

다중 셀 CDMA 셀룰라 시스템에서 Riemann-Zeta 함수를 이용한 간섭과 용량 근사식

정회원 김 호 준*

Interference and Capacity Approximation using Riemann-Zeta Function in Multi-Tier CDMA Cellular Systems

Ho-Joon Kim* *Regular Member*

요 약

CDMA 셀룰라 시스템은 같은 시간에 같은 주파수를 모든 사용자들이 같이 사용하므로 자기 신호 외의 다른 사용자의 신호는 간섭으로 나타나 통신 품질에 영향을 미친다. 이 간섭의 양에 따라 단위 셀당 사용자 수로 정의되는 시스템의 용량이 결정되며 간섭량의 정확한 계산이 이루어져야 시스템 성능 평가를 정확히 할 수 있다. 본 논문은 임의의 겹(tiers) 구조를 갖는 다중 셀 구성의 CDMA 셀룰라 시스템의 타셀 간섭량을 계산하기 위해 Riemann-Zeta 함수를 이용하여 임의의 전파 감쇄 지수에도 적용할 수 있는 근사식을 제안하였고, 제안된 식의 수치 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 효용을 살펴 보았다. 제안된 근사식을 이용해 계산한 타셀 간섭량과 시스템 용량은 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 중심으로 상한과 하한을 이루고 있으며 겹 수에 따른 값의 변화가 평균 간섭 및 용량 계산치와 일치하는 결과를 얻었다. 제안된 타셀 간섭 근사식은 복합적인 전파 환경이 공존하는 계층셀(Hierarchical Cellular) 시스템에서의 간섭 및 용량 계산과 알고리즘 검증에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

Key Words : interference, capacity, CDMA, multi-tier cellular systems, Riemann-Zeta

ABSTRACT

In CDMA cellular system, because all users share the frequency resource the signals of other user becomes interference which influences the communication quality. The system capacity defined the number of connected users within a cell is determined by the amount of interference, therefore the exact estimation of interference is important to system performance evaluation. In this paper, we propose an approximated function which calculates other cell interference in terms of Riemann-Zeta function in CDMA cellular systems, and compare with simulation results in other to verify its usefulness. The upper and lower bounds of system capacity calculated with the proposed approximated function gives almost alike result with the simulation. The proposed interference bounds are useful to calculate system capacity and to evaluate some algorithm in a hierarchical cellular systems where various propagation environments are mixed.

I. 서 론

모든 사용자들이 서로 다른 주파수를 사용하는 FDMA 시스템이나 서로 다른 타임 슬롯을 사용

하는 TDMA 시스템과 달리 CDMA 셀룰라 시스템은 같은 시간에 같은 주파수를 모든 사용자들이 같이 사용하므로 자기 신호 외의 다른 사용자의 신호는 잡음(간섭)으로 나타나 통신 품질에 영

* 전주대학교 정보기술컴퓨터공학부 (junekim@jeonju.ac.kr),

논문번호 : 030149-0401, 접수일자 : 2003년 4월 1일

※본 연구는 정보통신부지원 대학기초연구지원사업(정보통신기초기술연구지원사업) (2001-134-3) 지원으로 수행되었습니다.

향을 미친다. 통신 품질에 직접적 관련이 있는 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 앞의 두 시스템은 동일 주파수를 사용하는 셀의 거리를 제한하는 주파수 재사용 방식에 의해 잡음 수준을 기준 이하로 제한할 수 있도록 하는 반면 모든 인접 셀에서 동일한 주파수를 사용하는 CDMA 시스템은 신호대 잡음비가 낮아도 신호 수신이 가능하도록 하는 대역확산 신호 방식을 사용한다[1]. 이 CDMA 셀룰라 시스템은 간섭(interference)의 양에 따라 결정되는 특성을 갖고 있다[2]. 따라서 이 간섭량을 정확히 평가해야 시스템 용량을 정확히 추정할 수 있고 전력 제어, 핸드오버 처리, 호 수락 제어 등의 시스템 운영 알고리즘이 정확히 동작할 수 있으며, 또한 새로운 알고리즘의 성능을 평가할 때 정확한 결과를 얻을 수 있다. CDMA 시스템 연구 초기에는 접속된 자기 셀을 제외한 모든 타 셀에서의 간섭량을 자기 셀의 간섭량으로 나는 타 셀 간섭 요소(other cell interference factor)를 사용해 자기 셀의 간섭량만으로 모든 간섭량을 계산하는 단일 셀 모델을 사용하였고, 현재에도 해석적인 연구 접근 방식에서는 계산의 편의를 위해 단일 셀 모델에 근거한 방식으로 계산하고 있다[3].

