

소프트 핸드오프를 갖는 CDMA 계층구조 셀룰러 시스템의 Erlang 용량

정회원 성 봉 훈* 박 상 규**

Erlang Capacity of CDMA Hierarchical Cellular Systems with Soft Handoff

Bong Hoon Seong*, Sang Kyu Park** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 CDMA 계층구조 셀룰러 시스템에서 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비 그리고 소프트 핸드오프 영역 비에 따른 기지국이 받는 간섭전력과 시스템 용량을 구하였다. 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국이 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국보다 많을수록 기지국이 받는 간섭전력은 증가하며 따라서 시스템 용량은 감소한다. 그러나 소프트 핸드오프 영역의 증가로 기지국이 받는 간섭전력은 감소하며 시스템 용량은 상당히 증가한다.

ABSTRACT

This paper analyzes the system's capacity and the interference resulting from mobiles around a base station depending on the soft handoff ratio for a hierarchical cellular CDMA system. Furthermore the ratio between high speed users in a macro cell and low speed users in a micro cell is studied. It can be seen that the system's capacity decreases in the presence of more high speed users than low speed users due to an increase of interference. However the increase of the soft handoff region results in less interference and increases the system's capacity.

1. 서 론

최근 전자기술의 발달에 의한 고도정보사회의 진전에 따라 정보교환의 역할이 증대되고 있다. 특히 복잡, 다양화되는 사회 속에서 인간의 이동성이 높아지고 그 결과 이동중인 단말기들 사이의 정보의 교류를 가능하게 하는 이동통신분야의 중요성이 증대되고 있다. 따라서 이동전화는 기존의 유선전화 서비스보다 QoS(Quality of Service)면에서 떨어지는 점과 소비자의 경제적 부담이 커짐에도 불구하고 이동성이 자유롭다는 이유 때문에 해마다 사용자 수는 폭발적으로 증가하고 있다.

사업자는 많은 다양한 이동성의 가입자들에게 서비스를 지원할 수 있어야 하며 우수한 통화 품질을 제공하여야 한다. 이동통신시스템에서 수용 가능한 사용자 용량을 늘리는 방법의 하나로 기존 셀의 크기를 줄여 주파수 재사용 효율을 증가시키는 방법이 제안되고 있다^[1]. 즉 기존의 매크로 셀에 비해 크기가 작은 마이크로 셀은 매크로 셀에 생기는 음영지역 문제를 해소하고 단위 면적당 수용 가능한 사용자 수를 증가시켜 시스템 용량의 증가를 가져오게 한다. 그러나 셀 크기가 소형화되어지면서 발생하는 문제는 셀 내에 있는 이동 가입자가 통화중에 셀의 경계를 넘어설 확률이 높게되므로 핸드오

* 모리아 테크놀로지

** 한양대학교 전자전기공학부(skpark@email.hanyang.ac.kr)

논문번호: 00128-0414, 접수일자: 2000년 4월 14일

* 본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

프 호가 증가하게 된다.

셀 크기가 작아짐으로 해서 고속 이동국에 의해 빈번하게 발생하는 핸드오프 호 발생문제를 마이크로 셀에 매크로 셀을 두는 이른바 계층구조 셀룰러 시스템으로 상당히 줄일 수 있다. 국내에서 서비스 중인 CDMA 셀룰러 이동통신시스템 역시 가입자 수가 수용 가능한 용량의 한계에 이르면 기존의 매크로 셀에 마이크로 셀이 추가될 것이며 이 방식은 현재 차세대 이동통신시스템 IMT-2000에서 제시되어지고 있다.

지금까지 CDMA 계층구조 셀룰러 시스템에 대한 연구는 고속 이동국에 의한 호와 저속 이동국에 의한 호 그리고 핸드오프 호에 대한 채널 관리를 통해 이동국이 통신할 수 있는 최대 영역(coverage areas)과 시스템 용량 그리고 호 차단확률에 대한 분석들이 이루어지고 있다^{[2],[4]}. 또한 소프트 핸드오프를 사용하면 하드 핸드오프에 비해 통화품질이 우수하며 역방향 링크 간섭을 줄여 시스템 용량을 증가시키는 이점이 있다^[5].

계층구조 셀룰러 시스템에서 고속 이동국의 호와 저속 이동국의 호 그리고 핸드오프 영역에 따른 핸드오프 횟수와 호 차단확률의 관점에서 볼 때 소프트 핸드오프 영역이 증가하면 역으로 호당 평균 핸드오프 횟수와 호 차단확률은 감소하게 되어 시스템 용량이 개선된다. 따라서 본 논문에서는 계층구조 셀룰러 시스템에서 소프트 핸드오프 영역의 변화가 시스템에 미치는 영향을 간섭과 용량 측면에서 분석한다. 또한 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비에 따른 시스템 영향을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 계층구조 셀룰러 시스템 모델과 전파모델을 설명하고 역방향 링크 관점에서 기지국이 받는 간섭전량을 계산한다. 3장에서는 계층구조 셀룰러 시스템에서의 Erlang 용량을 계산한다. 4장에서는 그에 따른 수치 해석 결과를 분석하고 검토한다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 셀룰러 시스템의 다중접속간섭

