

석사학위논문

# 계층적 센서 네트워크에서의 클러스터링 및 라우팅 알고리즘

-Clustering & Routing Algorithms in  
Hierarchical Sensor Networks-

지도교수 : 조진성

경희대학교 대학원  
컴퓨터공학과

김대영

2006년 2월

# 계층적 센서 네트워크에서의 클러스터링 및 라우팅 알고리즘

-Clustering & Routing Algorithms in  
Hierarchical Sensor Networks-

지도교수 : 조진성

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

경희대학교 대학원  
컴퓨터공학과

김대영

2006년 2월

김대영의 공학 석사학위 논문을 인준함

주심교수 : \_\_\_\_\_ ㉮

부심교수 : \_\_\_\_\_ ㉮

부심교수 : \_\_\_\_\_ ㉮

경희대학교 대학원

2006년 2월

## 국 문 요 약

# 계층적 센서 네트워크에서의 클러스터링 및 라우팅 알고리즘

경희대학교 대학원  
컴퓨터 공학과  
김 대 영

무선 센서 네트워크에는 효율적인 라우팅을 위한 많은 알고리즘들이 있다. 그 중 클러스터링을 기반으로 하는 계층적 라우팅 알고리즘들은 클러스터 헤드만이 싱크 노드와의 통신에 참여하게 함으로써 에너지 효율을 얻는다. 그러나 이전의 계층적 라우팅 알고리즘들은 센서 노드의 전파 도달 반경(10m)을 고려하지 않고 설계되어서 실제 환경에서 적용할 수 없는 문제점 있다. 따라서 본 논문에서는 센서 노드의 전파 도달 반경을 고려한 클러스터링 및 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 클러스터링 방안에서는 클러스터 헤드 선택을 위해 노드의 잔존 에너지와 연결도를 이용하고, d-hop 클러스터링을 통해 클러스터의 범위를 확장한다. 또한 라우팅 방안에서는 홉수를 기반으로 한 멀티홉 라우팅 기법을 사용한다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해서 C++ 언어를 사용하여 시뮬레이터를 구현하고, 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제안된 방안의 네트워크 생존 시간이 가장 오래 지속됨으로써 효율적인 알고리즘임을 알 수 있었다.

키워드 : Wireless sensor network, Hierarchical routing, Clustering

# 목 차

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 .....                   | 1  |
| 제 2 장 관련 연구 .....                 | 3  |
| 2.1 무선 센서 네트워크 개요 .....           | 3  |
| 2.2 연결도를 기반으로 한 클러스터링 알고리즘 .....  | 5  |
| 2.3 확률을 기반으로 한 클러스터링 알고리즘 .....   | 7  |
| 2.4 잔존 에너지를 기반으로 한 클러스터링 알고리즘 ..  | 10 |
| 2.5 평면 라우팅 알고리즘 .....             | 12 |
| 제 3 장 제안하는 클러스터링 및 라우팅 알고리즘 ..... | 14 |
| 3.1 계층적 네트워크의 동작 .....            | 15 |
| 3.2 d-hop 클러스터링 .....             | 16 |
| 3.3 클러스터 헤드 선정 .....              | 19 |
| 3.4 Intra/Inter 클러스터 통신 .....     | 21 |
| 3.4.1 이웃 노드 테이블 .....             | 21 |
| 3.4.2 클러스터 내부에서의 통신 .....         | 21 |
| 3.4.3 클러스터 헤드의 통신 .....           | 22 |
| 제 4 장 성능 평가 .....                 | 25 |
| 4.1 성능 평가를 위한 환경 변수 .....         | 25 |
| 4.2 성능 평가 모델 .....                | 27 |
| 4.3 결과 및 분석 .....                 | 29 |
| 제 5 장 결론 .....                    | 38 |
| 참 고 문 헌 .....                     | 40 |
| Abstract .....                    | 42 |

## 그림 목차

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| [그림 2.1] 무선 센서 네트워크의 구조 .....                                                  | 3  |
| [그림 2.2] 최상위 연결도 기반 클러스터 .....                                                 | 6  |
| [그림 2.3] LEACH 프로토콜에 의한 클러스터 .....                                             | 8  |
| [그림 2.4] LEACH의 전파 모델 .....                                                    | 9  |
| [그림 2.5] Directed Diffusion 프로토콜의 동작 .....                                     | 13 |
| [그림 3.1] 계층적 네트워크의 동작 과정 .....                                                 | 15 |
| [그림 3.2] 제안된 클러스터링 알고리즘 의사코드 .....                                             | 17 |
| [그림 3.3] 1-hop 노드에 대한 클러스터 .....                                               | 18 |
| [그림 3.4] d-hop 노드에 대한 클러스터 .....                                               | 18 |
| [그림 3.5] 이웃 노드 테이블 .....                                                       | 21 |
| [그림 3.6] CH_STAT 메시지를 수신한 노드의 이웃 노드 테이블 ..                                     | 22 |
| [그림 3.7] Interest 메시지를 수신한 노드의 이웃 노드 테이블 .....                                 | 23 |
| [그림 4.1] 네트워크의 생존 시간 비교 .....                                                  | 29 |
| [그림 4.2] 클러스터 헤드의 개수 .....                                                     | 30 |
| [그림 4.3] 노드 개수에 따른 네트워크 생존 시간 비교 .....                                         | 31 |
| [그림 4.4] 싱크 노드가 네트워크 외부에 있을 때, d-hop에 따<br>른 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500) .....      | 33 |
| [그림 4.5] 싱크 노드가 네트워크 중앙에 있을 때, d-hop에 따<br>라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500) ..... | 34 |
| [그림 4.6] 싱크 노드가 네트워크의 임의의 지점에 있을 때,<br>d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비 .....      | 34 |
| 교 (N=500)                                                                      |    |
| [그림 4.7] d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 평균 생존 시<br>간 (N=500) .....                       | 35 |
| [그림 4.8] 싱크 노드가 네트워크 외부에 있을 때, d-hop에 따<br>른 네트워크의 생존 시간 비교 (N=300) .....      | 36 |
| [그림 4.9] 싱크 노드가 네트워크 중앙에 있을 때, d-hop에 따<br>라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=300) ..... | 36 |

|                                                                               |  |
|-------------------------------------------------------------------------------|--|
| [그림 4.10] 싱크 노드가 네트워크의 임의의 지점에 있을 때,<br>d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비 ..... 37 |  |
| 교 (N=300)                                                                     |  |
| [그림 4.11] d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 평균 생존 시<br>간 (N=300) ..... 37                  |  |

## 표 목차

|                              |  |
|------------------------------|--|
| [표 4.1] 시뮬레이션 환경 변수 ..... 26 |  |
|------------------------------|--|

## 제 1 장 서론

컴퓨터와 인간과의 관계 변화에 초점을 두고 컴퓨팅 환경의 진화 과정을 살펴보면, 현재는 제 3의 물결, 즉, 유비쿼터스 컴퓨팅(ubiquitous computing) 세대로 일컬어지고 있다. Mark Weiser에 의해 제창된 유비쿼터스 컴퓨팅 개념은 컴퓨터 사용자가 실제 일 보다는 컴퓨터 조작에 더 몰두해야 하는 문제점을 비판하며 인간 중심의 새로운 컴퓨팅 패러다임을 의미한다. 인간과 환경이 유기적으로 연계되어 다양하고 편리한 새로운 서비스를 제공하는 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서는 환경의 감지와 제어를 위해서 인프라 기술로써 무선 센서 네트워크 기술이 필요하다.

무선 센서 네트워크는 수많은 센서 노드들이 밀집된 형태로 구성되어 있으며 이들 노드 간에 무선 ad-hoc 네트워킹 능력을 가지고 있어야 한다. 그러나 센서 네트워크에 ad-hoc 네트워크를 그대로 적용할 때 몇 가지 문제점이 있다. 그것은 센서 네트워크가 많은 노드들로 구성되어 있으며, 브로드캐스트로 데이터를 전송하고 데이터 중심의 특성을 가진다는 것이다[1].

센서 네트워크의 라우팅 프로토콜은 평면 라우팅 프로토콜과 계층적 라우팅 프로토콜로 나뉘어진다. 센서 노드는 유사한 데이터의 중복 전달을 방지하기 위해 data aggregation을 수행하는데, 노드의 data aggregation 특성을 고려할 때 클러스터 헤드에서 data aggregation이 가능한 클러스터 기반의 계층적 라우팅 프로토콜이 많은 장점을 가진다. 클러스터링 기법은 ad-hoc 네트워크에서부터 많이 사용되어져 왔다. ad-hoc 네트워크에서의 클러스터링 기법에는 최상위 식별자를 중심으로 클러스터링 하는 방법, 최하위 식별자를 중심으로 클러스터링 하는 방법, 최상위 연결도를 가진 노드를 중심으로 클러스터링 하는 방법, 그리고 노드마다 부여된 가중치가 가장 높은 노드를 중심으로 클러스터링 하는 방법이 있다[4, 5, 6]. 그리고 센서 네트워크에서의 클러스터링 기법에는 확률적인 방법을 사용하여 클러스터 헤드를 선정한 후 클러스터링 하는 방법과 비교적 에너지

가 많이 남아있는 노드를 중심으로 클러스터링 하는 방법 등이 있다[2, 3]. 본 논문에서는 노드의 연결도와 잔존에너지를 이용한 하이브리드 방법으로 클러스터 헤드를 선정하고 클러스터링을 하는 알고리즘을 다룬다.

현재까지 연구되고 있는 무선 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜들은 클러스터링 기법과 클러스터 내부에서의 라우팅 방법을 다루고 있다. 클러스터 헤드에서 싱크 노드까지의 데이터 전송 방법으로 직접 통신 방식을 사용하는데, 무선 센서 네트워크의 MAC 표준이라고 할 수 있는 IEEE 802.15.4에서는 노드의 전파 전달 범위를 10m 정도로 기술하고 있다[7]. 그러므로 클러스터 헤드에서 싱크 노드까지 직접 통신을 이용하는 방법은 현실적이지 못하다. 또한 IEEE 802.15.4 표준을 따르게 되면 클러스터의 범위는 10m 정도가 되는데, 이렇게 될 경우 전체 네트워크에서 적절한 수의 클러스터를 유지할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 [8]의 d-hop에 의거한 클러스터링 방안과 홉수(hop-count)에 기반을 둔 intra/inter 클러스터 라우팅 알고리즘을 제안한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 방안이 현실적인 모델에서 다른 계층적 알고리즘보다 효율적인 기법임을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 관련연구로써 무선 센서 네트워크에 대한 소개와 계층적 라우팅 알고리즘과 평면 라우팅 알고리즘을 소개하고 3장에서는 제안하는 클러스터링 방안과 intra/inter 클러스터 라우팅 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 성능 평가 모델과 성능 평가 결과를 보이고 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 제 2 장 관련연구

### 2.1 무선 센서 네트워크 개요

무선 센서 네트워크는 컴퓨팅 능력을 가진 센서 노드들로 구성된 네트워크이며 센서 필드라고 불리는 특정 환경에 대한 정보 수집을 목적으로 한다. 센서 노드들은 센서 필드에 조밀하게 배치되며 미리 그 위치가 정해지지 않는다. 센서 필드는 통신 인프라 구조를 가지고 있는 것이 아니기 때문에 배치된 노드들은 스스로 네트워크 토폴로지를 구성해야 하며 모든 노드는 무선으로 통신한다. 또한 제한된 배터리 사용량 때문에 센서 노드는 에너지에 의존적인 라우팅 방법을 사용한다.

