

## Hitch-hiking 기법을 이용한 MST 기반

무선 애드 혹 네트워크 브로드캐스트 알고리즘<sup>1)</sup>전상현<sup>○\*</sup> 장형수<sup>\*</sup> 조준호<sup>\*\*</sup>

서강대학교 컴퓨터학과, 포항공과대학교 전자전기공학과

{shjeon<sup>○\*</sup>, hschang<sup>\*</sup>}@smolab.sogang.ac.kr, {jcho<sup>\*\*</sup>}@postech.ac.kr

## Energy Efficient MST based Broadcast with Hitch-hiking in Wireless Ad Hoc Network

Sang-hyun Jeon<sup>○\*</sup>, Hyeong Soo Chang<sup>\*</sup>, Joon Ho Cho<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>Department of Computer Science, Sogang University<sup>\*\*</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH

## 요 약

본 논문에서는 정적인(static) 무선 애드 혹 네트워크(wireless ad hoc network)상에서 동작하는 에너지 효율적인 broadcast 알고리즘인 "MST based Broadcast with Hitch-hiking(MBH)" 알고리즘을 제안한다. MBH는 BIP[1]에 Hitch-hiking 기법[2]을 적용시킨 BHH(Broadcast by Hitch-Hiking)[3]에 비해 적은 시간 복잡도를 가지면서 더 적은 에너지를 소모해 broadcast를 수행할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 분산(distributed) MBH는 1-hop 이웃정보만을 이용해 broadcast 트리를 구성하기 때문에 높은 확장성(scalability)을 가지며, 빠르고 효율적으로 에너지 효율적인 broadcast 트리를 구성할 수 있다. 또한 분산 MBH는 이동성을 고려한 동적 네트워크의 잦은 위상변화에 빠르게 적용할 수 있도록 쉽게 확장할 수 있다.

## 1. 서론

본 논문에서는 정적인 무선 애드 혹 네트워크(wireless ad hoc network)상에서 에너지를 효율적으로 사용하며 broadcast를 수행하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 네트워크의 전역정보(global information)를 이용해 broadcast 트리를 구성하는 중앙식(centralized) 알고리즘과 함께 1-hop 이웃노드의 정보만을 이용해 빠르게 에너지 효율적인 broadcast를 수행하는 분산(distributed) 알고리즘을 제안한다.

가장 대표적인 무선 애드 혹 네트워크 broadcast 알고리즘인 BIP[1]는 Prim's MST 알고리즘[9]에 기반을 둔 알고리즘으로서 빠르게 효율적인 broadcast 트리를 구성한다. WMH[2]는 Hitch-hiking 기법(이후 간단히 'HH기법'이라 표기하겠다.)을 이용한 다층 간(cross-layer) 최적화 방법을 이용해 BIP와 비교해 약 50%의 성능향상을 이루었다. WMH에 사용된 HH기법에 대해서는 2장에서 자세히 소개하도록 한다. 또한 BIP에 HH기법을 적용시킨 BHH[3]는 WMH보다 10~20% 적은 에너지로 broadcast할 수 있음을 보였다. 다음으로 BCHA[5]는 노드들이 정보를 전송받는 순서를 조정함으로써 각 노드의 power를 결정하는 coverage sequence reordering[5]을 이용함으로써 기존의 BHH보다 좋은 성능을 낼 수 있음을 보였다. 위 알고리즘들은 공통으로 broadcast를 하기 위해 전역정보를 미리 알고 있어야만 하는 단점을 갖고 있다. 알고리즘이 전역정보를 다 고려하면 네트워크 크기가 커질 경우 확장성에 문제가 생기므로, 지역정보만(local information)을 이용하는 broadcast 알고리즘에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 우

선 LBIP[6]는 기존 BIP 알고리즘을 수정해 지역정보만을 이용해 broadcast tree를 구성하는 알고리즘이다. 하지만 지역정보만을 이용하기 때문에 BIP보다 약간 성능이 떨어진다. 분산 WMH[2]도 제안되었는데 성능은 중앙식(centralized) WMH보다 약간 떨어지지만 HH기법을 이용한 분산 알고리즘이므로 LBIP에 비해서는 더 나은 성능을 보인다.

