

# IEEE 802.11 메쉬 네트워크에서 채널 다양성과 노드 연결성 향상을 위한 레이트 분할 멀티 채널 프로토콜

정회원 김 석 형\*, 종신회원 서 영 주\*<sup>o</sup>, 정회원 권 동 희\*\*

## A Rate Separating Multi-Channel Protocol for Improving Channel Diversity and Node Connectivity in IEEE 802.11 Mesh Networks

Sok-Hyong Kim\* *Regular Member*, Young-Joo Suh\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*,  
Dong-Hee Kwon\*\* *Regular Member*

### 요 약

무선 메쉬 네트워크는 무선 링크를 통해 백본 네트워크를 형성하여 사용자에게 인터넷 접근을 제공한다. WMN의 주요 이슈는 네트워크 용량이다. 이를 위해 IEEE 802.11의 멀티 채널과 멀티 레이트를 활용할 수 있다. 멀티 채널은 채널 할당에 따라 노드 연결성 (node connectivity)과 채널 다양성 (channel diversity)을 결정한다. 또한, IEEE 802.11 멀티 레이트 네트워크에서는 RA (Rate Anomaly) 문제가 발생하는데, 이는 낮은 레이트 링크들이 높은 레이트 링크의 성능을 심각히 저하시키는 현상이다. 본 논문에서는 노드 연결성과 채널 다양성을 향상시키고 RA문제를 완화하는 레이트 분할 멀티 채널 (Rate Separating Multi-Channel, RSMC) 프로토콜을 제안한다. RSMC는 트리 기반 WMN를 형성하여 채널 다양성을 증가시키고, 다른 레이트를 사용하는 트리 위의 링크들을 채널로 분리시켜 RA를 줄인다. 또한, 노드 연결성을 증가하기 NC (Network Connectivity) 알고리즘을 사용한다. 시뮬레이션을 통해 RSMC이 기존 멀티 채널 프로토콜보다 총 처리율, 노드 연결성, 채널 다양성 측면에서 향상된 성능을 보임을 입증하였다.

Key Words : IEEE 802.11, mesh networks, multi-channel, multi-rate, wireless mesh networks

### ABSTRACT

Wireless Mesh Networks (WMNs) provides Internet accesses to users by forming backbone networks via wireless links. A key problem of WMN is network capacity. For this, multi-channel and multi-rate functions of IEEE 802.11 can be utilized. Depending on channel assignments, multi-channel determines node connectivity and channel diversity. Also, in IEEE 802.11 multi-rate networks, the rate anomaly problem occurs, the phenomenon that low-rate links degrades the performance of high-rate links. In this paper, we propose rate separating multi-channel (RSMC) protocols that improves the node connectivity and channel diversity, and mitigates the rate anomaly problem. RSMC increases the channel diversity by forming tree-based WMNs and decreases the rate anomaly by separating different rate links on the tree via channels. In addition, it uses network connectivity (NC) algorithm to increase the node connectivity. Through simulations, we demonstrate that the RSMC shows improved performance than existing multi-channel protocols in terms of aggregate throughput, node connectivity, channel diversity.

\* 본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업 (WCU)으로부터의 지원 (R31-2008-000-10100-0), 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원 (2010-0024938), 지식경제부 및 정보통신 산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-C1090-1031-0009).

\* 포항공과대학교 컴퓨터공학과 모바일 네트워킹 연구실 ({shkimm, yjsuh}@postech.ac.kr), (°: 교신저자),

\*\* SK 텔레콤 (ddal@postech.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-09-457, 접수일자 : 2010년 09월 24일, 최종논문접수일자 : 2010년 11월 30일

## 1. 서 론

무선 메쉬 네트워크 (Wireless Mesh Network, WMN)가 널리 사용되면서 유연성 있는 무선 백본 네트워크를 쉽게 구성할 수 있게 되었다. WMN은 유선 네트워크와 연결된 메쉬 게이트웨이 (GW)와 무선 링크를 통해 트래픽을 전달하는 메쉬 라우터를 포함한다. 각 노드는 다수의 IEEE 802.11 NIC (Network Interface Card)를 사용할 수 있다.

WMN에서 가장 큰 문제점 중에 하나는 네트워크 용량 (capacity)이다. WMN용량을 증대시키기 위해 멀티 채널 기법이 효과적인 해결책으로 제시되었다. 다행히 IEEE 802.11은 서로 간섭을 미치지 않는 다수의 채널들을 제공한다. WMN에 존재하는 노드 개수가 증가할수록 가용한 무선 링크 개수는 증가한다. 하지만, IEEE 802.11의 채널 개수는 제한적이므로, 모든 무선 링크들을 다른 채널로 할당하는 것은 불가능하다. 따라서 WMN 용량은 노드 개수가 증가함에 따라 심각히 저하된다. 이를 해결하기 위해 많은 멀티 채널 기법들이 연구되었다<sup>1-5</sup>.

