

다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서 지연시간 최소화를 위한 브로드캐스트 트리 생성 알고리즘

김남희, 박숙영, 이상규
숙명여자대학교 컴퓨터과학과
e-mail : narcislike@naver.com, blue@sookmyung.ac.kr, sanglee@sookmyung.ac.kr

A Broadcast Tree Construction Algorithm for Minimizing Latency in Multi-Rate Wireless Mesh Networks

Nam-Hee Kim, Sook-Young Park, Sang-Kyu Lee
Dept. of Computer Science, Sookmyung Women's University

다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서 노드는 전송률 조절을 함으로써 링크의 전송 범위를 동적으로 조절할 수 있다. 다중 전송률 무선 메쉬 네트워크에서의 브로드캐스트 알고리즘인 WCDS 에서는 브로드캐스트 트리 생성시 고려하는 노드가 같은 비교 값을 가졌을 때 임의로 노드를 선택한다. 본 논문에서는 이를 보완하여 소스노드로부터의 지연시간을 고려하여 전체 지연시간 최소화를 위한 브로드캐스트 알고리즘인 MinLink_WCDS 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 802.11 파라미터를 기본으로 한 다중 전송률 무선 메쉬 네트워크에서 MinLink_WCDS 알고리즘과 기존에 제안된 알고리즘들과의 지연시간 결과를 비교하여 브로드캐스트 지연시간이 향상된 것을 보여준다.

1. 서론

무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Networks)에서 노드들은 메쉬 라우터와 메쉬 클라이언트로 구성된다. 각 노드는 호스트 역할뿐 아니라 무선 전송 범위에 있지 않은 다른 노드들에게 패킷을 포워딩 해주는 라우터의 역할도 한다. 무선 메쉬 네트워크는 네트워크에 있는 단말 노드들을 메쉬 형태의 무선망으로 연결하고 유지하는 역할을 하는 메쉬 라우터들을 동적으로 구성한다. 또한, 유선 인터넷 망에 연결된 특정 메쉬 라우터를 두어 게이트웨이의 역할을 수행한다. 이러한 특징은 무선 메쉬 네트워크에서 낮은 선비용(up-front cost)과 쉬운 네트워크 유지보수, 네트워크 견고성(robustness)을 보장하며, 신뢰할 수 있는(reliable) 서비스 제공 등에 많은 이점을 준다[1].

무선 메쉬 네트워크의 출발은 미국 군사기술을 민간용으로 전환한 것으로 무선 메쉬 네트워크 기능을 탑재한 무선 LAN AP(Access Point)는 전원만 연결이 되면 네트워크가 가능하므로 설치가 편리하고, 유선망과의 연결 없이 망 확장이 용이하다. 무선 메쉬 네트워크 기술은 IEEE 802.11 b/ a/ g/ n 등 다양한 물리 계층을 수용하며 QoS 및 IEEE 802.11n 을 지원하기 위한 적정 MAC 계층이 물리 계층 위에 요구된다. 또 메쉬기능을 위한 경로 설정 알고리즘, 보안, 메쉬 네트워크 측정 등의 기능이 MAC 계층 위에서 구현되며, 상위 계층에서 다른 메쉬 네트워크간에 연동을 위한 기능과 메쉬 설정 및 관리를 하는 기능이 요구되는 것으로 구분하고 있다[2].

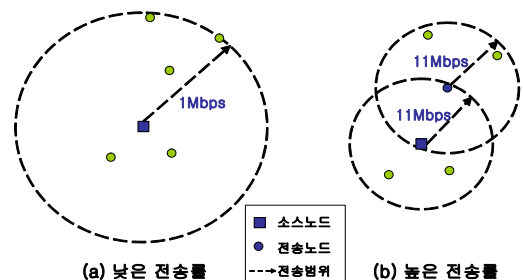
다중 홉 무선 네트워크와 무선 애드혹 네트워크에서 네트워크 계층의 효율적인 브로드캐스트와 멀티캐스트를 위해 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중에서도 에너지 소비, 전송 수, 라우트 발견과 관리에서의 오버헤드가 중요한 연구대상이었다[5,6,7].

