

# IEEE 802.11 다중 라디오 다중 전송률 무선 네트워크를 위한 채널 이질성 인지 채널 할당

정희원 김 석 형\*, 김 동 욱\*\*, 종신회원 서 영 주\*\*\*\*

## Channel Heterogeneity Aware Channel Assignment for IEEE 802.11 Multi-Radio Multi-Rate Wireless Networks

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

### 요 약

IEEE 802.11 장비가 널리 사용되고 있으며, 저비용 IEEE 802.11 장비들이 보급됨에 따라 단말들은 다중 IEEE 802.11 라디오를 장착할 수 있게 되었다. 최신 IEEE 802.11 장비들은 다수 채널 (multi-channel)과 전송률 (multi-rate)을 제공한다. 실제 다중 채널 네트워크에서는 같은 노드에 대해 채널들이 서로 다른 신호 특성을 가지는 채널 이질성 (channel heterogeneity)이 있으므로, 네트워크 용량을 향상시키기 위해 다수의 채널을 효율적으로 할당해야 한다. 또한, 다중 전송률 네트워크에서는 같은 채널 상의 낮은 전송률 링크가 높은 전송률 링크의 성능을 심각히 저하시키는 성능 이상 (performance anomaly) 현상이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 채널 이질성과 성능 이상을 반영하여 네트워크 성능을 향상시키는 HACA (Heterogeneity Aware Channel Assignment) 알고리즘을 제안한다. NS-2 시뮬레이션을 통해 HACA 알고리즘이 채널 이질성을 반영하지 못하는 기존 채널 할당 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보임을 검증하였다.

**Key Words** : channel assignment, channel heterogeneity, IEEE 802.11, multi-rate, wireless networks

### ABSTRACT

IEEE 802.11 devices are widely used, and terminals can be equipped with multiple IEEE 802.11 interfaces as low-cost IEEE 802.11 devices are deployed. The off-the-shelf IEEE 802.11 devices provide multiple channels and multiple data rates. In practical multi-channel networks, since there is channel heterogeneity which indicates that channels have different signal characteristics for the same node, channels should be efficiently assigned to improve network capacity. In addition, in multi-rate networks, low-rate links severely degrade the performance of high-rate links on the same channel, which is known as performance anomaly. Therefore, in this paper, we propose a heterogeneity aware channel assignment (HACA) algorithm that improves network performance by reflecting channel heterogeneity and performance anomaly. Through NS-2 simulations, we validate that the HACA algorithm shows improved performance compared with existing channel assignment algorithms that do not reflect channel heterogeneity.

### 1. 서 론

IEEE 802.11 무선 네트워크가 널리 보급됨에 따라 각 단말들은 다수의 IEEE 802.11 장비들을 장착할 수

\* 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업으로 수행되었음 (2011-0026371)

\*\* 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0029034)

\* 삼성전자 (shkimm@postech.ac.kr)

\*\* 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (shkim80@postech.ac.kr, yjsuh@postech.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-08-335, 접수일자 : 2011년 8월 2일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 21일

있게 되었다<sup>11</sup>. IEEE 802.11 네트워크의 중요한 문제점 중의 하나는 네트워크 용량 (capacity)이다. 네트워크 용량을 향상시키기 위해 다양한 방법이 사용될 수 있는데, 그 중 유용한 방법이 다중 채널 (multi-channel)과 다중 전송률 (multi-rate)을 활용하는 것이다. 동일 채널 상의 링크들을 다수의 채널로 분리 시킴으로써 전체 네트워크 성능을 향상시키기 위해 수많은 다중 채널 기법들이 제안되었다<sup>12-15</sup>.

실제 IEEE 802.11 다중 채널 네트워크에서는 각 채널들이 서로 다른 신호 특성을 가짐에 따라 채널 이질성 (channel heterogeneity)이 존재한다. 이는 같은 두 노드 사이에 대해서도 마찬가지이다. 예를 들어, 노드 A와 노드 B에게 데이터를 전송하기 위해 링크 A-B에 채널 1을 사용할 경우, 최대 사용 가능한 전송률은 54Mbps인 반면에, 채널 2를 사용할 경우 최대 36Mbps의 전송률을 사용할 수 있다. 이러한 채널 이질성이 일어나는 이유는 각 주파수 대역에서의 서로 다른 신호 전파 특성이나 다중 경로 효과 (multipath effect) 때문에 발생한다고 알려져 있다<sup>6,7</sup>. 현재까지 기존 채널 할당 기법들은 채널 이질성을 고려하지 않고, 채널 동질성 (channel homogeneity)을 가정하였기에 실제 네트워크에서는 성능이 급격히 저하될 수 있다.