Hyacinth<sup>11</sup>에서는 노드들이 WMN의 GW로부터 스패닝 트리 (spanning tree)를 형성한다. 노드들은 부모 노드를 선택할 때 홉 카운트 (hop count) 메트릭을 사용하며, 하나의 NIC은 부모 노드와 통신하기 위해 사용하고, 다른 NIC들은 자식 노드들과 통신하기 위해 사용한다. ROMA<sup>12</sup>에서도 트리 기반 WMN을 형성한다. 트리의 최상위 노드인 GW는 하부의 노드들에게 레벨에 따라 다른 채널을 할당하여 경로내 (intra-path) 간섭을 방지한다. 이와 동시에 같은 레벨의 노드들은 같은 채널을 사용하여 인접한 노드들과 직접 통신이 가능하다. ICA<sup>13</sup>는 각 노드가 채널별로 NIC을 가지며, WCETT 메트릭 사용하여 패킷을 전달한다.

멀티 채널 프로토콜에 의한 채널 할당은 네트워크에서 사용 가능한 링크들을 제한시킨다. 즉, 싱글 채널 (single-channel) 네트워크에서는 인접한 두 노드 사이에 존재하는 모든 링크들을 사용할 수 있지만, 멀티 채널 네트워크에서는 채널 할당 결과에 따라 인접한 두 노드가 서로 통신할 수 있음에도 불구하고 링크를 형성할 수 없을 수도 있다. 노드 간의 연결성 (node connectivity)을 증가시키면, 네트워크의 채널 다양성 (channel diversity)이 감소된다. 즉, 싱글 채널 네트워크를 사용하면 모든 링크를 사용할 수 있지만, 인접한 어떤 두 링크도 동시 전송할 수 없다. 즉, 채널 할당은 노드 연결성과 채널 다양성의 상충 관계

(tradeoff)를 결정한다.

IEEE 802.11은 멀티 레이트 (multi-rate)도 제공한다. 링크의 채널 상태에 따라 다양한 데이터 레이트 (data rate)를 사용할 수 있다. 일반적으로 WMN에 존재하는 무선 링크들은 서로 다른 데이터 레이트를 사용할 것이고, 이들은 동일 채널에서 동작할 수 있다. 이때, 낮은 레이트 링크가 높은 레이트 링크의 성능을 급격히 저하시키는 현상이 일어나는데, 이는 RA (Rate Anomaly) 문제로 알려져 있다<sup>6</sup>. 이를 위해 많은 기법들이 제안되었다<sup>7-12</sup>.

이들 중에서 멀티 채널을 통해 다른 레이트 링크를 분할시키는 기법이 제안되었는데, 이들은 크게 싱글 홉 네트워크와 멀티 홉 네트워크를 가정하였다. 싱글 홉 네트워크를 위한 예로써 MRMC<sup>9</sup>와 DR-CA<sup>10</sup>가 있다. MRMC는 노드들이 다수의 NIC을 가지며, 각 NIC은 특정 레이트에 할당되어 있다. 링크의 측정된 데이터 레이트에 따라 NIC과 채널이 결정된다. DR-CA는 노드들이 채널마다 하나의 NIC을 가지며, 각 채널에 할당된 데이터 레이트의 합이 모든 채널에 대해 균등하게 분산되도록 채널을 할당한다. 멀티 홉 네트워크의 예로, RB-CA<sup>11</sup>와 CoCA<sup>12</sup>가 있다. RB-CA는 트리 WMN을 구성하며, 부모 노드 선택시 PTT (Prioritized Transmission Time) 메트릭을 사용하여 낮은 레이트 링크보다 높은 레이트 링크에 채널을 할당한다. CoCA는 RB-CA의 단점을 보완하기 위해 특정 부모 노드의 자식 노드들이 사용하는 링크들을 채널로 분리하기 위해 분산 알고리즘을 사용한다.

본 논문에서는 멀티 채널의 채널 할당에 의한 노드 연결성과 채널 다양성의 상충 관계를 고려함과 동시에, RA문제를 완화하는 레이트 분할 멀티 채널 (Rate Separating Multi-Channel, RSMC) 프로토콜을 제안한다. RSMC는 WMN의 GW로부터 트리를 형성한다. 트리 위의 노드들은 주변 이웃 노드들과의 트래픽 부하를 고려하여 다른 채널을 할당함으로써 채널 다양성을 향상시킨다. 각 노드는 트리의 부모 노드 선택시, 낮은 레이트 링크보다 높은 레이트 링크를 선호함으로써 다른 레이트 링크를 채널로 분할하여 RA문제를 완화한다. 또한, 트리 상의 노드는 NC (Network Connectivity) 알고리즘을 통해 이웃 노드와의 링크를 형성하고 노드 연결성을 향상시킨다. 시뮬레이션을 통해 RSMC가 기존 프로토콜에 비해 향상된 성능을 나타냄을 확인하였다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서 문제 정의를 설명하고, 3장에서 RSMC 프로토콜을 제안한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안하는 RSMC의 성능을 평

가한 뒤, 5장에서 논문을 결론 내린다.

