

CDMA 셀룰라 시스템에서 음성 통화시 얼랑 용량과 Pole Capacity 계산

정회원 한 익 수, 김 경 태*

The Calculation of Erlang Capacity and Pole Capacity over Voice Call of CDMA Cellular Systems

Ik-su Han, Kyung-Tae Kim* *Regular Members*

요 약

이상적인 전력 제어 하에서 셀룰라 CDMA 시스템의 이론적 최대 용량인 pole capacity를 구하고, 단일 셀과 다중 셀에 따른 가장 적당한 E_b/N_o 를 각각 구하였다. 셀룰라 FDMA 시스템과 TDMA 시스템에서 통화 블록킹(call blocking)은 FDMA의 경우에 모든 주파수 대역이 점유되었을 때 통화 블록킹이 일어나고, TDMA(IS-54)의 경우는 시간 슬롯이 다른 사용에 의해 모두 점유 되었을 때 통화 블록킹 현상이 일어난다. 그런데 셀룰라 CDMA 시스템의 역방향 링크에서 여러 명의 사용자가 다중으로 접속될 경우, 여러 명의 사용자에 의한 총 간섭 전력이 임계값을 초과할 때 통화 블록킹이 일어난다. 실제로 망 설계를 할때 셀룰라 CDMA 시스템에서 사용자 수는 블록킹 확률(blocking probability)이 약 1%~2%의 값을 갖는 “얼랑 용량(erlang capacity)”에 의하여 결정된다. 본 논문에서 제시한 셀룰라 CDMA 시스템의 블록킹 확률 계산은 다른 셀로부터 기인한 총 간섭전력의 제공으로 표현되는 새로운 방법을 제시하였다. 본 논문에서 셀룰라 CDMA 시스템의 얼랑 용량의 계산은 이미 다른 논문[1], [2]에서 해석된 값과 비교했을 때 같은 결과를 보였으며, 특히 pole capacity가 단일 셀에서 $E_b/N_o=7\text{dB}$, 다중 셀인 경우 $E_b/N_o=6\text{dB}$ 일때, 최대용량을 갖는다는 것을 입증하였다.

ABSTRACT

In this paper, the calculation of pole capacity in CDMA cellular systems over perfect power control has calculated each E_b/N_o at single-cell and multi-cell. In FDMA and TDMA(IS-54) cellular systems, a requested call will be blocked when all frequency or time slots have been assigned to other users. In a CDMA cellular system, blocking will occur when the reverse link multiple access interference power reaches a predetermined level which is set to maintain acceptable signal quality. The number of users for which the CDMA blocking probability equals a certain value (usually 1% or 2%) is defined to be the “erlang capacity” of the system and is related to an equivalent number of channels in an FDMA or TDMA cellular system. In this paper, the calculation of the CDMA blocking probability is based on a new analysis of the total squared power of other-cell interference. The calculation of CDMA erlang capacity based on this result gives a result that is a equal that given in previous analyses. The calculation of pole capacity is $E_b/N_o=6\text{dB}$ at multi-cell and $E_b/N_o=7\text{dB}$ at single-cell gives this paper that is different that given in previous $E_b/N_o=7\text{dB}$ at single-cell and multi-cell.

1. 서론

셀룰라 CDMA 시스템은 모든 사용자들이 동일한 주파수 대역을 사용하여 동시에 음성 및 데이터 정

보를 전송하는 시스템이기 때문에 이동 사용자들은 서로 간섭에 영향을 받는다. 따라서 CDMA 시스템은 간섭량에 의해 시스템의 용량이 제한된다. 간섭량을 감소시키기 위한 방법으로는 섹터화와 안테나

* 경원대학교 전기정보전자공학부

논문번호 : 010390-1213, 접수일자 : 2001년 12월 13일

어레이, 음성활동율의 감지, 전력제어가 있는데 Janson은 작은 전력 오차에 대하여 시스템의 용량이 민감하게 변함을 보였고, 음성 활동율을 조정하고, 섹터화를 해서 CDMA 시스템의 용량 증가에 영향을 주는 것을 보였^[3].

셀룰라 CDMA 시스템에서 역방향 링크의 이동전화 사용자들이 사용하는 채널의 수는 고정되지 않고 랜덤하게 변화한다. 그리고 기지국 수신기는 역방향 링크에서 이동국이 발생시키는 간섭전력과 잡음전력을 모두 수신하고, 총 간섭전력이 주어진 임계치를 초과할 때 “CDMA Blocking” 현상이 일어난다고 한다. 이 현상은 1993년 Viterbi가 가우시안 변수 및 정규 분포 랜덤 변수(lognormal random variable)로 나타낼 수 있음을 밝혔으며 이것은 셀룰라 CDMA 시스템의 열량 용량을 설명하는데 사용되고, 1993년 Kyoung Il Kim은 간섭전력에 의해 용량의 제한을 받는 CDMA 시스템에서 “주파수 재사용 효율(frequency reuse fraction)”을 계산하는 방법을 제시하였다.^{[1], [2], [3]}

본 논문에서는 기존의 간섭전력으로 주파수재사용 효율을 구하는 방법에 대해 새롭게 간섭 제공 전력을 적용해 주파수 재사용 효율을 유도하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 먼저 기존의 셀룰라 CDMA 시스템에서 블록킹 확률(blocking probability)과 간섭 잡음 전력을 이용해서 주파수 재사용 효율(frequency reuse fraction)을 도출한 뒤 간섭 전력을 간섭 제공 전력으로 수식을 유도하여 주파수 재사용 효율을 새로이 구하고자 한다. 새로이 구한 주파수 재사용 효율을 이용하여 $R_b(9600\text{bps}, 14400\text{bps})$ 에 따르는 블록킹 확률 및 열량용량을 시뮬레이션에 의하여 구하고, 이것을 기존의 열량 표와 비교하여 차이점들을 논한다. 또한 종래에는 망 설계 시, 단일 셀과 다중 셀에 대한 pole capacity를 구할 때 일률적으로 $E_b/N_o=7\text{dB}$ 를 적용하였는데, 본 논문에서는 E_b/N_o 가 변화할 때 데이터율 $R_b(9600\text{bps}, 14400\text{bps})$ 에 따르는 최적의 E_b/N_o 를 시뮬레이션에 의하여 그 결과를 제시하고자 한다.

