

# OFDMA 하향링크에서 적응적 변조와 여러 개의 재사용 지수를 동시에 사용하고 채널 상태를 고려한 동적 셀 코디네이션

정희원 변 대 욱\*, 기 영 민\*, 종신회원 김 동 구\*

## Channel State-Aware Joint Dynamic Cell Coordination Scheme using Adaptive Modulation and Variable Reuse Factor in OFDMA

Dae Wook Byun\*, Young Min Ki\* *Regular Members*, Dong Ku Kim\* *Lifelong Members*

### 요 약

본 논문에서는 OFDMA 다중 셀 하향링크에서 채널 상태를 알고 있을 때 주파수 비 선택적 페이딩과 선택적 페이딩의 경우에 대해 효율적인 부반송파 할당을 위해 적응적 변조와 여러 개의 주파수 재사용 지수를 동시에 고려한 두 개의 서로 다른 동적 셀 코디네이션 기법을 제안한다. 기존의 OFDMA 시스템이 다른 셀들에 의한 간섭으로 인해 시스템 수율이 떨어지는 것에 비해 제안된 시스템은 시스템 수율을 높이고 각 사용자의 QoS(Quality of Service)를 보장하기 위해서 RNC(Radio Network Controller)가 각 부채널에 여러 종류의 재사용 지수를 동적으로 적용하고 각 사용자의 채널 상태와 간섭 정도를 고려해 스케줄링 한다. 비선택적 페이딩 환경에서는 제안된 방법이 기존에 제안된 동적 셀 코디네이션<sup>[8]</sup>에 비해 평균적으로 3배 높은 시스템 수율을 보인다 선택적 페이딩 환경에서는 모든 부채널의 주파수 재사용 지수를 1로 하는 경우에 비해 최대 2.6배 높은 시스템 수율을 보인다

Key Words : Cell Coordination, Frequency Reuse Factor, Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) in Multicell

### ABSTRACT

In this paper, two different dynamic cell coordination strategies for frequency flat and selective fading are proposed for efficient subcarrier allocation in the joint consideration of adaptive modulation and variable frequency reuse in the channel-aware OFDMA downlink multicellular environment. Compared to a conventional OFDMA system without cell coordination, where system throughput may become degraded due to the persistent interference from other cells, the proposed system dynamically allows RNC to apply different reuse factors on each subchannel and scheduling in consideration of channel and interference conditions of individual users so as to increase the system throughput and guarantee QoS of each user. In a frequency flat fading, the dynamic scheme with the proposed scheduling achieves on average three times larger throughput than the conventional dynamic scheme [8]. In a selective fading channel, the proposed schemes showed 2.6 times as large throughput as that of a single reuse factor of one for all subchannels.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0019)

\* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실 (ludiosop@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-10-403, 접수일자 : 2006년 10월 9일, 최종논문접수일자 : 2007년 1월 15일

## I. 서 론

미래의 무선 통신 시스템은 높은 데이터 전송률의 지원, 여러 사용자를 위한 다양한 QoS 보장 등이 요구된다. 이러한 요구를 충족시키기 위한 방법의 하나로써 직교 주파수 분할 다중 접속(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)이 제안되었다.

OFDMA 또는 OFDM 시스템에서 중요한 연구 분야 중에 하나는 어떻게 효율적으로 사용자들에게 부채널을 할당하는가이다 [1][3][4]에서는 다양한 서비스에 대해 여러 가지 전송률을 지원하는 동적 부채널 할당 방법이 제안되었다 하지만 모두 단일 셀 환경만을 고려하였다. 실제 환경은 다중 셀 환경이며, 이러한 환경에서 한 셀이 특정 부채널을 할당할 때 동일한 부채널을 인접 셀에서 사용하게 된다면 인접 셀에 의한 간섭이 발생된다. 따라서 이렇게 인접한 셀간 간섭을 줄이는 것이 중요하며 [5]에서는 이런 셀간의 간섭을 줄이는 방법에 대해 언급하고 있는데, 셀간의 간섭을 피하는 방법이 셀간의 간섭을 평균화하는 것보다 더 좋다는 것을 보이고 있다. 셀간의 간섭을 피하도록 하는 가장 간단한 방법으로 주파수 재사용 지수를 사용하는 방법이 있다. 셀간에 다른 주파수 대역을 사용함으로써 특정 대역에서 들어오는 인접 셀의 간섭효과를 줄일 수 있다[6][7]. 따라서 다중 셀 환경에서 다양한 전송률을 지원하는 것을 고려하기 위해서는 각 부채널마다 여러 개의 재사용 지수를 적용하고 동시에 적응적 변조와 코딩을 적용해야 한다.

본 논문에서는 주파수 비선택적 페이딩 환경일 때와 선택적 페이딩 환경일 경우를 고려한다. 비선택적 페이딩 환경에서는 각 부채널마다 재사용 지수를 고려한 셀 코디네이션 기법을 적용한 단순 부채널 할당 방법(Simplified Subchannel Allocation Scheme, SSAS)[8]의 성능을 살펴보고 SSAS의 성능을 개선할 수 있는 방법들을 제안한다. 선택적 페이딩 환경에서는 각 부채널의 주파수 효율성과 우선순위를 고려한 새로운 동적 셀 코디네이션 방법을 제안하며, 이 방법이 시스템 내의 모든 부채널에 동일한 단일 주파수 재사용 지수를 사용할 때와 비교해서 좋은 성능을 나타냄을 보인다.

본 논문의 2장에서는 시스템 모델을 소개하고 단일 주파수 재사용 지수를 사용하는 기존 시스템의 수율과 공평성을 보인다. 3장에서는 비선택적 페이딩 환경에서 기존의 방법과 제안된 방법을 소개하

며, 4장에서는 선택적 페이딩 환경일 때에 셀 코디네이션 방법을 제안한다. 5장에서는 모의실험 결과를 통해 성능을 분석하고 6장에서 결론을 논의한다.