## II. 문제 정의

### 2.1 시스템 모델

RSMC 프로토콜은 IEEE 802.11a를 기반으로 하는 WMN를 가정한다. 각 노드는 적어도 두 개 이상의 NIC을 가지며, 12개의 겹치지 않는 채널과 6Mbps에서 54Mbps의 8개 데이터 레이트를 사용할 수 있다. 현실적인 WMN를 위해서 각 노드가 가지는 NIC개수는 채널 개수보다 작다고 가정한다.

### 2.2 멀티 홉 RA (Rate Anomaly) 문제

RA 문제는 주로 무선랜과 같은 싱글 홉 네트워크에서 다뤄졌다. 하지만, WMN과 같은 멀티 홉 네트워크에서도 RA 문제는 여전히 발생한다<sup>12-13</sup>. 그림 1의 예제를 통해 멀티 홉 RA 문제를 살펴본다. 모든 노드는 서로 전송 범위 내에 존재한다. 그림 1(a)는 싱글 레이트 환경으로써, 노드 A가 B를 경유하여 C에게 두 개의 54Mbps 링크를 통해 포화된 (saturated) UDP 플로우 (flow)를 10초부터 보낸다. 동일하게 노드 D가 E를 경유하여 F에게 두 개의 54Mbps 링크를 통해 포화된 UDP 플로우를 20초부터 생성하였다. 그림 1(b)는 멀티 레이트 환경이며, 그림 1(a)와 동일한 플로우를 보내지만 노드 D가 E를 통해 F에게 두 개의 24Mbps 링크를 사용하여 보낸다. 이러한 두 환경의 성

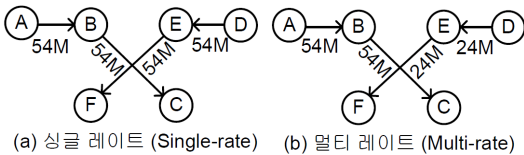


그림 1. 멀티 홉 네트워크 예제

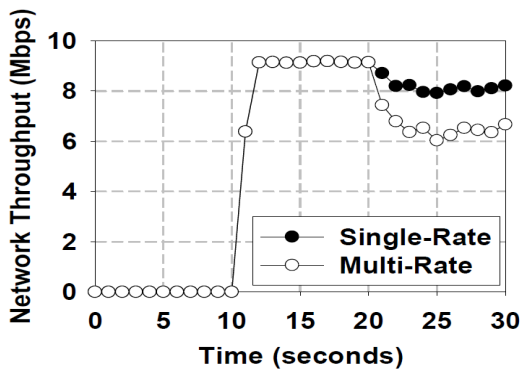


그림 2. 멀티 홉 네트워크 예제의 성능

능을 살펴보자.

그림 2는 그림 1의 싱글 레이트 환경과 멀티 레이트 환경의 네트워크 처리율 (throughput)을 보여준다. 싱글 레이트 환경은 두 플로우가 생성되었을 때, 링크 간의 경쟁 (contention)이 증가되어 성능이 약간 떨어진다. 하지만, 멀티 레이트 환경에서는 두 플로우가 생성되었을 때, 멀티 홉 RA로 인해 성능이 급격히 저하된다. 따라서, 멀티 홉 RA 문제를 완화하기 위해 다른 레이트 링크들을 채널로 분리하는 멀티 채널 프로토콜이 절실히 필요하다.

### 2.3 노드 연결성과 채널 다양성의 상충 관계

WMN에서 채널 할당은 노드 연결성과 채널 다양성의 상충 관계 (tradeoff)를 결정한다. 그림 3을 통해 이러한 관계를 살펴본다. 그림 3에서 노드 A는 두 개의 NIC을 가지고 있고, 노드 B와 C는 한 개의 NIC을 가지고 있다. 가용 채널 개수는 2개이다. 그림 3(a)는 노드 연결성을 증가시키는 예를 보여준다. 어떤 두 노드도 1 홉 링크를 통해 통신할 수 있지만, 어떤 두 링크도 동시에 전송할 수 없다. 그림 3(b)는 채널 다양성 증가의 예이다. 링크 A-B와 A-C는 동시에 전송할 수 있지만, 노드 B와 C는 링크 B-C를 사용할 수 없다. 따라서, 이러한 상충 관계를 고려하는 멀티 채널 프로토콜이 필요하다.

