

# 임의의 토폴로지를 갖는 OFDMA 다중홉 셀룰러 네트워크의 하향링크 간섭 완화를 위한 채널 할당 방법

임 성 국\*, 이 재 용<sup>o</sup>

## Interference Aware Downlink Channel Allocation Algorithm to Improve Throughput on OFDMA Cellular Multihop Networks with Random Topology

Sunggook Lim\*, Jaiyong Lee<sup>o</sup>

요 약

LTE-advanced와 IEEE 802.16m과 같은 차세대 셀룰러 네트워크는 중계기를 이용하여 적은 비용으로 높은 전송률을 제공하며 음영지역을 해소한다. 하지만 중계기에 의해 좁아진 셀 간격 때문에 셀 간 간섭은 심화되며, 특히 OFDMA를 사용하는 셀룰러 네트워크의 하향 액세스 링크(access link)는 많은 양의 데이터를 기지국이나 중계기가 동시에 사용자 단말에게 전송하기 때문에 간섭에 의한 성능저하가 심각하다. 이를 해결하기 위한 기존의 연구는 중계기의 분포를 대칭적으로 가정하였기에 실제 네트워크에 적용하는 것은 불가능하였다. 본 논문에서는 임의의 위치에 설치된 다수의 중계기를 이용하는 다중홉 셀룰러 네트워크에서 셀 간의 간섭을 완화하기 위한 채널 할당방안을 제안하여 신호대간섭잡음비(Signal to Interference plus Noise Ratio)를 높이고, 전력 제어에 필요한 제어 메시지의 수를 감소시켜 네트워크의 데이터 전송률을 높이고자 한다.

**Key Words** : Multihop cellular network, OFDMA, Channel allocation, Interference mitigation, Relay

ABSTRACT

Upcoming cellular networks such as LTE-advanced and IEEE 802.16m are enhanced by relay stations to support high data rate multimedia services and minimize the shadow zone with low cost. Enhancing the relay stations, however, divides the multihop cellular network into smaller microcells and the distance between microcells is closer, which intends large intra-cell and inter-cell interference. Especially the access link on downlink in the OFDMA cellular network is the throughput bottleneck due to the severe interference caused by base stations and relay stations transmitting large data to mobile stations simultaneously. In this paper, we present interference aware channel allocation algorithm to avoid severe interference on multihop cellular networks with random topology. Proposed algorithm increases SINR(signal to interference plus noise ratio) and decreases number of required control messages for channel allocation, so that increases overall throughput on the networks.

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음.[13-911-05-002, 다양한 IoT 서비스를 위한 액세스 네트워크 제어 기술]

• First Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, big92style@yonsei.ac.kr, 정희원

o Corresponding Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jy1@yonsei.ac.kr, 종신희원

논문번호 : KICS2014-11-455, Received November 19, 2014; Revised December 9, 2014; Accepted December 9, 2015

## 1. 서 론

LTE-advanced나 IEEE 802.16m과 같은 차세대 셀룰러 네트워크 및 현재 망구축이 활발한 LTE는 펠토셀이나 중계기를 사용하는 마이크로셀을 이용하여 적은 비용으로 고품질 멀티미디어 서비스를 제공하려 하고 있다. 특히 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)와 결합된 펠토 및 마이크로셀 네트워크는 유동적인 무선 자원 관리가 가능하다는 점에서 크게 주목받고 있으며 많은 연구가 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

다양한 방식의 무선 통신의 수요가 폭증함에 따라 현재 서비스를 제공하고 있는 이중망간의 라이선스 주파수 할당 문제가 중요한 문제로 부상하고 있으며, 따라서 좁은 주파수 대역을 최대한 효율적으로 사용하여 스펙트럼 효율을 향상시키는 것이 중요한 연구 분야 중 하나로 연구되고 있다.

주파수 재사용은 한정된 자원을 갖는 셀룰러 네트워크에서 스펙트럼 효율을 향상시키기 위해 필수적인 기술이다<sup>2)</sup>. 서로 멀리 떨어져 있는 기지국 간에는 거리로 인한 신호 세기 감쇠로 인해 동일한 주파수 대역을 사용해도 간섭의 영향이 적다. 이러한 주파수 재사용의 원리는 기존의 단일홉 셀룰러 네트워크를 위한 연구로 제안되었으나, 근래에는 다중홉 셀룰러 네트워크에도 주파수 재사용 기술을 적용시키려는 연구들이 진행되고 있다<sup>2-4,8)</sup>. 그림 1은 가운데 위치한 기지국을 중심으로 대칭적으로 분포하는 6개의 중계기를 고려한 대표적인 주파수 재사용 방안들이다. 같은 패턴무늬를 갖는 지역은 동일한 주파수를 사용하는 것을 의미하며, 스펙트럼 효율 측면에서는 그림 1 (c)와 같이 모든 주파수 대역을 기지국과 중계기들이 동시에 사용하는 것이 좋으나 간섭의 심화로 인해 마이크로셀 간의 경계에서 성능 열화가 발생한다. 각각의 중계기들이 서로 다른 주파수를 사용하면 간섭의 영향은 없으나, 스펙트럼 효율이 급격히 감소한다. 일반적으로 중계기는 사용자의 요청이나 자발적인 구매로 인해 임의의 위치에 설치될 수 있는 특성이 있다. 그러나

기존의 연구들은 소수의 중계기들이 균등하게 분포된 토폴로지만을 고려하여 주파수 재사용 패턴을 제안하였기 때문에 현실적으로 적용하기에는 불가능하다. 따라서 임의의 토폴로지를 갖는 중계기들의 주파수 재사용 방안이 새롭게 연구될 필요가 있다.

