

다양한 트래픽 속도를 갖는 IMT-2000 계층적 셀룰러 시스템의 순방향 링크 얼랑 용량 분석

정회원 이영용*, 이상문**, 최형진*

Forward Link Erlang Capacity of the IMT-2000 Hierarchical Cellular System with Mixed Traffic Rates

Young-yong Lee*, Sang-moon Lee**, Hyung-jin Choi* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 매크로셀/마이크로셀 기반의 계층적 셀 구조의 순방향 얼랑 용량 및 outage 확률을 수학적으로 분석하였다. 각 계층셀에는 음성 및 다양한 속도의 데이터 서비스 사용자가 균일하게 분포되어 있다고 가정하였으며 계층의 자원 분배 방법으로는 각 계층이 동일한 주파수 대역을 사용하는 대역 공유 방식을 적용하였다. 또한, 본 논문에서는 전력 제어의 불완전성에 의한 영향도 고려하였다. 대역 공유 계층셀 구조의 순방향 용량은 계층셀 기지국간 송신 전력비 및 매크로셀 내부에 위치한 마이크로셀의 상대적인 위치와 밀접한 관련이 있다는 결론을 내릴 수 있었으며 모의 실험 결과를 통해 증명하였다. 본 논문에서는 대역폭이 1.2288MHz인 1x 시스템과 광대역 3x 시스템의 순방향 얼랑 용량을 비교 분석하였으며 3x 시스템이 1x 시스템에 비해 3배 이상의 얼랑 용량 증대 효과를 가진다는 것을 제시하였다.

ABSTRACT

In this paper, the forward link erlang capacity and outage probability for hierarchical cellular system based on macrocell/microcell is derived analytically. We assume that voice and multi-rate data service users are distributed uniformly each cell and the same spectrum is applied in both layers. In addition, the analysis in this paper takes into account the impacts of imperfect power control. We can conclude that the forward link capacity for hierarchical cellular system is closely related to transmission power ratio between both layers and the relative position of microcell in macrocell, and that conclusion is proved by simulation results. We compare the forward link erlang capacity of 1x system to 3x system and show that 3x system can increase the user capacity by 3.45 and 3.65 times in case of macrocell and microcell, respectively, compared to 1x system.

I. 서론

간섭의 제한을 받는 CDMA 시스템의 용량을 증가시키는 방법으로는 전력제어, 소프트 핸드오프, 다기화, 코딩, 안테나 이득 등의 다양한 방법이 있

다^[9-12]. 계층적 셀 구조는 CDMA 시스템의 용량을 증가시킬 수 있는 방법 중의 하나로 크기가 서로 다른 셀을 중첩시켜 셀 용량을 극대화시키는 방법이다^[3-8]. 최근 무선 이동 통신 서비스에 대한 수요가 빠른 속도로 증가함에 따라 계층적 구조의 필요성은 더욱 증가하고 있다. 또한, IMT-2000에서도

* 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부(neohuman@ece.skku.ac.kr)

** 문경대학 정보통신과

논문번호: 010037-0314, 접수일자: 2001년 3월 14일

셀 용량을 증가시키기 위한 방법으로 매크로셀, 마이크로셀, 피코셀의 계층셀 구조를 지원하고 있다³⁾. 그러므로, 계층셀 구조에 대한 정확한 셀 용량 분석은 매우 중요하다.

최근, 계층셀 구조의 용량 분석이 여러 논문에서 제시되고 있다⁴⁻⁸⁾. 그러나, 대부분의 논문들이 음성 사용자를 중심으로 한 역방향 링크 용량의 분석을 다루고 있다. 이것은 대부분의 사람들이 CDMA 시스템의 용량을 좌우하는 링크가 역방향 링크라고 믿고 있기 때문이다. 그러나, 3세대 이동 통신 서비스에서는 역방향보다 순방향에서 더욱 빠른 속도의 데이터 및 무선 멀티미디어 서비스를 제공해야 하기 때문에 순방향 링크가 CDMA 시스템의 용량을 제약하는 링크가 될 것이라고 예상된다. 그러므로, 본 논문은 매크로셀/마이크로셀 기반 계층셀 구조의 순방향 링크 열량 용량 분석에 중점을 두었다.

순방향 링크의 용량을 구하기 위해서는 순방향 링크 간섭 계산이 선행되어야 한다. 순방향 링크의 간섭량을 계산하는 방법으로는 크게 두 가지가 존재한다. 첫 번째 방법으로 사용자에게 발생할 수 있는 최악의 상황에 대한 간섭량을 계산해 셀 용량의 하한선을 구하는 방법으로 일반적으로 정의되는 최악의 상황은 사용자가 자신이 접속된 셀 및 이웃한 두 셀의 셀 경계 지점에 위치하는 경우이다⁶⁾. 순방향의 셀 용량을 구하는 또 한가지 방법으로는 순방향 전력 할당 히스토그램을 이용하는 것이다. 이 방법은 문헌 [10]에 제시된 방법으로 사용자에게 수신되는 기지국 전력의 상대적인 측정량을 이용하는 것이다. 그러나, 첫 번째 방식은 계층셀 구조에서 적용하기가 매우 곤란하다. 왜냐하면, 계층셀 구조에서는 매크로셀과 마이크로셀 사용자에게 발생할 수 있는 최악의 상황이 서로 다르며 최악의 상황에 대한 설정 또한 매우 모호하기 때문이다. 그러므로, 본 논문에서는 계층셀 구조의 셀 용량 분석에 매우 적합한 방법으로 판단되는 순방향 링크 전력 할당 히스토그램을 이용하여 간섭량을 계산하였다.

본 논문에서는 매크로셀/마이크로셀 기반 계층셀 구조의 순방향 링크 열량 용량을 음성 및 다양한 속도의 데이터 서비스가 혼합된 환경에서 수학적으로 분석하였다. 대역폭은 1.2288 MHz인 1x 시스템과 대역폭이 3.6864 MHz인 3x 시스템을 고려하였으며 계층셀 구조에서 각 계층은 동일한 대역폭을 사용한다고 가정하였다. 또한, 불완전한 전력 제어의 영향을 고려하여 outage 확률 및 열량 용량을 분석하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 망 및 시스템 모델링을 다루었다. III장에서는 순방향 링크 간섭을 토대로 한 열량 용량 및 outage 확률을 분석하였으며 IV장에서는 III장에서 수식을 이용하여 계층셀 순방향 링크 열량 용량을 분석하였다. 마지막으로 V장에서는 결론에 대해 논하였다.

II. 망 및 채널 모델

본 논문에서 고려한 무선 망 모델은 그림 1과 같다. 매크로셀 및 마이크로셀의 기지국은 셀 중앙에 위치하며 매크로셀 내부에 하나의 마이크로셀만이 존재한다고 가정하였다.