무선 센서 네트워크의 일반적인 구조는 (그림 2.1)과 같다.

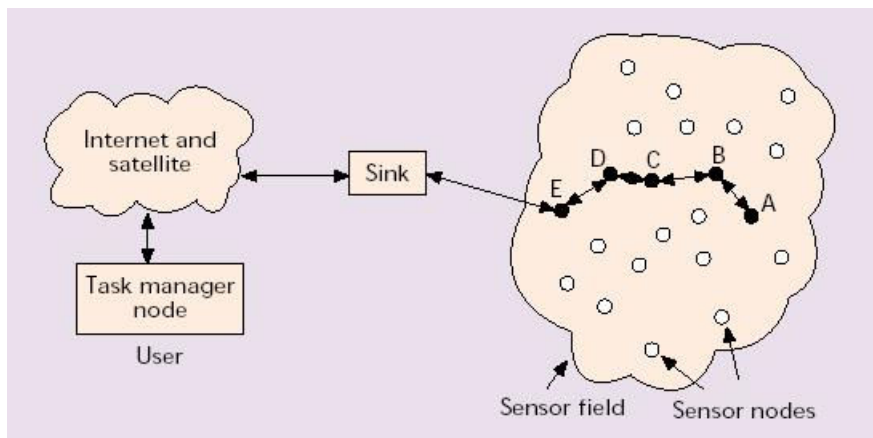


그림 2.1 무선 센서 네트워크의 구조

싱크(sink) 노드는 인터넷과 같은 외부 네트워크와 연결되어 있으며 사용자는 싱크 노드를 통하여 센서 필드에 질의 메시지를 보내거나 센서 필드에서 수집된 정보를 전달 받게 된다. 센서 노드는 초소형, 저가격, 저전력을 요구하며 기본적으로 마이크로프로세서, RF 트랜시버, AD 컨버터,

그리고 다양한 센서로 구성된다[1].

배터리에 의해 구동되는 다수의 센서 노드를 사용하는 센서 네트워크에서는 낮은 에너지 소비와 저비용의 컴퓨팅을 지향한다. 무선 센서 네트워크의 표준인 LR-WPAN이라고 불리는 IEEE 802.15.4는 짧은 범위에서 사용할 수 있는 저전력(low-power)의 무선 통신 표준을 정의하고 있으며 또한 최대 250Kbps의 데이터 전송률을 지원한다. 현재 IEEE 802.15.4를 이용해서 환경 감시, 재난 방제, 물류관리, 홈 시큐리티와 같은 다양한 센서 네트워크 응용 분야에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다.

센서 네트워크에서는 센서 노드의 에너지 제약적인 점과 수많은 센서 노드의 수를 감안할 때 기존의 IP 주소체계를 사용하기 어렵다. 그래서 브로드캐스팅(broadcasting)에 기반을 둔 라우팅 방법들이 사용된다. 센서 네트워크의 라우팅 방법은 크게 평면 라우팅(flat routing)과 계층적 라우팅(hierarchical routing)으로 구분된다. 평면 라우팅은 네트워크 전체를 하나의 영역으로 간주하여 모든 노드들이 동등하게 라우팅에 참여할 수 있으며 멀티홉(multi-hop) 라우팅을 특징으로 한다. 계층적 라우팅은 네트워크를 클러스터링을 기반으로 한 다수의 영역으로 분할하여 각각의 영역에서 특정 노드에게 헤드의 역할을 부여하여 라우팅을 수행하도록 한다[11].

센서 네트워크에는 데이터의 중복전달을 방지하기 위해 센서 노드에서 data aggregation 기능을 가지도록 한다. 그러나 평면 라우팅에서는 단말 노드(end node)에서 싱크 노드(sink node)까지 전달되는 과정에서 aggregation 된 정보가 새로운 정보와 또다시 aggregation 될 가능성이 있다. 이 경우 싱크 노드로 전달된 정보가 변질될 수도 있다. 그러나 계층적 라우팅에서는 클러스터 헤드라고 불리는 노드가 클러스터 멤버 노드로부터 정보를 수집한 후 data aggregation을 수행하고, 헤드 노드만이 싱크 노드로의 라우팅에 참여한다.

## 2.2 연결도를 기반으로 한 클러스터링 알고리즘

M. Gerla [5] 는 최상위 연결도를 가진 노드를 중심으로 클러스터링을 하는 알고리즘을 제안하였다. 연결도가 높은 노드가 클러스터 헤드가 되며 동일한 연결도를 가진 노드 중에서는 낮은 식별자를 가진 노드가 클러스터 헤드로 선정된다. M. Gerla의 알고리즘[5] 은 다음과 같이 기술할 수 있다.

### •최상위 연결도 기반 클러스터 알고리즘

- 1) 각 노드는 이웃 노드에 대한 리스트를 브로드캐스트 한다.
- 2) 클러스터 헤드가 아닌 이웃 노드 중에서 가장 높은 연결도를 가진 노드가 헤드로 선출된다.
- 3) 자신의 클러스터 헤드로써 또 다른 노드가 선출되면 그 노드는 클러스터 헤드의 역할을 포기한다.

노드의 연결도를 기반으로 한 클러스터의 구성은 모든 노드가 서로의 연결도에 대한 값을 유지해야 한다는 점에서 수많은 노드로 구성된 무선 센서 네트워크에 적합한 방법이라고 할 수 없다. 또한 노드가 이동하지 않는 경우처럼 노드의 연결도가 변하지 않으면 클러스터 헤드가 된 노드는 계속 클러스터 헤드로 선택되는 단점이 있다. 그러나 비교적 연결도가 높은 노드가 클러스터 헤드가 되기 때문에 intra/inter 클러스터 통신에서 노드의 전송 횟수를 줄일 수 있게 된다.

(그림 2.2)는 최상위 연결도 기반 클러스터 구성의 예를 보여준다.

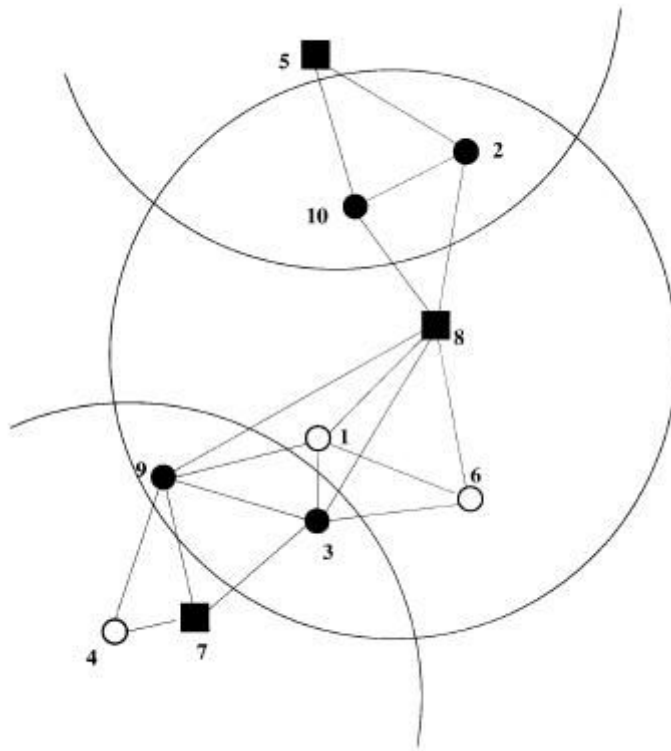


그림 2.2 최상위 연결도 기반 클러스터

## 2.3 확률을 기반으로 한 클러스터링 알고리즘

LEACH [2] 프로토콜은 네트워크 노드간의 에너지 소모를 균등하게 하기 위해서 확률 기반으로 노드간 균등한 횟수로 클러스터 헤드를 선정한다. 클러스터 헤드 노드와 멤버 노드 사이의 통신에서는 TDMA 스케줄을 사용하며 싱크 노드는 CDMA 코드에 의해서 각각의 클러스터를 구분한다. 클러스터 헤드 노드에서 싱크 노드까지 데이터 전달은 직접 통신에 의한 방법을 사용한다. (그림 2.3)은 LEACH 프로토콜의 클러스터 구성의 예를 보여준다.

LEACH 프로토콜의 동작은 다음과 같다.

### •LEACH

#### 1) 광고 단계 (advertisement phase)

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P^{*(r \bmod \frac{1}{P})}} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{식 2.1})$$

위 식에서  $P$ 는 클러스터 헤드가 될 확률을 나타내고  $r$ 은 라운드를 나타낸다.  $G$ 는 클러스터 헤드가 아닌 노드의 집합이다. (식 2.1)에 의해 계산된 임계값과 0과 1사이의 난수와 비교해서 임계값이 더 큰 경우 클러스터 헤드로 선정된다. 또한 한번 클러스터 헤드로 선택된 노드는  $1/P$  라운드 이후에 다시 클러스터 헤드가 될 수 있다. 클러스터 헤드로 선정된 노드는 이웃 노드에게 자신의 노드에 대한 정보를 브로드캐스트 한다.

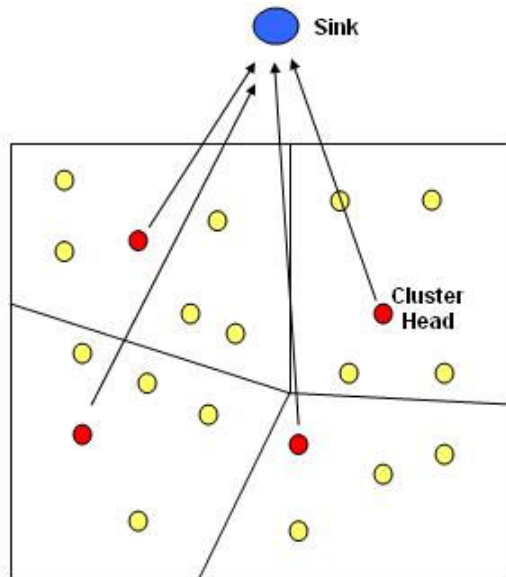


그림 2.3 LEACH 프로토콜에 의한 클러스터

2) 클러스터 설정 단계 (cluster set-up phase)

클러스터 헤드로부터 광고(advertisement) 메시지를 받은 각각의 노드는 클러스터 헤드에게 Join 메시지를 보낸다.

3) 스케줄 생성 (schedule creation)

헤드 노드는 TDMA 스케줄을 생성한 후, 자신의 멤버 노드들에게 이 스케줄을 전송한다.

4) 데이터 전송 (data transmission)

클러스터의 멤버 노드는 자신에게 할당된 전송 시간동안 데이터를 헤드 노드로 전송한다.

LEACH 프로토콜은 에너지 소비에 대한 간단한 전파 모델을 보여준다. 계층적 센서 네트워크의 프로토콜들은 대부분 LEACH의 전파 모델을 사

용하고 있으며 본 논문에서도 이를 이용한다. 전파 모델은 크게 데이터를 수신할 경우와 송신할 경우로 나뉜다. (그림 2.4)는 LEACH의 전파 모델을 나타낸다. 데이터를 수신할 때는 수신기의 전자회로에서 소모되는 에너지를 다루고, 송신할 때는 송신기의 전자회로에서 소모하는 에너지와 전송할 데이터 신호를 증폭하기 위한 에너지를 다룬다.