이러한 분산 broadcast 알고리즘에서 공통적으로 나오는 문제는 (1)한 노드가 인접 노드들의 정보를 얼마나 알고 있어야 하느냐와 (2)인접한 노드들의 결정이 충돌되는 경우 이를 어떻게 해결하느냐 하는 것이 있다. 다수의 분산 broadcast 알고리즘에서는 LBIP와 분산 WMH 등에서 알 수 있듯이 각 노드가 2-hop 이웃들의 정보를 유지하고 이를 각 노드의 전송강도를 결정할 때 이용한다. 하지만 2-hop 이웃들의 개수가 많아질수록 각 노드가 유지해야 하는 정보의 양이 많아지므로 이는 자칫 메모리가 부족한 무선기기에서 문제로 작용할 수 있다. 또한 인접한 노드들의 결정이 충돌되는 것은 [6]에서 나온 예에서도 알 수 있듯이 인접한 서로 다른 노드가 정보를 보낼 노드가 겹칠 경우 에너지가 낭비되거나 broadcast 알고리즘이 올바르게 동작하지 않는 결과를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 정적인 무선 애드 혹 네트워크(wireless ad hoc network)상에서 MST(Minimum Spanning Tree)를 기반으로 에너지 효율적인 broadcast를 수행하는 "MST based Broadcast with Hitch-hiking(MBH)" 알고리즘을 제안한다. MBH는 Prim's MST 알고리즘[9]에 기반을 둔 알고리즘으로써 BIP[1]에 HH기법을 적용시킨 BHH (Broadcast by Hitch-Hiking) [3]보다 좋은 성능을 보이면서 낮은 시간 복잡도를 갖는다. 또한 분산 MBH는 1-hop 이웃정보만을 이용하고 사용하는 컨트롤 메시지의 수가 상대적으로 적기 때문에 분산 환경에

1) 이 논문은 정보통신부의 대학 기초 사업 지원에 의하여 연구되었습니다(No. B1220-0501-0272).

서 에너지 효율적인 broadcast를 수행할 수 있다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 에너지 효율적인 broadcast(Minimum Power Broadcast : MPB)문제를 수학적으로 정의하고, 이와 관련된 coverage sequence[5]와 coverage sequence를 이용한 노드의 power할당 등을 소개한다. 3장에서는 MBH알고리즘의 아이디어와 동작과정 그리고 분산 환경에서 고려해야 할 사항들에 대해 기술한다. 다음으로 4장에서는 실험을 통해 MBH알고리즘의 성능을 보인다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 정리한다.

2. Problem setup

MPB문제는 주어진 무선 애드 혹 네트워크상에서 각 노드들의 에너지를 최소한으로 소모하면서 broadcast를 수행하기 위해 각각의 노드에 최적의 transmission power를 할당하는 문제이다. 이 장에서는 static 네트워크상에서 MPB문제를 정의한다.

2.1 Network model

무선 애드 혹 네트워크는 다음과 같이 그래프를 이용해 기술할 수 있다. 주어진 연결된(connected) 그래프  $G=(V,E)$ 에 대하여  $V$ 는 각각의 무선 노드들의 집합을 의미하고, 네트워크상의 모든 무선 노드들의 개수는  $|V|=N$ 이다. 각각의 노드  $v \in V$ 에 대하여  $p_v$ 는 노드  $v$ 의 전송강도(transmission power)를 나타내고, 각 노드는  $p_v \leq p_{max}$ 를 만족하는 최대 전송강도(maximum transmission power)를 갖는다. 본 논문에서는 모든 노드들이 동일한  $p_{max}$ 를 갖는다고 가정한다. 임의의 두 노드  $v_1, v_2 \in V$ 에 대하여  $d_{v_1v_2}$ 는 두 노드간의 Euclidean distance를 나타낸다. 노드  $v_1$ 이 노드  $v_2$ 에 패킷을 전송하기 위해서는 노드  $v_1$ 이  $p_{v_1v_2}$ 의 전송강도가 필요하고,  $p_{v_1v_2}$  다음과 같이  $(d_{v_1v_2})^\alpha$ 에 비례하는 에너지 모델(energy model)을 사용한다[7].

$$p_{v_1v_2} = c \cdot (d_{v_1v_2})^\alpha,$$

이때  $c$ 는 상수,  $\alpha$ 는 path loss exponent ( $2 \leq \alpha \leq 6$ )이다[7]. 또한,  $p_{v_1v_2} \leq p_{max}$ 인 경우 노드  $v_1$ 과  $v_2$ 는 이웃노드라 하고, 간선(edge)  $(v_1, v_2) \in E$ 가 존재한다.

2.2 Hitch-hiking model[2]

A. Coverage

임의의 노드  $v_1, v_2 \in V$ 에 대하여 노드  $v_1$ 이 노드  $v_2$ 에 패킷을 보낼 때, 노드  $v_1$ 이 보낸 패킷을 노드  $v_2$ 가 얼마나 decode할 수 있는나 하는 정도를 coverage,  $c_{v_1v_2}$ 라 하고 다음과 같이 정의한다.

$$c_{v_1v_2} = c \left( \frac{p_{v_1}}{p_{v_1v_2}} \right)$$

이 때  $c(\beta)$ 는 다음과 같은 함수이다.

$$c(\beta) = \begin{cases} 1, & \text{for } \beta > 1 \\ \beta, & \text{for } 0 < \beta \leq 1 \end{cases}$$

노드  $v_1$ 에 의한 노드  $v_2$ 의 coverage가 1 일 때( $c_{v_1v_2}=1$ ), 노드  $v_2$ 는 노드  $v_1$ 에 의해 완전히 커버(fully covered)된다고 한다.