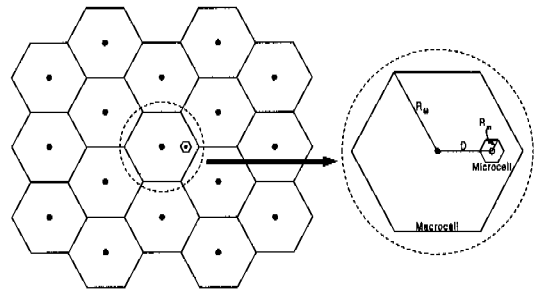


그림 1. 계층셀 구조

신호의 감쇠는 주로 long-term 페이딩과 관련되어 있다고 가정함으로써 전파전파를 모델링하였으며 다중 경로에 의한 레일리 페이딩의 영향은 고려하지 않았다. 본 논문에서 적용한 전파전파 모델은 다음과 같다^{5)[7]}.

$$P_r = L_p P_t = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{10^{L/10}}{d^2} P_t, & d \leq d_{BP} \text{ (inner area)} \\ (h_{bs} h_{ms})^2 \frac{10^{L/10}}{d^4} P_t, & d > d_{BP} \text{ (outer area)} \end{cases} \quad (1)$$

여기에서, P_r 은 기지국 안테나로부터 거리 d 에 위치한 이동국의 수신 신호 전력, L_p 는 전파전파 손실, P_t 는 기지국의 송신 전력, λ 는 파장, L 은 감쇠 지수, h_{bs} 는 기지국 안테나 높이, h_{ms} 는 이동국 안테나 높이를 나타낸다.

d_{BP} 는 경로 손실 변환 지점(break point)으로 $d_{BP} = \sqrt{r^2 + (h_{bs} - h_{ms})^2}$ 와 같이 정의할 수 있다.

여기에서, r 은 기지국과 이동국 사이의 지상 거리이다. ζ 는 음영 효과에 의한 dB 손실로 평균이 0이고 표준 편차는 σ 이다.

특정 매크로셀 기지국 j 로부터 그 셀에 접속된 매크로셀 사용자 i 에게 수신되는 신호 전력 $P_r^{M_i M_i}$, 마이크로셀 기지국 j 로부터 매크로셀 사용자 i 에게 수신되는 신호 전력 $P_r^{\mu_i M_i}$, 매크로셀 기지국 j 로부터 마이크로셀 사용자 i 에게 수신되는 신호 전력 $P_r^{M_i \mu_i}$, 마이크로셀 기지국 j 로부터 마이크로셀 사용자 i 에게 수신되는 신호 전력 $P_r^{\mu_i \mu_i}$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$P_r^{M_i M_i} = L_p^{M_i M_i} P_t^M \quad (2)$$

$$P_r^{\mu_i M_i} = L_p^{\mu_i M_i} P_t^M \quad (3)$$

$$P_r^{M_i \mu_i} = L_p^{M_i \mu_i} P_t^M \quad (4)$$

$$P_r^{\mu_i \mu_i} = L_p^{\mu_i \mu_i} P_t^M \quad (5)$$

여기에서, $L_p^{M_i M_i}$ 은 매크로셀 기지국 j 와 그 셀에 접속된 매크로셀 사용자 i 사이에서 발생하는 전파전파 손실, $L_p^{\mu_i M_i}$ 는 마이크로셀 기지국 j 와 매크로셀 사용자 i 사이에서 발생하는 전파전파 손실, $L_p^{M_i \mu_i}$ 은 매크로셀 기지국 j 와 마이크로셀 사용자 i 사이에서 발생하는 전파전파 손실, $L_p^{\mu_i \mu_i}$ 은 마이크로셀 기지국 j 와 그 셀에 접속된 마이크로셀 사용자 i 사이에서 발생하는 전파전파 손실을 의미한다. 또한, P_t^M 과 P_t^M 은 각각 매크로셀 기지국과 마이크로셀 기지국의 송신 전력을 의미한다.

매크로셀 기지국의 송신 전력 P_t^M 과 마이크로셀 기지국의 송신 전력 P_t^M 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다고 정의한다.

$$\Delta P = \frac{P_t^M}{P_t^M} \quad (6)$$

III. 계층셀 구조 순방향 열량 용량 분석

본 절에서는 매크로셀/마이크로셀 기반 계층셀 구조의 순방향 링크 outage 확률을 유도하여 열량 용량을 분석하였다. 일반적으로 순방향 전송에서 전력 제어는 주어진 셀에서 각 가입자의 요구에 따라

기지국 송신기에서의 전력 할당 형태를 취한다^{[9][10]}. 이를 위해서 각 이동국은 지금 속해있는 셀의 기지국으로부터의 총 송신 전력에 대한 수신 전력의 비율로 정의되는 신호 대 잡음비를 측정할 필요가 있다.

특정 매크로셀 기지국에 의해 서비스를 제공받는 i 번째 매크로셀 사용자에게 수신되는 $(E_b/I_0)_{M_i}$ 및 특정 마이크로셀 기지국에 의해 서비스를 제공받는 i 번째 마이크로셀 사용자에게 수신되는 $(E_b/I_0)_{\mu_i}$ 는 다음과 같다.

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{M_i} = \frac{\Psi \Phi_{M_i} P_r^{M_i M_i} / R}{\left[\sum_{j=1}^{K_M} P_r^{M_i M_i} + \sum_{j=1}^{K_\mu} P_r^{\mu_i M_i} + N_0 W \right] / W} \quad (7)$$

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{\mu_i} = \frac{\Psi \Phi_{\mu_i} P_r^{\mu_i \mu_i} / R}{\left[\sum_{j=1}^{K_M} P_r^{M_i \mu_i} + \sum_{j=1}^{K_\mu} P_r^{\mu_i \mu_i} + N_0 W \right] / W} \quad (8)$$

여기에서, $P_r^{M_i M_i}$ 은 매크로셀 사용자 i 에게 가장 높은 전력으로 수신되는 매크로셀 기지국 전력으로 $P_r^{M_i M_i} > P_r^{M_i \mu_i}$ 와 $P_r^{M_i M_i} > P_r^{\mu_i M_i}$ 이다. $P_r^{\mu_i \mu_i}$ 은 마이크로셀 사용자 i 에게 가장 높은 전력으로 수신되는 마이크로셀 기지국 전력으로 $P_r^{\mu_i \mu_i} > P_r^{M_i \mu_i}$ 와 $P_r^{\mu_i \mu_i} > P_r^{\mu_i M_i}$ 이다. Ψ 는 기지국 송신 전력 중에서 트래픽 채널에 할당되는 전력비로 전송 전력의 20%를 파일럿 신호에 공급하므로 $\Psi = 0.8$ 을 취한다^{[9][10]}. Φ_{M_i} 는 매크로셀 기지국의 트래픽 채널 송신 전력 중에서 i 번째 매크로셀 사용자에 할당되는 비율, Φ_{μ_i} 는 마이크로셀의 트래픽 채널 송신 전력 중에서 i 번째 마이크로셀 사용자에 할당되는 비율을 의미한다. R 은 데이터 속도, K_M 은 간섭 계산에 적용한 매크로셀의 최대수, K_μ 은 간섭 계산에 적용한 마이크로셀의 최대수, N_0 는 열잡음 전력 밀도, W 는 확산 대역폭을 의미한다.