또한, 다중 전송률 네트워크에서는 같은 채널 상의 낮은 전송률 링크가 높은 전송률 링크의 성능을 급격히 저하시키는 문제가 발생한다. 이는 성능 이상 (performance anomaly) 문제로 널리 알려져 있다<sup>8</sup>. 성능 이상 문제를 해결하기 위해 크게 단일 채널 (single-channel) 기법들<sup>9-10</sup>과 다중 채널 기법들<sup>11-12</sup>이 제안되었다. 단일 채널 기법들은 기존 IEEE 802.11을 수정하여 높은 전송률 링크와 낮은 전송률 링크의 전송 기회를 차별화 시킴으로써 성능 이상 문제를 해결하였다. 반면에, 다중 채널 기법들은 기존 IEEE 802.11 표준을 수정하지 않고 단순히 채널을 할당함으로써 서로 다른 전송률의 링크들을 분리하여 성능 이상 문제를 완화하였다.

따라서, 본 논문에서는 IEEE 802.11 다중 라디오 다중 전송률 무선 네트워크에서 채널 이질성과 성능 이상을 반영하는 HACA (Heterogeneity Aware Channel Assignment) 알고리즘을 제안하였다. HACA 알고리즘은 채널 이질성을 활용하여 채널을 선택하고, 서로 다른 전송률을 사용하는 링크들을 다른 채널로 분리시켜서 성능 이상 문제를 완화하여 전체 네트워크 성능을 향상시킨다. NS-2 시뮬레이션을 사용하여 HACA 알고리즘이 채널 이질성을 반영하지 않는 기존 알고리즘들 보다 나음을 검증하였다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서 채널 이질성 및 성능 이상을 설명하고, 관련 연구를 다룬 뒤에 본 연구의 필요성을 제시한다. 3장에서 HACA 알고리즘을 제안하고, 4장에서 성능 평가를 수행한 후, 5장에서 논문을 마무리한다.

## II. 채널 이질성 및 성능 이상, 관련 연구

본 장에서는 채널 이질성과 성능 이상 문제를 관찰한다. 그리고, 기존 관련 연구들을 살펴본 후에, 본 연구의 필요성을 설명한다.

### 2.1 채널 이질성

IEEE 802.11 네트워크에서 채널들의 채널 이질성을 살펴보기 위해 실제 IEEE 802.11a 테스트 베드에서 36번, 48번, 160번 채널들의 RSS (Received Signal Strength)를 측정하였다. IEEE 802.11a NIC을 장착한 송신 노드 A와 수신 노드 B 사이에 포화된 (saturated) UDP 트래픽을 10초 동안 생성시키고 RSS를 측정 한 뒤, 채널을 변경하여 측정을 반복하였다. UDP 패킷 크기는 1500 바이트이다. 그림 1은 각 채널의 RSS 값을 시간에 따라 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 동일한 송신 노드 A와 수신 노드 B에 대해서 채널에 따라 RSS값이 다름을 알 수 있다. 이는 각 채널 즉, 주파수 대역에 따라서 신호 전파 특성이 다르며, 다중 경로 효과 (multipath effect)가 다르기 때문이다<sup>6,7</sup>. 일반적으로 RSS값은 링크의 전송률에 영향을 미치기 때문에 RSS값이 낮을수록 링크의 가용 전송률은 낮아지게 된다. 또한, 채널 별로 RSS 값은 시간에 따라 상대적으로 안정되어 있음을 관찰할 수 있다<sup>6,7</sup>. 따라서, 이러한 채널 이질성을 반영하지 않는 채널 할당 기법은 네트워크 성능을 크게 저하시

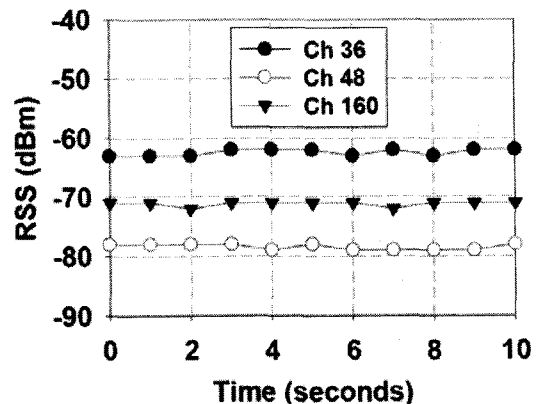


그림 1. 시간에 따른 각 채널별 RSS 값 변화 (채널 이질성)

킬 수 있다.