확률을 기반으로 한 클러스터의 구성은 클러스터 헤드가 네트워크 전체에 잘 분산된다고 볼 수 없으며 클러스터 헤드의 수가 전체 노드 수의 5%일 때 가장 효율적 이라고 해도 현실적인 센서 노드의 모델을 사용할 경우 광범위한 전체 네트워크를 여러 개의 클러스터로 구성할 때 5%이상의 클러스터 헤드가 필요하게 된다. 또한 클러스터 헤드가 된 모든 노드들은 직접 싱크 노드와 통신이 이루어져야 한다는 점에서 실제 상황에 적용되기 어렵다.

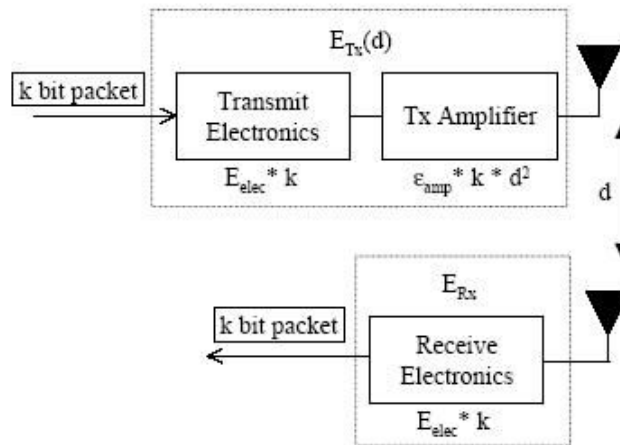


그림 2.4 LEACH의 전파 모델

## 2.4 잔존 에너지를 기반으로 한 클러스터링 알고리즘

HEED [3] 프로토콜은 노드의 잔존 에너지를 이용하여 클러스터 헤드를 선정한다. 클러스터 헤드 선정을 위한 식은 (식 2.2)와 같다.

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (\text{식 2.2})$$

위 식에서  $C_{prob}$ 는 전체 노드 중에서 클러스터 헤드의 비율을 나타내고  $E_{max}$ 는 노드의 초기 에너지를 나타내며  $E_{residual}$ 은 노드의 잔여 에너지를 나타낸다. 클러스터 헤드를 선정하기 위해서 초기에는 임계값  $P_{min}$  (e.g.  $10^{-4}$ ) 과  $CH_{prob}$  중 큰 값을 사용한다. 노드의  $CH_{prob}$  이 1이 될 때까지  $CH_{prob}$  를 2배씩 증가시켜 먼저 1이 되는 노드가 클러스터 헤드가 된다.

헤드로 선출된 노드는 평균 최소 도달 파워(AMRP)를 계산하여 이웃 노드에 이 값을 전달한다. 이 후 이웃 노드들은 AMRP를 사용해서 자신의 클러스터 헤드를 선택하게 된다. (식 2.3)은 AMRP에 대한 식을 나타낸다.

$$AMRP = \frac{\sum_{i=1}^M MinPwr_i}{M} \quad (\text{식 2.3})$$

$MinPwr_i$ 는 클러스터 헤드에서 이웃 노드  $i$ 에 데이터를 전송하기 위한 최소 파워 레벨을 의미하며  $M$ 은 이웃 노드의 수이다.

HEED 프로토콜은 클러스터 헤드 선정 방법을 제외하고는 LEACH 프로토콜의 방법을 따른다. 클러스터 내에서의 통신은 TDMA 스케줄을 이용하며 클러스터 헤드에서 싱크로의 통신은 직접 전송 방법을 사용한다. 또

한 LEACH의 전파 모델을 그대로 사용한다.

HEED 프로토콜은 에너지가 높은 노드를 중심으로 클러스터를 구성하기 때문에 LEACH 프로토콜과 비교해서 클러스터가 전체 네트워크에 잘 분산된다. 그러나 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이의 통신방법이 LEACH와 동일하다는 점에서 현실 모델에 적용하기 어렵다. 또한 HEED 프로토콜은 클러스터 헤드 선정 과정에서 노드의 동기화가 필요하다.

## 2.5 평면 라우팅 알고리즘

Directed Diffusion [10] 프로토콜은 대표적인 데이터 중심적인 (data-centric) 평면 라우팅 기법이다. 일반적으로 데이터 중심적인 라우팅 방법은 속성 기반 주소 지정(attributed-base naming)을 사용한다[9]. 싱크 노드가 interest 라고 불리는 정보 메시지를 다른 노드들에게 알려주면, 노드들은 정보 메시지의 이벤트와 일치하는 내용이 있을 경우 응답하는 방식이다. (그림 2.5)에서는 Directed Diffusion 프로토콜의 동작을 보여주고 있으며, 자세한 Directed Diffusion 알고리즘은 다음과 같다.

- Directed Diffusion

- 1) 싱크 노드는 interest 메시지를 네트워크 전체에 유포한다.
- 2) 중계 노드는 interest 메시지를 interest cache에 저장한다.
- 3) interest cache에 저장된 값을 이용하여 싱크 노드로 데이터를 전송하기 위한 gradient를 설정한다.
- 4) 다중 경로를 통해 데이터가 flooding 되는 것을 막기 위해 전송 품질이 좋은 경로를 강화(reinforcement)하고, 이후 강화된 경로를 통해서 데이터를 전송한다.

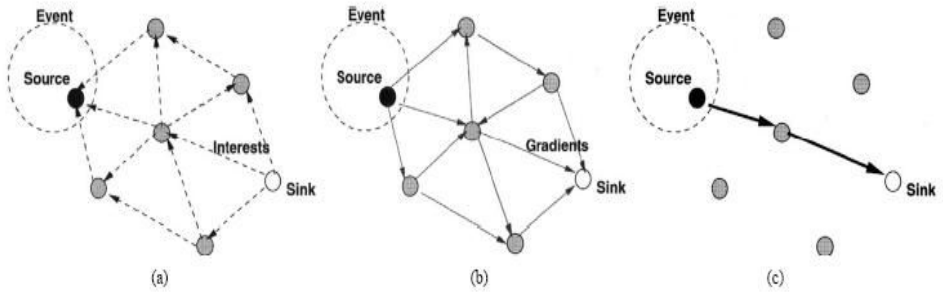


그림 2.5 Directed Diffusion 프로토콜의 동작

센서 네트워크는 데이터의 중복 전달을 피하기 위해서 data aggregation 이라는 기법을 사용한다. 중계 노드에서 이웃 노드의 데이터를 융합하는 기법인데, Directed Diffusion 프로토콜은 데이터를 전송하는 동안 계속해서 중간 노드에서 데이터가 모아지므로 인접 노드들이 유사한 데이터를 가지는 센서 네트워크의 특성을 완전하게 이용하지 못하게 된다[11]. 그러나 싱크 노드로부터 주기적으로 전달받는 interest 메시지를 사용하여 정보를 멀티홉(multi-hop) 전송 방식으로 전달하기 때문에 현실 모델에 그대로 적용할 수 있다.

### 제 3 장 제안하는 클러스터링 및 라우팅 알고리즘

클러스터 기반의 계층적 라우팅 알고리즘은 전체 네트워크를 몇 개의 클러스터로 나누고 각 클러스터 마다 클러스터 헤드라고 하는 중심 노드를 선정하여 클러스터를 관리하도록 한다. 일반적인 클러스터 기반의 알고리즘의 동작은 클러스터 헤드 노드의 선출, 클러스터의 구성, 데이터 통신의 순서로 이루어진다.

무선 센서 네트워크에서는 이러한 클러스터 기반의 계층적 라우팅 알고리즘이 평면 라우팅 알고리즘 보다 장점이 있음에도 불구하고 현실적이지 못하다는 이유로 실제로 사용되지 못하고 있다. 계층적 라우팅 알고리즘을 현실 모델에 적용하기 위해서는 센서 노드의 데이터 전송 반경을 고려해야 한다. 센서 네트워크의 표준으로 알려진 IEEE 802.15.4 에서는 센서 노드의 데이터 전송 반경을 10m로 정의하고 있으며[7], 센서 노드로 가장 보편적으로 사용되는 MICA2 역시 최대 전송 반경을 10m로 규정하고 있다[9]. 본 논문에서도 노드의 전송 반경을 최대 10m로 제한한다.

이번 장에서는 노드의 잔존 에너지와 연결도를 고려한 클러스터 헤드 선정 방안과 [8]에서 제안된 d-hop 접근방식을 이용하여 현실 모델에서 클러스터링이 이루어지는 과정을 다룬다. 또한 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이의 통신 방법으로 홉수(hop-count)를 기반으로 한 멀티홉(multi-hop)에 의한 라우팅 알고리즘을 기술한다. 이 라우팅 알고리즘은 기본적으로 최소 홉수를 가진 이웃 노드로 라우팅을 시도하며 동일한 홉수를 가진 이웃 노드 사이에서는 신호 세기가 가장 좋은 노드(가장 가까운 노드)로 라우팅 하게 된다. 애드 혹 노드와 달리 센서 노드는 자원이 제약되어 있기 때문에 라우팅을 위해서 다양한 정보를 사용하는 것보다 쉽게 획득할 수 있는 정보를 사용하는 간단한 라우팅 방법이 더 유용하다.

### 3.1 계층적 네트워크의 동작

계층적 센서 네트워크의 동작( $T_{op}$ )은 클러스터링을 위한 클러스터 동작 단계( $T_{cp}$ )와 데이터 통신을 위한 네트워크 동작 단계( $T_{no}$ )로 이루어져 있다. 일반적으로 클러스터 구성을 위한 네트워크의 오버헤드를 줄이기 위해서 네트워크 동작 단계가 클러스터 동작 단계 보다 더 큰 주기를 가지고 있다[3]. 네트워크 동작 단계는 클러스터 내부에서의 통신( $T_{intra}$ )과 클러스터 헤드의 통신( $T_{inter}$ ) 과정으로 구성되어 있으며 이 단계에서 데이터 전송이 이루어진다.

$$T_{op} = T_{cp} + T_{no} \quad (T_{no} \gg T_{cp}) \quad (\text{식 3.1})$$

센서 네트워크의 동작( $T_{op}$ )은 라운드(round)로 표현할 수 있고 하나의 라운드에서는 클러스터의 구성과 데이터의 수집, 전송이 이루어진다.

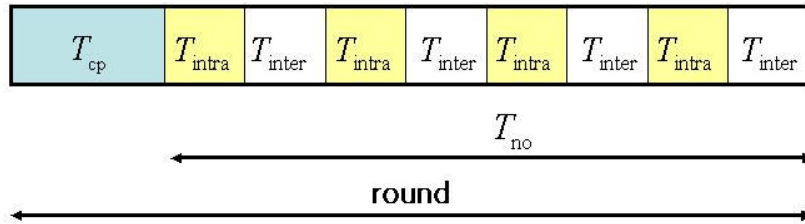


그림 3.1 계층적 네트워크의 동작 과정

### 3.2 d-hop 클러스터링

본 논문에서 제안하는 클러스터링 알고리즘에서는 클러스터가 구성되기 전에 모든 노드는 이웃 노드를 검색하여 이웃 노드의 정보(노드의 식별자, 최소 파워 세기)를 획득해야 한다. 이 과정은 클러스터를 구성하기 위한 클러스터 헤드 노드의 선택과 클러스터가 구성된 이후 클러스터 내부와 외부에서 데이터를 라우팅하기 위해 필요하다. 이웃 노드 탐색이 끝난 뒤 각 노드는 클러스터 헤드가 되기 위한 임계값을 계산한다. 그리고 0과 1 사이의 난수를 생성하여 이미 계산된 임계값과 비교한다. 이 때, 임계값이 난수보다 더 크게 되면 이 노드는 클러스터 헤드로 선정이 된다. 클러스터 헤드로 선정된 노드는 자신에 대한 정보 메시지를 이웃 노드에 전달한다. 이 메시지는 d-hop 반경까지 전달되며 이로 인해서 클러스터의 범위는 확장되게 된다.