매크로셀 사용자 i 에게 수신되는 $(E_b/I_0)_{M_i}$ 및 마이크로셀 사용자 i 에게 수신되는 $(E_b/I_0)_{\mu_i}$ 는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{M_i} = \frac{W}{R} \frac{\Psi \Phi_{M_i}}{1 + \frac{\sum_{j=2}^{K_M} P_r^{M_i M_i}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{\sum_{j=1}^{K_\mu} P_r^{\mu_i M_i}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{M_i M_i}}} \quad (9)$$

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{\mu_i} = \frac{W}{R} \frac{\Psi \Phi_{\mu_i}}{1 + \frac{\sum_{j=1}^{K_j} P_r^{M_j \mu_i}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{\sum_{j=2}^{K_j} P_r^{\mu_j \mu_i}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{\mu_i \mu_i}}} \quad (10)$$

매크로셀 사용자 또는 마이크로셀 사용자에게 수신되는 E_b/I_0 는 사용자가 제공받는 서비스 종류에 따라 서로 다르다. 만약, v 를 음성 서비스, $d_j(j=1, 2, \dots, \Omega)$ 를 다양한 속도의 데이터 서비스라고 정의한다면, 음성 또는 다양한 속도의 데이터 서비스를 제공받는 매크로셀 사용자의 수신 E_b/I_0 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_i^v = \frac{W}{R_v} \frac{\Psi \Phi_{M_i}^v}{1 + \frac{I_{oc}^{MM}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu M}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{M_i M_i}}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_i^{d_j} = \frac{W}{R_{d_j}} \frac{\Psi \Phi_{M_i}^{d_j}}{1 + \frac{I_{oc}^{MM}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu M}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{M_i M_i}}} \quad (12)$$

여기에서, ε 는 매크로셀 사용자에게 수신되는 $(E_b/I_0)_M$ 을 의미한다.

$I_{oc}^{MM} (= \sum_{j=1}^{K_j} P_r^{M_j M_i})$ 및 $I_{oc}^{\mu M} (= \sum_{j=1}^{K_j} P_r^{\mu_j M_i})$ 는 각각 타 매크로셀 기지국들로부터 서비스를 제공하는 매크로셀 기지국으로의 타셀 간섭, 마이크로셀 기지국들로부터 서비스를 제공하는 매크로셀 기지국으로의 타셀 간섭을 의미한다.

다양한 속도의 서비스를 제공받는 마이크로셀 사용자에게 수신되는 E_b/I_0 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_i^v = \frac{W}{R_v} \frac{\Psi \Phi_{\mu_i}^v}{1 + \frac{I_{oc}^{M\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{\mu_i \mu_i}}} \quad (13)$$

$$\gamma_i^{d_j} = \frac{W}{R_{d_j}} \frac{\Psi \Phi_{\mu_i}^{d_j}}{1 + \frac{I_{oc}^{M\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{N_0 W}{P_r^{\mu_i \mu_i}}} \quad (14)$$

여기에서, γ 는 마이크로셀 사용자에게 수신되는 $(E_b/I_0)_\mu$ 를 의미한다.

$I_{oc}^{M\mu} (= \sum_{j=1}^{K_j} P_r^{M_j \mu_i})$ 및 $I_{oc}^{\mu\mu} (= \sum_{j=2}^{K_j} P_r^{\mu_j \mu_i})$ 는 각각 매크로셀 기지국들로부터 서비스를 제공하는 마이크

로셀 기지국으로의 타셀 간섭, 타 마이크로셀 기지국들로부터 서비스를 제공하는 마이크로셀 기지국으로의 타셀 간섭을 의미한다.

일반적으로, 배경잡음은 사용자에게 가장 큰 전력으로 수신된 기지국 전력에 비해 충분히 작기 때문에 무시할 수 있다^{[9][10]}. 그러므로, 이후의 수식 유도 과정에서는 식 (11)과 식 (12), 그리고 식 (13)과 식 (14)의 분모 항에 위치한 $N_0 W/P_r^{M_i M_i}$ 및 $N_0 W/P_r^{\mu_i \mu_i}$ 를 고려하지 않기로 한다.

식 (11)과 식 (12)로부터 음성 및 다양한 속도의 데이터 서비스를 사용하는 i 번째 매크로셀 사용자에게 할당되는 전력비 $\Phi_{M_i}^v, \Phi_{M_i}^{d_1}, \dots, \Phi_{M_i}^{d_\Omega}$ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\Phi_{M_i}^v = \frac{\varepsilon_i^v}{\Psi} \frac{R_v}{W} y_i^M \quad (15)$$

$$\Phi_{M_i}^{d_j} = \frac{\varepsilon_i^{d_j}}{\Psi} \frac{R_{d_j}}{W} y_i^M \quad j = 1, 2, \dots, \Omega \quad (16)$$

여기에서, $y_i^M (= 1 + \frac{I_{oc}^{MM}}{P_r^{M_i M_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu M}}{P_r^{M_i M_i}})$ 는 i 번째 매크로셀 사용자에게 수신된 기지국 전력의 상대적인 측정량을 의미한다^{[9][10]}.

식 (13)과 식 (14)로부터 음성 및 다양한 속도의 데이터 서비스를 사용하는 i 번째 마이크로셀 사용자에게 할당되는 전력비 $\Phi_{\mu_i}^v, \Phi_{\mu_i}^{d_1}, \dots, \Phi_{\mu_i}^{d_\Omega}$ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\Phi_{\mu_i}^v = \frac{\gamma_i^v}{\Psi} \frac{R_v}{W} y_i^\mu \quad (17)$$

$$\Phi_{\mu_i}^{d_j} = \frac{\gamma_i^{d_j}}{\Psi} \frac{R_{d_j}}{W} y_i^\mu \quad j = 1, 2, \dots, \Omega \quad (18)$$

여기에서, $y_i^\mu (= 1 + \frac{I_{oc}^{M\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}} + \frac{I_{oc}^{\mu\mu}}{P_r^{\mu_i \mu_i}})$ 는 i 번째 마이크로셀 사용자에게 수신된 기지국 전력의 상대적인 측정량을 의미한다^{[9][10]}.

순방향 링크에서 y_i^M 및 y_i^μ 의 분포는 역방향 링크와는 달리 순위가 매겨진 로그-노말 확률 변수, 즉 타 기지국 전력의 합에 영향을 받고 분석이 불가능하므로 Monte-Carlo 시뮬레이션을 사용하여 구한다. 시뮬레이션으로부터 구한 상대적인 기지국 전력의 측정량의 분포도를 순방향 전력 할당 히스토그램이라고 한다^{[9][10]}.

