

# 무선 센서네트워크에서 네트워크 수명을 최대화하기 위한 에너지 추정 기반의 라우팅 프로토콜

(An Energy Estimation-based  
Routing Protocol for Maximizing  
Network Lifetime in Wireless  
Sensor Networks)

홍 난 경 <sup>†</sup>      권 기 석 <sup>\*\*</sup>  
(Rankyung Hong)    (Kisuk Kweon)

김 호 진 <sup>\*\*</sup>      윤 현 수 <sup>\*\*\*</sup>  
(Hojin Ghim)      (Hyunsoo Yoon)

**요 약** 우리는 센서 네트워크의 전체적인 수명을 최대  
화하기 위한 라우팅 알고리즘을 제안한다. 우리는 매우 복  
잡한 환경의 센서네트워크를 대상으로 한다. 복잡한 환경은  
빌딩 내부 또는 복잡한 도심에 센서 네트워크가 배치될 수  
있다는 점에서 실생활에 바로 적용 가능한 환경이다. 복잡  
한 환경에서는 한정된 공간에 많은 장애물이 놓이기 때문  
에 장애물들 사이에 낀 좁은 공간들이 있다는 특징을 가진  
다. 좁은 공간에 놓인 센서 노드는 매우 빈번히 라우팅 경  
로로 선택되기 때문에 에너지 소비가 많이 예상된다. 이러  
한 연결노드(relay node)는 주변에 자신이 수행하는 역할을

대신해줄 대안의 노드가 적기 때문에 에너지 고갈 시 네트  
워크 분할(partition)의 문제로 이어질 수 있다. 네트워크  
분할은 네트워크에 다른 센서 노드들의 에너지가 아직 충  
분하다 할지라도 분할로 인해 데이터를 전송할 수 없는 문  
제를 야기한다. 따라서 우리의 목적은 이러한 문제를 해결  
하기 위하여 네트워크 분할과 직결된 연결노드의 에너지를  
고려하여 네트워크가 최대한의 수명을 가질 수 있게 하는  
라우팅 프로토콜을 제안한다. 우리가 제안하는 라우팅 알고  
리즘은 크게 가중 그래프(weighted graph)를 통한 네트워  
크 추상화(abstraction)과정과 에너지 추정(estimation) 알  
고리즘을 거친다. 가중 그래프는 전체 토폴로지를 고려하여  
목적지까지 이르는 모든 길에 대한 정보를 알려주고, 에너  
지 추정 알고리즘을 통해 추가적인 통신 비용 없이 라우팅  
정보를 유지할 수 있다. 본 논문에서는 전체적 지형의 추상  
화된 정보를 기반으로 사용 빈도가 높은 노드의 에너지를  
관찰, 보호함으로써 전체적인 네트워크의 수명을 연장 및  
라우팅 복잡도를 낮추는 라우팅 프로토콜을 제안한다.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, 네트워크 수명 최대화, 에  
너지 추정 라우팅 프로토콜, 토폴로지 기반의  
네트워크추상화, 가중 그래프

**Abstract** Wireless sensor networks are closely rela-  
ted with the geometric environment in which they are  
deployed. We consider the probable case when a routing  
protocol runs on an environment with many complex  
obstacles like downtown surroundings. In addition, there  
are no unrealistic assumptions in order to increase  
practicality of the protocol. Our goal is to find a routing  
protocol for maximizing network lifetime by using only  
connectivity information in the complex sensor network  
environment. We propose a topology-based routing algo-  
rithm that accomplishes good performance in terms of  
network lifetime and routing complexity as measures.  
Our routing algorithm makes routing decision based on a  
weighted graph as topological abstraction of the complex  
network. The graph conduces to lifetime enhancement by  
giving alternative paths, distributing the skewed burden.  
An energy estimation method is used so as to maintain  
routing information without any additional cost. We show  
how our approach can be used to maximize network  
lifetime and by extensive simulation we prove that our  
approach gives good results in terms of both measures -  
network lifetime and routing complexity.