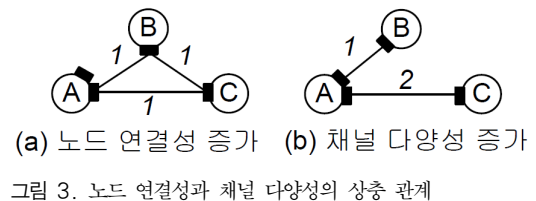


그림 3. 노드 연결성과 채널 다양성의 상충 관계

## III. 레이트 분할 멀티 채널 프로토콜

RSMC (Rate Separating Multi-Channel)은 GW로부터 스패닝 트리 (spanning tree)를 형성하며, 각 노드는 세 종류의 NIC을 가진다. 첫째로 부모 NIC은 트리 상의 부모 노드와 통신하기 위한 NIC이고, 둘째로 자식 NIC은 자식 노드에게 인터넷 접근을 위한 경로를 제공하며, 셋째로 이웃 NIC은 주변에 도달 가능한 이웃 노드와 링크를 형성하기 위해 사용된다. 트리 상의 노드들은 MLoad (Mesh Load) 메시지를 이웃 노드와 1홉으로  $T_M$ 초 마다 교환하여 가장 트래픽 부하가 작은 채널을 자신의 자식 NIC에 할당한다. RSMC의 트리 형성 과정을 살펴보자.

### 3.1 트리 형성 과정

그림 4는 전체적인 트리 형성 과정을 보여준다. 먼저, GW노드는 WMN에서 인터넷을 접근할 수 있는 경로를 제공하기 위해 MAdv (Mesh Advertisement) 메시지를 TM초마다 주기적으로 모든 채널에 대해 자식 NIC을 사용하여 브로드캐스트한다. 노드 X가 트리 상의 부모 노드로부터 MAdv를 받으면, X는 CRM (Channel assignment and Routing Metric, III-2절 참조)을 계산하고 부모 노드 Y를 선택한다. 이는 WMN의 노드가 인터넷 경로를 우선적으로 찾기 위함이다. 그 후, X는 MJoin (Mesh Join) 메시지를 Y에게 보내고, Y는 X에게 MAck (Mesh Acknowledgment)를 보내어 “부모 링크”의 채널을 할당한다. 즉, 부모 노드 Y가 자신의 자식 NIC에 할당한 채널을 자식 노드 X가 자신의 부모 NIC에 할당한다. 이때, 부모 링크는 자식 노드 X와 부모 노드 Y사이의 링크 X-Y이다. 그 후, X는 NC (Network Connectivity) 알고리즘 (III-3절 참조)을 통해 주위에 도달 가능한 이웃 노드Z를 선택하고, “이웃 링크”의 채널을 할당한다. 즉, 이웃 노드 Z의 자식 NIC에 할당된 채널이 노드 X의 이웃 NIC에 할당된다. 여기서, 이웃 링크는 노드 X와 이웃 노드 Z사이의 X-Z링크이다. 이러한 방식으로 RSMC은 트리를 구성한다.

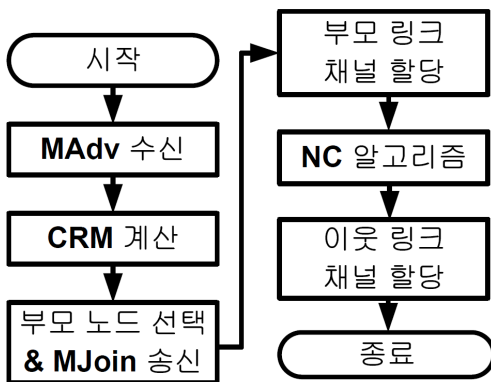


그림 4. 트리 형성 과정

### 3.2 CRM (Channel assignment and Routing Metric)

RSMC는 트리 형성시 부모 노드를 선택하기 위해 CRM 메트릭을 사용한다. CRM 메트릭을 정의하기 위해 LD (Link Delay)를 설명한다. 데이터 레이트  $r_i$ 를 사용하는 링크  $i$ 를 통해  $L$ 크기의 데이터 패킷을 전송할 때 걸리는 시간인  $LD_i$ 는 아래와 같다.

$$LD_i = \frac{L}{r_i} \quad (1)$$

여기서,  $L$ 은 데이터 크기 (bytes)이고,  $r_i$ 는 링크  $i$ 의 데이터 레이트 (Mbps)이다. 이러한 LD 값만 이용하면, WMN 상에 존재하는 경로의 대략적인 전송 시간을 구할 수 있다. 하지만, LD 값만으로는 특정 경로의 채널 다양성을 반영할 수 없다. 따라서, LD와 WCETT<sup>[3]</sup>을 참고하여 CRM 메트릭을 정의한다.

$$CRM_p = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i \in P} LD_i + \frac{1}{2} \cdot \max_{1 \leq k \leq K} LD_k \quad (2)$$

여기서, CRM<sub>p</sub>는 경로 P의 CRM값이고, K는 가능한 채널 개수이다. LD<sub>k</sub>는 아래와 같이 정의된다.

$$LD_k = \sum_{i \in P, j=k} LD_i^j \quad (3)$$

여기서, LD<sub>i</sub><sup>j</sup>는 채널  $j$ 를 사용하는 링크  $i$ 의 LD값이다. 따라서, 수식 (2)의 두 번째 항은 경로 P의 채널 다양성을 반영하는 항이다. 수식 (2)의 CRM메트릭은 WCETT<sup>[3]</sup>와 비슷하지만, ETX (Expected Transmission count)<sup>[14]</sup>가 반영되지 않았다. 이는 자식 노드가 부모 노드를 선택하기 전에는 부모 링크에 채널이 할당되지 않았기 때문에, ETX와 같은 링크의 품질 (quality)을 측정할 수 없기 때문이다. 또한, CRM은 단순한 라우팅 메트릭이 아닌, 트리의 링크들의 채널과 라우팅을 결정하는 메트릭이다.