매크로셀 사용자들에게 할당된 전력비의 총합 및 마이크로셀 사용자들에게 할당된 전력비의 총합은 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$\sum_i \phi_{M_i}^v + \sum_{j=1}^{K_d} \sum_i \phi_{M_i}^{d_j} \leq 1 \quad (19)$$

$$\sum_i \phi_{\mu_i}^v + \sum_{j=1}^{K_d} \sum_i \phi_{\mu_i}^{d_j} \leq 1 \quad (20)$$

1. 완벽한 전력 제어 조건

본 절에서는 전력 제어가 완벽하다고 가정하여 계층셀 구조의 순방향 링크 outage 확률을 분석하였다. 완벽한 전송 전력 제어란 전력 제어가 실행되었을 때 각 사용자의 수신 E_b/I_0 가 전력 제어가 목표로 하는 E_b/I_0 로 정확하게 수립되는 것을 의미한다^[1]. 매크로셀에서 음성 및 다양한 속도를 갖는 데이터 사용자의 목표 E_b/I_0 를 각각 $\epsilon^v, \epsilon^{d_j}$ ($j = 1, 2, \dots, \Omega$)라고 가정하자. 또한, 마이크로셀에서 음성 및 다양한 속도를 갖는 데이터 사용자의 목표 E_b/I_0 를 각각 γ^v, γ^{d_j} ($j = 1, 2, \dots, \Omega$)라고 가정하자. 전력 제어가 완벽한 경우 outage 확률에 영향을 주는 확률 변수는 음성 및 데이터의 호의 수 및 활성화된 음성 및 데이터 사용자의 수이다^[1].

전력 제어가 완벽한 경우 매크로셀의 outage 확률 P_{out}^M 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out}^M &= \Pr [BER > 10^{-3}] \\ &= \Pr \left[\sum_i \phi_{M_i}^v + \sum_{j=1}^{K_d} \sum_i \phi_{M_i}^{d_j} > 1 \right] \\ &= \Pr \left[\frac{R_v}{W} \epsilon^v y^M \sum_{i=1}^K \nu_i^v + \frac{R_{d_j}}{W} \epsilon^{d_j} y^M \sum_{i=1}^{K_d} \nu_i^{d_j} + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_{d_\Omega}}{W} \epsilon^{d_\Omega} y^M \sum_{i=1}^{K_d} \nu_i^{d_\Omega} > \Psi \right] \\ &= \Pr \left[Z = \frac{\epsilon^v}{G_v} Z_v + \frac{\epsilon^{d_1}}{G_{d_1}} Z_{d_1} + \dots + \frac{\epsilon^{d_\Omega}}{G_{d_\Omega}} Z_{d_\Omega} > \frac{\Psi}{y^M} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

여기에서, K_v 는 음성 사용자수, K_{d_j} ($j = 1, 2, \dots, \Omega$)은 d_j -class 데이터 사용자수를 의미하며 $K_v, K_{d_1}, \dots, K_{d_\Omega}$ 는 각각 Poisson 분포를 갖는 확률 변수이다. ν^v 와 ν^{d_j} 는 음성 및 d_j -class 데이터 사용자의 활성화를 의미하는 확률 변수로 $P[\nu^v = 1] = \alpha^v, P[\nu^{d_j} = 1] = \alpha^{d_j}$ 이다. y^M 는 y_i^M 의 평균을 의미한다. $G_v = W/R_v$ 이고 $G_{d_j} = W/R_{d_j}$

로 음성 및 다양한 속도를 갖는 데이터 서비스의 처리 이득을 의미한다.

$Z_v = \sum_{i=1}^{K_v} \nu_i^v, Z_{d_j} = \sum_{i=1}^{K_{d_j}} \nu_i^{d_j}$ ($j = 1, 2, \dots, \Omega$)는 활성화된 음성 및 데이터 사용자들의 수를 의미하며 평균이 각각 $\alpha^v \lambda_v / \mu_v$ 와 $\alpha_{d_j} \lambda_{d_j} / \mu_{d_j}$ 인 독립적인 확률 변수로 Poisson 분포를 갖는다^[1]. 여기에서, $\lambda(\cdot)$ 는 호 도착률, $\mu(\cdot)$ 는 각 서비스의 평균 호 주기를 의미한다. 또한, Z 는 수신된 부하량의 합을 의미한다.

그러므로, 전력 제어가 완벽한 경우에 대한 매크로셀의 outage 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out}^M &= e^{-\left(\frac{\alpha^v \lambda_v}{\mu_v} + \frac{\alpha_{d_1} \lambda_{d_1}}{\mu_{d_1}} + \dots + \frac{\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega}}{\mu_{d_\Omega}} \right)} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(\alpha^v \lambda_v / \mu_v)^v}{v!} \\ &\quad \sum_{d_1=0}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_1} \lambda_{d_1} / \mu_{d_1})^{d_1}}{d_1!} \dots \sum_{d_\Omega=\eta}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega} / \mu_{d_\Omega})^{d_\Omega}}{d_\Omega!} \end{aligned} \quad (22)$$

여기에서, η 는

$$\left\lfloor \frac{\Psi / y^M - v \epsilon^v / G_v - d_1 \epsilon^{d_1} / G_{d_1} - \dots - d_{\Omega-1} \epsilon^{d_{\Omega-1}} / G_{d_{\Omega-1}}}{\epsilon^{d_\Omega} / G_{d_\Omega}} \right\rfloor$$

이며 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 를 넘지 않는 최대 정수를 의미한다.

전력 제어가 완벽한 경우 마이크로셀의 outage 확률 또한 위와 동일한 절차를 이용하여 구할 수 있다.

2. 불완전한 전력 제어 조건

고정된 목적 E_b/I_0 를 적용한 완벽한 전력 제어에 의한 결과는 순방향 링크 열량 용량의 상한선으로 유용하다. 그러나, 실제 상황에서 각 사용자의 수신 E_b/I_0 는 매우 가변적이며 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째, 전력 제어 명령은 오류 정정 부호화 및 채널 부호화를 하지 않고 전송되므로 정보 비트보다 비트 오류가 발생할 확률이 매우 높다. 그러므로, 이동국의 응답이 원하는 응답과 반대가 될 수 있다. 두 번째, 지나치게 빠른 고속 페이딩은 전력 제어 루프에 의한 전력 제어가 거의 불가능하다. 마지막으로, 각 서비스 사용자의 다중 경로 전파 환경이 서로 다르기 때문이다^[1].