모든 노드는 클러스터 헤드 노드의 선정에 필요한 정보를 중앙의 특정 노드로부터 받아들이는 일이 없다. 모든 정보는 이웃 노드 검색 과정과 자신의 상태를 확인하는 것으로 수집된다. 또한 클러스터 헤드 선정이후 클러스터 헤드로 선택된 노드가 클러스터를 구성하는 역할을 담당하게 된다. 즉, 클러스터링의 모든 과정은 개별 노드에서 분산적으로 실행된다. (그림 3.2)는 제안하는 클러스터링 알고리즘에 대한 의사코드를 나타낸다.

#### I. Neighbor Nodes Scan

1. send Query message
2. If (receive Query message)
3.     reply to sender
4. write neighbor's information to the Neighbor Node Table (NNT)

#### II. Make Cluster

1. compute *threshold* to select cluster head
2. generate random number  $R(0,1)$
3. If ( $threshold > R$ )

4. become a cluster head
5. send CH\_STAT message to the members  
(until the d-hop boundary)
6. receive Join messages
7. *Else*
8. not a cluster head
9. *If* (receive CH\_STAT message)
10. send Join message
11. *Else*
12. become a cluster head
13. send CH\_STAT message to the members  
(until the d-hop boundary)
14. receive Join message

**그림3.2 제안된 클러스터링 알고리즘 의사코드**

전체 네트워크 필드의 정보를 싱크 노드로 전송하기 위해서는 클러스터링 과정에서 반드시 모든 노드들이 각각의 클러스터 범위 안에 존재해야 한다. 만약 클러스터 헤드 선정 알고리즘에 의해서 선택된 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 있도록 해야 한다.

클러스터 구성에서 클러스터 헤드는 자신의 정보를 d-hop 거리의 노드에 전달함으로써 네트워크 전체의 클러스터 수를 적절하게 유지할 수 있다. LEACH 프로토콜에서는 실험을 통해서 전체 네트워크에서 5%의 클러스터 헤드가 존재할 때 전체 네트워크의 에너지 효율이 가장 좋음을 밝혔다[2]. 그러나 현실 모델에서 1-hop 노드에 대해 클러스터링을 하게 되면 이 비율을 유지할 수 없게 된다. d-hop 노드에 대해 클러스터링을 할 때, 적절한 d의 값을 이용하면 LEACH 프로토콜에서 알려진 5%의 비율에 근접한 클러스터를 만들 수 있다. (그림 3.3), (그림 3.4)는 1-hop으로 클러스터를 구성할 때와 d-hop으로 클러스터를 구성할 때, 전체 네트워크

에 존재하게 되는 클러스터 헤드의 수를 비교하는 것이다.

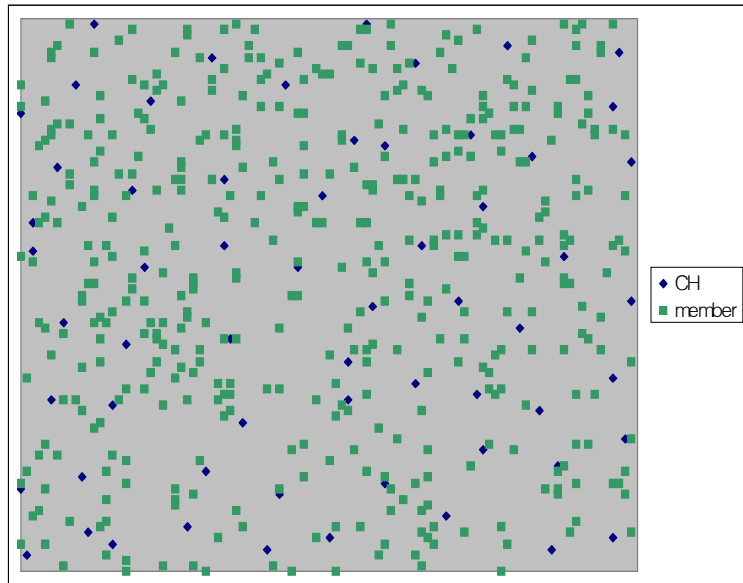


그림 3.3 1-hop 노드에 대한 클러스터

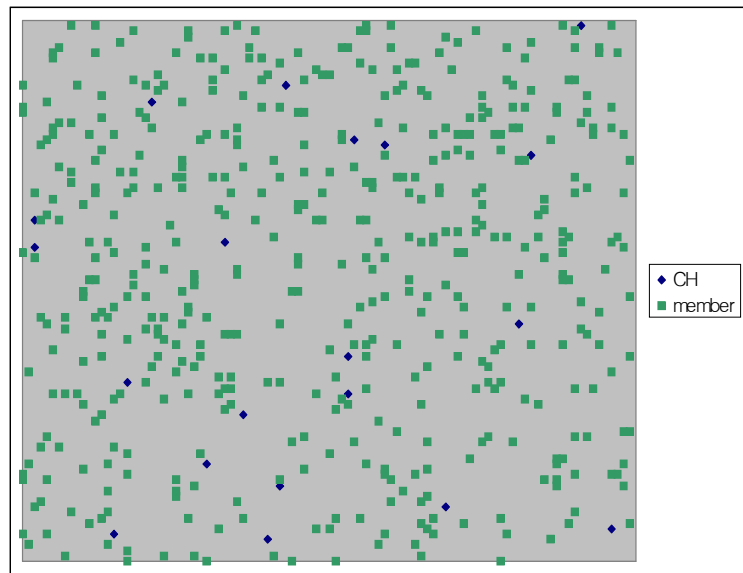


그림 3.4 d-hop 노드에 대한 클러스터

### 3.3 클러스터 헤드 선정

본 논문에서는 클러스터 헤드 노드를 선정하기 위한 요소로 노드의 잔존 에너지와 연결도를 고려하고 있다. 즉, 전체 네트워크에 배치된 노드들 중에서 잔존 에너지가 높을수록 연결도가 높을수록 클러스터 헤드가 될 확률은 높아진다.

연결도는 각 노드의 통신비용으로 계산할 수 있으며, 노드가 통신비용을 알기 위해서는 이웃 노드에 대한 탐색 과정이 필요하다. 각각의 노드는 비콘(beacon) 메시지를 사용하여 이웃 노드를 탐색한다. 이 때 응답하는 이웃 노드의 메시지를 받음으로써 이웃 노드에게 정보 전달을 위해 필요한 최소 신호 세기를 알 수 있다.

통신비용(Communication cost)은 현재 노드에서 각각의 이웃 노드에 대한 최소 신호 세기의 합으로 나타낼 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^{n_r} MinPwr_i \quad (\text{식 3.2})$$

MinPwr에 대한 신호 세기의 측정은 [9]에 제시된 직접적인 신호세기 측정법을 사용할 수 있다. 직접적인 신호 세기의 측정은, 노드  $u$ 가  $P_t$ 의 신호 세기로 데이터를 전송하고 노드  $v$ 가  $P_r$ 의 신호 세기로 데이터를 수신한 경우  $P_t$ 와  $P_r$ 의 비율로 나타낼 수 있다. 이 때 수신된 신호는 잡음(noise) 신호 보다 더 큰 세기를 가져야 의미 있는 정보가 된다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$MinPwr = \frac{P_t}{P_r} \times P_{noise} \quad (\text{식 3.3})$$

노드의 평균 통신비용(Average Communication Cost)은 (식 3.2)와 이웃

노드의 개수로 구할 수 있다.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} MinPwr_i}{n_r} \quad (\text{식 3.4})$$

연결도에 해당하는 요소는 (식 3.4)에서 계산한 평균 통신비용과 최대 신호 세기의 비율로 나타낸다.

$$\text{Connectivity} : \frac{ACC}{P_{\max}} \quad (\text{식 3.5})$$

클러스터 헤드 노드의 선정에서 에너지에 대한 요소는 각 노드가 측정한 자신의 잔존 에너지와 초기 에너지의 비율로 나타낸다.

$$\text{Energy} : \frac{E_{\text{residual}}}{E_{\text{INIT}}} \quad (\text{식 3.6})$$

(식 3.5)와 (식 3.6)에 의해서 클러스터 헤드 노드 선정을 위한 임계값 (T)은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $P_b$ 는 전체 노드에서 클러스터 헤드 노드의 비율이다.

$$T_i = \frac{1}{2} \left( \frac{E_i}{E_{\text{INIT}}} + \frac{ACC_i}{P_{\max}} \right) P_b \quad (\text{식 3.7})$$

(식 3.7)을 통해서 계산된 임계값의 범위는 0 과 1 사이가 된다. 각 노드는 위의 (식 3.7)의 임계값을 계산한 후, 0 과 1 사이의 난수를 생성하여 임계값과 비교한다. 이 때, 임계값이 생성한 난수 보다 크면 이 노드는 스스로 클러스터 헤드로 결정된다. 그리고 이웃 노드들에게 자신이 클러스터 헤드라는 사실을 알린다.

### 3.4 Intra/Inter 클러스터 통신

#### 3.4.1 이웃 노드 테이블

본 논문에서 제안하는 알고리즘에서는 네트워크의 모든 노드가 클러스터링과 intra/inter 클러스터 라우팅을 위해서 (그림 3.5)과 같은 이웃 노드 테이블을 가져야 한다. 이웃 노드 테이블에서 NID는 이웃 노드의 식별자이며, PS는 NID가 나타내는 노드까지 데이터 전송에 필요한 신호 세기를 의미한다. 본 논문에서는 직접 노드간 신호 세기를 직접 측정할 수 없기 때문에 PS에 노드간 거리를 나타내는 값을 사용하였으며 PS에 기록된 거리를 [2]의 전파 모델에 적용하였다. CHID는 노드의 클러스터 헤드에 대한 식별자이고, HC는 클러스터 헤드까지의 홉수를 나타낸다. D\_ID는 최종 목적지에 대한 식별자이며 D\_HC는 목적지까지의 홉수를 나타낸다.

|     |    |      |    |      |      |
|-----|----|------|----|------|------|
| NID | PS | CHID | HC | D_ID | D_HC |
|-----|----|------|----|------|------|

그림 3.5 이웃 노드 테이블

#### 3.4.2 클러스터 내부에서의 통신 (Intra Cluster Communication)

클러스터 내부에서 클러스터 멤버 노드가 클러스터 헤드 노드로 데이터를 전달하기 위해서는 클러스터 헤드까지의 홉수(hop-count)에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 홉수에 대한 정보는 클러스터 헤드가 선정된 이후 발행하는 헤드의 상태 정보를 나타내는 메시지(CH\_STAT)에 의해서 각 노드의 이웃 노드 테이블에 기록된다. CH\_STAT 메시지는 클러스터 헤드의 d-hop거리까지 전파되며 이웃 노드를 경유할 때마다 홉수가 1씩 증가한다. CH\_STAT 메시지를 수신한 노드는 이웃 노드 테이블에서 자신의 클러스터 헤드 식별자(CHID)와 클러스터 헤드까지의 홉수(HC)를 기

록한다. 이후 클러스터 내부에서 데이터 통신이 일어날 때, 노드는 자신이 가지고 있는 이웃 노드 테이블을 참조한다.

| NID | PS     | CHID | HC | D_ID | D_HC |
|-----|--------|------|----|------|------|
| 336 | 1      | 31   | 4  |      |      |
| 388 | 5      | 31   | 4  |      |      |
| 68  | 6,7082 | 31   | 4  |      |      |
| 237 | 6,4031 | 31   | 3  |      |      |
| 35  | 4,4721 | 31   | 3  |      |      |
| 150 | 6,4031 | 31   | 3  |      |      |
| 411 | 5,8309 | 31   | 3  |      |      |
| 132 | 6,3246 | 31   | 3  |      |      |
| 447 | 8,2463 | 31   | 3  |      |      |

그림 3.6 CH\_STAT 메시지를 수신한 노드의 이웃 노드 테이블

각 노드들은 가장 작은 HC 값을 가지고 있는 이웃 노드로 데이터를 전달하며 동일한 HC 값을 가진 이웃 노드들만 존재한다면 PS 필드의 값을 보고 거리가 가장 가까운 이웃 노드로 데이터를 전달한다(본 논문에서는 PS 값을 노드 사이의 거리로 구현하였다). (그림 3.6)의 이웃 노드 테이블에서는 NID가 35인 이웃 노드로 라우팅 한다. 홑수를 기반으로 한 데이터 라우팅 방법은 클러스터의 규모가 1-hop에서 d-hop으로 확장되더라도 쉽게 사용할 수 있다.

