

# 소프트 핸드오프를 갖는 셀룰러 CDMA 이동통신 시스템의 Erlang 용량

정희원 성 봉 훈\*, 박 상 규\*\*

## Erlang Capacity of Cellular CDMA Mobile Communication System with Soft Handoff

Bong Hoon Sung\*, Sang Kyu Park\*\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 소프트 핸드오프 영역과 로그-노말 섀도잉에 따른 평균 간섭 전력량과 CDMA 셀룰러 시스템의 용량을 분석하였으며, 최적의 영역을 선택하는 기준으로 Erlang 용량을 사용하였다. 소프트 핸드오프 영역이 증가함에 따라 간섭 전력량이 감소하였으며, 이것은 Erlang 용량의 증가를 가져옴을 알 수 있었다. 그러나 이 영역이 일정한 값 이상으로 증가하면 더 이상의 성능 향상은 일어나지 않았다. 또한 로그-노말 섀도잉 정규분포 성분의 표준편차가 증가함에 따라 동일한 Erlang 용량을 얻기 위해서는 선형적으로 더 넓은 영역이 요구되어짐을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper presents an analysis of the capacity, the interference of adjacent cells of a CDMA cellular system, depending on the soft handoff region and log-normal shadowing. The optimum soft handoff region is chosen by using Erlang capacity. It is shown that when the soft handoff region increases, the Erlang capacity increase due to a reduction of the interference power of adjacent cells. But if the region is increased above a certain value, there is no improvement in the system's capacity. Furthermore as the standard deviation of the log-normal shadowing's normal distribution factor increases, the soft handoff region has to be increased linearly to achieve the same Erlang capacity.

### I. 서론

주파수 대역이 한정된 상황에서 많은 가입자를 수용하기 위해, 주파수 자원을 효율적으로 이용할 수 있는 전송 기술 및 다중 접속 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 또한 아날로그 전송 방식에서 디지털 전송 방식으로 전환되어지는 지금 디지털 전송 방식을 위한 다원 접속 방법으로 시간 분할 다원 접속(TDMA) 방법이나 부호 분할 다원

접속(CDMA) 방법 등이 고려되어왔다. 이 중 CDMA 방법은 셀룰러 이동 통신 환경에서 TDMA에 비하여 주파수 자원을 효율적으로 이용하며 수배의 용량을 갖는다는 사실이 여러 연구 결과로부터 입증되고 있다<sup>[1][2][3]</sup>.

셀룰러 이동통신 시스템에서 하드 핸드오프는 소프트 핸드오프에 비해 더 높은 송신전력을 보내야 하는데 그 이유는 다음과 같다.

첫째, 서비스 중단을 나타내는 outage 확률의 일정한 값을 얻기 위한 섀도잉 전파감쇄 극복 페이드

\* (주)모리아 테크놀로지

\*\* 한양대학교 전자전기공학부(skpark@email.hanyang.ac.kr)  
논문번호 :99231-0605, 접수일자: 1999년 6월 5일

마진이 소프트 핸드오프보다 훨씬 많이 요구되어서 이동국의 송신전력이 증가하게 된다. 둘째, 하드 핸드오프는 이동국이 셀 경계에서 불규칙적으로 이동할 때 핑퐁(pin-pong) 효과가 일어나게 되는데 이런 현상을 줄이기 위해서 셀 경계에서 핸드오프를 하지 않고 셀 경계에서 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서 핸드오프를 하게 되므로 이동국에 높은 송신전력이 요구되어진다<sup>[1]</sup>. 따라서 하드 핸드오프시 이동국의 높은 송신전력으로 인해 간섭 전력량이 증가하게 되어 한 셀의 기지국이 수용할 수 있는 통화 서비스 수인 Erlang 용량이 줄어들게 된다.

소프트 핸드오프 영역에서 이동국은 많은 다른 기지국과 동시에 통신이 이루어진다. 이동국이 모든 셀에서 균일하게 분포되어 있다고 가정할 때 영역을 증가시키면 많은 이동국이 소프트 핸드오프를 하게 된다. 따라서 순방향 링크에서 영역의 증가는 이동국이 받는 간섭 전력량을 증가시켜 많은 성능 저하를 가져오게 하며<sup>[4]</sup> 소프트 핸드오프 영역은 Erlang 용량에 큰 영향을 준다. 그러나 기존의 연구에서는 소프트 핸드오프 영역이 Erlang 용량에 미치는 영향을 고려하지 않았다<sup>[2][3]</sup>.

역 방향 링크에서 소프트 핸드오프는 이동국이 전파 감쇄가 적은 기지국에 의해 전력제어 되게 하므로 경로손실과 쉐도잉에 의해서 요구되어지는 송신전력의 증가를 막아준다. 이때 기준셀과 주변셀의 간섭 전력량은 줄어들고, 셀의 Erlang 용량은 증가하게 된다.