2.1 CDMA 다중계층구조 셀룰러 시스템 모델

시스템의 용량을 증가시키기 위해서 전 통신 영역을 주파수 재사용 효율이 높은 마이크로 셀로 구성시켰다. 그러나 고속 이동국인 경우 빈번한 핸드오프 문제가 발생하게되고 이를 해결하기 위해서

마이크로 셀에 매크로 셀을 고려한 이른바 계층구조 셀룰러 시스템을 본 논문에서 제시한다. 또한 매크로 셀과 마이크로 셀은 같은 같은 FA(Frequency Allocation)을 가진다. 따라서 보행자에게는 마이크로 셀 기지국에 있는 통신 채널을 할당해 주고 고속 이동국에게는 매크로 셀 기지국에 있는 통신 채널을 할당해 주게된다. 계층구조 셀룰러 시스템에서 적용되는 소프트 핸드오프 모델을 IS-95의 소프트 핸드오프 모델을 따르며^[6] 이에 대한 구조는 그림 1과 같다.

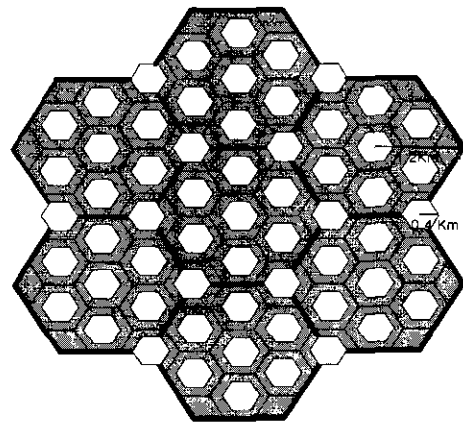


그림 1. 계층구조 셀룰러 시스템

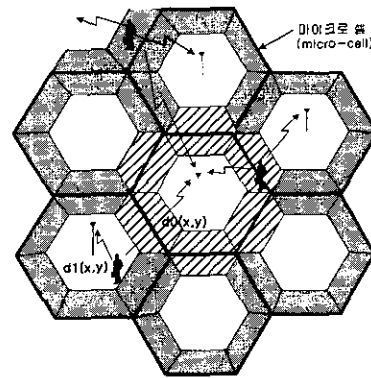


그림 2. 저속 이동국과 마이크로 셀 기지국간의 통신

계층구조 셀룰러 시스템의 구조에서 매크로 셀과 마이크로 셀 각각에 대해서 자세히 나타내면 그림 2, 그림 3과 같다.

2.2 전파 모델

이동통신환경에서 전파손실은 경로손실과 웨도잉 현상으로 인한 장기간 페이딩(long-term fading) 그리고 다중경로로 인한 단기간 페이딩(short-term

fading)으로 구성된다. 일반적으로 도심환경에서의 경로 손실은 기지국에 수신되는 신호 전력이 거리의 네제곱에 반비례하는 것을 말하며 쉐도잉 현상은 자연이나 인위적인 장애물에 의해서 전파가 전파할 때 방해를 받는 것으로서 기지국에 수신된 신호 전력의 분포는 로그-노말 분포(log-normal distribution)를 가지게된다. CDMA 시스템에서 레이크 수신기(Rake receiver)와 오류정정부호, 인터리빙(interleaving)을 통하여 단기간 페이딩으로 인한 성능 저하를 크게 완화할 수 있으므로^[7] 본 논문에서는 단기간 페이딩으로 인한 영향은 고려하지 않고 장기간 페이딩으로 인한 기지국 수신 신호전력의 변화만을 고려한다. 따라서 경로손실과 쉐도잉 현상을 고려할 때 하나의 이동국으로부터 각 기지국에 수신되는 신호의 전파감쇄 α_k 는 식 (1)과 같다^[8].

$$\alpha_k = r_k^\mu 10^{\delta_k/10}, \quad k = 1, 2, 3.. \quad (1)$$

여기서 r_k 는 하나의 이동국으로부터 기지국 k 까지의 거리이며 δ_k 는 하나의 이동국으로부터 기지국 k 에 수신되는 신호의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분으로 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 가우시안 분포를 따르는 랜덤 변수이다. 따라서 완전한 전력제어를 가정할 때 주변셀 기지국 j 로부터 전력제어 받는 이동국 i 가 주변셀 기지국 j 에 미치는 간섭전력 P 는 식 (2)와 같다.