### 3.3 NC (Network Connectivity) 알고리즘

RSMC는 트리 형성시 부모 링크의 채널 할당 후에 노드 연결성을 향상시키기 위해 이웃 링크의 채널을 할당한다. 이를 수행하기 전에 NC알고리즘을 사용해서 이웃 링크를 형성할 하나의 이웃 노드를 선택한다. 알고리즘1은 NC알고리즘의 대략적인 코드이다. 노드 X가 NC 알고리즘을 사용한다고 가정하자. 2번째 행에서 변수를 초기화하고, 3번째 행에서 노드 X는 주변에 도달 가능한 이웃 노드들과 만들 수 있는 가용 이웃 링크의 개수를 계산한다. 예를 들어, 노드 X의 주위에 이웃 노드 Y는 자식 노드 Z1과 Z2를 가지고 있다고 가정하자. 이웃 노드 Y와 두 자식 노드들은 같은 채널을 사용할 것이다. 따라서, 노드 X가 이웃 노드 Y를 NC알고리즘으로 선택한다면, 노드 Y, Z1, Z2

```

알고리즘 1. NC (Network Connectivity) 알고리즘
1: NC_Algorithm (received MAdv messages) {
2:   curr_nc = max_nc = 0; max_nn = old_crm = new_crm = null;
3:   Calculate the network connectivity for each neighbor node;
4:   if (There is a neighbor NIC) then {
5:     for each neighbor node i do {
6:       curr_nc = get_nc (node i); /* Get the current NC value */
7:       old_crm = get_crm (routing table); /* Get the current CRM */
8:       new_crm = get_crm (MAdv messages); /* Get the new CRM */
9:       if (old_crm > new_crm and max_nc < curr_nc) then {
10:        max_nc = curr_nc;
11:        max_nn = the address of node i;
12:      }
13:    }
14:  }
15: }
    
```

들과 통신이 가능하므로, 가용 이웃 링크 개수는 3이 된다. 이러한 정보는 노드들이 주기적으로 MAdv를 브로드캐스트하므로 얻을 수 있다. 이후에 4번째 행에서 노드 X는 이웃 노드와 이웃 링크를 형성할 수 있는 이웃 NIC이 있는지 확인한다. 가용한 이웃 NIC이 있다면, 5번째 행부터 가장 큰 가용 이웃 링크 개수를 나타내는 이웃 노드를 선택한다. 이때, 9번째 행에서 노드 X는 라우팅 루프 (routing loop)를 방지하기 위해 CRM의 기존 값보다 새로운 CRM값이 작은 경로를 제공하는 이웃 노드를 선택한다. 최종적으로 노드 X는 선택한 이웃 노드와 MJoin 및 MAck 메시지를 교환하여 이웃 링크의 채널을 할당한다.

3.4 라우팅 (Routing)

부모 링크와 이웃 링크의 채널 할당이 끝나면, 트리상의 각 노드는 다른 목적지 노드에 대한 CRM메트릭을 계산한다. 이를 위해 각 노드는  $T_M$ 초마다 주기적으로 CAdv (CRM Advertisement) 메시지를 부모 NIC, 자식NIC, 이웃 NIC으로 브로드캐스트한다. CAdv메시지는 각 목적지까지의 경로 상의 LD<sub>i</sub>의 합과 각 채널에 대한 LD<sup>k</sup>값을 포함한다. 이러한 값과 Dijkstra알고리즘을 사용하여 다른 목적지 노드에 대한 CRM메트릭 값을 계산한다.

3.5 RSMC 프로토콜 예제

그림 5를 사용하여 RSMC 동작의 예제를 살펴본다. 그림 5(a)는 초기 토폴로지이며 각 노드는 부모 NIC, 자식NIC, 이웃NIC을 하나씩 가지고 있다. GW는 자식 NIC만 가지고 있다. 각 노드의 자식 NIC은 숫자로 표시된 채널로 할당되었다. 노드 A와 C는 굵은 실선으로 표현된 부모 링크를 통해 연결되어 있고, 새로운 노드 X는 아직 트리를 형성하지 못한 상태이다.

