

# 매크로셀 사용자 보호를 위한 펌토셀 기지국의 전송전력 제어

정 동근\*, 김 유석\*

## Power Control of Femto Base Station for Protecting Macrocell Users

Dong Geun Jeong\*, Yu Seok Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 펌토셀을 채택한 셀룰러 통신망에서 매크로셀 사용자를 보호하기 위한 새로운 분산식 펌토셀 전송전력 제어 기법을 제안한다. 제안된 기법에서, 인근의 펌토셀로부터 심한 간섭을 받는 매크로셀 사용자는 그 사실을 매크로셀 기지국을 통해 해당 펌토셀 기지국에게 알린다. 펌토셀 기지국은 전송전력을 감소시켜 매크로셀 사용자를 보호한다. 제안된 기법은 매크로셀 기지국, 매크로셀 사용자 및 펌토셀 기지국 간에 교환해야 할 제어 정보가 많지 않고, 펌토셀 기지국의 계산량이 적어서 구현이 용이한 장점을 가진다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 제안된 기법은 그 단순함에도 불구하고 최소한의 펌토셀 사용자의 성능 열화를 대가로 탁월한 매크로셀 성능 향상을 달성한다.

**Key Words** : Femtocell networks, Macrocell user protection, Power control, Cellular system, Outage

### ABSTRACT

In the cellular networks adopting femtocells, the macrocell users can suffer from severe interference by the femtocells. In this paper, we propose a distributed transmission power control scheme for femtocells to protect macrocell users. With the proposed scheme, when a macrocell user experiences outage due to severe interference, it informs the interfering femtocell base station (BS) of the outage occurrence, via the macrocell BS. Then, the femtocell BS reduces the transmission power to protect the macrocell user. The proposed scheme does not require too much control information among the macrocell BS, the macrocell users, and the femtocell BS. Moreover, the computational complexity in femtocell BS is very low. By using simulation, we show that the performance of the proposed scheme is good enough to use in practice, in spite of its simplicity.

### I. 서 론

이동통신 기술의 발달과 다양한 휴대용 통신 장비의 보급으로 많은 사용자들이 실내와 실외에서 인터넷을 통한 멀티미디어 서비스를 쉽고 빠르게

이용할 수 있게 되었다. 특히, 비디오 스트리밍과 같은 영상서비스가 일반화됨에 따라 모바일 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있다. 이와 같이 증가하는 트래픽에 대처하기 위해 다양한 방안이 강구되고 있는데, 그 중 하나가 펌토셀(femtocell)로 3GPP와

※ 본 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author and Corresponding Author : 한국외국어대학교 전자공학과, dgjeong@hufs.ac.kr, 정회원

\* 한국외국어대학교 대학원 전자공학과, 학생회원

논문번호 : KICS2013-07-297, 접수일자 : 2013년 7월 19일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 4일

IEEE 802.16 등에서 표준화가 진행되고 있다<sup>12)</sup>.

팜토셀 기지국은 소규모 저전력 기지국으로서 그 기본적인 역할은 매크로셀(macrocell) 기지국과 동일하다. 팜토셀 기지국은 10 - 20 m 정도 거리의 작은 영역을 서비스하며 해당 지역에 발생하는 모바일 트래픽을 유선망 등으로 우회하여 처리한다<sup>13-5)</sup>. 팜토셀은 매크로셀의 서비스 영역에 중첩되어(overlaid) 설치되므로 2 계층(two-tier) 셀룰러 통신망이 구성된다. 팜토셀 기지국과 핵심(core) 이동통신망은 전용망이 아닌 우회망을 통해 연결된다. 우회망으로는 인터넷 등 이미 널리 구축된 가입자용 고속 범용 통신망을 이용하기 때문에, 팜토셀 기지국은 사용자가 손쉽게 구매하고 플러그 앤 플레이(plug and play) 방식으로 설치할 수 있다. 팜토셀 기지국과 핵심망(특히 매크로셀 기지국) 사이의 통신은 범용 통신망을 이용하므로 전용망을 사용할 때에 비해 전송 속도, 지연(delay), 또는 에러율 등 모든 면에서 신뢰성이 떨어진다. 따라서 팜토셀 관리 기법은 가능한 한 제어신호 교환을 적게 필요로 하고 단순해야 한다. 팜토셀 기지국의 운용 방식에는 모든 셀룰러 가입자에게 사용권을 부여하는 개방형 접근(open access) 방식과 해당 팜토셀 기지국에 미리 등록된 셀룰러 가입자에게만 사용권을 부여하는 폐쇄형 접근(closed access) 방식이 있다. 개인이 구매하고 설치한 팜토셀 기지국은 통상 폐쇄형 접근방식으로 운용된다.

팜토셀은 매크로셀 사업자에게 할당된 셀룰러 주파수대역을 이용한다. 그러므로 팜토셀의 동작 주파수대역 할당 기법은 셀룰러 시스템 전체의 주파수 효율을 높이도록 설계되어야 한다. 먼저 전체 주파수대역을 분리하여 매크로셀과 팜토셀에 서로 다른 주파수대역을 할당하여 각각 전용채널(dedicated channel)에서 동작시키는 방안은, 매크로셀과 팜토셀 사이의 간섭이 없으므로 무선자원 관리가 용이하다는 장점이 있으나, 팜토셀의 수가 작은 경우 무선자원 이용 효율이 떨어진다는 단점이 있다. 주파수 자원 이용 효율을 높이기 위해서는 매크로셀과 팜토셀이 같은 주파수 대역을 공유할 필요가 있으나, 이 경우 매크로셀과 팜토셀 사이에 간섭이 문제가 된다. 특히 폐쇄형 접근방식으로 운용하는 팜토셀 기지국 주위에 존재하는 매크로셀 사용자의 경우, 만약 그 팜토셀 기지국에 등록된 사용자라면 팜토셀로 핸드오프하여 더 좋은 서비스를 받을 수도 있지만, 미등록 사용자라면 팜토셀 기지국으로부터 격심한 간섭을 당할 수도 있다<sup>6)</sup>. 그러므로 팜토셀

기지국이 매크로셀 사용자에게 가하는 간섭을 회피할 방법이 필수적이다.