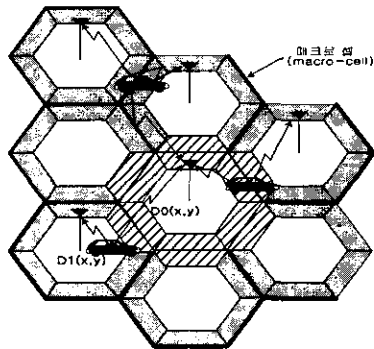


그림 3. 고속 이동국과 매크로 셀 기지국간의 통신

$$P = \frac{S_{ij}}{r_{ij}^\mu 10^{\delta_{ij}/10}} \quad (2)$$

여기서 S_{ij} 는 주변셀 기지국 j 에 의해서 전력제어 되어진 이동국 i 의 송신전력, r_{ij} 는 이동국 i 와 주변셀 기지국 j 사이의 거리 그리고 δ_{ij} 는 주변셀 기

지국 j 에 수신되는 송신전력의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분을 나타낸다. 또한 이동국 i 가 주변셀 기지국 j 에 의해서 전력제어 되어질 때 이동국 i 가 기준셀 기지국 0에 미치는 간섭전력 P_{i0} 는 식 (3)과 같다.

$$P_{i0} = \frac{S_{ij}}{r_{i0}^\mu 10^{\delta_{i0}/10}} \quad (3)$$

여기서 r_{i0} 는 이동국 i 와 기준셀 기지국 0 사이의 거리 그리고 δ_{i0} 는 기준셀 기지국 0에 수신되는 송신전력의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분을 나타낸다.

2.3 간섭전력비

본 논문에서는 7개의 매크로 셀과 49개의 마이크로 셀로 이루어져 있는 계층구조 셀룰러 시스템을 고려한다. 그리고 소프트 핸드오프시 두 개의 기지국만 고려한다. 매크로 셀들의 면적과 마이크로 셀들의 면적은 각각 동일하며 하나의 매크로 셀에는 J 명이 하나의 마이크로 셀에는 K 명이 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 또한 매크로 셀의 반경은 $R^{(M)}$ 으로, 마이크로 셀의 반경은 $R^{(m)}$ 으로 가정한다. 이러한 가정으로부터 매크로 셀과 마이크로 셀의 단위면적 당 이동국 밀도는 식 (4), (5)로 주어진다.

$$\rho_{macro} = \frac{2J}{3\sqrt{3} \cdot R^{(M)}} \quad (4)$$

$$\rho_{micro} = \frac{2K}{3\sqrt{3} \cdot R^{(m)}} \quad (5)$$

식 (1)에서 하나의 이동국으로부터 기지국 k 에 수신되는 신호의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분 δ_k 는 식 (6)으로 주어진다^[7].

$$\delta_k = a\xi + b\xi_k, \quad k = 1, 2, 3.. \quad (6)$$

여기서 ξ 는 각 기지국마다 공통적으로 가지고 있는 전파환경에 의해 형성되어진 로그-노말 쉐도잉의 전파감쇄 성분이며, ξ_k 는 기지국 k 만 가지고 있는 전파환경에 의해 형성되어진 로그-노말 쉐도잉의 전파감쇄 성분이다. 그리고 a 와 b 는 로그-노말 쉐도잉의 정규분포 성분 계수로서 이동국의 위치에 따라 값이 달라지며 $a^2 + b^2 = 1$ 이다. 또한 δ_k , ξ 그리고 ξ_k 는 각각 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우

시간 랜덤 변수이며 모든 k 에 대하여 $E(\xi\xi_k) = 0$ 이고 $i \neq j (i, j \in k)$ 인 경우 i 와 j 에 대하여 $E(\xi_i\xi_j) = 0$ 이다. 따라서 δ_i 와 δ_j 의 상관관계는 식 (7)로 주어진다.

$$\frac{E(\delta_i\delta_j)}{\sigma^2} = a^2 = 1 - b^2 \quad (7)$$

그림 1의 계층구조 셀룰러 시스템에서 한 가운데 있는 매크로 셀 기지국과 마이크로 셀 기지국을 기준 기지국이라 할 때, 이동국들의 모든 송신전력에 의해서 기준 매크로 셀 기지국과 기준 마이크로 셀 기지국에 각각 수신되는 총 간섭 전력량은 식 (8), (9)와 같다.

$$I^{(M)} = \sum_{i=2}^J \nu_i P_{(M)i} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} \quad (8)$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} + N_0 W$$

$$I^{(m)} = \sum_{i=2}^J \nu_i P_{(m)i} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} \quad (9)$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} + N_0 W$$

식 (8), (9)에서 $P_i^{(M)}$ 와 $P_i^{(m)}$ 는 기준 매크로 셀과 기준 마이크로 셀에 있는 i 번째 이동국의 송신전력에 의해서 기준셀 기지국에 수신되는 전력이고 $P_i^{(M)}$ 은 M 번째 매크로 셀에 있는 i 번째 이동국의 송신전력에 의해서 기준셀 기지국에 수신되는 전력이며, $P_i^{(m)}$ 은 m 번째 마이크로 셀에 있는 i 번째 이동국의 송신전력에 의해서 기준셀 기지국에 수신되는 전력이다. 그리고 $\nu_i, \nu_i^{(M)}, \nu_i^{(m)}$ 은 기준셀과 M 번째 매크로 셀 그리고 m 번째 마이크로 셀에 있는 i 번째 이동국들의 음성 활동율이며 상호 독립이다. 또한 N_0 는 단측 배경잡음 전력스펙트럼 밀도이고 W 는 시스템 대역폭을 나타낸다. 음성 활동율 ν_i 는 모든 셀에서 같고 모든 i 에 대해서 $\nu_i = \nu$ 이며 완전한 전력제어를 가정할 때 전력제어를 받는 이동국이 전력제어를 하는 기지국에 미치는 간섭 전력량은 모든 i 에 대해서 $P_i^{(M)} = P_i^{(m)} = P$ 이다. 본 논문에서는 $i = 1$ 에서의 신호전력을 통신 신호전력으로 보고 그 외는 모두 간섭 신호 전력으로 가정한다. 또한 매크로 셀 내에 있는 이동국 수 J 와 마이크로 셀 내에 있는 이동국 수 K 는 매우 크다고 가정한다.