다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서

브로드캐스트 문제를 이야기하는 Chou 의 논문 [3]에서는 현재까지의 전역적인(global) 지연시간은 고려하지 않고 지역적인(local) 데이터만을 고려했기 때문에 문제점이 있다. 본 논문에서는 다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서 브로드캐스트 트래픽 흐름을 위한 효율적인 라우팅의 문제로써 Chou[3]의 WCDS 알고리즘을 보완한 MinLink_WCDS 를 제안한다. 시뮬레이션을 통해서 MinLink_WCDS 알고리즘을 사용하 du 브로드캐스트 트리를 생성하는 것이 기존의 BIB, WCDS 알고리즘을 사용하는 것보다 브로드캐스트 지연시간이 향상된 것을 보여준다.

2. 관련연구

2.1 다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서의 브로드캐스트



[그림 1] 링크

전송률에 따른 전송범위 관계

[그림 1]을 보면 소스노드가 브로드캐스트 하는데 있어 같은 네트워크 상에서 높은 전송률과 낮은 전송률을

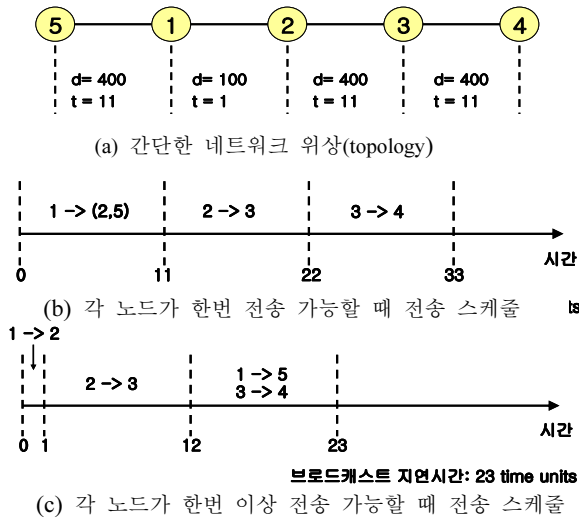
※ 이 논문은 서울시 산학연 협력사업(10544)의 지원에 의하여 연구되었음

사용하여 패킷을 전송하는 두가지 예를 보여주고 있다. [그림 1](a)에서는 1Mbps 의 낮은 전송률을 사용하여 모든 노드에게 패킷을 한번에 전송하는 것을 보여주고 있다. 반면에 [그림 1](b)에서는 1Mbps 의 낮은 전송률을 사용하는 대신 11Mbps 의 높은 전송률을 사용하여 모든 노드에게 패킷을 전달하려 할 때 한 번 이상의 패킷전송이 필요하여 다른 전송노드의 중계가 필요한 예를 보여주고 있다.

[표 1] 퀄넷(Qualnet)을 통한 IEEE 802.11b 의 전송률에 따른 최대 전송범위

전송률(Mbps)	1	2	5.5	11
전송범위(m)	483	370	351	283

[표 1]은 퀄넷(Qualnet) 시뮬레이터를 통한 IEEE 802.11b 에서의 전송률에 따른 최대 전송범위를 보여주고 있다.