## II. 시스템 모델과 셀 코디네이션을 하지 않는 경우의 성능 비교

### 2.1 시스템 모델

부채널은 인접한 부반송파의 모임으로 정의한다. 본 논문에서 사용되는 주파수 재사용 지수는 각 부채널마다 할당되며, 한 클러스터 내의 각각의 셀들은 시스템이 지원하는 대역의 모든 부채널을 사용할 수 있다. 또한 각 셀내의 부채널들은 여러 개의 재사용 지수가 적용될 수 있으며 그 중에 하나만이 할당될 수 있다. 그러므로 셀 내의 모든 부채널들의 재사용 지수가 1이 할당되는 경우를 제외하고는 한 셀에서 모든 부채널들을 사용할 수 없다.

다중 셀 환경에서 적응적 변조와 코딩이 적용된 OFDMA에 하향링크를 고려하며, 셀은 총 37개, 각 셀의 반경은 1km이다. 각 부채널에 할당할 수 있는 재사용 지수는 1, 3, 7이라 가정한다. 각 기지국은 단말이 각 기지국의 파일럿 신호를 구별할 수 있도록 하기 위해 기지국 인덱스가 포함된 파일럿 신호를 송신한다고 가정하고, 단말은 각 부채널별로 각각의 재사용 지수에 대응되는 SINR을 측정할 수 있다고 가정한다. 모든 부채널에 할당되는 파워는 동일하다고 가정하며, 하나의 부채널안에 부반송파들은 모두 같은 변조 방법이 적용된다고 가정한다. 심볼 주기와 주파수 오프셋과 같은 파라미터들은 상호 심볼 간섭과 상호 채널 간섭을 무시할 수 있도록 잘 디자인 되어있다고 가정한다.

### 2.2 단일 재사용 지수를 사용하며 셀 코디네이션을 하지 않는 경우

각 부채널의 재사용 지수는 시스템에 의해 미리 하나로 결정된다. 단말은 각 부채널별 SINR값을 측정하고 기지국으로 전송될 각 부채널별 데이터 전송률을 결정한다. 기지국은 각각의 단말들로부터 전송된 각 부채널별 데이터 전송률을 수신하고 PF(Proportional Fair) 스케줄러에 따라 부채널들을 단말들에게 할당한다. PF 스케줄러에서 각 부채널이 할당될 사용자를 선택하는 방법은 식(1)과 같다.

$$i_n^* = \arg \max_i \frac{R_{i,n}(t)}{R_{i,n}(t)} \quad (1)$$

여기서  $\overline{R_{i,n}}(t)$ 와  $R_{i,n}(t)$ 는 각각 사용자  $i$ 의  $n$ 번째 부채널의 평균 데이터 전송률과 순간 데이터 전송률을 나타낸다. PF 스케줄링은 각 부채널별로 독립적으로 수행된다.

2.3 단일 재사용 지수를 사용한 경우의 성능

1) 셀 수율의 비교 : 그림 1은 비선택적 페이딩과 선택적 페이딩 환경에서 여러 가지 재사용 지수에 대한 셀 수율을 나타낸다. 그림에서 RF  $k$ 는 재사용 지수  $k$ 를 나타낸다. 그림 1을 통해 재사용 지수가 1일 때 가장 높은 셀 수율을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 또한 비선택적 페이딩 환경에서의 셀 수율이 선택적 페이딩 환경에서의 셀 수율보다 높다는 것을 알 수 있다.

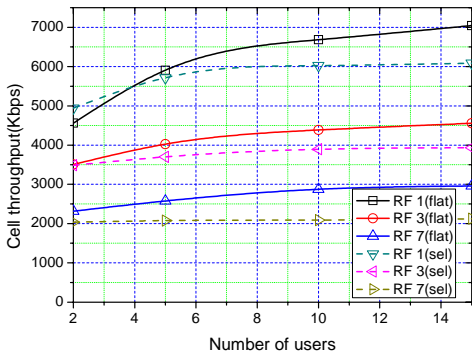


그림 1. 주파수 비선택적 페이딩과 선택적 페이딩 환경에서의 셀 수율 비교

2) 공평성의 비교 : 그림 2는 사용자의 수가 5명, 15명 일 때 각각의 재사용 지수에 대한 공평성을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, 큰 재사용 지수를 사용하는 경우가 공평성 성능이 좋다.

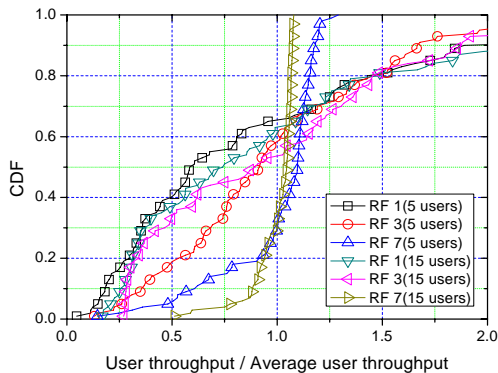


그림 2. 재사용 지수 1, 3, 7일 때의 공평성 비교

III. 주파수 비선택적 페이딩에서 동적 셀 코디네이션

3.1 정적 셀 코디네이션

정적 셀 코디네이션에서 RNC는 각 부채널의 재사용 지수를 결정하며, 각 부채널의 재사용 지수가 결정되면 변하지 않는다. 기지국은 RNC에 의해 특정 재사용 지수를 사용하도록 결정된 부채널을 특정 스케줄링 방법을 이용하여 사용자에게 할당한다.