소프트 핸드오프를 적용한 계층구조 셀룰러 시스템에서 하나의 이동국에 의해서 발생하는 기준셀 간섭 전력량과 주변셀 간섭전력량의 비를 모든 이동국들에 대해서 합하고 이를 평균한 것을 평균 주변셀 간섭전력 비 I_{mean} 이라 할 때, 식 (10)과 같다.

$$I_{mean} = I_{all A_m}^{(M)} + I_{all A_n}^{(M)} + I_{all A_k}^{(M)} \quad (10)$$

$$+ I_{all A_m}^{(m)} + I_{all A_n}^{(m)} + I_{all A_k}^{(m)}$$

여기서, $I_{all A_m}^{(M)}$ 와 $I_{all A_n}^{(m)}$ 은 매크로 셀과 마이크로 셀에서 각각 영역 A_{nk} 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역의 이동국들에 의한 평균 주변셀 간섭전력 비이며 $I_{all A_m}^{(M)}$ 와 $I_{all A_n}^{(m)}$ 은 매크로 셀과 마이크로 셀에서 각각 영역 A_{n1} 과 같은 조건에 해당하는 모든 영역의 이동국들에 의한 평균 주변셀 간섭전력 비이다. 그리고 $I_{all A_m}^{(M)}$ 와 $I_{all A_n}^{(m)}$ 은 매크로 셀과 마이크로 셀에서 각각 영역 A_{n2} 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역의 이동국들에 의한 평균 주변셀 간섭전력 비이다.

식 (10)에서의 평균 간섭전력 비 $I_{all A_m}^{(M)}, I_{all A_n}^{(M)}, I_{all A_m}^{(m)}, I_{all A_n}^{(m)}, I_{all A_k}^{(M)}, I_{all A_k}^{(m)}$ 는 다음과 같다^[8].

$$I_{all A_m}^{(M)} = E \left[\int_{all A_m} \int \left\{ \frac{D_1^\mu(x, y)}{D_0^\mu(x, y)} \cdot 10^{(\delta_1 - \delta_0)/10} \right\} \rho dA(x, y) \right]$$

$$= \frac{2J}{3\sqrt{3}RL} e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all A_m} \int H_1^\mu(x, y) dA(x, y) \quad (11)$$

여기서 $D_1(x, y)$ 는 이동국에서 전력제어를 받는 주변셀 기지국까지의 거리이며 $D_0(x, y)$ 는 이동국에서 간섭을 미치게되는 기준 매크로 셀 기지국까지의 거리이다. 식 (6)으로부터 $\delta_1 - \delta_0 = b(\xi_1 - \xi_0)$ 이며, ξ_1 과 ξ_0 는 서로 독립이므로 $\delta_1 - \delta_0$ 는 평균이 0이며 분산이 $2b^2\sigma^2$ 인 가우시안 랜덤 변수이다. 또한 $\beta = \ln(10)/10$ 이고 $H_1(x, y) = D_1(x, y)/D_0(x, y)$ 이다.

$$I_{all A_m}^{(m)} = E \left[\int_{all A_m} \int \left\{ \frac{d_1^\mu(x, y)}{d_0^\mu(x, y)} \cdot 10^{(\delta_1 - \delta_0)/10} \right\} \rho dA(x, y) \right]$$

$$= \frac{2K}{3\sqrt{3}r} e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all A_m} \int L_1^\mu(x, y) dA(x, y) \quad (12)$$

여기서 $d_1(x, y)$ 는 이동국에서 전력제어를 받는 주변셀 기지국까지의 거리이며 $d_0(x, y)$ 는 이동국에서 간섭을 미치게되는 기준 마이크로 셀 기지국까지의 거리이다. 그리고 $L_1(x, y) = d_1(x, y) / d_0(x, y)$ 이다.

$$I_{all\ H}^{(M)} = e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all\ H} \int \sum_{i=1}^{N-1} H_i(x, y)^\mu \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}} Q\left(z + \frac{M_j - M_0}{b\sigma} + 2b\beta\sigma\right) \prod_{i \neq j}^{j=1}^{j=N} Q\left(z + \frac{M_i - M_0}{b\sigma} + b\beta\sigma\right) dz \right] K dA(x, y) \quad (13)$$

여기서 N 은 매크로 셀에서 소프트 핸드오프할 때 고려되어지는 기지국 수를 나타낸다. 또한 $Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^{\infty} e^{-x^2/2} dx$, $M_j = 10\mu \log D_j(x, y)$ ($j = 0, 1$)이다.