II. 셀룰라 CDMA 시스템에서 블록킹 확률(Blocking Probability)과 주파수 재사용 효율(Frequency Reuse Fraction)

먼저 역방향 링크에서 K 명의 활성 사용자를 갖는 격리된 단일 CDMA 셀(Cell)을 고찰하자. 통화 가

능성이 있는 잠재적인 $(K+1)$ 번째 사용자가 볼 때, 다른 K 명의 사용자들의 총 파워전력 P_{TOT} 은 간섭전력이 되며 전파전파 특성 상 K 명의 각 사용자들 파워전력 P_i 과 K 명의 활성 사용자들의 통화 패턴 때문에 발생하는 랜덤 전력 신호는 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_{TOT} = \nu_1 P_1 + \nu_2 P_2 + \dots + \nu_K P_K + N_o W$$

$$= I_o W \tag{1}$$

여기서, W 는 CDMA 확산대역폭

ν_i 는 i 번째 사용자의 랜덤 음성 활성도

N_o 는 열잡음 전력 밀도

I_o 는 간섭 전력 밀도

P_i 는 i 번째 사용자의 랜덤 신호 전력

여기에서 중요한 사항은 K 번째 사용자 자신의 파워전력이 다른 가입자의 수가 상대적으로 매우 많기 때문에 다른 사용자들의 이동전화 통화량 변동에 따라 랜덤하게 변화된다. 식 (1)을 $I_o R_b$ 로 나누어 다음과 같이 정규화 할 수 있다.

$$\frac{P_{TOT}}{I_o R_b} = \nu_1 \frac{E_{bi}}{I_o} + \nu_2 \frac{E_{b2}}{I_o} + \dots$$

$$+ \nu_K \frac{E_{bK}}{I_o} + \frac{N_o}{I_o} \cdot \frac{W}{R_b} \tag{2}$$

$$\cong Z_K + \frac{N_o}{I_o} \cdot \frac{W}{R_b} = \frac{W}{R_b} = const. \tag{3}$$

또는

$$Z_K = \sum_{i=1}^K \nu_i \frac{E_{bi}}{I_o} = \sum_{i=1}^K \nu_i \rho_i = \frac{W}{R_b} (1 - \eta) \tag{4}$$

여기서, $\eta \cong N_o/I_o$ 은 셀룰러 CDMA 시스템의 부하의 정도를 판단하는 파라미터이고, 본 논문에서는 부하계수라 하겠다. W/R_b 는 처리이득이다. R_b 는 비트율이고, E_b 는 비트 당 에너지이다.

셀룰러 CDMA 시스템에서 부하계수 값이 $\eta < 0.1$ 이면 간섭에 의해 과부하가 걸리는 것을 고찰하였고^[1] 주어진 η 값은 $(K+1)$ 번째 이동 전화 사용자가 이용할 수 있는 채널은 랜덤변수 Z_K 의 분포에 의해 특징지어진다. 즉, 랜덤변수 Z_K 가 목표된 임계값을 넘는다면 그 채널은 $(K+1)$ 번째 사용자가 원활하게 사용할 수 없게 된다. 따라서 통화 블록킹 상태가 된다. 확률적으로 표현하면 랜덤 변수 Z_K 가 어떤 임

계값(Z_{crit})을 초과하는 확률이 된다. 즉,

$$\begin{aligned}
 P_{B_{CDMA}} &= \Pr\left\{Z_K > \frac{W}{R_b} \cdot (1 - \eta_{crit})\right\} \\
 &\equiv \Pr\{Z_K > Z_{crit}\} \\
 &= P_r\left\{\frac{Z_K - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}} > \frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}}\right\} \\
 &= Q_Z\left(\frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}}\right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

이다. 여기서, η_{crit} 는 목표한 부하계수의 값이다. 식 (5)에서 함수 $Q_Z(\cdot)$ 는 랜덤변수 Z_K 의 정규화된 값이다. Z_K 는 랜덤변수의 항이므로 중심제한정리(central limit theorem)를 이용하여 $P_{B_{CDMA}}$ 에 가우시안 분포를 적용하였다.

$$Q_Z(x) \approx Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (6)$$

식 (6)을 블록킹 확률 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$P_{B_{CDMA}} = Q\left(\frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}}\right) \quad (7)$$

여기서, Z_K 의 평균 $E\{Z_K\}$ 과 분산 $Var\{Z_K\}$ 은 블록킹 확률 식 (7)의 수학적인 확률계산이면서 또한 셀룰라 CDMA 시스템의 열량용량을 계산할 수 있는 식이다.

i 번째 사용자에게 대한 랜덤변수 $\rho_i \triangleq E_{bit}/I_o$ 은 대표값 $m_{dB}=7dB$ 와 표준편차 $\sigma_{dB}=2.5dB$ 인 가우시안 확률분포를 만족하고 있으며 일반적으로 랜덤변수 ρ_i 는 $\rho_i = \exp\{\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB})\}$ 로 쓸 수 있고, $\beta = (\ln 10)/10 = 0.2303$ 이다^[2].

ρ_i 의 평균 $E\{\rho_i\}$ 과 대표값 $Med\{\rho_i\}$, 그리고 ρ_i 의 자승 평균(mean square) $E\{\rho_i^2\}$ 는 다음과 같다.

$$Med\{\rho_i\} = \rho_{med} = \exp\{0.2303 \cdot m_{dB}\} = 5.01 \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 E\{\rho_i\} &= E\{\exp[0.2303 \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB})]\} \\
 &= \rho_{med} \exp\left\{\frac{1}{2}(0.2303)^2 \sigma_{dB}^2\right\} \\
 &= \rho_{med} \exp\left\{\frac{1}{2}(0.2303)^2 \times 7^2\right\} = 1.18 \rho_{med} \quad (9)
 \end{aligned}$$

이고

$$\begin{aligned}
 E\{\rho_i^2\} &= E\{\exp\{2 \times 0.2303 \times (m_{dB} + \sigma_{dB})\}\} \\
 &= \rho_{med}^2 \exp\{2(0.2303)^2 \sigma_{dB}^2\} \\
 &= \rho_{med}^2 \exp\{2 \times (0.2303)^2 \times 7^2\} = 1.94 \rho_{med}^2 \quad (10)
 \end{aligned}$$

식 (8), (9), (10) 의해서 단일 CDMA셀에 대한 랜덤변수 Z_K 의 평균과 자승평균은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E\{Z_K\} &= E_K\{E\{Z_K|K\}\} \\
 &= E\{K\}E\{\nu_i\}E\{\rho_i\} \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \rho_{med} \quad (11)
 \end{aligned}$$