전체 주파수대역을 다수의 부채널(subchannel)로 분할하여 사용하는 방식을 이용하는 시스템, 예컨대 직교 주파수분할 다중접속(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템의 경우에 있어서는 매크로셀과 팜토셀에게 동적으로 서로 다른 부채널을 사용하게 하는 것도 간섭을 회피하는 하나의 방법이다. 예를 들어 팜토셀 기지국이 매크로셀의 부채널 사용 여부를 감지(sensing)한 후 매크로셀이 사용하지 않는 부채널을 사용하는 방법으로 간섭을 회피할 수도 있다<sup>7)</sup>. 그러나 감지와 스케줄링(scheduling)에 기반을 둔 방식을 사용하려면, 부채널을 감지해야 하는 부담이 있고 다량의 제어신호 교환해야 하는데, 이는 팜토셀의 설계 의도인 관리기능 단순화와 부합되지 않는다. 더욱이, 매크로셀 사용자와 팜토셀 사용자가 증가하면 부채널을 분할하여 할당하는 스케줄링 자체가 복잡해진다.

매크로셀 사용자에게 가해지는 팜토셀 기지국으로부터의 간섭을 회피하기 위한 또 다른 방법은 팜토셀 기지국의 송신전력을 적절히 조절하는 것이다. 여기에는 한 매크로셀 영역 내에 있는 모든 팜토셀의 송신전력을 하나의 특정 제어 에이전트(주로 매크로셀 기지국)가 결정하는 중앙집중식 방법과 각 팜토셀이 자신의 송신전력을 스스로 결정하는 분산식 방법이 있다. 중앙집중식 방법을 이용하면 최적 송신전력을 계산할 수 있어서 간섭 효과를 최소화할 수 있지만, 신뢰도가 낮은 우회망을 통해 팜토셀 기지국과 중앙 제어 에이전트가 많은 제어정보를 교환해야 하고 중앙제어 에이전트의 계산량이 많은 점이 문제이다. 예를 들어, 서버(server)에 저장된 사용자의 위치정보를 이용하여 팜토셀 기지국의 전송전력을 결정하는 방법은 사용자들의 위치정보를 지속적으로 서버에 전달하기 위해 많은 제어신호를 발생시킨다<sup>8)</sup>.

분산식 방법의 예로, 팜토셀 기지국이 매크로셀 사용자가 수신하게 될(매크로셀 기지국으로부터의) 신호전력과(팜토셀 기지국으로부터의) 간섭전력을 추정하여, 매크로셀 사용자가 허용할 수 있는 전송전력의 범위를 결정하는 방법이 제안되었다<sup>9,10)</sup>, 그러나 이를 추정하기 위해서는 팜토셀 기지국의 복잡도가 증가하고, 또 추정 오차가 크게 발생할 수도 있다. 한 편, 매크로셀 기지국과 팜토셀 기지국 각각과 매크로셀 사용자 사이의 거리를 안다는 가정 하에서, 이를 이용하여 매크로셀 사용자의 아웃티지

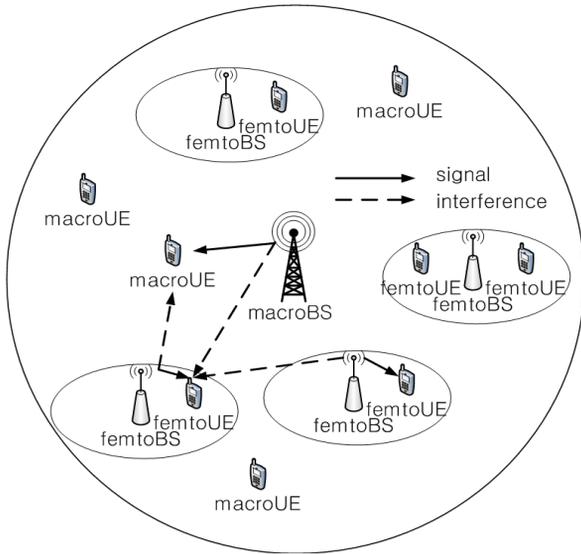


그림 1. 펌토셀을 채택한 셀룰러 시스템.  
Fig. 1. Cellular system with femtocell.

확률을 계산하고, 그 확률에 따라 전송전력을 제어하는 방법도 제안되었으나<sup>[11]</sup>, 시변 채널 상의 거리를 정확히 추정하는 것은 매우 어렵다.

본 논문에서는 펌토셀 환경에서 매크로셀 사용자를 보호하기 위한 새로운 분산식 펌토셀 송신전력 제어 기법을 제안한다. 제안되는 기법은 두 가지 설계 목표를 가진다. 첫째, 펌토셀의 전송전력을 낮춤으로써 발생하는 펌토셀 사용자의 성능 저하를 최소화한다. 둘째, 펌토셀 기지국의 계산 성능이 높지 않을 수 있다는 점과 펌토셀 기지국과 핵심망 사이 우회망의 신뢰도가 상대적으로 낮다는 점을 고려하여, 제어신호를 가능한 한 단순화한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서 고려하는 시스템의 모델을 소개하고, 제 3 장에서 제안된 전송전력 제어 기법을 설명한다. 제 4 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 성능 분석하고, 제 5 장은 이 논문의 결론이다.

## II. 시스템 모델

$M$  개의 매크로셀과  $N$  개의 펌토셀로 구성된 2계층 셀룰러 시스템을 고려한다. 한 매크로셀의 서비스 영역 내에는 사용자가 설치한 다수의 펌토셀이 존재한다(그림 1 참조). 각 펌토셀은 폐쇄형 접근방식으로 동작하여 미등록 매크로셀 사용자는 해당 펌토셀의 서비스를 받지 못한다. 매크로셀 사용자가 펌토셀 기지국에 근접하게 되면 펌토셀의 간섭을 받는다.

