

# 인접셀간 협력하는 셀룰라 시스템에서 소프트 주파수 재사용을 위한 송신전력할당 기법

정회원 김 동 희\*

## Transmit Power Allocation for Soft Frequency Reuse in Coordinated Cellular Systems

Donghee Kim\* *Regular Member*

요 약

본 논문은 셀간 간섭을 제어하여 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 증가시키는 기술인 소프트 주파수 재사용 시 전력 할당에 관한 것이다. 소프트 주파수 재사용 기술은 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 개선하는데 유용한 기술이나 주파수 재사용 지수가 증가되어 셀 평균 데이터 전송율을 감소시키는 문제가 있다. 본 논문에서는 하나의 중앙 제어기가 물리적 거리가 인접한 여러 개의 셀을 제어하는 환경에서, 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 개선하면서도 셀 평균 전송율 감소를 최소화하도록 소프트 주파수 재사용을 위한 송신 전력 할당 기법을 제안한다. 시스템 시뮬레이션을 통하여 인접한 두 셀에 소프트 주파수 재사용 기술을 적용하여 소프트 주파수 재사용에 의한 셀 평균 데이터 전송율 감소 정도와 제안하는 전력 할당 기법에 의한 셀 평균 데이터 전송율 개선을 살펴본다.

**Key Words** : Soft Frequency Reuse, Inter-cell interference, Cell coordination, Power allocation, Cell edge user throughput

ABSTRACT

Power allocation of soft frequency reuse(SFR) to increase cell edge user throughput by reducing inter-cell interference is proposed for coordinated cellular systems. SFR is the effective technique to increase cell edge user throughput, however, it costs the degradation of total system throughput. The cost increases when SFR operated in distributed resource controlled systems fails to be fast adaptive in the change of user distribution. The proposed scheme enables coordinated cells to control transmit power adaptively depending on user distribution so that it minimizes the loss of system throughput introduced from SFR while it guarantees enhancement of cell edge user throughput. Through system level simulation considering neighboring two cells, evaluation result for adaptive power allocation is shown compared with static power allocation.

### I. 서 론

멀티미디어 패킷 데이터를 전송하는 3세대 이동통신 시스템에서는 사용자 다이버시티, 적응형 코딩 변복조와 터보 코드, H-ARQ(hybrid automatic repeat

request)등이 주요 핵심 기술로서 셀 효율을 증가시키는 역할을 하였다. 이어 3.9세대 시스템인 LTE(long term evolution)에서는 광대역을 사용하고 다중 안테나 시스템(multiple antenna system)을 적용하여 데이터 전송율을 증가시켰다. 광대역과 다중

\* 전주대학교 전기전자정보통신공학부 무선미디어 연구실(donghee@jj.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-02-072, 접수일자 : 2009년 2월 23일, 최종논문접수일자 : 2009년 3월 26일

안테나 시스템을 효과적으로 지원하기 위하여 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 기반으로 시스템을 설계하였고, 3세대 시스템의 핵심 기술이었던 사용자 다이버시티, 적응형 코딩 변복조, H-ARQ 등이 OFDM 시스템에서도 효과적으로 구현되도록 설계하였다.

한편, 4세대 시스템으로 불리는 IMT-advanced에서는 셀 평균 데이터 전송율의 개선 뿐만 아니라 사용자가 위치에 관계없이 서비스의 품질을 유지하기 위해서, 사용자가 셀 경계에 위치한 경우에도 충분한 데이터 전송율을 유지하는 것을 목표로 한다. 셀 경계에 위치한 낮은 신호대 간섭비의 사용자, 즉 주변 셀에서 간섭을 많이 받고, 서비스를 받는 기지국에서 경로 손실이 많이 발생하는 위치에 있는 사용자의 경우에 데이터 전송율을 높이기 위해서는 셀 경계 사용자의 신호대 잡음비를 높을 수 있는 기술이 필요하다.

또한, 향후 셀룰라 시스템은 더욱 다양한 형태의 셀들로 구성되리라 전망되고 있다. 높은 주파수에서의 운영을 위해 셀의 크기가 작은 마이크로셀이 설치되고, 건물 내 혹은 개인 영역에 설치되어 특정 사용자에게 높은 데이터 전송율을 제공하는 펌토셀, 기지국 커버리지를 증가시키기 위해 셀 경계 영역에 무선 중계기 등이 설치될 것이다. 이처럼 서비스 영역이 작은 다양한 셀들이 존재함으로써 셀간 간섭에 영향을 많이 받는 셀 경계 영역이 증가하게 되어 향후 셀룰라 시스템에서는 셀간 간섭을 제어하는 기술이 데이터 전송율을 높이기 위한 필수 기술이 되었다.