그리고

$$\begin{aligned}
 E\{Z_K^2\} &= E_K\{E\{Z_K^2|K\}\} \\
 &= E_K\{KE\{\nu_i^2 \cdot \rho_i^2\} \\
 &\quad + K(K-1)[E\{\nu_i \cdot \rho_i\}]^2\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기에서 K 는 일반적인 스위칭 시스템의 통화량에 해당되며, 이것의 확률 분포는 포아송 분포를 갖는다. 그 이유는 K 의 평균과 분산이 포아송 분포로 가정되었기 때문에 $Var\{K\} = \bar{K}$ 에 대해서 Z_K 의 분산은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Var\{Z_K\} &= E\{Z_K^2\} - [E\{Z_K\}]^2 \\
 &= \bar{K} \cdot Var\{\nu_i \rho_i\} \\
 &\quad + \overline{K^2 \cdot [E\{\nu_i \rho_i\}]^2} - [\overline{KE\{\nu_i \rho_i\}}]^2 \\
 &= \bar{K} \cdot Var\{\nu_i \cdot \rho_i\} + Var\{K\}[E\{\nu_i \cdot \rho_i\}]^2 \\
 &= \bar{K}\{Var\{\nu_i \cdot \rho_i\} + [E\{\nu_i \cdot \rho_i\}]^2\} \\
 &= \bar{K} \cdot E\{\nu_i^2 \cdot \rho_i^2\} \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot \bar{\rho}_i^2 = \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \rho_{med}^2 \quad (13)
 \end{aligned}$$

다중 CDMA셀의 경우에 대한 랜덤변수 Z_K 의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E\{Z_K\} &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 [\rho_{med(S-C)} + \rho_{med(O-C)}] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \cdot \rho_{med(S-C)} \left[1 + \frac{\rho_{med(O-C)}}{\rho_{med(S-C)}}\right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \cdot \rho_{med(S-C)} \cdot (1+F) \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서, F 는 주파수 재사용 효율 (frequency reuse fraction)이다. 그리고 아래 첨자 ($S-C$)는 같은 셀이고, ($O-C$)는 다른 셀이다.

주파수 재사용 효율 F 는 다른 셀로부터 기인한 총 간섭 전력 대 같은 셀로부터 기인한 총 간섭 전력의 비로 정의 되므로 이 정의에 의해 수식을 전개하면, Z_k 의 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}\{Z_k\} &= \overline{K} \cdot \overline{\nu}_i^2 \cdot 1.94 [\rho_{med(S-C)}^2 + \rho_{med(O-C)}^2] \\ &= \overline{K} \cdot \overline{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \cdot \rho_{med(S-C)}^2 \left[1 + \frac{\rho_{med(O-C)}^2}{\rho_{med(S-C)}^2} \right] \\ &= \overline{K} \cdot \overline{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \cdot \rho_{med}^2 \cdot (1+F') \end{aligned} \quad (15)$$

$$F' \triangleq \frac{\rho_{med(O-C)}^2}{\rho_{med(S-C)}^2} \quad (16)$$

여기서, F' 는 간섭 전력의 제공으로 표현된 새로운 주파수 재사용 효율이다.

단일 CDMA 셀뿐만 아니라 다중 CDMA 셀의 경우, 통화 블록킹 확률을 나타내는 식 (7)에다가 Z_k 의 평균인 식 (11)과 분산인 식 (13)을 대입하여 구한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{B_{CDMA}} &= Q\left(\frac{Z_{crit} - E\{Z_k\}}{\sqrt{\text{Var}\{Z_k\}}}\right) \\ &= Q\left(\frac{\frac{W}{R_b} \cdot (1 - \eta_{crit}) - 1.18 \cdot \overline{K} \cdot \overline{\nu}_i \cdot \rho_{med} \cdot (1+F)}{\sqrt{1.94 \overline{K} \cdot \overline{\nu}_i^2 \cdot \rho_{med}^2 \cdot (1+F')}}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, \overline{K} 는 열량 용량이다.

III. Pole Capacity

셀룰라 CDMA 시스템이 이상적인 전력 제어 상태라고 가정하고, 한 개의 이동국 송신전력을 기지국이 수신 하였을 때 수신 전력 대 간섭 전력의 비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{S}{I} &= \frac{P_{rx}}{(N-1) \cdot P_{rx} \cdot \nu \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{1}{S} + N_o \cdot W} \\ &\cong \frac{P_{rx}}{\left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot P_{rx} \cdot \nu + N_o \cdot W} \\ &= \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, F : 주파수 재사용 효율,

R_b : 비트율(bit rate),

S : 섹터화 이득,

W : CDMA 대역 폭,

ν : 랜덤 음성활성도,

$N_o W$: CDMA 주파수 대역의 열잡음,

P_{rx} : 기지국이 수신한 이동국의 전력.

N : 사용자 수

식 (18)으로부터 P_{rx} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{rx} &= \left(\frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W}\right) \cdot \left\{ \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot P_{rx} \cdot \nu + N_o \cdot W \right\} \\ &= \left\{ 1 - \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu \right\} \\ &= \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot N_o \cdot W \\ &= \frac{\frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot N_o \cdot W}{1 - \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu} \end{aligned} \quad (19)$$

셀 내의 모든 사용자들의 총 송신 전력을 기지국이 수신한다면, 기지국의 총 수신 전력은 식 (20)이 된다.

$$P_{total\ RX} = \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot P_{rx} \cdot \nu + N_{th} \cdot W \quad (20)$$

여기서, N_{th} 는 열잡음이다.

식 (20)에 식 (19)를 대입하여 정리하면 기지국의 총 수신 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{total\ RX} &= \frac{\frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu \cdot N_{th} \cdot W}{1 - \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu} \\ &\quad + N_{th} \cdot W \\ &= \left\{ 1 + \frac{\frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu}{1 - \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{W} \cdot \left(\frac{N}{F \cdot S} - 1\right) \cdot \nu} \right\} \cdot N_{th} \cdot W \end{aligned} \quad (21)$$

IV. 셀룰라 CDMA 시스템의 새로운 주파수 재사용 효율 유도

만일 이상적인 전력제어이고 R^d 인 전파법칙을 따

른다면, 같은 셀 내에서 두개의 이동국 송신기에서 방사된 전력 P_1 대 P_2 의 비는 기지국으로부터 각각의 이동국까지 거리 비 D_1 대 D_2 비의 4승에 비례한다.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 \quad (22)$$

셀 모서리 부분에 있는 이동국으로부터 기지국까지 개념상 거리는 셀의 반지름 R 이다. 기지국에서 이동단말기로 전송된 전력 P 는 이상적인 최대전송 전력(P_{max})과 실제의 전력 제어된 수신 전력 (P_o)의 관계로 표현할 수 있다.

$$P = P_{max} \left(\frac{r}{R}\right)^4 = P_o r^4 \quad (23)$$

여기서, r 은 자신의 기지국에서 이동단말기까지 거리이고, $P_o = P_{max}/R^4$ 이다.