펌토셀로부터 매크로셀 사용자에게 가해지는 간섭은 하향링크 상에 작용하므로, 본 논문에서는 하향링크만 고려한다.

매크로셀과 펌토셀이 동일한 주파수 대역을 공유하며, 전체 하향링크 주파수 대역을  $K$  개의 부채널(sub-channel)로 나누어서 사용하는 OFDMA 시스템을 고려한다. 부채널  $k(1 \leq k \leq K)$ 를 통해 매크로셀 기지국  $i(1 \leq i \leq M)$ 에게 서비스 받는 임의의 매크로셀 사용자  $j$ 의 수신 신호대 간섭 및 잡음비(SINR: signal-to-interference and noise ratio)는 다음과 같이 계산된다.

$$SINR_j^k = \frac{P_{Macro}^k G_{i,j}}{\sum_{m=1, m \neq i}^M I_m^k + \sum_{n=1}^N I_n^k + \eta_0} \quad (1)$$

이 때,  $k$ 는 부채널의 번호이고,  $P_{Macro}^k$ 는 매크로셀 기지국의 송신전력,  $G_{i,j}$ 는 매크로셀 기지국  $i$ 와 매크로셀 사용자  $j$  사이의 채널 이득이다.  $I_m^k$ 와  $I_n^k$ 는 각각 매크로셀 기지국  $m$ 과 펌토셀 기지국  $n$ 에 의한 간섭이고  $\eta_0$ 는 열화 잡음 전력이다.

식 (1)의 매크로셀 사용자  $j$ 에 대한 간섭원(interference source) 중 멀리 떨어진 펌토셀에 의한 간섭은 펌토셀 기지국의 전송전력이 낮고 벽 투과 손실(wall penetration loss)이 있기 때문에 무시할 수 있다. 또 인접 셀의 매크로셀 기지국에 의한 셀간 간섭은 펌토셀을 채택하지 않은 전통적 시스템에서와 동일하고, 인접한 펌토셀에 의한 간섭에 비해 무시할 수 있다. 매크로셀 사용자는 인접 펌토셀 기지국 중 아웃티지 발생에 기여할 수 있을 만큼 큰 간섭을 야기하는 펌토셀 기지국을 각 펌토셀 기지국이 방송하는 제어 신호(예컨대 파일럿 신호 등)를 통해 파악할 수 있다. 이에 해당되는 펌토셀 기지국의 ID(즉, 인덱스)의 집합을  $\mathcal{N}_D$ 라 하자. 이 때 매크로셀 사용자의 수신 SINR은 다음과 같이 근사할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$SINR_j^k \cong \frac{P_{Macro}^k G_{i,j}}{\sum_{n \in \mathcal{N}_D} I_{n,i}^k + \eta_0} \quad (2)$$

본 연구에서는 SINR이 정해진 값  $\gamma$  보다 작아서( $SINR_j^k < \gamma$ ) 매크로셀 사용자가 매크로셀 기지국으로부터 전송된 원하는 신호를 디코딩하지 못하면 아웃티지(outage)가 발생했다고 간주한다. 주어진 수신 신호 전력에 대해, 아웃티지는 펌토셀의 간섭

이 크거나 열화 잡음이 클 때 발생한다. 본 연구에서는 매크로셀 사용자가 아웃티지 발생 원인을 파악할 수 있다고 가정한다.

이 논문에서는 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률을 낮출 수 있는 펠토셀 전송전력 제어 기법을 제안한다. 전력제어는 일정한 시간 간격으로 이루어지며, 이 간격을 전력제어 슬롯(slot)이라 칭하기로 한다. 슬롯은 이산 시각을 나타내는 시간단위로도 사용된다.

### III. 펠토셀 전송전력 제어

제안하는 매크로셀 사용자 보호 기법은 다음 두 가지 과정으로 구성된다.

- (1) 매크로셀 사용자가 심각한 간섭을 받고 있음을 펠토셀 기지국이 인지하는 과정.
- (2) 간섭을 줄이기 위해 펠토셀 기지국이 전송전력을 낮추고, 간섭이 사라진 후 전력을 높이는 전력제어 과정.

#### 3.1. 펠토셀 기지국의 간섭 인지

한 펠토셀 기지국이 자신이 매크로셀 사용자에게 가한 간섭을 가장 직접적으로 확인할 수 있는 방법은 해당 매크로셀 사용자로부터 그 사실을 보고받는 것이다. 그러나 이 방법은 펠토셀 기지국과 매크로셀 사용자 간의 직접적 제어 메시지 교환을 필요로 하므로, 이들 간의 새로운 신호 프로토콜도 필요하고 펠토셀 기지국 및 단말기에 새로운 기능을 추가하여야 한다.

이러한 과도한 변경을 피해, 매크로셀 사용자가 매크로셀 기지국으로 전송하는 신호나 데이터를 펠토셀 기지국이 감청(overhearing)하고 이를 이용하여 매크로셀 사용자가 심한 간섭을 받고 있는지 여부를 간접적으로 판단할 수도 있다. 그러나 앞의 직접 보고 방법과 마찬가지로 이 방법 또한 펠토셀 기지국이 매크로셀의 상향링크를 계속 감시해야하는 어려움이 있다. 더구나 예를 들어 매크로셀 사용자가 보고하는 매크로셀의 기준신호 수신 전력 정보를 감청했다하더라도, 이 것 만으로는 매크로셀 사용자가 아웃티지가 발생할 만큼 큰 간섭을 받고 있는지는 판단하기 쉽지 않다.