2.2 성능 이상

그림 2는 성능 이상 문제를 채널 할당을 통해 완화할 수 있음을 보여준다. 먼저, 그림 2a (채널 할당1)와 같이 4개의 노드가 NIC 2개를 사용하여 4개의 플로우를 생성시켰다고 가정하자. 각 플로우에는 사용하는 전송률과 채널 번호가 표시되었고, 4개의 노드는 서로의 전송 범위 내에 위치한다. 채널 할당 1에서 볼 수 있듯이, 높은 전송률 링크 A-B (54Mbps)는 낮은 전송률 링크 C-D (12Mbps)와 같은 채널 36을 사용하기 때문에 성능 이상이 발생한다. 하지만, 그림 2b (채널 할당 2)에서는 높은 전송률 링크들이 낮은 전송률 링크들과 다른 채널을 사용하여 분리되어, 성능 이상이 발생하지 않는다. 그림 3은 채널 할당 1과 2의 성능을 실제 IEEE 802.11a 테스트 베드 실험을 통해 측정된 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 동일한 환경에서 채널 할당만 변경하여 성능을 약 36Mbps에서 44Mbps까지 향상시킬 수 있다. 따라서, 채널 이질성과 이러한 성능 이상 문제를 완화할 수 있는 채널 할당 기법이 필요하다.

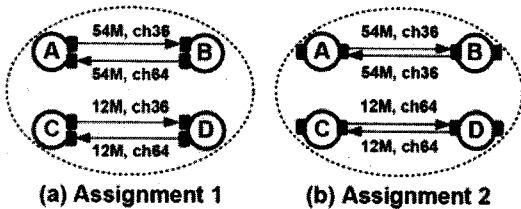


그림 2. 성능 이상 관찰을 위한 채널 할당 예제

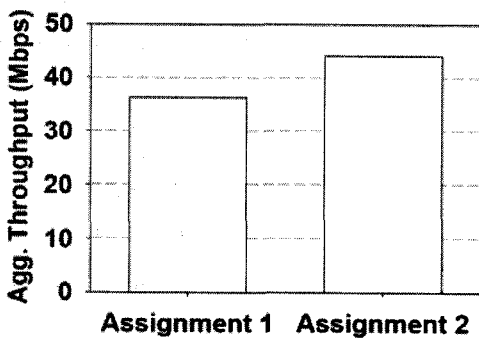


그림 3. 그림 2의 채널 할당 1과 2의 성능 측정 결과

2.3 관련 연구

다중 채널을 활용하여 네트워크 성능을 향상시키기 위해 수많은 다중 채널 기법들이 제안되었다<sup>2-5)</sup>. 예를

들어, Hyacinth<sup>2)</sup>는 무선 메쉬 네트워크를 위한 채널 할당 기법이다. Hyacinth는 메쉬 게이트웨이를 중심으로 트리를 형성하며, 각 노드는 채널 할당을 위해 주변 이웃 노드들과 주기적으로 채널 트래픽 부하 정보를 교환한다. ROMA<sup>3)</sup>는 경로내 (intra-path) 간섭과 경로간 (inter-path) 간섭을 해결하기 위해 각 트리에 서로 다른 채널 순서 (channel sequence)를 사용한다. 이러한 채널 할당 기법들은 모든 채널들이 동일한 특성을 가진다고 가정하였기 때문에 채널 이질성을 반영하지 못한다.

또한, 다중 전송률 네트워크에서 성능 이상 문제를 해결하기 위해 크게 단일 채널 기법<sup>9-10)</sup>과 다중 채널 기법<sup>11-12)</sup>들이 제안되었다. 단일 채널 기법들은 기존 IEEE 802.11 표준을 수정하여 동일 채널 상의 높은 전송률 링크와 낮은 전송률 링크의 채널 접근 기회를 차별화 시킨다. 예를 들어, 기법<sup>9)</sup>에서는 IEEE 802.11의 채널 접근 파라미터를 조절하여 낮은 전송률 링크가 높은 전송률 링크보다 채널 접근 기회가 적게 한다. 기법<sup>10)</sup>에서는 낮은 전송률을 사용하는 노드로부터의 데이터를 중간 노드가 전달 (relay) 하여, 낮은 전송률 링크의 채널 점유 시간을 줄였다. 하지만, 이 기법들은 기존 IEEE 802.11을 변경하므로 이미 보급된 IEEE 802.11 장비들을 수정해야 한다.

다중 채널 기법들은 기존 IEEE 802.11 표준을 수정하지 않고 가용한 다중 채널들을 활용하여 서로 다른 전송률 링크들을 분리시켜 성능 이상 문제를 완화한다. 이에 대한 대표적인 기법은 MRMC (Multi-Rate Multi-Channel)<sup>11)</sup>과 DR-CA (Data Rate adaptive Channel Assignment)<sup>12)</sup>이다. MRMC는 단일 홈 네트워크를 가정하였으며, 각 노드가 다수의 IEEE 802.11 NIC (Network Interface Card)을 장착하고 있다. 각 NIC은 서로 다른 채널과 전송률을 사용한다. 따라서, 링크들은 자신의 전송률에 따라 사용하는 채널이 달라진다. MRMC에서는 노드들이 사용하는 NIC 개수 (C)가 가용 전송률 개수 (R)보다 작을 경우, 높은 전송률 링크들이 가용 NIC에 우선적으로 할당된다. 즉,  $C < R$ 일 경우에, 첫 번째 NIC<sub>1</sub>에는 최대 전송률 R<sub>1</sub>을, 두 번째 NIC<sub>2</sub>에는 두 번째 최대 전송률 R<sub>2</sub>를, ..., C-1번째 NIC<sub>C-1</sub>에는 C-1 번째 최대 전송률 R<sub>C-1</sub>를 할당한다. 그리고, 마지막 NIC<sub>C</sub>에는 나머지 전송률 R<sub>C</sub>~R<sub>R</sub>이 할당된다. 예를 들어, 각 노드가 IEEE 802.11a NIC 3개를 사용한다면 (즉, C=3, R=8), NIC1에는 54Mbps 링크, NIC2에는 48Mbps 링크, NIC3에는 36Mbps~6Mbps 링크가 할당된다. DR-CA도 단일 홈 네트워크를 가정하였으며, 각 노드는 채널