셀간 간섭 제어 기술 중 효과적으로 셀 경계 데이터 전송율을 높일 수 있는 기술로 소프트 주파수 재사용(SFR: Soft Frequency Reuse) 기술이 있다<sup>[14]</sup>. 소프트 주파수 재사용 기술은 전체 대역을 부대역으로 분할하고, 각 부대역의 송신전력을 다르게 할당한다. 각 부대역의 송신 전력은 각 셀들이 독립적으로 조절하거나 셀간 상호 송신 전력 정보를 교환함으로써, 인접한 셀들이 동일한 부대역에 높은 송신 전력을 할당하지 않도록 한다. 각 셀들은 셀 경계 사용자들을 송신전력이 높게 할당된 부대역에서 서비스함으로써 해당 사용자의 데이터 전송율을 높일 수 있다.

소프트 주파수 재사용 기술은 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 증가시키는 반면, 셀 평균 데이터 전송율을 열화시키는 문제가 있다. 이는 주파수를 최대한 재사용하는 주파수 재사용 지수 1을 사용하

지 않고 각 부대역의 전력을 다르게 설정하여 주파수 재사용 지수를 실제적으로 1보다 크게 만들기 때문이다. 즉, 소프트 주파수 재사용을 사용하여 얻은 셀 경계 사용자 데이터 전송율의 증가는 셀 평균 데이터 전송율의 열화를 대가로 한다. 본 논문에서는 소프트 주파수 재사용 기술을 사용함으로써 발생하는 셀 평균 데이터 전송율의 열화 정도를 살펴볼 것이다.

일반적으로 소프트 주파수 재사용을 위해서는 각 셀에서 설정된 송신 전력 정보가 각 셀을 연결하는 네트워크를 통해 교환된다. 각 셀의 할당 송신전력 업데이트 및 이에 따른 정보교환은 네트워크의 지연 정도와 시그널링 오버헤드등을 고려해 실시간으로 이루어지기 보다는 일정 지연시간을 두고 운영된다. 소프트 주파수 재사용 기술은 셀간 간섭 제어를 위해 매우 유효한 기술이나, 이러한 문제들로 인해 실시간 적응적으로 구현되기 보다는 매우 제한적으로 구현된다.

각 셀들이 독립적으로 단말로부터의 채널 상태 피드백만을 기준으로 부대역의 송신 전력을 조정할 수 있으나, 이 또한 인접셀의 송신 전력 변화를 즉각적으로 반영하여 송신 전력을 결정하기는 쉽지 않다. 네트워크의 정보교환 도움을 받지 않고, 송신 전력을 결정하기 위해서는 단말로부터 간섭 정보를 피드백 받아야 하고 이렇게 피드백 되어지는 간섭 정보는 보통 장시간 평균되어진 값들이기 때문이다.

본 논문에서는 중앙 제어를 사용하거나 하나의 기지국이 물리적 거리가 인접한 여러 개의 셀을 제어하는 환경을 가정한다. 실제로 LTE와 같은 시스템에서는 하나의 기지국(eNB)이 원격 안테나(remote antenna)에 의해 운영되는 256개의 셀을 제어할 수 있으며, 이런 경우에는 각 셀의 송신전력은 실시간으로 기지국에서 제어된다. 기지국은 eNB 장비를 의미하고, 셀은 원격 안테나에 의해 독립적인 커버리지를 갖는 영역을 의미한다. 이러한 경우 기지국(eNB)가 중앙제어의 역할을 한다. 여러 셀의 전송전력이 실시간으로 제어되는 경우, 소프트 주파수 재사용 기술을 적응적으로 송신 전력을 결정하는 알고리즘을 제안한다. 이러한 기술을 사용하여 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 증가시키며, 이로 인한 셀 평균 데이터 전송율의 손실을 최소화 되도록 한다.

II장에서는 중앙 제어되는 셀룰라 시스템에서 소프트 주파수 재사용 기술을 위한 부대역 전력 할당 방법에 대하여 살펴본다. 인접한 두 셀과 두개의 부

대역을 고려한 전력할당을 살펴보고, 셀 평균 데이터 전송율을 최소화하는 적응형 소프트 주파수 재사용 기술에 대하여 기술한다. III장에서는 II장에서 도출된 전력 할당 기법을 적용한 시스템 시뮬레이션을 통하여 셀 경계 데이터 전송율 개선에 따른 셀 평균 데이터 전송율의 변화를 살펴보고, IV장에서 결론을 논한다.