이러한 사정을 고려하여 본 논문에서는 다음과 같이 매크로셀 사용자가 아웃티지 발생을 매크로셀 기지국을 경유하여 펠토셀 기지국에게 전달하는 방법을 사용한다. 먼저 아웃티지가 발생한 매크로셀

사용자는 아웃티지 발생에 큰 영향을 준 펠토셀에 대한 정보를 자신을 서비스 중인 매크로셀 기지국에게 기존의 상향링크 제어 채널을 이용하여 전송한다. 이 때, 매크로셀 사용자는 펠토셀 기지국이 방송하는 제어 신호(예컨대 파일럿 신호 등)를 통해 파악한 해당 펠토셀 기지국의 ID를 함께 전송한다. 아웃티지 발생 사실을 통보받은 매크로셀 기지국은 그 사실을 (코어망과 펠토셀 기지국을 연결하는 우회망을 통하여) 간섭을 발생시킨 펠토셀 기지국에게 알린다.

매크로셀 기지국이 펠토셀 기지국에게 아웃티지 발생 정보를 전달하기 위해, 예를 들어 3GPP의 경우, S1 인터페이스나 X2 인터페이스를 이용할 수 있다<sup>12)</sup>. 본 논문에서는 펠토셀 전송전력 제어에 초점을 맞추기 위해 이들 인터페이스와 메시지 전달 절차의 구체적 구현에 대해서는 더 이상 고려하지 않는다.

#### 3.2. 전송전력 제어

부채널  $k$ 를 사용하는 임의의 펠토셀 기지국  $n$ 은 슬롯시각  $t$ 에서 매크로셀 기지국으로부터 매크로셀 사용자의 아웃티지 발생을 통보받을 수도 있고 ( $n \in \mathcal{N}_D$ ), 그렇지 않을 수도 있다( $n \notin \mathcal{N}_D$ ). 아웃티지를 야기한 펠토셀 기지국은 전송전력을 낮추어 매크로셀 사용자를 보호해야 한다. 다른 한 편, 펠토셀 기지국의 펠토셀 사용자에 대한 전송 성능(데이터 전송속도 및 에러율)은 전송전력이 커질수록 좋다. 그러므로 매크로셀 사용자의 이동이나 채널 상태의 변화로 매크로셀 사용자에게 대한 간섭이 사라질 경우, 펠토셀 기지국은 송신전력을 높여야 한다. 그런데 매크로셀 기지국, 나아가 펠토셀 기지국이 매크로셀 사용자에게 대한 간섭이 사라졌음을 (혹은 견딜만한 수준으로 유지됨을) 알 수 있는 방법은 더 이상의 아웃티지 보고가 없는 것으로부터 추정할 수 있을 뿐이다.

본 논문에서 제안하는 기법은 기본적으로 일종의 뱅뱅 제어(bang-bang control)에 기초한다. 즉, 임의의 펠토셀 기지국  $n$ 은 시각  $t$ 에서 아웃티지 발생을 통보받으면 다음 슬롯(시각  $t+1$ )의 전송전력을  $\Delta P$  만큼 감소시키고, 아웃티지 발생 통보를 받지 않은 경우 다음 슬롯의 전송전력을  $\Delta P$  만큼 증가시킨다.

$$P_{Femto,n}^k(t+1) = \begin{cases} P_{Femto,n}^k(t) - \Delta P, & \text{if } n \in \mathcal{N}_D \\ P_{Femto,n}^k(t) + \Delta P, & \text{if } n \notin \mathcal{N}_D \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $P_{Femto,n}^k(t)$ 는 시각  $t$ 에서 펌토셀 기지국  $n$ 이 사용하는 전송전력으로 최대  $P_{Femto,max}^k$ , 최소  $P_{Femto,min}^k$  사이의 값을 가질 수 있다. 그런데 식 (3)의 제어 방법을 실제 상황에 그대로 구현할 경우 몇 가지 문제점이 야기될 수 있고, 이를 해결하기 위한 설계가 필요하다.

매크로셀 사용자의 아웃티지는 매크로셀 기지국으로부터의 신호가 약해지거나, 펌토셀 기지국의 간섭이나 열화 잡음이 커질 때 발생한다. 매크로셀 사용자와 펌토셀 기지국 사이의 거리가 가까워지면 발생하는 아웃티지는 여러 슬롯에 걸쳐 지속적으로 일어난다. 이에 반해, 페이딩이나 신호의 추계적(stochastic) 특성에 의해 지속 기간이 매우 짧은 아웃티지가 간헐적으로 발생하는 경우도 흔히 있다. 매크로셀 사용자의 아웃티지 발생 사실이 매크로셀 기지국을 거쳐 펌토셀 기지국에게 전달되기까지는 일정 시간 지연이 존재한다. 더구나 매크로셀 기지국과 펌토셀 기지국은 범용 우회망으로 연결되므로 이 지연 시간을 정확히 예측하기는 불가능하다. 이러한 환경에서 지속 기간이 매우 짧을 수도 있는 모든 아웃티지 발생마다 식 (3)의 제어 방법을 그대로 적용하여 전송전력을 증가시키고 그 직후 감소시키기를 반복하면 시스템의 성능을 저하시키게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 제안되는 기법에서는 전송전력을 낮출 때 슬라이딩 윈도우 메커니즘을 사용한다. 슬라이딩 윈도우의 크기를  $W$  슬롯이라 하자. 펌토셀 기지국은 과거  $W$  슬롯 기간 동안 아웃티지 발생 통보 유무를 보존한다. 슬롯 시각  $t$ 에서 매크로셀 사용자의 아웃티지 발생을 통보받으면, 과거 슬롯시각  $t - W + 1$ 부터 현재까지  $W$  슬롯 기간 발생한 아웃티지 총 횟수를 센다. 이 횟수를  $s$ 라 했을 때,  $s$ 가 미리 정해진 기준값  $S_{th}$ 보다 크거나 같아야 전송전력을 낮춘다. 정리하면, 부채널  $k$ 를 사용하는 임의의 펌토셀 기지국  $n$ 은 시각  $t$ 에서 매크로셀 기지국으로부터 매크로셀 사용자의 아웃티지 발생을 통보받으면( $n \in \mathcal{N}_D$ ) 전송전력을 낮출지 여부를 다음과 같이 결정한다.