따라서 소프트 핸드오프 영역을 증가시키면 더 많은 이동국들의 송신전력이 감소되어 상당한 간섭 전력량의 감소와 Erlang 용량의 증가가 기대되어진다. 그러므로 한 셀에서 알맞은 소프트 핸드오프 영역을 결정하는 일은 대단히 중요하다.

본 논문에서는 일정한 성능을 유지하는 가운데 핑퐁(pin-pong) 효과를 줄이거나 제거하고 이동국의 송신전력으로 인한 간섭 전력량을 최소화하여 셀의 Erlang 용량을 증가시키기 위한 방안으로 알맞은 소프트 핸드오프 영역을 제시한다. 또한 역 방향 링크 용량에 미치는 영향을 Erlang 용량으로 분석한다.

본문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전파 모델과 소프트 핸드오프 모델을 설명하고 역 방향 링크에서 주변셀이 기준셀에 미치는 간섭 전력량을 계산하였다. 3장에서는 CDMA 시스템의 역 방향 링크 Erlang 용량을 계산하였다. 4장에서는 그에 따른

수치해석 결과를 분석 및 검토하였고 5장에서는 결론을 맺었다.

## II. CDMA 시스템 다중 접속 간섭

### 2.1. 전파 모델

경로 손실과 쉐도잉 현상을 포함한 전파 감쇄는 식 (1)과 같이 나타낸다<sup>[1]</sup>.

$$a(r, \delta) = r^{-\mu} 10^{\delta/10} \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 기지국과 이동국 사이의 거리,  $\delta$ 는 쉐도잉을 나타내는 랜덤변수로서 평균이 0이고 표준편차가  $\sigma$ 인 가우시안 분포를 갖으며  $\mu$ 는 거리에 따른 전파손실을 나타내는 경로손실 지수이다. 완전한 전력제어를 가정할 때 주변셀 기지국  $j$ 로부터 전력제어 받는 이동국  $i$ 가 주변셀 기지국  $j$ 에 미치는 간섭전력  $F$ 는 식 (2)와 같다.

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

여기서,  $S_{ij}$ 는 주변셀 기지국  $j$ 에 의해서 전력 제어 되어진 이동국  $i$ 의 송신 전력이고  $r_{ij}$ 는 이동국  $i$ 와 주변셀 기지국  $j$ 사이의 거리를 나타내며  $\delta_j$ 는 주변셀 기지국  $j$ 에 수신되는 송신전력의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분을 의미한다.

또한 이동국  $i$ 가 주변셀 기지국  $j$ 에 의해서 전력 제어 되어질 때 이동국  $i$ 가 기준셀 기지국 0에 미치는 간섭전력  $P_{i0}$ 는 식 (3)과 같다.

$$P_{i0} = \frac{S_{ij}}{r_{i0}^{-\mu} 10^{\delta_0/10}} \quad (3)$$

여기서  $r_{i0}$ 는 이동국  $i$ 와 기준셀 기지국 0 사이의 거리이며  $\delta_0$ 는 기준셀 기지국 0에 수신되는 송신전력의 로그-노말 쉐도잉 정규분포 성분이다.

### 2.2. 소프트 핸드오프 모델

본 논문에 적용되는 소프트 핸드오프 모델은 IS-95의 소프트 핸드오프 모델을 따른다<sup>[5]</sup>. 그림 1은 CDMA 시스템의 역 방향 링크 소프트 핸드오프 과정을 설명하기 위한 모델로서 기지국에 수신된 신호 전력을  $P_{ij}$ 로 나타내었다. 여기서  $i=1, 2, 3$ 은 이동국을 나타내며  $j=1, 2$ 는 기지국을 나타낸

다. 그림 1에서 어두운 부분은 소프트 핸드오프 영역을 나타낸다. 이동국 1과 이동국 3은 소프트 핸드오프 영역에 위치하지 않은 이동국들이며 이들은 가장 가까이 위치한 기지국에 연결되어 전력제어 된다고 가정한다. 반면 이동국 2는 소프트 핸드오프 영역에 위치한 경우를 나타낸다. 이 경우 이동국 2는 기지국 1과 기지국 2에 연결되어 있으며 매 순간 MSC(Mobile Switching Center)에 의해서 최상의 신호가 선택되어 진다고 가정한다. 본 논문에서는 소프트 핸드오프 시 이동국으로부터 가장 가까운 거리에 있는 두개의 기지국만을 고려한다.