셀룰라 시스템은 다수의 타 셀을 고려하여 실제 셀룰라 시스템처럼 운영함으로써 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있다^[4]. 이 방식은 시뮬레이션을 통해서만 가능하였고 모든 셀을 고려하려면 계산량이 많아져 소요 시간이 많아지므로 현실적이지 못하여 일부 소수의 주변 셀 만 존재하는 것처럼 운영할 수밖에 없었다. 이때 몇 겹(tiers)의 이웃 셀 까지를 간섭 계산 시 고려하느냐가 중요하며 흔히 일반적인 경험에 의해 결정하였다. 매크로 셀의 경우 세 겹 셀 까지 만을 고려하는 것이 일반적이었으나 이는 계산의 편의를 위한 것이었지 정확한 결과라고 볼 수는 없다. 또한 마이크로 및 피코 셀의 경우 셀 반경이 작고 전파 감쇄 정도가 상대적으로 작으므로 더 많은 겹의 이웃 셀 까지를 고려해야만 한다. 그리고 타 셀 간섭 요소는 주변 환경에 따라 전파 감쇄 정도가 다른 모든 상황에 맞는 계수가 아니다. 따라서 충분히 큰 유한개의 이웃 셀을 고려한 셀룰라 시스템의 간섭량을 전파 감쇄 계수에 상관없이 계산할 간편한 방법이 필요하다. 간섭과 용량을 계산하는 해석적인 접근 방식에서는 원형 셀 구조로 단순화하여 계산하거나^[5], 특정 전파 감쇄 지수

(4.0)에서만 계산 결과를 얻을 수 있었다^[6]. 문헌 [5]의 경우 타 셀을 개별 셀로 모델화 하지 않고 tier 단위 전체를 원형으로 모델화 하여 구조가 현실적이지 못하였고 모든 단말이 중심 셀에 가장 가까운 곳 또는 가장 먼 곳에 집중되어 있다는 극단적인 가정을 하여 간섭의 최소, 최대의 편차가 너무 컸다. 또한 간섭 하한식에 오류가 있어 계산 결과가 맞지 않았다.

본 논문에서는 정육각형 셀모양의 실제적인 셀 모델 상에서, 무한 복소 수열의 합을 계산하는 Riemann-Zeta 함수를^{[7][8]} 사용하여, 전파 감쇄 지수에 관계 없이 이상적인 무한개의 타셀이 존재할 때의 타셀 간섭량과 임의의 타 셀 겹수에 따른 타 셀 간섭량 상한과 하한을 계산할 수 있는 근사식을 제시한다. 또한 wrap-around 기법을 사용하여^{[9][10]} 임의의 타 셀 겹 수까지 구성 할 수 있는 가변 다중 셀 상에서 시뮬레이션을 수행하고 근사식의 결과와 비교한다.

II. 셀룰라 모델과 나머지 셀 간섭 보정

1. 셀 모델과 간섭 계산

본 논문에서는 모든 셀은 동일한 모양과 크기이며 동일한 수의 사용자가 접속되어 있고 모든 사용자는 셀 전체에 균일하게 분포되어 있는 경우를 고려하며 전파 감쇄 지수에 따라 거리에 반비례하는 전파 전파 모델을 사용한다.

셀룰라 시스템은 정육각형 셀이 규칙적인 격자점에 존재하는 형태로 분석하는 것이 일반적이거나 일부 연구에서는 분석이 쉽도록 단순화된 겹 구성을 사용하기도 하였다^[6]. 본 논문에서는 그림 1과 같은 일반적인 정육각형 셀 구성 모델을 사용한다. 즉 중점으로부터 꼭지점까지의 거리가 R 인 정육각형 셀이 겹침이나 빈틈이 없이 촘촘히 구성된 형태를 갖는다^[11]. 이때 중심 셀의 여섯 면에 접하고 있는 여섯 개의 셀을 첫번째 겹 셀 군이라 하고, 그 다음 열 두개의 셀을 두 번째 겹 셀 군이라 하며 이와 같은 형태로 일반적으로 n 겹 셀 군이 존재한다. 이 셀 구조는 셀 $C_{0,0}$ 의 중심점을 정점으로 60° 마다 기본형 셀 배치가 반복되는 대칭 구조를 가지고 있다. 이때 중심셀 $C_{0,0}$ 과 n 겹 셀 군 중 한 셀과의 중심 거리는 D , 한 셀에 속해있는 임의의 한 단말로부터의 중심 셀 기지국과의 거리는 D_x 로 정의한다. 또한 그 단말로부터 그 셀 기지국까지의 거리를 d_x 라 한다.

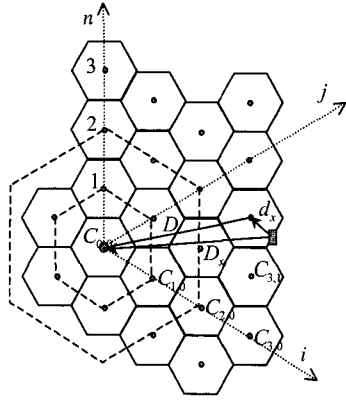


그림 1. 셀 구조와 Tier 구성

그림 2는 반복되는 셀 구성 중 한 60°범위의 기본형을 그린 것으로 n 겹 셀 군은 n 개의 셀로 기본형이 구성되며 따라서 n 겹에는 총 $6n$ 개의 셀이 존재한다. 셀 중심과 한 변 사이의 거리를 H 라 하면 $H = R\sqrt{3}/2$ 이고 인접하는 인접 두 셀 중심간의 기본 거리는 $2H = R\sqrt{3}$ 이 된다.