그림 5(b)에서 노드 X는 인터넷 경로를 찾기 위해 CRM메트릭을 사용해서 가장 CRM값이 작은 인터넷 경로를 제공하는 부모 노드를 선택한다. 노드 X는 다

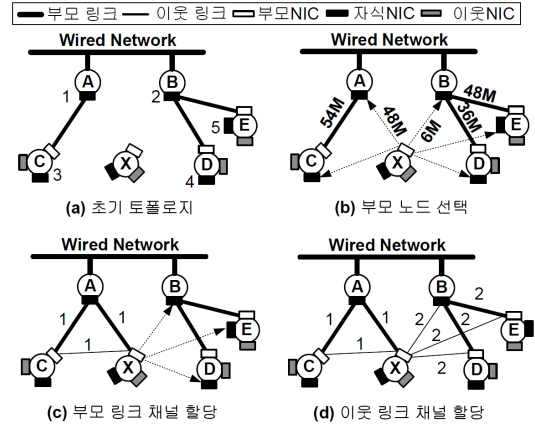


그림 5. RSMC 프로토콜 예제

양한 경로를 통해 인터넷에 접근할 수 있다. 총 다섯 개의 경로 A-X, A-C-X, B-X, B-E-X, B-D-X를 사용할 수 있다. 간단한 설명을 위해 두 경로 A-X, B-X만 살펴본다. 노드 X가 B를 부모로 선택해서 링크 B-X를 사용한다고 가정해보자. 링크 B-X의 데이터 레이트는 6Mbps이고, 기존 링크 B-E와 B-D의 데이터 레이트는 48Mbps, 36Mbps이다. 따라서, 링크 B-X가 사용되면 높은 레이트 링크인 B-E와 B-D가 낮은 레이트 링크 B-X에 의해 심각한 성능 저하를 겪을 수 있다. 반면에, 노드 X가 노드 A를 부모로 선택한다고 가정해보자. 링크 A-X의 데이터 레이트는 48Mbps이고, 기존 링크 A-C의 데이터 레이트는 54Mbps이다. 이 경우도 마찬가지로 RA현상이 발생하지만 앞의 경우보다는 RA문제가 덜 심각하다. 따라서, 노드 X는 노드 A를 부모로 선택한다. 이에 따라, 노드 X는 그림 5(c)와 같이 부모 링크 A-X를 형성한다. 여기서, 노드 C와 X는 같은 부모 노드 A에게 속했으므로 같은 채널 (부모 노드 A의 자식 NIC에 할당된 채널1)을 사용한다. 따라서, 링크 C-X도 사용한다.

다음으로, 그림 5(c)에서 노드 X는 이웃 링크를 형성하기 위한 이웃 노드를 NC알고리즘을 통해 선택한다. 노드 X가 도달 가능한 이웃 노드는 A, B, C, D, E이지만, 노드 A, C와 X 사이의 링크는 채널이 이미 할당되었으므로, B, D, E노드만 고려한다. 노드 B를 이웃 노드로 선택할 경우 가용 이웃 링크 수는 3개, 노드 D와 E를 이웃으로 선택할 경우는 각각 1개이다. 따라서, 노드 X는 그림 5(d)와 같이 가장 큰 가용 이웃 링크 수를 제공하는 이웃 노드 B를 선택하여 이웃 링크 B-X의 채널을 B의 자식 NIC에 할당된 채널2로 설정한다. 또한, 노드 D, E, X는 같은 부모 노드 B에게 속했으므로 링크 X-D, X-E도 채널2로 할당되어

사용 가능하다. 그림 5(d)는 노드 X의 최종 채널 할당 결과이다.

#### IV. 성능평가

본 장에서는 NS-2<sup>[15]</sup>를 사용하여 RSMC의 성능을 검증하고, 이를 Hyacinth<sup>[1]</sup>, ROMA<sup>[2]</sup>, ICA<sup>[3]</sup>, CoCA<sup>[12]</sup>와 비교한다. 각 실험 결과는 30번의 다른 시나리오들을 통해 얻어진 결과이다. 각 시나리오에는 30개의 노드와 하나의 GW를 포함하며, 이들은 1000m x 800m 네트워크 영역 내의 임의의 위치에 존재한다. 각 노드는 3개의 IEEE 802.11a NIC을 사용하며, IEEE 802.11a의 파라미터는 기본값으로 설정하였다. 사용 가능한 겹치지 않는 채널 개수는 12개이며, 6-54Mbps의 데이터 레이트를 사용한다. 각 데이터 레이트를 위한 거리는 Cisco Aironet 802.11a카드를 참조하였다<sup>[16]</sup>. 각 시나리오 별 실험 시간은 300초이며, 전송 범위 (transmission range)와 간섭 범위 (interference range)는 각각 250m, 550m이다. 주기적인 메시지 전송을 위한 T<sub>M</sub>값은 20초이다.

UDP 트래픽을 사용하여 성능을 측정하였다. UDP 패킷 크기는 1000바이트이고, 각 UDP 플로우는 포화 (saturated)되었다. WMN를 고려하여 인터넷 플로우와 P2P (peer-to-peer) 플로우를 생성하였다. 인터넷 플로우는 임의의 두 노드를 선택하여 플로우의 송신 노드와 수신 노드로 설정하였고, 두 노드 중의 하나는 GW이다. P2P플로우는 임의의 두 노드를 선택하여 플로우의 송신 노드와 수신 노드로 설정하였다. 시나리오마다 생성된 플로우 개수는 노드 개수와 같고, 인터넷 플로우 개수와 P2P 플로우 개수는 같다. 예로, 노드 개수가 30개이면, 인터넷 플로우와 P2P플로우 개수는 각각 15개이다.