본 논문에서는 재사용 지수를 1, 3, 7만을 고려한다. 각각의 재사용 지수를 갖는 부채널의 수를 a/b/c로 표현하며, a는 재사용 지수 1을 갖는 부채널의 수를, b는 재사용 지수 3을 갖는 부채널의 수, c는 7을 갖는 부채널의 수를 의미한다. 세 가지의 주파수 할당 방식이 있으며 이들은 각각 (22/1/1), (9/3/2), (1/1/4)이다. (22/1/1)은 시스템 내의 부채널의 대부분이 재사용 지수 1임을 의미하며, (1/1/4)는 대부분의 부채널들이 재사용 지수 7임을 의미한다.

3.2 우선순위를 기초로 한 그리디(Greedy) 셀 코디네이션 방법

3.2.1 사용자들의 우선순위

1) 주파수 효율성을 이용한 우선순위 : 한 부채널의 주파수 효율성은 사용자의 전송 가능한 데이터 전송률과 재사용 지수의 비로 정의한다[8]. 사용자  $i$ 의 우선순위는 다음과 같이 주파수 효율성을 이용해 계산된다.

$$\text{Priority of user } i = \frac{R_k^{ib}}{k} \tag{2}$$

여기에서  $R_k^{ib}$ 는 기지국  $b$ 에 있는 사용자  $i$ 가 재사용 지수  $k$ 를 갖는 부채널이 도달할 수 있는 데이터 전송률을 말한다. 가장 높은 우선순위는 부채널당 가장 높은 주파수 효율성을 갖는 사용자가 갖는다. 그러므로 좋은 채널 상태를 갖는 사용자들이 더 많이 서비스를 받을 수 있으며, 반면에 채널 상태가 나쁜 사용자들은 서비스를 받을 수 있는 기회가 줄어든다.

2) 주파수 효율성과 사용자의 평균 수율을 이용한 우선순위 : 사용자의 우선순위는 다음과 같이  $\overline{R}^{ib}$ 를 고려함으로써 결정된다.

$$\text{Priority of user } i = \left( \frac{R_k^{ib}}{k} \right) / \overline{R}^{ib} \tag{3}$$

여기에서  $\bar{R}^{ib}$ 는 기지국  $b$ 에 속한 사용자  $i$ 의 한 부채널에 대한 평균 데이터 전송률을 뜻한다. 식 (2)의 경우와는 달리 식 (3)에서는 주파수 효율성보다 더 공평한 평균 데이터 전송률을 가지고 주파수 효율성을 정규화 한다.

### 3.2.2 우선순위를 기초로 한 그리디 셀 코디네이션 방법

본 논문에서는 각 기지국들이 요구하는 부채널의 수를 계산하여 전송한 후 RNC에서 셀 코디네이션을 하여 다시 기지국으로 보내고, 각 기지국에서는 RNC로부터 받은 정보를 바탕으로 매 프레임마다 부채널들을 할당하는 방법인 SSAS[8]에서 RNC의 동작 방법을 변화시키지 않고 각 기지국들이 요구하는 부채널의 수를 계산하는 세 가지 방법을 제안한다.

1) 우선순위를 기초로 한 그리디 방법 1 : 각 사용자의  $R_k^{ib}$ 에 따라, 요구하는 부채널의 수는 다음과 같이 얻어진다.

$$R_k^{ib} \cdot N_k^{ib} \geq T_i^b \quad (4)$$

여기에서  $N_k^{ib}$ 와  $T_i^b$ 는 각각 기지국  $b$ 에 있는 사용자  $i$ 가 요구하는 부채널의 수와 미리 정해진 요구되는 데이터 전송률을 나타낸다. 이 방법은 매 프레임동안  $T_i^b$ 를 만족하도록 그리디한 방법으로 부채널을 할당한다.

2) 우선순위를 기초로 한 그리디 방법 2 : 이 방법은 QoS가 매 프레임동안  $T_i^b$ 를 만족할 필요 없이 평균적으로  $T_i^b$ 를 만족하면 되는 사용자  $i$ 의 평균 데이터 전송률과 순간 데이터 전송률을 모두 사용해서  $N_k^{ib}$ 를 계산한다. 각 사용자가 요구하는 부채널의 수는 다음과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{N-1}{N}\right) \cdot \bar{R}^{ib} + \frac{1}{N} \cdot R_k^{ib} \cdot N_k^{ib} \geq T_i^b \quad (5)$$

여기에서  $N$ 은 사용자  $i$ 의 평균 데이터 전송률을 계산하기 위해 사용되는 이동 윈도우 크기를 나타낸다.

3) 우선순위를 기초로 한 그리디 방법 3 : 기본적으로 방법 2와 비슷하지만 기지국이 할당하고 남은 부채널 모두를 가장 높은 우선순위를 갖는 사용자에게 할당한다는 점이 다르다.

## IV. 주파수 선택적 페이딩에서 동적 셀 코디네이션

### 4.1 정적 셀 코디네이션

선택적 페이딩 환경에서 정적 셀 코디네이션은 스케줄링이 각 부채널별로 수행된다는 것을 제외하고는 비선택적 페이딩 환경에서의 정적 셀 코디네이션과 같다.

### 4.2 주파수 효율성과 우선순위에 기초한 동적 셀 코디네이션

선택적 페이딩 환경에서는 각 부채널마다 채널 이득이 다르기 때문에 기지국으로 채널 상태에 대한 제환(feedback)정보량이 비선택적 페이딩 환경에 비해 증가하게 된다. 본 논문에서 제안하는 코디네이션 방법은 선택적 페이딩 환경에서 사용자들의 주파수 효율성 또는 우선순위를 고려하고 인접 셀 간 간섭을 최소화하도록 여러 가지 재사용 지수가 부채널에 적용된 방법이다. 이 장에서는 제안된 코디네이션 방법의 효율성을 살펴본다.