$$P_{Femto,n}^k(t+1) = \begin{cases} P_{Femto,n}^k(t), & \text{if } s < S_{th} \\ P_{Femto,n}^k(t) - \Delta P, & \text{if } s \geq S_{th} \end{cases} \quad (4)$$

그런데 아웃티지로 말미암아 전송전력을 감소시킨 직후는 그 전송전력 값이 매크로셀 사용자까지의 거리나 채널 상황을 감안할 때 적당한 값일 수 있다. 이러한 상황에서, 단 1회 아웃티지 발생 통보가 없다고 곧바로 전송전력을 증가시키면 새로이 아웃티지가 발생하게 된다. 이는 다시 전송전력 감소를 초래한다. 뱅뱅 제어에서 흔히 나타나는 이러한 핑퐁(ping-pong) 현상은 일부 매크로셀 사용자의 아웃티지 성능을 현저히 저하시킬 수 있다. 이를 막기 위해 본 연구에서는 보수적인 전력제어 정책을 채택한다. 즉, 전송전력을 감소시킨 직후가 아니라 일정 기간 경과(대기) 후, 그 기간 동안 아웃티지가 발생하지 않으면 전송전력을 증가(복원)시키는 정책이다. 미리 정해진 대기기간을  $T$  슬롯이라 하자. 부채널  $k$ 를 사용하는 임의의 펌토셀 기지국  $n$ 이 한 번의 전송전력 감소 후 현재 시각  $t$ 까지 대기한 시간이  $\tau$ 인 상황에서 아웃티지 발생 통보를 받지 않으면( $n \notin \mathcal{N}_D$ ),  $t+1$  시각에 전송전력을 높일지 여부를 다음과 같이 결정한다.

$$P_{Femto,n}^k(t+1) = \begin{cases} P_{Femto,n}^k(t), & \text{if } \tau < T \\ P_{Femto,n}^k(t) + \Delta P, & \text{if } \tau = T \end{cases} \quad (5)$$

참고로, 식 (3)의 전송전력 제어 방법은 식 (4) 및 (5)로 표현된 제어 방법의 특별한 경우로 해석할 수 있다. 즉, 식 (4)와 (5)에서  $W=1$ ,  $S_{th}=1$ ,  $T=1$ 인 경우가 식 (3)의 제어 방법에 해당된다. 이후 성능평가에서는 식 (4)와 (5)로 표현된 전송전력제어 방법을 사용한다.

## IV. 성능 평가

### 4.1. 시뮬레이션 설정

C-언어로 작성한 시뮬레이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 평가하였다. 시뮬레이션에서 전력제어 슬롯의 길이는 1 ms이고 슬라이딩 윈도우의 크기는 20 슬롯( $W=20$ ), 즉 20 ms이다. 매크로셀 기지국과 펌토셀 기지국 간의 우회망 지연시간은 20 ms로 일정하다고 가정하였다. 한 매크로셀 사용

표 1. 수신 SINR에 따른 MCS 수준[13].  
Table 1. MCS level for SINR threshold[13].

SINR range (dB)	Modulation	Code rate
$2.88 < \text{SINR} \leq 5.74$	QPSK	1/2
$5.74 < \text{SINR} \leq 8.79$	QPSK	3/4
$8.79 < \text{SINR} \leq 12.22$	16QAM	1/2
$12.22 < \text{SINR} \leq 15.88$	16QAM	3/4
$15.88 < \text{SINR} \leq 17.50$	64QAM	1/2
$17.50 \leq \text{SINR}$	64QAM	3/4

자에게 이웃 매크로셀 영역에 있는 펌토셀이 미치는 영향은 특별한 경우를 제외하고는 무시할 수 있으므로, 시뮬레이션에서는 하나의 매크로셀과 10 개의 펌토셀이 존재하는 모델을 사용하였다. 매크로셀은 반지름이 500 m 인 원형이며 중심에 매크로셀 기지국이 위치한다. 펌토셀 기지국은 매크로셀 서비스 영역 내에 균등(uniform) 분포한다. 각 펌토셀은 기지국을 중심으로 반지름이 10 m 인 원형이며, 펌토셀이 주로 건물 내에 설치되는 점을 감안하여 펌토셀의 경계를 따라 벽이 설치되어 있다고 가정한다. 시뮬레이션에서는 매크로셀 사용자에게 대한 펌토셀의 간섭이 열화 잡음보다 큰 경우에 발생하는 아웃티지를 간섭에 의한 아웃티지로 간주하였다. 또 전송전력 제어시 전력 증감분  $\Delta P$ 는 3 dB로 설정하였다.

매크로셀 내에는 150 명의 매크로셀 사용자가 존재하고, 각 펌토셀마다 5 명의 펌토셀 사용자가 존재한다(전체 50 명의 펌토셀 사용자). 각 사용자는 랜덤 워크(random walk) 모델에 따라 3 km/h 의 속도로 이동한다. 매크로셀 사용자는 매크로셀 전체 영역을 이동할 수 있으나, 펌토셀 사용자는 해당 펌토셀 내에서만 이동할 수 있다.