개수만큼 NIC을 사용한다. DR-CA는 각 채널에 할당된 링크들의 전송률 합이 모든 채널에 균등하게 분산 되도록 채널을 할당한다. 예로, 4개의 링크들이 36Mbps, 24Mbps, 12Mbps, 9Mbps를 사용하고 각 노드가 NIC 3개를 사용한다면, NIC1에는 36Mbps 링크, NIC2에는 24Mbps 링크, NIC3에는 12Mbps 링크와 9Mbps 링크가 할당된다. 즉, 각 채널에 할당된 전송률 합이 36Mbps (NIC1), 24Mbps (NIC2), 21Mbps (NIC3)로 균등하게 된다. MRMC와 DR-CA는 다중 채널을 활용하여 성능 이상을 완화하지만, 채널 이질성을 반영하지 못하기 때문에 네트워크 성능이 심하게 저하될 수 있다.

### 2.4 본 연구의 필요성

앞에서 살펴본 바와 같이, 실제 IEEE 802.11 네트워크에서는 채널 간의 서로 다른 특성을 가지는 채널 이질성이 존재한다. 또한, IEEE 802.11 다중 전송률 네트워크에서는 낮은 전송률을 사용하는 링크들에 의해 성능 이상 문제가 발생한다. 기존 관련 연구와 같이 이 두 가지 사항들을 반영하지 못할 경우, 네트워크 성능을 심하게 떨어뜨릴 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이들을 반영하는 채널 할당 프로토콜을 제안한다.

## III. HACA 알고리즘

### 3.1 시스템 모델

본 논문에서는 IEEE 802.11 기반 다중 라디오 다중 전송률 단일홉 (single-hop) 네트워크를 가정한다. 다중홉 (multi-hop) 네트워크를 위한 채널 할당 알고리즘은 향후 연구 계획이다. 또한, IEEE 802.11a 가 IEEE 802.11b나 802.11g보다 많은 수의 채널과 높은 전송률을 지원하기 때문에 802.11a를 가정한다.

### 3.2 채널별 성능 측정 모델

HACA 알고리즘을 설명하기에 앞서 그림 4a와 같은 네트워크 토폴로지를 생각해보자. 네 개의 노드 A, B, C, D는 서로 전송 범위 및 간섭 범위 내에 위치하고 있으며 직접 통신이 가능하다. 또한, 각 노드는 NIC 3개를 가지고 있고, 최대 4개의 채널을 사용할 수 있다. 이때, 6개의 플로우 즉, A-B, A-C, B-C, B-D, C-D, D-A가 생성되었다고 가정하자. 이 상황에서 각 플로우를 위한 링크의 채널이 할당되어야 하므로, 각 노드는 그림 4b와 같이 자신의 NIC에 어떤 채널을 할당해야 할지 결정해야 한다. 이때, 다음 두 가

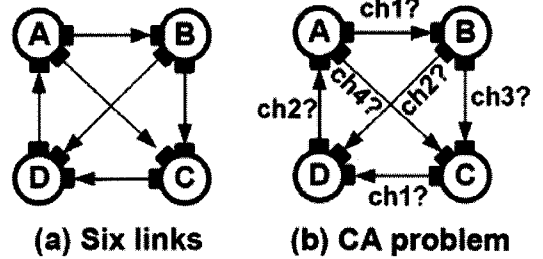


그림 4. 채널 할당을 위한 토폴로지 예제 (6개 링크)

지 사항을 고려해야 한다. 첫째, 하나의 NIC에는 두 개 이상의 채널을 할당할 수 없다. 둘째, 모든 링크를 사용할 수 있어야 한다. 예로, 채널 할당으로 인해 링크 B-D를 사용할 수 없을 경우, B는 D에게 데이터를 보낼 수 없다. 따라서, 각 노드가 NIC 3개를 가질 경우 적절한 채널 3개를 선택하여 각 NIC에 할당하면 위의 두 가지 사항은 해결된다. 따라서, 가용 채널 개수가 노드 별 가용 NIC 개수보다 클 경우, 어떤 채널을 선택할지를 결정하는 기준이 필요하다.