다중 셀 CDMA 시스템에서 이상적인 전력제어 상황이라고 가정하면, 다른 셀(cell 2) 내에 있는 이동단말기로부터 또 다른 셀(cell 1)에서 수신된 전력은 다음과 같다.

$$P_{other} = \frac{P_o r^4}{D_{21}^4} = P_o \left(\frac{r}{D_{21}}\right)^4 \quad (24)$$

여기서, r = Cell 2내의 기지국에서 이동국까지 거리 ($\leq R$)

D_{21} = Cell 1내의 기지국에서 이동국까지 거리

그림 1에서 표현된 것처럼 기지국과 다른 기지국

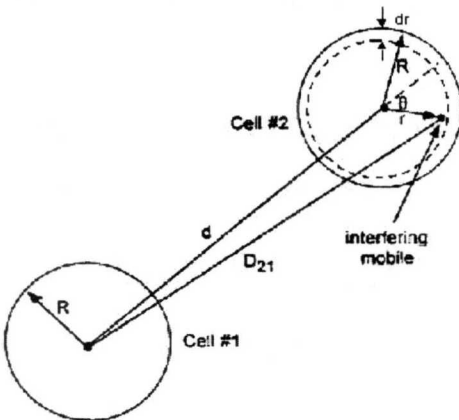


그림 1. 셀 2내에 이동국이 있을 때, 다른 셀(기지국)로부터의 간섭

사이의 거리가 d 라면, 다른 기지국과 이동국까지의 거리 D_{21} 는 아래와 같이 표현된다.

$$D_{21} = \sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos \theta} \quad (25)$$

여기서, ($r, \theta : 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi$)는 셀2 안에 있는 이동국이 셀2의 기지국 중앙에 대하여 위치를 나타내는 파라미터 범위가 된다.

각 셀의 면적 πR^2 에 K 명의 사용자들의 전력밀도가 균일하게 분포되었다고 가정하면, 거리 d 인 셀로부터 간섭을 받는 기지국 중앙의 총 평균 간섭전력은 다음과 같다^[3].

$$P(d) = \frac{2KP_o}{\pi R^2} \int_0^R dr \cdot r^5 \cdot \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^2} \quad (26)$$

파라미터 $k=d/R$ 을 사용하면, 총 평균 간섭 전력은 다음과 같다.

$$P(d = kR) = 2KP_o \left[2k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] \quad (27)$$

그리고 기지국 중앙의 총 평균 간섭 전력과 주어진 셀 안에서 이동국의 총 수신 전력 KP_o 와의 합을 $KI_o R_b$ 으로 나눈 것을 주파수 재사용 계수(frequency reuse factor)라고 하고, 식 (28)과 같이 나타낸다.

frequency reuse factor

$$\cong 1 + F = \frac{KP_o + \sum_k P(d = kR)}{KP_o} \quad (28)$$

여기서, 주파수 재사용 효율(frequency reuse fraction) F 는 다음과 같다.

$$F = \frac{\sum_k P(kR)}{KP_o} = 2 \sum_k \left[2k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] = \frac{1}{KI_o R_b} \frac{\sum_k P(d = kR)}{KP_o} \approx \frac{\rho_{med(O-C)}}{\rho_{med(S-C)}} \quad (29)$$

FM 시스템에서 이웃 셀로부터의 간섭분포율(그림 2)에 따라 파라미터 K 들의 값은 $k_1 \approx 0.06, k_2 \approx$

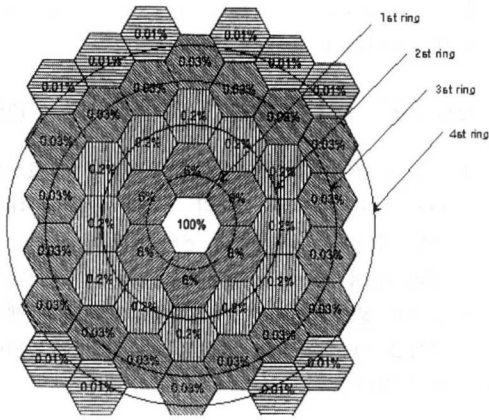


그림 2. FM 시스템에서 이웃 셀로부터의 간섭 분포율

0.002, $k_3 \approx 0.0003$ 및 $k_4 \approx 0.0001$ 이 되며, 이 값들을 식 (30)에 적용해서 구한 F 값은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{1 + 6k_1 + 12k_2 + 18k_3 + \dots}$$

$$\approx \frac{1}{1 + 6(0.06) + 12(0.002) + 18(0.0003) + 24(0.0001)}$$

$$\approx 0.72 \quad (30)$$

셀 반지름 R 를 갖는 셀룰라 패턴에 대하여 첫 번째 링은 $k=2$ 인 6개의 인접 셀을 갖고, 두 번째 링은 $k=4$ 인 6개의 인접 셀과 $k=2\sqrt{3}$ 인 6개의 인접 셀을 갖는다. 같은 방법으로 세 번째 링은 $k=6$ 인 6개의 인접 셀과 $k=2\sqrt{7}$ 인 12개의 인접 셀을 갖는다(그림 3). 그리고 첫 번째 링부터 세 번째 링까지에 대하여 $F=0.3198$ 을 갖고, 네 번째 링 이상 링의

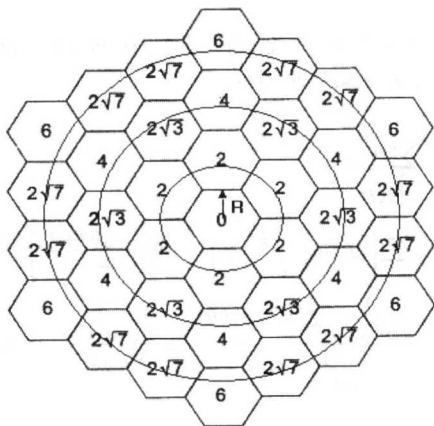


그림 3. 반지름이 R 일 때 셀의 중심에 대한 다른 셀의 중심 거리

개수가 존재할 때 대하여 $F \approx 0.33$ 이 적용된다^[3]. 주파수 재사용 효율을 인접 셀에 의한 간섭전력과의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$F = 6P(2R) + 6P(2R\sqrt{3}) + 6P(4R) + 12P(2R\sqrt{7}) + 6P(6R) + \dots \approx 0.33 \quad (31)$$

여기서, $6P(2R) + 6P(2R\sqrt{3}) + 6P(4R) + 12P(2R\sqrt{7}) + 6P(6R) = 0.3198$ 이다.