$$I_{all\ H}^{(m)} = e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all\ H} \int \sum_{i=1}^{N-1} h_i^\mu \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}} Q\left(z + \frac{m_j - m_0}{b\sigma} + 2b\beta\sigma\right) \prod_{i \neq j}^{j=1}^{j=N} Q\left(z + \frac{m_i - m_0}{b\sigma} + b\beta\sigma\right) dz \right] K dA(x, y) \quad (14)$$

여기서 $m_j = 10\mu \log d_j(x, y)$ ($j = 0, 1$)이며 n 은 마이크로 셀에서 소프트 핸드오프를 할 때 고려되어지는 기지국 수를 나타낸다.

$$I_{all\ A_n}^{(M)} = N e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all\ H} \int H_1^\mu \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \prod_{i=2}^n Q\left(z + b\beta\sigma + \frac{M_i - M_1}{b\sigma}\right) dz \right] K dA(x, y) \quad (15)$$

$$I_{all\ A_n}^{(m)} = n e^{b^2(\beta\sigma)^2} \int_{all\ H} \int L_1^\mu \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \prod_{i=2}^n Q\left(z + b\beta\sigma + \frac{m_i - m_1}{b\sigma}\right) dz \right] K dA(x, y) \quad (16)$$

식 (10)의 I_{mean} 을 기준셀에 있는 이동국 수로 나타낼 것을 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비 f 라 한다. 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 매크로 셀 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비 $f_H^{(M)}$ 과 기준 마이크로 셀 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비 $f_H^{(m)}$ 은 식 (17), (18)과 같다.

$$f_H^{(M)} = \frac{I_{mean}^{(H\ M)}}{J} \quad (17)$$

$$f_H^{(m)} = \frac{I_{mean}^{(H\ m)}}{K} \quad (18)$$

여기서 $I_{mean}^{(H\ M)}$ 은 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 매크로 셀 기지국이 받는 평균 주변셀 간섭전력 비이고 $I_{mean}^{(H\ m)}$ 은 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 마이크로 셀 기지국이 받는 평균 주변셀 간섭전력 비이다. 따라서 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 기지국이 받는 전체 평균 주변셀 간섭전력 비 f_H 는 식 (19)와 같다.

$$f_H = \Gamma_M f_H^{(M)} + \Gamma_m f_H^{(m)} \quad (19)$$

여기서 Γ_M 는 매크로 셀 기지국과 통신하는 고속 이동국 수의 비이고 Γ_m 는 마이크로 셀 기지국과 통신하는 저속 이동국 수의 비이다.

식 (19)를 계산하기 위한 파라미터들은 다음과 같다. 이동국의 위치에 따라 웨도잉 분포가 변화하지 않도록 ξ_i 의 계수 $a=b=\sqrt{0.5}$, 경로손실 지수 μ 는 4이며 로그-노말 웨도잉 정규분포성분의 표준편차 σ 는 임의값 5dB와 12 dB이다^[8].

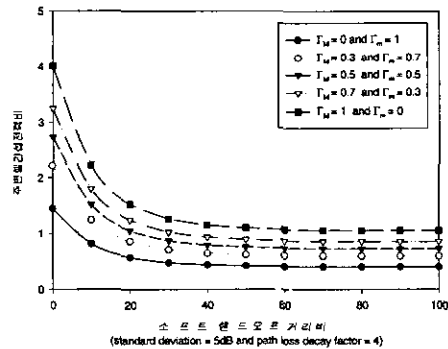


그림 4. 소프트 핸드오프 영역에 따른 주변셀 간섭전력비 f_H ($\sigma=5dB, \mu=4$)

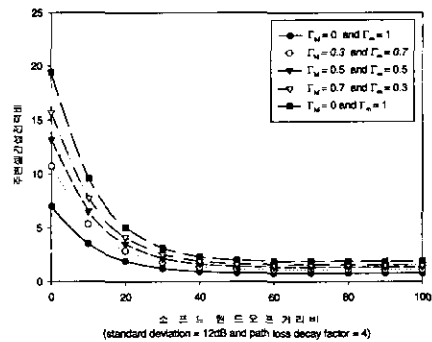


그림 5. 소프트 핸드오프 영역에 따른 주변셀 간섭전력 비 f_H ($\sigma=12dB, \mu=4$)