본 논문에서는 두 가지의 방법을 제안한다. 하나는 동적 최대 C/I 셀 코디네이션(Dynamic Maximum C/I Cell Coordination, DMCC) 방법, 다른 하나는 동적 비례 공정성 셀 코디네이션(Dynamic Proportional Fairness Cell Coordination, DPFC) 방법이다. DMCC에서는 각 기지국 내에 있는 사용자의 주파수 효율성을 고려하여 사용자들에게 부채널들을 할당한다. DPFC에서는 DMCC에서 고려하는 주파수 효율성이 각 사용자의 평균 수율을 고려한 사용자들의 우선순위로 바뀐다. 제안하는 방법은 다음의 단계로 구성되어 있다.

#### 4.2.1 단말의 리포트

각 기지국들은 해당 기지국을 뜻하는 인덱스를 파일럿 신호를 통해 전송한다고 가정했기 때문에, 단말은 각 부채널에 대해 재사용 지수 1, 3, 7일 때의 각각의 SINR값을 측정할 수 있다. 각 부채널에서의 전송 가능한 데이터 전송률은 다음과 같이, 측정된 SINR값들과 각 SINR값들에 대응되는 주파수 효율성 값들로부터 계산된다.

$$e_{k,n}^{ib} = \frac{R_{k,n}^{ib}}{k} \quad (6)$$

$$k_{best,n}^{ib} = \arg \max_k e_{k,n}^{ib} \quad (7)$$

여기에서  $e_{k,n}^{ib}$ 는 기지국  $b$ 에 있는 사용자  $i$ 의  $n$

n번째 부채널이 재사용 지수가 k일 때의 주파수 효율성을 나타낸다. 식 (7)과 같이 각 재사용 지수에 대한 주파수 효율성 값을 비교해 가장 큰 값을 결정한다. 단말은  $k_{best,n}^{ib}$ 와  $e_{k_{best,n}}^{ib}$  값을 기지국으로 전송한다.

4.2.2 기지국의 리포트

DMCC에서 기지국 b는  $k_{best,n}^{ib}$ 와  $e_{k_{best,n}}^{ib}$  값을 사용자들로부터 수신하고 아래와 같은 형태를 갖는 행렬  $Q^b$ 를 만든다.

$$Q^b = \begin{pmatrix} e_{1,1}^{ib} & e_{1,2}^{ib} & \cdots & \cdots & e_{1,n}^{ib} \\ e_{3,1}^{ib} & e_{3,2}^{ib} & \cdots & \cdots & e_{3,n}^{ib} \\ e_{7,1}^{ib} & e_{7,2}^{ib} & \cdots & \cdots & e_{7,n}^{ib} \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기에서  $\hat{i}(k, n, b) = \arg \max_{i:k=k} e_{k,n}^{ib}$  또는  $\hat{i}$ 는 기지국 b에 재사용 지수 k를 갖는 n번째 부채널에서의 최대 주파수 효율성 값을 갖는 사용자를 뜻한다. 행렬  $Q^b$ 의 각 원소는 기지국 내에 있는 모든 사용자들이 n번째 부채널에서 재사용 지수가 k일 때 사용자들의 주파수 효율성 값 중에서 가장 큰 주파수 효율성 값이 된다. DPFCC에서는, 사용자의 우선순위가 다음과 같이 계산된다.

$$p_{k_{best,n}}^{ib} = \frac{R_{k_{best,n}}^{ib}}{R^{ib}} \quad (9)$$

$$Q^b = \begin{pmatrix} p_{1,1}^{ib} & p_{1,2}^{ib} & \cdots & \cdots & p_{1,n}^{ib} \\ p_{3,1}^{ib} & p_{3,2}^{ib} & \cdots & \cdots & p_{3,n}^{ib} \\ p_{7,1}^{ib} & p_{7,2}^{ib} & \cdots & \cdots & p_{7,n}^{ib} \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기에서  $\hat{i}(k, n, b) = \arg \max_{i:k=k} p_{k,n}^{ib}$  또는  $\hat{i}$ 는 기지국 b내에 재사용 지수 k를 갖는 n번째 부채널에서 가장 높은 우선순위를 갖는 사용자를 나타낸다. DMCC와 마찬가지로 DPFCC의 행렬  $Q^b$ 의 각 원소는 재사용 지수 k를 갖는 n번째 부채널에서 사용자들의 우선순위 중에서 가장 높은 우선순위가 된다. DMCC, DPFCC 모두 각각의 행렬  $Q^b$ 를 이용해 행렬  $Q_{best}^b$ 를 다음과 같이 결정한다.

$$Q_{best}^b = (e_{k^*,1}^{i(k^*,n,b)}, e_{k^*,2}^{i(k^*,n,b)}, \dots, e_{k^*,n}^{i(k^*,n,b)}) \quad (11)$$

여기에서  $k^*(n, b) = \arg \max_k e_{k,n}^{ib}$  또는  $k^*$ 는 기지국 b에서 n번째 부채널의 주파수 효율성 값들 또는 우선순위 값들 중에 가장 큰 값에 대응되는 재사용 지수를 뜻한다. 즉 행렬  $Q^b$ 의 n번째 열의 값들을

비교해 가장 큰 값을 찾고 그 값에 해당하는 재사용 지수 값이  $Q_{best}^b$ 의 n번째 원소가 되는 것이다. 각 기지국에서 계산된  $k^*(n, b)$ ,  $Q^b$ ,  $Q_{best}^b$ 는 RNC로 보내진다.

4.2.3 셀 코디네이션

RNC는 다음과 같이 셀 코디네이션을 수행한다.