**Key words** : Wireless sensor networks, Maximizing  
network lifetime, Energy Estimation  
routing protocol, Topology-based net-  
work abstraction, Weighted graph

· 이 논문은 2007 한국컴퓨터종합학술대회에서 '무선 센서네트워크에서  
네트워크 수명의 최대화를 위한 에너지 추정 기반의 라우팅 프로토콜'  
의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 정 회 원 : 한국과학기술원 전산학과  
nkhong@nslab.kaist.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 비 회 원 : 한국과학기술원 전산학과  
kskweon@nslab.kaist.ac.kr  
hojin@nslab.kaist.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종 신 회 원 : 한국과학기술원 전산학과 교수  
hyoon@nslab.kaist.ac.kr

논문접수 : 2007년 10월 2일

심사완료 : 2008년 2월 14일

Copyright©2008 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저  
작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니  
다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와  
출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송  
등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을  
지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제14권 제3호(2008.5)

## 1. 서 론

센서 네트워크는 센서가 배치되어 있는 지형적 환경  
에 매우 밀접한 연관을 갖는다. 우리는 이런 복잡한 환  
경이 가진 핵심적인 특징을 제시한다. 한정된 센서 네트

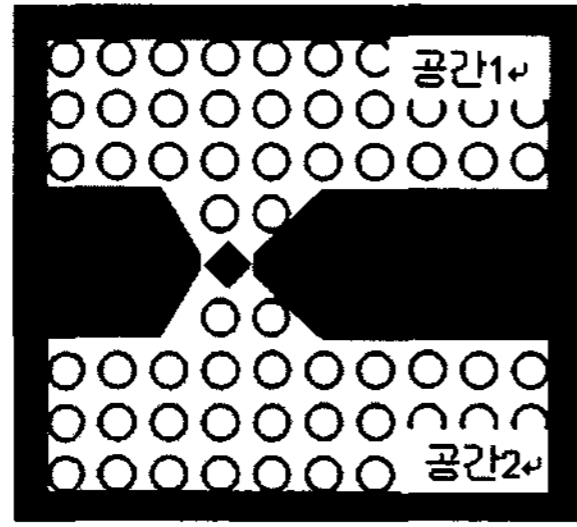


그림 1 장애물로 인하여 발생하는 좁은 지역과 좁은 지역을 담당하는 D노드(마름모 모양)

워크에 많은 장애물이 존재함으로 인하여 장애물과 장애물 사이에 좁은 지역들이 생긴다. 그림 1에서와 같이 좁은 지역에 놓인 노드는 두 공간을 이어주는 문(door)의 역할을 한다. 이런 D노드(Door node)들은 데이터 전송 경로로서 선택될 가능성이 높기 때문에 다른 노드들에 비해 급격히 에너지가 줄어들 가능성이 크다. D노드의 에너지 고갈은 네트워크 분할을 일으키고 이는 다른 노드들이 살아있음에도 불구하고 공간을 넘나드는 데이터를 전송하지 못하게 된다.

따라서 이런 복잡한 환경의 특징으로 인한 문제를 해결하기 위해서는 장애물이 많은 복잡한 환경의 센서 네트워크에서 네트워크 수명을 최대화하는 효율적인 라우팅 프로토콜에 대한 연구가 절실히 필요하다.

제안할 알고리즘의 개괄적인 방법은 다음과 같다. 우선, 가중 그래프를 통해 모든 경로의 정보와 D노드들의 에너지 변화정보를 제공한다. 그리고 우리가 가장 크게 기여하는 부분으로서 D노드들의 남아있는 에너지량을 추정하는 알고리즘은 D노드들이 매번 변하는 에너지 정보를 업데이트 하기 위하여 모든 노드와 정보를 주고받는 막대한 통신 비용을 획기적으로 줄인다. 경로 설정에 소모되는 비용이 적게 들고 D노드의 수명연장을 위한 대안의 경로를 선택함으로써 궁극적으로 네트워크의 수명을 연장하는 결과를 가져온다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련된 기존 연구를 살피고 연구 동기를 밝힌다. 3장에서는 풀고자 하는 문제에 대한 정의와 가정을 기술한다. 4장에서는 본 논문에서 제안하고 있는 복잡한 환경에서 네트워크 수명 연장을 위한 라우팅 프로토콜에 대하여 설명한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺고 향후 연구과제에 대하여 언급하겠다.