III. 셀룰러시스템의 Erlang 용량

본 논문에서는 새로운 이동국들에 대하여 수신 처리능력의 부족으로 인한 통화 차단확률은 무시할 수 있을 만큼 충분한 수신 처리기가 있고 또한 본 계층구조 셀룰러 시스템은 완전한 전력제어가 이루어지는 것으로 가정한다. 매크로 셀 영역에서의 기지국 통화요청 수는 평균과 분산이 (λ/μ) 인 포아송 분포를 따르는 랜덤변수이며 마이크로 셀 영역에서의 기지국 통화요청 수는 평균과 분산이 (γ/μ) 인 포아송 분포를 따르는 랜덤 변수이다. λ 는 이동국이 초당 매크로 셀 기지국에 통화를 요청하는 평균 수(calls/sec)를 나타내며, γ 는 이동국이 초당 마이크로셀 기지국에 통화를 요청하는 평균 수(calls/sec)를 나타낸다. 또한 $1/\mu$ 은 통화 당 평균 서비스 시간을 나타낸다. 매크로 셀과 마이크로 셀에 있는 이동국들은 같은 포아송 채널 점유 분포와 음성활동을 가진다고 가정한다. 소프트 핸드오프를 적용한 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 매크로 셀 기지국과 기준 마이크로 셀 기지국에 각각 수신되는 총 간섭 전력량 $P_i^{(M)}$, $P_i^{(m)}$ 은 기지국이 허용할 수 있는 최대 간섭전력보다는 작거나 같아야 한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_i^{(M)} = \sum_{j=2}^M \nu_j P_{(M)j} + \sum_{M+1}^6 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} + N_0 W \leq I_T^{(M)} \cdot W \quad (20)$$

$$P_i^{(m)} = \sum_{j=2}^m \nu_j P_{(m)j} + \sum_{M+1}^7 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} + N_0 W \leq I_T^{(m)} \cdot W \quad (21)$$

음성 활동을 ν_i , $\nu_i^{(M)}$, $\nu_i^{(m)}$ 는 이동국들에 대해서 서로 독립이고 0과 1의 값을 가지는 이진랜덤변수로서 $q = \Pr(\nu_i=1) = \Pr(\nu_i^{(M)}=1) = \Pr(\nu_i^{(m)}=1) = 1 - \Pr(\nu_i=0) = 1 - \Pr(\nu_i^{(M)}=0) = 1 - \Pr(\nu_i^{(m)}=0)$ 이다. 또한 $I_T^{(M)}$, $I_T^{(m)}$ 는 각각 매크로 셀과 마이크로 셀 기지국 최대 허용 간섭 전력 밀도이다. 모든 셀에 있는 이동국들로부터 기준셀 기지국에 수신되는 총 간섭 전력량이 기지국 최대 허용간섭전력량보다 높을 확률을 outage 확률, $\Pr(outage)$,이라 정의한다. 따라서 계층구조 셀룰러 시스템에서 기준 매크로 셀 기지국과 기준 마이크로 셀 기지국의

outage 확률은 식 (22)와 같다^[9].

$$\Pr(outage)_{(k)} = \Pr[P_i^{(k)} > I_T^{(k)} W] \approx \Pr[Z^{(k)} > K_0^{(k)}], \quad k = M, m \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } Z^{(M)} &= \left(\sum_{i=1}^6 \nu_i P_{i(M)} + \sum_{M+1}^6 \sum_{i=1}^K \nu_i P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i P_i^{(m)} \right) / I_T^{(M)}, \quad Z^{(m)} = \left(\sum_{i=1}^7 \nu_i P_{i(m)} + \sum_{M+1}^7 \sum_{i=1}^K \nu_i P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i P_i^{(m)} \right) / I_T^{(m)} \quad \text{그리고} \\ K_0^{(M)} &= W(1 - \eta^{(M)}), \quad K_0^{(m)} = W(1 - \eta^{(m)}), \quad \eta^{(M)} = N_0 / I_T^{(M)}, \quad \eta^{(m)} = N_0 / I_T^{(m)} \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

본 논문에서는 $Z^{(M)}$ 과 $Z^{(m)}$ 의 분포를 중심 극한의 정리를 이용하여 가우시안 분포로 근사화하였다. $Z^{(M)}$ 의 평균과 분산은 각각 다음과 같다^[8].

$$\begin{aligned} E(Z^{(M)}) &= E\left\{ \left(\sum_{i=1}^6 \nu_i P_{i(M)} + \sum_{M+1}^6 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} \right) / I_T^{(M)} \right\} \\ &= (\lambda/\mu)(1 + f_{(M)}) \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Var(Z^{(M)}) &= Var\left\{ \left(\sum_{i=1}^6 \nu_i P_{i(M)} + \sum_{M+1}^6 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} \right) / I_T^{(M)} \right\} \\ &= (\lambda/\mu)(1 + f_{(M)}) \quad (24) \end{aligned}$$

또한 $Z^{(m)}$ 의 평균과 분산은 각각 다음과 같다^[8].

$$\begin{aligned} E(Z^{(m)}) &= E\left\{ \left(\sum_{i=1}^7 \nu_i P_{i(m)} + \sum_{M+1}^7 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} \right) / I_T^{(m)} \right\} \\ &= (\gamma/\mu)(1 + f_{(m)}) \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Var(Z^{(m)}) &= Var\left\{ \left(\sum_{i=1}^7 \nu_i P_{i(m)} + \sum_{M+1}^7 \sum_{i=1}^K \nu_i^{(M)} P_i^{(M)} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=1}^K \nu_i^{(m)} P_i^{(m)} \right) / I_T^{(m)} \right\} \\ &= (\gamma/\mu)(1 + f_{(m)}) \quad (26) \end{aligned}$$