단계 1. 각 부채널의 재사용 지수 결정 : 각 부채널별로 모든 기지국으로부터 수신된 요구되는 재사용 지수의 개수를 센다. 각 부채널의 대표 재사용 지수는 이용 가능한 시스템 대역폭을 효율적으로 사용하기 위해 부채널별로 세어진 재사용 지수의 개수들 중에 가장 큰 값으로 선택한다. 예를 들어, 특정 부채널에서 모든 기지국으로부터 모아진 요청된 재사용 지수 1, 3, 7에 대해 세어진 개수의 값이 각각 9, 9, 1이라면, 부채널의 대표 재사용 지수는 3이 된다. 그림 3은 어떻게 재사용 지수가 각 부채널에 할당되어 있는지를 나타낸다. 부채널의 대표 재사용 지수가 k로 결정되면, 대표 주파수 효율성 값은 모든 기지국들 중에서 재사용 지수 k를 요청한 기지국들의 주파수 효율성 값 중에 가장 큰 값으로 결정된다.

7	3	7	.....	1	3
---	---	---	-------	---	---

그림 3. 각 부채널에 대해 재사용 지수 k의 결정

단계 2. 재사용 지수 7에 대한 대역 분할 : 여러 가지의 대역 분할 방법이 존재할 수 있으며 그것들 중에 하나를 아래와 같이 구현했다. 여러 가지 대역 분할 방법에 대한 성능 비교와 복잡도 비교가 앞으로 이루어져야 할 필요가 있다.

제안하는 방법은 그림 4와 같이 전체 대역 중에서 7개의 연속적인 부채널을 묶어서 이동 부대역 윈도우를 만들고 이를 이용해 재사용 지수 7인 대역을 결정하는 것이다. 먼저, 부대역 윈도우가 이동하면서 윈도우 내에 있는 부채널에서 대표 재사용 지수가 7인 부채널의 개수를 센다. 만일 대표 재사용 지수가 7인 부채널의 개수가 4개 이상이 되면 그때의 부대역은 재사용 지수 7인 대역이 될 수 있는 후보가 되며, 이 때 재사용 지수가 7인 부채널들의 대표 주파수 효율성 값을 모두 더한다. 부대역 윈도우는 시스템이 사용할 수 있는 대역의 가장 낮은 주파수에서 시작해서 한 부채널씩 주파수가 높은 방향으로 이동하며 모든 대역이 포함될 때까지

위의 과정이 반복된다. 재사용 지수 7을 가질 수 있는 후보 부대역을 중에서 실제로 재사용 지수 7을 갖는 부대역을 결정하기 위해 후보 부대역 별로 합해진 주파수 효율성 값들을 비교해 가장 큰 값을 갖는 부대역 순으로 순서를 나열한다. 가장 큰 값을 갖는 부대역부터 재사용 지수 7을 갖는 부대역으로 결정하며, 만일 두 부대역이 겹칠 경우에는 두 부대역의 합해진 주파수 효율성 값을 비교해서 더 큰 값을 갖는 쪽의 부대역을 선택한다

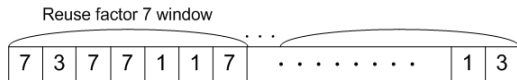


그림 4. 재사용 지수 7을 갖는 부대역 결정

단계 3. 재사용 지수 3에 대한 대역 분할: 그림 5와 같이 이동 부대역 윈도우의 크기를 3으로 하여 단계 2를 반복한다. 여기에서 후보 부대역은 부대역 윈도우 내에 재사용 지수 3을 갖는 부채널의 개수가 2개 이상일 때이다.



그림 5. 재사용 지수 3을 갖는 부대역 결정

단계 4. 재사용 지수 1에 대한 대역 분할: 단계 2와 단계 3후에 재사용 지수가 아직 결정되지 않고 남아 있는 모든 부채널들의 재사용 지수를 그림 6과 같이 1로 한다. 각 부채널에 대해 최종적으로 할당된 재사용 지수를 나타내는  $k_n$  값 또한 이 단계에서 결정된다.

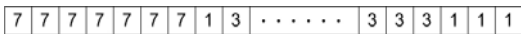


그림 6. 재사용 지수 1, 3, 7을 갖는 부대역 결정

단계 5. 각 부채널에 대해 기지국 결정: 재사용 지수가 7인 부대역에 대해, RNC는 부대역내의 각 부채널에서 7개의 기지국들의 대표 주파수 효율성 값을 비교해서 가장 큰 값을 갖는 기지국에게 해당 부채널을 할당한다. 만일 부대역 내에 같은 기지국에 두 개 이상의 부채널이 할당된다면, 할당된 부채널들 중에서 기지국의 대표 주파수 효율성 값을 비교해 가장 큰 값을 갖는 부채널 하나가 기지국에 할당된다. 이렇게 함으로써 한 부대역 내에서 7개의 기지국이 모두 한 개씩의 부채널을 할당받게 된다. 같은 방법으로 재사용 지수 3을 갖는 부대역들에

대해서 기지국들에게 부채널이 할당된다. 기지국이 특정 채널을 사용한다는 것을 나타내는 행렬  $B$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$B = (b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad b_n) \quad (12)$$

여기에서  $b_n$ 은  $n$ 번째 부채널의 기지국 인덱스이며  $b_n = 0$ 은  $n$ 번째 부채널의 재사용 지수가 1임을 뜻한다. 그림 7은 어떻게 재사용 지수  $k$ 를 갖는 각 부채널에 기지국이 할당되는지를 보여준다

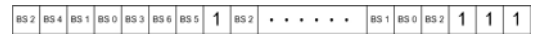


그림 7. 각 부채널에 할당될 기지국 결정

단계 6. 기지국에게 부채널 할당: RNC는  $k_n$ 와 행렬  $B$ 를 기지국에게 전송한다.

#### 4.2.4 단말에게 부채널 할당

각 기지국은 기지국에 할당된 부채널 재사용 지수에 대한 정보를 수신한다. 기지국은 행렬  $Q^b$ ,  $B$  그리고  $k_n$  값을 이용해 한 하향링크 프레임 동안 가장 높은 우선순위를 갖는 사용자에게 각 부채널을 할당한다.