## 2. 관련 연구 및 연구 동기

센서 네트워크의 환경에 따라 같은 알고리즘이라 할지라도 다른 결과를 이끈다. 장애물이 없는 경우에는 좋은 성능을 보이는 Greedy forwarding[1]일지라도 장애

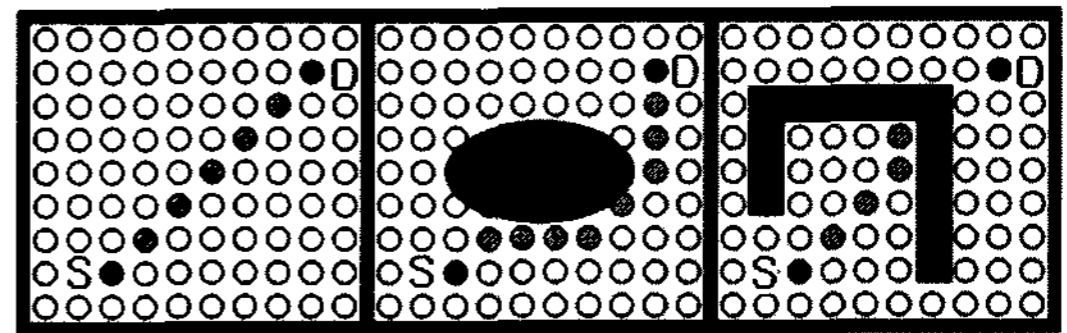


그림 2 Greedy forwarding 알고리즘을 통해 구해진 출발노드(S)부터 목적노드(D)까지 경로, (a) 장애물이 없는 경우; (b) 블록한 장애물이 있는 경우; (c)오목한 장애물이 있는 경우(경로 설정 실패)

물과 네트워크 환경이 바뀌게 되면 경로 설정 실패(데이터전송 불가)가 발생하기도 한다(그림 2(a)). 경로 설정 보장을 위하여 Perimeter routing 또는 Face routing[1-3]이 제안되었지만 보장된 경로를 찾기 위한 오버헤드가 크다는 문제점을 가진다.

이런 문제를 해결하기 위하여 장애물로 인해 복잡해진 네트워크의 지형적 정보를 경로 선택 과정에 적용한 알고리즘들이 제안되었다. 네트워크 추상화 과정을 위하여 Qing Fang et al.의 경계표(Landmark) 노드를 사용한 GLIDER[4] 프로토콜과 Jehoshua Bruck et al.의 중앙선(Medial axis)을 이용한 MAP[5]은 좋은 성능을 가진다. 하지만 경계표의 위치 선정 문제뿐만 아니라 경계표와 중앙선에 의해 추상화된 네트워크 정보 위에서 항상 목적 노드에 이르는 최단거리 경로만을 선택하기 때문에 좁은 지역에 놓인 D노드들의 에너지를 고려하지 못하는 문제를 가진다. 즉, 그림 3(b)에서 출발노드 p로부터 목적노드 q까지 MAP 프로토콜에 의해 정해지는 경로는  $t_1, t_2$ 를 통해서는 점선과 같다. 중앙선 위에서 짧은 경로를 기준으로 라우팅을 하므로 좁은 지역 쪽으로만 경로가 설정된다. 이때 좁은 지역에 놓이는 노드들은 상대적으로 급격히 에너지가 소비되는 문제가 생긴다.