[그림 2] 브로드캐스트 지연시간에서 다중 전송률의 역할

[그림 2]는 5 개의 노드를 가지고 있는 작은 네트워크에서 다중 전송률을 사용했을 경우 브로드캐스트 지연시간의 변화를 보여주고 있다. [그림 2](a)에서 d 는 각 노드 사이의 거리이고, t 는 [표 1]의 거리에 따른 전송률에 대한 단위전송시간을 나타낸다. 각 노드가 한번만 전송 가능할 때 스케줄링 한 결과는 [그림 2](b)와 같다. 노드 1 이 노드 2 와 노드 5 에게 전송을 하고, 노드 2 는 전송을 받자마자 노드 3 에게 전송을 하고, 노드 3 은 노드 4 에게 이어서 전송을 한다. 총 지연시간은 33 이다. 반면에 [그림 2](c)는 같은 네트워크 상에서 각 노드가 전송을 한번 이상 할 수 있는 경우를 보여준다. 노드 1 이 노드 2 에게 11Mbps 로 전송을 하고 노드 2 는 노드 3 에게, 이어서 노드 1 과 3 이 동시에 각각 노드 5 와 4 에게 전송을 한다. 이때 노드 1 과 노드 3 은 간섭이 일어나지 않으므로 동시에 전송을 할 수 있다. 이렇게 노드가 한번 이상 전송을 할 수 있다고 가정하면, 총 지연시간은 23 으로 노드가 한번만 전송가능할 때 보다 지연시간을 줄일 수 있다.

2.2 지연시간 최소화를 위한 브로드캐스트 관련 연구

2.2.1 네트워크 모델

노드 i 의 전송률을 r_i 라고 했을 때 노드 i 의 전송비용 (communication cost)은 $1/r_i$ 로 나타낸다. 모든 노드는 초기값으로 소스노드로 부터의 전송비용을 갖고 있다.

노드가 스스로부터 전송 범위 안에 들지 않으면 전송비용은 무한대(∞)값을 갖는다.

트리 생성 알고리즘의 네트워크 환경은 [3]의 논문에서와 같이 다음과 같은 가정을 한다.

1. 네트워크에 있는 각 노드는 하나의 라디오를 가지고 있고, 모든 라디오는 공통의 채널로 맞출 수 있다.
2. 노드는 다른 데이터 전송률로 멀티캐스트 할 수 있다. 전송률은 전송 범위가 멀어질수록 데이터 전송률이 감소하는 함수를 갖고 있다.
3. 노드의 이웃은 최소 전송률로 데이터를 받을 수 있는 모든 노드들이다.
4. i_1, \dots, i_m 는 노드 x 의 이웃이고, 노드 x 가 각 이웃노드에게 도달할 수 있는 최대 전송률은 r_{i_1}, \dots, r_{i_m} 이다. 이 때 노드 x 가 이웃 노드 i_1, \dots, i_m 에게 멀티캐스트 하려고 하면 $\min(r_{i_1}, \dots, r_{i_m})$ 또는 더 낮은 전송률로 전송할 수 있다.
5. 이진 간섭(binary interference) 모델을 사용한다. 노드 k 가 전송 받고 있을 때, k 의 반경 $\kappa \cdot s_{\max}$ 안에 있는 노드 j 가 전송하고 있으면, k 는 오류가 있는 데이터를 받거나 데이터를 잃는다. 간섭의 범위 $\kappa \cdot s_{\max}$ 는 상수로 가정한다.
6. 이상적인 MAC 계층을 가지고 있다고 가정한다. 두개의 노드 i 와 j 가 동시에 멀티캐스트 할 수 있다면, 노드 i 의 멀티캐스트는 j 의 멀티캐스트의 수신자와 서로 간섭하지 않는다.
7. 멀티캐스트를 스케줄하는 중앙식 엔티티를 가지고 있다. 즉, 이상적인 MAC 계층의 가정 아래 두 멀티캐스트는 서로 간섭하지 않는다.
8. 각 노드는 같은 패킷을 m_{\max} 번 멀티캐스트 할 수 있다. 이때 멀티캐스트 하는 부분집합들은 서로 다르다.

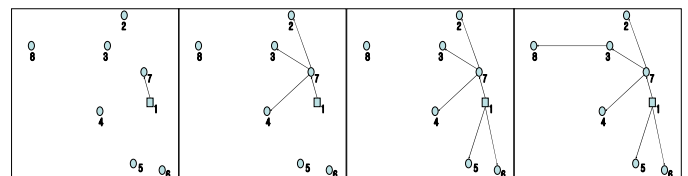
2.2.2 WCDS (Weighted Connected Dominating Set)

WCDS 에서는 k 개의 다른 전송률을 갖는 환경에서 고려한다. 트리 집합 T 는 초기값으로 아무 노드도 갖고 있지 않고 집합 C 는 소스노드 s 를 갖고 있다.