임의의 토폴로지를 갖는 다중홉 셀룰러 네트워크에서 각각의 기지국 및 중계기는 좁은 대역폭으로 이루어진 다수의 OFDMA 채널을 모두 사용할 수 있다. 이때 기지국이나 중계기가 직접 사용자 단말에 신호를 송출하는 OFDMA 하향 액세스 링크는 특히 간섭에 의한 성능 열화가 심각하다. 그 이유는 많은 양의 데이터를 기지국이나 중계기가 OFDMA 하향링크 프레임 구간동안 모든 채널을 사용하여 사용자 단말에게 동시에 전송하기 때문이다. 같은 채널은 동일 주파수를 사용하므로 전송 신호가 집중되는 하향 액세스 링크는 모든 기지국 및 중계기들은 상호간에 간섭을 받게 되고 이는 신호대간섭잡음비 감소 및 데이터 전송률의 감소를 야기한다.

기존에 연구되었던 중계기 간의 간섭을 제어하기 위한 자원 할당방법은 기본적으로 모든 중계기들이 시스템의 전체 주파수 대역을 할당받은 것을 가정하고 있다<sup>7,9-11)</sup>. 따라서 각각의 중계기가 분산 처리 방식으로 시스템 최적화 문제를 풀기 위해서는 모든 중계기가 상호간 채널 상태에 대한 정보를 교환해야 하며 이는 중계기의 수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어난다.

본 논문에서는 중계기간의 정보 교환량을 크게 감소시키면서 트래픽 품질의 최소 요구사항을 만족하도록 간섭을 제어하면서도 상대적으로 높은 스펙트럼 효율로 데이터 전송률을 높이는 채널 할당 방법을 제안한다. 또한 임의의 토폴로지에 적용이 가능하며 간섭 신호의 집중을 분산시켜 신호대간섭잡음비를 높이고자 한다. 임의의 토폴로지에서 셀 내 간섭만을 고려한 기존 주파수 재사용 방안<sup>6)</sup>과는 다르게 셀 간 간섭도 동시에 고려하기 때문에 제안하는 방법은 간섭완화에 더욱 효과적이다. 제안하는 채널 할당 방법은 두 단계로 이루어져 있다. 먼저 기지국 셀 내의 중계기 간의 간섭을 줄이기 위해 주파수 재사용이 가능한 중계기들의 집합을 산출하고 각각의 집합에 채널을 할당한다. 그 후 인접셀 간의 간섭을 완화하기 위해 기지국은 심각한 간섭이 발생하는 채널을 간섭이 적은 다른 채널로 스위칭 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 알고리즘이 고려하고 있는 시스템 모델에 대해 기술하고, III장에서는 간섭 완화를 위한 OFDMA 채널

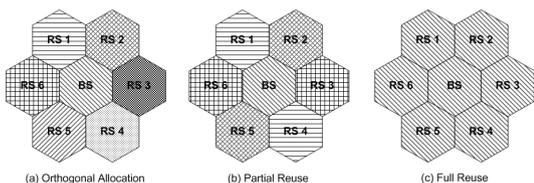


그림 1. 기존에 연구된 주파수 재사용 방안<sup>14)</sup>  
 Fig. 1. Conventional frequency reuse schemes<sup>14)</sup>

할당 방법을 제시하고 기지국 셀 내 간섭 완화와 기지국 인접셀 간 간섭 완화 과정을 각각 나누어서 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 모든 채널을 동시 사용한 경우와 성능비교를 하며, 평균 프레임 점유율과 데이터 전송률과의 비교를 통해 제안한 알고리즘의 성능향상을 입증한다. 마지막으로 V장에서는 결론과 향후 연구과제에 대해 서술한다.

## II. 시스템 모델

OFDMA 프레임은 시간 단위인 심볼들과 주파수 단위인 채널들로 이루어져있다. 따라서 주파수 재활용 문제는 채널을 중복하여 중계기들에게 할당하는 문제로 치환하여 생각할 수 있다. 상향링크와 하향링크는 거의 유사한 구조의 프레임을 사용하며 각각의 프레임은 시간 축을 기준으로 액세스 구역(access zone)과 릴레이 구역(relay zone)으로 나뉘어져 있다<sup>5)</sup>. 액세스 구역은 기지국이나 중계기가 사용자 단말과 통신하는 구간이고, 릴레이 구역은 중계기간이나 기지국과 중계기간의 통신이 이루어지는 구간이다.

중계기가 도입된 다중홉 셀룰러 네트워크는 중계기에 의해 서비스가 제공되는 마이크로셀과 기존의 기지국이 관장하는 셀이 혼재하게 된다. 기지국 셀은 상대적으로 마이크로셀보다 커버리지가 넓으며 하나의 기지국 셀 내에는 다수의 마이크로셀이 존재한다. 본 논문에서는 표기의 편의성을 위해 이후로부터 셀을 하나의 기지국에 의해 관리되며 다수의 중계기가 포함된 기지국 셀로 정의한다. 그림 2는 7개의 셀로 이루어진 임의의 셀룰러 네트워크 토폴로지의 예다. 셀 중앙에 위치한 기지국은 자신이 관리하는 셀 내의 모든 중계기들의 하향링크 채널 할당에 관여하며, 각각의 중계기들은 임의의 위치에 설치될 수 있다.