어떤 매크로셀 사용자에게 전송할 데이터가 생기면 매크로셀 기지국은 하나의 부채널을 할당하여 200 슬롯동안 데이터 메시지를 전송한다. 전송이 완료되면 평균이  $1/\lambda_M$ 인 ( $\lambda_M$ 은 매크로셀 사용자에게 대한 데이터 메시지 생성율) 지수분포를 따르는 시간이 경과된 후 다시 그 매크로셀 사용자에게 대한 새로운 데이터가 생성된다. 한편, 펌토셀 기지국은 사용가능한 전체 부채널을, 데이터를 전송해야 할 모든 펌토셀 사용자에게 공정하게 분배한다. 한 펌토셀 사용자에게 펌토셀 기지국은 그 사용자에게 할당된 모든 부채널을 이용하여 500 슬롯동안 메시지를 전송한다. 전송이 완료되면 평균이  $1/\lambda_F$

표 2. 경로 손실 모델[14].  
Table 2. Path loss model[14].

Link		Path loss model
macrocell BS → user	outside	$15.3 + 37.6 \log_{10} R$
	inside	$15.3 + 37.6 \log_{10} R + L_w$
femtocell BS → user	inside	$38.46 + 20 \log_{10} R + 0.7 R$
	outside	$\max(15.3 + 37.6 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10} R) + 0.7 R$
	another inside	$\max(15.3 + 37.6 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10} R) + 0.7 R + 2L_w$

인 ( $\lambda_F$ 는 펌토셀 사용자에게 대한 데이터 메시지 생성율) 지수분포를 따르는 시간이 경과한 후 다시 그 펌토셀 사용자에게 대한 새로운 데이터 전송을 시도한다.

모든 사용자에게 대한 데이터 전송에는 AMC (adaptive modulation and coding) 기법이 사용된다. 사용자의 수신 SINR에 따른 MCS(modulation and coding scheme) 수준은 표 1과 같이 결정된다<sup>[13]</sup>.

부채널 수  $K$ 는 50으로 설정하였기 때문에, 매크로셀 사용자가 이용할 수 있는 총 부채널의 수는 50이다. 또 10 개의 펌토셀 전체에서 사용할 수 있는 총 부채널의 수는 500 개다. “매크로셀 부채널 이용율(MSU: macrocell subchannel utilization)”을 시뮬레이션 동안 전체 매크로셀 부채널 중 사용자에게 할당된 부채널 수의 비율로, “펌토셀 부채널 이용율(FSU: femtocell subchannel utilization)”을 시뮬레이션 동안 총 펌토셀 부채널 중 모든 펌토셀에서 사용자에게 할당된 부채널 수의 비율로 각각 정의하자. 시뮬레이션에서는  $\lambda_M$ 과  $\lambda_F$ 을 변경하여 매크로셀 및 펌토셀 부채널 이용율, 결국 시스템에 가해지는 트래픽 부하를 조절한다. 본 연구에서 사용한 성능 척도는 주어진 부채널 이용율에 대한 매크로셀 및 펌토셀 사용자의 아웃티지 확률이다.

Femtocell Forum에서 제시한 시뮬레이션 파라미터 값에 따라, 채널의 중심주파수는 2 GHz, 전체 채널의 대역폭은 10 MHz, 매크로셀 기지국의 전송 전력은 43 dBm, 펌토셀 기지국의 최소 및 최대 전송 전력은 각각 -10 및 20 dBm로 설정하였다[14]. 경로 손실 모델은 표 2와 같다<sup>[14]</sup>. 표 2에서,  $R$ 은 기지국과 사용자 사이의 거리(미터 단위)이고  $L_w$ 는 벽 투과 손실이다. 열화 잡음 전력밀도는 -174

dBm/Hz, 전파음영(shadowing)의 표준편차는 4 dB,  $L_w$ 는 20 dB로 설정하였다.

본 논문에서 제안된 기법의 성능을 비교하기 위한 기준 기법으로, 펠토셀이 전력제어를 하지 않고 항상 최대 전력으로 전송하는 기법도 함께 시뮬레이션 하였다. 이 비교 대상 기법은 아래 그림에서 “without PC(power control)”로 표시한다.

#### 4.2. 수치적 결과

그림 2는 펠토셀 부채널 이용율이 50 %이고  $S_{th} = 1$ 인 제안된 기법과 전력제어를 하지 않는 기법을 비교한 결과이다. 그래프에서 ‘macroUE’와 ‘femtoUE’는 각각 매크로셀 사용자와 펠토셀 사용자를 의미한다. 사용한 기법에 상관없이(또한  $T$ 의 값에 상관없이), 매크로셀 부채널 이용율이 증가하면, 펠토셀 사용자에 대한 간섭도 증가하므로 펠토셀 사용자의 아웃티지 확률도 따라서 커진다. 그림 2는 이러한 현상을 잘 보여준다. 펠토셀 사용자에 대한 간섭이 커지면 그 수신 SINR이 나빠지고, AMC 기법을 사용하여 전송하는 펠토셀 기지국은 낮은 수준의 MCS를 사용할 가능성이 커진다. 이는 펠토셀 기지국의 전송전력을 약간이나마 낮추는 효과를 나타내고, 그 결과 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률이 근소하게 낮아진다. 단, AMC 기법에서 사용되는 MCS 수준에 따른 전송전력의 차이는 매우 작으므로, 매크로셀 부채널 이용율 증가에 따른 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률 감소는 극히 미미하다.

한 편 그림 2에서 보면 전송전력을 증가시키기 전에 대기하는 시간  $T$ 가 길수록 펠토셀 사용자의 아웃티지 확률은 커지는 반면, 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는  $T$ 가 길수록 펠토셀 기지국의 전송전력이 낮을 확률이 높아져서 펠토셀 사용자의 수신 SINR이 임계값 이하가 될 확률이 높아지는 반면, 매크로셀 사용자에 대한 간섭은 줄어들기 때문이다.

제안된 기법은  $T$ 의 값에 상관없이 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률 측면에서 전력제어를 하지 않는 기법에 비해 탁월한 성능을 나타낸다. 전체적으로 볼 때, 제안된 기법은 전력제어를 하지 않는 기법에 비해 펠토셀 사용자의 성능을 약간 희생하여 매크로셀 사용자의 성능을 현저히 높여준다.