## II. 소프트 주파수 재사용

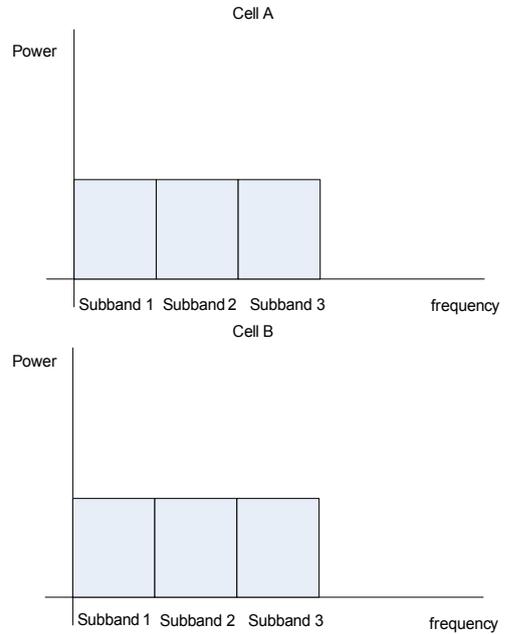
### 2.1 주파수 재사용

일반적인 주파수 재사용 방식은 주파수 재사용 지수 1을 사용한다. 즉, 모든 셀이 같은 주파수를 사용한다. 같은 주파수를 사용함으로써 주파수 재사용 지수 1보다 큰 시스템에 비해, 예를 들면 세개의 셀마다 다른 주파수 자원을 사용하는 주파수 재사용 지수 3에 비해, 주파수 자원의 사용을 최대화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 주파수 재사용 지수 1을 사용함으로써 셀 경계에 위치한 단말들은 인접한 셀들로부터 간섭을 많이 받게 된다. 따라서 셀 경계에 위치한 단말들에게 서비스할 수 있는 데이터 전송율은 제한을 받게 된다.

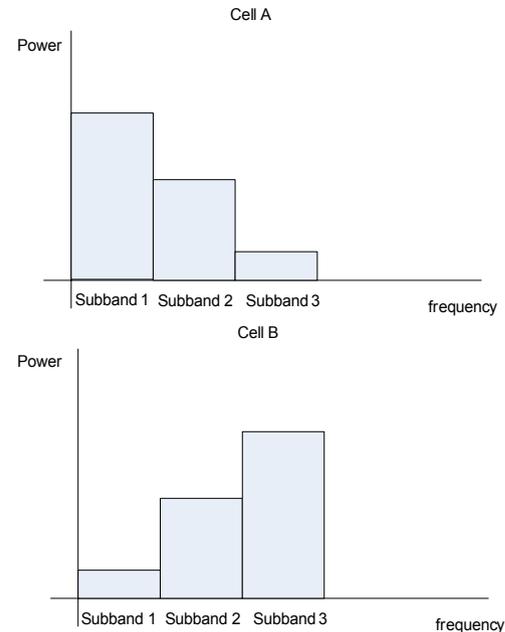
또한, 서로 다른 주파수 재사용 방식의 장점을 활용하기 위하여 부대역에 서로 다른 주파수 재사용 지수를 적용하는 부분 주파수 재사용 기술(FFR: Fractional Frequency Reuse)을 사용할 수 있다. 특정 대역에서는 주파수 재사용 지수 1을 사용하여 모든 셀에서 같은 주파수를 사용하고, 다른 대역에서는 주파수 재사용 지수 3으로 사용된다. 이렇게 서로 다른 주파수 재사용 지수를 혼합하여 사용함으로써, 셀 경계의 사용자들은 주파수 재사용 지수 3을 사용하는 부대역으로 셀 중심의 사용자들은 주파수 재사용 지수 1을 사용하는 부대역으로 서비스하게 된다.

소프트 주파수 재사용 기술은 부분 주파수 재사용 기술을 포함하는 좀 더 일반화된 기술이다. 부분 주파수 재사용 기술이 주파수 재사용 지수를 높이기 위하여 특정 부대역에 전력을 할당하지 않는데 비해, 소프트 주파수 재사용 기술은 주변 셀에 간섭을 작게 주는 한도 내에서 낮은 전력을 할당한다. 할당된 전력으로 사용자들 서비스를 할 수 있어 부분 주파수 재사용 기술에 비하여 높은 셀 평균 데이터 전송율을 제공한다.

그림 1은 주파수 재사용 지수 1인 경우와 소프트 주파수 재사용을 사용하는 경우의 전력 할당 예이



(a) 주파수 재사용 지수 1인 경우 인접 셀 A와 B의 송신 전력 할당 예  
(a) Example of transmit power allocation for neighboring cell A and B when frequency reuse factor is 1



(b) 소프트 주파수 재사용 사용시 인접 셀 A와 B의 송신 전력 할당 예  
(b) Example of transmit power allocation for neighboring cell A and B when soft frequency reuse is used

그림 1. 부대역 전력 할당  
Fig. 1. Subband Power Allocation

다. 그림 1(a)은 주파수 재사용 지수 1인 경우 인접 셀 A와 셀 B의 송신 전력 할당을 나타낸다. 모든 대역에 동일한 전력이 할당되며 이는 셀 A와 B가 동일하다. 각 부대역은 동일한 정도의 간섭을 겪게 된다. 그림 1(b)는 소프트 주파수 재사용을 사용하는 경우 각 셀의 전력 할당 예를 나타낸다. 인접 셀 A와 B는 그림 1(b)와 같이 송신 전력을 사용하도록 정보를 교환한다. 부대역 1에서는 A셀이 높은 전력을 사용하고 B셀은 전력을 낮게 사용한다. 이는 주파수 재사용 지수를 1과 2 사이의 값으로 볼 수 있으며, 셀 A와 B 중간에 위치한 단말은 이 부대역1을 사용하게 되면 간섭을 최소화 하며 셀 A로부터 서비스를 받을 수 있게 된다.