그러므로, 전력 제어가 불완전한 경우에 대한 매크로셀의 outage 확률은 다음과 같이 유도될 수 있

다.

$$\begin{aligned}
 P_{out}^M &= \Pr \left[\frac{y^M}{G_v} \sum_{i=1}^{K_v} \nu_i^v \varepsilon_i^v + \frac{y^M}{G_{d_1}} \sum_{i=1}^{K_{d_1}} \nu_i^{d_1} \varepsilon_i^{d_1} + \dots \right. \\
 &\quad \left. + \frac{y^M}{G_{d_\Omega}} \sum_{i=1}^{K_{d_\Omega}} \nu_i^{d_\Omega} \varepsilon_i^{d_\Omega} > \Psi \right] \\
 &= \Pr \left[Z = \frac{1}{G_v} Z_v + \frac{1}{G_{d_1}} Z_{d_1} + \dots + \frac{1}{G_{d_\Omega}} Z_{d_\Omega} > \frac{\Psi}{y^M} \right] \quad (23)
 \end{aligned}$$

위 식에서 $\varepsilon_i^{(\cdot)}$ 는 i.i.d(identical independent distributed) 로그-노말 확률 변수이므로 $Z(\cdot)$ 또한 로그-노말 확률 변수라고 가정할 수 있다. 여기에서,

$$Z_v = \sum_{i=1}^{K_v} \nu_i^v \varepsilon_i^v, \quad Z_{d_j} = \sum_{i=1}^{K_{d_j}} \nu_i^{d_j} \varepsilon_i^{d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, \Omega)$$

다. 로그-노말 확률 변수의 유한 합은 로그-노말 확률 변수이므로 Z 는 로그-노말 확률 변수라고 정의할 수 있다¹¹⁾. Outage 확률을 계산하기 위한 근사화 방법으로서 가우시안 근사화와 로그-노말 근사화를 들 수 있다. 이 중 사용자 수가 적을 때 로그-노말 근사화는 가우시안 근사화보다 더욱 정확하다¹¹⁾. 그러므로, 본 논문에서는 로그-노말 근사화 방법을 이용하여 outage 확률을 유도하였다.

전력 제어가 불완전한 경우에 대한 매크로셀의 outage 확률은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{out}^M &= e^{-\left(\frac{\alpha_v \lambda_v}{\mu_v} + \frac{\alpha_{d_1} \lambda_{d_1}}{\mu_{d_1}} + \dots + \frac{\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega}}{\mu_{d_\Omega}}\right) \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(\alpha_v \lambda_v / \mu_v)^v}{v!}} \\
 &\quad \sum_{d_1=0}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_1} \lambda_{d_1} / \mu_{d_1})^{d_1}}{d_1!} \dots Q\left(\frac{\ln(\Psi / y^M) - E(Z)}{\sqrt{\text{var}(Z)}}\right) \\
 &\quad \sum_{d_\Omega=0}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega} / \mu_{d_\Omega})^{d_\Omega}}{d_\Omega!} \quad (24)
 \end{aligned}$$

여기에서,

$$Q(x) = \int_x^{\infty} e^{-x^2/2} dx / \sqrt{2\pi}$$

이다.

식 (24)에서 $Z = \ln(Z)$ 으로 평균이 $E[Z]$, 분산이 $\text{Var}[Z]$ 인 조건부 가우시안 확률 변수로 Z 의 평균과 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Var}[Z] = \ln\left(\frac{\text{Var}(Z)}{E^2[Z]} + 1\right) \quad (25)$$

$$E[Z] = \ln(E[Z]) - 0.5 \text{Var}(Z) \quad (26)$$

또한, Z 의 평균과 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E[Z] &= \frac{v}{G_v} \cdot f(m_v, \sigma_v) + \frac{d_1}{G_{d_1}} \cdot f(m_{d_1}, \sigma_{d_1}) \quad (27) \\
 &\quad + \dots + \frac{d_\Omega}{G_{d_\Omega}} \cdot f(m_{d_\Omega}, \sigma_{d_\Omega})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Var}[Z] &= \left(\frac{1}{G_v}\right)^2 \cdot v \cdot h(m_v, \sigma_v) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{G_{d_1}}\right)^2 \cdot d_1 \cdot h(m_{d_1}, \sigma_{d_1}) + \dots \quad (28) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{G_{d_\Omega}}\right)^2 \cdot d_\Omega \cdot h(m_{d_\Omega}, \sigma_{d_\Omega})
 \end{aligned}$$

여기에서, $\beta = \ln(10)/10$, $f(a, b) = \exp[\beta a + (\beta b)^2 / 2]$, $h(a, b) = \exp[2\beta a + (\beta a)^2] \cdot \exp[(\beta b)^2 - 1]$ 이다.

전력 제어가 불완전한 조건에서 마이크로셀의 outage 확률 또한 매크로셀의 outage 확률을 구하는 과정과 동일하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{out}^\mu &= e^{-\left(\frac{\alpha_v \lambda_v}{\mu_v} + \frac{\alpha_{d_1} \lambda_{d_1}}{\mu_{d_1}} + \dots + \frac{\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega}}{\mu_{d_\Omega}}\right) \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(\alpha_v \lambda_v / \mu_v)^v}{v!}} \\
 &\quad \sum_{d_1=0}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_1} \lambda_{d_1} / \mu_{d_1})^{d_1}}{d_1!} \dots Q\left(\frac{\ln(\Psi / y^\mu) - E(Z)}{\sqrt{\text{var}(Z)}}\right) \\
 &\quad \sum_{d_\Omega=0}^{\infty} \frac{(\alpha_{d_\Omega} \lambda_{d_\Omega} / \mu_{d_\Omega})^{d_\Omega}}{d_\Omega!} \quad (29)
 \end{aligned}$$

IV. 수치 해석 결과

본 절에서는 앞에서 유도한 수식을 이용해 대역 공유 계층셀 시스템의 순방향 링크 간섭 및 용량을 계산하였다. 간섭 계산을 위해 고려한 외부 매크로셀의 tier 수는 3이며 매크로셀 내부에는 하나의 마이크로셀만이 존재한다고 고려하였다. 간섭 및 용량 계산을 위해 적용한 시스템 파라미터가 표 1에 정

표 1. 시스템 파라미터들

	매크로셀	마이크로셀
이동국 안테나 높이	1.5m	1.5m
기지국 안테나 높이	60m	9m
경로손실 감쇠지수	4, 2	4, 2
음영손실 표준편차	8dB	4dB
셀 반경	10km	1km
chip rate	1.2288, 3.6864Mcps	
캐리어 주파수	2GHz	

의되어 있다.

그림 2와 그림 3은 매크로셀 및 마이크로셀의 순방향 전력 할당 히스토그램을 나타낸 것이다. 기존의 평면셀에서 순방향 전력 할당 히스토그램을 구할 때에는 대칭성의 원리에 의해 평면셀의 일정 부분에 수신되는 신호 전력만을 이용하였다^{[9][10]}. 그러나, 매크로셀/마이크로셀 기반의 순방향 전력 할당 히스토그램을 구하는 경우에는 이러한 대칭성의 원리가 성립하지 않으므로 전체 셀을 모두 이용하였다. 그러므로, 본 논문에서는 매크로셀 및 마이크로셀 각각에 600 개의 점을 등간격으로 배치하였다. 등간격으로 배치된 각 사용자마다 10회씩 반복하여 $y_i^M - 1$ 및 $y_i^m - 1$ 의 분포를 구하였다.

