되는 효과를 거둘 수 있다.

### 3.2 알고리즘

변형된 Graph Coloring 방법을 WSNs에 적용하면 가장 먼저 각 노드가 (a)와 같이 배치되고 각 노드들은 이웃 노드에 대한 정보를 수집하여 노드의 에너지 정보와 함께 base station으로 보낸다. 이 때 이웃에 대한 정보를 이용하여 (b)와 같은 연결 관계를 생성한다. 두 번째로 base station에서 이러한 정보를 통합하여 적절한 색의 수를 정하고 유전자 알고리즘을 통하여 각 노드에 대한 색을 분배하고 각 노드에 해당 색을 알려준다 (c). 세 번째로 각 round에 해당하는 색을 가진 노드가

cluster-head로 선출되고(d)(e)(f) clustering을 한다. 네 번째로 감지(sensing) 및 데이터 전송을 한다. 마지막으로 모든 색이 한 번씩 cluster-head가 되었다면 변형된 Graph Coloring을 이용하여 새롭게 바뀐 색이 적용되게 된다(g)(h). (g)에서 -1의 값을 가진 노드는 cluster-head 선출에서 제외된 노드이며 이에 대한 설명은 3.3.2에 있다.

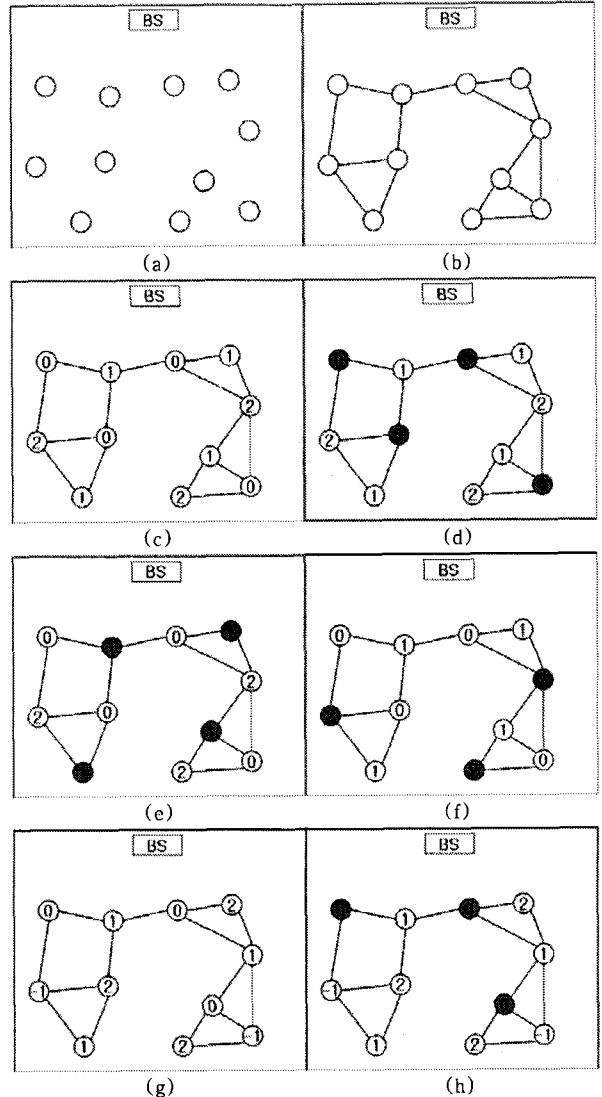


그림5. (a) 초기 노드 배치 (b) 노드 사이의 연결 관계 생성 (c) 각 노드에 색 설정 (d)(e)(f) 0, 1, 2번 색을 가진 노드가 차례대로 cluster-head로 선출됨. (g) 각 노드에 새로운 색을 설정 (h) 0번 색을 가진 노드가 cluster-head로 선출됨

#### 3.2.1. 이웃 노드 설정 및 전송 단계

이 알고리즘의 핵심은 이웃 노드와의 관계에 대한 정보를 이용하는 것이라고 할 수 있다. 각 노드는 자신의 이웃을 정하기 위하여 일정한 범위의 노드에게 자신이 이웃이라는 메시지를 보내게 되는데 그 범위는 식(2)를 사용하여 정해진다. 원하는 범위까지만 통신하도록 전파의 세기를 조절해서 메시지를 보내고 메시지를 받은 노드들은 메시지를 보낸 노드를 자신의 이웃

으로 추가시킨다. 이 과정이 끝나면 자신에게 메시지를 보낸 노드들(일정 범위 안에 있는 노드들)은 이웃으로 추가되고 각각의 노드들은 이 정보를 base station으로 전송한다. 이 때 각 노드의 에너지 정보도 같이 전송한다. 에너지 정보가 필요한 이유는 3.2.2에서 설명한다.

