

기지국 어레이 안테나와 불완전 전력 제어를 고려한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 성능 분석

The Performance Analysis of a DS/CDMA Cellular System considering a Base Station Array Antenna and Imperfect Power Control

김형채* · 김항래* · 김 남* · 한태영**

Hyoung-Chae Kim* · Hang-Rae Kim* · Nam Kim* · Tae-Young Han**

요 약

본 논문은 다중접속 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 기지국 어레이 안테나를 이용하여 전파음영 환경하에서 빔 형성 알고리즘과 전력 제어 오차에 따른 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 성능을 분석한다. 블록킹(blocking) 확률을 어레이 파라미터와 E_b/N_0 및 간섭 통계를 이용하여 유도하고 특정한 블록킹 확률에 일치하는 시스템 용량을 계산한다. 1%의 블록킹 확률을 가정하였을 경우, 등방성 안테나 1개를 사용하는 경우보다는 12개의 어레이 안테나를 이용한 MCGM 알고리즘을 사용하였을 경우에 약 32배의 시스템 용량이 증가되며 MMSE 알고리즘보다는 MCGM 알고리즘을 사용하였을 경우 약 2배의 시스템 용량이 증가함을 보인다.

Abstract

In this paper, the reverse link performance of a imperfect power controlled DS/CDMA cellular system that uses a base station array antenna which can effectively remove the multiple access interference is analyzed considering both beam forming algorithm and power control error in shadowing. The blocking probability of the DS/CDMA cellular system based on array parameters, E_b/N_0 , and statistics of interference is derived, and then the system capacity corresponding to a certain blocking probability is calculated. On the assumption that the blocking probability is set 1%, the system capacity using MCGM algorithm with 12 antenna arrays is more increased maximum 32 times than that using a omni-directional antenna and about 2 times than that using MMSE algorithm, respectively.

I. 서 론

향후 서비스 예정인 IMT-2000(international mobile telecommunications-2000) 시스템에서는 음성 및 데이터 서비스의 질이나 속도, 용량면에서 현재의 DS/CDMA(direct sequence code division multiple

access) 시스템보다 우수한 성능을 제공하여야 한다. 따라서, 제한된 주파수 영역을 가지는 무선 통신 시스템에서 보다 우수한 스펙트럼 효율을 제공하는 문제가 관심의 대상이 되고 있다.

DS/CDMA 시스템에서 시스템의 용량을 증대시키고 통화 품질을 향상시키기 위해서는 다중경로

*충북대학교 정보통신공학과(Dept. of Computer and Communication Engineering, Chungbuk Natirnal Univrsty)

**주성대학(Jusung College)

· 논문 번호 : 20001026-124

· 수정완료일자 : 2001년 5월 2일

페이딩(multipath fading)에 의한 자기 간섭신호(ICI ; inter chip interference)와 다중사용자 신호에 의한 간섭신호(MAI ; multiple access interference)를 제거시켜 주어야 한다. 일반적으로, ICI를 줄이기 위해서는 RAKE 수신기를 사용하고 있고, MAI를 줄이기 위해서는 모든 사용자들의 신호에 대한 정보를 이용하는 다중사용자 검파(multiuser detection)와 어레이 안테나를 이용한 기지국 어레이 안테나(base station antenna array)에 대한 방법들이 제안되고 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}.

스마트 안테나(smart antenna) 또는 적응 어레이 안테나(adaptive array antenna)라고 하는 기지국 어레이 안테나(base station array antenna)는 특정 형태로 배열된 각 안테나 소자의 출력에 복소 가중치(complex weight)를 곱하여 원하는 사용자의 신호방향으로 안테나의 빔(beam)을 형성하도록 하고 간섭신호방향으로는 널(null)을 구동하여 간섭을 제거하는 방식으로 다중접속 간섭의 제거를 통한 높은 대역 효율, 다양한 영역의 서비스 제공, 고품질의 무선 통신 서비스 등을 제공할 수 있는 시스템이다^[3].