## V. 모의실험 결과

### 5.1 모의실험 결과

표 1은 TDD-OFDMA를 기반으로 한 IEEE 802.16e의 파라미터이고 표 2는 모의실험에 사용한 MCS 표이다. MCS 레벨은 SINR 민감도 경계들에 따라 사용자들에게 리포트 되고 MCS 레벨은 한 프레임 지연된다고 가정했다. 반경 1km를 갖는 37개의 셀이 있다고 가정했다. 요구되는 데이터 전송률은 모든 사용자가 같다고 가정했다. 단말들은 기지국내에 균등하게 분포하고 있다고 가정하고 셀당 단말의 수는 2명에서 최대 15명까지로 가정했다. 경로 감쇠 모델은  $PL = 129.427 + 37.6 * \log_{10}(d_{km})$  [9][10]로 가정하고 로그 노멀 섉도잉(log-normal shadowing)의 표준 편차는 10dB이다. 단기 채널 이득은 6.4Hz의 도플러 주파수를 가지며 [11]에서 사용된 ITU-R에서의 탭드 딜레이 라인(tapped-delay-line) 다중 경로 모델을 갖는 Rayleigh 페이딩으로 가정했다. 기지국의 송신 파워와 안테나 이득은 각각 20W와 14dBi값으로 설정했다. 열잡음 밀도는 -174dBm/Hz로 가정하며 최대 C/I값은 30dB로 제

한했다. 성능을 나타내는 모든 그림에서, sp와 nsp는 주파수 효율성과 평균 수율로 정규화 된 주파수 효율성을 뜻한다.

표 1. 시스템 파라미터 [12]

파라미터	값
반송파 주파수	2.3 GHz
채널 대역	10 MHz
사용된 부반송파의 수	2,048중 1,702
트래픽 부반송파의 수	1,536
부반송파 간격	5.57616 kHz
부채널의 수	32
한 부채널당 부반송파의 수	48
프레임 길이	5.0 msec
하향 심볼의 수	18
OFDMA 심볼 시간	190.543 $\mu$ sec
보호 구간	11.208 $\mu$ sec

표 2. 변조와 코딩 방법 (Modulation and coding scheme, MCS) 표

Modulation	Code Rate	Sensitivity threshold S/N (Rayleigh)	PHY bit/sec/Hz
QPSK	1/12	-3.0dB	0.135
QPSK	1/8	-1.3dB	0.202
QPSK	1/4	1.4dB	0.404
QPSK	1/2	6.6dB	0.807
QPSK	3/4	8.5dB	1.211
16QAM	1/2	10.5dB	1.613
64QAM	2/3	15.3dB	3.227
64QAM	3/4	20.8dB	3.63

5.2 셀 수율 성능

비선택적 페이딩 환경에서 사용자의 수가 변함에 따른 정적 셀 코디네이션 방법과 동적 셀 코디네이션 방법의 셀 수율의 성능비교를 그림 8와 9에서 나타내고 있다. SSAS[8]를 사용한 경우, 셀 수율은 사용자가 5명 이상일 때 감소하게 되는데, 이유는 재사용 지수 7을 갖는 부채널을 요구하는 사용자의 수가 증가하기 때문이다. 요구되는 데이터 전송률이 384kbps이고 사용자의 수가 증가할 때, 그리디 셀 코디네이션 방법 2의 셀 수율이 SSAS에 비해 최대 66% 증가함을 알 수 있다. 64kbps인 경우에는 그리디 셀 코디네이션 방법 3이 SSAS에 비해서 셀 수율이 평균 3.6배 좋은 것을 알 수 있다. 사용자들의 요구되는 데이터 전송률이 384kbps일 때, 그리디 방법 3의 성능은 요구된 수율을 만족하는 사용자가 거의 없기 때문에 사용자의 수가 증가할수록 감소한다. 특정 부채널에 큰 재사용 지수가 할당되면 부채널의 품질은 좋아지지만 부채널이 포함된

부대역 내의 나머지 부채널들은 셀 내에서 사용될 수 없어 자원을 낭비하게 되므로, 재사용 지수 1과 3을 사용한 그리디 방법 3의 셀 수율은 재사용 지수를 1, 3, 7을 사용한 경우에 비해서 더 좋은 성능을 보인다.

선택적 페이딩 환경에서 사용자의 수의 변화에 따른 셀 코디네이션을 적용하지 않은 경우와 동적 셀 코디네이션을 적용한 경우의 셀 수율의 성능비교를 그림 10에 나타냈다. DMCC는 좋은 채널 상태를 가진 사용자들에게 부채널을 할당하기 때문에 가장 좋은 셀 수율을 보인다. 재사용 지수 1, 3, 7을 사용한 DMCC의 셀 수율은 재사용 지수를 1만 사용하는 셀 코디네이션을 하지 않은 경우에 비해

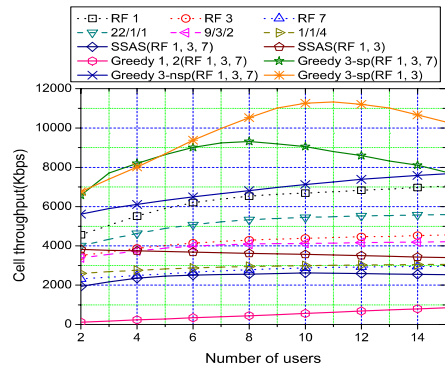


그림 8. 비선택적 페이딩 환경에서 요구되는 데이터 전송률이 64kbps일 때, 정적 셀 코디네이션 방법, SSAS, 제안하는 방법에 대한 셀 수율 비교