B. Packet combining

노드  $v_1, v_2, \dots, v_k$ 들이 보낸 패킷을 인접한 노드  $v_0$ 가 각각의 노드들로부터 받은 coverage가  $c_{v_1v_0}, c_{v_2v_0}, \dots, c_{v_kv_0}$ 일 때, maximal ratio combiner(MRC)[8]를 이용해 노드  $v_0$ 의 coverage를

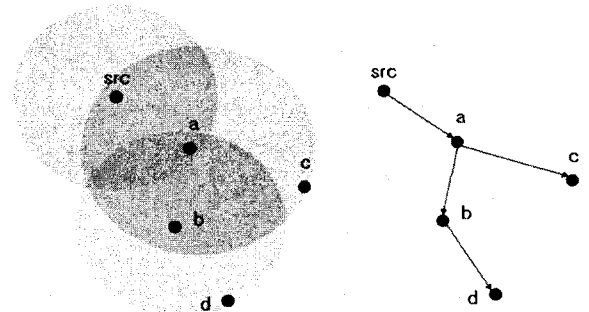
$$c_{v_0} = \sum_{i=1}^k c_{v_iv_0}$$

으로 만들 수 있다. 이때  $c_{v_0} \geq 1$ 인 경우 노드  $v_0$ 는 인접한 노드들에 의해 커버(covered)된다고 한다. 이와 같이 coverage가 1이 안 되는 패킷들을 MRC를 이용해 결합함으로써 완전한 패킷을 복원해 내는 기법을 packet combining이라 하고, Hitch-hiking mode은 packet combining을 이용함으로써 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다.

2.3 coverage sequence

다음 [그림 1]은 무선 애드 혹 네트워크에서 broadcast가 이루어지는 상황을 나타낸 그림이다. 아래에 그림에서 노드 src가 노드 a에 정보를 보내고, 노드 a는 노드 b와 노드 c에, 마지막으로 노드 b는 노드 d에 정보를 보낸다. 이를 그래프 형태로 나타내면 오른쪽과 같은 트리로 나타낼 수 있다. 이 때 소스 노드로부터 커버(cover)되는 순서로 이루어진 노드들의 sequence를 얻을 수 있는데 이러한 sequence를 coverage sequence라 정의한다. coverage sequence는  $S_N$ 으로 나타내며,  $S_N=(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 은  $N$ 개의 노드들로 이루어진 coverage sequence를 의미한다. 이 때  $S_N$ 는 다음과 같은 특성을 만족시켜야 한다.

- sequence의 첫 노드, 즉 소스노드  $v_1$ 는 커버리지가 1이어야 한다. 초기에 소스 노드는 후속 노드들에게 전달할 정보를 완전히 갖고 있어야 한다.
- 임의의  $i(1 \leq i \leq N-1)$ 에 대해,  $p_{v_iv_{i+1}} \leq p_{max}$ 이 성립해야 한다. 즉, sequence에서 인접한 노드들 간의 Euclidean distance는 최대  $p_{max}$ 의 에너지를 사용해 패킷을 전달할 수 있는 거리범위 이내이어야 한다.
- 임의의  $i(2 \leq i \leq N)$ 에 대해,  $\sum_{j=1}^{i-1} c_{v_jv_i} \geq 1$ 이어야 한다. 즉, sequence에 앞서 나온 노드들로부터 받은 패킷을 완전히 decode할 수 있어야 한다.



[그림 1] 무선 애드 혹 네트워크상에서 broadcast

2.4 Power assignment using coverage sequence

이번 절에서는 coverage sequence를 이용해 power vector를 구하

는 방법에 대해서 알아보았다. coverage sequence로부터 power vector를 구하는  $AssignPow: S_N \rightarrow R^N$  함수를 정의할 수 있다. 이때  $R^N$ 은 N차원의 power vector들의 집합을 의미하고,  $S_N$ 은 N개의 노드들로 이루어진 모든 coverage sequence들의 집합을 의미한다. 함수  $AssignPow$ 는 크게 LP를 이용한 power assignment, adjacent power assignment by sequence, adjacent power assignment by distance의 세 가지 방법으로 구현할 수 있다. 각각에 대해서 자세히 살펴보면 다음과 같다.

**A. LP를 이용한 power assignment**

주어진 coverage sequence  $s_N=(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 로부터 최적의 power vector  $p_N=(p_{v_1}, p_{v_2}, \dots, p_{v_N})$ 을 결정하는 문제는 다음과 같이 정형화(formulate)할 수 있다[4].