본 논문에서는 특히 간섭 제곱 전력으로 F' 를 표시하고 이를 블록킹 확률을 계산하게 되는데 사용하기 위해 다른 셀 안에 있는 이동국으로부터 수신된 기지국의 전력 제곱은 식 (32)와 같이 쓸 수 있는데 이를 간섭 제곱 전력이라고 하고 다음과 같이 표현된다.

$$P_{other}^2 = P_o^2 \left(\frac{r}{D_{21}} \right)^8 \quad (32)$$

여기서, D_{21} 은 셀1안에 있는 기지국으로부터 셀2안에 있는 이동국까지의 거리이다(그림 1). 총 간섭 제곱 전력을 $P_2(d)$ 라 표시하고 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_2(d) = \frac{2KP_o^2}{\pi R^2} \int_0^R dr \cdot r^9 \cdot \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd\cos\theta)^4} \quad (33)$$

$P_2(d)$ 를 부록에 있는 수식을 이용하여 k (셀1의 기지국과 셀2의 기지국간의 거리를 셀 반경으로 나타낸 값)항으로 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_2(d = kR) = 2KP_o^2 \left\{ \frac{k^6 + 9k^4 + 9k^2 + 1}{12(k^2 - 1)^6} - \frac{4k^6 + 45k^4 + 54k^2 + 7}{60(k^2 - 1)^5} + \frac{2k^6 + 30k^4 + 45k^2 + 7}{40(k^2 - 1)^4} - \frac{4k^6 + 90k^4 + 180k^2 + 35}{120(k^2 - 1)^3} + \frac{k^6 + 45k^4 + 135k^2 + 35}{60(k^2 - 1)^2} - \frac{3k^2 + 18k + 7}{4(k^2 - 1)} + \frac{11k^2}{15} - \frac{7}{2} + 8k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) \right\} \quad (34)$$

이제 식 (29)와 달리 주파수 재사용 효율을 다시 정리할 필요가 있다. 이유는 식 (34)와 같이 전력 제곱 항으로 표시하였기 때문에 이것을 주파수 재

사용 효율 정의에 의하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F' &= \frac{\sum_k P_2(d=kR)}{KP_o^2} \\
 &= \frac{\frac{1}{K(I_oR_b)^2} \sum_k P_2(d=kR)}{\frac{1}{K(I_oR_b)^2} KP_o^2} \\
 &\approx \frac{\rho_{med}^2(O-C)}{\rho_{med}^2(S-C)} \quad (35)
 \end{aligned}$$

식 (29)와 식 (35)을 비교해보면, 식 (35)가 식 (29)를 제공한 비로 표시되었음을 알 수 있다.

V. 셀룰라 CDMA 시스템의 열량용량과 Pole Capacity 계산 결과

CDMA 블록킹 확률 $P_{B_{CDMA}}$ 은 식 (17)에 주어졌었다. 이 식에 $W=1.2288MHz$, $\overline{v}_i=0.4$, $\overline{v}_i^2=0.31$, $\rho_{med}=7dB=5.01^{[11]}$ 을 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 R_b &= 9.6kbps \text{ 일 때} \\
 P_{B_{CDMA}} &= Q\left(\frac{115.2 - 2.37(1+F)\overline{K}}{3.89\sqrt{(1+F')\overline{K}}}\right) \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_b &= 14.4kbps \text{ 일 때} \\
 P_{B_{CDMA}} &= Q\left(\frac{76.8 - 2.37(1+F)\overline{K}}{3.89\sqrt{(1+F')\overline{K}}}\right) \quad (37)
 \end{aligned}$$

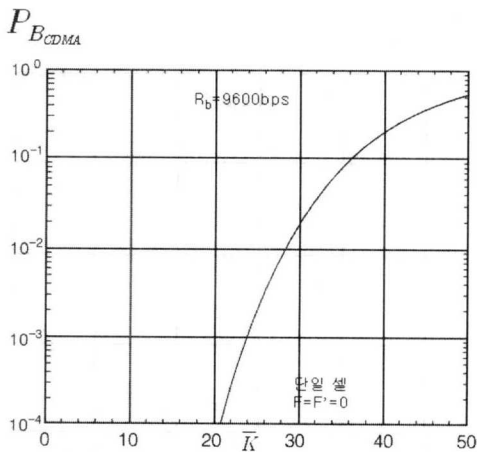


그림 4. 단일 셀 ($F=F'=0$), $R_b=9600bps$

$R_b=9.6kbps$ 와 $R_b=14.4kbps$ 에 대한 블록킹 확률인 식 (36)과 식(37)은 IS-95 셀룰라 CDMA 시스템에 대해 일반적으로 사용할 수 있다.

식 (36)을 시뮬레이션을 한 결과는 그림 4와 5, 6에 각각 보였고, 식 (37)을 시뮬레이션 한 결과는 그림 7, 8, 9에 보였다.

그림 4는 $R_b=9.6kbps$ 이고 $F=F'=0$ 일 때 즉, CDMA 단일 셀일 때 블록킹 확률에 대한 열량용량 \overline{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 열량용량 \overline{K} 를 찾아보면 28열량이다. 또한 B열량 표에서 블록킹 확률이 0.01일 때 28.1열량과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=39$ 명이었으며, 열량B 표의 값은 28.1으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

그림 5는 $R_b=9.6kbps$ 이고 $F=0.33$, $F'=0.086$ 일 때 즉, CDMA 다중 셀일 때 블록킹 확률에 대한 열량용량 \overline{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 열량용량 \overline{K} 를 찾아보면 22열량이다. 또한 B열량 표에서 블록킹 확률이 0.01일 때 22.0열량과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=32$ 명이었으며, 열량B 표의 값은 22.0열량으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

그림 6은 $R_b=9.6kbps$ 이고 $F=0.55$, $F'=0.086$ 일 때 즉, CDMA 다중 셀일 때 블록킹 확률에 대한 열량용량 \overline{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 열량용량 \overline{K} 를 찾아보면 20열량이다. 또한 B열량 표에서 블록킹 확률이 0.01