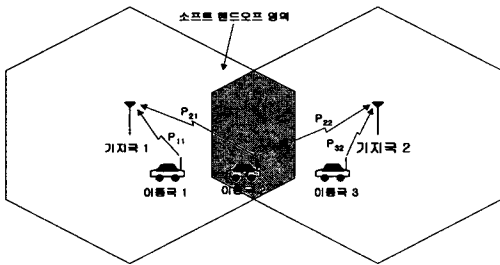


그림 1. 소프트 핸드오프 모델

2.3. 주변셀 간섭

그림 2는 육각형 셀 모델을 나타내고 있다. 각 셀의 면적은 동일하고 K명의 이동국들이 균일하게 분포되어 있으며 셀의 반경을 R로 가정하였다. 이러한 가정으로부터 단위 면적 당 이동국 밀도  $\rho$ 는 식 (4)로 주어진다<sup>[1]</sup>.

$$\rho = \frac{2K}{3\sqrt{3} \cdot R} \quad (4)$$

소프트 핸드오프는 소프트 핸드오프 영역에서 하나의 이동국이 두 개 이상의 기지국과 동시에 통신을 하다가 소프트 핸드오프 영역을 벗어날 때 기지국에 수신되는 신호 전력이 제일 높은 기지국과 최종적으로 통신을 계속하게 한다. 따라서 하나의 이동국으로부터 두 개 이상의 서로 다른 기지국에 수신되는 신호전력 세기를 매순간 측정하여야하며 이를 위해서 각 기지국이 속해있는 셀의 전파 손실 환경을 고려하여야 한다. 이동국으로부터 두 기지국 i와 j에 수신되는 신호의 전파손실  $\alpha_i$  와  $\alpha_j$  는 식 (5)와 같다.

$$\alpha_k = r_k^\mu 10^{\delta_k/10}, \quad k = i, j \quad (5)$$

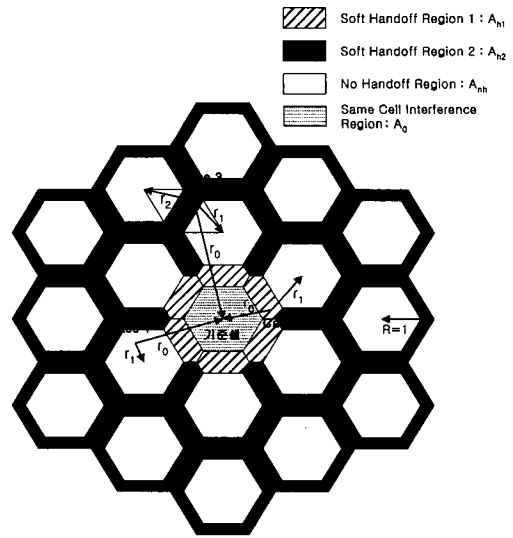


그림 2. 주변셀 간섭량 분석을 위한 육각형 셀 모델

여기서  $\delta_i$ 와  $\delta_j$ 는 이동국으로부터 기지국 i와 j에 각각 수신되는 신호의 로그-노말 쉘도잉의 정규분포 성분으로 가우시안 랜덤 변수이다. 그리고  $r_i$ 와  $r_j$ 는 이동국으로부터의 기지국 i와 j까지의 거리이다. 이동국으로부터 기지국 i와 j에 수신되는 신호의 로그-노말 쉘도잉의 정규분포 성분  $\delta_k$ 는 식 (6)으로 주어진다.

$$\delta_k = a\xi + b\xi_k, \quad k = i, j \quad (6)$$

여기서  $\xi$ 는 이동국 주변의 공통적인 환경에 의한 로그-노말 쉘도잉 정규분포 성분이며,  $\xi_k$  ( $k = i, j$ )는 기지국 i와 j에만 속하는 로그-노말 쉘도잉의 정규분포 성분이다. 그리고 a와 b는 로그-노말 쉘도잉의 정규분포 성분 계수로서 이동국의 위치에 따라 값이 달라지며  $a^2 + b^2 = 1$  이다. 또한  $\delta_i, \delta_j, \xi, \xi_i$  그리고  $\xi_j$ 는 각각 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 랜덤 변수이며 모든 i에 대하여  $E(\xi\xi_i) = 0$  이고  $i \neq j$ 인 경우 모든 i와 j에 대하여  $E(\xi_i\xi_j) = 0$  이다. 따라서  $\delta_i$ 와  $\delta_j$ 의 상관관계는 식 (7)로 주어진다.

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

기준셀과 주변셀에 각각 K명의 이동국이 있고, J개의 주변셀을 고려할 경우 소프트 핸드오프시 기준 셀 기지국에서 수신되는 총 전력 C는 평균적으로

로 볼 때 식 (8)과 같다.

$$C = \sum_{i=1}^K \nu_i P_i + \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} P_i^{(j)} + N_0 W \quad (8)$$