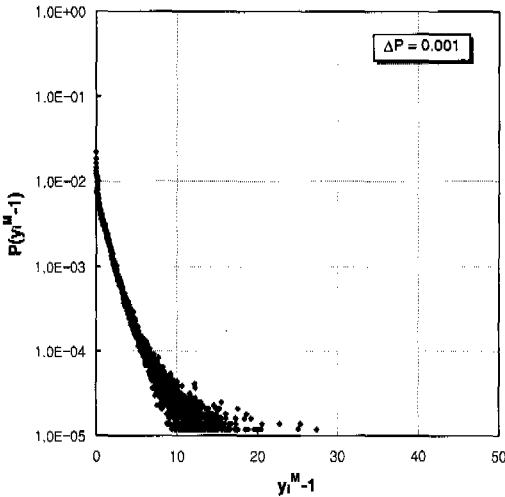


그림 2. 매크로셀의 순방향 전력 할당 히스토그램 ($\Delta P = 0.001, NP = 0.6$)

그림 2는 $y_i^M - 1$ 의 분포도로 ΔP 가 0.001인 조건에서 매크로셀의 순방향 전력 할당 히스토그램을 나타낸 것이다. 매크로셀 내부에서 마이크로셀의 정규화된 위치(Normalized Position; 이하 NP)는 0.6을 고려하였다. 여기에서, 마이크로셀의 정규화된 위치란 매크로셀의 반경 R_M 을 1로 정규화한 조건에서 마이크로셀의 상대적인 위치를 의미한다.

그림 3은 $y_i^m - 1$ 의 분포도로 ΔP 가 0.1인 조건에서 마이크로셀의 전력 할당 히스토그램을 나타낸 것이다. 마이크로셀의 정규화된 위치는 0.8을 적용하였다. 본 논문에서는 이와 같은 방식으로 전력 할당 히스토그램으로부터 간섭량을 계산하여 열량 용량을 분석하였다.

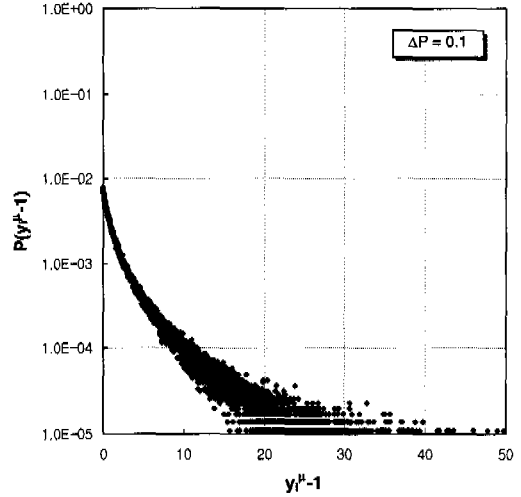


그림 3. 마이크로셀의 순방향 전력 할당 히스토그램 ($\Delta P = 0.1, NP = 0.8$)

그림 4는 전력 제어가 완벽한 조건에서 1%의 outage 확률을 갖는 매크로셀의 열량 용량과 마이크로셀의 용량을 나타낸 것이다.

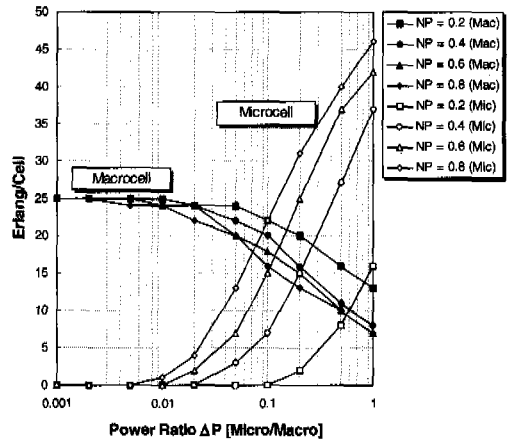


그림 4. 대역 공유 계층셀 시스템의 순방향 용량(완벽한 전력 제어, 9.6 kbps 음성 서비스)

대역폭은 1.2288 MHz이며 9.6kbps의 음성 서비스만을 고려하였다. 매크로셀 내부에서 마이크로셀의 정규화된 위치는 0.2부터 0.8까지를 고려하였다. 매크로셀에서 요구되어지는 평균 $(E_b/N_0)_{req}^M$ 및 마이크로셀에서 요구되어지는 평균 $(E_b/N_0)_{req}^m$ 는 각각 5dB를 적용하였다. 그림 4로부터 마이크로셀이 기준 매크로셀의 기지국으로부터 멀어질수록 매크로

셀의 용량은 감소하며 마이크로셀의 용량은 증가하는 것을 알 수 있으며 마이크로셀이 매크로셀 기지국에 가까워질수록 그 반대 현상이 나타난다. 또한, 기지국간 송신 전력비가 커질수록 매크로셀의 용량은 감소하며 마이크로셀의 용량은 증가하는 것을 알 수 있다.

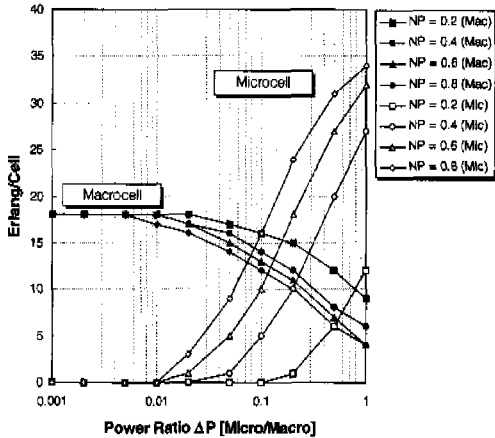


그림 5. 대역 공유 계층셀 시스템의 순방향 용량 (전력 제어 어러 2.5dB, 9.6kbps 음성서비스)

그림 5는 전력 제어 오류가 2.5dB인 조건에서 1%의 outage 확률을 갖는 매크로셀의 얼랑 용량과 마이크로셀의 얼랑 용량을 나타낸 것이다. 나머지 조건 변수는 그림 4에 적용한 것과 동일하다. 전송 전력 제어가 완벽한 그림 4의 결과와 비교할 때 매크로셀은 약 28%, 마이크로셀은 약 30%의 얼랑 용량 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 4와 5를 통해 매크로셀 내부에서 마이크로셀의 상대적인 위치는 0.4에서 0.6, 계층셀간 송신 전력비는 0.1에서 0.2 정도가 적당하고 사료된다. 그러나, 송신 전력비는 셀 반경 비율에 따라 변경될 소지가 있는 값이다.