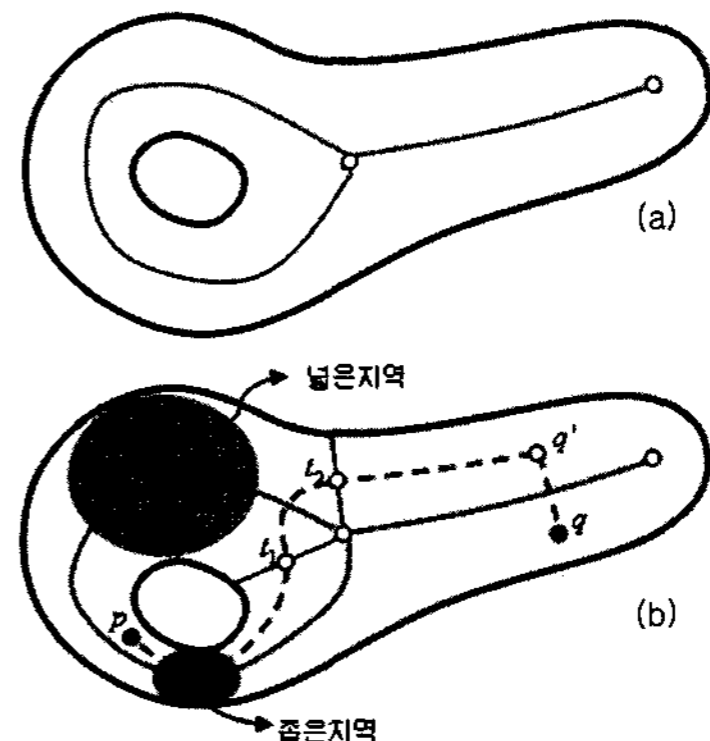


그림 3 (a) Medial axis(네트워크 중간에 놓인 선), (b) 좁은 지역 노드들의 급격한 에너지 소비 고려하지 않음

이전 연구 논문들이 복잡한 환경에서는 실질적 경로의 효율성이나 에너지 또는 네트워크 수명과 관련하여 효율적이지 않다는 점을 알 수 있다. 따라서 우리는 복잡한 환경에서 생길 수 있는 좁은 지역의 노드들을 고려하여 네트워크 수명을 연장하는 라우팅 알고리즘을 연구하고자 한다.

### 3. 문제 정의 및 가정

우리는 그림 4와 같이 복잡한 센서 네트워크 환경에서 전체 네트워크의 수명을 최대한으로 연장하기 위한 효율적인 라우팅 문제를 푼다. 네트워크 수명의 정의는 네트워크가 분할되기 전까지의 시간을 말한다.

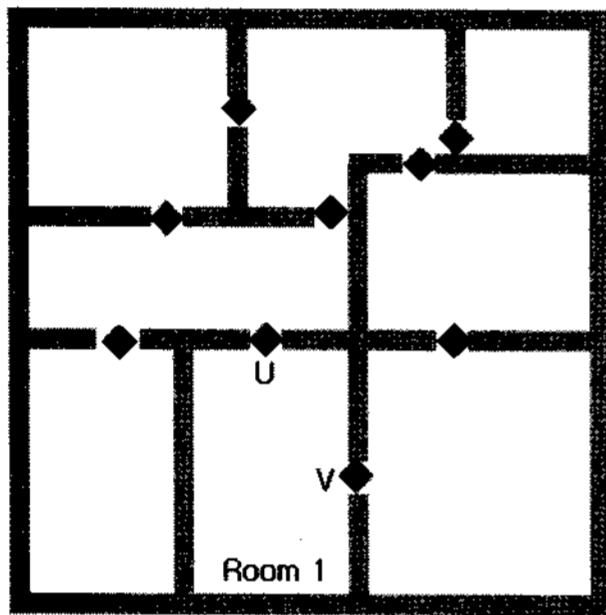


그림 4 본 논문이 목표로 하는 응용 환경의 예시 (D노드는 Room 1에서 U, V와 같은 노드)

우리는 비현실적인 가정들은 제외한다. 임의의 크기와 모양을 가진 영역 A(Sensing area) 안에 모든 영역을 커버할 수 있는 센서 노드가 자유롭게(random) 분산되어 있다고 가정한다. A안에 자유롭게 위치하는 장애물의 크기와 개수에 따라 센서가 놓일 수 없는 면적이 달라지므로 센서의 개수 역시 고정되지 않는다. 그리고 제안하는 라우팅 알고리즘은 위치 정보, 각(angular) 정보, 거리정보를 가지고 있지 않으며 단지 통신 그래프(communication graph)만을 사용하여 주변 노드와 연결을 기반으로 하는 hop만을 기준으로 동작한다.

#### 3.1 네트워크 수명 연장을 위한 에너지 추정 기법을 사용한 토폴로지 기반의 라우팅 프로토콜

D노드들은 일반 노드보다 라우팅에 관여할 확률이 크므로 에너지 소비가 더 급격히 일어난다. 이를 고려하고 이런 D노드들의 에너지를 추정하는 방식으로 통신 비용을 줄여서 네트워크 수명을 오래 유지하는 것이 우리가 제시하는 라우팅의 방향이다.