심각한 간섭을 완화하며 스펙트럼 효율 향상을 위해 주파수 재활용까지 고려하는 하향 채널 할당이 본 논문의 목적이기 때문에 특정 채널을 할당받은 중계기는 해당 채널의 모든 심볼을 사용한다고 가정한다. 설치가 자유로운 이동형(mobile) 중계기나 노매딕(nomadic) 중계기는 차량이나 가정에 쉽게 보급하기 위해 낮은 가격과 단순한 구조로 생산해야 하므로 각각의 중계기는 무지향성의 단일안테나를 장착하고 있다고 가정하며, 기지국으로부터 할당받은 채널만을 사용하는 decode-and-forward (DF) 중계기로 정의한다.

경로 손실 모델은 로그노멀(lognormal) 페이딩 모델을 사용하며 식 (1)과 같은 경로 손실 모델로 정의된다.

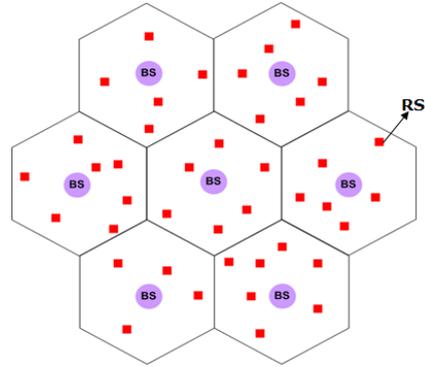


그림 2. 임의의 토폴로지를 갖는 셀룰러 네트워크  
Fig. 2. Example of random topology in cellular networks

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \log(d/d_0) + X_r \quad (1)$$

$\alpha$ 는 경로 손실 계수로 빌딩이 많은 도심지역에서는 3~4의 값을 갖고,  $X_r$ 는 쉐도잉 효과(shadowing effect)를 나타내는 파라미터이다.  $d_0$ 는 기준거리이고  $d$ 는 통신 링크의 거리로서 실제 통신 링크 거리와 기준 거리와의 비율을 고려해 신호감쇠의 양을 계산한다. 또한 일반적으로 중계기와 중계기간의 거리가 사용자 단말과 중계기간의 거리보다 훨씬 멀기 때문에 사용자 단말에서 측정된 특정 중계기로부터 오는 간섭의 세기와 해당 사용자 단말을 관리하는 중계기에서 측정된 간섭의 세기가 동일하다고 가정한다. 이는 또 다른 연구 분야인 채널 추정 기법의 범주에 속하므로 본 논문에서는 간략화 한다.

## III. 간섭 완화를 위한 채널 할당 방법

제안하는 중계기간의 간섭 완화를 위한 채널 할당 방법은 두 가지 단계로 이루어져 있다. 먼저 각각의 기지국은 자신의 셀 내 중계기들의 간섭 정보를 수집하여 서로간의 간섭이 미리 정한 수준을 넘지 않는 범위 내에서 채널을 중복해서 사용할 수 있도록 각 중계기에 채널 할당을 해주며, 이 알고리즘을 Random-topology Frequency Reuse(RFR)라고 명칭 한다. 셀 내 간섭을 해결한 후에도 여전히 인접셀 간의 간섭은 존재 할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 인접셀 기지국과 정보 교환을 통해 인접셀 간섭이 심한 특정 채널을 상대적으로 간섭이 적은 채널과 교환하며, 이 알고리즘은 채널 스위칭(Channel Switching)이라고 명칭 한다. 이러한 단계를 모두 거치면 셀 내 간섭 및 인접셀 간 간섭으로 모두 완화시키는 중계기 채널 할당이

완료된다.

할당된 채널은 하향 링크의 데이터 전송을 위한 채널이기 때문에 OFDMA 프레임의 프리앰블(preamble)이나 컨트롤 채널 등은 항상 송수신이 가능하다. 따라서 새로운 중계기가 네트워크에 설치되면 기지국과 중계기가 동기 및 기타 무선환경 파라미터를 맞추기 위해 수행하는 레인징 절차에 따라 필요한 채널을 할당받을 수 있고, 주기적 레인징에는 모든 중계기들이 동시에 참여해야 하므로 이러한 레이징 주기마다 제안하는 간섭 완화 방안을 수행한다. 그러나 새로운 중계기가 설치되지 않거나 기존의 중계기가 제거되지 않는 등 토폴로지의 변화가 없을 경우에는 제안하는 간섭 완화 방안을 수행하지 않아도 된다.

### 3.1 셀 내 간섭 완화 채널 할당 (RFR)

셀 내 간섭 제어를 위해서는 중계기들이 신호를 발생시킬 때 서로 간에 미치는 간섭의 양을 알아야 한다. 그러나 모든 중계기들이 받는 간섭의 양을 수집하기 위해서는 필요로 하는 정보의 양이 지나치게 크다. 따라서 모든 간섭 정보를 기지국에 전송하는 것 보다 간섭이 심한 중계기의 식별자만 전송하는 것이 제어 메시지의 트래픽 부하를 줄이게 된다. 이를 위해 각 중계기는 파일럿 신호를 통해 다른 중계기들로부터 발생하는 신호의 세기를 측정할 수 있다. 모바일 와이맥스(IEEE 802.16e, 802.16j)<sup>[5]</sup>와 같은 경우 초기 레인징 절차를 수행할 때 경쟁기반(contention based) 채널접근 방법을 사용하므로, 레인징 구간에서는 모든 중계기들이 다른 중계기로부터 오는 신호들도 수신하여 특정 중계기로부터의 수신신호세기 정보를 획득할 수 있다. 이는 주기적인 레인징 절차에도 적용 가능하기 때문에 주기적인 정보 갱신이 가능하다. 본 논문에서 제안한 채널 할당 방법의 목적은 간섭의 영향을 상대적으로 적게 받는 중계기들 간에 주파수를 재활용할 수 있게 함으로써 사용자 단말이 겪는 간섭을 완화시키고 데이터 전송률 높이는 것이다. 중계기들은 상호간에 제어 채널(control channel)을 이용한 파일럿 신호의 송수신을 통해서 무선채널의 품질을 측정할 수 있으며, 다수의 데이터 채널을 이용하는 것이 아닌 하나의 제어 채널을 이용하여 채널의 품질을 측정하는 것이 효율적이다. 그러나 이렇게 측정된 값은 실제 데이터 채널의 품질과는 차이가 있을 수 있는데 이러한 오차는 기존에 연구된 다른 전력제어 방안들을 통해서 보정할 수 있다.