반면에 셀 A나 셀 B의 중심 근처에 위치한 단말들은 자원 사용을 최적화하는 주파수 재사용 지수 1이 적용되고 있는 부대역 2를 통해 서비스를 받는다. 부대역 2를 사용함으로써 셀 A와 B는 동시에 중심 근처에 있는 단말들에게 서비스를 할 수 있게 된다. 그러나, 이와 같이 미리 약속된 전력을 설정하여 사용하는 것은 단말들의 셀 내 분포에 따라 적응적으로 송신 전력을 조절할 수 없는 문제가 있다. 예를 들어 셀 경계에 단말이 없는 경우더라도 미리 약속한 것에 따라 셀 B는 부대역 1에 적은 전력을 사용하고 있으며 이는 전체 셀 평균 데이터 전송율을 감소시키게 된다. 따라서 단말의 셀 내 분포가 변화하게 되면 송신 전력도 변화시킬 수 있는 방안이 필요하다.

### 2.2 주파수 재사용

다중 셀의 송신 전력과 같은 무선 자원을 관리하는 방법으로 중앙 제어를 사용하여 다중셀을 제어하는 중앙제어방식과 각 셀이 독립적으로 자원의 사용을 결정하는 분산제어방식으로 구분할 수 있다<sup>5)</sup>. 그림 2은 물리적으로 가까운 인접 셀들을 제어하는 하나의 기지국 혹은 중앙 제어가 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 이런 형태의 구성은 기지국을 설치할 물리적인 공간을 마련하기 어렵거나, 특정 공간에서 네트워크 최적화를 하기 위한 셀 구성에 사용된다. 각 셀간은 빠른 스피드의 네트워크로 연결되어진다. 기지국에서는 각 셀로부터 수집되어지는 단말들의 피드백을 이용하여 관리하고 있는 모든 셀들의 스케줄링을 수행하게 된다. 하나의 기지국으로부터 다중 셀들의 스케줄링이 수행되므로 기지국에서는 모든 셀들의 상황을 고려하여 스케줄링을 수행할 수 있다.

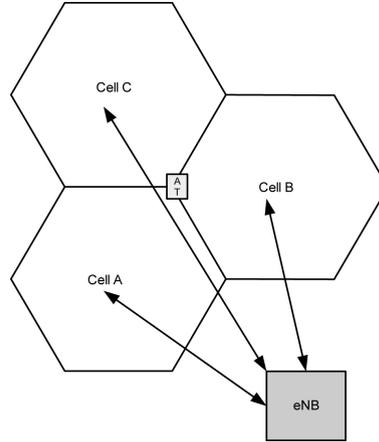


그림 2. 하나의 기지국에서 여러 개의 셀을 제어하는 셀 구성 예  
Fig. 2. Example of single eNB controlling multiple cells

현실적으로 중앙 제어기는 전 시스템의 셀들을 제어한다기 보다는 물리적으로 거리가 인접한 셀들만을 제어하게 된다. 인접한 셀들만을 제어하더라도 주변 셀들에 의해 집중적으로 간섭을 받는 셀간 채널 특성상 중앙 제어에 의한 효과를 충분히 볼 수 있다. 중앙제어되는 시스템에서 송신 전력과 해당 지점에 서비스할 사용자 선택의 최적화는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$(U^*, P^*) = \arg \max C(U, P) \quad (1)$$

여기서  $U$  는 해당 지점에 서비스되는 사용자 벡터로  $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n \ \dots \ u_N]$ 와 같이 표현된다. 전체  $N$  개의 셀이 시스템에 있고 사용자가  $n$ 번째 셀에서 서비스되는 사용자이다. 각 셀은 한 지점에 한 명의 사용자만을 서비스하는 것으로 한다.  $P$ 는 송신 전력 벡터이고,  $P = [P_{u_1} \ P_{u_2} \ \dots \ P_{u_n} \ \dots \ P_{u_N}]$ 와 같이 표현된다.  $P_{u_n}$ 는 사용자  $u_n$ 에게 할당된 송신 전력을 나타낸다.  $C(\cdot)$ 는 평균 데이터 전송율로 아래와 같다.

$$C(U, P) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \left( 1 + \left( \frac{S}{I} \right)_{u_n} \right) \quad (2)$$

여기서  $(S/I)_{u_n}$ 는 사용자  $u_n$ 의 신호대 간섭비로 아래와 같이 계산된다.

$$\left( \frac{S}{I} \right)_{u_n} = \frac{G_{u_n, n} P_{u_n}}{\sum_{i \neq n} G_{u_n, i} P_{u_i} + \sigma^2} \quad (3)$$