이를 위해 본 논문에서는 각 채널의 성능을 측정하기 위해 성능 측정 모델<sup>[13]</sup>을 사용한다. 채널 k에 존재하는 링크 i의 처리율 (throughput)은 아래와 같이 표현할 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$X_{k,i} = \frac{1}{\sum_{j \in S_k(i)} \frac{1}{r_j}} \quad (1)$$

여기서,  $S_k(i)$ 는 채널 k에서 링크 i의 전송에 간섭을 미치는 링크들의 집합이다.  $S_k(i)$ 는 링크 i도 포함한다. 또한,  $r_j$ 는 링크 j의 전송률이다. 수식 (1)에서, 채널 k의 모든 링크들의 처리율  $X_k$ 는 링크의 전송률의 함수이며, 모든 링크에 대해 동일하며, 성능 이상 문제를 반영한다<sup>[13]</sup>.

### 3.3 HACA 알고리즘

HACA 알고리즘을 설명하기 위해 그림 4b를 다시 생각해보자. 이해를 돕기 위해 6개 링크의 전송률이 각 채널마다 표1과 같이 주어졌다고 가정한다. 채널 이질성으로 인해 각 채널에서 링크의 전송률은 독립적이라고 가정하였다. 표1에서 볼 수 있듯이 각 채널에서 6개 링크는 서로 다른 전송률을 나타내기에, 어떤 채널이 좋은 채널인지 알기 힘들다. 따라서, HACA에서는 수식 (1)의 채널별 처리율을 사용하여 아래와 같이 채널을 선택한다.

표 1의 8번째 열에는 각 채널별 처리율이 수식 (1)을 사용하여 계산되었다. 수식 (1)에 따르면, 채널 4가 4.04M로 가장 큰 처리율을 나타낸다. 따라서, 가장 먼저 채널 4를 선택한다. 그 후, 채널 4의 각 링크들의 전송률을 높은 전송률에서 낮은 전송률로 그림 5a와 같이 정렬한다. 그리고, 현재 채널  $k$ 에 대해 다음과 같은  $L_{avg,k}$  을 계산한다.

$$L_{avg,k} = \frac{1}{N_{mic}} \sum_{i \in S_k} r_i \quad (2)$$

여기서,  $S_k$ 는 채널  $k$ 상의 링크들의 집합이며,  $N_{mic}$ 은 채널 할당이 끝나지 않은 남아있는 NIC 개수이다.

이 후에, HACA는 정렬한 링크들 중에서 가장 전송률이 큰 링크부터 선택한 채널 4에 할당한다. 이 과정은 채널 4에 할당된 링크들의 전송률 합이  $L_{avg,4}$  ( $=1/3*(54M+48M+36M+24M+18M+12M)=64M$ )보다 작거나 같은 동안 반복된다. 채널 4에 링크 A-C (54Mbps)와 링크 A-B (48Mbps)를 할당하면 채널 4에 할당된 링크들의 전송률 합은 102Mbps가 되므로  $L_{avg,4}=64Mbps$ 보다 크다. 따라서, HACA 알고리즘은 채널 4에 대해 채널 할당을 끝내고, 다른 채널을 수식 (1)의 처리율을 사용하여 선택한다.

표 2는 채널 1, 2, 3에 대한 각 링크의 전송률과 각 채널의 처리율을 보여준다. 위의 마찬가지로 가장 큰 처리율인 4.80M를 나타내는 채널 2가 선택된다. 이 후에, 채널 2의 4개 링크 C-D, B-D, B-C, D-A들을 전송률에 따라 정렬하고,  $L_{avg,2}$  ( $=1/2*(36M+24M+18M+12M)=45M$ )를 계산하여 동일한 채널 할당 과정을 그림 5b와 같이 수행한다. 이러한 과정이 반복되면 모든 NIC 3개에 대해 표 3과 그림 5c와 같이 채널 할당이 끝나게 된다.

알고리즘 1은 HACA 알고리즘의 개략적인 코드가

표 1. 채널별 링크별 전송률 (6개 링크, 채널 선택 전)

Links	A-B	A-C	B-C	B-D	C-D	D-A	$X_i$
Ch 1	54M	24M	36M	9M	12M	18M	2.96M
Ch 2	36M	36M	24M	12M	18M	36M	3.79M
Ch 3	24M	48M	12M	6M	24M	9M	2.15M
Ch 4	54M	48M	36M	24M	18M	12M	4.04M

표 2. 채널별 링크별 전송률 (4개 링크, 채널 4 선택 후)

Links	B-C	B-D	C-D	D-A	$X_i$
Ch 1	36M	9M	12M	18M	3.60M
Ch 2	24M	12M	18M	36M	4.80M
Ch 3	12M	6M	24M	9M	2.67M

표 3. 채널별 링크별 전송률 (2개 링크, 채널 4, 2 선택 후)

