

# 무선 애드 혹 네트워크에서 전력, 이동성 및 주변 무선 채널 상태를 고려한 연결형 Dominating Set 구성 방법

준회원 조형상\*, 정회원 유상조\*

## Power, mobility and wireless channel condition aware connected dominating set construction algorithm in the wireless ad-hoc networks

Hyoung-Sang Cho\* *Associate Member*, Sang-Jo Yoo\* *Regular Member*

### 요약

본 논문에서는 이동 애드 혹 네트워크에서 효율적인 전력 사용 및 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장하는 연결형 dominating set 기반의 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 연결형 dominating set 기반의 라우팅 알고리즘에서 갖은 dominating set의 재구성은 루트 손실로 인한 전송 에러를 발생시키기 때문에 노드의 잔여 전력량과 이동성을 고려하여 게이트웨이 노드를 선택하여야 한다. 또한 같은 지역에 노드가 집중되어 있다면 매체를 공유하는 무선 네트워크의 특성상 병목으로 인한 충돌 및 지연 등을 야기시킬 가능성이 크다 따라서 본 논문에서는 노드의 잔여 전력량 및 이동성, 이웃 노드수의 가중 가산 값에 비례하여 이웃 구성 통보 메시지(neighbor set advertisement message)의 브로드캐스팅을 지연시키는 방법을 통해 연결형 dominating set의 재구성을 최소화 하면서도 신뢰성 있고 효율적인 데이터 전송을 보장하는 새로운 연결형 dominating set 구성 방법을 제안하고 다양한 상황에서의 실험을 통해 그 성능을 비교 평가하였다.

**Key Words :** Ad-hoc network, Wireless, Algorithm, Power, Energy

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new power-efficient and reliable connected dominating set based routing protocol in the mobile ad hoc networks. Gateway nodes must be elected in consideration of residual energy and mobility because frequent reconstruction of connected dominating set result in transmission error for route losses. If node density is high, it results in a lot of contentions and more delays for network congestion. Therefore, in this paper, we propose a new construction method of connected dominating set that supports reliable and efficient data transmission through minimizing reconstruction of connected dominating set by delaying neighbor set advertisement message broadcast in proportion to weighted sum of residual energy, mobility, and the number of neighbor nodes. The performance of the proposed protocol is proved by simulation of various conditions.

### I. 서론

무선 애드 혹 네트워크는 고정 기반 구조 없이 무선 네트워크 인터페이스를 장착한 이동 단말들로

만 구성되는 다중 홉 무선 네트워크이다. 무선 애드 혹 네트워크를 구성하는 각 이동 단말은 배터리로 구동되므로 배터리 용량의 한계로 인하여 노드 수명에 제약을 가진다. 때문에 이동노드의 효율적인

\* 인하대학교 정보통신대학원 멀티미디어통신망연구실(arod76@shinbiro.com, sjyoo@inha.ac.kr),

논문번호 : KICS2005-03-092, 접수일자 : 2005년 3월 3일

※본 연구는 정보통신부 정보통신 학술기초연구지원사업의 연구결과로 수행되었음.

에너지 사용은 무선 에드 혹 네트워크의 수명을 증가시키는데 있어 중요하다. 노드는 일반적으로 송신(transmission), 수신(reception), 유휴상태(idle), 슬립(sleep)모드의 네 가지 상태를 가질 수 있다. 각 상태에서 소모되는 전력의 측정 결과는 유휴 상태에서 소모되는 전력이 상당하다는 것을 보여주고 있다[1]. IEEE 802.11[2]에서는 노드가 자신의 송수신기의 전원을 끄고 슬립 모드로 전환할 수 있는 전력 절감 모드(power saving mode)를 정의하고 있다. 따라서 노드가 유휴 상태에 있는 시간을 최소화하고 슬립 모드에 있는 시간을 최대화함으로써 노드의 전력 소모를 절감할 수 있다.

연결형 dominating set를 무선 에드 혹 네트워크 내의 가상 백본망으로 사용하는 에드 혹 라우팅 방법은 연결형 dominating set에 속하는 노드들만이 루트 탐색과정에 참여하므로 연결형 dominating set 기반에서 on-demand 방식의 에드 혹 라우팅 프로토콜을 사용할 경우 루트 탐색 공간을 연결형 dominating set에 속한 노드들로 제한함으로써 플러딩(flooding) 되는 루트 탐색 메시지의 수를 줄일 수 있다. 따라서 연결형 dominating set에 속하지 않는 다른 이동 노드들은 루트 탐색에 참여하지 않으므로 송수신할 데이터가 없을 경우 유휴상태에서 슬립 모드로 전환함으로써 전력 소모를 절감할 수 있다.

연결형 dominating set 기반의 라우팅 방법은 그 그래프 이론의 dominating 개념[3]에 기반을 둔다. 그래프에서 꼭짓점(vertex)은 노드를 의미하고 꼭짓점 사이의 연결선(edge)은 연결된 노드가 서로의 무선 전송 범위 안에 위치함을 의미한다. Dominating set이란 그래프 내의 꼭짓점의 부분집합으로 이 부분집합에 속하지 않은 다른 꼭짓점(vertex)들은 최소한 하나 이상의 부분집합에 속한 꼭짓점과 인접하고 있다. 에드 혹 라우팅은 dominating set에 속하는 노드들 간에서만 이루어진다. 그러므로 라우팅 동작을 용이하게 하기 위하여 dominating set은 연결된 형태를 취하여야만 한다. Dominating set에 속한 노드를 게이트웨이(gateway) 노드라 하고 dominating set에 속하지 않는 노드들은 비게이트웨이(non gateway)노드라 한다. 그림 1은 연결형 dominating set과 나머지 노드들로 구성된 네트워크의 예를 보여준다. 노드 x와 y는 게이트웨이 노드이며 서로 연결되어 있고 나머지 노드 u, v, z, t는 비게이트웨이 노드이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 게이트웨이 노드들은 무선 에드 혹 네트워크에서 가상 백본망의 역할을 수행한다.

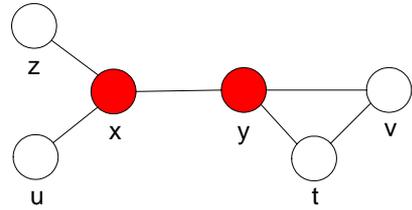


그림 1. 연결형 dominating set의 예.

연결형 dominating set 기반의 라우팅 프로토콜의 성능은 연결형 dominating set의 구성 방법에 따라 크게 달라질 수 있다. 대부분의 그래프에서 최소 개수 연결형 dominating set을 구성하는 것은 NP-complete 하다고 알려져 있으며, 이에 따라 근사화된 최소 개수 연결형 dominating set을 찾는 다양한 방법이 제안되었다[4,5,6,7,8]. 본 논문에서는 기본적으로 Wu와 Li가 제안한 단순 분산형 근사 알고리즘(simple distributed approximation algorithm)[4]과 유사한 방법으로 최소 개수에 근사한 연결형 dominating set을 구성한다. 연결형 dominating set 기반의 에드 혹 라우팅 알고리즘에서 게이트웨이 노드는 에드 혹 전력 절감모드로 동작 없이 항상 깨어있는 상태를 유지하고 라우팅 기능을 전담하므로, 일반적으로 게이트웨이 노드는 다른 노드에 비하여 전력 소모가 빠르다. 따라서 에드 혹 네트워크의 균등한 에너지 소모를 위해서도 게이트웨이 노드는 노드의 잔여 전력을 고려하여 선택되어야 한다. 게이트웨이 노드는 에드 혹 네트워크의 백본 역할을 하고 있으므로 게이트웨이 노드의 이동으로 다른 노드와 연결되어 있는 링크가 단절될 경우 루트 손실로 인한 전송 에러가 발생할 수 있다. 따라서 게이트웨이 선정 시 노드의 이동성 또한 고려되어야 한다. 게이트웨이 노드의 상태 변화는 연속적으로 주위 노드가 게이트웨이를 선정하는데 영향을 끼칠 수 있으므로 연결형 dominating set의 안정적인 유지를 위하여 게이트웨이 노드의 상태 변화를 최소화 할 수 있는 연결형 dominating set 구성 방법을 사용하여야 한다. 무선 매체를 사용하는 에드 혹 네트워크의 특성상 많은 트래픽이 집중되는 게이트웨이 노드가 한 지역에 몰려 있을 경우, 무선 매체의 혼잡으로 인한 지연과 충돌이 증가할 가능성이 높아진다. 따라서 본 논문에서는 노드의 잔여 전력량 및 이동성, 이웃 노드 수의 가중 가산 값에 비례하여 이웃 구성 통보 메시지(neighbor set advertisement message)의 브로드캐스팅(broadcasting)을 지연시키는 방법을 통해 연결형 dominat-

ing set의 재구성을 최소화 하여 루트 손실로 인한 전송에러를 최소화하고 특정 지역의 트래픽 집중으로 인한 문제를 해결하여 효율적인 데이터 전송을 보장하는 방법을 제안한다