- V 의 노드 중 C 에 포함되지 않은 각각의 노드 c 와 전송률 r 에 대한 $f(c, r)$ 값을 구한다. $f(c, r)$ 값은 C 에 포함되지 않은 노드 c 에서 전송률 r 로 전송 가능한 노드 $N(c, r)$ 의 개수와 전송률 r 의 곱으로 이루어진 것으로 식(1)과 같이 나타낸다.

$$f(c, r) = |N(c, r) \setminus C| \times r \quad \text{식 (1)}$$

- 루프를 반복하며 $f(c, r)$ 값이 최대인 노드 c' 과 전송률 r' 을 찾아서 노드 c' 으로 전송 가능한 노드를 집합 C 에 넣는다. 그리고 새로운 노드들과 그에 연결된 링크들을 트리 집합 T 에 넣는다.



(a) 1->7 (b) 7->2,3,4 (c) 1->5,6 (d) 3->8

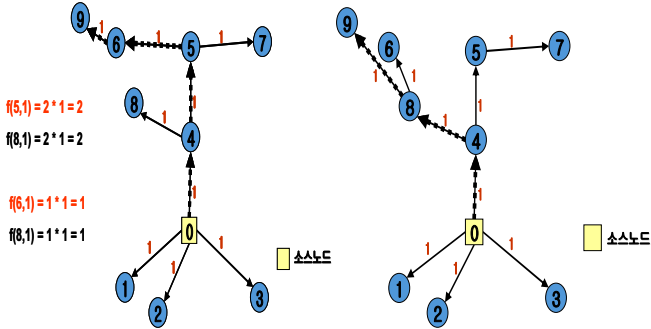
[그림 3] WCDS 알고리즘으로 브로드캐스트 트리를 생성하는 예제

[그림 3]은 WCDS 알고리즘을 사용하여 브로드캐스트 트리를 생성하는 과정을 보여주고 있다. [그림 3](a)를 보면

노드 1 에서 각각의 전송률에 대해 $f(c,r)$ 값을 구하면, 최대값이 1 로 $c'=1, r'=1$ 이 선택된다. [그림 3](b)를 보면 다음 $f(c,r)$ 의 최대값은 1.5 로 $c'=7, r'=0.5$ 일 때이다. 차례로 $f(c,r)$ 의 최대값이 0.25, 0.125 가 선택되어 노드 1, 노드 3 이 차례로 c' 에 선택된다[그림 3](c)-(d).

2.2.3 WCDS 알고리즘의 문제점

[그림 4]는 10 개의 노드를 가지고 있는 무선 네트워크 토폴로지에서 소스노드가 0 일 때 WCDS 알고리즘을 사용하여 브로드캐스트 트리를 생성한 결과를 보여 주고 있다. 소스노드 0 에서 전송률 11Mbps(지연시간=1)로 브로드캐스트 하면 노드 1, 2, 3, 4 가 메시지를 수신한다. 차례로 노드 4 가 노드 5, 8 에게, 노드 5 가 6 과 7 에게, 노드 6 이 9 에게 메시지를 전송하면 소스 노드 0 에서부터 전체노드가 메시지를 받을 때까지 총 브로드캐스트 지연시간은 4 가 된다. 하지만 [그림 4]의 우측그림을 보면 [그림 4]의 좌측과 동일한 토폴로지상에서 더 작은 지연시간 3 을 갖는 트리를 구성 하는 것을 볼 수 있다.