여기서  $P_i$ ,  $P_i^{(j)}$ 는 소프트 핸드오프시 기준셀과 주변셀  $j$ 에 있는  $i$ 번째 이동국의 송신전력에 의해서 기준셀 기지국에 수신되는 전력이다. 그리고  $\nu_i$ 와  $\nu_i^{(j)}$ 는 기준셀과 주변셀  $j$ 에 있는  $i$ 번째 이동국의 음성 활동율이며 상호 독립이다. 또한  $N_0$ 는 단축 배경잡음 전력 스펙트럼 밀도이고  $W$ 는 시스템 대역폭을 나타낸다. 음성 활동을  $\nu_i$ 는 모든 셀에서 같고 모든  $i$ 에 대해서  $\nu_i = \nu$ 이며 완전한 전력제어를 가정할 때 전력제어를 받는 이동국으로부터 전력제어를 하는 기지국에 미치는 간섭 전력량은 모든  $i$ 에 대해서  $P_i = F$ 이다. 본 논문에서는  $i = 1$ 에서의 신호 전력을 통신 신호 전력으로 보고 그 외는 모두 간섭 신호 전력으로 가정한다. 또한 한 셀 내에 있는 이동국 수  $K$ 는 매우 크다고 가정한다.

이동국이 기준셀 기지국에 의해서 전력제어를 받을 경우 이 이동국에 의해서 기준셀 기지국이 받는 간섭 전력량을 기준셀 간섭 전력량이라 하고 이동국이 주변셀 기지국에 의해서 전력제어를 받을 경우 이 이동국에 의해서 기준셀 기지국이 받는 간섭 전력량을 주변셀 간섭 전력량이라 한다. 따라서 소프트 핸드오프시 기준셀 기지국이 받는 간섭 전력량  $I$ 는 기준셀 간섭 전력량  $I_{sc}$ 와 주변셀 간섭 전력량  $I_{oc}$ 의 합이며 식 (9)와 같다.

$$I = I_{sc} + I_{oc} \quad (9)$$

소프트 핸드오프에서 하나의 이동국에 의해서 발생하는 기준셀 간섭 전력량과 주변셀 간섭 전력량의 비를 모든 이동국들에 대해서 합하고 이를 평균한 것을 평균 간섭 비  $I_m$ 이라 할 때  $I_m$ 은 식 (10)으로 주어진다.

$$I_m = I_{all A_{n1}} + I_{all A_{n2}} + I_{all A_{nk}} \quad (10)$$

여기서,  $I_{all A_{n1}}$ 는 영역  $A_{n1}$ 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역에서의 평균 간섭 비,  $I_{all A_{n2}}$ 는 영역  $A_{n2}$ 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역에서의 평균 간섭 비, 그리고  $I_{all A_{nk}}$ 는 영역  $A_{nk}$ 와 같은 조

건에 해당하는 모든 영역에서의 평균 간섭 비이다.

식 (10)에서의 평균 간섭 비  $I_{all A_{n1}}$ ,  $I_{all A_{n2}}$ ,  $I_{all A_{nk}}$ 에 대해서 살펴보면 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

경우 1: 이동국이 소프트 핸드오프 영역에 위치하지 않는 경우를 나타낸다. 그림 1에서보면  $A_{nh}$  영역에 있는 이동국은  $r_1(x, y)$  거리에 있는 주변셀 기지국에 의하여 전력제어 되어지고  $r_0(x, y)$  거리에 있는 기준셀 기지국에 간섭 전력을 미치게된다. 식 (2), (3)을 이용하여  $A_{nh}$ 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역에 위치하는 이동국으로부터 기준셀 기지국에 수신되는 평균 간섭 비  $I_{all A_{n1}}$ 는 식 (11)로 주어진다.

$$\begin{aligned} I_{all A_{n1}} &= \\ E \left[ \int_{all A_{n1}} \left\{ \frac{r_1^\mu(x, y) 10^{\delta_1/10}}{r_0^\mu(x, y) 10^{\delta_0/10}} \right\} \rho dA(x, y) \right] \\ &= \frac{2K}{3\sqrt{3}R} \cdot e^{\beta^2(\beta\sigma)^2} \int_{all A_{n1}} \int H_1^\mu(x, y) dA(x, y) \quad (11) \end{aligned}$$

여기서  $r_1(x, y)$ 는 이동국에서 전력제어를 받는 주변셀 기지국까지의 거리이며  $r_0(x, y)$ 는 이동국에서 간섭을 미치게되는 기준셀 기지국까지의 거리이다.  $\delta_1 - \delta_0 = b(\xi_1 - \xi_0)$ 이며,  $\xi_1$ 과  $\xi_0$ 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  $H_1(x, y) = r_1(x, y) / r_0(x, y)$ 이다.