### 3.4.3 클러스터 헤드의 통신 (Inter Cluster Communication)

클러스터 멤버 노드들로부터 수집한 데이터는 클러스터 헤드에 의해서 멀티홉(multi-hop) 전송으로 싱크 노드로 전달된다. 클러스터 헤드가 싱크 노드와 통신이 이루어지기 위해서 싱크 노드는 주기적으로 interest 메시지를 네트워크에 전달해야 한다. 이 때 interest 메시지는 싱크 노드로부

터 전체 네트워크로 전달되며 네트워크 내에 존재하는 클러스터 헤드는 이 메시지를 사용하여 자신이 가지고 있는 이웃 노드 테이블의 D\_ID 필드와 D\_HC 필드를 기록한다. (그림 3.7)은 노드가 interest 메시지를 받은 후 D\_ID 필드와 D\_HC 필드가 채워진 이웃 노드 테이블을 보여준다.

클러스터 헤드가 싱크 노드로 데이터를 전달할 때는 이웃 노드 테이블에서 D\_HC가 가장 작은 이웃 노드를 경유하여 D\_ID 노드까지 라우팅을 한다. D\_ID 노드까지의 홑수가 동일할 경우에는 PS 필드의 값을 보고 거리가 가장 가까운 이웃 노드로 데이터를 전달한다(본 논문에서는 PS 값을 노드 사이의 거리로 구현하였다). (그림 3.7)의 이웃 노드 테이블에서는 자신의 노드 식별자에 해당하는 166을 제외한 나머지 D\_ID(0 = sink)를 가진 이웃 노드 중에서 홑수가 가장 작은 이웃 노드인 216으로 라우팅하게 된다.

| NID | PS     | CHID | HC | D_ID | D_HC |
|-----|--------|------|----|------|------|
| 139 | 8.0623 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 276 | 8.0623 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 164 | 8.0623 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 32  | 7.8103 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 376 | 6.0828 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 324 | 6.4031 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 469 | 3.6056 | 31   | 4  | 0    | 3    |
| 288 | 6.3246 | 288  | 1  | 0    | 3    |
| 264 | 5.0990 | 166  | 3  | 0    | 3    |
| 257 | 4.2426 | 166  | 3  | 0    | 3    |
| 368 | 5.6569 | 166  | 3  | 0    | 3    |
| 335 | 6.4031 | 166  | 3  | 0    | 3    |
| 294 | 7.0711 | 166  | 4  | 0    | 2    |
| 455 | 8.0623 | 166  | 4  | 0    | 2    |
| 0   | 8.6023 | -    | -  | 0    | 1    |

그림 3.7 Interest 메시지를 수신한 노드의 이웃 노드 테이블

현실 모델에서 클러스터 헤드는 직접 싱크 노드와 통신할 수 없다. 본

논문에서 제안된 클러스터 헤드의 라우팅 방안에서는 싱크 노드가 발행한 interest 메시지를 이용하여 계산된 홉수를 기반으로 한 라우팅을 사용한다. 제안된 라우팅 방안은 라우팅을 위해 특별한 라우팅 경로를 유지하는 것이 아니라 싱크 노드까지의 홉수가 가장 작은 이웃 노드로 라우팅 되기 때문에 쉽게 사용할 수 있으며, 또한 클러스터 헤드는 싱크 노드로 데이터 전송을 위해 최단 거리의 경로를 사용하게 된다.

## 제 4 장 성능 평가

제안된 계층적 센서 네트워크에서의 라우팅 알고리즘은 현실 모델에서 효율적으로 동작하도록 하는 것을 목적으로 한다. 이번 장에서는 제안된 알고리즘을 연결도를 고려한 계층적 라우팅 알고리즘, 확률을 기반으로 한 계층적 라우팅 알고리즘, 그리고 잔존 에너지를 기반으로 한 계층적 라우팅 알고리즘과 평면 라우팅 알고리즘을 비교하여 성능 평가를 한다.

올바른 성능 평가를 위해서 다음의 네트워크 모델을 따른다.

1. 네트워크 필드에 배치되는 모든 노드는 동일한 특성을 가지며, 동일한 조건에서 시작한다.
2. 네트워크 필드는 1m의 격자 구조로 이루어져 있다. 즉, 노드는 최소 1m 간격으로 네트워크 필드에 배치된다.
3. 모든 노드는 네트워크 필드 위에 랜덤하게 분포되며, 한 번 필드에 배치된 노드는 움직이지 않는다.
4. 노드는 초기에 네트워크 필드에 배치된 이후에 이동하거나 더 이상 추가되지 않는다.
5. 최대 전파 도달 거리 밖에 존재하는 노드로는 데이터 전송을 할 수 없다.

### 4.1 성능 평가를 위한 환경변수

성능 평가를 위한 도구로 계층적 센서 네트워크 라우팅 알고리즘 시뮬레이터를 C++로 구현하였다. 센서 노드를 이용하여 직접 테스트 베드를 구축하여 실험할 수 없었기 때문에 시뮬레이터를 사용하였다. 센서 노드를 이용한 직접 신호 세기를 측정할 수 없었기 때문에 노드 사이의 거리를 LEACH의 전파 모델에 적용시켜 신호 세기를 에너지 소비로 대체하여 성능 평가를 하였다.

성능 평가에 사용된 기본적인 환경변수는 [3]과 동일하게 사용되었다. 네트워크의 크기를  $100\text{m} \times 100\text{m}$ 의 정방형으로 하고 싱크 노드는 네트워크 외부에 위치할 때와 네트워크 내부에 위치할 때로 나누어 성능 평가하였으며 알고리즘의 성능은 네트워크의 생존 시간으로 평가하였다.

| 환경 변수            | 값                          |
|------------------|----------------------------|
| 네트워크 크기          | 100m x 100m                |
| 데이터 패킷 크기        | 100 bytes                  |
| 쿼리 패킷 크기         | 25 bytes                   |
| 헤더 패킷 크기         | 25 bytes                   |
| $E_{elec}$       | 50 $nJ/bit$                |
| $\epsilon_{amp}$ | 10 $pJ/bit/m^2$            |
| $E_{INIT}$       | 1 $J$                      |
| 싱크 노드의 위치        | (50,101), (50,50), (75,25) |

표 4.1 성능 평가 환경변수

## 4.2 성능 평가 모델

전체 네트워크에 대한 에너지 소비 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} E_{flat} = E_{interest} + E_{f\_comm.} \\ E_{hierarchical} = E_{clustering} + E_{interest} + E_{h\_comm.} \end{cases} \quad (\text{식 4.1})$$

평면 라우팅 알고리즘에서 에너지 소비는 interest 메시지를 전체 네트워크에 플러딩(flooding) 하는 동안 소비하는 에너지와 개별 노드들이 싱크 메시지로 데이터를 전달하는데 소비되는 에너지의 합으로 생각할 수 있다. 계층적 라우팅 알고리즘의 에너지 소비는 클러스터를 구성하는 동안 소비되는 에너지, 싱크 노드가 interest 메시지를 플러딩 하는 동안 소비되는 에너지, 그리고 데이터 통신하는 동안 소비되는 에너지로 표현되며 클러스터링 하는 동안 소비되는 에너지에는 헤드 노드가 지역적으로 브로드캐스트 하는데 소모되는 에너지, 클러스터 멤버 노드가 클러스터에 참여하기 위해 응답 메시지를 보내는 데 소모되는 에너지, 그리고 이웃 노드 탐색(제안된 알고리즘) 과정에서 소모되는 에너지로 구성된다. 또한 계층적 알고리즘의 데이터 통신에서 소모되는 에너지는 클러스터 내부에서 데이터 전달에 소모되는 에너지와 클러스터 헤드 노드가 싱크 노드로 데이터를 전송하는데 사용하는 에너지로 나눌 수 있다. 계층적 라우팅 알고리즘에서 싱크 노드가 interest 메시지를 플러딩 하는데 소비되는 에너지는 평면 라우팅 알고리즘과 동일하다. 그러나 계층적 라우팅 알고리즘에서는 클러스터를 구성함으로써 네트워크의 통신비용을 현저하게 줄일 수 있다.

성능 평가의 대상이 되는 알고리즘들은 모두 (식 4.1)의 네트워크 에너지 소비 모델을 따르며 알고리즘의 성능은 네트워크의 생존 시간으로 결정된다. 일반적으로 센서 네트워크의 생존 시간은 FND (First Node Dies)와 LND (Last Node Dies)를 사용하여 판단한다. FND는 네트워크에서 최초

의 노드가 die할 때까지의 시간을 측정하는 것이고, LND는 네트워크의 마지막 노드가 die할 때까지 측정된 시간이다. 그러나 현실적인 모델에서 센서 데이터는 멀티홉에 의하여 싱크 노드까지 전달된다. 이 때 싱크 노드 주변의 중계 노드가 모두 die 한 경우 센서 데이터는 더 이상 싱크 노드로 전달되지 못한다. 또한 이웃 노드가 모두 die 하여 다른 노드로 라우팅 하지 못하는 경우에도 센서 데이터는 더 이상 싱크 노드로 전달되지 못한다. 따라서 현실적인 모델에서 LND를 사용한 네트워크 생존 시간 측정은 의미가 없다. 본 논문에서는 네트워크의 성능 평가를 위해 FND와 고립된 노드가 발생하지 않은 상황에서 모든 클러스터 헤드가 싱크 노드로 데이터를 전달할 수 있을 때 까지를 측정한 CND (Connection Nodes Die)를 사용하였다.