이렇게 수집한 수신신호세기 정보를 이용하여 각 중계기는 심각한 간섭을 받는 중계기들의 목록인 간

```

Qi = List of RSs who are intereferers to RSi
do  $\forall RS\ i$ 
{
     $I_{RSi} \leftarrow \{RS\ x \mid \arg \max_{RS\ x \in Q_i} SNR_{RSx}^{RSi}\}$ 
    delete RS x from Qi
} while (  $\sum_{m \in Q_i} g_{mi} P_m^{max} \geq \frac{g_{ii} P_i^{max}}{\gamma_i^0} - N_0$  )
    
```

그림 3. 간섭리스트 생성 알고리즘  
Fig. 3. Interference list building algorithm

섭리스트를 그림 3과 같이 생성한다. 중계기 *i*의 외부로부터 수신신호가 잡히는 모든 중계기의 식별자를 *Q<sub>i</sub>*라고 할 때, 중계기 *i*는 *Q<sub>i</sub>*에 속하는 중계기중 수신신호세기가 가장 큰 중계기 식별자 *x*를 간섭리스트 *I<sub>RSi</sub>*에 저장한다. 이때 중계기 *i*와 같은 기지국 셀에 있지 않아도 신호가 검출되는 모든 중계기들에 대해 위 과정을 수행하기 때문에 *Q<sub>i</sub>*에는 다른 셀의 중계기도 포함된다. 그리고 *Q<sub>i</sub>*에서 중계기 *x*의 식별자를 제거한다. *Q<sub>i</sub>*에 남은 중계기들로부터의 모든 수신신호세기를 더하여 그것이 특정 간섭 한계점(threshold)보다 작아질 때 까지 간섭리스트에 중계기 식별자를 추가하는 것을 계속한다. 여기서 *g<sub>mi</sub>*는 중계기 *m*으로부터 중계기 *i*로의 채널 이득이고, *P<sub>m</sub><sup>max</sup>*는 중계기 *m*의 최대송신전력으로 일반적으로 파일럿 신호는 최대송신전력으로 전송한다. *g<sub>ii</sub>*는 중계기 *i*로부터 사용자 단말들간의 채널의 평균 이득으로, 이것은 사용자 단말들로부터 수신되는 채널상태정보(CQI:channel quality indication)를 평균하여 구할 수 있고, *N<sub>0</sub>*는 잡음인자이다. 간섭 한계점은 중계기 *i*가 허용할 수 있는 최대 간섭의 양을 의미하는데 이것은 운영하고자 하는 네트워크 사양서에 명시되어 있는 최소 요구 신호대간섭잡음비  $\gamma_i^0$ 의 정의인 수식 (2)로부터 구해진다.

$$\gamma_i^0 \leq \frac{g_{ii} P_i^{max}}{\sum_{m \in Q_i} g_{mi} P_m^{max} + N_0} \quad (2)$$

수식 (2)를 간섭의 합인  $\sum_{m \in Q_i} g_{mi} P_m^{max}$ 로 정리하면 간섭 한계점  $(g_{ii} P_i^{max} / \gamma_i^0) - N_0$ 를 유도할 수 있다. 따라서 중계기 *i*는 간섭 한계점을 넘지 않도록 하는 중계기들과는 주파수 재활용이 가능하므로 동일한 채널

을 할당받아도 무방하며, 이러한 중계기들은 동일 셀에 속한 전체 중계기 식별자 중에서  $I_{RSi}$ 를 제외하면 알 수 있다. 이때 중계기  $i$ 는  $I_{RSi}$ 에 속한 중계기들과 심각한 간섭 (severe interference) 관계에 있다고 정의한다. 간섭리스트에는 동일 셀에 속하지 않은 외부 셀의 중계기 식별자도 포함될 수 있으나, 셀 내 간섭 완화 단계에서는 고려하지 않고, 이후 수행 될 셀 간 간섭 완화 단계에서 처리하게 된다.

간섭리스트의 작성이 끝나면 각 중계기는 이를 기지국으로 전송한다. 간섭리스트는 상향 링크를 사용해서 전송하기 때문에 사용자가 수신하는 하향 링크의 데이터 전송률에는 큰 영향을 미치지 않는다. 자신이 관리하는 모든 중계기로부터 간섭리스트를 수신한 기지국은 주파수 재활용 테이블을 만든다. 그림 4는 RFR 알고리즘의 예로, 주파수 재활용 테이블을 이용한 채널 할당 방법을 나타내고 있다. 토폴로지 (a)를 보면 중계기 1은 인접한 중계기 2, 3과 심각한 간섭을 주고받으며 이때 간섭리스트는  $I_{RS1} = \{2,3\}$ 가 된다. 이와 마찬가지로 중계기 4의 간섭리스트는  $I_{RS4} = \{2\}$ 이다. 이러한 중계기들의 간섭리스트를 수집한 기지국은 그림 4(b)와 같은 주파수 재활용 테이블을 만든다. 테이블의 1은 해당 중계기 짝이 서로 주파수 재활용이 가능함을 나타내고 있으며, 이것은 해당 기지국이 관리하는 셀에 속한 전체 중계기 식별자 중에서 간섭리스트들을 제외하면 구할 수 있다. 주파수 재활용 테이블은 항상 대각화성질(diagonality)을 유지할 필요가 있기 때문에 테이블의 lower triangle과 upper triangle을 원소곱하여 대각화를 유지한다. 이후 주파수 재활용 테이블의 upper triangle중 원소가 1