경우 2: 이동국이 기준셀을 포함한 소프트 핸드오프 영역에 위치하는 경우를 나타낸다. 이 경우 이동국은 전파 감쇄가 작은 기지국에 의하여 전력 제어되며 주변셀 기지국에 의해 전력제어 될 경우만 주변셀 간섭으로 작용한다. 만약 기준셀의 전파감쇄가 주변셀의 전파 감쇄보다 작을 경우 이동국은 기준셀에 의해 전력제어 되며 이 경우 기준셀 간섭 전력 성분이 된다. 따라서  $A_{n1}$ 과 같은 조건에 해당하는 모든 영역에 위치하는 이동국으로부터 기준셀 기지국에 수신되는 평균 간섭 비  $I_{all A_{n1}}$ 은 식 (12)로 주어진다.

$$\begin{aligned} I_{all A_{n1}} &= \int_{all A_{n1}} \int H_1^\mu(x, y) E[10^{(\delta_1 - \delta_0)/10}; \\ & r_1^\mu(x, y) 10^{\delta_1/10} < r_0^\mu(x, y) 10^{\delta_0/10}] \rho dA(x, y) \end{aligned}$$

$$= \frac{2K}{3\sqrt{3}R} \cdot e^{b^2(\beta\sigma)^2} \left\{ \int_{all A_{k1}} \int H_1^\mu(x, y) \right. \\ \left. Q\left[\sqrt{2}b\beta\sigma + \frac{M_1 - M_0}{\sqrt{2}b\sigma}\right] dA(x, y) \right\} \quad (12)$$

여기서 이중적분 내부의  $E[\cdot]$ 는 부등식이 만족되는 표본 영역에서의 평균이다. 식 (12)의 부등식은 주변셀의 전파감쇄가 기준셀의 전파감쇄보다 작다는 것을 의미한다. 또한  $Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^\infty e^{-x^2/2} dx$ ,  $M_i = 10 \mu \log r_i(x, y)$  ( $i = 0, 1$ )이다.

경우 3: 이동국이 기준셀을 포함하지 않는 소프트 핸드오프 영역에 위치하는 경우를 나타낸다. 이 경우 이동국은 가장 가까운 거리의 두 기지국 중 전파 감쇄가 작은 기지국에 의하여 전력 제어된다. 따라서  $A_{k2}$ 와 같은 조건에 해당하는 모든 영역에 위치하는 이동국으로부터 기준셀 기지국에 수신되는 평균 간섭 비  $I_{all A_{k2}}$ 는 식 (13)으로 주어진다.

$$I_{all A_{k2}} = I_1 + I_2 \quad (13)$$

여기서

$$I_1 = \int_{all A_{k2}} \int H_1^\mu(x, y) E[10^{(\delta_1 - \delta_0)/10}; \\ r_1^\mu(x, y) 10^{\delta_1/10} < r_2^\mu(x, y) 10^{\delta_2/10}] \rho dA(x, y) \\ = e^{b^2(\beta\sigma)^2} \cdot \frac{2K}{3\sqrt{3}R} \int_{all A_{k2}} \int H_1^\mu(x, y) \\ Q\left(\frac{b\beta\sigma}{\sqrt{2}} + \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{2}b\sigma}\right) dA(x, y) \quad (14)$$

$$I_2 = \int_{all A_{k2}} \int H_2^\mu(x, y) E[10^{(\delta_2 - \delta_0)/10}; \\ r_2^\mu(x, y) 10^{\delta_2/10} < r_1^\mu(x, y) 10^{\delta_1/10}] \rho dA(x, y) \\ = e^{b^2(\beta\sigma)^2} \cdot \frac{2K}{3\sqrt{3}R} \int_{all A_{k2}} \int H_2^\mu(x, y) \\ Q\left(\frac{b\beta\sigma}{\sqrt{2}} + \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{2}b\sigma}\right) dA(x, y) \quad (15)$$

식 (15)에서  $H_2(x, y) = r_2(x, y) / r_0(x, y)$  이다. 식 (13)에서  $I_1$ 는 이동국으로부터 거리가  $r_1(x, y)$ 만큼 떨어져있는 주변셀 기지국에 의하여 전력 제어되는 경우이며  $I_2$ 는 이동국으로부터 거리가  $r_2(x, y)$ 만큼 떨어져있는 주변셀 기지국에 의하여

전력 제어되는 경우이다. 식 (13)에서  $I_m$ 을 한 셀의 이동국 수  $K$ 로 나누면 하나의 이동국에 의한 평균 주변셀 간섭 전력비  $f$ 를 구할 수 있는데 이는 식 (16)과 같다.

$$f = \frac{I_m}{K} = \frac{I_{all A_{k1}} + I_{all A_{k2}} + I_{all A_{k3}}}{K} \\ = \frac{2e^{b^2(\beta\sigma)^2}}{3\sqrt{3} \cdot R} \cdot \left\{ \int_{all A_{k1}} \int H_1^\mu(x, y) dA(x, y) + \int_{all A_{k1}} \int H_1^\mu(x, y) Q\left(\sqrt{2}b\beta\sigma + \frac{M_1 - M_0}{\sqrt{2}b\sigma}\right) dA(x, y) + \int_{all A_{k2}} \int H_1^\mu(x, y) Q\left(\frac{b\beta\sigma}{\sqrt{2}} + \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{2}b\sigma}\right) dA(x, y) + \int_{all A_{k2}} \int H_2^\mu(x, y) Q\left(\frac{b\beta\sigma}{\sqrt{2}} + \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{2}b\sigma}\right) dA(x, y) \right\} \quad (16)$$