## 4.3 결과 및 분석

### 4.3.1 네트워크 생존 시간

센서 네트워크의 생존 시간 실험을 위해서 각 알고리즘은 노드 수를 300, 500, 700개로 하여 네트워크 필드에 배치하였으며 제안된 라우팅 알고리즘의 d-hop값은 노드의 개수에 따라 7, 6, 5로 설정하였다. 그리고 [2, 3, 5]의 기존 알고리즘들은 현실 조건에 맞게 클러스터 헤드 노드가 싱크 노드에 데이터를 전달하기 위해서 멀티홉에 의한 전송 방식을 사용하도록 수정하였다. 실험 결과는 (그림 4.1), (그림 4.2), (그림 4.3)과 같으며 실험 결과는 3회 반복한 평균으로 나타내었다.

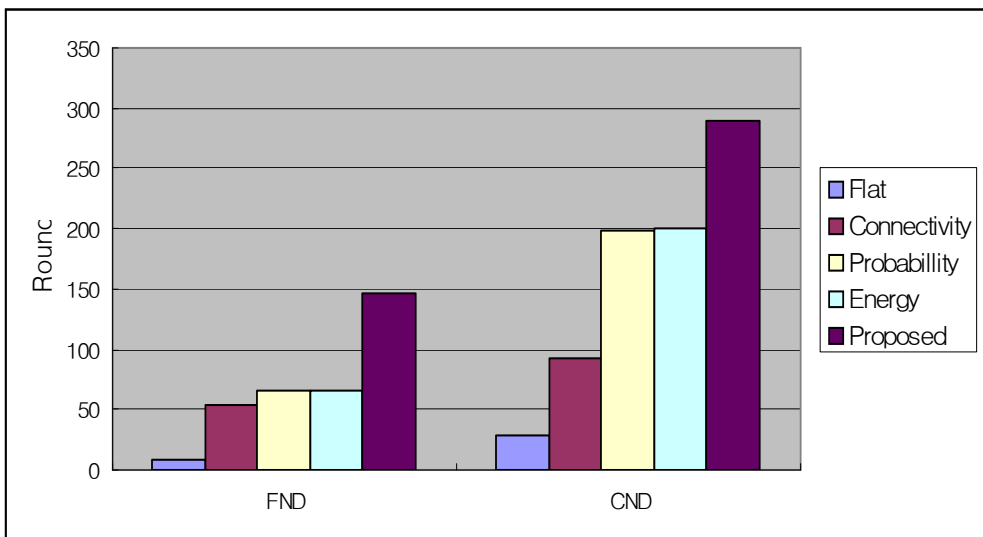


그림 4.1 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500, d=6)

(그림 4.1)의 결과처럼 클러스터 기반의 라우팅 알고리즘은 평면 기반 라우팅 알고리즘보다 우수한 성능을 보인다. 그것은 클러스터 기반의 라우팅 알고리즘에서 클러스터 헤드 노드가 data aggregation을 수행하기 때

문이다. (그림 4.2)는 클러스터 기반의 라우팅 알고리즘에서 평균적으로 발생하는 클러스터 헤드의 수를 나타낸 것이다.

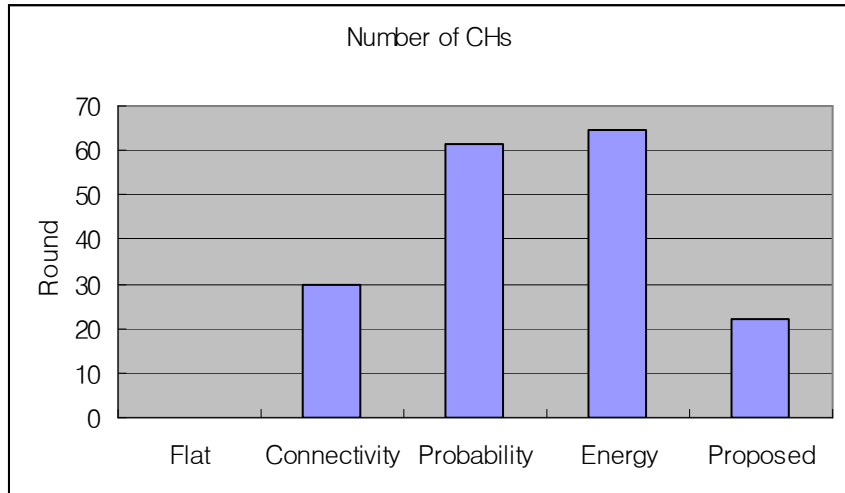
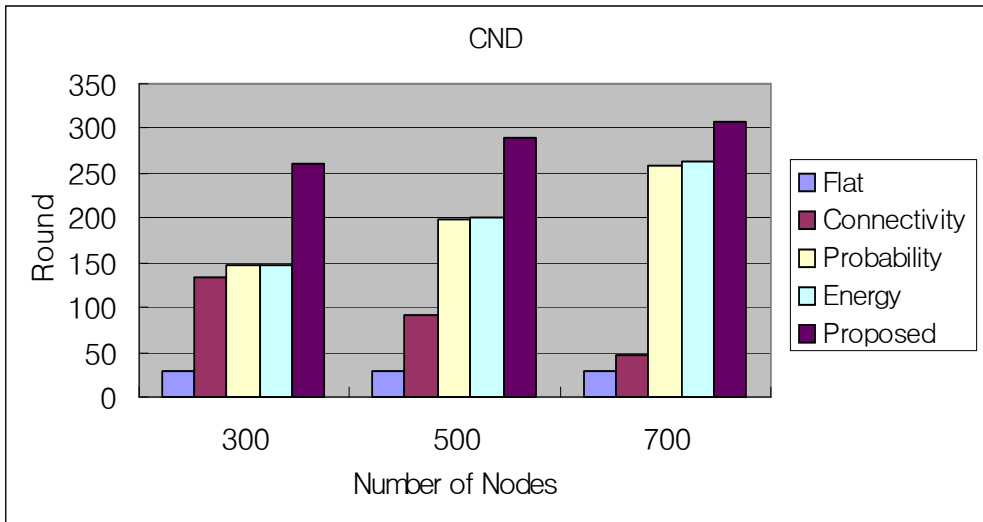


그림 4.2 클러스터 헤드의 개수 (N=500, d=6)

본 논문에서 제안한 홉수에 기반으로 한 라우팅 알고리즘을 사용하는 계층적 라우팅 알고리즘들은 클러스터 헤드의 숫자가 전체 네트워크의 생존 시간에 영향을 준다. 1-hop으로 클러스터를 구성하는 확률, 에너지 기반의 라우팅 알고리즘에 비해서 d-hop으로 클러스터를 구성하는 제안된 라우팅 알고리즘에서 네트워크의 생존 시간이 더 오래 지속된다. 이것은 (그림 4.2)에서 보여주는 클러스터 헤드의 개수가 제안된 라우팅 알고리즘에서 더 적기 때문이다. 그러나 연결도 기반의 라우팅 알고리즘이 적은 수의 클러스터 헤드를 가짐에도 불구하고 네트워크의 생존 시간이 짧은 것은 각각의 노드가 자신을 제외한 모든 노드의 연결도를 알고 있어야 한다는 점에서 연결도 정보를 브로드캐스트 하기 때문이다.

에너지 기반의 라우팅 알고리즘이 확률 기반의 라우팅 알고리즘 보다 노드의 부하 분산 효과가 크기 때문에 성능이 더 좋아질 것으로 기대되었으나, 현실 모델에 적용 하였을 때는 네트워크의 생존 시간이 비슷하게 나

타났다. 현실 모델에서는 클러스터 헤드의 부하를 분산하는 것보다 적절한 수의 클러스터를 유지하는 것이 네트워크의 수명에 더 큰 영향을 미치는 것으로 여겨진다.



**그림 4.3 노드 개수에 따른 네트워크 생존 시간 비교**  
(N=300 d=7, N=500 d=6, N=700 d=5)

(그림 4.3)의 결과처럼 제안된 알고리즘은 노드의 개수에 상관없이 우수한 성능을 유지한다. 그러나 연결도를 기반으로 한 라우팅 알고리즘은 노드의 개수가 늘어날수록 전체 네트워크의 생존 시간이 줄어드는 이유는 다른 노드들의 연결도 정보를 알리기 위해 브로드캐스트를 수행하기 때문이다. 비슷한 이유로 제안된 알고리즘에서도 노드의 개수가 늘어나면, 클러스터를 구축하기 전에 이웃 노드를 탐색 과정 때문에 노드의 개수가 적을 때 보다 다른 알고리즘과의 성능 차이가 줄어드는 것으로 보인다.

### 4.3.2 d-hop 최적화

제안된 알고리즘은 클러스터의 범위를 확장시키기 위해서 d-hop의 개념을 사용한다. 클러스터 헤드가 결정된 이후 d-hop 만큼의 거리까지 CH\_STAT 메시지를 전달하는데 d의 값에 의해서 클러스터의 크기가 결정된다. 따라서 최적의 d 값을 결정함으로써 네트워크 전체의 성능을 향상 시킬 수 있다.

이론적으로 최적화된 d의 값은 네트워크 필드의 크기(MAX\_FIELD), 네트워크 필드에 분포하는 노드의 수(NumOfNodes), 클러스터 헤드의 비율( $P_b$ )을 사용하여 계산할 수 있다.

클러스터 헤드의 수는 (식 3..9)와 같이 나타낸다.

$$nCH = NumOfNodes \times P_b \quad (\text{식 4.2})$$

2차원 네트워크 필드에서, x축에서 바라본 평균 클러스터 헤드의 수는 (식 4.3)으로 나타낼 수 있으며, 이때 클러스터의 평균 반경은 (식 4.4)로 정리할 수 있다.

$$nCH_x = \sqrt{NumOfNodes \times P_b} \quad (\text{식 4.3})$$

$$R = \left\lceil \frac{MAX\_FIELD}{nCH_x + 1} \right\rceil \quad (\text{식 4.4})$$

센서 노드의 전파 전달 반경이 10m이면 클러스터 내의 노드간 간격(Interval)은 필드의 격자가 1이라고 했을 때 1에서 10 사이가 되고, 클러스터의 반경과 d의 관계는 (식 4.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d \times Interval \geq R$$

(식 4.5)

크기가 100 x 100 인 네트워크에서 500개의 노드가 뿌려진 경우  $R=17$  이다. ( $\lceil x \rceil$  기호는  $x$  보다 작지 않은 최소 정수를 나타낸다.) 이 때 노드간 간격(Interval)에 의해서  $d$ 의 범위는 2에서 17이 사이가 되고  $\lceil d$ 의 평균  $\rceil = 6$  이 된다. 같은 방법으로 노드가 300개 일 때는  $\lceil d$ 의 평균  $\rceil = 7$  이 된다.

실험을 통해서 최적의  $d$  값을 찾기 위해 500개의 노드를 랜덤하게 분포시키고  $d$ 의 값을 1에서 20까지 변화시키며 네트워크의 생존 시간을 관찰하였다. 이 때 싱크 노드의 위치를 다르게 하여 3회 실험을 하였으며 그 결과를 (그림 4.4), (그림 4.5) (그림 4.6)으로 나타내었다.