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 기존에 연구된 연결형 dominating set 구성 방법에 관련된 연구를 소개하고 제 3장에서는 본 논문에서 제안한 노드의 잔여 전력과 이동성 이웃 노드의 상태 등이 고려된 연결형 dominating set 구성 방법에 대한 기본 개념의 설명, 프로토콜의 동작과정, 데이터 구조에 대해 기술한다. 제 4장에서는 제안하는 프로토콜에 대해 다양한 조건에서의 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과를 통해서 성능을 평가하고, 마지막으로 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 관련연구

### 2.1 IEEE 802.11 에드 혹은 전력 절감 모드

무선 랜 규격인 IEEE 802.11 에서는 인프라구조의 파워 관리 모드(power management)와 인프라 구조를 사용하지 않는 에드 혹은 파워 관리모드를 정의하고 있다. 에드 혹은 전력 절감모드로 동작하는 각 노드는 각 노드간의 동기화를 위하여 각 노드의 시간 정보(time stamp)가 포함되어 있는 주기적인 비콘(beacon) 패킷을 사용한다. 비콘 주기(beacon interval)는 ATIM(Ad-hoc Traffic Indication Map) 윈도우 기간과 실제 데이터 전송이 이루어지는 구간으로 나뉘지는데, ATIM 윈도우 기간에는 전송할 데이터가 있는 노드는 전송할 데이터가 있다는 것을 수신자에게 알리기 위하여 수신자의 리스트를 포함하는 ATIM 메시지를 전송하고, ATIM 메시지 수신을 위하여 모든 노드는 그림 2와 같이 비콘 기간(beacon interval)이 시작하는 시점에 깨어나서 최소한 ATIM 윈도우 동안 깨어있는(awake) 상태를 유지한다. 자신이 포함되어 있는

ATIM 메시지를 수신한 노드는 ATIM 응답메시지(ATIM acknowledgement message)를 통하여 응답한다. 송신할 데이터가 없고 ATIM 기간 동안 자신이 포함되어 있는 ATIM 메시지를 받지 못한 노드들은 ATIM 윈도우 기간이 끝나면 다음 비콘 주기가 시작할 때까지 슬립모드로 동작한다. ATIM 윈도우가 끝난 비콘 주기의 나머지 기간에 ATIM 메시지를 주고받은 송수신자간에 실제 데이터 전송이 이루어진다.

### 2.2 단순 분산형 근사 알고리즘에 기반을 둔 최소 연결형 dominating set 구성 방법

Wu와 Li는 최소 개수에 근사한 연결형 dominating set 구성을 위한 단순 분산형 근사 알고리즘(simple distributed approximation algorithm)을 제안했다[4]. 이 알고리즘은  $G=(V, E)$ 로 정의되는 그래프에서의 모든 꼭짓점들(vertices)에 대하여 마킹(marking) 과정을 수행함으로써 연결된 dominating set을 구성한다. 그래프  $G$ 의 꼭짓점들은 T(체크되어짐), F(체크되어지지 않음)의 두 가지 상태 중 한가지 상태를 가진다.  $m(v)$ 는 그래프  $G$ 의 꼭짓점  $v$ 의 마킹 상태를 나타낸다. 초기에 모든 꼭짓점은 체크되어지지 않은 상태이다. 열린 이웃 구성  $N(v)$ 는 꼭짓점  $v$ 의 모든 이웃 꼭짓점들을 의미하고, 닫힌 이웃 구성  $N[v]$ 는 꼭짓점  $v$  자신을 포함한 꼭짓점  $v$ 의 모든 이웃 꼭짓점들을 의미한다. 그래프의 마킹 과정은 기본적으로 다음과 같은 세 가지 과정으로 구성되어 있다.

1. 초기에 그래프  $G$ 의 모든 꼭짓점  $v$ 는 F로 표시 된다.
2. 모든 꼭짓점  $v$ 는 자신의 열린 이웃 구성 정보  $N(v)$ 를 자신의 모든 이웃들과 교환한다.
3. 연결되어지지 않은 이웃이 존재하는 모든 꼭짓점은 자신의 마커  $m(v)$ 를 T로 마크한다.

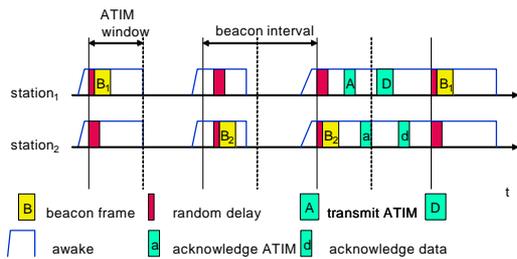


그림 2. 에드 혹은 파워 절감 모드(power saving mode)로 동작하는 단말의 예

그림 3의 예에서 보듯이 첫 번째 과정에선 그래프  $G$ 의 모든 꼭짓점들은 체크되어지지 않은 상태이고(그림 3-a) 각각의 개방 이웃 구성은  $N(t)=\{x\}$ ,  $N(u)=\{x, v\}$ ,  $N(v)=\{x, y\}$ ,  $N(y)=\{x, v, z\}$ ,  $N(z)=\{y\}$ 이다. 제 2 과정에서 자신의 모든 이웃들과 자신의 개방 이웃 구성 정보를 교환한다. 제 3과정에서 연결되어 지지 않은 이웃노드를 가진 노드  $x$ 와 노드  $y$ 는 T(체크되어짐)으로 마크되고 노드  $x$ 와  $y$ 는 연결형 dominating set을 구성

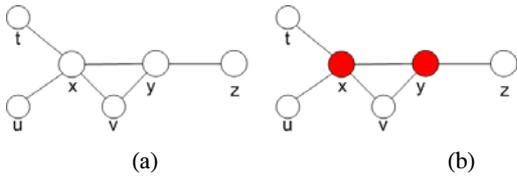


그림 3. 연결형 dominating Set 구성 과정

하게 된다(그림 3-b).

마킹 과정을 통하여 만들어진 연결형 dominating set은 여분의 dominating set에 속하는 꼭짓점들을 가지고 있다. 이 여분의 꼭짓점들을 dominating set에서 제거함으로써 최소개수에 근사한 dominating set을 구성할 수 있다. 이 여분의 꼭짓점들을 제거하기 위하여 먼저 각 꼭짓점마다 구별 가능한 id를 할당하고 다음과 같은 2가지 규칙을 제공한다.

**규칙 1:** 이웃하고 있는 연결형 dominating set의 꼭짓점  $x, v$ 를 고려해보자. 그림 4-a에서 보는 바와 같이 그 중 한 꼭짓점인  $x$ 의 닫힌 이웃 구성이 다른 꼭짓점  $v$ 의 닫힌 이웃구성에 포함되고  $\{N[x] \subseteq N[v]\}$ , 꼭짓점  $x$ 의 id가 꼭짓점  $v$ 의 id보다 작으면  $\{id(x) < id(v)\}$  이면 꼭짓점  $x$ 는 자신을 F(체크되지 않음)로 마크함으로써 연결형 dominating set에서 자신을 제거한다. 만약 그림 4-b의 경우처럼 꼭짓점  $x, v$ 와 서로 상대방의 닫힌 이웃구성을 포함한다면  $\{N(x)=N(v)\}$ , 두 꼭짓점 중 id가 작은 꼭짓점인  $x$ 가 자신을 F(체크되어지지 않음)로 마크함으로써 자신을 연결형 dominating set으로부터 제거한다.



그림 4. 규칙 1에 해당하는 연결형 dominating set의 예.