여기서  $G_{u_n, n}$  과  $G_{u_n, i}$  은 사용자  $u_n$  의  $n$  번째 셀과  $i$  번째 셀로부터의 채널 이득이다.  $\sigma^2$  는 가우시안 열 잡음의 전력이다. 식(1)의 일반화는 알려져있지 않으며 인접한 두개의 셀만이 고려되고 사용자가 미리 결정되어 있는 경우에 아래와 같은 해를 갖는다<sup>6)</sup>.

$$(P_1^*, P_2^*) = (P_{\max}, P_{\max}) \text{ or } (P_{\max}, 0) \text{ or } (0, P_{\max}) \quad (4)$$

$P_1^*$  과  $P_2^*$  는 각각 셀 1과 셀 2의 최적 할당 전력을 나타내고, 그 해는 두 개의 셀이 모두 최대 전력을 할당하던지, 두 개 셀중 하나의 셀은 전력을 송신하지 않고 다른 하나의 셀은 최대전력을 사용하는 것이다. 전력을 할당하지 않는 경우는 셀과 사용자 사이에 채널 이득이 0에 가까운 경우 전력을 할당해도 전송율을 높힐 수 없으며, 오히려 인접셀에 간섭으로만 작용하기 때문이다. 그러나 이와 같은 결과는 사용자가 미리 정해져 있기 때문이고, 만약 실제 시스템에서 이러한 상황이 발생한다면 기지국은 다른 사용자를 서비스할 수 있다. 즉, 실제 적용가능한 해는 두 셀에서 모두 최대 전력을 사용하는 주파수 재사용 지수 1이 최대 평균 데이터 전송율을 제공한다. 소프트 주파수 재사용 기술의 관점에서 문제를 보면, 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 고려하여 아래와 같이 문제를 재 정의할 수 있다.

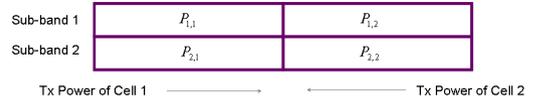
$$(U^*, P^*) = \arg \max T_{\text{system}}(U, P) \text{ satisfying } T_{\text{edge}} \geq T_{\text{edge,required}} \quad (5)$$

여기서  $T_{\text{system}}(\cdot)$  는 셀 평균 데이터 전송율이고,  $T_{\text{edge}}$  는 셀 경계 사용자의 데이터 전송율,  $T_{\text{edge,required}}$  는 셀 경계 사용자의 최소요구 데이터 전송율이다. 이는 셀 경계 사용자에게 최소한의 데이터 전송율을 보장하며, 최대한 주파수 재사용 지수 1에 가깝게 만드는 것으로 해석할 수 있다.

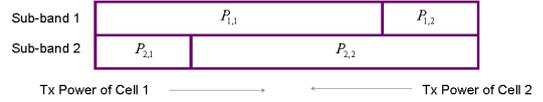
### 2.3 두개셀-두개 부대역 전력 할당

두 개의 인접한 셀을 가정하고 소프트 주파수 재사용을 위하여 전체 주파수 대역이 동일한 크기의 두 개의 부대역으로 구분되어 있는 것으로 가정할 때, 각 부대역에 식(4)을 만족하는 송신 전력을 할당한다.

그림 3(a)는 두개의 셀, 두개의 부대역이 있는 경우에 주파수 재사용 지수 1을 사용한 경우의 전력 할당을 나타낸다. 주파수 재사용 지수 1인 경우에,



(a) 주파수 재사용 지수 1인 경우  
(a) when frequency reuse factor is 1



(b) 소프트 주파수 재사용이 사용된 경우  
(b) when soft frequency reuse is used

그림 3. 두개셀-두개 부대역 전력할당  
Fig. 3. Two cell-two subbands power allocation

한 셀의 최대 송신 전력  $P_T$  는 두 개의 부대역에  $P_{1,n} = P_{2,n} = P_T/2$  ,  $n=1,2$  와 같이 할당된다. 여기서  $P_{1,n}$  과  $P_{2,n}$  는  $n$  번째 셀에 대한 부대역 1과 2의 송신 전력이다. 셀 경계 데이터 전송율  $T_b$  는 다음과 같이 계산된다.

$$T_b = \log_2 \left( 1 + \frac{(P_T/2)r_b^{-4}}{(P_T/2)r_b^{-4} + \sigma^2} \right) \quad (6)$$

여기서  $r_b$  는 셀 반경이고 경로 손실 지수는 4로 가정한다. 셀 경계 데이터 전송율을  $k$  배 증가시키기 위해,  $T_{\text{edge,required}} = kT_b$ , 셀 1의 부대역 1의 송신 전력은 다음과 같이 설정된다.

$$T_{\text{edge,required}} = kT_b = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{1,1}r_b^{-4}}{(P_T - P_{1,1})r_b^{-4} + \sigma^2} \right) \quad (7)$$