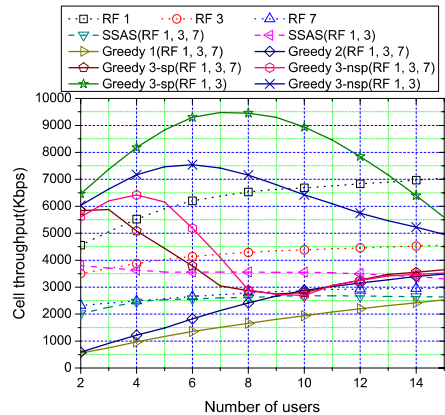


그림 9. 비선택적 페이딩 환경에서 요구되는 데이터 전송률이 384kbps일 때, SSAS와 제안하는 방법에 대한 셀 수율 비교



약 2.6배 좋은 성능을 보인다. DPFCC는 DMCC에 비해 상대적으로 낮은 셀 수율을 보이고 있는데 사용자들 사이의 공평성이 고려되었기 때문이다. 그럼에도 불구하고 DPFCC의 셀 수율은 사용자가 증가함에 따라 재사용 지수 3을 사용한 경우와 비슷하다. 또한, 재사용 지수 1과 3을 사용한 DPFCC는 재사용 지수 1만을 사용한 경우의 셀 수율에 근접하는 것을 볼 수 있다. 재사용 지수를 1과 3만을 사용한 DMCC와 DPFCC는 재사용 지수 1, 3, 7을 모두 사용한 경우에 비해 각각 24%, 57% 더 좋은 성능을 보이는데, 이유는 재사용 지수가 7이면 사용할 수 있는 전체 대역에 1/7만을 사용하기 때문에 대역사용의 효율성이 떨어져 셀 수율 성능에 좋지 않은 영향을 주기 때문이다

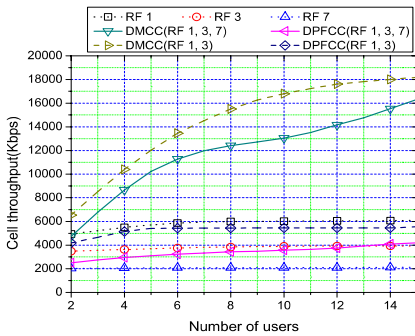


그림 10. 선택적 페이딩 환경에서 재사용 지수를 1, 3, 7을 사용한 경우와 1, 3을 사용한 경우에 대한 제안하는 방법의 셀 수율 비교

### 5.3 공평성 성능

비선택적 페이딩 환경에서 사용자의 수가 5명과 15명이고 사용자들의 요구되는 데이터 전송률이 각각 64kbps, 384kbps일 때, SSAS와 본 논문에서 제안된 방법들의 공평성 성능을 그림 11에 나타내었다. SSAS의 공평성은 재사용 지수를 3만 사용한 경우와 비슷했으며 사용자의 수가 증가함에 따라 사용자의 요구되는 데이터 전송률과 무관함을 알 수 있다. 사용자의 요구되는 데이터 전송률이 64kbps일 때, 그리디 방법 1과 2는 재사용 지수 7만을 사용한 경우보다 더 좋은 공평성 성능을 보인다. 사용자의 수가 15명이고 요구되는 데이터 전송률이 384kbps일 때, 그리디 방법 3의 공평성은 요구되는 데이터 전송률이 64kbps인 그리디 방법 1과 2의 공평성 성능에 근접함을 알 수 있는데, 할당하고 남게 되는 부채널이 거의 없기 때문이다.

선택적 페이딩 환경에서 15명의 사용자를 가정했을 때, 제안된 방법들의 공평성 비교를 그림 12에 나타냈다. 정적 셀 코디네이션 중에 (22/1/1)과 (1/1/4)인 경우의 공평성은 각각 재사용 지수를 1만 사용한 경우와 3만을 사용한 경우와 비슷한 것을 알 수 있다. DMCC는 가장 좋은 채널 품질을 갖는 사용자에게 부채널을 할당하기 때문에 가장 나쁜 공평성 성능을 보인다. DMCC를 사용할 경우, 전체 사용자의 65%가 서비스를 받지 못한다. 재사용 지수 1, 3, 7을 사용하는 DPFCC의 공평성 성능은 정적 셀 코디네이션인 (9/3/2)의 경우보다 좋다. 재사용 지수 1과 3을 사용하는 DPFCC의 공평성은 재사용 지수 1, 3, 7을 사용한 경우에 비해 좋지 않은 성능을 보인다. 비선택적 그리고 선택적 페이딩 환경에서 셀 코디네이션 방법의 대부분이 셀 경계에 있는 사용자에게 큰 재사용 지수의 부채널을 할당함으로써 사용자들의 SINR을 개선시켜 더 높은 데이터 전송률을 제공하는 것을 관찰할 수 있다