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{i=1}^N p_{v_i} \\ & \text{satisfying } p_N \geq 0, \\ & \sum_{k=1}^{i-1} c_{v_i, v_k} \geq 1, \quad \forall i (2 \leq i \leq N) \end{aligned}$$

위 문제는 Linear Programming(LP)을 이용해 주어진 coverage sequence  $s_N$ 에 대한 최적의 power vector  $p_N$ 을 구할 수 있다 [11]. 이러한 LP를 이용해  $p_N$ 을 구하는 함수를  $AssignPow_{LP}$ 라 하자. 분명히  $AssignPow_{LP}$ 는 해당  $s_N$ 에 대한 최적의  $p_N$ 을 찾아주지만, 수행시간이 오래 걸리기 때문에 에너지가 풍부하지 않은 mobile기에서  $AssignPow_{LP}$ 를 수행하는 것은 그다지 효율적이지 못하다.

**B. adjacent power assignment by sequence**

adjacent power assignment by sequence( $AssignPow_{adjS}$ )는 coverage sequence에 있는 바로 이전 노드가 다음 노드를 커버할 수 있도록 각 노드에 power를 할당하는 방법이다. coverage sequence  $s_N$ 을 이용해 power vector  $p_N=(p_{v_1}, p_{v_2}, \dots, p_{v_N})$ 를 구하는 함수  $AssignPow_{adjS}$ 의 pseudo code는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & AssignPow_{adjS}(s_N=(v_1, v_2, \dots, v_N)) \{ \\ & \text{for all } i, 1 \leq i \leq N-1, \\ & \text{if } (c_{v_i, v_{i+1}} \neq 1) \{ \\ & \quad p_{v_i} \leftarrow d_{v_i, v_{i+1}} \\ & \text{else} \\ & \quad p_{v_i} \leftarrow 0 \\ & \quad p_{v_N} \leftarrow 0 \\ & \} \} \end{aligned}$$

[그림 2]  $AssignPow_{adjS}$ 의 pseudocode

$AssignPow_{adjS}$ 는 coverage sequence  $s_N$ 을 이용해 빠르게 power vector  $p_N$ 을 구할 수 있는 장점이 있지만 앞서 설명한

$AssignPow_{LP}$ 에 비해 성능이 떨어질 수 있다는 단점이 있다.

**C. adjacent power assignment by distance**

adjacent power assignment by distance( $AssignPow_{adjD}$ )는 coverage sequence의 앞에 있는 노드들 중 커버할 노드와의 Euclidean distance가 가장 가까운 노드의 power를 올려 해당 노드를 커버하는 방법이다. coverage sequence  $s_N$ 을 이용해 power vector  $p_N=(p_{v_1}, p_{v_2}, \dots, p_{v_N})$ 를 구하는 함수  $AssignPow_{adjD}$ 의 pseudo code는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & AssignPow_{adjD}(s_N=(v_1, v_2, \dots, v_N)) \{ \\ & \text{for all } i, 1 \leq i \leq N-1, \\ & \text{if } (c_{v_i, v_{i+1}} \neq 1) \{ \\ & \quad v_{min} \in \underset{v_i < v_j \leq v_{i+1}}{\text{argmin}} d_{v_i, v_j} \\ & \quad p_{v_{min}} \leftarrow d_{v_{min}, v_{i+1}} \\ & \text{else} \\ & \quad p_{v_i} \leftarrow 0 \\ & \quad p_{v_N} \leftarrow 0 \\ & \} \} \end{aligned}$$

[그림 3]  $AssignPow_{adjD}$ 의 pseudocode

$AssignPow_{adjD}$ 는  $AssignPow_{adjS}$ 에 비해 수행시간이 좀 더 소모되지만 보다 나은 성능을 보이기 때문에  $AssignPow_{adjS}$ 보다 좀 더 효율적인 power vector  $p_N$ 을 구하고자 할 때 사용할 수 있다.

**2.5 Problem setup**

이제 MPB문제를 다음과 같이 정형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{MPB문제는 주어진 } G=(V, E) \text{에 대해,} \\ & AssignPow_{LP}(s_N), s_N \in S_N \text{을 최소화시키는 } s_N^* \text{를 찾는} \\ & \text{문제이다.} \end{aligned}$$

위 MPB문제의 최적해는 모든  $s_N \in S_N$ 에 대해서  $AssignPow_{LP}$ 를 이용해 해당 coverage sequence에 대한 최적의 power vector를 구한 뒤, 이렇게 구한 전송강도의 총합이 최소가 되는 coverage sequence  $s_N^*$ 을 선택하면 된다. 하지만  $|S_N|=(N-1)!$  이므로 NP=P가 아니면, MPB문제의 최적해를 다항 시간(polynomial time) 내에 찾는 것은 불가능하다[10].