여기서  $P_{1,1}$  은 식 (6) 와 (7)의 관계에 의해 계산될 수 있다.  $P_{1,1}$  이 셀 경계 사용자를 서비스하기 위하여 증가될수록  $P_{2,1}$  는  $P_{1,1} = P_T - P_{2,1}$  의 관계에 의하여 감소한다. 또한 셀 2에서  $T_{\text{edge,required}}$  의 셀 경계 데이터 전송율을 제공하기 위해서 셀 2의 부대역 전력은  $P_{2,2} = P_{1,1}$  과  $P_{1,2} = P_{2,1}$  에 의해 설정된다. 그림 3(b)는 이와 같은 식 (6), (7)에 의해 설정된 전력을 나타낸다.

### 2.4 적응형 소프트 주파수 재사용

앞절과 같이 부대역의 전력을 할당하면 셀 경계 단말에게  $T_{\text{edge,required}}$  의 데이터 전송율을 제공하지

만, 증가된 주파수 재사용 지수로 인하여 셀 평균 데이터 전송율이 감소하게 된다. 중앙 제어되는 시스템에서는 다음과 같이 적응적으로 송신 전력을 결정하여 주파수 재사용 지수의 증가를 최소화 한다.

부대역의 송신 전력은 미리 결정되어 있는 것이 아니라 현재 서비스하는 사용자의 수신 신호대 잡음비에 따라 결정한다. 스케줄러는 주파수 재사용 지수 1을 사용한다고 가정하고 사용자  $i$ 의 데이터 전송율  $T_{i|FRF=1}$ 를 다음과 같이 계산한다. 주파수 재사용 지수 1을 사용하므로 각 부대역의 송신 전력은 동일하다.

$$T_{i|FRF=1} = \log_2 \left( 1 + \frac{(P_T/2)r_i^{-4}}{(P_T/2)(2r_b - r_i)^{-4} + \sigma^2} \right) \quad (8)$$

여기서  $r_i$ 는 서비스하는 셀로부터  $i$ 번째 사용자까지의 거리이다. 만약  $T_{i|FRF=1} \geq T_{edge,required}$ 이면, 각 부대역의 송신 전력은  $P_T/2$ 로 결정된다. 이렇게 부대역에 동일한 전력을 사용하기로 결정하면 두 셀에서 모두 동일 전력을 각 부대역에 사용하며, 각 부대역에는  $T_{i|FRF=1}$ 가  $T_{edge,required}$ 보다 큰 사용자들이 서비스 된다.

만약  $T_{i|FRF=1} < T_{edge,required}$ 이면, 부대역의 송신 전력은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{edge,required} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{1,1}r_i^{-4}}{(P_T - P_{1,1})(2r_b - r_i)^{-4} + \sigma^2} \right) \quad (9)$$

여기서 위 식을 만족하는  $P_{1,1}$ 는 셀 1의 부대역 1의 송신 전력으로 설정되고, 스케줄러는  $P_{1,2} = P_{2,1} = P_T - P_{1,1}$ 과  $P_{2,2} = P_{1,1}$ 에 따라 대칭적으로 셀 1과 셀 2의 부대역 송신 전력을 설정한다. 사용자  $i$ 가 셀 1의 부대역 1에 서비스되는 시점에 셀 2의 부대역 2에 서비스되는 사용자  $j$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$j^* = \arg \min T_{j|P_{2,2}} \text{ satisfying } T_{j|P_{2,2}} \geq T_{edge,required} \quad (10)$$

식(10)은 부대역의 송신 전력을 균일하지 않게 설정하는 시간을 최소화하기 위하여 셀 1과 셀 2가 셀 경계 사용자를 서비스하는 시점을 일치시키기 위한 것이다. 셀 1과 셀 2가 동시에 셀 경계 사용자를 서비스 함으로써, 그 외의 시간에는 모든 부대역의 송신 전력을 동일하게 설정하는 주파수 재사용

지수 1로 운영이 가능하다.

따라서 소프트 주파수 재사용을 적응적으로 운영하는 방법으로, 각 시간 슬롯에서 중앙 스케줄러는 해당 슬롯에서 각 부대역의 전력을 균일하게 설정할지 균일하지 않게 설정하지 결정한다. 셀 1과 셀 2에서 모두 셀 중심의 사용자를 서비스하는 경우 각 부대역의 전력을 균일하게 설정하고 주파수 재사용 지수 1이 되도록 한다. 또한 셀 1과 셀 2에서 모두 셀 경계 사용자를 서비스 하는 경우 각 부대역의 전력을 다르게 설정하게 된다. 이러한 방식은 각 부대역의 전력 할당이 다르게 되는 시간을 최소화함으로써, 셀 평균 데이터 전송율의 감소를 최소화하고자 하는 것이다.