그림 6(a)는 노드 개수에 따른 RSMC의 총 처리율

(aggregate throughput)을 보여준다. 각 시나리오에는 30개의 포화된 UDP 플로우가 생성되었다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이, 노드 개수가 증가할수록 제안한 RSMC의 총 처리율이 다른 프로토콜에 비해 향상된 성능을 나타낸다. 노드 개수가 30개일 때, RSMC가 CoCA, ROMA, Hyacinth, ICA에 비해 약 11.9%, 21.54%, 39.4%, 85.8% 나은 총 처리율을 보여준다. 이는 노드 개수가 증가함에 따라 RA문제가 심각해지기 때문이다. ICA는 각 노드가 3개의 NIC을 가지므로 총 3개의 채널을 사용하고, RA문제를 완화하는 채널 할당 기법이 없으므로, 성능이 매우 낮다. Hyacinth는 모든 채널을 사용하지만, 역시 RA문제를 줄이지 못한다. ROMA는 링크의 품질을 반영하여 트리를 구성하기 때문에, Hyacinth보다는 높은 성능을 보이지만, 레이트를 분할하는 채널 할당 기법이 없다. CoCA는 분산 알고리즘을 통해 레이트를 분할하여 RA문제를 완화하지만, 인접한 두 이웃 노드들 사이의 이웃 링크를 활용하지 않는다. RSMC는 이러한 이웃 링크를 활용하고 RA문제를 완화하기 위해 CRM메트릭을 사용한다. 따라서, RSMC가 가장 높은 성능을 보인다.

그림 6(b)와 그림 6(c)는 노드 연결성과 채널 다양성을 보여준다. 각 프로토콜의 노드 연결성과 채널 다양성을 측정하기 위해 노드 연결성 비율 (Node Connectivity Ratio)과 채널 다양성 비율 (Channel Diversity Ratio)를 정의하였다. 노드 연결성 비율은 각 시나리오에서 가능한 모든 링크 중에서 각 프로토콜이 실제로 라우팅을 위해 사용한 링크 비율을 나타낸다. 노드 연결성 비율 값이 높을수록 노드 연결성은 높아진다. 채널 다양성 비율은 각 시나리오에서 가능한 모든 채널 중에서 각 프로토콜이 실제로 사용한 채널 비율을 나타낸다. 채널 연결성 비율 값이 클수록 채널 다양성은 높아진다.

그림 6(b)에서 ICA는 가장 높은 노드 연결성을 보

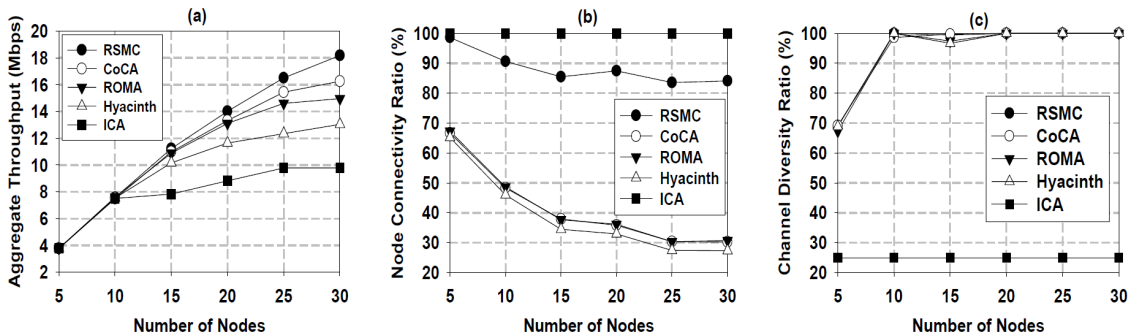


그림 6. RSMC 프로토콜 성능 (a) 총 처리율 (b) 노드 연결성 비율 (c) 채널 다양성 비율

이다. 이는 ICA가 WMN상의 모든 링크를 사용하기 때문이다. 하지만, 그림 6(c)에서 ICA는 매우 낮은 채널 다양성을 나타낸다. Hyacinth는 트리를 가정하였기 때문에 상당한 수의 링크를 사용하지 않는다. ROMA와 CoCA는 Hyacinth와 같이 부모 노드와 자식 노드 사이의 링크를 사용할 뿐만 아니라, 같은 부모에 속한 자식들은 같은 채널을 사용하므로 가용 링크 개수가 증가한다. 하지만, RSMC는 이러한 링크에 더하여, 인접한 이웃과의 링크를 활용하므로 더욱더 많은 링크들을 사용한다. 또한, Hyacinth, ROMA, CoCA, RSMC는 모두 트리를 기반으로 모든 가용채널을 사용하기 때문에 거의 100%에 가까운 채널 다양성 비율을 보인다.