Links	B-D	C-D	$X_i$
Ch 3	6M	24M	4.80M

Sort in decreasing order

Links	A-C	A-B	C-D	B-D	B-C	D-A
Data rates	54M	48M	36M	24M	18M	12M
	Ch4 (NIC1)					

(a) Assign links A-C and A-B to channel 4

Sort in decreasing order

Links	A-C	A-B	D-A	B-C	C-D	B-D
Data rates	54M	48M	36M	24M	18M	12M
	Ch4 (NIC1)		Ch2 (NIC2)			

(b) Assign links D-A and B-C to channel 2

Sort in decreasing order

Links	A-C	A-B	D-A	B-C	C-D	B-D
Data rates	54M	48M	36M	24M	12M	9M
	Ch4 (NIC1)		Ch2 (NIC2)		Ch1 (NIC3)	

(c) Assign links C-D and B-D to channel 1

그림 5. 6개 링크에 대한 HACA 알고리즘 동작 과정

알고리즘 1. HACA 알고리즘

```

1: HACA_Algorithm () {
2:   max_x_ch = link_avg = sum_rate = null; nic_id = 0;
3:   for each unassigned NIC nic_id do {
4:     Get the  $X_i$  value for all unused channels for unassigned links;
     /* Get a channel with maximum  $X_i$  value based on (1) */
5:     max_x_ch = get_max_x_ch();
6:     Assign channel max_x_ch to NIC nic_id;
7:     Sort links in decreasing order of data rates on max_x_ch;
     /* Get the  $L_{avg,k}$  based on (2) */
8:     link_avg = get_link_avg();
9:     sum_rate = 0; nic_id++;
     /* Channel assignment */
10:    while (sum_rate <= link_avg) do {
11:      Assign current link i to current NIC nic_id;
12:      sum_rate += the data rate of link i;
13:    }
14:  }
15: }
```

다. 먼저, 변수들이 초기화되고, 할당되지 않은 각 NIC에 대해 채널 할당을 수행한다 (라인 3-14). 선택되지 않은 모든 채널 상의 할당되지 않은 링크들에 대해 수식 (1)의 처리율을 계산한다. 그리고, 가장 큰 처리율을 가지는 채널을 선택하고, 선택한 채널 상의 링크들을 정렬한 후, 수식 (2)의  $L_{avg,k}$  값을 계산한다. 이 후에,  $L_{avg,k}$  보다 클 때까지 링크들을 할당한다. 결국, HACA 알고리즘은 각 노드의 가능한 모든 NIC에 채널이 할당되면 끝난다.

### IV. 성능평가

제안하는 HACA 알고리즘의 성능을 NS-2<sup>[14]</sup>를 사용하여 평가하였다. HACA 알고리즘을 기존 채널 할당 기법인 MRMC<sup>[11]</sup>, DR-CA<sup>[12]</sup>와 비교하였다. 또한, 모든 링크들이 단일 채널에서 동작하는 S-CH도 비교하였다. 각 실험 결과는 20개의 서로 다른 시나리오의 결과를 평균한 값이다. 각 시나리오는 30개의 노드들이 단일 홉 내에서 임의의 위치에 서로 통신할 수 있도록 배치하였다. 각 노드는 IEEE 802.11a NIC 3개를 가지며, 총 12개의 채널과 6Mbps에서 54Mbps의 전송률을 사용한다. 각 전송률을 위한 거리 값은 Cisco Aironet 802.11a NIC의 데이터 시트 값을 참조하였다<sup>[15]</sup>. IEEE 802.11a 파라미터는 기본 값을 사용하였으며, 각 시나리오는 100초 동안 실험하였다. 트래픽 생성은 UDP 트래픽을 사용하였으며, 각 패킷 크기는 1000 바이트이다. UDP 플로우는 총 30개이며, 트래픽량은 1Mbps에서 10Mbps까지 증가시켰다. 각 플로우의 송신 노드와 수신 노드를 위해 임의의 두 노드를 선택하였다.