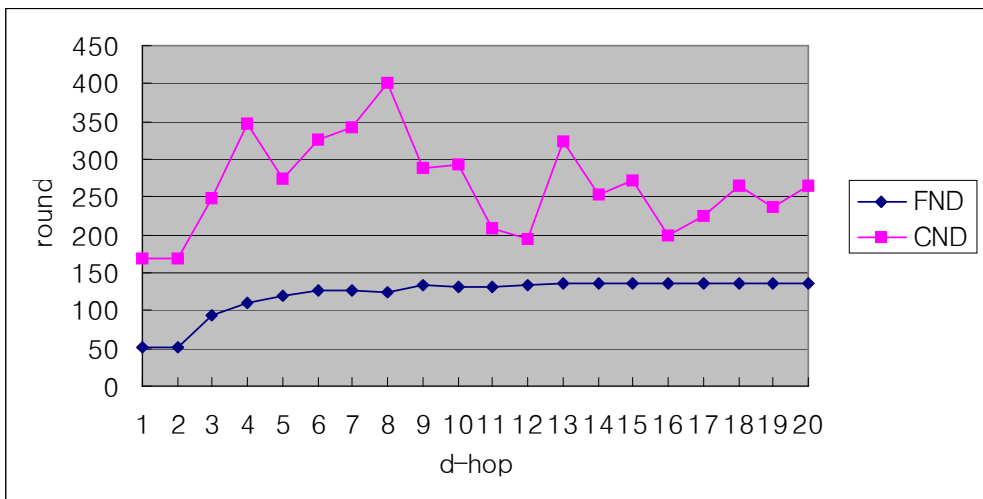


그림 4.4 싱크 노드가 네트워크 외부에 있을 때,  
d-hop에 따른 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500)

$d$ 의 값이 8일 때 네트워크의 생존 시간이 최대화 되었다.

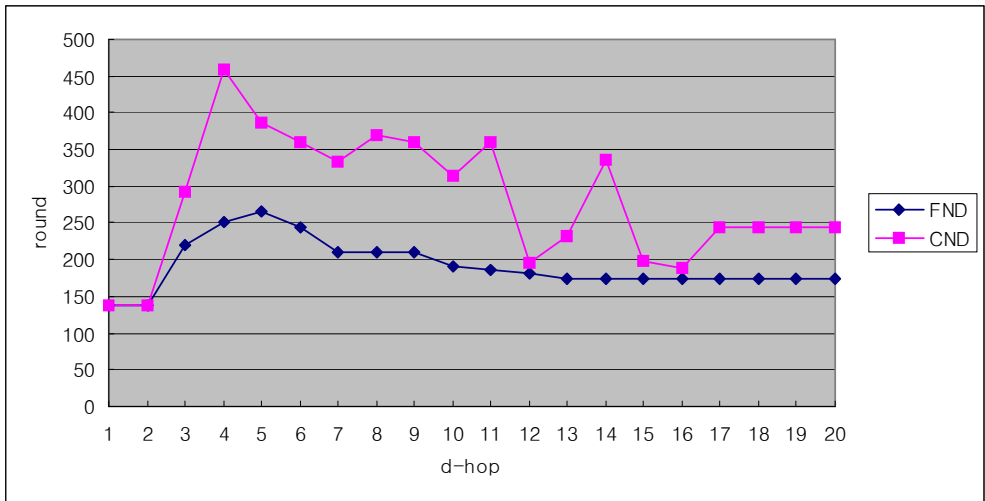


그림 4.5 싱크 노드가 네트워크 중앙에 있을 때,  
d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500)

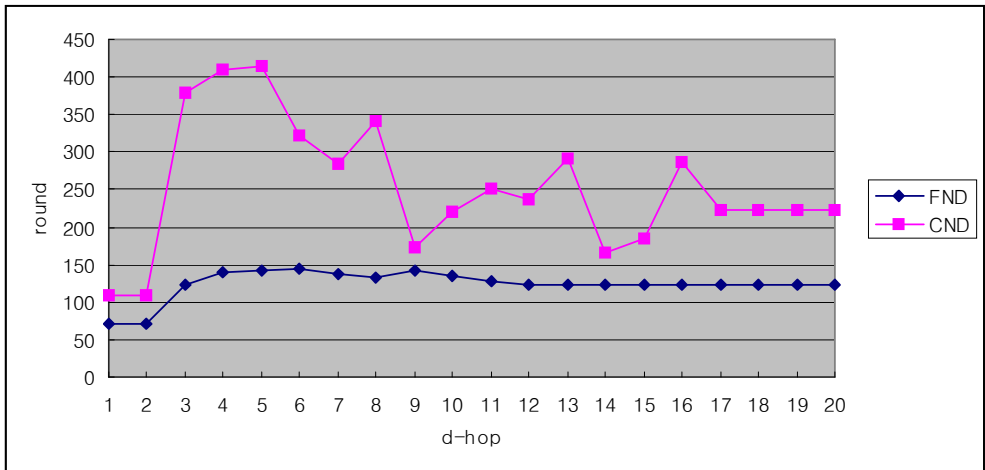


그림 4.6 싱크 노드가 네트워크의 임의의 지점에 있을 때,  
d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=500)

싱크 노드가 네트워크의 중앙에 위치할 때는 d의 값이 4일 때 네트워크의 생존 시간이 최대화 되었다. 싱크 노드가 네트워크의 임의의 지점에

있을 때 네트워크의 생존 시간을 최대화 하는 d의 값은 5일 때로 관찰되었다. d의 값에 따라 네트워크 생존 시간의 변동이 심하게 발생하였는데, 이것은 노드가 데이터 전송을 위해 멀티홉 라우팅을 사용할 때 중복된 경로에 해당하는 노드가 일찍 die 하기 때문으로 여겨진다. 제안된 라우팅 알고리즘은 전체 노드에서 약 5% 비율의 클러스터 헤드를 선정한다. 이후 클러스터를 구성할 때 d-hop의 개념을 사용하는데 d의 값을 아무리 크게 하여도 클러스터 헤드의 개수는 변하지 않는다. 즉, d의 값이 커질수록 클러스터 내에서 지역적으로 브로드캐스트 되는 쿼리 메시지의 전달 횟수가 증가하기 때문에 최적의 d 값은 모든 클러스터가 네트워크에 분포된 전체 노드를 포함할 수 있도록 하는 가장 작은 값이어야 한다. (그림 4.7)는 싱크 노드의 위치에 따라 달라지는 네트워크 생존 시간을 평균한 그래프이다.

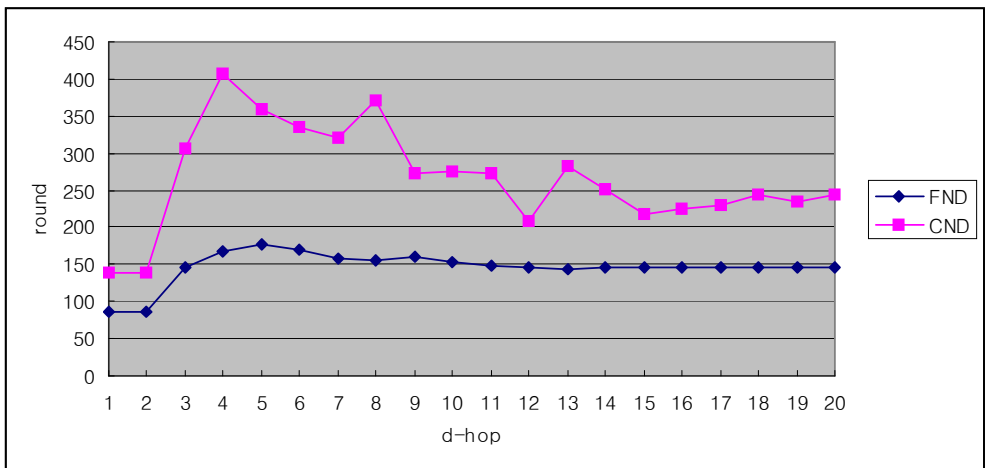


그림 4.7 d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 평균 생존 시간 (N=500)

다음은 300개의 노드를 랜덤하게 분포시키고 위와 같은 방법으로 d의 값을 1에서 20까지 변화시키며 네트워크의 생존 시간을 관찰한 것이다. 그 결과는 (그림 4.8), (그림 4.9), (그림 4.10), (그림 4.11)과 같다.

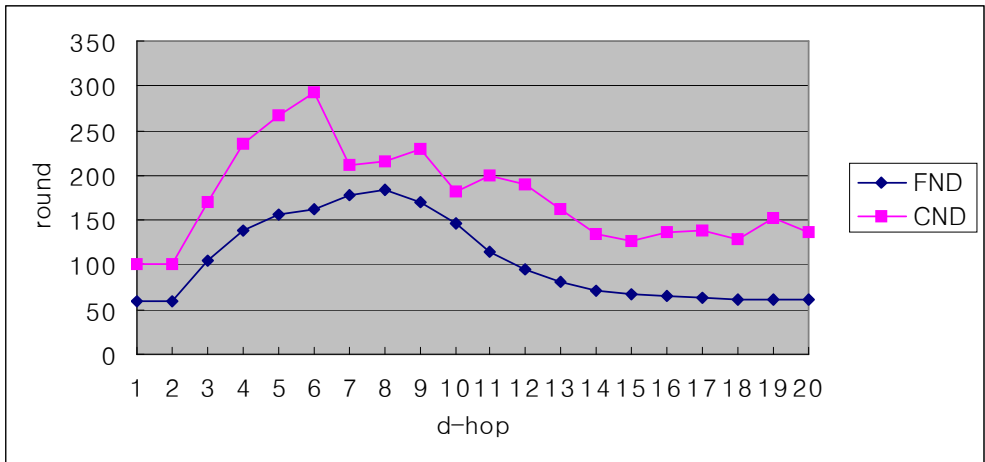


그림 4.8 싱크 노드가 네트워크 외부에 있을 때,  
d-hop에 따른 네트워크의 생존 시간 비교 (N=300)

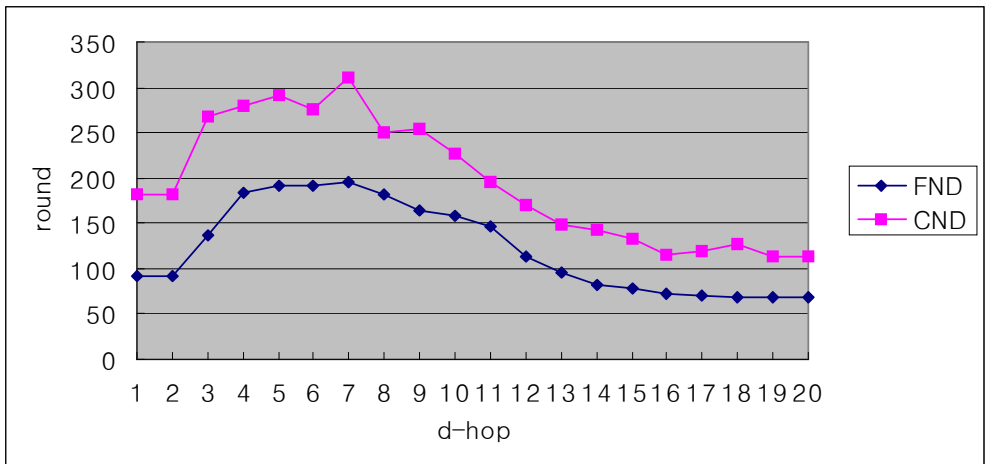


그림 4.9 싱크 노드가 네트워크 중앙에 있을 때,  
d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=300)

싱크 노드가 네트워크 외부에 있을 경우는 d의 값이 6일 때, 싱크 노드가 네트워크 중앙에 있을 경우 또는 네트워크 내부의 임의의 지점에 있을 경우는 d의 값이 7일 때 네트워크의 생존 시간이 최대화 되었다.