**3. 중앙식(centralized) MBH 알고리즘**

MBH는 Prim's 알고리즘에서 distance를 측정하기 위한 metric으로 coverage distance를 이용한 알고리즘이다. MBH가 갖는 특징 중 하나는 HH기법을 이용하기 때문에 간선을 추가할 때마다(즉 노드의 power를 올릴 때마다) 인접한 노드들 간의 coverage distance가 낮아지므로 어떤 간선을 추가하느냐에 따라 네트워크 위상이 달라지는 특징이 있다.

```

MBH()
  t ← 1
  st ← {v1}
  while( cv ≠ 1, ∀ v ∈ V )
    (vt, vt') ∈ arg minv ∈ st, v' ∈ St dv, v'
    st+1 ← {st, vt}' }
    vmin ∈ arg minvi, 1 ≤ i ≤ t dvi, vt+1' }
    pvmin ← pvmin + dvmin, vt' }
    t ← t + 1
  }
  return AssignPowadjD(st)
    
```

[그림 4] MBH알고리즘 pseudocode

3.1 알고리즘

MBH알고리즘은 커버리지가 1인 노드들과의 coverage distance가 최소인 노드를 새롭게 커버할 노드로 선택한 뒤 이 노드와의 Euclidean distance가 가장 가까운 노드가 power를 올림으로써 해당 노드를 커버한다. 이 과정을 네트워크상의 모든 노드가 커버될 때까지 반복함으로써 broadcast 트리를 구성한다. [그림 4]는 MBH알고리즘의 pseudocode로서 기존에 커버된 노드들과의 coverage distance가 가장 적은 노드를 선택하고, 다음으로 이렇게 선택된 노드를 기존의 coverage sequence  $s_t$ 의 맨 뒤에 추가한다. 그리고 이렇게 선택된 노드를 커버하기 위해 이미  $s_t$ 에 있는 노드들 중 선택된 노드에 가장 가까운 노드가  $v_t'$ 을 커버하도록 power를 증가시킨다. [그림 4]에서 알 수 있듯이 while루프 내에서 최소 매번 하나의 노드가 커버되므로 while루프 내에 있는 코드가 최대 N-1번 수행됨을 알 수 있다. 가장 많은 수행시간을 필요로 하는 새롭게 커버할 노드를 선택하는 과정의 시간복잡도는  $O(N^2)$ 이므로 전체 알고리즘의 시간복잡도는  $O(N^3)$ 으로 BIP[2]나 BCAH[5]보다 낮음을 알 수 있다.

4 분산(distributed) MBH 알고리즘

분산 MBH알고리즘은 각 노드가 1-hop 이웃노드들의 정보를 유지하면서 내부에 설정된 timer가 종료(expire)되거나 외부로부터 패킷을 받을 때 내부 상태에 따라 동작을 수행함으로써 broadcast를 수행한다. 분산 MBH알고리즘에서 각 노드가 유지해야 할 이웃노드들의 정보는 다음과 같다. 각 노드  $v_i \in V$ 에 대해,

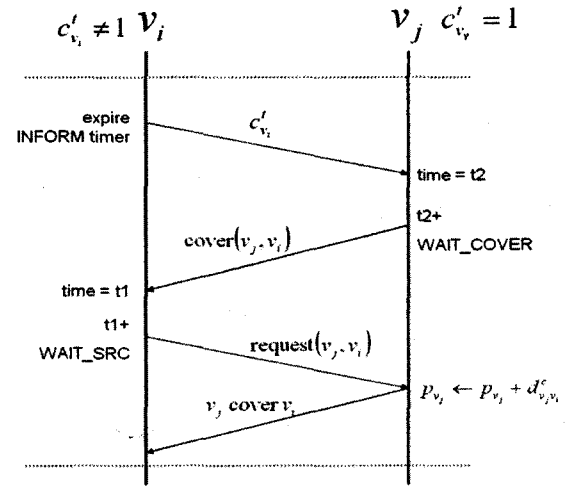
- $N_{v_i}$  : 노드  $v_i$ 의 시간  $t$ 일 때 1-hop 이웃노드들의 집합
- $D_{v_i}$  : 노드  $v_i$ 와 이웃노드들 간의 Euclidean distance
- $C_{v_i}$  : 이웃노드들의 커버리지
- $c_{v_i}$  : 노드  $v_i$ 의 커버리지
- $n_{v_i}^t$  : 노드  $v_i$ 가 시간  $t$ 일 때 커버하는 노드

[그림 5] 각 노드가 유지하는 이웃정보

위 정보를 기반으로 각 노드에서는 다음과 같은 두 종류의 이벤트(event)에 따라 MBH 알고리즘이 동작한다. 이러한 이벤트는 각 노드 내부에 설정된 타이머에 의해 발생하는 timer expire event와 외부에서 패킷이 들어오는 경우 생기는 packet receive event가 있고, 각 이벤트에 따른 노드의 세세한 동작은 다음과 같다.