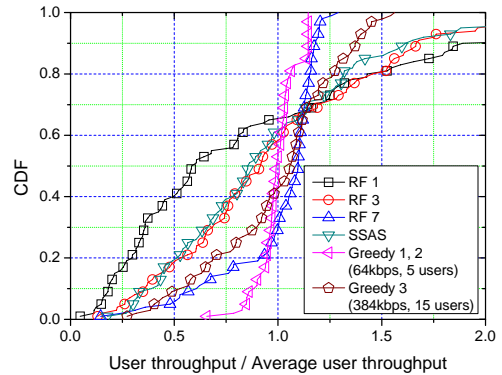


그림 11. 비선택적 페이딩 환경에서 SSAS와 제안하는 방법의 공평성 비교

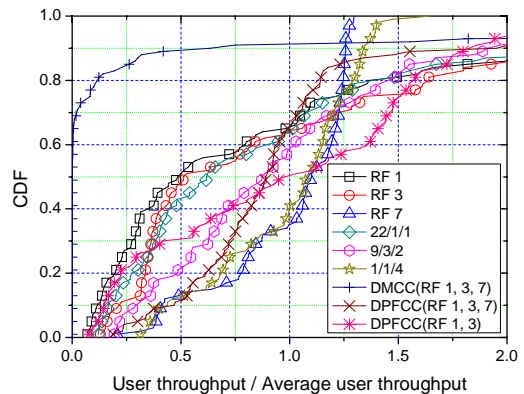


그림 12. 선택적 페이딩 환경에서 제안하는 방법의 공평성 비교



## VI. 결론

본 논문에서는 OFDMA 하향링크 다중 셀 시스템에서 채널 상태를 알고 있을 때, 효율적으로 부반송파를 할당하기 위해 적응적 변조와 여러 가지 주파수 재사용 지수를 동시에 고려한 두 가지의 서로 다른 동적 셀 코디네이션 방법을 제안했다.

주파수 비선택적, 선택적 페이딩 환경에서 성능을 평가하였으며 제안된 방법은 RNC가 각 부채널에 여러 가지 재사용 지수를 동적으로 할당할 수 있으며 각 사용자의 QoS를 보장하고 시스템의 수율을 향상시키기 위해 각 사용자들의 채널 상태와 간섭 상태를 고려한 스케줄링을 적용할 수 있다.

비선택적 페이딩 환경에서는 요구되는 데이터 전송률이 64kbps일 때 그리디 방법 3이 SSAS에 비해 평균 3.6배 높은 셀 수율을 보였으며, 그리드 방법 1과 2가 가장 좋은 공평성 성능을 보였다. 요구되는 데이터 전송률이 384kbps일 때에는 그리디 방법 3의 셀 수율이 SSAS에 비해 최대 3배 높은 셀 수율을 보이는 것을 알 수 있었다. 요구되는 데이터 전송률이 64kbps일 때 그리디 방법 3은 그리디 방법 1과 2를 사용한 경우와 비슷한 공평성 성능을 보였다. 선택적 페이딩 환경에서는 DMCC의 셀 수율이 재사용 지수를 1만을 사용한 경우에 비해 최대 2.6배 높은 셀 수율을 보이며, DPFCC의 공평성 성능은 재사용 지수를 7만 사용한 경우에 근접하는 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

[ 1 ] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA," IEEE Transaction on Wireless Communications, vol. 2, pp.1150-1158, Nov. 2003.

[ 2 ] D. Tse, "Multiuser diversity in wireless networks," Wireless communication seminar, StanfordUniversity, Apr. 2001.

[ 3 ] C.Y. Wong, and R. S. Cheng, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 17, pp.1747-1758, Oct. 1999.

[ 4 ] D. Kivanc, and H. Liu, "Subcarrier Allocation and Power Control for OFDMA," Signals, Systems and Computers, Conference Record of

the Thirty-Fourth Asilomar Conference on, vol. 1, pp.147-151, 2000.

[ 5 ] M. Suzuki, R. Bohnke, and K. Sakoda, "Band division multiple access (BDMA) system: A novel approach for next generation mobile telecommunication system, based on OFDM and SFH-TDMA," IEEE VTC'1998.

[ 6 ] J. Zander, and M. Frodigh, "Capacity allocation and channel assignment in cellular radio systems using reuse partitioning," Electronics Letters, vol. 28, no. 5, pp.438-440, Feb. 1992.

[ 7 ] P. M. Bleri, G. C. Polyzos, and M. Zorzi, "Plane Cover Mutiple Access: A New Approach to Maximizing Cellular System Capacity," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 19, pp.2131-2141, Nov. 2001.

[ 8 ] H. Kim, Y. Han, and J. Koo, "Optimal Subchannel Allocation Scheme in Multicell OFDMA Systems," in Proc. IEEE VTC spring'04, vol. 3, pp.1821-1825, May 2004.

[ 9 ] Recommendation ITU-R M.1225, Guideline for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.

[ 10 ] TTAR-0016, "Evaluation Criteria of Radio Access Technology for 2.3GHz Portable Internet, Telecommunications Technology Association (TTA)," August, 2004.

[ 11 ] 3GPP R1-030042, Update of OFDM SI simulation methodology, Jan. 2003.

[ 12 ] <http://www.ieee802.org/16/tge>

[ 13 ] IEEE C802.16d-03/78r1, Coverage/Capacity simulation for OFDMA PHY in with ITU-T channel model, 2003.

[ 14 ] IEEE C802.16d-04/50r3, OFDMA PHY Enhancements for better mobility performance, 2004.

변 대 옥 (Dae Wook Byun)

정희원



2004년 2월 경희대학교 전자정보학부 졸업

2006년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사

2006년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야> 3G, 4G 무선 패킷

스케줄링, WiBro 휴대인터넷 시스템, 802.16e, 802.16j MMR

기 영 민 (Young Min Ki)

정회원



2000년 2월 연세대학교 기계전  
자공학부 졸업

2002년 2월 연세대학교 전기전  
자공학과 석사

2002년 3월~현재 연세대학교 전  
기전자공학과 박사과정

<주관심분야> 무선 자원 관리,  
채널 스케줄러, WiBro 휴대인

터넷 시스템, cdma2000 1xEV-DO, 802.15.4a  
WPAN, UWB 위치 추적 기술

김 동 구 (Dong Ku Kim)

정회원



1983년 2월 한국항공대학교 통  
신공학과 졸업

1985년 U.S.C. Dept. of Electrical  
Engineering 석사

1992년 U.S.C. Dept. of Electrical  
Engineering 박사

1999년~현재 연세대학교 공과대  
학 전기전자공학과 부교수

<주관심분야> CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조  
및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC기술, 순방향링  
크 빔성형 기술 및 MIMO기술, UWB, Binary  
CDMA