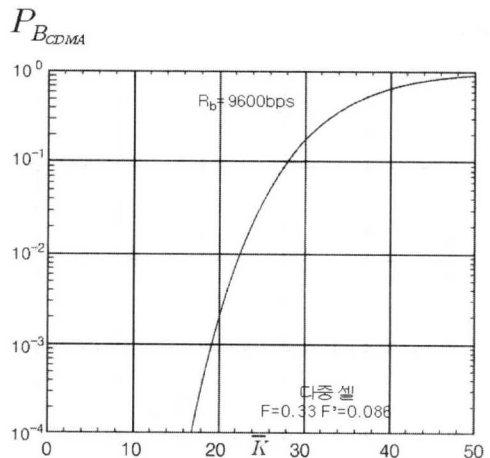


그림 5. 다중 셀 ($F=0.33$, $F'=0.086$) $R_b=9600bps$

일 때 20.3얼랑과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=30$ 명이었으며, 얼랑 B 표의 값은 20.3얼랑으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

그림 7는 $R_b=14.4kbps$ 이고 $F=F'=0$ 일때, 즉, PCS 단일 셀일 때 블록킹 확률에 대한 얼랑용량 \bar{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 얼랑용량 \bar{K} 를 찾아보면 16.1얼랑이다. 또한 B얼랑 표에서 블록킹 확률이 0.01일 때 16.1얼랑과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=25$ 명이었으며, 얼랑 B 표의 값은 16.1얼랑으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

그림 8는 $R_b=14.4kbps$ 이고 $F=0.33, F'=0.086$

일때, 즉, PCS 다중 셀일 때 블록킹 확률에 대한 얼랑용량 \bar{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 얼랑용량 \bar{K} 를 찾아보면 12.8얼랑이다. 또한 B얼랑 표에서 블록킹 확률이 0.01일 때 12.8얼랑과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=21$ 명이었으며, 얼랑 B 표의 값은 12.8얼랑으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

그림 9는 $R_b=14.4kbps$ 이고 $F=0.33, F'=0.086$ 일 때, 즉, PCS 다중 셀일 때 블록킹 확률에 대한 얼랑용량 \bar{K} 의 관계를 표현하였는데 그림에서 블록킹 확률이 0.01일 때 얼랑용량 \bar{K} 를 찾아보면 12얼랑이다. 또한 B얼랑 표에서 블록킹 확률이 0.01일 때

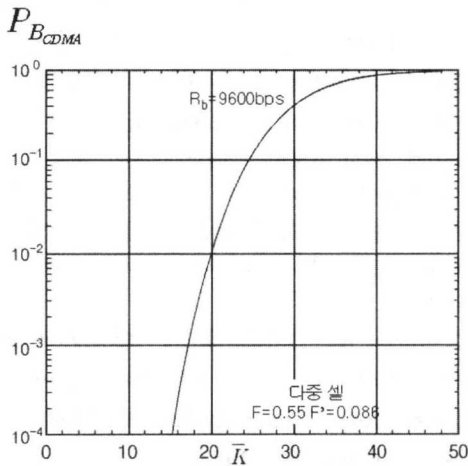


그림 6. 다중 셀 ($F=0.55, F'=0.086$) $R_b=9600bps$

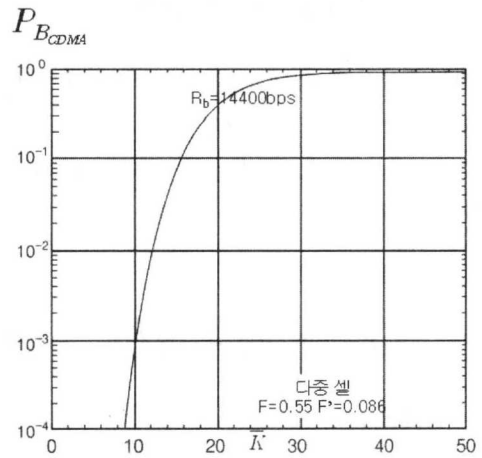


그림 8. 다중 셀 ($F=0.33, F'=0.086$) $R_b=14400bps$

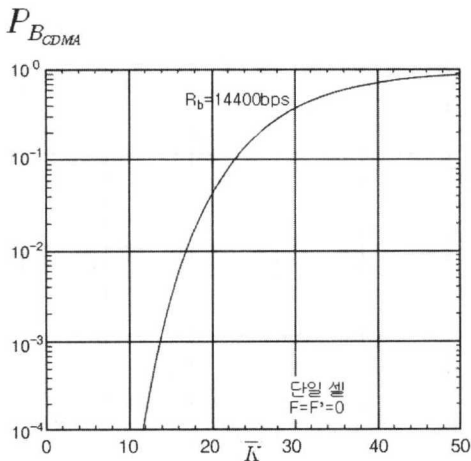


그림 7. 단일 셀 ($F=F'=0$) $R_b=14400bps$

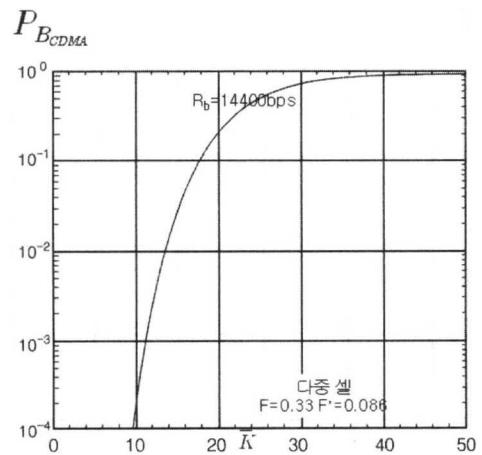


그림 9. 다중 셀 ($F=0.55, F'=0.086$) $R_b=14400bps$

12.0열량과 대응되는 사용자의 수 N 를 찾으면 사용자의 수는 $N=20$ 명이었으며, 열량 B 표의 값은 12.0 열량으로서 본 논문의 결과와 차이가 없음이 확인되었다.

pole Capacity의 가정은 이상적인 전력 제어이고 열잡음이 존재하지 않는 셀 환경에서 이론적인 역방향 최대용량을 의미한다. 본 논문에서는 다음과 같이 파라미터 값을 정한 후, 식 (21)를 시뮬레이션 하여 최적의 E_b/N_0 과 역방향 최대용량을 구하였다.