**규칙 2:** 그림 5의 경우처럼 자신이 연결형 dominating set에 속하면서 연결형 dominating set에 속하는 두 꼭짓점  $x, z$ 를 이웃으로 가지고 있는 꼭짓점  $y$ 의 열린 이웃 구성  $N(y)$ 가 꼭짓점  $x$ 의 열린 이웃 구성  $N(x)$ 와 꼭짓점  $z$ 의 열린 이웃 구성  $N(z)$  합집합에 포함되고  $\{N(y) \subseteq N(x) \cup N(z)\}$ , 꼭짓점  $y$ 의 id가 세 꼭짓점( $x, y, z$ ) 중에 가장 작다면  $\{id(y) = \min[id(x), id(y), id(z)]\}$ , 꼭짓점  $y$ 는 자신을 F(체크되지 않음)으로 마크함으로써 연결형 dominating

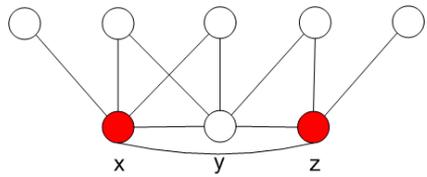


그림 5. 규칙 2에 해당하는 연결형 dominating set의 예

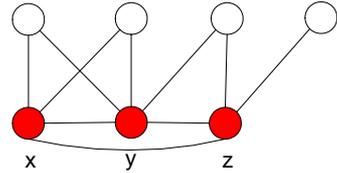


그림 6. 규칙 1과 2가 동시에 적용될 수 있는 연결형 dominating set의 예

set으로부터 자신을 제거한다

그림 6의 경우는 규칙 1,2가 동시에 적용되는 경우이다. 꼭짓점  $y$ 의 id가 연결형 dominating set에 속하는 세 꼭짓점  $x, y, z$ 중에 가장 작다면, 규칙 2에 의해 꼭짓점  $y$ 가 연결형 dominating set에서 제거되지만 꼭짓점  $x$ 의 id가 꼭짓점  $y$ 보다 작다면, 규칙 1에 의해서 꼭짓점  $x$ 가 연결형 dominating set으로부터 제거된다. 꼭짓점  $z$ 의 id가 세 꼭짓점  $x, y, z$ 중에 가장 작다면, 세 노드 중 어떤 것도 연결형 dominating set으로부터 제거되어지지 않는다.

### 2.3 노드의 잔여 에너지를 고려하여 확장된 연결형 dominating set 구성 방법

연결형 dominating set 기반의 라우팅 알고리즘은 게이트웨이 노드가 라우팅 기능을 전담하므로 일반적으로 게이트웨이 노드는 다른 노드에 비하여 전력 소모가 빠르다. 전체 에드 혹 네트워크의 수명을 늘리기 위해서는 전체 네트워크의 노드들의 에너지가 균등하게 소모되어야 한다. 그러므로 연결형 dominating set을 구성함에 있어 노드들의 잔여 전력이 고려되어야 한다. 노드의 잔여 에너지를 고려한 연결형 dominating set 구성 알고리즘[5]은 위에서 설명한 규칙 1과 2를 확장함으로써 실현될 수 있다.

확장된 규칙 1a와 규칙 2a는 다음과 같다. 노드  $v$ 의 잔여전력은  $el(v)$ 로 표현한다.

**규칙 1a:** 규칙 1의 조건에서 노드  $v$ 의 잔여전력  $el(v)$ 를 비교하는 조건을 추가한다. 다음과 같은 조건을 만족하면 노드  $x$ 는 연결형 dominating set으로부터 자신을 제거한다

1.  $N[x] \subseteq N[v]$  이고,  $el(x) < el(v)$  일 때.
2.  $N[x] \subseteq N[v]$  이고  $el(x) = el(v)$ ,  $id(x) < id(v)$  일 때.

규칙 2a: 규칙 2의 조건에서 노드  $v$ 의 잔여전력  $el(v)$ 를 비교하는 조건을 추가한다 다음과 같은 조건을 만족하면 노드  $x$ 는 연결형 dominating set으로부터 자신을 제거한다

1.  $N(y) \subseteq N(x) \cup N(z)$ ,  $N(x) \not\subseteq N(y) \cup N(z)$ ,  $N(z) \not\subseteq N(x) \cup N(y)$  일 때.
2.  $N(y) \subseteq N(x) \cup N(z)$ ,  $N(x) \subseteq N(y) \cup N(z)$ ,  $N(z) \not\subseteq N(x) \cup N(y)$  이고
  - (a)  $el(y) < el(x)$  일 때
  - (b)  $el(y) = el(x)$  이고  $id(y) < id(x)$  일 때
3.  $N(y) \subseteq N(x) \cup N(z)$ ,  $N(x) \subseteq N(y) \cup N(z)$ ,  $N(z) \subseteq N(x) \cup N(y)$  이고
  - (a)  $el(y) < el(x)$ ,  $el(y) < el(z)$  일 때
  - (b)  $el(y) = el(x)$ ,  $el(y) < el(z)$  이고  $id(y) < id(x)$  일 때
  - (c)  $el(y) = el(x) = el(z)$ ,  $id(y) = \min\{id(x), id(y), id(z)\}$  일 때

### III. 노드의 잔여전력과 이동성, 주변 무선 링크의 상태를 고려한 연결형 dominating set 구성 방법

본 논문에서 제안된 CARCODS(Construction Algorithm for Reliable Connected Dominating Set)에서 기본적으로 각 노드는 다음과 같이 동작한다 고 가정한다.

- (a) 게이트웨이 노드는 에드 혹은 파워 절감 모드로 동작하지 않고 항상 깨어있는(awake) 상태를 유지하며 비게이트웨이 노드는 beacon interval이 시작하는 시점에서 깨어나고(awake) 자신이 송수신할 데이터가 없으면 ATIM 윈도우 기간이 끝나는 시점부터 다음 beacon interval이 시작되는 시점까지 슬립 모드로 동작한다.
- (b) 노드는 자신의 상태 정보를 포함한 자신의 이웃에 관한 정보가 포함된 그림 9-a와 같은 이웃 구성통보 (neighbor set advertisement) 메시지를 브로드 캐스팅 주기의 시작 시점에서 본 논문에서 제안된 수식에서 계산된 기간만큼 지연한 뒤에 자신의 모든 이웃에게

브로드캐스팅 한다

- (c) 노드는 이웃 통보 메시지를 보내기 전에 단순 분산 근사형 알고리즘(simple distributed approximation algorithm)에 기반을 두어 자신을 게이트웨이 노드로 선정할지를 결정한다.
- (d) 노드는 GPS 수신기를 장착하고 있으므로 GPS정보를 수신함으로써 자신의 위치 정보와 시간을 알 수 있다

#### 3.1 기존의 단순 분산형 근사 알고리즘에 기반을 둔 연결형 dominating set 구성방법의 문제점

본 절에서는 단순 분산형 근사 알고리즘(simple distributed approximation algorithm)에 기반을 둔 연결형 dominating set 구성방법을 실제 라우팅에서 활용할 경우 나타날 수 있는 문제점들에 대해 분석하고 본 논문에서 이러한 문제점을 해결하기 위해 제시한 방법들을 살펴보겠다

- 1) 이웃 구성 정보의 동시 전송으로 인한 브로드캐스트 스톰(broadcast storm) 현상: 모든 노드는 자신의 이웃 구성 정보를 주기적으로 브로드캐스팅 한다. 동시에 많은 노드가 자신의 이웃 구성 정보를 브로드캐스팅할 경우, 무선 매체를 공유하고 있는 무선 랜의 특성상 브로드캐스트 스톰 현상같은 기간에 매체를 공유하고 있는 여러 노드가 동시에 브로드캐스팅을 시도함으로써 나타나는 현상으로 인해 무선 매체에 혼잡이 발생하여, 이에 따라 충돌과 지연이 증가할 수 있다. 본 논문에서는 각 주기마다 이동성과 노드의 잔여 전력을 고려하여 계산된 기간만큼 이웃 구성 정보의 브로드캐스팅을 지연하는 방법을 통해 동시에 여러 노드가 이웃 구성 정보 브로드캐스팅을 시도하는 것을 방지할 수 있다.
- 2) 불필요한 게이트웨이 상태 반복으로 인한 라우팅 에러: 단순한 분산형 근사 알고리즘 기반의 연결형 dominating set 구성 방법에서 각 노드는 일정 주기마다 자신의 이웃 구성 (neighbor set) 정보 및 자신의 상태정보를 이웃 구성 통보 메시지(neighbor set advertisement message)를 통하여 자신의 모든 이웃에게 브로드캐스팅 한다. 자신의 이웃 노드들로부터의 이웃 구성 통보 메시지의 수신을 통해