### V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11 WMN의 성능을 향상시키기 위한 RSMC 프로토콜을 제안하였다. RSMC는 트리를 기반으로 CRM메트릭을 사용하여 WMN의 채널 다양성을 높이고, 높은 레이트 링크에 채널을 할당함으로써 RA문제를 완화시켰다. 또한, NC알고리즘을 사용하여 노드 연결성을 증가시켰다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 RSMC의 성능을 WMN를 위해 제안된 기존의 다른 프로토콜과 비교하였고, 향상된 성능을 보임을 입증하였다. 향후에는 RSMC에서 사용하는 CRM 메트릭을 개선하고, 실제 테스트 베드에서 RSMC를 실험할 계획이다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Raniwala and T. Chiueh, "Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network," in Proc. of IEEE Infocom, 2005.

[2] A. Dhananjay et al., "Practical, Distributed Channel Assignment and Routing in Dual-radio Mesh Networks," in Proc. of ACM Sigcomm, 2009.

[3] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks," in Proc. of ACM Mobicom, 2004.

[4] S. Avallone, I. F. Akyildiz, and G. Ventre, "A Channel and Rate Assignment Algorithm and a Layer-2.5 Forwarding Paradigm for Multi-Radio Wireless Mesh Networks", IEEE/ACM

Transactions on Networking, Vol.17, No.1, pp. 267-280, Feb. 2009.

[5] A.H.M. Rad and V. Wong, "Joint Logical Topology Design, Interface Assignment, Channel Allocation, and Routing for Multi-Channel Wireless Mesh Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.6, No.12, pp.4432-4440, Dec. 2007.

[6] M. Heusse, F. Rousseu, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, "Performance Anomaly of 802.11b," in Proc. of IEEE Infocom, 2003.

[7] T. Joshi et al., "Airtime Fairness for IEEE 802.11 Multirate Networks," IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.7, No.4, pp.513-527, Apr. 2008.

[8] V. Bahl et al., "Opportunistic Use of Client Repeaters to Improve Performance of WLANs," IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol.17, No.4, pp.1160-1171, Aug. 2009.

[9] T. Kuang, Q. Wu, and C. Williamson, "MRMC: A Multi-Rate Multi-Channel MAC Protocol for Multi-Radio Wireless LANs," in Proc. of WiNCS, 2005.

[10] N. Niranjan, S. Pandey, and A. Ganz, "Design and Evaluation of Multichannel Multirate Wireless Networks," ACM/Kluwer Mobile Networking and Applications, Vol.11, No.5, pp.697-709, Oct. 2006.

[11] S.H. Kim et al., "A Distributed Channel Assignment Protocol for Rate Separation in Wireless Mesh Networks," Computer Communications, Vol.33, No.11, pp.1281-1295, Jul. 2010.

[12] S.H. Kim et al., "Distributing Data Rate Using Cooperative Channel Assignment for Multi-Rate Wireless Mesh Networks," in Proc. of IEEE WCNC, 2010.

[13] C. Yu et al., "Multi-hop Transmission Opportunity in Wireless Multihop Networks," in Proc. of IEEE Infocom, Mar. 2010.

[14] D. De Couto et al., "A High Throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing," in Proc. of ACM Mobicom, 2003.

[15] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

[16] Cisco Aironet, <http://www.cisco.com/>.

김 석 형 (Sok-Hyong Kim)

정회원



2005년 2월 한국항공대학교 정보통신공학과 학사  
2007년 2월 포항공과대학교 정보통신공학과 석사  
2007년 3월~현재 포항공과대학교 컴퓨터 공학과 박사과정  
<관심분야> 무선 메쉬 네트워크, 무선랜, 무선 네트워크

권 등 희 (Dong-Hee Kwon)

정회원



1997년 2월 한국과학기술원 전자공학과 학사.  
2000년 2월 포항공과대학교 정보통신공학과 석사  
2006년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사  
2006년~2009년 POSDATA 연구원  
2010년~현재 SK 텔레콤 연구원  
<관심분야> 무선 통신, 모바일 네트워크

서 영 주 (Young-Joo Suh)

종신회원



1985년 2월 한양대학교 전자공학과 학사  
1987년 2월 한양대학교 전자공학과 석사  
1996년 미국 조지아 공대(Georgia Tech) 컴퓨터공학 박사  
1988년~1990년 LG전자연구원

1990년~1993년 충청대학 교수  
1996년~1997년 미국 Georgia Tech 연구원  
1997년~1998년 미국 University of Michigan 연구원  
1998년~현재 포항공대 컴퓨터공학과 교수  
<관심분야> 무선랜 프로토콜, 이동 IP, 이동 멀티캐스트, ad-hoc/sensor 네트워크, 차세대 이동 네트워크