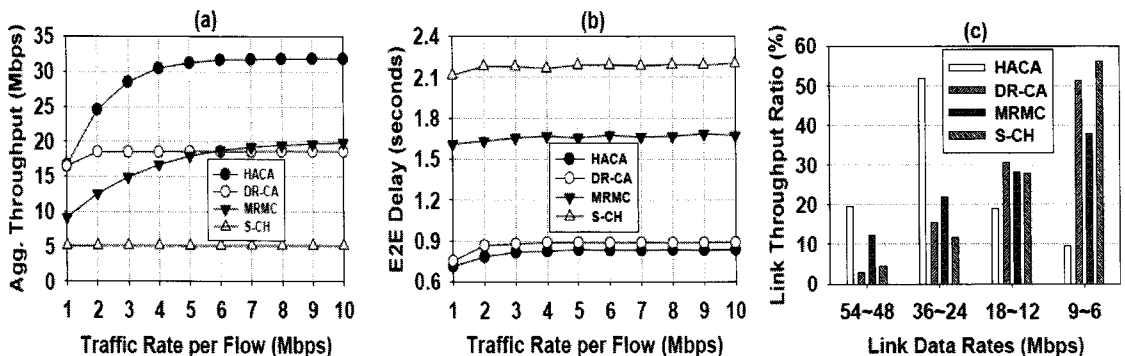
채널 이질성을 시뮬레이션하기 위해 다음과 같이 설정하였다. 어떤 송신 노드 A와 수신 노드 B 사이에 최대 가용한 전송률이 R일 경우, 각 채널에서의 실제 전송률은 최소 전송률인 6Mbps와 최대 가용 전송률 R 사이의 임의의 전송률을 선택하였다. 예를 들어, 가용 채널 개수가 12개이고, 링크 A-B의 최대 가용 전송률이 48Mbps일 경우, 각 채널의 전송률은 24Mbps (채널1), 48Mbps (채널2), ..., 36Mbps (채널12)으로 설정하였다. 이렇게 설정한 값은 S-CH, MRMC, DR-CA, HACA 모두 동일하게 사용된다. S-CH는 채널1의 전송률을 사용하고, MRMC와 DR-CA는 채널 동질성을 가정하였으므로 NIC 3개에 채널 1, 2, 3을

할당하였다. HACA는 가용 채널 12개에서 수식 (1)의 처리율이 높은 채널 3개를 선택하여 사용한다.

그림 6a와 6b는 각 UDP 플로우의 트래픽 량에 따른 전체 처리율 (aggregate throughput)과 종단간 지연 시간 (end-to-end delay)을 보여준다. 그림 6a,b에서 볼 수 있듯이, HACA의 성능이 다른 3개 기법에 비해 매우 향상됨을 알 수 있다. 예로, 각 플로우의 트래픽량이 10Mbps일 때, HACA의 전체 처리율은 DR-CA, MRMC, S-CH에 비해 약 71.3%, 60.3%, 517.5% 정도 향상된다.

이러한 성능 향상은 다음과 같이 설명할 수 있다. S-CH는 동일 채널에서 모든 링크들이 동작하므로 성능 이상 문제로 인해 전체 네트워크 성능이 심각히 저하된다. 반면, MRMC는 NIC 3개를 사용하여 가장 높은 전송률인 54Mbps와 48Mbps 링크들을 36Mbps~6Mbps 링크들로부터 분리시킨다. 또한, DR-CA는 NIC 3개에 링크의 전송률별로 분리시킨다. 따라서, MRMC와 DR-CA가 S-CH보다 나은 성능을 보인다. DR-CA와 MRMC를 비교했을 때, 플로우 별 트래픽량이 6Mbps 이하일 때는, DR-CA가 높은 성능을 보이지만, 6Mbps 이상일 때는, MRMC가 높은 성능을 보인다. 이는 MRMC가 높은 전송률들을 NIC1과 NIC2에 할당하여, 높은 전송률 링크들이 NIC1과 NIC2에서 보다 높은 처리율을 나타내기 때문이다. 하지만, MRMC와 DR-CA는 채널 동질성을 가정하였으므로, 채널 이질성이 존재할 경우 각 채널의 전송률을 알지 못하고 동작한다. 따라서, 채널 이질성을 활용하는 HACA 알고리즘이 MRMC, DR-CA 보다 높은 성능을 나타낸다.

다음으로, HACA가 채널 이질성을 활용하여 성능 이상 문제를 효과적으로 완화하는지 파악하기 위해 링크 처리율 비율 (link throughput ratio)을 다음과 같



(a) 전체 처리율  
그림 6. HACA 알고리즘 및 기존 기법의 성능 비교

(b) 종단간 지연시간

(c) 링크 처리율 비율

이 정의하였다. 전송률 54Mbps를 사용하는 링크들에 대한 링크 처리율 비율 ( $R_{54Mbps}$ )은 다음과 같다.