### III. 성능 분석

소프트 주파수 재사용에 따른 셀 경계 사용자 데이터 전송율의 증가와 셀 평균 데이터 전송율의 감소를 살펴보기 위해 두 개의 셀로 이루어진 시스템을 가정한다. 다수의 셀로 이루어진 실제 시스템의 상황을 고려하기 위하여 두 셀 이외의 모델링되지 않는 주변셀에서 들어오는 간섭성분들은 중앙 스케줄러에 의해 제거가능하지 않으므로, 두 셀의 중앙에 위치한 단말이 수신하는 전체 간섭성분의 50%가 모델링되지 않는 주변셀의 간섭과 열잡음으로 구성된다고 가정한다. 수신기에서 최대 실현가능한 SNR은 25dB로 가정하고 경로 손실 지수는 4로 한다. 셀 전체의 송신 전력은 20W이고 셀의 반경은 100m인 마이크로셀을 고려한다<sup>7)</sup>. 20개의 단말들이 두 셀에 균일하게 분포한다. 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 단말의 이동성은 고려되지 않는다. 각 사용자는 동일한 시간동안 서비스되는 것으로 한다.

#### 3.1 소프트 주파수 재사용

그림 4는 셀 경계 사용자 데이터 전송율 개선에 따른 셀 평균 데이터 전송율을 나타낸다. 셀 평균 데이터 전송율은 모든 사용자의 데이터 전송율의 합인 사용자 수로 정규화한 것이다. 셀 경계 사용자 데이터 전송율 개선은  $k * 100$  [%]로 표현되면,  $k$ 는 1부터 2까지 증가한다. 200%의 셀 경계 사용자 데이터 전송율의 개선은 주파수 재사용 지수 1인 경우에 비해 셀 경계 사용자 데이터 전송율이 두 배가 되었음을 의미한다. 셀 평균 데이터 전송율이 부대역의 수에 따라 도시되었다. 두개의 부대역을 사용하는 것은 전체 주파수 대역이 두개의 부대역

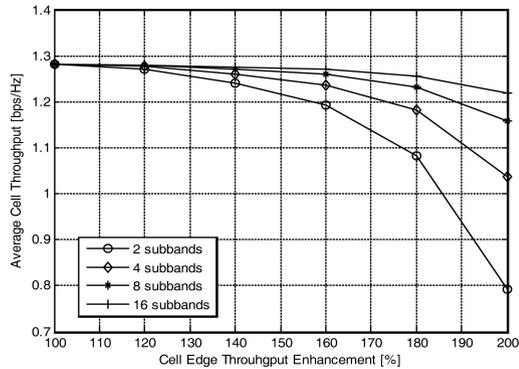


그림 4. 부대역 수에 따른 평균 셀 데이터 전송율  
Fig. 4. Average cell throughput according to number of subbands

으로 구성되며, 그림 3(b)와 같은 송신 전력이 적용된 것을 의미한다. 4, 8, 16개의 부대역은 전체 주파수 대역이 각각 4, 8, 16개의 동일한 크기의 부대역으로 분할된 것을 의미하며, 이들 부대역중 두개의 부대역에 그림 3(b)와 같은 송신 전력이 적용되고, 나머지 부대역에는 그림 3(a)와 같은 동일한 크기의 송신 전력이 할당된다. 즉 8개 부대역의 경우에는 6개의 부대역이 동일한 크기의 송신 전력으로 할당된다.

모든 경우에 셀 경계 사용자 데이터 전송율이 증가할수록 셀 평균 데이터 전송율은 감소한다. 이는 소프트 주파수 재사용에 따라 주파수 재사용 지수 1 이상으로 증가하였기 때문에 주파수 활용도가 감소한 것에 기인한다. 전력이 작게 할당된 부대역에서 발생한 데이터 전송율의 감소가 전력이 크게 할당된 부대역에서의 데이터 전송율 이득에 의해 모두 보상되지 않기 때문이다. 특히 두개의 부대역 경우를 보면 셀 경계 데이터 전송율이 2배 증가하면 셀 평균 데이터 전송율이 약 40% 감소하였다. 이는 주파수 재사용 지수 2의 경우 셀 평균 데이터 전송율이 감소하는 것과 비슷한 상황으로 생각할 수 있다. 셀 경계의 데이터 전송율을 2배로 하기 위해 송신 전력이 하나의 부대역에 집중되어 주파수 재사용 지수 2의 경우와 같아지는 것이다. 부대역의 수가 증가하면, 소프트 주파수 재사용에 사용된 부대역의 비율이 감소하므로 셀 평균 데이터 전송율의 감소가 줄어든다. 따라서 셀 경계 사용자의 비율에 따라 소프트 주파수 재사용을 사용할 부대역의 수를 적절히 설정하여 주는 것이 필요하다. 두 개의 인접한 셀을 가정하고 소프트 주파수 재사용을 위하여 전체 주파수 대역이 동일한 크기의 두 개의