현재 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서, 모든 이동국은 역방향 링크에서 통화 채널을 유지하기 위한 최소 전력만을 송신하도록 해당 기지국에 의해 제어된다. 현재 사용되고 있는 전력 제어 방식은 개루프 전력 제어(open loop power control)와 폐루프 전력 제어(closed loop power control)이다. 개루프 전력 제어는 이동국이 기지국의 신호 강도를 기준으로 행하는 단순한 전력 제어이며 폐루프 전력 제어는 기지국이 1.25 ms마다 이동국으로 전력제어 비트를 전송하여 세밀한 제어를 하는 방식이다. 그러나, 불안정한 무선채널로 인해 완벽한 전력 제어는 불가능하기 때문에 전력 제어 오차(PCE ; power control error)가 발생하게 되며 이동국으로부터 기지국으로 수신된 신호는 로그노말(log-normal) 분포를 하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 전파음영 환경을 가정하여 기지국 어레이 안테나와 전력 제어 오차를 고려한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 성능을 해석적으로 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다중접속 간섭을 제거하기 위해 기지국 어레이 안테나에 이용되는 빔 형성 알고리즘들 중에서 MMSE 알

고리즘과 MCGM 알고리즘에 대해 기술하고, III장에서는 어레이 안테나 파라미터와 E_b/N_o 및 간섭통계를 이용하여 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크의 성능을 분석하기 위한 블록킹 확률을 유도하며, IV장에서는 이론적 해석을 바탕으로 시스템 용량을 분석한다. 끝으로, V장에서는 결론과 향후 과제들에 대해서 기술한다.

II. 기지국 어레이 안테나 알고리즘

희망 사용자 방향으로의 이득은 최대화하고, 간섭 신호의 방향으로는 이득을 최소화하는 빔 패턴을 형성하기 위해 어레이 안테나에 가해지는 가중계수를 최적화하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 어레이 안테나의 각 소자에 곱할 복소 이득값을 최적화하는 것이고 두 번째로는 각 소자에 가할 위상 지연값을 최적화하는 것이다. 두 방법은 처리과정만 다를 뿐 결국 이론적으로 등가이기 때문에 주어진 신호 환경에 따라 적절한 방법을 선택해야 할 것이다.

2-1 MCGM 알고리즘(Modified Conjugate Gradient Method Algorithm)

MCGM 알고리즘은 희망 사용자의 신호 출력이 간섭 사용자의 신호 출력보다 월등히 크다고 가정할 때, 수신된 신호들의 자기 상관 행렬(auto correlation matrix)의 최대 고유치(maximum eigenvalue)에 해당하는 고유벡터(eigenvector)들은 희망 사용자의 방향 벡터와 거의 일치하게 되며 이를 안테나 각 소자들에 대한 가중계수 벡터로서 이용하고 추정된 가중계수를 이용하여 희망 사용자의 방향으로 주빔(main beam)을 구동하는 방식이다^[1].

서로 다른 K 개의 신호가 반파장의 간격을 두고 선형적으로 나열되어 있는 M 개의 어레이 안테나에 수신되는 구조를 그림 1에 나타내었다.

k 번째 사용자의 신호가 입사되는 각도를 θ_k 이라고 가정하면 m ($1, 2, \dots, M$)번째 어레이 안테나에 입력되는 신호는 기준 안테나 신호와 $(m-1)\pi \sin \theta_k$ 만큼의 위상차가 발생하게 된다. 따

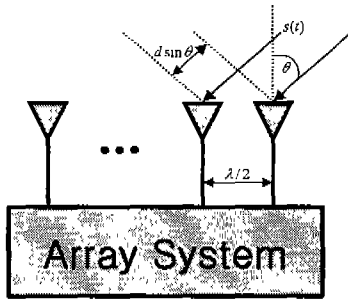


그림 1. 어레이 안테나의 수신 구조
Fig. 1. The receive structure of array antenna.

라서 m 번째 어레이 안테나에 수신되는 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{-j(m-1)\pi \sin \theta_k} + n_m(t) \quad (1)$$

식 (1)에서, $s_k(t)$ 는 k 번째 신호원으로부터 전송된 신호가 기준 안테나에서 수신된 값이고 $n_m(t)$ 는 m 번째 안테나에 더해져지는 잡음을 나타내며 기지국 어레이 안테나에 사용된 소자들은 전 방향에 대해서 동일한 이득을 주는 등방성 안테나인 것으로 가정하였다.

수신된 신호들에 대한 자기 상관 행렬의 최대 고유치에 해당하는 고유벡터로 어레이 응답 벡터를 정의하면 어레이 안테나 출력 신호에 가해지는 어레이 응답 벡터는 다음과 같다^[1].

$$a(\theta_k) = [1 \ e^{-j\pi \sin \theta_k} \ \dots \ e^{-j(M-1)\pi \sin \theta_k}]^T \quad (2)$$

여기서 T 는 전치(transpose)를 나타내며, M 은 어레이 안테나 수이다.