##### 3.1.1 준비단계 - 경계선 인지를 통한 이름 정하기

라우팅을 위하여 준비단계로 Y Wang et al.[6]이 제안한 경계선 인지 방법을 센서네트워크 영역 A에 적용하면 모든 노드(v)들은 다음의 형태의 이름표를 가지게 된다.

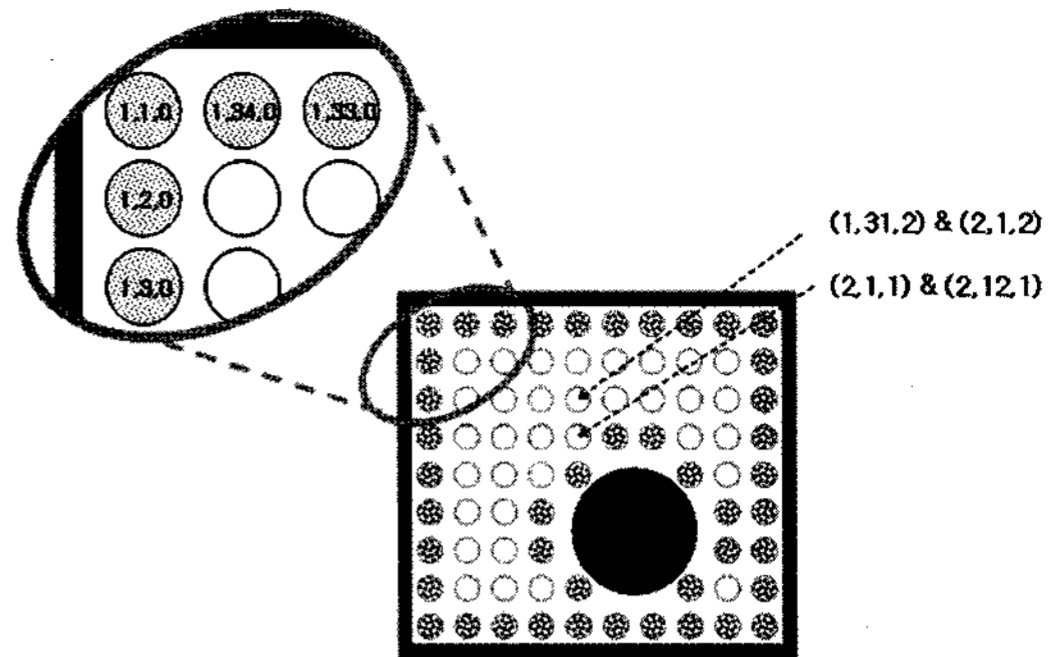


그림 5 [6]을 통해 얻어진 이름 정하기(Naming) 결과 이름표 형식 :  $(i, \ell_i(v), h_i(v))$

- $i$  = 경계선 고리(boundary cycle)의 아이디
- $\ell_i(v)$  = 고리(cycle)의 시작점( $\ell_i(v) = 1$ )을 기준으로 거쳐온 홉(hop)수
- $h_i(v)$  = 경계선노드( $h_i(v) = 0$ )로부터 떨어진 최소 홉수

이름표의 첫 번째 인자는 의미 있는 경계선마다 유일한 아이디이고 두 번째 인자는 고리 시작점 노드부터 일정한 방향으로 데이터를 전달하면서 정해진 순서이다. 그리고 마지막 인자는 그림 5에서 음영이 들어간 센서 노드처럼 자신으로부터 가장 가까운 경계선 노드로부터 이르는 홉 수를 의미한다.

##### 3.1.2 D노드와 R노드의 선택

D노드와 R노드는 가중그래프를 구성하는 노드로써 사용된다. 우선 경계선 노드까지의 거리가  $\alpha$ 홉 이내에 위치하는 노드 중 로컬하게 가장 좁은 지역에 놓인 노드가 D노드로 선택된다. R노드의 선택은 D노드가 선택된 이후에 주변에서 가장 많은 D노드를 아는 노드가 R노드가 된다(그림 6). 그 이후 에너지 소비로 인해 R노드의 역할 교환은 기존에 연구된 에너지 소비를 고려한 헤더 선출 알고리즘을 따른다.