여 알게 된 이웃 노드 정보에 따라, 만약 연결 안 된 이웃이 존재하고 규칙 1과 규칙 2를 만족하지 않으면, 자신을 게이트웨이 노드로 설정하고, 다음 번 이웃 통보 메시지를 통해 자신이 게이트웨이로 선정되었음을 이웃 노드들에게 알린다. 그림 7-a와 같이 잔여 에너지를 고려한 단순 분산형 근사 알고리즘 기반의 연결형 dominating set 구성방법이 사용된 애드 혹 네트워크에서 이웃한 노드 x, y 처럼 두 노드 모두 연결 안 된 이웃이 존재하고,  $N[x] = N[y]$  일 때, 잔여 에너지가 작은 노드 x가 먼저 자신을 게이트웨이로 선정하고 이웃 통보 메시지를 자신의 모든 이웃에게 브로드캐스팅 했을 경우에 노드 y는 잔여 전력량이 노드 x보다 크므로 자신을 게이트웨이로 설정하고 이웃통보 메시지를 통해 자신이 게이트웨이로 선정되었음을 알린다. 노드 y로부터 이웃 통보 메시지를 받은 노드 x는 규칙 1a를 만족하는 것을 알게 되므로 노드 x는 자신의 상태를 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이 노드로 바꾸게 된다. 노드 x가 게이트웨이인 기간 동안에 노드 x를 경유하는 루트 설정이 이루어졌을 경우, 노드 x가 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이로 바뀌게 됨에 따라 애드 혹 전력 절감 모드로 동작하므로 슬립 모드로 전환한 기간 동안에는 라우팅 과정에 참여하지 못하게 되므로 전송 데이터 에러가 발생하고 이에 따른 재 루트 탐색 과정이 필요하게 된다. 그에 반해 그림 7-b의 경우처럼 본 논문에서 제안한 잔여 전력량을 고려하여 이웃 구성 통보 메시지의 브로드캐스팅을 지연시키는 방법을 사용하면, 노드 y가 먼저 자신이 게이트웨이로 선정되었음을 이웃 구성 통보 메시지를 통해 노드 x에게 알리게 되므로 불필요하게 노드 x가 자신을 게이트웨이 노드로 선정하고 다시 비게이트웨이 노드로 상태를 바꾸어 따

라 나타나는 루트 손실에 의한 데이터 에러 문제를 방지할 수 있다.

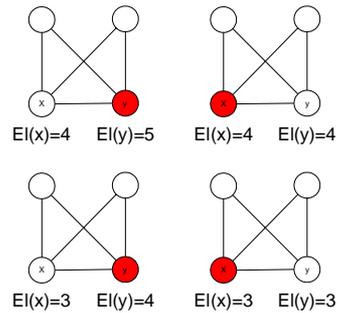


그림 8. 잔여 전력 변화에 따른 두 노드의 잦은 게이트웨이 상태 반복의 예

그림 8의 이웃한 노드 x, y 처럼 잔여 전력이 비슷한 두 노드 x, y가 모두 연결 안 된 이웃이 존재하고,  $N[x] = N[y]$  일 때, 잔여 전력이 큰 노드 y가 게이트웨이로 선정되고, 노드 x는 비게이트웨이 상태를 유지한다. 그러나 게이트웨이 노드인 노드 y의 전력 소모가 더 심하고, 두 노드의 잔여 전력량이 비슷하기 때문에, 그림 8의 경우처럼 곧 노드 x와 y간의 잔여 전력량의 역전 현상이 발생하여 노드 x는 비게이트웨이에서 게이트웨이로, 노드 y는 게이트웨이에서 비게이트웨이로 상태가 변하게 된다. 그 이후에도 마찬가지로 잔여 전력량이 비슷한 노드 x, y는 짧은 주기로 비게이트웨이 상태와 게이트웨이 상태를 반복하게 된다. 이처럼 잦은 노드의 상태 변화는 루트 손실에 의한 재 루트 탐색 과정 및 데이터 에러 문제를 야기시킨다. 따라서 본 논문에서는 유효한 라우팅 테이블을 가지고 있는 노드가 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이 노드로 상태를 변화할 때 일정 기간 동안 루트 탐색에는 참여하지 않고 라우팅 기능만 수행하는 임시 게이트웨이로 지정하는 방법을 통해 이 문제를 해결한다

### 3.2 잔여 전력량과 이동성, 이웃 노드의 수를 고려한 이웃 구성 통보 메시지 브로드캐스팅 지연 시간 계산 방법

본 논문에서는 이웃 구성 통보 메시지(neighbor set advertisement message)를 노드의 잔여전력과 이동성, 이웃 게이트웨이 노드의 수를 변수로 하여 본 논문에서 제안한 수식에 의하여 계산된 값만큼 지연하여 브로드캐스팅 하는 방법을 통해 다른 노드보다 잔여전력이 상대적으로 크고 이동성이 작으면서 무선 채널의 혼잡할 확률이 적은 노드가 우선

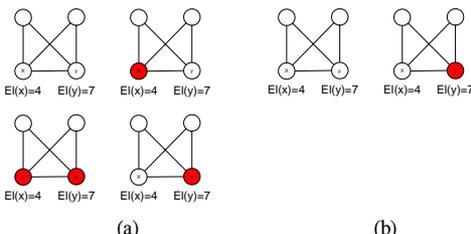


그림 7. 규칙 1을 서로 만족하는 두 노드의 연결형 dominating set 구성의 예.

적으로 게이트웨이로 선정될 수 있게 한다

식 1은 노드의 최대 전파 도달거리에서 이웃 노드들과의 거리 중 최댓값을 감한 값으로 노드의 이동 임계 영역(movement limit)을 의미한다. 노드가 이웃 노드로부터 임계 영역 이상 더 멀어진다면 노드와 이웃 노드와의 링크는 단절되게 된다

$$ML(\text{Movement Limit}) = R_{trans} - Max_{ndist} \quad (1)$$

노드는 GPS로부터 시간과 자신의 위치 정보를 수신하므로 자신의 이동속도를 추정할 수 있다. 노드는 새로운 위치 정보와 시간을 받을 때마다 직전에 받은 위치 정보 값과 시간을 이용하여 식 2로부터  $V_m$ 을 구한다. 식 3을 이용하여 계산된  $V_m$  값을 과거 속도 값  $V_{old}$ 와의 가중 가산시켜 노드의 이동 속도  $V$  값을 얻는다.

$$V_m = \frac{\sqrt{(X_{new} - X_{old})^2 + (Y_{new} - Y_{old})^2}}{T_{new} - T_{old}} \quad (2)$$

$$V = (1 - w) * V_m + w * V_{old} \quad (3)$$

( 0 < w < 1)

식 1~3을 이용해서 식 4를 유도할 수 있으며, 식 4는 이웃 노드와의 최소 링크 생존시간(link lifetime) 값을 의미한다. 최소 링크 생존 시간 값이 크면 클수록 이웃 노드와의 링크가 끊어지는 시간이 길어질 확률이 높아진다.

$$MLT(\text{Minimum Link lifeTime}) = \frac{R_{trans} - Max_{ndist}}{V} \quad (4)$$

링크 불안정성(link instability) 은 최소 링크 생존 시간(MLT) 값의 역수로 구해지고 최대 반영치는  $LI_{max}$  로 표시한다.

$$LI(\text{Link Instability}) = \frac{1}{MLT} \quad (5)$$

에너지 변수 값 (energy factor)는 노드의 실제 잔여전력  $E_{res}$ 의 역수 값으로부터 얻어지고 에너지 변수 값의 최대 반영치는  $EF_{max}$  로 표시한다.

$$EF(\text{Energy Factor}) = \frac{1}{E_{res}} \quad (6)$$

이웃 노드 수는  $N_d$ (Node Degree)로 표시하고 이웃 노드수의 최대 반영치는  $N_d^{max}$ 로 표시한다.