노드는 움직이지 않는다고 가정을 하기 때문에 이웃 노드에 대한 정보는 바뀌지 않는다. 따라서 이 단계는 전체 알고리즘에서 한 번만 수행하면 된다.

3.2.2. 변형된 Graph Coloring 단계

각 노드로부터 이웃 노드와의 관계에 대한 정보를 전송받은 base station은 이 정보를 통합하여 하나의 그래프를 만들 수 있다. 이 그래프에 3.1에서 설명한 변형된 Graph Coloring 문제를 적용시키면 각 노드의 cluster-head 선출 시기를 정할 수 있다.

변형된 Graph Coloring 문제를 풀기 위해서 몇 가지 색으로 이 문제를 풀어야 할지 정해야 한다. 3.1에서는 전체 노드의 수  $n$ 에서 cluster-head 선출비율  $s$ 로 나누면 된다고 설명하였지만  $n$ 을 cluster-head로 선출 가능한 노드의 수  $n'$ 로 바꾸면 알고리즘은 더욱 효율적이 된다. WSNs를 진행하는 동안 각 노드들 사이의 에너지 소모량이 차이가 생기고 다른 노드들보다 일찍 고갈되는 노드가 생기게 된다. 그렇게 되면 일정 부분 감지가 불가능할 수도 있고 전체적인 에너지 소모량이 더 커지게 된다. 따라서 모든 노드들의 남은 에너지를 비슷하게 만들어 준다면 전체 네트워크의 질을 높이고 lifetime을 늘릴 수 있다. 이를 위해 다른 노드에 비해 남은 에너지가 적은 노드를 에너지 소모량이 많은 cluster-head 선출에서 제외시키는 방법을 사용한다.

전체노드의 집합을  $N$ 이라고 하면  $|N| = n$ 이다.  $E(x)$ 를 집합  $X$ 의 노드들이 가진 평균 에너지라고 하고  $e(x)$ 를 노드  $x$ 의 현재 에너지라고 하자. Cluster-head 선출에서 제외되는 노드의 집합  $\bar{N}$ 은

$$\bar{N} = \{e(x) < c \times E(N) | x \in N\} \quad (4)$$

이고  $c$ 는 전체 노드의 평균 에너지와 제외될 노드의 에너지의 비율을 나타낸 값으로 1이하의 상수이다. 따라서 cluster-head 선출에 참여하는 노드의 집합  $N'$ 은

$$N' = N - \bar{N} \quad (5)$$

이다.  $|N'| = n'$ 이고 색의 수  $m$ 은 cluster-head 선출 비율을  $s$ 라고 했을 때  $n/s$ 를 반올림하는 대신  $n'/s$ 를 반올림하여 구해진다.

색의 수가 결정되었다면 유전자 알고리즘[3]을 사용하여 3.1에서 설명한 변형된 Graph Coloring 문제를 푼다. 유전자 알고리즘을 사용하면 실제로 계산 시간이 오래 걸리지만 3.2.5와 같은 방식으로 계산 결과를 다음 cycle에 적용한다면 노드들이 통신하는 동안 delay가 발생하지 않기 때문에 문제가 되지 않는다. 이 때 GA에 사용된 fitness function은 이웃 노드 사이에 색이 같지 않은 정도와 같은 색을 가지고 있는 노드의 수의 균일성을 측정한다. Fitness function은 식(6)과 같이 나타낸다.

$$c_1 \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{\forall i,j \in \Omega_k, i \neq j} edge(i,j) + c_2 \sum_{i=0}^{m-1} |n/m - |\Omega_i|| \quad (6)$$

에너지가 적은 노드를 제외시켰으므로 그래프는  $G=(N,E)$ 가 아닌  $G=(N',E)$ 에 대하여 적용하게 된다. 결과적으로 집합  $N'$ 에 속하는 모든 노드는 색이 칠해지게 된다. 이러한 노드에 대해서는 해당 색과 전체 색의 수에 대한 정보를 전송해준다. 집합

$\bar{N}$ 에 속하는 노드는 cluster-head로 선출되지 않았다는 메시지와 전체 색의 수에 대한 정보를 전송해 준다.