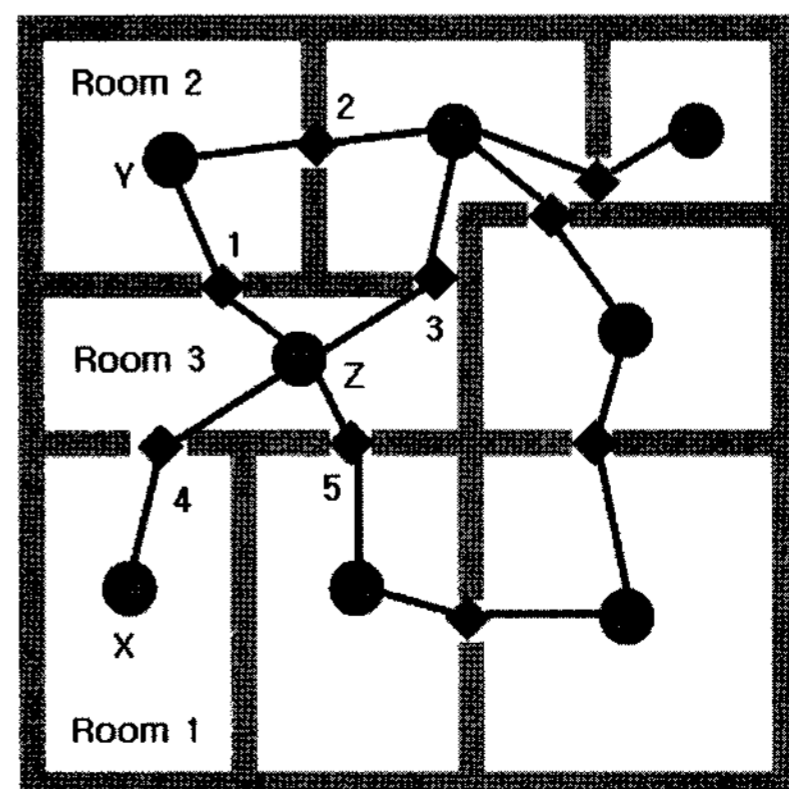


그림 6 선택된 D노드(마름모모양)와 R노드(원모양)

3.1.3 넓이 추정

R노드가 담당하는 각 공간(Room)에 몇 개의 센서 노드들이 산재해 있을지는 알 수 없지만 데이터는 영역의 넓이에 균등한 비율로 발생한다. 이 정보는 D노드 에너지 추정을 통한 그래프 정보 유지를 위한 추정의 근거 자료로 사용된다. 추정의 아이디어는 길이 L의 선분이 있을 때 이것을 가지고 가장 큰 넓이를 갖기 위해서는 선분 L로 만들 수 있는 원을 그리는 것이라는 사실로부터 출발한다.

각 R노드는 자기가 담당하는 D노드들의 정보를 바탕으로 각각 D노드의 경계선 노드 이름표의 첫 번째 인자 값인  $i$ 값과 같은  $i$ 값을 가지는 다른 D노드의 경계선 노드를 찾는다.  $i$ 값이 같은 쌍을 두 번째 인자 값이 증가하는 순서대로 연결을 하면 그림 7에서 보는 바와 같이 가상의 원을 그릴 수 있다. 이 가상의 원은 그림 6을 기반한 예제로, 이때 D노드 사이의 길이는 이름표의 두 번째 인자의 차가 되며, 이것이 의미하는 것은 D노드 사이에 놓이게 되는 경계선 노드의 흡의 정보를 나타낸다. R노드는 식 (1)을 이용하여 선분 L로 만들 수 있는 가장 큰 영역의 넓이를 구할 수 있다. 이것이 의미하는 것은 R노드가 담당하고 있는 공간의 최대 가능한 넓이가 된다.