그림 3은 지나치게 빈번한 전송전력 감소 및 증가를 막기 위해 슬라이딩 윈도우를 사용하여 아웃티지 이력을 관리하고 그에 의거하여 전력 제어를

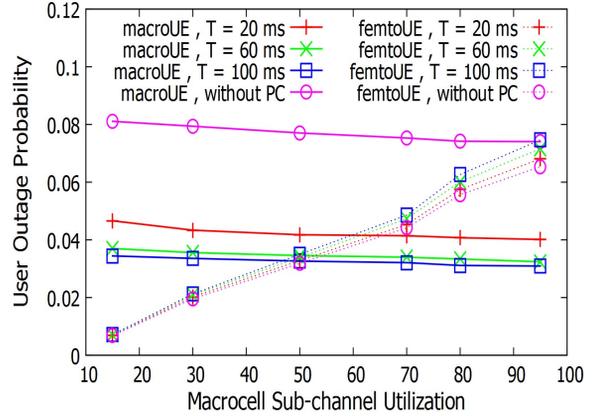


그림 2. 아웃티지 확률에 대한 대기시간  $T$ 의 영향 (펠토셀 부채널 이용율: 50 %,  $S_{th} = 1$ ).

Fig. 2. Effects of waiting time  $T$  on outage probability (femtocell subchannel utilization: 50 %,  $S_{th} = 1$ ).

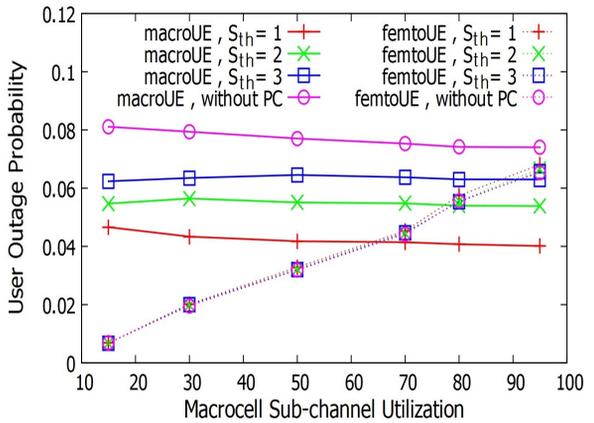


그림 3. 아웃티지 확률에 대한 아웃티지 발생횟수 기준값  $S_{th}$ 의 영향 (펠토셀 부채널 이용율: 50 %,  $T = 20$  ms).

Fig. 3. Effects of reference number of outages  $S_{th}$  on outage probability (femtocell subchannel utilization: 50 %,  $T = 20$  ms).

할 때, 전력을 낮출지 판단할 때의 기준값  $S_{th}$ 의 영향을 보여 준다.  $S_{th}$ 가 클수록 펠토셀 기지국은 보수적으로 전송전력을 낮추므로, 평균 전송전력이 커질 가능성이 높다. 펠토셀 기지국의 전송전력이 낮아지지 않을수록 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률은 증가한다.

매크로셀 사용자와 펠토셀 사용자 사이의 공정성을 추구하기 위해, 두 종류 사용자의 아웃티지 확률이 가능한 비슷하도록 파라미터  $T$ 와  $S_{th}$ 의 값을 설정하였을 때, 제안된 기법과 전력제어를 하지 않는 기법의 성능을 비교 분석하였다. 두 가지 값의 펠토셀 부채널 이용율 각각에 대해 다섯 가지 값의

표 3. 펠토셀 부채널 이용율에 따른 다양한 시나리오 하의 성능 평가에 사용된 ( $S_{th}$ ,  $T$ ).  
Table 3. ( $S_{th}$ ,  $T$ ) used for performance evaluation according to femtocell subchannel utilization.

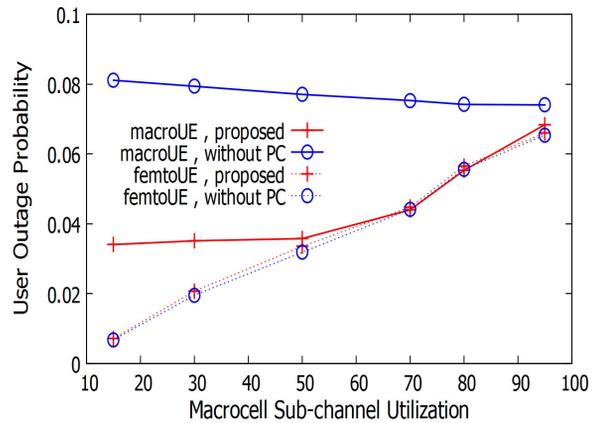
FSU MSU	50 %	80 %
15 %	(1, 80 ms)	(1, 100 ms)
30 %	(1, 60 ms)	(1, 80 ms)
50 %	(1, 40 ms)	(1, 60 ms)
70 %	(2, 80 ms)	(1, 40 ms)
80 %	(3, 60 ms)	(2, 100 ms)
95 %	(5, 40 ms)	(2, 40 ms)

매크로셀 부채널 이용율을 설정하는, 10 가지 시나리오를 고려하였다. 각 시나리오에 대응되는  $T$ 와  $S_{th}$ 의 값은 표 3에 정리하였다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 펠토셀 부채널 이용율 50 %와 80 %에 대응된다. 그림에서 보듯이 펠토셀 부채널 이용율이 50 - 70 % 이상이 되면 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률은 급격히 증가한다. 이는 펠토셀의 부하가 시스템 용량(capacity)에 가까워진 상황에서, 매크로셀 사용자의 아웃티지 확률이 펠토셀 사용자의 아웃티지 확률과 비슷해지도록  $T$ 와  $S_{th}$ 의 값을 설정했기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 제안된 시스템의 아웃티지 확률은 전력제어를 하지 않는 기법에 비해 현저히 낮다.