4.1 timer expire event에 따른 동작

분산 MBH에서 각 노드에서 발생하는 timer는 INFORM, WAIT\_SRC, WAIT\_COVER의 세 종류가 있다. INFORM timer는 각 노드가 주기적으로 자신의 위치를 알리기 위해 사용하는 timer로서 INFORM timer가 종료되면 해당 노드는  $p_{max}$ 의 power로  $c_{v_i}$ 를 포함한 hello메시지를 전송한다. 다음은 WAIT\_SRC timer로 아직 커버되지 않은 노드에서 발생하는 timer이다. 이 timer는 이미 커버된 인접한 노드가 보낸 cover메시지를 최초로 받은 뒤 다른 인접한 노드들의 cover메시지를 기다리기 위해 설정된 timer이다. 이 때 cover메시지는 인접한 노드가 자신을 커버할 수 있음을 알리기 위한 메시지이다. 마지막으로 WAIT\_COVER timer는 이미 커버된 노드에서 발생하는 timer로서 아직 커버되지 않은 인접한 노드로부터 최초 hello메시지를 받은 뒤 다른 노드들의 hello메시지를 기다리기 위해 설정한 timer이다.



[그림 6] 메시지 흐름도

4.2 packet receive event에 따른 동작

노드  $v_i$ 가  $v_j$ 가 보낸 hello메시지를 받았다고 할 때, 노드  $v_i$ 는 수신강도와  $c_{v_j}$ 를 이용해  $N_{v_i}$ ,  $D_{v_i}$ , 그리고  $C_{v_i}$ 를 갱신한다. 수신노드의  $c_{v_j}$ 가 1인 경우 커버할 노드  $n_{v_i}^t$  변경여부를 결정하기 위해 WAIT\_COVER timer를 동작시킨 뒤 timer가 expire되면  $N_{v_i}$  중에서 coverage distance가 가장 가까운 노드  $v_{min} \in N_{v_i}$ 에  $cover(v_i, v_{min})$ 메시지를 보낸다. 이 때  $cover(v_i, v_{min})$ 메시지는 노드  $v_i$ 가 노드  $v_{min}$ 을 커버하겠다는 요청을 나타내는 메시지이다. 한편  $c_{v_j}$ 가 1이 아닌 경우에는 이웃노드들의 정보를 갱신한다. 다

음으로  $c_i$ 가 1이 아닌 노드가  $cover(\cdot, v_i)$  메시지를 받은 경우 WAIT\_SRC timer를 동작시킨 뒤 timer가 expire되면  $cover(\cdot, v_i)$  메시지를 보낸 노드들 중  $v_i$ 와의 Euclidean distance가 가장 가까운 노드  $v_{min}$ 에게  $request(v_{min}, v_i)$  메시지를 보낸다. 이  $request(v_{min}, v_i)$  메시지를 받은 노드  $v_{min}$ 은 노드  $v_i$ 를  $nc_{v_{min}}$ 으로 설정하고  $d_{v_{min}, v_i}$ 만큼 power를 올린다. 아래 [그림 6]은 아직 커버되지 않은 노드  $v_i$ 와 인접한 이미 커버된 노드  $v_j$ 간에 메시지 통신과정을 단순화시켜 나타낸 그림이다.

4.2 논의사항

A. 지역정보(local information)

모바일 기기들은 메모리가 한정되어 있기 때문에 broadcast를 수행할 때 고려하는 지역정보의 양을 최대한 줄이는 것이 좋다. 많은 분산 broadcast알고리즘들은 2-hop 이웃정보[2][6]를 유지하는 반면 분산 MBH에서는 1-hop 이웃정보만을 유지함으로써 메모리 제약의 덜 받는 특성을 갖는다. 또한 [2][6]에서 2-hop 이웃정보는 1-hop 이웃을 통해 얻기 때문에 이는 시간적으로 오래된 정보일 수밖에 없고, 이로 인해 이동성을 고려한 네트워크에서 broadcast 알고리즘이 2-hop이웃정보들을 이용한 결정의 정확성이 떨어질 수 있다. 분산 MBH와 같이 1-hop 이웃정보만을 고려하는 broadcast알고리즘은 상대적으로 좀 더 정확한 결정을 내릴 수 있다.

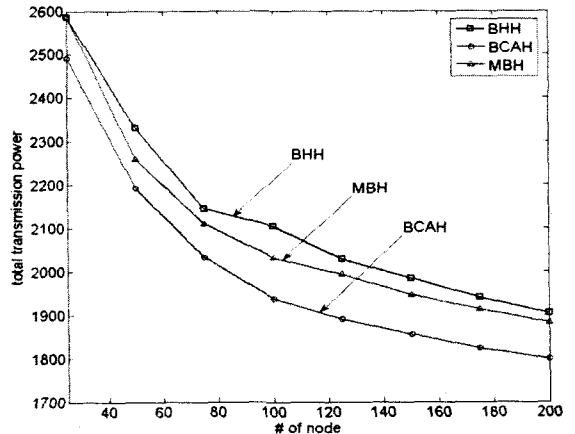
B. 결정 충돌(conflicting decision)