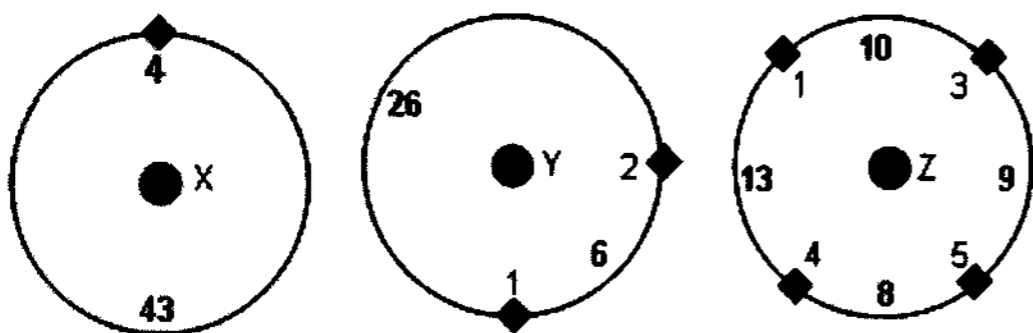


그림 7 각 R노드(X,Y,Z)가 가질 수 있는 최대 공간

$$\text{원의 넓이} = \frac{\text{둘레}^2}{4\pi} \tag{1}$$

만일 센서 노드가 균일하게 분포될 때 단위 넓이당 하나의 센서가 놓인다고 대표 할 수 있기 때문에 우리는 영역의 넓이를 대표하는 것으로써 하나의 R노드가 담당하는 한 공간에 위치할 수 있는 최대 노드 개수(R node's family node; RFam node)를 사용한다. 그리고 전체 네트워크 개수(Nmax)의 최대가능 값의 추정은 식 (2)와 같이 모든 RiFam의 합으로 간단히 구한다.

$$N_{\max} = \sum_i R_i \text{Fam} \tag{2}$$

3.1.4 네트워크 토폴로지 구성

모든 R노드는 구해진 다른 R노드의 추정 값을 얻어 와서 가중그래프를(weighted graph) 조직한다. 식 (4)와 같이 라우팅 정보를 유지하는 R노드를 정점(vertex)으로 하고 D노드의 에너지정보를 담고 있는 추정 값을

에지 비용(edge cost)으로 하는 그림 6과 같은 네트워크 토폴로지를 구성한다.

$$\text{Vertex} = R\text{-node}$$

$$\text{Edge cost function} = \frac{E_i^{x_1}}{E_i^{x_2}} \times \mu \times H(R_i, R_j)^{x_3} \tag{4}$$

여기서  $E_i$ 는 Di노드의 초기 에너지량,  $E_i$ 는 Di노드의 잔여 에너지량, H는 Di노드와 근접한 다른 D노드까지의 실제 흡 수,  $\mu$ 는 상수, 그리고  $x_1, x_2, x_3$ 은 양수 가중 팩터(nonnegative weighted factors)이다.

3.1.5 라우팅

데이터의 발생은 네트워크 영역에 균등하고 자유롭게 발생한다. 그리고 각 데이터 요청은 req( $R_s, R_d$ ) 형식으로  $R_s$ 노드에 있는 출발노드(source node)부터  $R_d$ 에 있는 목적노드(destination node)까지 데이터를 보내게 된다. R노드들은 위에서 구해진 가중그래프를 기반으로 모든 다른 R노드에 이르는 길을 구할 수 있다. 선택된  $R_s, R_d$  사이의 경로는 소스라우팅 형식으로 데이터 패킷 헤더에 표시된다. 이때 식 (4)의 에지 비용 값을 변화하여 원하는 목적에 맞는 라우팅을 구현할 수 있다 [참조 표 2].

표 2 가중 그래프에서 에지 비용의 가중 팩터 설정이 좌우하는 라우팅 의미

( $x_1, x_2, x_3$ )	라우팅 의미
(0, 0, 0)	D-node를 최소로 포함하는 경로 선택
(0, 0, 1)	최소 흡 수를 가지는 경로 선택
( $x, x, *$ )	정규화한 잔여 에너지를 사용한 경로 선택
(0, *, *)	절대적인 잔여 에너지를 사용한 경로 선택

3.1.6 에너지 추정 기법을 통한 라우팅 정보유지

구성된 가중 그래프 정보를 계속적으로 유지하기 위하여 모든 R노드는 D노드들의 현재 남아있는 에너지량 ( $E_i$ )을 계속적으로 추적해야 한다. 하지만 이것은 많은 통신 비용을 발생한다.