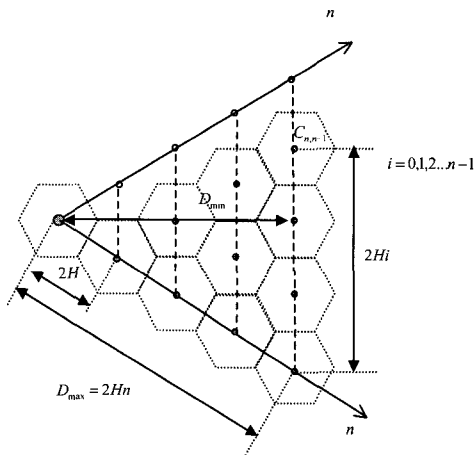


그림 2. 중심 셀과의 거리

중심 셀과 특정 겹 셀군 중 하나인 $C_{n,i}$ 와의 거리를 D 라 하면 $D = R\sqrt{3}\sqrt{n^2 + i^2 - n \cdot i}$ 가 된다. 이때 $n=1,2,3, \dots$ 이고 $i = 0,1,2, \dots, n-1$ 이다. D 값 중 최대는 $i=0$ 일 때이며 $D_{\max}(n) = \sqrt{3}Rn$ 이 된다. 또한 D 값 중 최소는 $i = \lfloor (n-1)/2 \rfloor$ 일 때로 $D_{\min}(n) = \sqrt{3}R\sqrt{n^2 + \lfloor \frac{(n-1)}{2} \rfloor^2 - n \lfloor \frac{(n-1)}{2} \rfloor}$ 이 된다. 이때, $\lfloor x \rfloor$ 는 x 를 넘지 않는 최대 정수이다. 타셀 간섭량에서 가장 비중이 큰 첫번째

겹 셀과의 거리가 $D = D_{\max}(n)$ 를 만족하므로

$$D_{\max}(n) = \sqrt{3}Rn \text{로 근사화하여 계산에 사용한다.}$$

n 겹에 있는 셀 중 하나를 C_x 라 정의하고 이 셀에 속해 있으며 중심으로부터 d_x 만큼 떨어져 있는 한 단말이 송신한 전력은 P_x 라 하고 기지국에 수신된 전력을 P_0 라 하면 거리에 상관없이 일정한 전력으로 기지국에 수신되도록 완벽한 전력 제어를 이루었다는 전제 하에 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_x = P_0 d_x^{-\nu} \quad (1)$$

여기서 ν 는 거리에 따른 전파 감쇄 지수로서 환경에 따라 2~6 범위의 값을 일반적으로 사용한다^[12]. 식 (1)의 전력은 중심 셀 $C_{0,0}$ 의 기지국에 도달하여 다음과 같은 개별 간섭이 된다.

$$I_x = P_0 d_x^{-\nu} D_x^{-\nu} \quad (2)$$

셀 겹 구조에 따라 T 겹 셀까지의 간섭의 합은 다음 식과 같이 주어진다.

$$I(T) = 6T \cdot I_x \quad (3)$$

모든 셀은 동일한 수의 가입자가 존재하고, 각 셀에는 N_0 명의 사용자가 서비스 영역 전체에 균일하게 분포하는 환경을 고려하면 사용자 밀도는 $\rho = (2N_0)/(3\sqrt{3}R^2)$ 이 된다. 중심 셀의 기지국에서 수신되는 간섭 신호는 자기 셀 범위 내의 간섭과 그 외의 타 셀로부터의 간섭으로 나누어 생각할 수 있다. 자기 셀 간섭은 $P_0(N_0-1)$ 만큼 되고, 타 셀 간섭은 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{\text{other}} = \frac{2N_0P_0}{3\sqrt{3}R^2} \oint_{\text{other}} \left(\frac{d_x}{D_x} \right)^{-\nu} dA \quad (4)$$

이 타 셀 간섭 계산은 간단히 해결할 수 없으며 $\nu=4$ 와 같이 특별한 조건 하에 근사식으로 해결하거나^[6] 시뮬레이션을 통해 계산한다^[3]. 본 논문에서는 모든 감쇄 정수 ν 에 대해 계산이 가능한 간섭 및 용량의 상한과 하한 근사식을 제시하고자 한다.

임의의 한 타 셀에서 모든 사용자가 균일하게 분포하여 송출하는 전력의 합과 일정한 거리에 원형으로 분포하여 송출하는 전력의 합(N_0P_e)이 같아지는 등가 거리 r_e 를 찾을 수 있다. 먼저, 모든 단말이 정육각형 셀에 균일하게 분포하는 경우 송출 전력의 총합은 다음과 같다.

$$P_S = \oint_R P_x \rho dA = \oint_R P_0 d_x^\gamma \rho dA \quad (5)$$

이 값은 정육각형 셀에 외접하는 원 내부를 적분영역으로 한 값보다는 작고, 내접하는 원 내부를 적분영역으로 한 값보다는 크다.