식 (22)에서 outage 확률값이 주어질 때 이동국들의 초당 평균 통화 요청 수 λ/μ 을 하나의 기지국에 의해서 이동국들에게 제공할 수 있는 초당 평균 통화 서비스 수 $(\lambda/\mu)^*$ 라 할 때 이를 Erlang 용량으로 정의한다. 따라서 계층구조 셀룰러 시스템에서 소프트 핸드오프시 기준 매크로 셀 기지국의

$\Pr(outage)_{(M)}$ 은 식 (22)으로부터 식 (27)과 같이 된다^[8].

$$\Pr(outage)_{(M)} \approx Q \left[\frac{K_0^{(M)} - (1 + f_{(M)}) (\lambda/\mu)_{(M)}^* q}{\sqrt{(1 + f_{(M)}) (\lambda/\mu)_{(M)}^* q}} \right] \quad (27)$$

이때 $(\lambda/\mu)_{(M)}^*$ 는 식 (27)로부터 식 (28)이 된다.

$$(\lambda/\mu)_{(M)}^* = \frac{K_0^{(M)} F(B^{(M)})}{(1 + f_{(M)}) q} \quad (28)$$

여기서 $F(B^{(M)}) = \left[1 + \frac{B^{(M)}}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4}{B^{(M)}}} \right) \right]$ 이

고 $B = \frac{\{Q^{-1}[\Pr(outage)_{(M)}]\}^2}{K_0^{(M)}}$ 이다. 식 (27)에

서 구한 것과 마찬가지로 방법으로 계층구조 셀룰러 시스템에서 소프트 핸드오프시 기준 마이크로 셀 기지국의 $\Pr(outage)_{(m)}$ 은 식 (22)으로부터 식 (29)과 같이 된다.

$$\Pr(outage)_{(m)} \approx Q \left[\frac{K_0^{(m)} - (1 + f_{(m)}) (\gamma/\mu)_{(m)}^* q}{\sqrt{(1 + f_{(m)}) (\gamma/\mu)_{(m)}^* q}} \right] \quad (29)$$

이때 $(\gamma/\mu)_{(m)}^*$ 는 식 (29)으로부터 식 (30)이 된다.

$$(\gamma/\mu)_{(m)}^* = \frac{K_0^{(m)} f(B^{(m)})}{(1 + f_{(m)}) q} \quad (30)$$

여기서 $f(B^{(m)}) = \left[1 + \frac{B^{(m)}}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4}{B^{(m)}}} \right) \right]$ 이

고 $B^{(m)} = \frac{\{Q^{-1}[\Pr(outage)_{(m)}]\}^2}{K_0^{(m)}}$ 이다. 따라서 계층구조 셀룰러 시스템의 Erlang 용량, $(\lambda/\mu)_{(M)}$ 은 식 (28), (30)을 통해서 식 (31)와 같다.

$$(\lambda/\mu)_{(M)} = \Gamma_M (\lambda/\mu)_{(M)}^* + \Gamma_m (\gamma/\mu)_{(m)}^* \quad (31)$$

식 (31)을 계산하기 위한 파라미터들은 다음과 같다. 매크로 셀과 마이크로 셀 기지국의 서비스 중단 확률, $\Pr(outage)_{(M)}$, $\Pr(outage)_{(m)}$ 은 둘 다 0.1이다. 그리고 음성 활동을 ν_i 가 1이 될 확률 q 는 0.4이고 시스템 대역폭 W 는 1.2288MHz 이다. 또한 기지국 최대 허용 간섭 전력 밀도에 대한 단층 배경잡음 전력 스펙트럼 밀도 비 $\eta^{(M)}$, $\eta^{(M)}$ 은 둘 다 0.1이고 β 는 0.2303(ln10/10)이다.

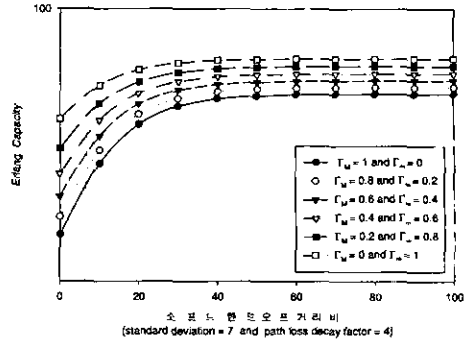


그림 6. 소프트 핸드오프 영역에 따른 Erlang 용량 ($\sigma=7$, $\mu=4$)

IV. 수치 해석

4.1 간섭전력비에 대한 수치해석 결과

본 절에서는 2장의 CDMA 계층구조 셀룰러 시스템 역방향 링크에서 소프트 핸드오프 영역 비, 그리고 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비에 따른 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비에 대한 수치해석 결과를 분석한다. 그림 4와 그림 5는 계층구조 셀룰러 시스템에서 하나의 매크로 셀 영역 내에 70명의 사용자가 있을 때 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비를 나타낸다.

계층구조 셀룰러 시스템에서 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국이 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국보다 많을수록 기준 기지국이 받는 평균 주변셀 간섭전력 비는 증가한다. 그러나 소프트 핸드오프 영역의 증가로 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비는 상당히 줄어든다.