소프트 핸드오프 영역에 따른 평균 주변셀 간섭 전력 비를 나타내는 그림 3의 파라미터는 다음과 같다.  $\xi$ 의 계수  $b$ 는  $\sqrt{0.5}$ , 경로손실 지수  $\mu$ 는 4.0이며 셀 반경  $R$ 은 1000m이다. 또한  $\beta$ 는  $\ln 10/10$ 이고 로그-노말 섀도잉 정규분포성분  $\delta$ 의 표준 편차는 4, 6, 8, 10 이다.

### III. CDMA 시스템의 Erlang 용량

본 논문에서는 새로운 이동국들에 대하여 수신 처리 능력의 부족으로 인한 통화 블록킹 확률은 무시할 수 있을 만큼 충분한 수신 처리기가 있다고 한다. 그리고 한 셀의 기지국에 통화를 요청하는 이

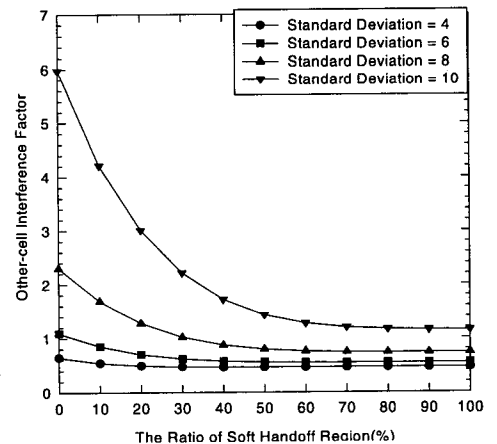


그림 3. 소프트 핸드오프 영역에 따른 평균 주변셀 간섭전력 비  $f$  ( $\mu=4.0$ )

동국들로 인한 초당 통화 요청 수는 평균과 분산이  $\lambda/\mu$ 인 포아송 분포를 따르는 랜덤 변수이며 불완전한 전력제어로 기지국 수신 전력  $P_i$ 는 로그-노말 분포를 따르는 랜덤 변수로 가정한다.  $\lambda$ 는 이동국들이 초당 한 기지국에 통화를 요청하는 평균 수(calls/sec)를 나타내며  $1/\mu$ 는 통화 당 평균 서비스 시간(sec)을 나타낸다. 그리고 주변셀들은 기준셀과 같은 이동국의 포아송 채널 점유 분포와 음성활동을 가진다고 가정한다. 따라서 소프트 핸드오프시 기준셀 기지국에 수신되는 총 간섭 전력량  $C_I$ 는 식 (8)로부터 식 (17)과 같다.

$$C_I = \sum_{i=2}^K \nu_i P_i + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} P_i^{(j)} + N_0 W$$

$$= \sum_{i=2}^K \nu_i E_{b_i} D_R + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} E_{b_i}^{(j)} D_R + N_0 W \quad (17)$$

$$\leq I_T \cdot W$$

여기서  $P_i = E_{b_i} \cdot D_R$ ,  $P_i^{(j)} = E_{b_i}^{(j)} \cdot D_R$ ,  $D_R$ 은 초당 비트 수를 나타내는 데이터 율이며  $E_{b_i}$ ,

$E_{b_i}^{(j)}$ 는 소프트 핸드오프시 기준셀과 주변셀  $j$ 에 있는  $i$ 번째 이동국의 송신전력에 의해서 기준셀 기지국에 수신되는 비트 에너지이다. 그리고 불완전한 전력제어로  $E_{b_i}$ ,  $E_{b_i}^{(j)}$ 는 로그-노말 분포를 가지는 랜덤 변수이며 서로 독립이다<sup>[1]</sup>. 또한 음성 활동을  $\nu_i$ ,  $\nu_i^{(j)}$ 는 이동국들에 대해서 서로 독립이고 0과 1의 값을 가지는 이진 랜덤변수이며  $q = \Pr(\nu_i=1) = \Pr(\nu_i^{(j)}=1) = 1 - \Pr(\nu_i=0) = 1 - \Pr(\nu_i^{(j)}=0)$ 이다. 또한  $I_T$ 는 기지국 최대 허용 간섭 전력 밀도이다.