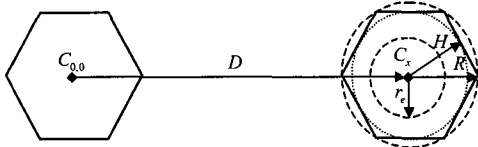


그림 3. 정육각형 셀 반경과 등가 거리

즉, 다음과 같은 범위의 값을 갖게 된다.

$$\int_0^H \int_0^{2\pi} P_0 d_x^\gamma d_x \rho d d_x d\theta \leq P_S \leq \int_0^R \int_0^{2\pi} P_0 d_x^\gamma d_x \rho d d_x d\theta$$

여기서 $H = R\sqrt{3}/2$ 이다.

P_S 의 최대 최소값을 구하면 다음과 같다.

$$P_S^{\max} = 2\pi\rho P_0 \frac{1}{\gamma+2} R^{\gamma+2}$$

$$P_S^{\min} = 2\pi\rho P_0 \frac{1}{\gamma+2} H^{\gamma+2}$$

이 최대 최소값의 평균으로 P_S 를 취하면 다음과 같아진다.

$$P_S = \frac{2\pi\rho N_0 P_0 R^\gamma}{3\sqrt{3}(\gamma+2)} \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{\gamma+2} \right\} \quad (6)$$

또한, 반경이 등가거리 r_e 인 원에 모든 단말이 분포하는 경우 모든 단말로부터 송출되는 전력의 합이

$$P_S = P_e N_0 = N_0 P_0 r_e^\gamma \text{이므로 (6)에서}$$

$$r_e^\gamma = \frac{2\pi R^\gamma}{3\sqrt{3}(\gamma+2)} \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{\gamma+2} \right\} \quad (7)$$

로 구할 수 있으며, 여기서 등가 거리를 셀의 반경 R 에 대한 비율로 정규화 하면

$$\left(\frac{r_e}{R} \right)^\gamma = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}(\gamma+2)} \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{\gamma+2} \right\} \quad (8)$$

이 된다. 따라서 등가 전력 P_e 는 다음과 같다.

$$P_e = \frac{2\pi P_0 R^\gamma}{3\sqrt{3}(\gamma+2)} \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{\gamma+2} \right\} \quad (9)$$

2. 간섭 상한

단말들은 정육각형 셀에 고루 분포하는 것과 등가적으로 등가거리 r_e 인 원에 분포하는 경우 중 그림 3과 같이 중심 셀 $C_{0,0}$ 에 가장 근접한 곳에 집중되거나 가장 먼 곳에 집중 되면 최대 간섭과 최소 간섭이 발생한다. 그 거리는 각각 $D-r_e$ 와 $D+r_e$ 가 된다. 식(3)(7)(9)에 r_e 와 $D_x = D-r_e$ 를 적용하면 T 겹까지의 간섭량 상한은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{\text{other}}^{\max}(T) &\leq 6 N_0 P_e \sum_{n=1}^T n (\sqrt{3}Rn - r_e)^{-\gamma} \\ &= 6 N_0 P_e (\sqrt{3}R)^{-\gamma} \sum_{n=1}^T \frac{n}{\left(n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} \\ &= \frac{4\pi N_0 P_0}{(\gamma+2)(\sqrt{3})^{\gamma+1}} \sum_{n=1}^T \frac{n}{\left(n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} \\ &= N_0 P_0 I_{co} \sum_{n=1}^T \frac{n}{\left(n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} \quad (10) \end{aligned}$$

여기서 I_{co} 는 다음과 같이 정의된다.

$$I_{co} = \frac{4\pi}{(\gamma+2)(\sqrt{3})^{\gamma+1}}$$

$m > 1$ 이고 $n > 0$ 일 때 수렴하는 Riemann-Zeta

함수식인^[13] $\zeta(m, n) = \sum_{i=0}^{\infty} 1/(i+n)^m$ 를

적용하기 위해 식(10)을 변형하고 T 가 ∞ 로 접근할 때의 간섭 상한식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{\text{other}}^{\max}(\infty) &\leq N_0 P_0 I_{co} \cdot \\ &\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^T \frac{n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}}{\left(n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} + \sum_{n=1}^T \frac{\frac{r_e}{\sqrt{3}R}}{\left(n - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} \right) \\ &= N_0 P_0 I_{co} \cdot \\ &\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=0}^{T-1} \frac{1}{\left(n+1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^{\gamma-1}} + \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \sum_{n=0}^{T-1} \frac{1}{\left(n+1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \right)^\gamma} \right) \\ &= N_0 P_0 I_{co} \cdot \left\{ \zeta\left(\gamma-1, 1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) + \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \zeta\left(\gamma, 1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