3.2.3. Cluster-head 선출 및 clustering 단계

자신의 색 정보를 전송받은 각각의 노드들은 현재 진행되고 있는 round가  $x$ 이고 총 색의 수가  $m$ 이라고 한다면  $x \bmod m$ 의 색을 가진 노드가 cluster-head로 선출된다. Cluster-head로 선출된 노드는 같은 transmission energy로 "선출 시그널"을 보내고 이 시그널을 받은 cluster-head가 아닌 노드들은 가장 강한 시그널을 골라 그 시그널을 보낸 cluster-head에게 cluster에 참여하겠다는 메시지를 전송한다[1].

3.2.4. 감지 및 데이터 전송 단계

전체적으로 cluster가 구성되면 감지 및 데이터 전송 단계를 실행하게 된다. 이 과정에서도 에너지를 줄일 수 있는 많은 방법이 고안되었지만 본 논문에서는 clustering에 대한 알고리즘을 제안하는 것이 목적이므로 새로운 방법을 제시하지 않는다. 4장에서 본 논문의 clustering 기법과 LEACH의 clustering 기법을 실험을 통해 비교하므로 본 논문에서 감지 및 데이터 전송 단계는 LEACH의 방법을 따르도록 하겠다.

Cluster에 포함된 노드의 목록을 가지고 있는 cluster-head는 각 노드에 대한 TDMA schedule을 생성하여 각 노드에 이 정보를 전송해 준다[1]. Cluster-head가 아닌 노드는 이 정보를 받아서 자신이 전송해야할 시간에 전송을 하고 그 이외의 시간에는 에너지 절약을 위하여 통신 radio를 끈다[1].

3.2.5. Cluster-head 재선출

알고리즘은 round가 진행되면서 3.2.3과 3.2.4의 단계를 반복적으로 수행한다. 각 노드가 base station으로부터 색을 전송받은 시기가  $t_1$  round이고  $t_1 + m - 1$  round까지 진행되었다면 집합  $N'$ 에 속하는 모든 노드들이 cluster-head로 한 번씩 선출되게 된다. 이를 한 cycle로 생각할 수 있고  $t_1 + m - 1$  round에 각 노드는 cluster-head를 통해서 자신의 에너지를 base station으로 전송하게 된다. 물론 base station에서 변형된 graph coloring을 적용하여 다시 색을 정해서 전달해 주어야 하지만 그렇게 되면 계산 시간 동안의 지연이 발생하게 된다. 따라서 지연 시간을 없애기 위하여 현재의 결과를 다음 cycle에 적용시키는 방법을 사용한다. 이러한 방법을 사용하면 변형된 Graph Coloring을 계산하는 과정과 각 노드들이 감지 및 데이터를 전송하는 과정이 병렬적으로 수행될 수 있다[4]. 그림4는 그 과정을 설명하고 있다.

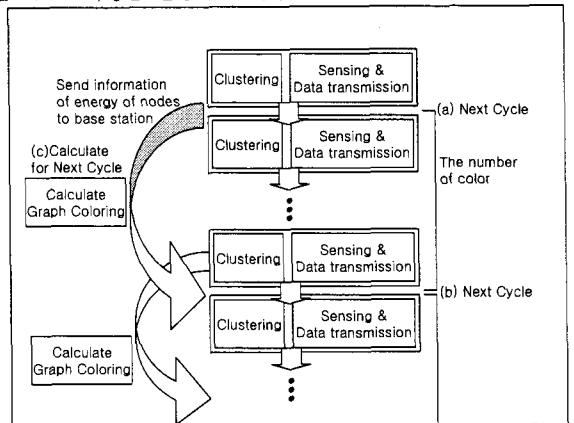


그림4. 시간의 흐름에 따른 알고리즘 수행

1) 각 용어는 3.1에서 설명한 것과 같이  $\Omega_i$ 는  $i$ 의 색을 가진 노드들의 집합이며  $|S|$ 는 집합  $S$ 의 원소의 개수를 나타낸다.  $edge(i,j)$ 는 집합  $E$ 의 원소이면 1 아니면 0의 값을 갖고  $c_1$ 과  $c_2$ 는 상수이다.