[그림 4] WCDS 알고리즘을 사용한 브로드캐스트 트리

[그림 4]에서 WCDS 알고리즘을 사용하여 브로드캐스트 트리를 생성하는 과정을 자세히 살펴 보면, 집합 C 에 노드 0, 1, 2, 3, 4, 5, 8 을 갖고 있을 때 $f(c,r)$ 값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(5,1) &= 3 \times 1 = 3 & f(8,1) &= 3 \times 1 = 3 \\ f(5,2) &= 3 \times 2 = 6 & f(8,2) &= 3 \times 2 = 6 \\ f(5,5.5) &= 3 \times 5.5 = 16.5 & f(8,5.5) &= 2 \times 5.5 = 11 \\ f(5,11) &= 2 \times 11 = 22 & f(8,11) &= 2 \times 11 = 22 \end{aligned}$$

위와 같이 노드 5 와 노드 8 은 전송률 11Mbps 에서 22 라는 동일한 최대값을 갖게 된다. 이 경우 WCDS 알고리즘 에서는 노드의 번호 순으로 전송할 노드를 선택하여 노드 5 가 선택이 된다. 하지만 이 상황에서 동일한 $f(c,r)$ 값을 갖는 노드의 c, r 쌍이 있을 때 소스 노드로부터 노드 c 까지의 지연시간이 작은 노드를 선택하면 더욱 향상된 결과를 갖게 될 것이다.

3. MinLink_WCDS 알고리즘

이 장에서는 브로드캐스트 지연시간을 최소화하기 위한 기존의 WCDS 알고리즘을 개선한 MinLink_WCDS 알고리즘을 제안한다.

브로드캐스트 휴리스틱 알고리즘은 다음의 3 단계로 표현할 수 있다.

● **1단계: 트리 구성**

이 단계에서는 브로드캐스트 트리를 만든다. 모든 노드가 전송을 하지 않고, 알고리즘에 따라 가장 효율적인 전송을 하는 노드를 선택하므로 전송 노드를 결정한다. 이때 본 논문에서 제안하는 MinLink_WCDS

알고리즘을 사용하여 트리를 구성한다.

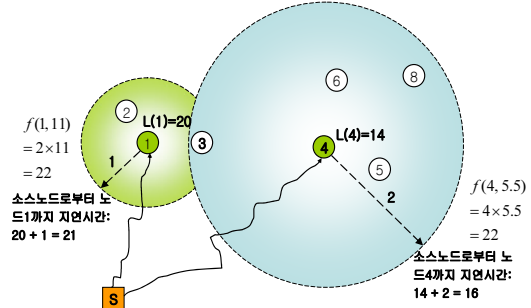
● **2단계: 멀티캐스트 수신자 그룹화**

1 단계에서 완성된 트리 안에서 수신자의 입장에서 볼 때 어떤 노드로부터 얼마만큼의 전송률로 받는 것이 좋은지 bottom-up 방식으로 결정한다.

● **3단계: 전송 스케줄링**

1 단계에서 완성된 전송 노드, 2 단계에서 완성된 전송률과 그에 따라 수신하는 노드에 대해서 간섭을 고려하여 노드들이 언제 전송을 할지 정하는 전송 스케줄을 구성한다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 브로드캐스트 메시지 전달에 참여하는 송신노드를 결정할 때 노드들의 전역적인 지연시간을 계산하여 고려함으로써 전체 네트워크의 지연시간을 줄이는 효과를 가져온다.



[그림 5] WCDS 알고리즘의 개선방안

[그림 5]를 보면 노드 1 에서 전송률 11Mbps 로 전송할 때 $f(c,r)$ 값과 노드 4 에서 전송률 5.5Mbps 로 전송할 때 $f(c,r)$ 값은 22 로 같다. 이때 기존의 WCDS 알고리즘은 노드 번호의 순서대로 노드 1 을 선택하게 된다. 하지만 로컬한 $f(c,r)$ 값만을 고려하는 WCDS 알고리즘과는 달리 본 논문에서 제안하는 MinLink_WCDS 알고리즘 ([표 2])에서는 $f(c,r)$ 과 함께 소스노드로부터 현재노드까지의 지연시간과 현재 노드의 예상 전송시간을 합한 값이 가장 작은 노드를 고려하여 브로드캐스트 트리를 구성한다.