3. 간섭 하한

그림 3에서 N_0 개의 단말이 모두 $D+r_e$ 위치에 있을 때 중심 셀 $C_{0,0}$ 에로의 간섭이 최소가 된다. 따라서 상한선을 구하는 방식과 같은 방법으로 다음과 같이 최소 간섭 하한선을 계산할 수 있다. 즉, 식(3)(7)(9)에 r_e 와 $D_x = D+r_e$ 를 적용하면 T 겹 셀 군으로부터의 간섭량 하한은 다음과 같다.

$$I_{other}^{\min}(T) \geq 6 N_0 P_e \sum_{n=1}^T n (\sqrt{3}Rn + r_e)^{-\gamma}$$

$$= N_0 P_0 I_{\infty} \sum_{n=1}^T \frac{n}{\left(n + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right)^{\gamma}} \quad (12)$$

식(12)를 변형하고 T 가 ∞ 로 접근할 때의 간섭 하한식을 구하면 다음과 같다.

$$I_{other}^{\min}(\infty) \geq N_0 P_0 I_{\infty} \cdot \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=0}^{T-1} \frac{1}{\left(n + 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right)^{\gamma-1}} - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \sum_{n=0}^{T-1} \frac{1}{\left(n + 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right)^{\gamma}} \right)$$

$$= N_0 P_0 I_{\infty} \cdot \left\{ \zeta\left(\gamma-1, 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \zeta\left(\gamma, 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) \right\} \quad (13)$$

4. 간섭 중간값

그림 3에서 N_0 개의 단말이 모두 D 위치에 있다고 가정하면 중심 셀 $C_{0,0}$ 에로의 간섭은 상한과 하한의 중간값이 된다. 즉 식(10) 또는 (12)에서 $r_e=0$ 일 경우 다음과 같다.

$$I_{other}^{mid}(T) = N_0 P_0 I_{\infty} \sum_{n=1}^T \frac{1}{n^{\gamma-1}} \quad (14)$$

또한 T 가 ∞ 로 접근할 때의 간섭 중간값은 다음과 같다.

$$I_{other}^{mid}(\infty) = N_0 P_0 I_{\infty} \zeta(\gamma-1, 1) \quad (15)$$

5. 용량 한계 및 중간값

CDMA 시스템에서 요구되는 성능을 내기 위해서는 신호대 간섭비 목표가 설정되며 이는 자기셀 간섭과 타셀 간섭량에 의해 결정된다. 식(10)과 식(12)에서 구한 타셀 간섭량 상한과 하한에 의해 다음과 같이 신호대 간섭비 상한과 하한이 결정된다.

$$\frac{P_0}{P_0(N_0-1) + I_{\infty}^{\max}(T)} \leq \frac{S}{I} \leq \frac{P_0}{P_0(N_0-1) + I_{\infty}^{\min}(T)} \quad (16)$$

이는 타 셀 겹 수를 무한대까지 고려한 이상적인 셀 구조에서의 결과이며 실제 환경을 고려하거나 계산의 편의를 위해 임의의 겹 수까지만 타 셀 간섭량에 고려할 경우 시스템의 셀당 사용자 수는 상한이 식(17-a), 하한이 식(17-b)와 같이 계산된다.

$$N_0(T) \leq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \sum_{k=1}^T \frac{k}{\left(k + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right)^{\gamma}}} \quad (17-a)$$

$$N_0(T) \geq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \sum_{k=1}^T \frac{k}{\left(k - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right)^{\gamma}}} \quad (17-b)$$

식(11)과 (13)에 의해 무한개의 간섭 셀을 고려한 이상적인 경우의 시스템 용량 상한과 하한은 각각 식(18-a)와 (18-b)로 구할 수 있다.

$$N_0(\infty) \leq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \left\{ \zeta\left(\gamma-1, 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) - \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \zeta\left(\gamma, 1 + \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) \right\}} \quad (18-a)$$

$$N_0(\infty) \geq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \left\{ \zeta\left(\gamma-1, 1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) + \frac{r_e}{\sqrt{3}R} \zeta\left(\gamma, 1 - \frac{r_e}{\sqrt{3}R}\right) \right\}} \quad (18-b)$$

식(14)(15)와 같이 간섭의 상한 하한 대신 중간값을 사용할 경우 시스템 용량식 (17)(18)은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$N_0(T) \approx \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \sum_{k=1}^T \frac{1}{k^{\gamma-1}}} \quad (19)$$

$$N_0(\infty) \approx \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \cdot \zeta(\gamma-1, 1)} \quad (20)$$