분산 broadcast알고리즘에서는 인접한 노드들이 선택한 정보를 전송할 노드가 겹치는 경우가 발생할 수 있다. 이로 인해 broadcast 알고리즘이 수행되는 도중 알고리즘이 정상적으로 동작하지 않거나, 중복된 전송을 반복해 수행함으로써 에너지 낭비를 일으킬 수 있다. 이러한 문제는 많은 분산 broadcast알고리즘에서 공통적으로 발생할 수 있는 문제로 distributed WMH나 LBIP에서는 한 노드가 전송할 노드를 결정하는 도중에는 인접한 다른 노드가 잠시 동작을 잠시 멈추게 하는 일종의 lock을 구현함으로써 이 문제를 해결하고자 했다. 하지만 이러한 lock을 구현하기 위해서는 인접한 노드들 간의 컨트롤 메시지 전송을 필요로 하고 이는 전체 broadcast알고리즘의 복잡도를 높이는 하지만, lock을 구현함으로써 분산 broadcast알고리즘이 보다 에너지 효율적인 결정을 할 수 있다[2][6]. 따라서 기반이 되는 분산 broadcast알고리즘이 가능한 단순해야 lock을 보다 쉽게 구현할 수 있고, 이를 통한 이득이 커질 것이라는 것을 알 수 있다. 이런 면에서 분산 MBH는 1-hop 이웃정보만을 이용해 간단한 과정을 통해 broadcast를 수행하기 때문에 lock을 구현함으로써 broadcast알고리즘의 복잡성을 크게 증가시키지 않으면서 동시에 에너지 효율을 올릴 수 있다. 이러한 사실은 5장에서 실험을 통해 확인할 수 있다.

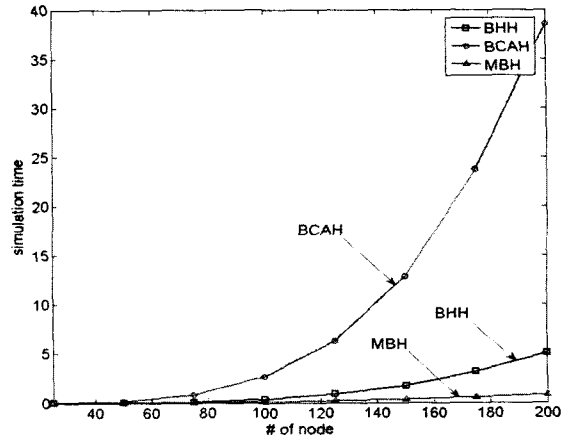
5. Experiment

실험은 100x100 인 정사각형 공간에 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200개의 노드들로 이루어진 네트워크상에서 수행했다. 각각의 노드의 위치는 임의로 결정한 뒤 각 네트워크 마다 100회 실험을 수행한 뒤 실험 결과의 평균을 정리했다. 실험에 사용된 파라미터

는  $c=1, \alpha=2$ [1][2][3]이다. 다음으로 MBH와 비교할 알고리즘으로 BHH와 BCAH를 선택했다. 먼저 각 알고리즘들이 전역정보를 모두 알고 있는 환경에서의 성능을 비교하기 위해서 실험을 수행했다. [그림 7]은 전역정보를 모두 알고 있는 환경에서 각 알고리즘의 노드 개수에 따른 전송강도의 합을 나타낸 그래프이다. [그림 8]은 같은 환경에서 각 알고리즘의 수행시간을 나타낸 그래프이다. 두 그래프에서 알 수 있듯이 MBH가 BHH보다 수행속도가 빠른 동시에 적은 에너지를 소모해 broadcast를 수행함을 알 수 있다. BCAH가 에너지 효율적인 측면에서는 가장 좋은 성능을 보이지만 coverage sequence reordering이라는 복잡한 과정을 수행함으로써 다른 알고리즘들과의 수행시간 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 또한 BCAH를 분산 알고리즘으로 구현할 때 큰 걸림돌로 작용함을 다음 실험을 통해 확인할 수 있다.