전체 무선 메시 네트워크는 그래프 $G=(V,E)$ 로 나타낸다. V 는 메시 노드들의 집합을 나타내고 E 는 두 노드 사이의 에지(edge)집합을 나타낸다. $(i,j) \in E$ 는 i 와 j 사이의 유니캐스트 링크를 나타낸다. i 와 j 의 거리를 기준으로 하여 링크 (i,j) 의 전송률은 R_{ij} 라고 한다. i,j 가 이웃이 아니면, 전송률 $R_{ij} = 0$ 이다(예를 들어 i 가 가장 낮은 전송률과 가장 높은 파워를 갖고 전송을 하여도 j 가 패킷을 받을 수 없다면 R_{ij} 는 0 이다).

주어진 집합 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 은 k 개의 다른 전송률을 갖고 있는 전송률의 집합이고, 집합 $N(x, r_i)$ 는 집합 V 에 있는 노드 x 중에서 r_i 의 전송률을 사용하여 전송 할 수 있는 노드의 집합을 말한다.

처음에 집합 C 는 소스노드 s 를 갖고 있고, 트리 집합 T 는 공집합이다. 집합 C 에 V 의 모든 노드가 들어갈 때까지 루프를 반복한다.

- C 에 있는 모든 노드 c 와 R 에 있는 모든 전송률에 r 에 대해 $f(c,r)$ 값을 구한 후 $f(c,r)$ 값이 최대값이 되는 노드 c 와 전송률 r 의 쌍을 집합 F 에 넣는다 $F \leftarrow F \cup \arg \{ \max_{c \in C, r \in R} f(c,r) \}$ 식(2)
- 집합 F 에 있는 c, r 쌍 중에서 소스노드로부터 노드

c 까지의 지연시간 $L(c)$ 와 전송률 r 로 보내는 지연시간 r/r_k 의 합이 최소가 되는 c, r 쌍인 \hat{c}, \hat{r} 을 구한다. \hat{c}, \hat{r} 을 식으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$(\hat{c}, \hat{r}) \leftarrow \arg \{ \min_{(c,r) \in F} (L(c) + r/r_k) \} \quad \text{식(3)}$$

- \hat{c}, \hat{r} 값이 구해지면 \hat{c}, \hat{r} 의 전송으로 수신 받는 노드들을 집합 A 에 넣고, A 와 C 의 합집합을 C 에 다시 넣는다. 그리고 집합 A 의 노드 a 에 대한 (\hat{c}, a) 링크도 추가한다. 집합 A 에 있는 노드 x 에 대해 $L(a)$ 를 $L(\hat{c}) + \hat{r}/r_k$ 로 업데이트한다. 루프를 반복한다.

[표 2] 지연시간을 고려하는 MinLink_WCDS 알고리즘

```

Input : G // G = (V, E)
        s // source node
        R = {r1, ..., rk} // rate (r1 < r2 < ... < rk)
C = {s}, T = ∅
F = ∅ // F는 (c, r) 쌍을 갖는 집합
for (v ∈ V) do
    L(v) = 0
end for
while (V \ C = ∅) do
    for (c ∈ C) do
        for (r ∈ R) do
            f(c, r) = |N(c, r) \ C| × r
        end for
    end for
    F ← F ∪ arg {max c ∈ C, r ∈ R f(c, r)}
    (ĉ, r̂) ← arg {min (c, r) ∈ F (L(c) + r/rk)}
    A ← N(ĉ, r̂) \ C
    C ← C ∪ A
    T ← T ∪ (∪ a ∈ A {(ĉ, a)})
    for (a ∈ A) do
        L(a) ← L(ĉ) + r̂/rk
    end for
end while
    
```