III. 수치 계산과 시뮬레이션

식(11)과 식(13)을 이용하여 이상적인 타셀 간섭의 최대값 $I^{\max}(T=\infty)$ 와 최소값 $I^{\min}(T=\infty)$ 을 구하고 특정 계층까지 타셀 간섭의 합 $I^{\max}(T)$ 와 $I^{\min}(T)$ 를 식(10)과 식(12)를 이용하여 구하면 여러 가지 전파 감쇄 지수에 대해 타셀 겹 수에 따른 간섭의 정규화값 $I^{\max}(T)/I^{\max}(T=\infty)$ 및 $I^{\min}(T)/I^{\min}(T=\infty)$ 을 계산할 수 있다. 이때 $I^{\max}(\infty)$ 와 $I^{\min}(\infty)$ 를 계산 시 사용하는 Riemann-Zeta 함수는 무한 급수 합으로 계산하는 대신 다음과 같은 유한 급수 근사식으로 계산하였다^[13].

$$\zeta(m, n) = \sum_{i=0}^N \frac{1}{(n+i)^m} + \frac{1}{(m-1)(N+n)^{m-1}} + R_N \quad (21)$$

이때 N 은 유한한 타셀 겹 수로서 충분히 클 경우 오차항 R_N 은 앞의 두 항에 비해 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 본 연구에서는 $N = 1000$ 으로 하여 10^{-10} 이하의 오차가 나도록 계산하였다.

그림 4는 식(10)(11)에 의한 간섭의 상한의 변화를 타셀 겹 수의 함수로 표현한 그림으로 각 전파 감쇄 지수에 대해 최대 간섭 상한값으로 정규화 한 것을 표현한 것이다. 이를 통해 전파 감쇄 지수에 따라 타셀 간섭량이 최대값에 어느 정도 빠르게 수렴하는 지를 알 수 있다. v 가 3.0 이상일 경우 타셀이 세 겹 이상이면 최대 간섭의 95% 이상 포함하나 그 이하에서는 20 겹 이상 고려해야 최대 값에 겨우 근접함을 알 수 있다.

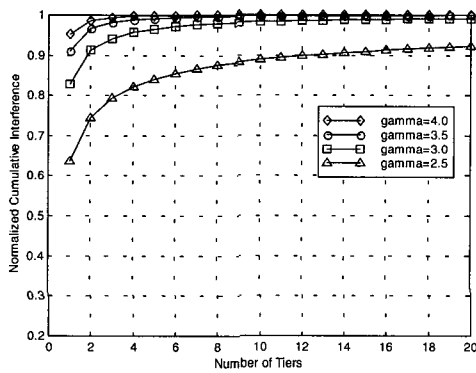


그림 4. 정규 누적 간섭 최대치

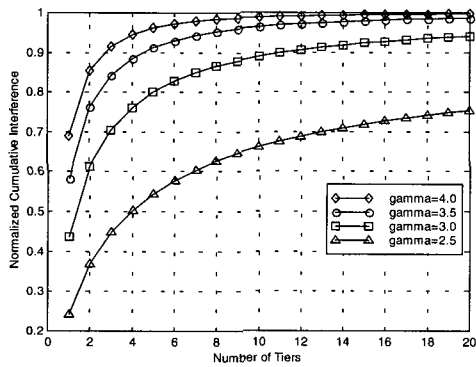


그림 5. 정규 누적 간섭 최소치

그림 5는 식(12)(13)에 의한 간섭의 하한의 변화를 타셀 겹 수의 함수로 표현한 것으로 각 전파 감쇄 지수에 대해 최대 간섭 하한값으로 정규화 한 것을 표현한 것이다. 그림4와 달리 v 가 3.0 이상일 경우 최대 간섭에 수렴하는 겹 수가 10 이상이어야 하고 그 이하일 경우는 20 이상이어야 함을 알 수 있다. 그림 4와 그림5의 결과를 보면 일반적

으로 타셀 간섭 계산시 세 겹까지만을 고려했던 방식은 간섭을 충분히 고려하지 못했음을 알 수 있다.

이는 그림7,8,9에서 살펴볼 용량의 계산 시 고려해야 할 타셀 겹수에서도 확인할 수 있을 것이다. 그림(4)(5)는 각 전파 감쇄 지수가 클수록, 타 셀 겹 수에 따른 간섭의 최대값에 수렴하는 정도가 빨라짐을 알 수 있다. 한편 전파 감쇄 지수에 따라 간섭의 상대적인 크기의 관계를 알기 위해 가장 간섭이 큰 $v = 2.5$ 에서의 최대 간섭으로 모든 경우의 간섭을 정규화 한 것이 그림 6과 같다. 그림 4,5와 달리 감쇄 지수가 작을수록 간섭량은 크게 나옴을 알 수 있다.

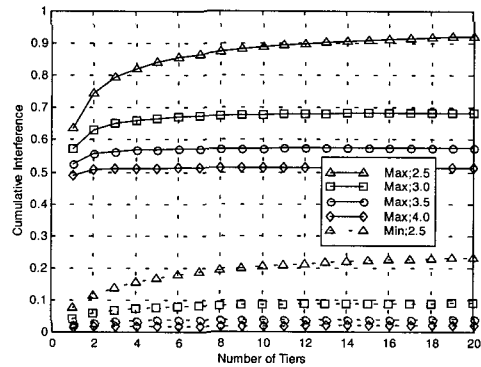


그림 6. 타 셀 겹수에 따른 간섭의 변화

그림 7은 식 (17-a,b)에 의해 계산한 셀 용량의 상한과 하한을 타셀 겹 수에 따라 변화하는 것을 그린 것이다.