인 행과 열의 식별자를 갖는 중계기들에게 같은 채널을 할당함으로써 그림 4(c)와 같이 최종적인 채널 할당이 이루어진다. 이렇게 할당된 채널은 간섭리스트를 만족하지 않는 중계기들만 통신하게 되므로 중계기가 모든 채널을 할당받는 방법과는 다르게 항상 최소 신호대간섭잡음비 요구사항을 만족시킬 수 있게 되면서, 하나의 중계기에 하나의 채널을 할당하는 직교할당방법보다 높은 주파수 재활용 비율을 갖기 때문에 스펙트럼 효율 또한 높아진다.

### 3.2 셀 간 간섭 완화 채널 할당 (Channel switching)

제안하는 셀 내 간섭 완화 채널 할당은 기지국 셀 내부의 중계기 간의 간섭은 완화시키지만 인접셀과의 간섭은 고려하지 않는다. 따라서 셀 내 간섭 완화가 이루어진 후에는 인접셀 간의 간섭 또한 고려하여 채널을 할당해야 실제 중계기들에 의해 서비스를 제공받는 사용자 단말에 도달하는 간섭이 완화된다.

셀 간의 간섭을 완화하기 위하여 각각의 기지국들은 자신의 이웃 기지국들과 채널 할당정보를 공유한다. 일반적으로 기지국은 유선으로 연결된 백본망에 의해 서로 연결되어 있기 때문에 채널 할당정보를 공유할 때 추가적인 무선자원을 사용하지 않는다. 이러한 과정이 끝나면 그림 5의 예에서 보듯 기지국 1은 인접 기지국 2의 각 채널에 할당된 중계기들의 식별자를 모두 알게 된다. 이를 자신이 가지고 있는 각 중계기들의 간섭리스트와 비교하여 심화 된 간섭이 발생하는지를 검사한다. 이때 간섭리스트의 중계기 식별자는 외부셀에 위치한 중계기들만을 고려한다. 심화된 셀 간 간섭이 발생하는 모든 기지국들은 상호 독립적으로 아래와 같은 채널 스위칭을 수행하여 간섭을 완화하며 이는 분산처리방식으로 이루어진다. 그림 5(a)에서 기지국 1의 중계기 3의 간섭리스트에 기지국 2의 중계기 14가 포함되어 있으며 세 번째 채널을 두 중계기가 동일하게 할당 받은 것을 알 수 있다. 세 번째 채널에서 발생하는 심각한 간섭을 완화하기 위해 기지국 1은 중계기 3과 중계기 4에 할당된 채널을 그림 5(b)와 같이 간섭리스트에 위배되지 않는 다른 채널로 스위칭 해주게 된다. 채널 스위칭 기법을 구현하기 위해 그래프 이론의 k-coloring problem을 사용한다. K-coloring problem은 그래프  $G=(E,V)$ 의 각 꼭짓점( $V$ :vertex)에  $k$ 개의 색을 부여하는 방법으로, 모서리( $E$ :edge)에 의해 서로 연결된 두 꼭짓점은 반드시 다른 색을 부여받도록 하는 알고리즘이다. 채널 스위칭을 수행하는 기지국은 그래프  $G=(E,V)$ 의 꼭짓점을

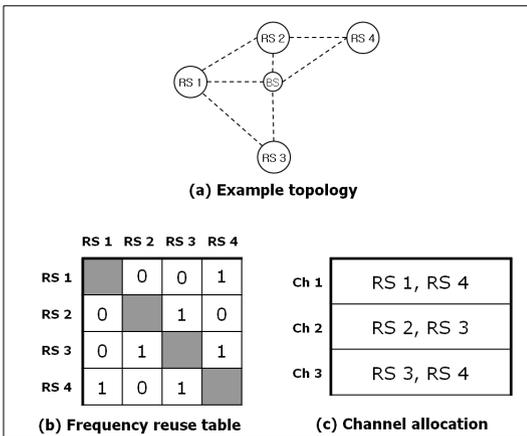


그림 4. 셀 내 중계기 간섭을 고려한 채널 할당 방법  
Fig. 4. Channel allocation scheme for inter-cell interference

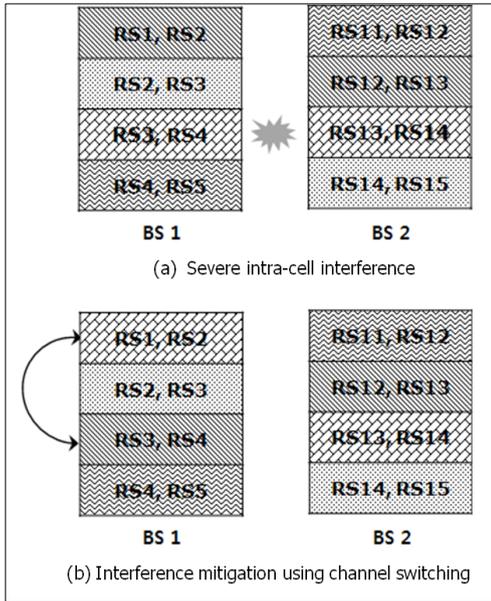


그림 5. 셀 간 간섭을 완화하기 위한 방법 ( $I_{RS3} = \{1,5,14\}$ 인 경우)  
 Fig. 5. Intra-cell interference mitigation scheme (in case of  $I_{RS3} = \{1,5,14\}$ )