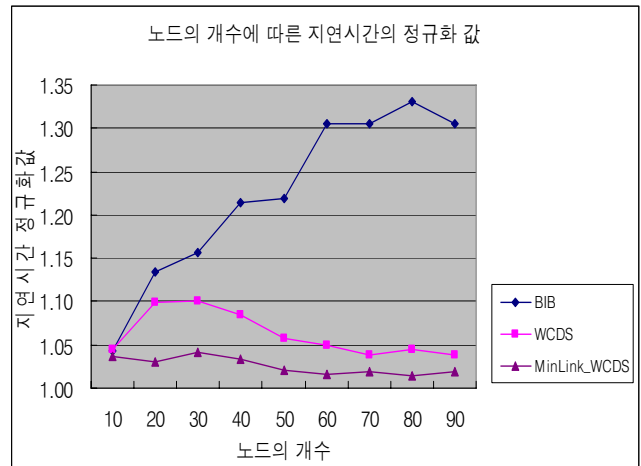
4. 실험 및 결과

본 장에서는 3 장에서 제안한 다중 전송률을 지원하는 무선 메쉬 네트워크에서 지연시간을 고려한 브로드캐스트 알고리즘의 성능 비교를 위해서 기존의 연구인 BIB, WCDS 를 계산하였다. 실험은 논문[3]과 같이 트리의 생성, 멀티캐스트 그룹핑, 스케줄링의 순서로 진행하며, 스케줄링의 결과인 지연시간을 고려한다.

1000m × 1000m 의 정사각형 범위 안에서 소스 노드는 사각형의 정가운데 위치하고, 노드의 개수가 10~90 개가 되도록 노드를 임의로 생성한다. 각각의 경우에 대하여 BIB, WCDS, MinLink_WCDS 알고리즘을 적용하여 시스템의 지연시간을 측정하였다. 이때 지연시간은 1/전송률로 나타내었고, 간섭범위는 [표 1]에 나타난 전송률에 따른 최대 전송범위 관계를 사용하였다.

세가지 알고리즘에 대한 결과의 비교를 위하여 논문 [5]에서의 정규화 방법을 브로드캐스트 지연시간의

정규화에 적용하였다. [그림 6]은 100 번의 시뮬레이션을 통하여 평균을 낸 결과이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 MinLink_WCDS 가 노드의 개수에 상관없이 가장 좋은 성능을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 값이 1 에 가까운 것은 MinLink_WCDS 가 노드수의 변화에 상관없이 100 번의 시뮬레이션 동안 가장 작은 지연시간을 가지는 것을 볼 수 있다.



[그림 6] 노드의 개수에 따른 BIB, WCDS, MinLink_WCDS 알고리즘에 따른 지연시간의 정규화

5. 결론

본 논문에서는 무선 메쉬 네트워크에서의 브로드캐스트 방법에서 기존의 단일채널이나 단일전송과는 달리 무선 메쉬 네트워크에서 다중 전송률 링크 계층 멀티캐스트를 바탕으로 하는 기존의 WCDS 알고리즘에서 지역적인(local) 데이터뿐 아니라 전역적인(global) 데이터를 고려하는 MinLink_WCDS 알고리즘을 제안하였다. 그리고 IEEE 802.11 을 기반으로 한 시뮬레이션을 통해서 기존의 BIB 이나 WCDS 알고리즘보다 항상 향상된 브로드캐스트 지연시간을 통해 성능 향상을 보였다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang, W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey", Computer Networks, 2005
- [2] 이민호, "Mesh Network 기술동향 및 Applications", 2004
- [3] C. T. Chou, A. Misra, J. Qudir, "Low Latency Broadcast in Multirate Wireless Mesh Networks", IEEE Journal on selected areas in Communications Vol.24 No11, Nov 2006
- [4] C. T. Chou, A. Misra, "Low Latency Multimedia Broadcast in Multirate Wireless Meshes", SECON, Nov 2006
- [5] J. E. Wieselthier, G. D. Nuyen and A. Ephremides, "On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks", In INFOCOM, 2000
- [6] M. Cagalj, J. Hubaux and C. Enz, "Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues", In MobiCom, pp. 172-182, 2002
- [7] J. Cartigny, D. Simplot and I. Stojmenovic, "Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks", In INFOCOM, pp. 2210, 2003