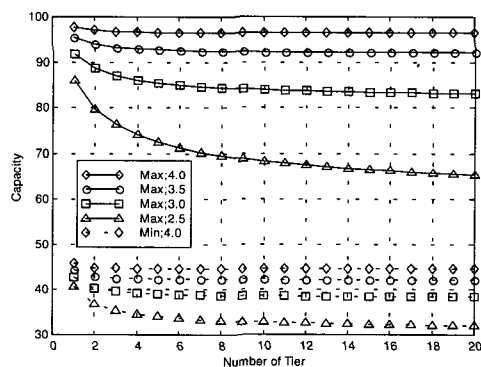


그림 7. 셀 용량의 최대 및 최소

전파 감쇄 지수가 클수록 용량이 크며, 간섭 계산 시 고려하는 타 셀 겹 수가 늘어날수록 감소하는 특성을 보인다. 또한 식(10)(12)(17)에서 보듯이 간섭의 하한은 용량의 상한과 관계가 있고 간섭의

상한은 용량의 하한과 관계가 있으며 시스템의 최대 용량을 추정할 때 간섭 하한이 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 감쇄 지수가 3.5 이상일 때는 타셀 겹 수를 3 이상 고려하면 최대 용량의 10% 오차 이내로 수렴하나 3.0 이하 일 때는 타셀 겹 수를 10 이상 고려해야 수렴함을 알 수 있다.

본 연구에서는 계산식에 의한 간섭 한계를 확인 하기 위해 그림1과 같은 구성의 셀룰라 시스템 모델 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이터는 wrap around 기법을 사용하여 임의의 타셀 겹 수를 설정할 수 있으며^[10], 이때 각 셀은 중심으로부터 최외각 꼭지점까지의 거리 $R = 1 \text{ Km}$ 인 동일 크기의 셀로 하였고, 각 셀에는 $N_0 = 70$ 명의 사용자가 전 영역에 균일하게 분포하도록 하였다. $P_0 = -20 \text{ dBm}$ 으로 전력 제어 되도록 하였으며 쇄도우잉 감쇄는 고려하지 않았고 음성 활동도는 1로 설정하였으며 전방향성 안테나를 사용함을 가정했다. 그림 8,9는 각각 $v=3.0$ 일 때와 $v=4.0$ 일 때 계산식에 의한 간섭 상한과 하한 계산 결과 그리고 시뮬레이션에 의한 간섭이 타 셀 겹 수에 따라 변화한 것을 비교한 그림이다.

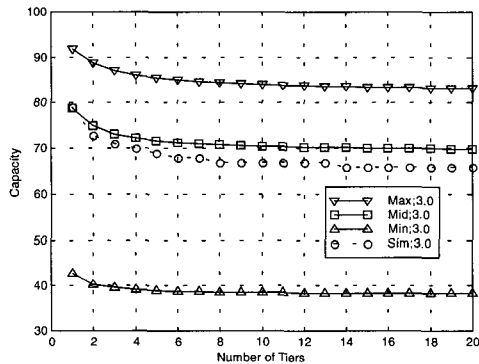


그림 8. 셀 용량 한계와 시뮬레이션 결과($v=3.0$)

시뮬레이션은 각 셀에서의 사용자 수를 10명에서 100명 까지 증가 시키면서 임의의 위치에 분포 시키고 완벽한 전력 제어가 이루어 지도록 하여 역방향 신호대 간섭비가 -20 dB 이하이면 통화 품질 이탈(outage)로 간주하고 outage 확률이 0.05 일 때의 사용자 수를 셀의 용량으로 결정하였다. 이 시뮬레이션은 snap-shot 방식으로 10000회 실행하였고 중심 셀과 첫 번째 인접 셀을 포함하여 총 7개의 셀을 통계에 포함하였다. 근사식 (14)와 (19)의 계산에 의한 용량 중간값이 시뮬레이션 결과와

동일한 추이로 나타났다. 이 중간값을 중심으로 약 10 을 상회하는 용량 상한과 약 30~40을 하회하는 용량 하한이 식(17)에 의해 계산된다.