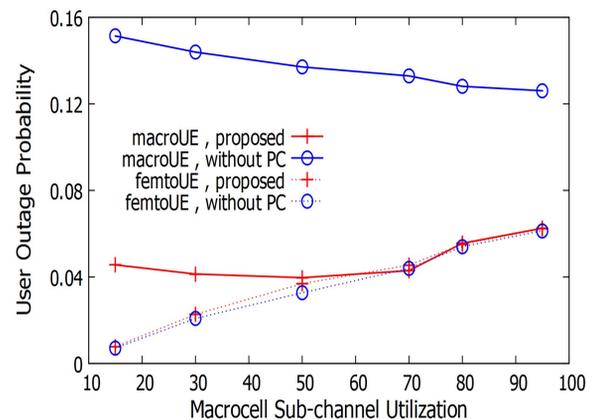
### V. 결론

본 논문에서는 매크로셀 사용자를 보호하기 위하여 펠토셀 기지국의 전송전력을 제어하는 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 매크로셀 기지국, 매크로셀 사용자 및 펠토셀 기지국 간에 교환해야 할 제어 정보가 많지 않고, 펠토셀 기지국의 계산량이 적어서, 기존 시스템을 약간만 변경하여 구현할 수 있다는 장점을 가진다. 제안된 기법에서는 간헐적으로 짧은 기간 발생하는 매크로셀 사용자의 아웃티지로 인한 비효율적 펠토셀 기지국 전력제어를 최소화하기 위하여 슬라이딩 윈도우 메커니즘을 사용하였다. 또 전송전력을 낮춘 후에는 일정 기간 아웃티지가 없음을 확인한 후 전력을 증가시킴으로써 매크로셀 사용자 보호 기능을 더욱 강화시켰다.

시뮬레이션을 통해, 제안된 기법을 사용하면 매크로셀 사용자의 아웃티지를 효과적으로 통제할 수



(a) 펠토셀 부채널 이용율: 50%.



(b) 펠토셀 부채널 이용율: 80%.

그림 4. 매크로셀 및 펠토셀 사용자의 아웃티지 확률이 비슷할 경우 제안된 기법의 성능.  
Fig. 4. Performance of the proposed scheme when macrocell and femtocell users experience similar outage probability.

있음을 보였다. 또한 매크로셀 사용자와 펠토셀 사용자가 대등한 아웃티지 확률을 보이는 시나리오 하에서, 제안된 기법은 전력제어를 하지 않는 기법에 비해 탁월한 성능을 보였다.

### References

- [1] 3GPP, *UTRAN architecture for 3G Home Node B(HNB); Stage 2*, 3GPP TS 25.467, Dec. 2010.
- [2] IEEE, *IEEE standard for local and metropolitan area networks - Part 16: Air interface for broadband wireless access systems*, IEEE 802.16m, May 2011.
- [3] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, and

S. Rangan, "Femtocells: Past, present, and future," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 497-508, Apr. 2012.

[4] S. P. Yeh, S. Talwar, S. C. Lee, and H. C. Kim, "WiMAX femtocells: A perspective on network architecture, capacity, and coverage," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 10, pp. 58-65, Oct. 2008.

[5] D. Calin, H. Clasussen, and H. Uzunalioglu, "On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 1, pp. 26-32, Jan. 2010.

[6] W. S. Jeon, J. Kim, and D. G. Jeong, "Downlink radio resource partitioning with fractional frequency reuse in femtocell networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, to appear, 2013.

[7] D. C. Oh and Y. H. Lee, "Cognitive radio based resource allocation in femto-cells," *J. Commun. Networks*, vol. 14, no. 3, pp. 252-256, June 2012.

[8] J. Guillet, L. Brunel, and N. Gresset, "Downlink femto-macro ICIC with location-based long-term power setting," in *Proc. IEEE CAMAD 2012*, Barcelona, Spain, Sept. 2012.

[9] M. Morita, Y. Matsunaga, and K. Hamabe, "Adaptive power level setting of femtocell base stations for mitigating interference with macrocells," in *Proc. IEEE VTC 2010-Fall*, Ottawa, Canada, Sept. 2010.

[10] S.-J. Lee, S.-Y. Kim, H.-W. Lee, S.-W. Ryu, and C.-H. Cho, "Adaptive power control schemes for interference mitigation in LTE femtocell networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 8, pp. 648-660, Aug. 2012.

[11] X. Chu, Y. Wu, and D. L.-Perez, "On providing downlink services in collocated spectrum-sharing macro and femto networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 4306-4315, Dec. 2011.

[12] H. Zhang, W. Zheng, X. Wen, and C. Jiang, "Signalling overhead evaluation of HeNB mobility enhanced schemes in 3GPP

LTE-Advanced," in *Proc. IEEE VTC Spring-2011*, Yokohama, Japan, May 2011.

[13] A. Ladanyi, D. L. Perez, A. Juttner, and C. Xiaoli, "Distributed resource allocation for femtocell interference coordination via power minimisation," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2011*, pp. 744-749, Houston, U.S.A., Dec. 2011.

[14] Femtocell Forum, *Interference management in OFDMA femtocells*, Retrieved May 2010, from <http://www.femtoforum.org>.

정 동 근 (Dong Geun Jeong)



1983년 서울대학교 제어계측 공학과 학사  
 1985년 서울대학교 제어계측 공학과 석사  
 1993년 서울대학교 제어계측 공학과 박사(통신)  
 1986년~1990년 한국데이터통

신 주임연구원

1994년~1997년 신세기통신 기술연구소 연구팀장  
 1997년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수  
 <관심분야> 이동통신시스템, 자원관리, 성능평가

김 유 석 (Yu Seok Kim)



2011년 8월 한국외국어대학교 전자공학과 학사  
 2013년 8월 한국외국어대학교 전자정보공학과 석사  
 2013년 8월~현재 삼성전자 무선사업부 연구원  
 <관심분야> 이기종 네트워크,

무선 자원 관리