위와 같이 변형된 Graph Coloring에 대한 계산 결과를 다음 cycle에 적용시킨다면 (a)의 시점에서 각각의 노드가 가지고 있는 에너지에 의해 생성되는 집합  $N'$ 와 (b)의 시점에서 생성되는 집합  $N'$ 가 다르게 된다. 이는 (a)시점에서 cluster-head로 선출이 되는 노드와 선출되지 않는 노드 간의 에너지 소모의 차이에서 기인하므로 이를 미리 반영하여 집합  $N'$ 를 정한다면 변형된 Graph Coloring에 대한 계산 결과를 다음 cycle에 반영하는 것에 의해 생기는 차이를 줄일 수 있다. 이를 위해 (a)시점에서 (b)시점까지 작업을 수행하는데 사용되는 에너지를 예측해서 각 노드의 남은 에너지에 차감한 결과를 사용하여 (c)의 계산을 수행하는 방법을 사용한다. 이 때 cluster-head에 참여하는 노드는 더 많은 에너지를 소모할 것이라고 예상할 수 있으므로 더 많은 에너지를 차감한다. 결과적으로 (a)시점에서 각 노드의 에너지 정보를 얻어서 (c)의 계산을 수행하지만 (b)시점에서 각 노드 정보를 얻어서 계산하는 것과 비슷한 결과를 보일 것이다.

3.2.6. Pseudocode

전체적인 알고리즘의 흐름을 살펴보면 다음과 같다.

```

GCCA {
    N = set of all nodes in WSN;
    N' = set of eligible nodes for being elected
        as cluster-heads;
    c = ratio of the average energy of the ineligible nodes
        to that of the all nodes in N //[3.2.2]참조
    d = ratio of the number of alive nodes2) to |N|;
    round = 0; N' = N;
    Start:
    for each node v in N{
        calculate the radius of circle of v;
        decide v's neighbor nodes;
        transmit v's neighbor-node list to BS;
    }
    GC: solve the graph coloring problem with N';
    //[3.2.2]참조
    while the number of alive nodes is greater
        than |N'| * d {
        transmit the color of each node in N' from BS
        to nodes in N';
        for the number of color m obtained in GC {
            elect a node with the color of round - ⌊  $\frac{round}{m}$  ⌋ m
            as a cluster-head;
            clustering; //[3.2.3]참조
            sensing and data transmission; //[3.2.4]참조
            round++;
        }
        transmit energy information of each node to BS;
    for each node v in N{
        N' = {v | e(v) ≥ c × E(N), v ∈ N}; [3.2.2]참조
    }
    GC: solve the graph coloring problem with N';
    }
    End:
}
    
```

2) 일정량 이상의 에너지를 가지고 있어서 한 round이상 통신을 할 수 있는 노드를 말한다.

4. 결과 및 분석

데이터를 보낼 때 보내는 쪽에서는 전송(Transmit) 에너지와 증폭(Amplifier) 에너지가 필요하다. 또한 받는 쪽에서는 수신(Receive) 에너지가 필요하다. 이러한 에너지 소모를 측정하기 위하여 본 논문에서는 LEACH에서 사용되었던 간단한 radio model을 사용한다[1]. 데이터의 전송과 수신에 사용되는 에너지는  $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ 이고 증폭에 사용되는 에너지는  $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ 이라고 가정한다.