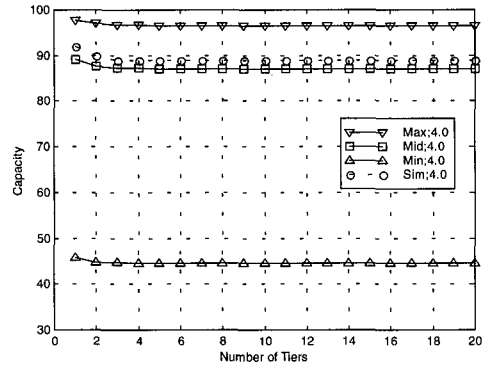


그림 9. 셀 용량 한계와 시뮬레이션 결과($v=4.0$)

그림 8에서 보듯이 v 가 3.0 이하 일 경우는 10 겹 이상의 타 셀을 간섭에 포함 시켜야 인정할 만한 용량 결과로 여길 수 있으며, 그림 9에서처럼 v 가 4.0 이상일 때는 간섭으로 고려한 셀 겹 수가 3 이상이면 타셀 간섭이 충분히 고려되어 인정할 만한 용량 결과로 간주할 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 임의의 겹(tiers) 구조를 갖는 다중 셀 구성의 CDMA 셀룰라 시스템의 타셀 간섭량을 계산하기 위해 무한 복소 수열의 합을 계산하는 Riemann-Zeta 함수를 사용하여 전파 감쇄 지수에 관계 없이 이상적인 무한개의 타셀이 존재할 때의 타셀 간섭량과 임의의 타 셀 겹수에 따른 타셀 간섭량 상한과 하한을 계산할 수 있는 근사식을 제시하였다. 이때 모든 셀은 정육각형 모델을 사용하였고 모든 단말이 등가 거리 원의 근지점과 원지점에 존재하는 것으로 가정하여 균일 분포 특성에 근접하도록 현실화하였다. 또한 wrap-around 기법을 사용하여 임의의 타 셀 겹 수까지 구성 할 수 있는 가변 다중 셀 상에서 시뮬레이션을 수행하고 근사식의 결과와 비교하였다.

제안된 근사식을 이용해 계산한 타셀 간섭량과 시스템 용량은 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 일치하는 중간값을 중심으로 상한과 하한을 이루고 있으며 겹 수에 따른 값의 변화가 일치하는 결과를 얻었다. 또한 간섭 및 용량 계산 결과를 분석하여 전파 감쇄 지수에 따라 계산 및 시뮬레이션에서 고

려해야 할 타 셀 겹 수에 많은 차이가 남을 알 수 있었다. 즉, 전파 감쇄 지수가 3.5 이상일 경우는 3 겹 셀까지, 그리고 3.0 이하 일 경우는 10 겹 셀까지 간섭에 포함 시켜야 인정할 만한 결과가 나옴을 알 수 있었다. 따라서 제안된 타셀 간섭 근사식은 복잡한 전파 환경이 공존하는 다계층셀 시스템에서의 간섭 및 용량 계산과 알고리즘 검증에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] V. K. Garg, J. E. Wilkes, *Wireless and Personal Communications Systems*, Prentice Hall, 1996.

[2] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications*, Prentice Hall, ISBN 0-13-461-88-1, U.S.A., 1996.

[3] Viterbi, A.J., Viterbi, A.M., Zehavi, E., "Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, Iss. 2, pp.1501-1504, Feb/Mar/Apr 1994.

[4] O. G. Lauro, A.H. Aghvami, *Resource Allocation in Hierarchical Cellular Systems*, pp.51~54, Artech House Publishers, 2000.

[5] David Munoz-Rodriguez, Osca Uribe-Arambula, Cesar Vargas, Hector Maturino, "Interference Bounds in Power Controlled Systems," *IEEE Communications Letters*, Vol.4, No. 12, pp. 398-401, December 2000.

[6] Kyoung Il Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 345-350, August, 1993.

[7] J. Miller, V.S. Adamchik, "Derivatives of the Hurwitz Zeta function for rational arguments," *J. Computer Appl. Math.*, No.100, pp.201-206, 1999.

[8] <http://mathworld.wolfram.com/HurwitzZetaFunction.html>

[9] Jens Zander, S. L. Kim, *Radio Resource Management for Wireless Networks*, Artech House Publishers, pp.336~337, 2001.

[10] 김호준, 윤상흠, "Wrap Around 기법에 의한 CDMA 셀룰라 시스템 시뮬레이션 효율에 관한 연구," *한국통신학회논문지*, 제28권,5호, 2003.

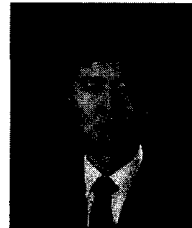
[11] David Lee, CeXu, "The Effect of Narrowbeam Antenna and Multiple Tiers on System Capacity in CDMA Wireless Local Loop," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No.9, pp.110-114, September, 1997.

[12] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, 2nd Ed., Prentice Hall, NJ, p.139, 2002.

[13] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 5th ed., Academic Press:San Diego, p.1101, 1994.

김 호 준(Ho-Joon Kim)

정회원



1986년 2월 : 연세대학교 전기공학과 학사
 1988년 2월 : 연세대학교 전기공학과 석사
 1988년 3월~1993년 4월 : 삼성종합기술원 주임연구원
 1998년 8월 : 연세대학교 전기

공학과 박사
 1999년 2월~2001년 3월 : 삼성전자 통신연구소 수석연구원
 2001년 3월~현재 : 전주대학교 정보기술컴퓨터공학부 조교수

<주관심분야> 통신 시스템, 이동통신, IMT-2000 System and Beyond