노드 v의 브로드캐스트 지연 시간  $B_d(v)$ 는 식 7과 같다.

$$B_d(v) = \{ w_1 \min[LI, LI_{max}] + w_2 \min[EF, EF_{max}] + w_3 \min[N_d, N_d^{max}] \} * T_d \quad (7)$$

가중치  $w_1, w_2, w_3$  값의 합은 1이며 각 요소 단위가 일치하지 않기 때문에 서로의 비중을 맞추기 위한 가중치 값이다.  $T_d$ 는 각 브로드캐스트 주기마다 이웃 구성 통보 메시지의 브로드캐스트를 지연할 수 있는 최대 시간이다.

### 3.3 게이트웨이 노드의 잦은 상태 반복으로 인한 루트 손실을 줄이는 방법

노드의 잔여 에너지를 비롯한 게이트웨이 노드 결정에 영향을 끼치는 변수 값의 변화로 인하여 노드가 짧은 주기로 비게이트웨이 상태와 게이트웨이 상태를 반복함에 따라 발생하는 루트 손실로 인한 데이터 에러를 방지하기 위하여 노드는 자신이 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이 노드로 상태를 변화시켰을 때 그 주기 값의 최소값( $C_m$ )을 유지한다. 노드 x가 여전히 연결되지 않은 이웃이 존재하는데도 불구하고 노드의 상태 값이 규칙 1과 규칙 2에 해당하여 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이 노드로 상태를 변화시켜야 할 때, 노드 x에 루트 탐색 절차에 의하여 생성된 유효한 라우팅 테이블이 존재할 경우 노드 x는 자신을 게이트웨이에서 해지하고 이웃 통보 메시지를 통하여 이웃 노드들에게 이 정보를 알리지만  $2 * C_m$ 의 기간 동안에는 에드 혹은 전력 절감 모드로 동작하지 않고 항상 깨어있는 상태를 유지하여 노드 x를 경유하는 데이터에 대한 라우팅 동작을 수행한다. 게이트웨이 노드는 아니지만 에드 혹은 파워 절감 모드로 들어가지 않고 라우팅 동작을 수행하는 상태를 임시 상태라고 하고 이를 위하여 노드 상태 테이블에서 게이트웨이 상태는 F로 변경하지만 임시 상태 유효시간을  $2 * C_m$ 의 시간 값으로 갱신함으로써 그 기간 동안 임시 상태로 동작할 수 있도록 한다. 그러나 게이트웨이에서 해지 되었으므로 루트 탐색 메시지는 재전송하지 않고 폐기한다

### 3.4 제안된 메시지 및 데이터 구조

CARCORDS(Construction Algorithm for Reliable Connected Dominating Set) 프로토콜은 에드 혹은 네

트위크의 모든 노드들이 이웃 구성 통보 메시지를 통하여 서로의 이웃 정보 및 노드 상태를 주고받고, 노드 상태 테이블을 참고하여 게이트웨이 노드를 결정하는 동작으로 이루어진다. 모든 노드는 이웃 노드로부터의 이웃 통보 메시지를 통하여 얻은 정보를 통하여 노드 상태 테이블을 유지한다.

노드명	이웃 노드 리스트	이웃노드(거리)	2-hop 이웃 리스트
		K(4)	V,U
		U(5)	Z,K,W,X,Y
		W(5)	U,V
		Y(6)	V,U,X,L
이웃 노드 리스트	노드 잔여 전력	100	
시퀀스 넘버	이동 속도	15	
노드 위치 (X,Y)	임시 상태 유효시간	100	
게이트웨이 상태 (T, F)	게이트웨이 상태 (T,F)	F	

그림 9. 이웃 구성 통보 메시지 구조와 노드 상태 테이블 구성의 예.

그림 9-a는 이웃 구성 통보 메시지의 구조를 나타낸 것이다. 이웃 구성 통보 메시지는 노드명, 노드의 이웃 노드 리스트, 메시지의 중복 수신을 방지하는 시퀀스 넘버, 노드의 물리적 좌표 정보와 노드의 게이트웨이 상태를 포함한다.

그림 9-b는 노드 상태 테이블의 구성 예를 보여 준다. 이웃 노드 리스트에는 노드 자신과의 거리를 포함한 이웃노드들의 리스트와 그 이웃 노드들의 이웃 노드 목록인 2-hop 이웃 리스트를 유지한다. 노드 잔여 전력은 노드의 전원부를 체크하여 노드의 잔여 전력량 정보를 얻는다. 이동 속도는 GPS 수신을 통해 얻어진 노드 위치 정보와 시간 정보를 이용하여 계산된다. 노드의 임시 상태 유효시간이 0 이상이면 비 게이트웨이 상태라도 에드 혹 파워 절감모드로 동작되어지지 않고 항상 깨어있는 상태를 유지한다. 유효시간이 0이고 비게이트웨이 상태면 에드 혹 파워 절감 모드에 따라 동작된다. 게이트웨이 상태는 T 이면 게이트웨이 상태를 나타내고, F면 비게이트웨이 상태를 나타낸다.

3.5 제안된 CARCODS프로토콜의 동작 과정

CARCODS(Construction Algorithm for Reliable Connected Dominating Set)프로토콜은 기본적으로 단순 분산형 근사 알고리즘을 사용하지만 노드id를 사용하지는 않는다. 그러므로 초기에 노드 id 를 할당하는 과정이 필요 없다. 서로 이웃하지 않는 이웃 노드가 존재하고 다음과 같이 간소화된 규칙 1

과 규칙2에 해당하지 않으면 자신을 게이트웨이 노드로 설정한다.

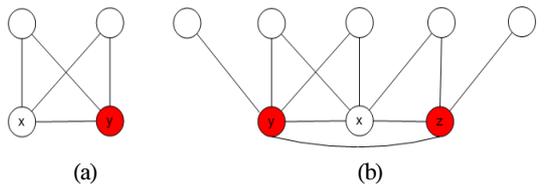


그림 10. 규칙 1 또는 규칙 2를 만족하는 노드의 예

규칙 1: 그림 10-a에서 보는 것처럼 노드 x의 이웃 노드인 노드 y가 게이트웨이 노드이고,  $N[x] \subseteq N[y]$  일 때

규칙 2: 그림 10-b처럼 노드 x의 이웃 노드인 노드 y, z가 게이트웨이 노드이고,  $N(x) \subseteq N(y) \cup N(z)$  일 때

모든 노드는 각 주기마다 식 7에 의하여 브로드캐스트 지연 시간을 계산하고 연결형 dominating set을 재구성한다. 각 노드는 브로드캐스트 지연시간만큼 이웃 구성 통보 메시지의 브로드캐스팅을 지연한 뒤에, 그림 9-b와 같은 노드 상태 테이블 (node state table)값을 참고하여 자신이 게이트웨이 노드가 될 것인지를 결정하고 그림 9-a와 같은 이웃 구성 통보 메시지(neighbor set advertisement message) 를 모든 이웃에 브로드캐스팅 한다. 게이트웨이 노드는 각 주기마다 새로 결정된다. 그림 11-a 와 같이 구성된 에드 혹 네트워크를 가정해 보자. 연결형 dominating set 구성 절차는 노드의 브로드캐스트 지연시간에 따라 다음과 같은 절차에 따라 진행된다.

- (1) 그림 11-a 에서 브로드캐스트 지연시간이 가장 짧은 노드 X는 모든 이웃 노드가 이웃하고 있으므로 자신을 게이트웨이 노드로 선정하지 않고 이웃 구성 통보 메시지를 브로드캐스팅한다.
- (2) 노드 Z와 K도 마찬가지로 모든 이웃 노드가 이웃하므로 자신을 게이트웨이 노드로 선정하지 않고 이웃 구성 통보 메시지를 브로드캐스팅한다.
- (3) 노드 V는 서로 이웃하지 않은 이웃 노드가 존재하고 규칙 1또는 2에 해당되지 않으므로 자신을 게이트웨이 노드로 선정하고 이웃 통보 메시지를 브로드캐스팅한다.