각 채널에 할당된 중계기 짝으로 정의하고, 각 꼭짓점 간에 심각한 간섭이 인지되면 모서리로 연결한다. 각 꼭짓점에는 할당된 채널에 맞는 고유한 색을 부여한다. 기지국은 인접셀의 채널 할당 정보를 이용하여 자신과 연결된 모든 꼭짓점에 대해 이러한 그래프를 그리게 된다. 이후 인접셀과 연결된 모서리를 검토하여, 각 모서리에 의해 연결된 두 꼭짓점이 같은 색을 부여 받았으면 k-coloring problem을 통하여 자신의 꼭짓점의 색을 다시 설정한다. K-coloring problem의 솔루션은 다양하지만 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 제안한다. 모서리가 가장 많이 연결된 꼭짓점 순으로 색을 부여하되 연결된 꼭짓점 중 인접셀에 속한 다른 꼭짓점의 색과는 다른 색을 임의로 할당한다. 이 과정을 모든 꼭짓점에 색이 할당될 때까지 수행하며, 제안하는 셀 간 간섭 완화 채널 할당 방법은 인접셀의 채널 할당은 수정하지 않고, 심각한 간섭을 인지한 하나의 기지국에서만 수행하기 때문에 네트워크 전체적인 관점에서는 분산 알고리즘(distributed algorithm)이라고 볼 수 있다. 이렇게 수정된 채널할당은 단일 홉으로 인접한 셀에만 큰 영향을 주기 때문에 3~4회의 반복적인 인접셀 간 간섭 완화 과정을 거치면 대부분 수렴하는 결과를 보인다.

### 3.3 전력 제어

하향 액세스 링크를 위한 채널 할당이 끝난 후, 각 중계기들은 전력 제어 알고리즘을 통해 사용자 단말에 전달되는 OFDMA 프레임의 각 채널의 전력 세기를 조절한다. 이때 각 중계기들은 액세스 링크를 위해 할당받은 채널의 수가 다르기 때문에 중계기에 의해 생성되는 OFDMA 프레임의 액세스 구간의 점유율도 각각 다르다. 모든 채널을 할당받은 중계기의 경우 점유율은 1이 된다. 그러나 송신전력을 다수의 채널에 분배해야 하므로 점유율이 낮은 중계기보다는 채널당 평균 송신전력이 낮다. 간섭의 영향을 예측하여 최적화된 전력 제어가 가능하다면 추가적인 성능의 이득을 얻을 수 있겠으나 전력 제어는 본 논문의 주제에서 벗어나므로, 여기서는 각 채널에 동일한 전력을 할당하는 것으로 가정한다.

## IV. 성능평가

제안한 간섭 완화 채널 할당 방법의 성능 평가를 위해 matlab을 이용한 모의실험을 수행하였으며 무선 채널환경 및 OFDMA 파라미터들은 모바일 와이맥스 표준<sup>5,14)</sup>을 참고하였다. 실험에 사용된 변수들과 값은 표 1에 정리되어있다. 중앙에 하나의 기지국이 위치하고 인접 기지국 6개가 육각셀을 유지하며 주변에 분포하고 있다. 각각의 기지국은 모두 셀 내 간섭 완화 채널 할당을 수행하며, 셀 간 간섭 완화 채널 할당은 중앙에 위치한 기지국만 독립적으로 수행하고 성능 평가를 위한 파라미터들은 중앙에 위치한 기지국에서 측정되었다. 각 기지국 셀 내에 설치된 평균 중계기의 수를 10개에서 30개로 증가시키며 성능평가를 수행하였으며, 셀 내에서 각 중계기의 위치는 균등 확률 분

표 1. 모의실험 환경  
 Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value	
Max. Tx. power of BS and RS	30dBm	
Number of BSs	7	
Average number of RSs per BS	10~30	
Number of OFDMA subchannels	30	
Bandwidth of each channel	25kHz	
Cell coverage	2Km	
Min. required SINR	-3.46dB	
Wireless channel model	Log-normal fading	
	$\alpha$	3.6
	$\sigma$	8

포를 갖는다. 무선 채널은 로그노멀 페이딩 무선 채널 모델을 사용하였다. 성능을 평가할 알고리즘들은 모든 중계기에 전 채널을 할당하는 full-allocation 방법과 제안하는 셀 내 간섭 완화 채널 할당만 하였을 경우 (RFR only), 셀 간 간섭 완화 채널 할당까지 모두 한 경우(RFR & Channel switching)이다.

효과적인 전력제어를 위해 중계기간에 교환해야 하는 제어 메시지의 양은 그림 6에 나타나 있다. 전력제어를 위해 중계기는 자신에게 실제 간섭을 주는 다른 중계기의 간섭 신호 세기만 측정하면 된다. 이때 간섭 세기 측정의 이유는 중계기에서 최적화된 전력제어를 하기 위해 간섭을 받는 모든 중계기들과의 채널 이득 및 각 중계기들의 송신 전력의 크기를 알아야 하기 때문이다<sup>[13]</sup>. 그 외 중계기와는 주파수 재활용을 통해 채널을 같이 쓰지 않을 것이기 때문에 간섭 정보를 체크할 필요가 없다.