- $F = 0.65$
- $S = 0.85$
- $R_b = 9600\text{bps}$ (CDMA 시스템)
- $= 14400\text{bps}$ (PCS 시스템)
- $W = 1.2288\text{MHz}$
- $\nu = 0.4$

그림 10은 E_b/N_0 가 6 ~ 13dB까지 변화할 때, CDMA 시스템($R_b=9600\text{bps}$)의 기지국 수신 전력 대 pole capacity를 나타낸 것으로서 E_b/N_0 값이 7dB

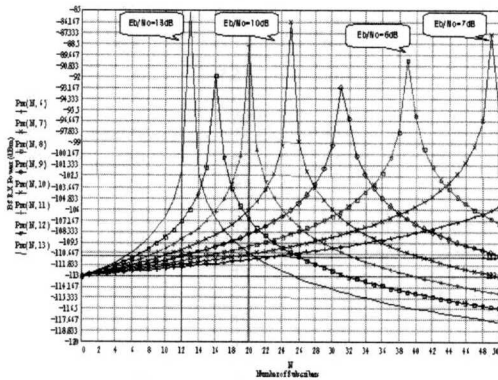


그림 10. 단일 셀에서 pole capacity(CDMA)

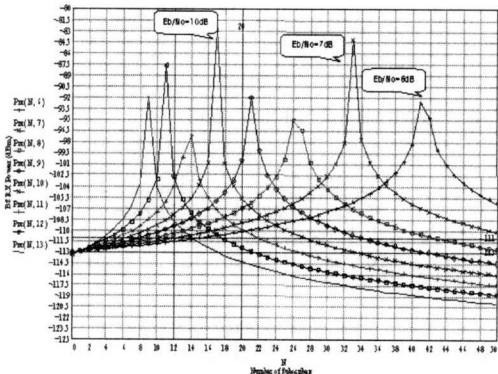


그림 11. 단일 셀에서 pole capacity(PCS)

일 때 기지국 수신 전력과 pole capacity가 최대인 것을 알 수 있다. 즉, E_b/N_0 가 7dB일 때를 살펴보면 수신 전력은 -87.333dBm으로 세 번째 높은 값을 갖고 Pole capacity는 49명으로 가장 많다. 그러나 E_b/N_0 값이 13dB일 때는 수신세기는 -85dBm으로 가장 높지만 그에 따른 pole capacity N 은 13명이 된다. 그러므로 기지국 수신전력과 pole capacity N 에 대한 최적의 E_b/N_0 값은 7dB이고, CDMA 무선망 설계시에 실제로 쓰이는 값으로 이론값과 차이가 없음이 증명되었다.

그림 11는 E_b/N_0 가 6 ~ 13dB까지 변화할 때, R_b 가 14400bps인 경우 즉, PCS 시스템에서 pole capacity를 나타냈다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 E_b/N_0 값이 6dB인 경우 pole capacity는 43명을 나타내지만 수신세기는 -92dbm으로 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 그런데 E_b/N_0 가 7dB인 경우 pole capacity는 33명이고 수신세기는 약 -87dBm으로 두 번째로 수신강도를 보이고 있다. 그러므로 앞의 경우와 동일하게 E_b/N_0 를 7dB으로 사용하는 것

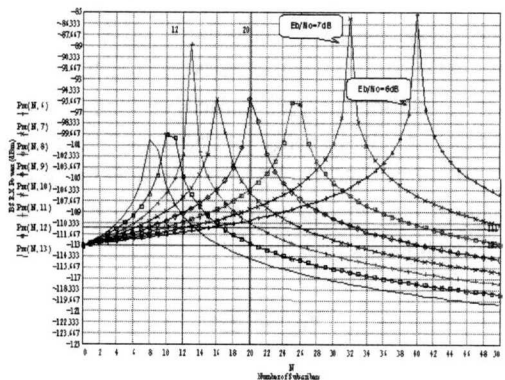


그림 12. 다중 셀에서 pole capacity(CDMA)

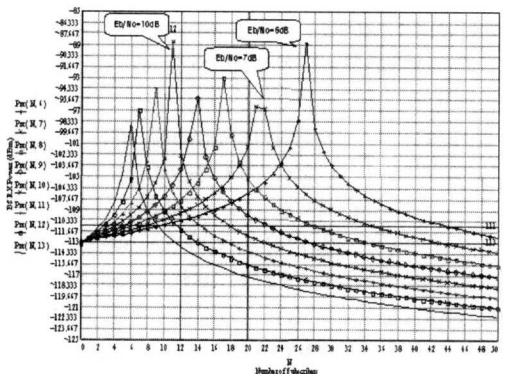


그림 13. 다중 셀에서 pole capacity(PCS)

이 현실이다.

다음은 다중 셀에서 pole capacity를 CDMA 경우와 PCS의 경우에 대해서 각각 나타내었다.

그림 12은 E_b/N_o 가 6 ~ 13dB까지 변화할 때, CDMA ($R_b=9600$ bps) 다중 셀 시스템에서는 단일 셀 시스템과는 좀 차이가 있었다. 그림에서 보듯 E_b/N_o 가 7dB인 경우 수신세기가 약 -86.3dBm이고 pole capacity는 32명이다. 그러나 E_b/N_o 가 6dB인 경우 수신세기는 -85dBm으로 가장 세고 pole capacity도 40명으로 가장 많았다. 이는 새로운 사실로서 앞으로 망 설계를 할 때에는 CDMA 다중셀 시스템에서의 pole capacity를 구할 시, E_b/N_o 를 6dB로 놓고 계산을 해야 함을 본 논문에서 제시했다.

그림 13은 E_b/N_o 가 6 ~ 13dB까지 변화할 때, PCS ($R_b=14400$ bps) 다중 셀 시스템에서 앞의 경우와 같이 역시 단일 셀 시스템과 차이가 있었다. 그림에서 보듯 E_b/N_o 가 7dB인 경우 수신세기는 약 -97.3dBm으로 매우 낮았으므로 정당치 않다. E_b/N_o 가 10dB인 경우 수신 세기는 -89dBm으로 가장 높고 pole capacity는 11명이다. 그런데 E_b/N_o 가 6dB인 경우에는 수신세기는 E_b/N_o 가 10dB인 경우와 같이 -89dBm이고 pole capacity는 27명으로 가장 많았다. 이 역시 새로운 사실로서 앞으로 망 설계를 할 시에는 PCS 다중 셀 시스템에서의 pole capacity를 구할 때, E_b/N_o 를 6dB로 놓고 계산을 해야 할 것이다.