- (4) 노드 Y는 서로 이웃하지 않은 이웃 노드가 존재하고 규칙 1 또는 규칙 2에 해당되지 않으므로 자신을 게이트웨이 노드로 선정하고 이웃 통보 메시지를 브로드캐스팅한다
- (5) 노드 W는 모든 이웃 노드가 서로 이웃하므로 자신을 게이트웨이 노드로 선정하지 않고 이웃 통보 메시지를 브로드캐스팅한다
- (6) 노드 U는 서로 이웃하지 않은 이웃 노드가 존재하지만 노드 V와 Y가 게이트웨이 노드로 설정되었고  $N(U) \subseteq N(V) \cup N(Y)$  이므로 규칙 2를 만족하게 된다. 그러므로 자신을 게이트웨이 노드로 설정하지 않고 이웃 통보 메시지를 브로드캐스팅한다
- (7) 노드 L은 이웃 노드가 하나뿐이므로 자신을 게이트웨이 노드로 설정하지 않고 이웃 통보 메시지를 브로드캐스팅 한다

이와 같은 과정을 통하여 그림 11-b와 같은 연결형 dominating set이 구성된다.

그림 11-c는 다음 주기에 구성된 연결형 dominating set의 예를 보여준다. 노드 V는 게이트웨이 노드에서 비게이트웨이 노드로 상태가 변경되었지만 루트 탐색 과정에 의하여 생성된 유효한 라우팅 테이블을 가지고 있으므로 게이트웨이 상태 변경 주기의 최소값 ( $C_m$ )의 2배수만큼 비게이트웨이 노드이지만 에드혹 파워 절감 모드로 들어가지 않고 라우팅 기능을 수행한다. 그러나 루트 탐색 메시지는 폐기한다.

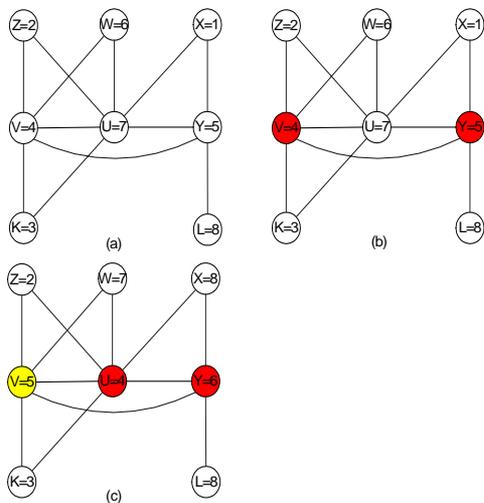


그림 11. 연결형 dominating set 구성 과정의 예.

### 3.6 수정된 에드 혹 전력 절감 모드 (Modified ad hoc power saving mode).

CARCODES 프로토콜에서 게이트웨이 노드는 에드 혹 전력 절감 모드로 동작하지 않고 항상 깨어 있는 상태를 유지하며 비게이트웨이 노드는 비콘 주기(beacon interval)가 시작하는 시점에서 깨어나고, ATIM 윈도우 기간 동안 송신할 데이터가 없고 자신을 포함하는 ATIM 메시지를 수신하지 못한 노드는 ATIM 윈도우 기간이 끝나는 시점부터 다음 비콘 주기가 시작되는 시점까지 슬립(Sleep) 모드로 동작한다. CARCODES 프로토콜의 모든 노드는 기본적으로 GPS 수신 장비를 장착하고 있으므로 노드 간에 동기를 맞추기 위한 별도의 비콘(beacon) 패킷은 사용되어지지 않는다. 게이트웨이 노드는 ATIM 윈도우 기간 동안 비게이트웨이 노드로 송신할 데이터가 있을 경우에만 수신 노드를 포함하는 ATIM 메시지를 송신하고 게이트웨이 노드 간의 송신에는 별도의 ATIM 메시지를 송신하지 않는다. 브로드캐스트 송신인 루트 탐색 메시지를 전송 시에도 게이트웨이 노드 간에만 루트 탐색 메시지를 전송하므로 별도의 ATIM 메시지를 송신하지 않는다. 따라서 전체 노드가 에드 혹 파워 절감 모드로 동작할 때 보다 ATIM 메시지의 양이 줄어들고 비콘 메시지 송수신으로 인한 랜덤 지연시간도 없으므로 ATIM 윈도우의 크기는 축소되어 질수 있다. ATIM 윈도우를 제외한 나머지 비콘 주기 동안 실제 데이터 전송이 이루어지므로 전송 대역폭의 확대를 가져올 수 있다. 그림 12는 수정된 에드 혹 전력 절감 모드의 동작 예를 보여준다. 비 게이트웨이 노드 2는 비 게이트웨이 노드 3을 수신자로 하는 ATIM 응답 메시지로 응답한다 마찬가지로 게이트웨이 노

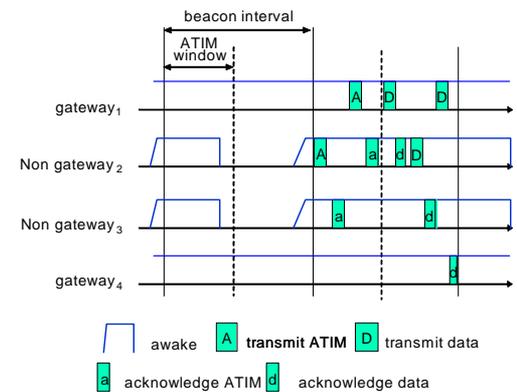


그림 12. 수정된 에드 혹 전력 절감 모드의 동작 예.

드1은 비게이트웨이 노드2를 수신자로 하는 ATIM 메시지를 보낸다. ATIM 윈도우가 끝난 후에도 송수신할 데이터가 있는 비게이트웨이 노드2와 수신할 데이터가 있는 비게이트웨이 노드3은 슬립 모드로 전환하지 않는다. ATIM 윈도우가 끝난 후 잔여 비콘 주기 동안 게이트웨이 노드 1에서 비게이트웨이 노드2로 데이터 전송이 이루어지고, 비게이트웨이 노드2에서 비게이트웨이 노드3으로 데이터 전송이 이루어진다. 게이트웨이 노드1에서 게이트웨이 노드4로의 데이터 전송은 ATIM 메시지의 송수신 없이 이루어진다.

#### IV. 모의실험 및 성능 분석

이 장에서는 본 논문에서 제안하는 CARCODS 프로토콜에 대한 성능을 평가하기 위해서 복잡한 무선 에드 혹 네트워크를 노드의 이동 모델과 메시지의 통신 모델, 그리고 노드의 에너지 모델로 세분화하여 모델링 하였다[9].

시뮬레이션 매개 변수들은 표 1에 나타내었다. 실험을 위한 무선 에드 혹 네트워크의 크기는 1000m×1000m이고, 각 노드의 최대 전파 전송 거리는 250m로 통일하였다. 노드의 초기 에너지 평균값은 50 (Joule) 을 사용하였다. 이웃 구성 통보 메시지 브로드 캐스팅 지연 시간을 계산하기 위한 가중치 요소 값으로  $w_1=0.4$ ,  $w_2=0.4$ ,  $w_3=0.2$ 를 각각 사용하였다. 가중치 요소 값은 실제 사용에서 네트워크 사용자에게 의하여 적절히 설정될 수 있으며 효율적인 가중치 요소 값을 찾아내는 것은 추후 연구 분야이다. 최대 링크 불안정성 값 반영치  $L_{i,max}$  는 12.5 로 결정하였고, 최대 잔여 에너지 값 반영치  $E_{max}$  는 200 J(Joule), 그리고 최대 이웃 노드 수 반영치  $N_d^{max}$  는 25 노드로 결정하였다.

표 1. 시뮬레이션 환경.