따라서 기존의 셀룰러 네트워크에서는 중계기들과 간섭정보를 주고받기 위해 128bit의 IPv6 주소와 간섭 크기정보를 위한 96bit가 모든 중계기의 수 만큼 필요하지만, 제안하는 방법을 사용하면 주파수 재활용 가능한 중계기들 간에 간섭크기정보를 제외한 128bit의 IPv6 주소와 24bit의 중계기 식별자만 주고 받으면 된다. 그림 6에서 보듯 제어 메시지의 양은 제안하는 방법에 의해 감소하며, 감소 효과는 중계기의 수가 증가할수록 더 커짐을 알 수 있다.

그림 7은 20개의 중계기가 각 셀에 설치되었을 때 누적 신호대간섭잡음비(cumulative SINR)를 그린 것으로, 제안하는 방법이 간섭을 완화시켜 높은 신호대간섭잡음비를 얻는 것을 확인할 수 있다. 또한 RFR만을 사용하였을 때도 높은 개선효과를 볼 수 있어서 셀 간 간섭보다 셀 내 간섭의 영향이 상대적으로 큰 것을

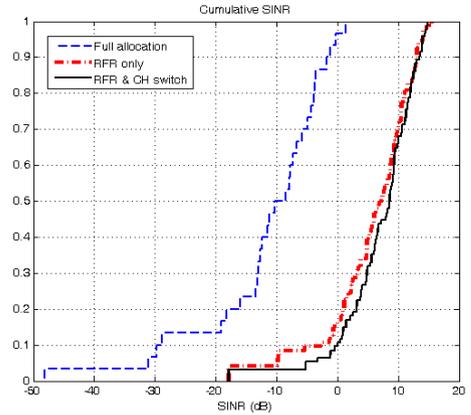


그림 7. 누적 신호대간섭잡음비 (중계기 20개)  
Fig. 7. Cumulative SINR (Number of RSs is 20)

확인할 수 있다. 셀 내 간섭제어는 자주 수행하고 셀 간 간섭제어는 상대적으로 낮은 빈도로 수행해도 어느 정도 성능개선이 이루어질 것으로 예측된다.

전체 OFDMA 채널 수 대비 중계기가 할당받은 채널의 수를 통해 각 중계기가 하향링크 OFDMA 프레임의 액세스 구간에서 점유하고 있는 비율을 알 수 있다. 그림 8에서 full-allocation의 경우 전 대역을 각 중계기에 할당했기 때문에 항상 점유율 1을 갖는다. 그러나 제안한 채널 할당 알고리즘을 사용할 경우 중계기 수가 증가할수록 각 중계기의 평균 점유율은 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 중계기의 밀도가 높아질수록 심각한 간섭을 겪을 확률도 증가하고 따라서 주파수 재활용을 하는 경우가 적기 때문이다. 일반적으로 프레임 점유율이 낮으면 데이터 전송률도 낮으나, 그림 7에서 확인했듯이 높은 신호대간섭잡음비를 통해 낮은 점유율에 대한 보상이 가능하다.