또한 소프트 핸드오프 영역의 증가는 그림 4 보다 통신 환경이 더욱 나쁜 그림 5에 더 많은 이득을 가져다준다. 그림 5의 하드 핸드오프 지점에서는 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비에 따라 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비가 상당한 차이를 보이지만 소프트 핸드오프 영역비가 100(%)인 지점에서는 차이가 상당히 줄어든다. 그리고 전체적으로 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력 비는 소프트 핸드오프 영역이 증가할수록 더욱 많이 줄어든다.

역방향 링크에서는 소프트 핸드오프 영역의 증가

로 기준 기지국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭 전력비가 줄어들지만 핸드오프 영역비가 40% 이상에서는 주변셀 간섭전력비가 더 이상 줄어들지 않고 거의 일정한 성능을 유지한다. 이는 이동국이 특정 기지국에 더 가까이 있을 경우, 즉 핸드오프 영역이 증가했을 때 이동국의 송신전력이 경로손실에 의한 영향으로 통신해야 할 기지국이 거의 결정되며 페이딩에 의한 소프트 핸드오프의 변경은 거의 일어나지 않는다. 그러므로 이러한 경우 더 이상의 소프트 핸드오프 영역을 설정하는 것은 성능에 아무런 영향을 주지 못한다.

순방향 링크에서는 소프트 핸드오프 영역의 증가로 이동국이 받는 정규화된 평균 주변셀 간섭전력량이 증가한다. 따라서 소프트 핸드오프 영역비가 40% 이상에서는 평균 주변셀 간섭전력 비가 더 이상 줄어들지 않으므로 소프트 핸드오프 영역 비는 40% 이하로 잡는 것이 적절하다.

4.2 Erlang용량에 대한 수치해석 결과

본 절에서는 3장의 CDMA 계층구조 셀룰러 시스템 역방향 링크에서 소프트 핸드오프 영역 비, 그리고 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비에 따른 Erlang 용량에 대한 수치해석 결과를 분석한다. 그림 6은 로그-노말 섀도잉 정규분포 성분의 표준편차 $\sigma = 7dB$ 와 경로감쇄지수 $\mu = 4$ 가 주어질 때 기지국이 실제 이동국에게 통신 서비스를 할 수 있는 Erlang 용량에 대해 보여준다.

계층구조 셀룰러 시스템에서 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국이 많을수록 Erlang 용량은 감소하며 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국이 많을수록 Erlang 용량은 증가한다. 이는 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 이동국은 마이크로 셀 기지국과 통신하는 이동국보다 높은 송신전력을 보내야 함으로 기지국이 더 많은 간섭전력을 받기 때문이다. 또한 소프트 핸드오프 영역의 증가로 계층구조 셀룰러 시스템의 Erlang 용량이 상당히 증가하며 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비에 따른 Erlang 용량 차이가 상당히 줄어든다.

그림 6에서 알 수 있듯이 소프트 핸드오프 영역 비가 40% 이상에서는 Erlang 용량이 거의 증가하지 않는다. 순방향 링크에서 소프트 핸드오프 영역 비가 증가하면 이동국은 더 많은 간섭을 받게되

로 시스템 전체로 볼 때 소프트 핸드오프 영역 비가 40% 이상 증가하는 것은 오히려 성능 저하를 가져오게 하는 것이 된다.

V. 결론

본 논문은 계층구조 셀룰러 시스템에서 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국과 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 비, 그리고 소프트 핸드오프 영역 비에 따라 기준 기지국이 이동국에 통신 서비스할 수 있는 Erlang 용량에 대해서 분석하였다.

계층구조 셀룰러 시스템에서 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국이 많을수록 이동국의 높은 송신전력에 의해서 기준 기지국이 받는 간섭전력이 증가하며 결과적으로 Erlang 용량은 감소하게 된다. 반면 마이크로 셀 기지국과 통신을 하는 저속 이동국의 경우를 고려해 볼 때 상대적으로 낮은 송신전력으로 인해 Erlang 용량은 증가한다. 이는 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 이동국은 마이크로 셀 기지국과 통신하는 이동국보다 높은 송신전력을 보내야 함으로 기지국이 더 많은 간섭전력을 받기 때문이다. 여기서 소프트 핸드오프 영역을 증가시키면 기지국이 받는 간섭전력이 감소하여 시스템의 Erlang 용량은 더욱 증가한다.

본 논문에서 고려한 계층구조 셀룰러 시스템에서는 주변 셀 간섭량이 커서 용량의 저하를 초래하는 경우, 즉 매크로 셀 기지국과 통신을 하는 고속 이동국이 많은 경우에도 마이크로 셀 기지국과 통신하는 저속 이동국이 많은 경우와 거의 비슷할 정도로 높은 Erlang 용량을 갖게 된다.

참고 문헌

- [1] K. Takeo, "Improvement of Coverage Probability by Subband Scheme in CDMA Macro-micro Cellular System," *IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communication*, Vol. 1, pp. 93-97, Oct. 1996.
- [2] Lon-Rong Hu, Stephen S. Rappaport "Personal Communication System Using Multiple Hierarchical Cellular Overlays" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, N.2 pp. 406-415, Feb. 1995.
- [3] Bijan Jabbari and Woldemar F. Fuhrmann