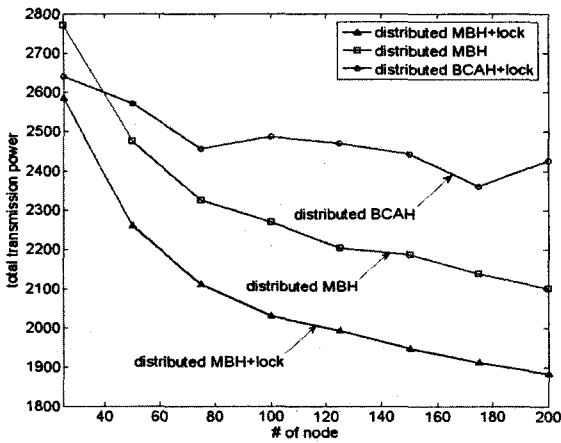
[그림 7] 중앙식 broadcast알고리즘 전송강도비교



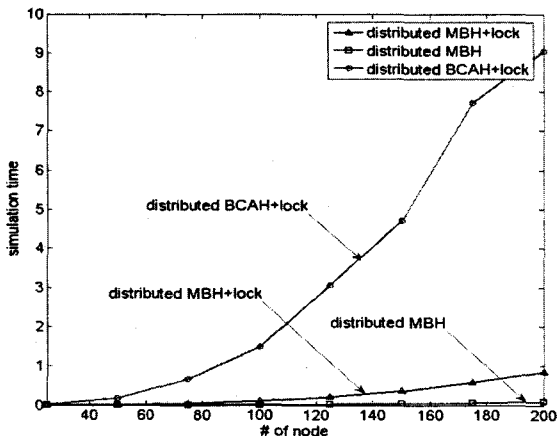
[그림 8] 중앙식 broadcast알고리즘 수행시간비교

다음으로 각 알고리즘들이 지역정보만을 알고 있는 분산 알고리즘의 성능을 비교하기 위한 실험을 수행했다. 실험에 사용된 알고리즘은 분산 환경에 맞게 구현한 분산 MBH와 분산 BCAH를 그리고, 각 노드들의 결정이 충돌되지 않도록 lock을 구현한 분산 MBH와 분산 BCAH를 선택했다. 실험결과 분산 BCAH는 성능이

알고리즘들에 비해 현저히 떨어져 그래프에서 제외했다. [그림 9]는 분산 MBH와 lock을 구현한 분산 MBH, 그리고 lock을 구현한 분산 BCAH의 노드 개수에 따른 전송강도를 나타낸 그래프이고, [그림 10]은 같은 알고리즘들의 수행시간을 비교한 그래프이다. 이 실험을 통해 확인할 수 있는 중요한 결과는 lock을 구현한 분산 MBH가 중앙식 MBH와 같은 동일한 성능을 낸다는 것이었다. MBH알고리즘 특성상 인접한 노드들을 차례로 커버하기 때문에 lock을 구현함으로써 분산 MBH가 중앙식 MBH와 동일한 성능을 보이는 것으로 확인할 수 있었다. 가장 좋은 성능을 보이는 것은 lock을 구현한 MBH이었고, 또한 lock을 구현하지 않은 분산 MBH가 lock을 구현한 분산 BCAH보다 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 BCAH의 coverage sequence reordering과정이 분산 알고리즘에는 적합하지 않음을 보여주는 큰 이유라고 할 수 있다. 이는 수행시간을 비교한 [그림 10]에서도 확연히 드러난다.



[그림 9] 분산 broadcast알고리즘 전송강도비교



[그림 10] 분산 broadcast알고리즘 수행시간비교

6. 결론

본 논문에서 제안한 MBH알고리즘은 훌륭한 확장성과 에너지 효율성을 가짐을 실험을 통해 확인할 수 있었다. MBH는 기존의

BHH보다 나은 성능을 가지면서 알고리즘의 계산량이나 고려해야 할 정보의 양이 적기 때문에 네트워크 변화에 대한 빠른 적응성을 필요로 하는 동적 네트워크에 매우 적합한 알고리즘임을 알 수 있다. 또한 BHH보다 나은 성능을 보였던 BCAH보다는 약간 떨어지는 성능을 보이지만 분산 환경에서는 BCAH보다 더 나은 성능을 보임을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 추후 distributed MBH를 확장해 동적 네트워크상에서 빠르게 적용해 broadcast를 수행할 수 있는 알고리즘을 연구할 예정이다.

참고문헌

[1] J. E. Wieselthier, G. D. Ngyugen, and A. Ephremides, "On the Construction of Energy-Efficient Broadcast and Multicast Trees in Wirelsss Networks", *Proc IEEE INFOCOM*, pp. 585-594, March 2000.

[2] M. Agarwal, J. H. Cho, L. Gao, and J. Wu, "Energy efficient broadcast in wireless ad hoc networks with hitch-hiking", *Proc IEEE INFOCOM*, pp. 2097-2108, 2004

[3] M. T. Thai, Y. Li, and D-Z Du, "A Combination of Wireless Multicast Advantage and Hitch-Hiking", *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No12, Decemter 2005.

[4] I. Maric. and R. D. Yates, "Cooperative Multicast for Maximum Network Lifetime", *IEE JSAC, Special Issue on Wireless Ad Hoc Networks - Part 1*, Vol. 23, No. 1, 2005

[5] 전상현, 장형수, 조준호, "Hitch-hiking기법과 Coverage sequence 조절을 통한 에너지 효율적인 무선 애드 혹 네트워크 브로드캐스트 알고리즘", *KCC 2006* Vol. 33, No. 1(D), 2006

[6] F. Ingelrest, and D. Simplot-Ryl, "Localized Broadcast Incremental Power Protocols for Wireless Ad Hoc Networks", *ACM Wireless Networks*, 2006

[7] T. S. Rappaport, *Wireless Communications : Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.

[8] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill, 2001.

[9] E. Horowitz, S. Sahni, and S. A.-Freed, *Fundamentals of data structure in C*, Computer Science Press, 2001.

[10] P. Linz, *An Introduction to Formal Languages and Automata*, 3rd edition, 2000

[11] Ronald L. Rardin, *Optimization In Operations Research*, Prentice Hall, 2000