VI. 결론

과거에 셀룰라 CDMA 시스템에서 주파수재사용 효율의 계산은 일반적으로 간섭전력을 이용해서 구했으나 본 논문에서는 간섭 제곱 전력의 개념을 도입하여 주파수 재사용 효율을 새롭게 유도한 후 블로킹 확률에 대입하여 시뮬레이션을 해 보았다. 특히, 망 설계 시에 사용하는 얼랑용량을 시뮬레이션에 의해 각 시스템의 데이터율(R_b)에 따른 얼랑을 구해보았고, 그 결과 값이 얼랑 B표와 일치함을 보였다. 본 논문에서 제시한 블로킹 확률식 유도는 다소 복잡했지만 그 결과 식은 간단했기 때문에 얼랑용량을 구할 때 쉽게 구할 수 있었다. 또한 최대 사용자 용량(pole capacity)을 구함에 있어 데이터율($R_b=9600$ bps와 $R_b=14400$ bps)별, 단일 셀과 다중 셀에 따른 값을 구해보았다. 이때 기지국 수신 세기와 사용자 수를 비교하여 최적의 E_b/N_o 값을 구해보았고

이에 대한 결과로 pole capacity를 구할 때는 일률적으로 $E_b/N_o=7$ dB를 쓰면 무리가 있고, 특히 다중 셀에서 E_b/N_o 은 본 논문에서 제시한 6dB을 채택하여야 한다.

부 록

표 1. 얼랑 B Table

Erlangs B				
N	1.0%	1.2%	1.5%	2%
10	4.46	4.61	4.81	5.08
11	5.16	5.32	5.54	5.84
12	5.88	6.05	6.29	6.61
13	6.61	6.80	7.05	7.40
14	7.35	7.56	7.82	8.20
15	8.11	8.33	8.61	9.01
16	8.88	9.11	9.41	9.83
17	9.65	9.89	10.2	10.7
18	10.4	10.7	11.0	11.5
19	11.2	11.5	11.8	12.3
20	12.0	12.3	12.7	13.2
21	12.8	13.1	13.5	14.0
22	13.7	14.0	14.3	14.9
23	14.5	14.8	15.2	15.8
24	15.3	15.6	16.0	16.6
25	16.1	16.5	16.9	17.5
26	17.0	17.3	17.8	18.4
27	17.8	18.2	18.6	19.3
28	18.6	19.0	19.5	20.2
29	19.5	19.9	20.4	21.0
30	20.3	20.7	21.2	21.9
31	21.2	21.6	22.1	22.8
32	22.0	22.5	23.0	23.7
33	22.9	23.3	23.9	24.6
34	23.8	24.2	24.8	25.5
35	24.6	25.1	25.6	26.4
36	25.5	26.0	26.5	27.3
37	26.4	26.8	27.4	28.3
38	27.3	27.7	28.3	29.2
39	28.1	28.6	29.2	30.1
40	29.0	29.5	30.1	31.0

다른 셀로부터 기인한 총 자승 간섭 전력의 계산에 인용된 내적은 다음과 같다.

$$C(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2drcos\theta)^4} \quad (A-1)$$

식 (A-1)의 해는 다음과 같이 표현된다⁵⁾.

$$C(r) = \frac{d^6 + 9d^4 r^2 + 9d^2 r^4 + r^6}{(d^2 - r^2)^7} \quad (A-2)$$

따라서 외적은 다음과 같이 표현된다.

$$f_2(R, d) = \int_0^R dr r^9 C(r) = \int_0^R dr \frac{d^6 r^9 + 9d^4 r^{11} + 9d^2 r^{13} + r^{15}}{(d^2 - r^2)^7} \quad (A-3)$$

식 (A-3)을 계산하면 식 (A-4)가 된다.

$$f_2(R, d) = \frac{R^8(d^6 + 9d^4 R^2 + 9d^2 R^4 + R^6)}{12(d^2 - R^2)^6} - \frac{R^6(4d^6 + 45d^4 R^2 + 54d^2 R^4 + 7R^6)}{60(d^2 - R^2)^5} + \frac{R^4(3d^6 + 30d^4 R^2 + 45d^2 R^4 + 7R^6)}{40(d^2 - R^2)^4} - \frac{R^2(4d^6 + 90d^4 R^2 + 180d^2 R^4 + 35R^6)}{120(d^2 - R^2)^3} + \frac{d^6 + 45d^4 R^2 + 135d^2 R^4 + 35R^6}{60(d^2 - R^2)^2} - \frac{3d^4 + 18d^2 R^2 + 7R^2}{4(d^2 - R^2)} + \frac{11d^2}{15} - \frac{2}{7} R^2 + 8d^2 \ln\left(\frac{d^2}{d^2 - R^2}\right) \quad (A-4)$$

참 고 문 헌

- [1] R. Padovani, "Reverse Link Performance of IS-95 Based Cellular Systems", *IEEE Person Communications Magazine*, Third Quarter, pp. 28-34, 1994.
- [2] A. M. Viterbi and A. J. Vierbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 892-90, Aug. 1993.
- [3] M. G. Jansen and R. Prasad, "Capacity, Throughput, and Delay Analysis of a Cellular DS CDMA System with Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization" *IEEE Tran. on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
- [4] K. I. Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.
- [5] W. C. Y. LEE, "Overview of Cellular CDMA", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 291-302, May, 1991.
- [6] Klein S. Gilhousen, Irwin M. Jacobs, Roberto Padovani, Andrew J. Viterbi, "On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, May, 1991.
- [7] Andrew J. Viterbi, Audrey M. Viterbi, Klein S. Gilhousen, Ephraim Zehavi, "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increase Reverse Link Capacity", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 8, pp. 1281-1288, Oct. 1994.
- [8] Paul Newson and Mark R. Heath, "The Capacity of a Spread Spectrum CDMA System for Cellular Mobile Radio with Consideration of System Imperfections", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 4, no. 4, pp. 673-684, May, 1994.
- [9] R.C Dixon, "Spread Spectrum System," *John Wiley & Sons, Inc.*, pp.72-85, 1982.
- [10] H. H. Xia and F. Siu, "System Design Aspects of CDMA Personal Communications Services", *46th, VTC, Atlanta, GA*, pp. 1647-1651, May, 1996.
- [11] W. C. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems, 2nd Edition, McGrawHill*, 1999.
- [12] M. V. Clark et al., "Reuse Efficiency in Urban Microcellular Networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 303-312, May, 1997.
- [13] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles and Practice, Prentice-Hall*, 1996.
- [14] J. Zander, "Distributed Cochannel Interference Control in Cellular Radio System", *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 41, no. 3, 1992.
- [15] A. J. Viterbi and Roberto Padovani, "Implications of Mobile Cellular CDMA", *IEEE Communications Magazine*, pp. 38-41, Dec. 1999.
- [16] A. J. Viterbi et al., "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity", *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 12, no. 8, pp. 1281-1288, Oct. 1994.