그림 9는 중계기들이 최대 송신 전력을 할당 받은

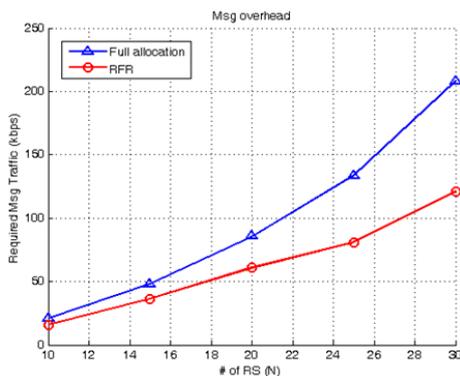


그림 6. 중계기간에 교환하는 제어 메시지의 양  
Fig. 6. Amount of control messages among RSs

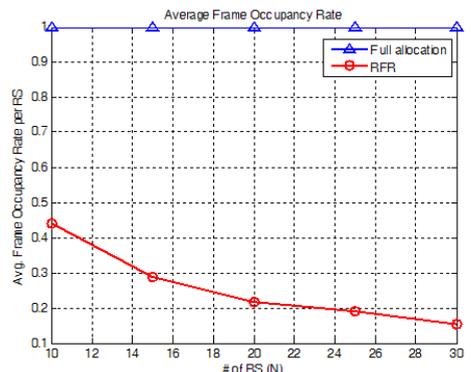


그림 8. 평균 OFDMA 프레임 점유율  
Fig. 8. Average OFDMA frame occupancy rate

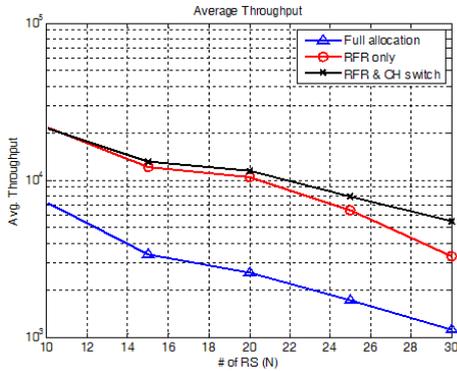


그림 9. 평균 중계기 데이터 전송률  
Fig. 9. Average throughput

채널에 균등하게 나누어 사용할 때 사용자 단말까지의 데이터 전송률을 나타낸 것이다. 할당 받은 채널이 적은 중계기일수록 채널당 송신 전력이 높기 때문에 적은 채널의 단점을 상쇄할 수 있다. 제안하는 채널 할당방안이 낮은 OFDMA 프레임 점유율을 갖지만 평균 중계기 데이터 전송률은 full-allocation보다 높은 값을 보이므로 간섭의 완화가 효과적으로 이루어졌다는 것을 확인 할 수 있다. 중계기의 수가 증가할수록 단위 면적당 중계기 밀도가 증가하기 때문에 간섭의 영향을 더 많이 받고 데이터 전송률도 낮아진다. 특히 중계기가 20개 이상일 경우 채널 스위칭을 사용했을 때가 높은 데이터 전송률을 보여주는데, 이것은 한정된 채널 내에서 중계기 밀도가 높을 경우에는 셀 내 간섭을 완화해도 인접셀에서 심각한 간섭을 받을 확률이 높기 때문이다. 따라서 중계기의 수가 늘어날수록 인접셀 간 간섭을 고려한 채널 할당의 성능 개선 효과가 증가한다.

### V. 결 론

본 논문에서는 임의의 토폴로지를 갖는 중계기가 도입된 다중홉 셀룰러 네트워크에서 중계기간의 간섭을 고려한 채널 할당 방안을 셀 내 간섭 완화 방법과 셀 간 간섭 완화 방법으로 나누어 제안하였다. 기존의 주파수 재활용 방안에 대한 연구들은 대칭형으로 분포된 소수의 중계기만을 고려하였기 때문에 중계기 위치의 임의성이 높은 실제 환경에 적용하기에는 많은 어려움이 따랐다. 제안하는 채널 할당 방안은 한계점 이하로 간섭을 통제하여 신호대간섭잡음비를 높이고, 주파수 재활용이 발생하는 중계기의 범주를 축소하여 전력제어에 필요한 메시지 양을 감소시킨다. 또

한 주파수 재활용 및 신호대간섭잡음비의 향상을 통해 적은 프레임 점유율을 갖으면서도 데이터 전송률 향상을 보장한다. 특히 중계기의 밀도가 높아질수록 셀 간 간섭 완화의 효과가 증가함을 보임으로써, 채널 스위칭 방법이 중계기가 많이 설치되는 도심지역에서 데이터 전송률 향상을 위해 필수적임을 증명하였다.

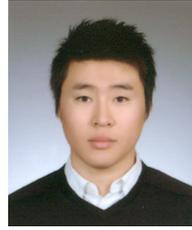
### References

- [1] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wirel. Comm.*, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.
- [2] S. Y. Park, J. Y. Kim, and D. H. Kim, "Decentralized frequency reuse scheme supporting best-effort services in downlink small-cell network," *J. KICS*, vol. 38A, no. 4, pp. 360-370, 2013.
- [3] Y. Kim, W. Lim, and S. Cho, "Interference aware cost effective coverage extension in multihop relay networks," *J. KICS*, vol. 37C, no. 12, pp. 1138-1147, 2012.
- [4] S. Lim, H. Jeon, and J. Lee, "Effective frequency reuse scheme for OFDMA cellular multihop networks for improving cell throughput with low outage ratio," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 1198-1206, 2010.
- [5] IEEE Std 802.16j-2009, Jun. 2009.
- [6] S. Lim and J. Y. Lee, "Interference avoiding radio resource allocation scheme for multi-hop OFDMA cellular networks with random topology," *Int. Conf. Future Generation Commun. Netw.*, pp. 95-103, Dec. 2010.
- [7] Y. Hua, Q. Zhang, and Z. Niu, "Resource allocation in multi-cell OFDMA-based relay networks," *INFOCOM*, pp. 2133-2141, 2010.
- [8] S.-W. Kim, J.-K. Choi, and S.-J. Yoo, "Uplink relaying scheme for efficient frequency usage in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 356-368, 2011.
- [9] T. C. Y. Ng, W. Yu, J. Zhang, and A. Reid, "Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*,

vol. 25, no. 2, pp. 328-339, 2007.

- [10] Y. Zhao, X. Fang, R. Huang, and Y. Fang, "Joint interference coordination and load balancing for OFDMA multihop cellular networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 1, pp. 89-101, Jan. 2014.
- [11] R. Wang, V. K. N. Lau, and Y. Cui, "Decentralized fair scheduling in two-hop relay-assisted cognitive OFDMA systems," *IEEE J. Selected Topics in Signal Process.*, vol. 5, no. 1, pp. 171-181, Feb. 2011.
- [12] M. Rahman and H. Yanikomeroglu, "Enhancing cell-edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 1414-1425, Apr. 2010.
- [13] W. Tao, et al., "Iterative resource allocation for maximizing weighted sum min-rate in downlink cellular OFDMA systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 1, pp. 223-234, Jan. 2011.
- [14] G. Senarath, W. Tong, and P. Zhu, et al., "Multi-hop relay system evaluation methodology (channel model and performance metric)," *IEEE C802.16j-06/013r3*, Feb. 2007.

**임 성 국 (Sungook Lim)**



2005년 2월 : 연세대학교 전자공학과  
2005년 3월~현재 : 연세대학교 석박통합과정  
<관심분야> Interference Management, Power Control, Wireless Multihop Network, Cellular Network

**이 재 용 (Jaiyong Lee)**



1977년 2월 : 연세대학교 전자공학과  
1984년 5월 : IOWA State University 공학석사  
1987년 5월 : IOWA State University 공학박사  
1987년 6월~1994년 8월 : 포항공과대학 교수

1994년 5월~현재 : 연세대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> Protocol Design for Wired/Wireless QoS Management, Ubiquitous Sensor Network, Wireless Multihop Network