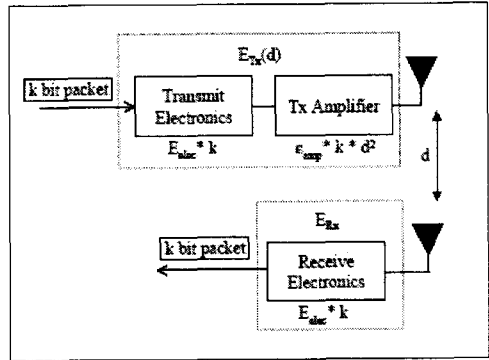


그림1. Radio Model

네트워크 환경은 실험의 결과에 중대한 영향을 미친다. 따라서 GCCA와 LEACH 알고리즘[1]의 WSNs의 환경을 똑같이 설정하고 실험을 하였다. 100개의 노드가 가로, 세로 100m의 정사각형 공간에 골고루 배치되어 있도록 하였다. 노드의 배치는 random한 방식으로 배치되며 매 실험할 때 마다 그 위치가 변한다. 모든 노드의 초기 에너지는 0.5J로 동일하며 데이터의 전송과 수신에 사용되는 에너지는  $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ 이고 증폭에 사용되는 에너지는  $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ 이다. 적절한 cluster-head 선출 비율은 LEACH에서와 같이 5%로 하였다. Base station은 1개이며 100m만큼 떨어진 거리에 있다고 가정하였다.

LEACH와 달리 GCCA에서 몇 가지 더 설정해 주어야 한다. 전체 면적에 대한 이웃 노드로 설정하는 원의 면적의 비율 k와 각 노드가 가진 평균 에너지에 대한 cluster-head 선출에 제외되어야 하는 노드가 가진 에너지의 비율 c이다. 이는 실험을 통하여 적당한 값을 찾아낼 수 있는데 k에 대한 실험은 k의 값을 0.05에서 0.3까지 0.05씩 증가시키면서 1000과 2000 round에서의 전체 노드의 에너지 소모량을 측정하였다.

round \ k	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
1000	24.316	24.353	23.332	23.274	23.294	22.749
2000	44.035	44.070	42.415	42.286	42.639	41.647

표1. k에 따른 전체 에너지 소모량 (Joules)

결과적으로 k값이 커질수록 같은 round에 더 적은 에너지를 소모하였다. 하지만 0.3이상 커졌을 경우는 Graph Coloring에서 이웃 노드의 색은 서로 달라야하는 조건을 위반하는 경우가 자주 발생하였다. 따라서 본 논문에서는 안정적으로 k값을 0.2로 선택하였다.

c에 대한 실험은 c의 값을 0.5부터 0.9까지 0.1씩 증가시키면서 1000과 2000 round에서의 전체 노드의 에너지 소모량을 측정하였고 표2와 같이 c값에 따른 변화가 크지 않다. 본 논문에서는 c 중 가장 작은 결과값을 가지는 0.6을 c의 값으로 선택하였다.

round \ c	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1000	22.999	21.881	22.196	22.342	21.436
2000	41.842	40.216	40.689	40.951	40.522

표2. c에 따른 전체 에너지 소모량 (Joules)

WSNs에서 sensor 노드들이 일정 수 이하로 떨어지면 전체 네트워크가 정상적으로 작동하지 않는다고 가정하였다. 그 결과 round별로 살아남은 노드의 수를 그래프로 나타내면 그림6과 같다. GCCA의 전체 네트워크가 정상적으로 작동하지 않을 때까지의 시간은 LEACH 알고리즘의 2배가 조금 안 된다. 특히 하나의 노드도 죽지 않고 유지되는 시간은 LEACH 알고리즘보다 훨씬 길다. 따라서 GCCA는 전체 네트워크가 정상적으로 작동하는 면에 있어서 뛰어난 성능의 향상을 가져왔다.

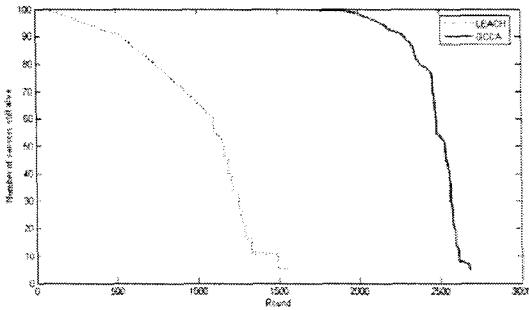


그림6. round에 따른 살아남은 노드의 수

노드 사이에 통신할 때 거리의 제곱에 비례하여 에너지를 소모한다. GCCA는 노드 사이의 통신 거리가 비슷하도록 clustering이 효율적으로 구성되기 때문에 전체적인 에너지 소모량도 줄일 수 있다. 그림7을 보면 GCCA의 전체 에너지 소모량이 LEACH보다 더 적은 것을 볼 수 있다. GCCA의 전체 에너지 소모량은 LEACH 알고리즘의 전체 에너지 소모량보다 약 33% 줄어들었다.