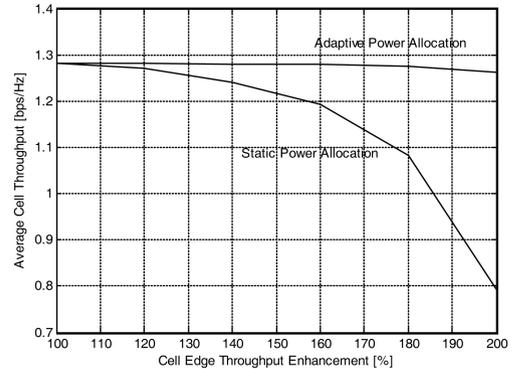


그림 5. 적응형 전력 할당에 따른 셀 평균 데이터 전송율  
Fig. 5. Average cell throughput according to adaptive power allocation

부대역으로 구분되어 있는 것으로 가정할 때, 각 부대역에 식(4)를 만족하는 송신 전력을 할당한다.

### 3.2 적응형 소프트 주파수 재사용

그림 5은 두 개의 부대역을 사용하는 경우 적응형 소프트 주파수 재사용을 한 경우의 셀 평균 데이터 전송율을 나타낸 것이다. 앞서 살펴본 비적응형 소프트 주파수 재사용과 성능을 비교하였다. 비적응형 소프트 주파수 재사용의 경우 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 증가시키기 위하여 셀 평균 데이터 전송율이 40% 줄어든 반면 적응형 소프트 주파수 재사용을 사용한 경우 셀 평균 데이터 전송율 감소가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 적응형 소프트 재사용에 의해 셀 경계 사용자의 데이터 전송율을 높이기 위하여 최소 필요한 시간 슬롯에서만 높은 주파수 재사용 지수가 사용되었기 때문이다. 또한, 두 셀에서 셀 경계 사용자를 서비스하는 시간 슬롯을 동기화함으로써 높은 주파수 재사용 지수가 사용되는 시간이 줄어들 수 있었다.

## IV. 결 론

소프트 주파수 재사용 기술은 셀 경계 사용자 데이터 전송율을 개선하는데 유용한 기술이나 주파수 재사용 지수가 증가되어 셀 평균 데이터 전송율을 감소시키는 문제가 있다. 따라서 소프트 주파수 재사용 기술에서 셀 평균 데이터 전송율을 감소시키지 않기 위해서는 시스템 내 사용자의 분포에 따른 부대역의 송신 전력을 적절하게 조절하는 것이 필요하다. 또한 부대역의 수를 충분히 설정하여 필요한 만큼의 부대역만 주파수 재사용 지수를 증가시

키는 것이 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 부대역으로 이루어진 인접한 두 셀에 중앙 제어 방식의 적응형 소프트 주파수 재사용 기술을 사용하여 셀 경계 사용자 데이터 전송율을 유지하며 셀 평균 데이터 전송율 감소를 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 실시간 중앙 제어되는 경우에는 단말의 분포에 따라 송신 전력이 실시간으로 제어되어 일정 셀 경계 사용자 데이터 전송율을 유지하면서도 셀 평균 데이터 전송율의 손실을 피할 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] Michael Mao Wang, Tingfang Ji, Jaber Borran, and Thomas Richardson, "Interference Management and Handoff Techniques in Ultra Mobile Broadband Communication Systems," *IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 166-172, Aug. 2008.

[2] A.L. Stolyar, and H. Viswanathan, "Self-organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems," *IEEE The 27th Conference on Computer Communications.*, pp. 691 - 699, Apr. 2008.

[3] R. Giuliano, P. Loretì, F. Mazzenga, and G. Santella, "Fractional Frequency Reuse Planning for WiMAX over Frequency Selective Channels," *Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 666 - 671, Aug. 2008.

[4] H. Fujii, and H. Yoshino, "Theoretical Capacity

and Outage Rate of OFDMA Cellular System with Fractional Frequency Reuse", *Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 1676-1680, May 2008.

[5] D. Gesbert, S.G. Kiani, A. Gjendemsj, and G.E. Oien, "Adaptation, Coordination, and Distributed Resource Allocation in Interference-Limited Wireless Networks," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 12, pp. 2393 - 2409, Dec. 2007.

[6] A. Gjendemsjo, D. Gesbert, G.E. Oien, and S.G. Kiani, "Optimal Power Allocation and Scheduling for Two-Cell Capacity Maximization," *4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, pp.1-6, Apr. 2006.

[7] 3GPP2 contribution, "Evaluation methodology Document," <ftp://ftp.3gpp2.org>, May 2008.

김 동 희 (Donghee Kim)

정회원



1994년 2월 연세대학교 전기공학과 학사

1996년 8월 연세대학교 전기공학과 석사

2001년 8월 연세대학교 전기전자공학과 박사

2001년~2008년 삼성전자 통신연구소 표준연구팀 책임연구원

2008년~현재 전주대학교 전기전자정보통신공학부 조교수

<관심분야> 이동통신, MIMO, 협력통신, 방송시스템