그림 6은 대역폭이 1.2288MHz, 전력 제어 오류가 2.5dB, 음성 및 데이터 서비스 속도가 각각 9.6kbps, 64kbps, 128kbps인 조건에서 1%의 outage 확률을 갖는 매크로셀의 얼랑 용량을 나타낸 것이다. 마이크로셀의 상대적인 위치는 0.6이며 계층셀간 송신 전력비는 0.2이다. 또한 음성 및 데이터 서비스의 목적 E_b/I_0 는 각각 4dB, 3dB, 3dB를 적용하였다.

그림 7은 1%의 outage 확률을 갖는 마이크로셀의 얼랑 용량의 용량을 나타낸 것이다. 모든 조건

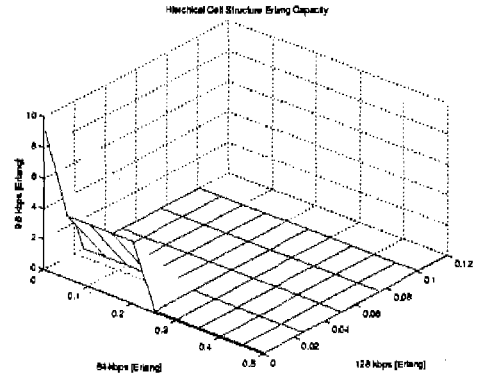


그림 6. 세 종류 서비스를 제공하는 1x 계층셀 시스템의 매크로셀 얼랑 용량(9.6 kbps 음성, 64 kbps 데이터, 128 kbps 데이터)

변수는 그림 6에 적용한 것과 동일하다. 그림 6과 그림 7로부터 마이크로셀이 매크로셀에 비해 고속 데이터 서비스 얼랑 용량의 관점에서 매우 우수하다는 것을 알 수 있으나 대역폭이 1.2288MHz인 경우에 단순히 계층셀 구조만으로 128kbps이상의 서비스를 제공하는 것이 힘들다는 것을 알 수 있다.

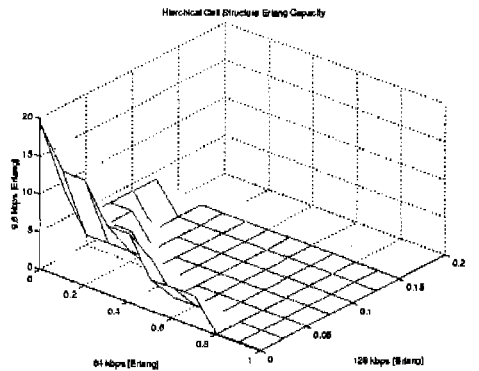


그림 7. 세 종류 서비스를 제공하는 1x 계층셀 시스템의 마이크로셀 얼랑 용량(9.6 kbps 음성, 64 kbps 데이터, 128 kbps 데이터)

그림 8은 대역폭이 3.6864MHz, 전력 제어 오류가 2.5dB, 음성 및 데이터 서비스 속도가 각각 9.6kbps, 64kbps, 128kbps인 조건에서 1%의 outage 확률을 갖는 매크로셀의 얼랑 용량을 나타낸 것이다. 마이크로셀의 상대적인 위치는 0.6이며 계층셀간 송신 전력비는 0.2이다. 또한 음성 및 데이터 서비스의 목적 E_b/I_0 는 각각 4dB, 3dB, 3dB를 적용

하였다.

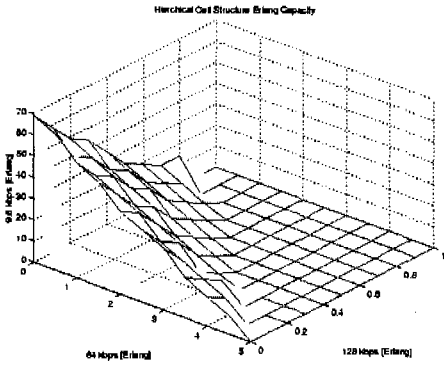


그림 8. 세 종류 서비스를 제공하는 3x 계층셀 시스템의 매크로셀 열량 용량(9.6 kbps 음성, 64 kbps 데이터, 128 kbps 데이터)

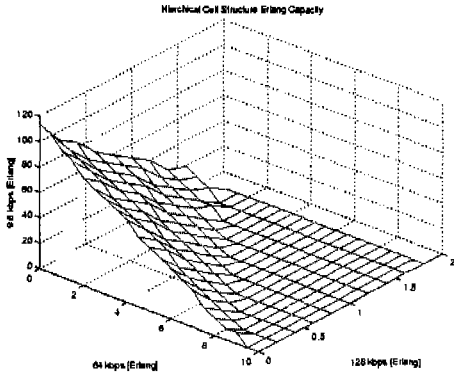


그림 9. 세 종류 서비스를 제공하는 3x 계층셀 시스템의 마이크로셀 열량 용량(9.6 kbps 음성, 64 kbps 데이터, 128 kbps 데이터)

그림 9는 1%의 outage 확률을 갖는 마이크로셀의 열량 용량을 나타낸 것이다. 모든 조건 변수는 그림 8에 적용한 것과 동일하다. 그림 8과 그림 9를 통해 3x 시스템의 순방향 열량 용량이 1x 시스템의 순방향 열량 용량에 비해 3배 이상의 용량 증대 효과가 있으며 특히 고속 데이터 서비스에 대한 열량 용량 측면에서는 10배 정도의 열량 용량 증가가 이루어지는 것을 관찰할 수 있다.

그림 10은 대역폭이 3.6864MHz, 전력 제어 오류가 2.5dB, 음성 및 데이터 서비스 속도가 각각 9.6kbps, 128kbps, 384kbps인 조건에서 1%의 outage 확률을 갖는 매크로셀의 열량 용량의 용량을 나타낸 것이다. 마이크로셀의 상대적인 위치는 0.6이며 계층셀간 송신 전력비는 0.2이다. 또한 음성 및 데이터 서비스의 목적 E_b/I_0 는 각각 4dB,

3dB, 3dB를 적용하였다. 그림 11은 1%의 outage 확률을 갖는 마이크로셀의 열량 용량의 용량을 나타낸 것으로 나머지 조건 변수는 그림 10에 적용한 것과 동일하다.

그림 10과 그림 11로부터 대역폭이 3.6864MHz인 3x 계층셀 시스템에서도 한 채널로 384kbps 이상의 데이터 속도를 지원하는 것이 매우 힘들다는 결론을 내릴 수 있다. 물론 본 논문에서는 마이크로셀 영역에 매크로셀 사용자가 분포할 수 있다고 가정, 즉 완벽한 핸드오버를 가정하지 않고 간섭을 계산하였기 때문에 셀 용량이 크게 나오지 않은 측면도 있다.