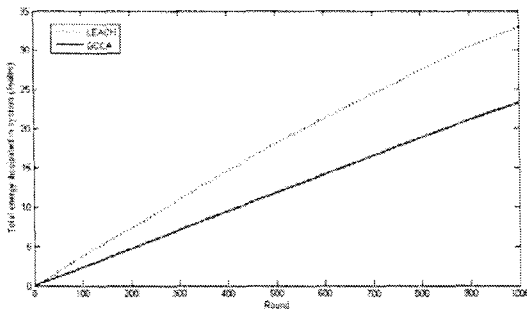


그림7. round에 따른 전체 에너지 소모량

5. 결론

Wireless Sensor Networks의 사용이 증대됨에 따라 에너지가 적은 sensor 노드를 효율적으로 사용하기 위한 많은 방법들이 고안되었다. 그 중 clustering을 사용하는 방법이 효과적으로 쓰이고 있다. 위치 정보나 에너지 정보와 같은 많은 정보를 알고 있다면 더 효율적으로 clustering을 할 수 있지만 모든 상황을 파악하기 위해서는 GPS를 사용하는 것과 같은 기회비용이 발생하기 마련이다. 본 논문에서는 위치 정보를 알지 못하

는 상황에서의 효율적인 clustering 방법으로 Graph Coloring based Clustering Algorithm(GCCA)을 제안하였다.

본 논문에서는 GCCA를 WSNs에서 대표적으로 사용되는 LEACH 알고리즘과 비교하였다. 결과적으로 GCCA는 LEACH 알고리즘보다 살아남은 노드의 수나 전체 에너지 소모량 측면에서 더 뛰어난 성능을 보였다. 이는 WSNs에서 같은 에너지를 가지고 있다면 GCCA가 더 오랜 시간 통신을 할 수 있다는 것을 의미한다.

LEACH 알고리즘 이후로 효율적인 clustering을 위한 다른 알고리즘들이 제안 되었다[5][6][7]. 향후 과제로 LEACH 알고리즘보다 뛰어난 성능을 보이는 다른 방법과 비교가 필요할 것이다.

본 논문에서는 base station과 노드 사이에 직접 통신이 가능하다고 가정하였는데 차후 직접 통신이 불가능한 경우에 대한 개선책 및 실험이 필요하다. 또 각 노드가 전체 공간에 고르게 분포되어 있다고 가정하였는데 고르게 분포되지 않았을 경우에 대한 결과도 LEACH 알고리즘과 비교하여 보아야 할 것이다.

3.1에서 정의한 k값은 실험을 통하여 적절한 값을 선택하였지만 모든 네트워크 환경에도 같은 결과가 나올 것이라는 보장이 없다. 따라서 향후 k값에 대한 면밀한 고찰이 있어야 한다.

본 논문에서 사용한 유전자 알고리즘은 일반적으로 계산 시간이 오래 걸린다. 기존 Graph Coloring 문제는 NP-Complete에 속하는 문제로 잘 알려져 있지만 본 논문에서 제시한 변형된 Graph Coloring은 그 보다 적은 계산 시간이 걸릴 것이라 생각 된다. 차후 이에 대한 연구와 유전자 알고리즘보다 빠른 시간에 계산할 수 있는 알고리즘의 고안이 필요하다.

참고문헌

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, vol. 8, pp. 3005-3014, Jan. 2000.
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [3] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [4] K. P. Ferentinos , T. A. Tsiligiridis. "Adaptive design optimization of wireless sensor networks using genetic algorithms" Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking , Volume 51 , Issue 4 , pp.1031-1051 , March 2007
- [5] L. Ying , Y. Haibin, "Energy Adaptive Cluster-Head Selection for Wireless Sensor Networks," Proceedings of the Sixth International Conference on Parallel and Distributed Computing Applications and Technologies, pp.634-638, 05-08 December 2005
- [6] H. Yang , B. Sikdar, "Optimal Cluster Head Selection in the LEACH Architecture" Performance, Computing, and Communications Conference, 2007. IPCCC 2007. IEEE Internationa pp.93-100, 11-13 April 2007.
- [7] R. Virrankoski , A. Savvidecs, "TASC: topology adaptive spatial clustering for sensor networks" Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on , pp.10 , 7-10 Nov. 2005