내용	값
실험 구역의 크기 (Simulation area)	1000m X 1000m
시뮬레이션 시간	1200 (seconds)
평균 데이터 전송률	2 ~ 10 (kbps)
최대 전파 전송 거리	250m
노드의 초기 에너지 평균값	50 (Joule)
노드 수 (N)	20-60
평균 정지시간(pause time)	20,40,80,100 (초)
노드 이동 속도 (velocity)	0~20m/s(균등분포)

- (a) 네트워크 이동 모델: 시스템 내의 각 노드들은 임의의 중간기점 (random waypoint) 모델에 따라 이동한다. 이동 시나리오의 정지 시간(pause time)에 따라 결정된다. 이동 시나리오 오는 중단 시간 동안 정지하다가 임의 목적지를 실험 구역 공간 내에서 선택한 후에 노드는 균등 분포된 확률로 0~20m/s 속도 범위에서 하나를 선택하여 선택된 속도로 목적지로 이동한다.
- (b) 통신 모델: 네트워크를 구성하고 있는 노드 중에 몇 개의 노드를 선택하여 트래픽 소스로 동작하게 한다. 트래픽소스로 동작하는 노드는 한 세션에서 전송하는 패킷의 수만큼 패킷들을 목적지 노드까지 CBR(Constant Bit Rate)로 전송한다. 데이터 패킷 하나의 크기는 512 byte로 고정하였다. 트래픽 소스로 지정된 노드는 1Mbps의 고정 비트율로 전송하므로 초당 평균적으로 256개의 패킷을 발생시킨다. 트래픽 소스 노드의 수를 변화시키는 것은 전체 네트워크의 전송률을 변화시키는 것과 동등한 효과를 가져오므로, 전체 네트워크의 전송률의 변화에 따르는 성능 평가 모델은 트래픽 소스 노드의 수를 변화하는 방식으로 단순화 시켜 모델링 할 수 있다. 패킷 전송은 신뢰성이 있고 그러므로 모든 패킷 손실은 dominating set의 재구성이나 노드의 이동으로 인한 링크 단절로 루트가 손실되었을 때만 일어난다. 세션이 끝난 트래픽 소스 노드는 일정 기간 동안 휴지기를 기다린 후 다시 새로운 목적지를 선택하고 선택된 목적지와의 세션을 시작한다.
- (c) 에너지 모델: 노드가 1Mbps의 고정 비트율로 송수신할 때 각 노드의 노드 상태에 따르는 전력소모율은 다음과 같이 설정하였다. [6]

표 2. 노드 상태에 따른 전력 소모율.

송신상태(Tx)	수신상태(Rx)	유희상태(Idle)	슬립상태(Sleep)
1400 mW	1000 mW	830 mW	130 mW

본 논문에서 제안한 CARCODS 프로토콜의 성능을 패킷 손실률(loss rate), 노드당 평균 전력 소모율(average power consumption per node), 그리고 네트워크 수명(lifetime)을 비교 항목으로 하여 IEEE 802.11 [2]과 Wu와 Li의 단순 분산형 근사 알고리

증 기반의 연결형 dominating set 구성 방법[4]과 비교한다. 네트워크 계층의 프로토콜로는 on-demand 방식의 프로토콜인 AODV 프로토콜을 사용하여 루트 탐색 및 설정, 패킷 포워딩을 수행하였다.

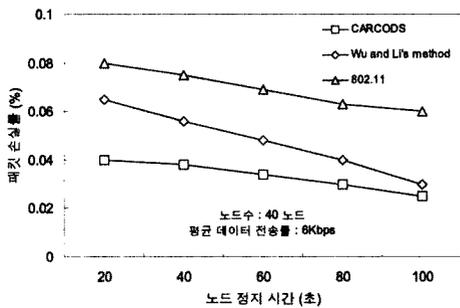
첫 번째 실험에서는 노드의 평균 정지 시간(pause time)과 평균데이터 전송률을 변수로 하여 CARCODS 프로토콜의 패킷 손실률을 802.11 기반과 Wu와 Li의 단순 분산형 근사 알고리즘으로 구성된 연결형 dominating set기반에서의 실험을 통해서 얻어진 결과 값과 비교하였다. 그림 13-a에서처럼 노드의 정지 시간이 짧을수록, 즉 노드의 이동성이 커질수록 802.11 기반과 Wu와 Li 방법에 의해 구성된 연결형 dominating set의 경우 패킷 손실률이 급격히 증가하지만 CARCODS 프로토콜의 패킷 손실률의 증가는 비교적 작았다. 노드의 정지시간이 100 초에서 20초로 짧아질 때, 802.11 기반과 Wu와 Li방법에 의해 구성된 연결형 dominating set 방법은 손실률이 각각 33%, 110% 만큼 증가하지만, CARCODS 프로토콜은 패킷 손실률이 55% 증가한다. 802.11 기반보다 이동성 증가에 따른 패킷 손실률의 증가는 크지만, 절대 수치에서 802.11 기반의 패킷 손실률이 CARCODS 프로토콜보다 현저하게

크다. CARCODS 프로토콜은 노드의 이동성을 고려하여 게이트웨이 노드를 결정하므로 이와 같은 실험결과가 나타남을 알 수 있다.

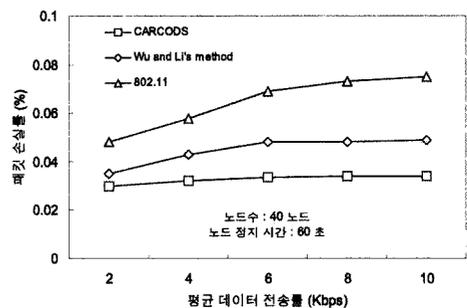
그림 13-b의 결과에서 볼 수 있듯이 노드의 평균 데이터 전송률이 높아질수록 노드의 전력 소모가 높아지므로 노드의 전력 고갈에 의해 발생하는 루트 손실로 인한 패킷 손실률이 커진다. 노드의 평균 데이터 전송률이 2 Kbps에서 10Kbps로 증가할 때 802.11 기반과 Wu와 Li방법에 의해 구성된 연결형 dominating set 방법은 패킷 손실률이 각각 약 60%, 40% 증가한다. 그러나 CARCODS 프로토콜의 패킷 손실률은 10% 정도 증가하는데 그친다. CARCODS 프로토콜은 노드의 잔여 전력을 고려하여 게이트웨이를 선정하여 특정 노드의 전력 소모가 높아지는 것을 막을 수 있기 때문이다.

두 번째 실험에서는 노드 밀도와 평균 데이터 전송률을 변수로 하여 CARCODS 프로토콜의 노드당 평균 전력 소모율을 802.11 기반과 Wu와 Li의 단순 분산형 근사 알고리즘으로 구성된 연결형 dominating set기반에서의 실험을 통해 얻은 결과 값과 비교하였다.

그림 14-a에서 보듯이 노드 밀도가 높아질수록

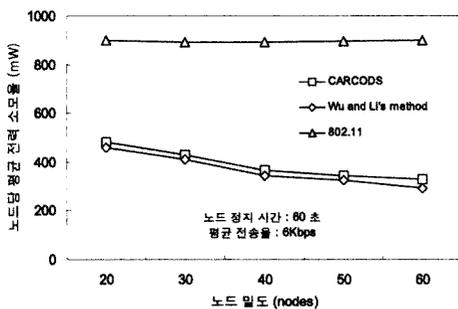


(a)

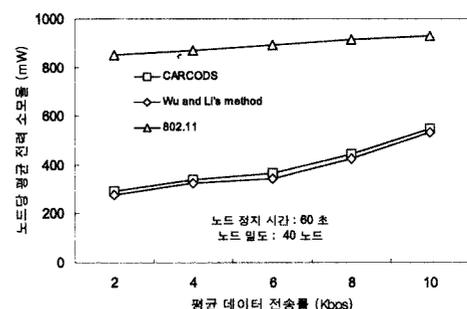


(b)

그림 13. 패킷 손실률.



(a)



(b)

그림 14. 노드당 평균 전력 소모율.

dominating set 기반의 방법은 노드당 평균 에너지 소모율이 작아짐을 보여준다. 노드 밀도가 높아질수록 전체 네트워크에서 게이트웨이 노드의 비율이 작아지기 때문에 전체 네트워크에서 슬립 모드에 있는 노드의 비율이 커진다. 그러나 802.11 기반의 방법은 노드 밀도가 높아져도 노드 당 평균 에너지 소모율은 큰 변화를 보이지 않는다. Wu 와 Li의 단순 분산형 근사 알고리즘으로 구성된 연결형 dominating set기반 방법이 CARCODS 프로토콜보다 근소하게 노드당 평균 전력 소모율이 작게 나타난다. CARCODS 프로토콜은 노드 상태를 고려하여 dominating set을 구성하므로 Wu 와 Li의 dominating set 구성 방법보다는 다소 게이트웨이의 수가 늘어나기 때문이다.