매 단위 시간마다 req( $R_s, R_d$ )의 데이터 요청이 발생할 때, 잔여 에너지량은 P(Di)라는 확률로 그 값이 감소한다. P(Di)가 의미하는 것은 현재 발생한 요청을 처리하기 위한 경로 중에 Di노드를 지나가게 될 확률의 값을 의미한다.

$$P(D_i) = \sum_k \frac{\# \text{ of } D_i \text{ - nodes in path}_k}{\text{total \# of paths}} \times P(\text{req}(R_i, R_j)) \times \alpha \left\{ \frac{1}{\# \text{ of path}(R_i, R_j)} \right\} \times \beta \left\{ \frac{\mu'}{H(R_i, R_j)} \right\}$$

$$\text{단, } P(\text{req}(R_i, R_j)) = P\left(\frac{R_i \text{Fam}}{N_{\max}}\right) \times P\left(\frac{R_j \text{Fam}}{N_{\max}}\right) \tag{5}$$

$P(D_i)$ 는 4.3절에서 추정으로 구해진 값을 기반으로 식 (5)와 같이 확률 값을 설정된다. 그래서 매 단위 시간마다 R노드는 하나의 0과 1사이의 하나의 랜덤변수를 정하여  $P(D_i)$ 값보다 큰 경우의  $D_i$ 노드의 잔여 에너지량을 줄여나간다. 이와 같은 방식으로 매 번의 플러딩 없이 각 R노드는 D노드의 잔여 에너지량을 추정하며 가중 그래프의 에지 비용의 값을 업데이트한다.  $\alpha, \beta$  설정은 에지 비용 값을 구할 때 사용하는 요소와 맞추어 적절한 상수 값으로 적용한다. 이렇게 구해진  $P(D_i)$ 값을 사용하여 모든 R노드가 추가의 데이터 전송 없이 경로를 선택하게 되므로 굉장한 라우팅 복잡도를 줄이게 된다.

에너지 추정에 있는 불확실 도를 줄이기 위한 보조적인 수단으로 피기백(piggyback) 정보를 사용한다. 데이터를 전송하는 동안 거처온 D노드들의 실제 잔여 에너지량을 피기백킹 함으로써 추가적인 비용 없이 비주기적으로 정보를 업데이트한다.

#### 4. 결론

본 논문은 복잡한 센서 네트워크 환경에서 데이터 전송이 집중되는 D노드의 특징을 사용한 라우팅 프로토콜을 제안하였다. D노드의 에너지 고갈은 네트워크 분할을 일으키는 밀접한 연관을 가지기 때문에 라우팅 경로 선택 시 D노드의 에너지량을 고려하여 평등한 에너지 소비를 유도한다. 이를 위해 우리는 가중 그래프의 에지 비용의 함수를 D노드의 에너지와 연관시킴으로써 D노드의 잔여 에너지를 계속적으로 고려하는 라우팅 프로토콜을 제안했다. 뿐만 아니라 가중 그래프의 정보 중 D노드의 잔여에너지를 추정함으로써 매 번 정보에 변동이 있을 때마다 추가적 유지 비용이 소모되는 통신 비용을 없앨 수 있는 추정 알고리즘을 제안했다. 이를 통해 전체 센서 네트워크의 수명 연장을 목적을 달성했다.

향후 연구 과제로는 추정 알고리즘의 수학적 분석과 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능평가가 이루어질 계획이다.

#### 참고 문헌

- [1] B. Karp and H. Kung. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proc. ACM/IEEE Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 243-254, 2000.
- [2] BOSE, P., MORIN, P., STOJMENOVIC, I., AND URRUTIA, J. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. In *Proc. ACM DIALM Workshop* (Seattle, WA, USA), pp. 48-55, 1999.
- [3] F. Kuhn, R. Wattenhofer, Y. Zhang and A. Zollinger, Geometric adhoc routing: of theory and practice, in: *Proceedings 22nd ACM Int. Sympo-*

*sium on the Principles of Distributed Computing (PODC)*, pp. 63-72, 2003.

- [4] Q. Fang, J. Gao, L. Guibas, V. de Silva and L. Zhang, GLIDER: Gradient landmark-based distributed routing for sensor networks, in *Proceedings of the 24th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM)*, Vol. 1 pp. 339-350, 2005.
- [5] J. Bruck, J. Gao, and A. Jiang. MAP: Medial axis based geometric routing in sensor networks. In *Proc. ACM/IEEE Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 88-102, 2005.
- [6] Y. Wang, J. Gao, JSB Mitchell, Boundary recognition in sensor networks by topological methods. in *proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*, 2006.