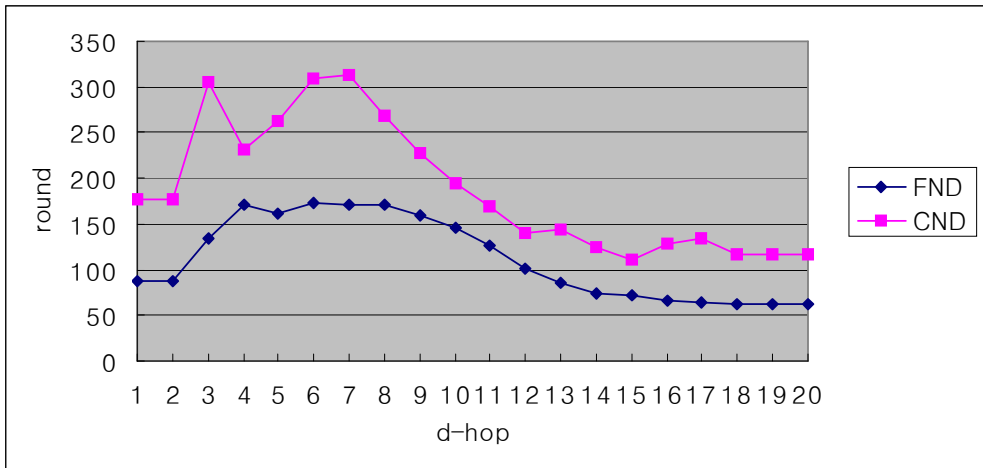


그림 4.10 싱크 노드가 네트워크의 임의의 지점에 있을 때,  
d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 생존 시간 비교 (N=300)

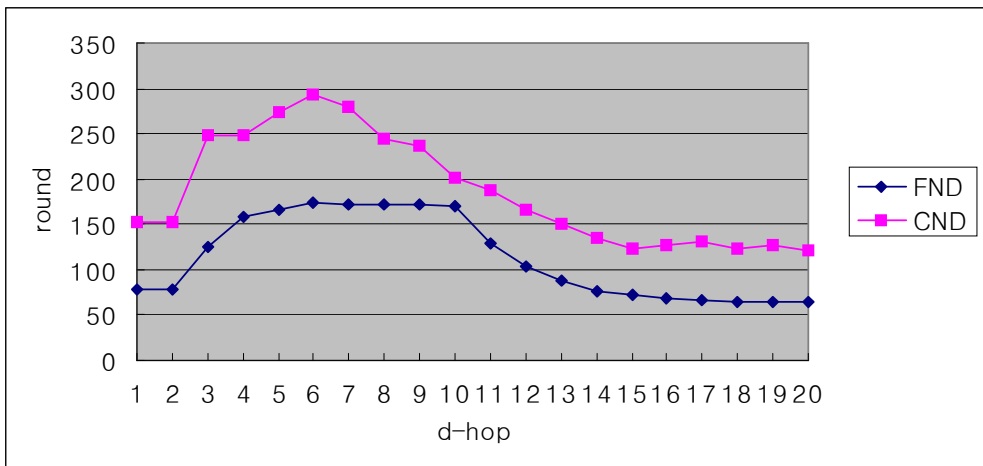


그림 4.11 d-hop에 따라 달라지는 네트워크의 평균 생존 시간  
(N=300)

지금까지의 실험 결과를 통해서 네트워크의 최대 생존 시간이  $\lceil d \text{의 평균} \rceil \pm 2$ 의 범위에서 나타나는 것을 알 수 있었다.

## 제 5 장 결론

최근 유비쿼터스 컴퓨팅 사회로의 도래와 더불어 무선 센서 네트워크라고 하는 무선 통신 기술이 각광을 받고 있다. 무선 센서 네트워크는 무수히 많은 노드들이 특정 인프라가 없는 곳에서도 스스로 토폴로지를 구성하여 통신이 할 수 있는 네트워크를 말한다. 이러한 무선 센서 네트워크는 낮은 에너지 소비(low-power)와 저비용(low-cost)을 목적으로 개발되고 있으며, 그 응용 범위가 군사적인 것에서부터 사람이 접근하기 힘든 곳에 대한 감시, 자연 환경 모니터링, 홈 네트워크의 응용으로 까지 크게 확장되고 있다.

무선 센서 네트워크에는 평면 라우팅과 계층적 라우팅 기법이 있다. 센서 노드의 데이터 융합(data aggregation) 특성을 고려한다면 클러스터 기반의 계층적 라우팅 알고리즘이 더 많은 장점을 가진다. 계층적 라우팅 알고리즘에서는 네트워크의 생존 시간을 최대화하기 위해서는 클러스터 헤드 선정이 가장 중요하다. 본 논문에서는 노드의 잔존 에너지가 많고 비교적 연결도가 높은 노드가 클러스터 헤드 노드로 선정되도록 하는 알고리즘을 제안했다. 노드의 잔존 에너지를 고려함으로써 클러스터 헤드의 부하 분산(load balancing)이 가능해 지며, 연결도를 고려함으로써 노드간 통신 횟수를 줄일 수 있게 된다. 또한 제안된 알고리즘은 무선 센서 네트워크의 MAC 표준이라고 할 수 있는 IEEE 802.15.4에서 정의한 노드의 데이터 전달 반경(10m)을 고려하여 설계되었기 때문에 현실 모델에 적용할 수 있다. 기존의 알고리즘들은 노드의 전파 도달 거리를 고려하지 않고 설계되었기 때문에 계층적 라우팅이 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 현실 모델에서 사용되지 못하였다. 클러스터 형성 과정에서 노드의 전파 도달 반경이 다소 제약적이기 때문에 넓은 지역의 네트워크에서는 많은 수의 클러스터가 발생하게 된다. 클러스터 헤드 노드의 수가 많아지면, 클러스터 헤드 노드가 싱크 노드로 데이터를 전달하기 위해 멀티홉(multi-hop) 라우팅을 사용하는데 이 때 네트워크의 전송 횟수가 늘어

나게 된다. 따라서 에너지 소비가 증가하게 되는 것이다.

본 논문에서는 d-hop 접근 방법을 사용하여 제약적인 데이터 전달 반경을 가진 노드로 구성된 네트워크에서도 적절한 수의 클러스터를 유지할 수 있도록 하였으며, 노드 사이의 통신 방법으로 홉수(hop-count)를 기반으로 한 멀티홉 전송 기법을 사용함으로써 제한된 전파 도달 반경 안에서도 클러스터 헤드 또는 싱크 노드로의 데이터 전송이 가능하도록 제안하였다.

본 논문에서는 고정된 싱크 노드에 대한 계층적 라우팅 알고리즘에 대해 기술하고 있다. 싱크 노드는 센서 필드에 대한 정보를 수집하여 처리하며 외부 네트워크에 연결된 장치이다. 싱크 노드는 경우에 따라 센서 필드에 고정될 수도 있고, 이동할 수도 있다. 또는 센서 필드가 이동할 수도 있다. 이 경우 네트워크의 클러스터링 및 라우팅 알고리즘이 센서 네트워크의 이동성을 반영해야 하는 문제점이 있다. 따라서 향후 과제로는 센서 네트워크에서 이동성을 지원하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, pp.102-114, August 2002
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," HICSS, vol.8, pp.1-10, Jan. 2000
- [3] 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, March 2004
- [4] D. J. Baker and A. Ephremides, "The Architectural Organization of a Mobile Radio Network via a Distributed Algorithm," Comm. IEEE, Vol.29, No.11, pp.1694-1701, 1981
- [5] M. Gerla and J. T. Tsai, "Multicluster, mobile, multimedia radio network," Wireless Networks, Vol.1, No.3, pp.255-265, 1995
- [6] S. Basagni, "Distributed Clustering for Ad Hoc Networks," Proc. of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, pp.310-315, 1999
- [7] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter and B. Heile, "IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks," IEEE Network Magazine, volume 15, Issue 5, pp.12-19, September/October 2001
- [8] A. D. Amis, R. Prakash, T. H. P. Vuong and D. T. Huynh, "Max-Min D-Cluster Formation in Wireless Ad Hoc Networks," Proc. of IEEE INFOCOM, vol.1, pp.32-41, March 2000

- [9] Noseong Park, Daeyoung Kim, Yoonmee Doh, Sangsoo Lee and Ji-tae Kim, "An Optimal and Lightweight Routing for Minimum Energy Consumption in Wireless Sensor Networks," IEEE RTCSA 2005, August 2005
- [10] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking(MOBICOM), pp.56-67, August 2000
- [11] 배정숙, 김성희, "무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜," ITFIND Mailzine, 제132호
- [12] 이상학, "무선 센서네트워크의 에너지 효율적인 분산 클러스터링에 관한 연구," 경희대학교 박사학위 논문, 2005
- [13] Anna Hac, "Wireless Sensor Network Designs," Wiley, 2003

## Abstract

# Clustering & Routing Algorithms in Hierarchical Sensor Networks

Dae-Young Kim

Dept. of Computer Engineering

Graduate School of Kyung Hee Univ.

There are many efficient routing algorithms in wireless sensor networks. Among those algorithms, cluster-based hierarchical routing algorithms allow that only cluster heads communicate with sink. So they are more efficient than flat routing algorithms. However, previous hierarchical routing algorithms didn't consider radio radius(10m) of a sensor node. we can not use them in real-environment.

In this paper, I propose clustering and routing algorithms in hierarchical sensor networks. The proposed clustering method selects cluster-heads considering remaining energy and connectivity of a node, and expands range of cluster using d-hop clustering. The proposed routing method uses hop-count based multi-hop routing. Through extensive computer simulations using the simulator implemented by C++ language, the efficiency of the proposed algorithms has been validated.

Key words: Wireless sensor network, Hierarchical routing, Clustering,

## 감사의 글

부푼 마음으로 지도교수님의 연구실 문을 두드리던 때가 엇그제 같은데 벌써 2년이란 시간이 흘렀습니다. 그동안 연구실에서 보낸 시간들이 주마등처럼 머리를 스치고 지나갑니다. 즐거웠던 일과 힘들고 아쉬웠던 일들이 제게는 분명히 큰 자산으로 남을 것입니다. 실수투성이였던 제가 이렇게 좋은 논문을 쓸 수 있도록 도와주신 많은 분들께 감사의 마음을 전합니다.

지금까지 아낌없는 가르침과 격려를 해 주신 지도교수님이신 조진성 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해 주시고 조언을 해 주신 한치근 교수님, 유인태 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 석사과정 동안 많은 지식을 베풀어 주신 경희대학교 컴퓨터공학과 교수님들께 감사를 드립니다.

연구실에서 힘든 시작을 함께했던 건백이형, 두경이형, 준하, 굳은 일도 마다하지 않는 경환이형, 연구실 살림을 맡아하는 충용이형, 이번에 대학원 진학을 하는 권택이, 상하, 재호, 그리고 연구실 막내 용규, 멀리 미국에 있는 정현에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

새로운 세상을 보여주었던 기영이형, 이미 연구실을 떠났지만 지난 1년 동안 함께 생활했던 천환이형, 형관이형, 어린 시절 같은 기억을 공유하고 있는 고등학교 친구들 경진이, 상목이, 상우, 언제나 나를 믿어주는 성원이 그리고 함께 조교 생활하며 의지했던 재욱에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 한결같은 사랑으로 보살펴주신 아버지와 어머니, 내 동생 인영, 그리고 힘든 시기에 의지가 되어준 연진에게 한없는 감사를 드리며 이 논문을 바칩니다.

2005년 12월 김대영 드림