그림 14-b에서 보듯이 노드의 평균 데이터 전송률이 낮아질수록 802.11 기반과 dominating set 기반의 방법과의 노드당 평균 전력 소모율 차이는 커지고, 전송률이 높아질수록 그 차이는 줄어든다. 802.11 기반의 프로토콜은 노드가 송수신할 데이터가 없더라도 유휴상태를 유지하므로 평균 데이터 전송률이 낮아져도 노드 당 평균 전력 소모율은 크게 떨어지지 않지만, dominating set 기반의 방법들은 평균 데이터 전송률이 낮아지면 게이트웨이 노드가 아닌 노드들은 모두 슬립상태로 들어가기 때문에 전력 절감 효과가 크게 나타나기 때문이다. Wu 와 Li의 단순 분산형 근사 알고리즘으로 구성된 연결형 dominating set기반 방법과 CARCODS 프로토콜은 비슷한 노드당 평균 전력 소모율을 보이지만, CARCODS 프로토콜의 전력 소모율이 근소하게 높게 나타난다. 기본적으로 CARCODS 프로토콜은 노드 상태를 고려하여 dominating set을 구성하기 때문에 Wu와 Li의 방법에 비해 노드 수 대비 게이트웨이 수의 비율이 크기 때문이다.

세 번째 실험에서는 노드 밀도를 변수로 하여 무선 에드 혹 네트워크의 수명을 802.11 기반과 Wu 와 Li의 단순 분산형 근사 알고리즘로 구성된 연결형 dominating set기반에서의 실험을 실시하여 얻어진 결과값을 비교하였다. 무선 에드 혹 네트워크의 수명은 전체 노드 중에 10% 의 노드들이 에너지가 고갈되었을 때라고 정의하고 그 시간까지의 길이를 측정하여 그림 15에 나타내었다.

그림 15의 결과에서 알 수 있듯이 CARCODS 프로토콜은 실험 공간 내에서 다른 프로토콜보다 네트워크 수명 측면에서 가장 좋은 결과를 보인다. 802.11 기반은 노드 밀도에 따른 네트워크의 수명

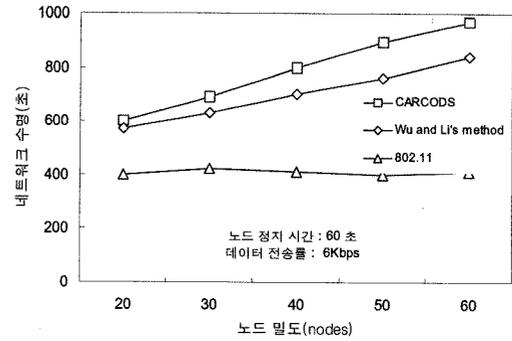


그림 15. 네트워크 수명.

의 증감이 거의 없는 결과를 보여 주었고 dominating set 기반인 Wu와 Li 방법과 CARCODS 프로토콜은 노드 밀도가 20에서 60으로 증가할 때, 네트워크의 수명이 각각 50%, 70%로 증가한다. Dominating set 기반의 프로토콜들은 노드 밀도가 증가할수록 노드당 평균 전력 소모율이 줄어들기 때문이다. 노드당 평균 전력 소모율은 CARCODS 프로토콜이 Wu 와 Li의 방법으로 구성된 연결형 dominating set 기반 방법보다 크지만, 잔여 전력을 고려하여 게이트웨이 노드를 선정하므로 특정 노드가 게이트웨이로 장기간 선정되어 전력이 고갈되는 것을 막아주기 때문에 네트워크 수명 측면에서는 더 나은 결과를 보여준다.

## V. 결론

무선 에드 혹 네트워크의 이동 노드들은 한정된 배터리로 작동되기 때문에 전력 소모의 효율성은 에드 혹 네트워크의 수명을 늘리는데 있어 중요하다. 연결형 dominating set 기반의 라우팅 프로토콜은 유휴상태에 있는 노드 수를 최소화함으로써 전력 소모를 절감할 수 있으며, 루트 탐색 공간을 게이트웨이 노드로 한정하여 루트 탐색 메시지를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 반면 연결형 dominating set의 잦은 재구성은 루트 손실로 인한 루트 재탐색 및 전송 에러를 불러일으킬 수 있고 무선 매체를 공유하는 무선 네트워크의 특성상 노드 밀도가 높을수록 혼잡으로 인한 지연 및 충돌의 가능성이 높아진다. 따라서본 논문에서 제안한 CARCODS 프로토콜은 노드의 잔여 전력과 이동성, 이웃 노드의 수를 고려하여 연결형 dominating set 을 구성함으로써 이러한 문제를 해결한다. 성능 평가를 위해 복잡한 무선 에드 혹 네트워크를 네트워크 이동 모델, 통신 모델, 에너지 모델로 세분화하여 모델링하여

제안한 CARCODS 프로토콜을 기존 기법과 비교하였다. 기존의 방법은 시뮬레이션 시간이 경과할수록 노드 잔여 전력 고갈로 인하여 루트 손실로 인한 패킷 손실률이 급격하게 증가하였지만 CARCODS 프로토콜은 기존 방법들에 비하여 패킷 손실률의 증가 속도가 더뎠다. 또한 노드의 이동성이 높아질수록 기존의 연결형 dominating set 구성 방법 기반의 에드 혹 라우팅 방법보다 패킷 손실률의 측면에서 더 나은 결과를 보여준다. 다만 최소 연결형 dominating set 보다 CARCODS 프로토콜로 구성되는 연결형 dominating set의 게이트웨이 노드의 수가 더 많기 때문에 노드당 평균 전력 소모율은 최소 연결형 dominating set의 노드당 평균 전력 소모율보다 다소 증가하는 결과를 보여주었다. 향후 과제로 본 논문에서 제안한 CARCODS 프로토콜에 특화된 네트워크 계층의 에드 혹 라우팅 프로토콜의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Feeney, L.M. and Nilsson, M., "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," Proceedings of IEEE Infocom, Anchorage AK, April, 2001.

[2] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications," IEEE 802.11 Standard, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee (August 1999).

[3] T. W. Haynes, Hedetniemi S. T., and P. J. Slater, "Fundamentals of Domination in Graphs," A Series of Monographs and Text books. Marcel Dekker, Inc., 1998.

[4] J. Wu and H. Li, "On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks," in : Proceedings of the Third International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, Seattle, WA (August 1999).

[5] J. Wu and M. Gao, "On calculating power-aware connected dominating sets for efficient routing in ad hoc wireless networks," in Proceedings of the 30th Annual Interna-

tional Conference on Parallel Processing, Valencia, Spain (September 2001).

[6] Chen Benjie, Jamieson Kyle, Balakrishnan H. and Morris Robert, "SPAN: An Energy-Efficient Coordination Algorithm of Topology Maintenance in Ad hoc Wireless Networks", ACM Wireless Networks Journal, Volume 8, Number 5, pp. 481-494, September, 2002.

[7] S. Guha and S. Khuller, "Approximation algorithms for connected dominating set," Algorithmica, 20(4):374-387, April 1998.

[8] Y. P. Chen and A. L. Liestman, "Approximating Minimum Size Weakly-Connected Dominating Sets for Clustering Mobile Ad hoc Networks", MOBIHOC '02, June, 2002.

[9] Y. H. Kang, Y. I. Eom, "Balancing Routing Energy Consumption in Wireless Ad-hoc Network Environments", The Journal of KICS, pp. 1671-1683, Oct, 2001.

조 형 상 (Hyoung-Sang Cho)

준회원



2003년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사)  
2003년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정  
<관심분야> 에드 혹 네트워크, 유비쿼터스 센서 네트워크, Mobile IP, 인터넷 QoS

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)

정회원



1988년 2월 한양대학교 전자통신학과 (공학사)  
1990년 2월 한국 과학 기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
2000년 8월 한국 과학 기술원 전자전산학과(공학박사)  
1990년 3월~2001.2 한국통신

연구개발본부 전임연구원  
2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수  
<관심분야> 인터넷 QoS, 초고속 통신망 구조, 멀티미디어 네트워킹, 트래픽 엔지니어링