소프트 핸드오프시 불완전한 전력제어하에서 모든 셀에 있는 이동국들로부터 기준셀 기지국에 수신되는 간섭 전력량이 기지국 최대 허용 간섭 전력량보다 높을 확률을 outage 확률,  $\Pr(outage)$ ,이라 정의하며 식 (18)과 같다.

$$\Pr(outage) = \Pr[C_I > I_T W] \approx \Pr[Z > K_0] \quad (18)$$

여기서  $Z = \sum_{i=1}^K \nu_i \varepsilon_i + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} \varepsilon_i^{(j)}$ 이고  $K_0 = (W/D_R)(1-\eta)$ 이다. 또한  $\eta = N_0/I_T$ 이고  $\varepsilon_i = E_{b_i}/I_T$ 이며  $\varepsilon_i^{(j)} = E_{b_i}^{(j)}/I_T$ 이다.

본 논문에서는  $Z$ 의 분포를 중심 극한의 정리를 이용하여 가우시안 분포로 근사화하였다. 소프트 핸드오프시  $Z$ 의 평균과 분산은 식 (19), (20)과 같다<sup>[1]</sup>.

$$E(Z) = E\left\{ \sum_{i=1}^K \nu_i \varepsilon_i + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} \varepsilon_i^{(j)} \right\}$$

$$= (\lambda/\mu)(1+f) q e^{\beta m} e^{(\beta \sigma)^2/2} \quad (19)$$

$$Var(Z) = Var\left\{ \sum_{i=1}^K \nu_i \varepsilon_i + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \nu_i^{(j)} \varepsilon_i^{(j)} \right\}$$

$$= (\lambda/\mu)(1+f) q e^{2\beta m} e^{2(\beta \sigma)^2} \quad (20)$$

식 (19), (20)에서 로그-노말 분포를 가지는 랜덤 변수  $\varepsilon_i$ 와 가우시안 랜덤변수  $x_i$ 와의 관계식은 식 (21)과 같다.

$$x_i = 10 \log_{10} \varepsilon_i \quad (21)$$

식 (21)에서  $x_i$ 의 평균과 분산을 각각  $m$ ,  $\sigma$ 라고 할 때 랜덤변수  $\varepsilon_i$ 의 평균치와 2차 모멘트는 식 (22), (23)과 같다.

$$E[\varepsilon_i] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\beta x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x_i-m)^2/2\sigma^2} dx_i$$

$$= e^{\beta m} e^{(\beta \sigma)^2/2} \quad (22)$$

$$E[\varepsilon_i^2] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\beta x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x_i-m)^2/2\sigma^2} dx_i$$

$$= e^{2\beta m} e^{2(\beta \sigma)^2} \quad (23)$$

여기서  $\varepsilon_i = 10^{x_i/10} = e^{\beta x_i}$ .

식 (18)에서 outage 확률값이 주어질 때 이동국들의 초당 평균 통화 요청 수,  $\lambda/\mu$ ,는 하나의 기지국에 의해서 이동국들에게 제공할 수 있는 초당 평균 통화 서비스 수,  $(\lambda/\mu)^*$ ,가 되었는데 이를 Erlang 용량으로 정의한다. 소프트 핸드오프시  $\Pr(outage)$ 은 식 (18)로부터 식 (24)와 같이 된다.

$$\Pr(outage) \approx \int_{K_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi var(Z)}} e^{-\frac{(Z-E(Z))^2}{2 var(Z)}} dZ$$

$$= Q\left[ \frac{K_0 - E(Z)}{\sqrt{Var(Z)}} \right] \quad (24)$$

$$= Q\left[ \frac{K_0 - (1+f)(\lambda/\mu)^* q e^{\beta m} e^{(\beta \sigma)^2/2}}{\sqrt{(1+f)(\lambda/\mu)^* q e^{2\beta m} e^{2(\beta \sigma)^2}}} \right]$$

이때  $(\lambda/\mu)^*$ 는 식 (24)로부터 식 (25)가 된다.

$$(\lambda/\mu)^* = \frac{K_0 F(B, \alpha)}{(1+f)q} \quad (25)$$

여기서

$$F(B, \alpha) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 + \frac{\alpha^3 B}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\alpha^3 B}} \right) \right]$$

$$B = \frac{\{Q^{-1}[\Pr(outage)]\}^2}{K_0} \text{ 이며 } a = e^{\beta m} e^{(\beta \sigma)^2/2}$$

이다.

소프트 핸드오프 영역에 따른 Erlang 용량을 나타내는 그림 4의 파라미터는 다음과 같다. 서비스 중단 확률인  $\Pr(outage)$ 은 0.1이고  $x_i$ 의 평균  $m$ 과 표준편차  $\sigma$ 는 각각 7dB, 2.5dB이다. 그리고 음성 활동을  $\nu_i$ 가 1이 될 확률  $q$ 는 0.4이고 데이터를  $D_R$ 은 9600bps이며 시스템 대역폭  $B$ 는 1.2288MHz이다. 또한 기지국 최대 허용 간섭 전력 밀도에 대한 단축 배경잡음 전력 스펙트럼 밀도 비  $\eta$ 는 0.1이고  $\beta$ 는 0.2303이다.