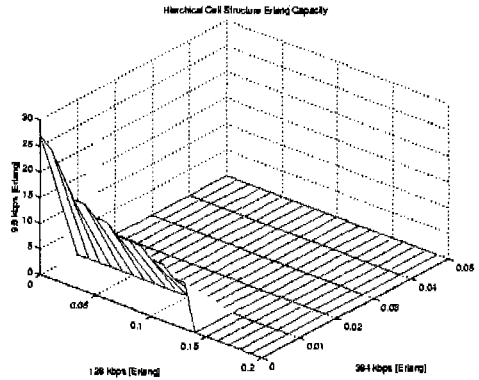


그림 10. 세 종류 서비스를 제공하는 3x 계층셀 시스템의 매크로셀 열량 용량(9.6kbps 음성, 128 kbps 데이터, 384 kbps 데이터)

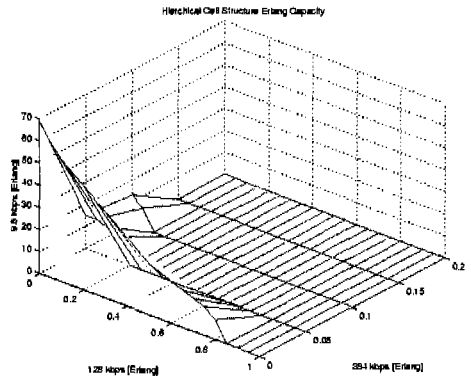


그림 11. 세 종류 서비스를 제공하는 3x 계층셀 시스템의 순방향 링크 마이크로셀 열량 용량(9.6 kbps 음성, 128 kbps 데이터, 384 kbps 데이터)

만약 한 채널로 384kbps이상의 속도를 지원하기 위해서는 전력 제어 오류를 본 논문에서 고려한 2.5dB 미만으로 줄일 수 있는 우수한 전력 제어 알고리즘을 이용하거나 우수한 오류 정정 코드를 이

용하여 각 서비스의 목적 E_b/I_0 를 줄이는 방법이 필요하다.

V. 결론

본 논문에서는 음성 및 다양한 속도의 데이터 서비스를 지원하는 매크로셀/마이크로셀 기반 계층셀 구조의 순방향 열량 용량 및 outage 확률을 불완전한 전력 제어에 의한 영향을 고려하여 유도하였다. 유도한 수식을 이용하여 대역폭이 1.2288MHz인 2세대 시스템과 대역폭이 3.6864MHz인 3세대 CDMA 시스템의 용량을 계산하여 비교하였다.

본 논문에서는 3세대 CDMA 시스템에서도 한 채널로 384kbps 이상의 서비스를 지원하는 것이 결코 쉽지 않다는 결론을 내릴 수 있었다. 그러나, 본 논문에서 고려하지 않은 소프트 핸드오버 및 전력 제어 오류를 2.5dB 미만으로 줄일 수 있는 우수한 전력 제어 알고리즘의 개발, 그리고 각 서비스의 목적 E_b/I_0 를 낮출 수 있는 우수한 오류 정정 부호를 사용한다면 한 채널로 384kbps의 열량 용량을 획득할 수 있을 것이라고 판단한다.

참고 문헌

[1] N. B. Mandayam, J. M. Holtzman, and S. Barberis, "Erlang capacity for an integrated voice/data wireless CDMA system with variable bit-rate sources," Proc. of PIMRC '95, pp. 1078-1082, sept 1995

[2] A. Sampath, N. B. Mandayam, J. M. Holtzman, "Erlang capacity of a power controlled integrated voice and data CDMA system," Proc. of VTC'97, pp. 1557-1561, sept 1995

[3] Xavier Lagrange, "Multitier cell design," IEEE Commun. Mag., pp. 60-64, August, 1997

[4] Aura Ganz, C. M. Krishna, Dingyi Tang, Zygmunt, "On optimal design of multitier wireless cellular systems," IEEE Commun. Mag., pp. 88-93, February 1997

[5] Chin-Lin I, Larry J. Greenstein, Richard D. Gitlin, "A microcell/macrocell cellular architecture for low- and high-mobility wireless users," IEEE Journal on selected areas in commun., vol. 11, no. 6, pp. 885-891, August 1993

[6] J. S. Wu, J. K. Chung, M. T. Sze, "Analysis of uplink and downlink capacities for two-tier system," Proc. Commun., vol. 144, no. 6, pp. 405-411, December 1997

[7] Isman Bazar, Yoshikuni Onozato, "Spectrum resources management on two-tier cellular networks," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E81-A, no. 7, pp. 1330-1338, July 1998

[8] Joseph Saphira, "Microcell engineering in CDMA cellular networks," IEEE Trans. Veh. Thech., vol. 43, no. 4, pp. 817-825, November. 1994

[9] Andrew J. Viterbi, *CDMA principles of spread spectrum communication*, Addison-wesley publishing company

[10] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, "On the capacity of a cellular CDMA," IEEE Trans. Veh. Thech., vol. 40, no. 2, pp. 303-311, May 1991

[11] Andrey. M. Viterbi, Andrew. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," IEEE Journal on selected area in commun., vol. 11, no. 6, pp. 892-899, August 1993

[12] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, K. S. Gilhousen, E. Zehavi, "Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity," IEEE Journal on selected areas in commun., vol. 12, no. 8, pp. 1281-1288, October 1994.

이 영 용(Young-yong Lee)

정회원



1998년 2월: 성균관대학교
전자공학과 졸업

2000년 2월: 성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터
공학부 석사

2000년 3월~현재: 성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터
공학부 박사 과정

<주관심 분야> 이동통신, 무선통신, 동기화 기술

이 상 문(Sang-Mun Lee)

정회원



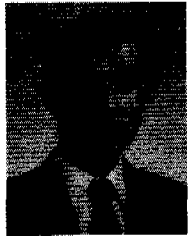
1991년 2월: 성균관대학교
전자공학과 졸업
1993년 2월: 성균관대학교
전자공학과 석사
2000년 8월 ~ 현재: 성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터
공학부 박사과정 수료

1993년 1월 ~ 1998년 1월: LG전자 디지털미디어 연
구소 선임연구원

1998년 3월 ~ 현재: 문경대학 정보통신계열 전임교수
<주관심 분야> 디지털통신, 이동통신, 통신신호처리

최 형 진(Hyung-jin Choi)

정회원



1974년 2월: 서울대학교
전자공학과 졸업
1976년 2월: 한국과학기술원
전기전자공학과 석사
1976년 3월 ~ 1979년 7월:
(주) 금성사 중앙연구소
연구원

1979년 9월 ~ 1982년 12월 : 미국 University of
Southern California 전기공학과(공학
박사)

1982년 10월 ~ 1989년 2월 : 미국 Lincom Corp. 연
구원

1989년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 전기전자 및 컴
퓨터 공학부 교수

<주관심 분야> 디지털통신, 무선통신, 이동통신, 위
성통신 및 동기화 기술을 포함한
MODEM기술