$$R_{54Mbps} = \frac{S_{54Mbps}}{S} \cdot 100(\%) \quad (3)$$

여기서,  $S$ 는 전체 처리율 (aggregate throughput)이고,  $S_{54Mbps}$ 는 네트워크에 존재하는 54Mbps 링크들에 의한 처리율이다. 예를 들어,  $S=100Kbps$ ,  $S_{54Mbps}=20Mbps$  이면,  $R_{54Mbps}=20\%$ 이다. 즉, 54Mbps 링크들이 전체 처리율에서 20%를 처리했다는 뜻이다. 따라서, 이러한 링크 처리율 비율 메트릭을 사용하면, 각 기법들에 의해 높은 전송률 링크가 낮은 전송률 링크에 비해 얼마나 효율적으로 전송하였는지, 즉 얼마나 성능 이상 문제가 완화되었는지 파악할 수 있다. 그림 6c는 링크 처리율 비율을 보여준다. 예를 들어, HACA는 54Mbps 및 48Mbps 링크들이 전체 처리율에서 약 20%를 처리했음을 보여준다. 그림 6c에서 볼 수 있듯이, S-CH, MRMC, DR-CA는 낮은 전송률 링크들이 대부분의 처리율을 차지함을 알 수 있다. 하지만, HACA는 채널 이질성을 활용하여 높은 전송률 링크들이 낮은 전송률 링크들 보다 높은 처리율을 나타냄을 알 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11 다중 라디오 다중 전송률 네트워크에서 나타나는 채널 이질성과 성능 이상 문제를 고려하여 전체 네트워크 성능을 향상시키는 HACA 알고리즘을 제안하였다. HACA 알고리즘은 채널 이질성을 활용하기 위해 각 채널의 처리율을 기존 성능 측정 모델을 통해 계산하고, 이를 바탕으로 채널을 선택 및 할당하였다. 또한, 성능 이상 문제를 완화하기 위해 높은 전송률 링크들과 낮은 전송률 링크들을 다른 채널에 할당하여 분리시켰다. NS-2 시뮬레이션을 사용하여 제안하는 HACA 알고리즘의 성능을 성능 이상 문제를 완화하기 위해 제안된 기존 채널 할당 기법들과 비교하였으며, HACA 알고리즘이 보다 나은 성능을 나타내고, 성능 이상 문제를 효과적으로 완화를 입증하였다. 향후 연구 계획으로는 다중 홉 네트워크를 위해 제안한 HACA 알고리즘을 확장하여 설계할 계획이다.

### 참 고 문 헌

[1] IEEE 802.11-2007, "IEEE Standard - Part 11:

Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications," Jun. 2007

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

[3] A. Dhananjay, H. Zhang, J. Li, and L. Subramanian, "Practical, Distributed Channel Assignment and Routing in Dual-radio Mesh Networks," Proc. ACM SIGCOM, 2009

[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 Trans. 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 Trans. Wireless Comm., vol. 6, no. 12, pp 4432-4440, Dec. 2007

[6] A.P. Subramanian, J. Cao, C. Sung, and S.R. Das, "Understanding Channel and Interface Heterogeneity in Multi-channel Multi-radio Wireless Mesh Networks," Proc. PAM, 2009

[7] H. Rahul, F. Edalat, D. Katabi, and C. Sodini, "Frequency-Aware Rate Adaptation and MAC Protocols," Proc. ACM MOBICOM, 2009.

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

[9] D.Y. Yang, T.J. Lee, K.H. Jang, J.B. Chang, and S. Choi, "Performance Enhancement of Multirate IEEE 802.11 WLANs with Geographically Scattered Stations," IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 5, no. 7, pp. 906-919, Jul. 2006

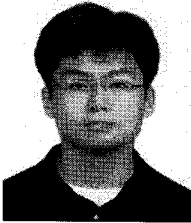
[10] P. Bahl, R. Chandra, P. Lee, V. Misra, J. Padhye, D. Rubenstein, and Y. Yu, "Opportunistic Use of Client Repeaters to Improve Performance of WLANs, IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 17, no. 4, pp. 1160-1171, Aug. 2009

[11] 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

- [12] 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
- [13] M. Genetzakis and V.A. Siris, "A Contention-Aware Routing Metric for Multi-Rate Multi-Radio Mesh Networks," Proc. IEEE SECON 2008
- [14] NS Official Website, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [15] Cisco Aironet, <http://www.cisco.com/>

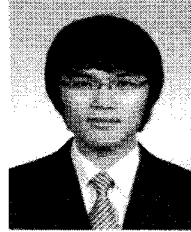
김 석 형 (Sok-Hyong Kim) 정회원



2005년 2월 한국항공대학교  
정보통신공학과 학사  
2007년 2월 포항공과대학교  
정보통신공학과 석사  
2011년 8월 포항공과대학교  
컴퓨터공학과 박사  
2011년 9월~현재 삼성전자 연  
구원

<관심분야> 무선 메쉬 네트워크, 무선랜, 무선 네트  
워크

김 동 욱 (Dong-Wook Kim) 정회원



2005년 2월 경북대학교 컴퓨터  
공학과 학사  
2005년 3월~현재 포항공과대학  
교 컴퓨터 공학과 통합과정  
<관심분야> 무선랜, 무선 메쉬  
네트워크, 무선 네트워크,  
애드혹 네트워크

서 영 주 (Young-Joo Suh) 중신회원



1985년 2월 한양대학교 전자공  
학과 학사  
1987년 2월 한양대학교 전자공  
학과 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 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수  
<관심분야> 무선랜 프로토콜, 이동 IP, 이동 멀티캐  
스트, ad-hoc/sensor 네트워크, 차세대 이동 네트  
워크