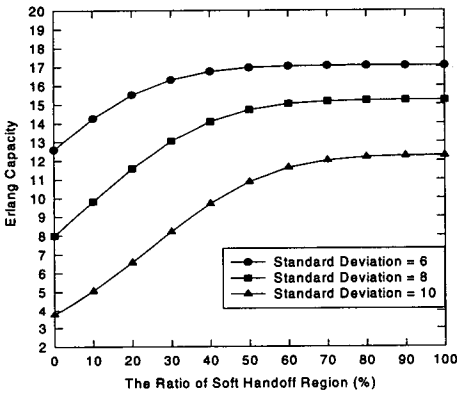


그림 4. 소프트 핸드오프 영역에 따른 Erlang 용량 ( $\mu=4.0$ )

#### IV. 수치 해석

소프트 핸드오프의 경우 이동국은 두 개 이상의 기지국 중에서 일정한 outage 확률을 유지하는 가운데 제일 낮은 송신 전력을 요구하는 기지국과 통신을 하게 된다, 따라서 다른 기지국에 간섭으로 작용하는 평균 간섭 전력량이 매우 낮아지게 된다.

그림 3은  $\mu = 4.0$ 과  $\sigma = 4, 6, 8, 10$ 이 주어진 경우 소프트 핸드오프 영역에 대한 평균 주변셀 간섭 전력비  $f$ 의 변화를 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있듯이  $\sigma$ 값이 클수록 소프트 핸드오프 영역에 따른 평균 주변셀 간섭 전력비  $f$ 가 큰 폭으로 감소된다. 따라서  $\sigma$ 값이 클수록 적절한 소프트 핸드오프 영역의 설정이 필요하고 이로 인해서 간섭 량이 상당히 감소함을 알 수 있다.

그림 4는 경로손실 지수  $\mu = 4.0$ 과 로그-노말 섀도잉 정규분포 성분의 표준편차  $\sigma = 6, 8, 10$ 인 경

우 소프트 핸드오프 영역에 따른 Erlang 용량의 변화를 나타낸다. 한 셀에서 수용할 수 있는 최대 Erlang 용량을 1로 볼 때 로그-노말 섀도잉 정규분포 성분의 표준편차가 8인 경우 0.9 Erlang 용량을 얻기 위해 36% 정도의 소프트 핸드오프 영역이 요구되나 표준편차가 10으로 증가할 경우 0.9 Erlang 용량을 얻기 위해서는 52%의 소프트 핸드오프 영역이 요구된다. 따라서 전파환경에 따른 소프트 핸드오프 영역의 적절한 선택은 한 셀당 Erlang 용량에 상당한 영향을 준다.

그러나 일정한 소프트 핸드오프 영역 이상으로 증가하면 Erlang 용량의 증가는 거의 일어나지 않으며 이것은 섀도잉에 의한 전파감쇄가 충분히 고려되었기 때문이다. 따라서 일정 영역 이상으로 증가시키는 것은 순방향 링크 간섭량만 증가시키게 되어 전체 시스템의 성능저하를 가져오게 한다.

로그-노말 섀도잉 정규분포 성분의 표준편차가 증가함에 따라 셀 경계에서 멀리 떨어져 있는 이동국이 반대편 기지국에 의하여 전력 제어될 확률이 높아짐으로 표준편차가 큰 전파 환경에서는 동일한 Erlang 용량을 얻기 위해 더 넓은 소프트 핸드오프 영역이 요구되어진다.

#### V. 결론

본 논문은 경로손실과 섀도잉으로 인한 통신 문제를 해결하기 위해서 역방향 링크 관점에서 소프트 핸드오프 영역을 제시하였다. 하드 핸드오프는 셀 경계에서 자주 발생하게되는 핸드오프 문제를 줄이고 섀도잉에 의한 불규칙적인 전파감쇄로부터 일정한 outage 확률을 얻기 위해 높은 송신전력을 보내야하며 이러한 높은 송신전력은 간섭 전력량을 증가시켜 Erlang 용량에 상당한 감소를 가져오게 한다.

그러나 소프트 핸드오프는 이동국이 여러 기지국과 동시에 통신을 하게 한다. 이때 이동국은 기지국에 수신되는 신호전력이 제일 높은 기지국과 최종적으로 통신을 함으로서 경로손실과 섀도잉에 의한 전파 손실이 적게 일어난다. 따라서 전파 환경으로 인한 송신 전력의 증가와 일정한 outage 확률을 유지하기 위한 섀도잉 극복 페이드 마진이 상당히 감소되어진다. 그러므로 소프트 핸드오프 영역의 증가는 기지국이 받는 간섭 전력량을 더욱 줄여들게 하여 Erlang 용량을 크게 증가시키며 이동국의 적은 송신전력으로도 우수한 통화 품질을 유지하게 한다.