어레이 안테나를 사용할 경우, 셀 내에 균등하게 분포된 K 명의 사용자로부터 전송되는 신호 중에서 희망 사용자에 대한 신호는 수신하고 간섭신호는 감소시키기 위하여 수신된 신호를 공간영역에서 처리한 후, 어레이 응답 벡터를 추정하여 추정된 응답 벡터를 어레이 안테나의 출력 신호에 곱하게 된다. 즉, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \sum_{m=0}^{M-1} W_m^H \cdot X_m \quad (3)$$

위 식에서, H 는 허미션 전치(Hermitian transpose)를 나타내며 X_m 는 m 번째 어레이 안테나에 수신된 신호 벡터이다. 가중계수 W 는 매 스텝마다 MCGM 알고리즘에 의해 새롭게 갱신되며 각 스텝에서 반드시 1로 정규화 한 후, 다음 가중계수 계산에 사용된다. AWGM 환경에서, 어레이 출력 y 는 식 (3)으로부터 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} y &= w^H s_1 a(\theta_1) + \sum_{k=2}^K w^H s_k a(\theta_k) + w^H n \\ &= s_1 + \frac{1}{M} \sum_{k=2}^K s_k a(\theta_1) a(\theta_k) + \frac{1}{M} a(\theta_1) n \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서, 가중계수 w 를 근사화된 복소 가중치 값 $a(\theta_1)/M$ 으로 대체하였고 s 는 데이터 심볼이며 n 은 복소 잡음 벡터이다. 첫 번째 항은 희망 신호에 대한 것이며 두 번째 항은 셀 내에서 희망 사용자를 제외한 다중 접속 사용자에 대한 것이다. 식 (4)로부터, 1번째 희망 사용자의 신호와 잡음에 대한 어레이 안테나의 출력 $SNR_o^{(1)}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} SNR_o^{(1)} &= \frac{E[|s_1|^2]}{E\left[\left|\frac{1}{M} a^H(\theta_1) n\right|^2\right]} = M \frac{E[|s_1|^2]}{\sigma_n^2} \\ &= M \cdot SNR_i^{(1)} \end{aligned}$$

여기서 $SNR_i^{(1)}$ 은 어레이 안테나에 입력되는 1번째 사용자의 신호 대 잡음 전력비이고 M 은 어레이 안테나 수이다. 식 (5)에서 출력 $SNR_o^{(1)}$ 은 어레이 안테나 수(M)만큼 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉, 잡음에 대한 어레이 안테나의 면역성은 어레이 안테나 수에 따라 선형적으로 증가한다. 식 (4)로부터, 1번째 희망 사용자의 신호와 간섭 신호에 대한 어레이의 출력 신호 대 간섭 전력비 $SIR_o^{(1)}$ 는 다음과 같다^[1].

$$\begin{aligned} SIR_o^{(1)} &= \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K \left[\frac{1}{M^2} |a^H(\theta_1) a(\theta_k)|^2 E[|s_k|^2] \right]} \\ &= \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K G_k(\theta_1, \theta_k) E[|s_k|^2]} = \frac{1}{G_A^{(k)}(\theta_1)} \cdot SIR_i^{(1)} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서, $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 는 다중접속 사용자에게 대한 어레이 안테나 이득이고 $G_A^{(k)}(\theta_1)$ 는 다중접속 사용자에게 대한 평균 어레이 안테나 이득이며 각각 다음과 같다.

$$G_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{M^2} |a^H(\theta_1) a(\theta_k)|^2 \quad (7)$$

$$G_A^{(k)}(\theta_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_k(\theta_1, \theta_k) d\theta_k \quad (8)$$

식 (7)에서, $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 은 $\theta_1 = \theta_k$ 을 제외하고는 항상 1보다 작으며 $a(\theta_1)$ 과 $a(\theta_k)$ 가 서로 직교성(orthogonal)을 가진다면 어레이 안테나 출력에서 간섭 신호들은 완전히 제거될 수 있다. 식 (8)은 $G_A^{(k)}(\theta_1) = E[G_k(\theta_1, \theta_k)]$ 에 대한 표현이며 M 과 θ_1 에 대한 함수이다. 따라서, $G_A^{(k)}(\theta_1)$ 는 임의의 M 과 θ_1 에 따라 정량적으로 계산될 수 있으며 본 논문에서는 $\theta_1 = 0^\circ$, $M = 8, 12$ 에 대하여 어레이에 입력되는 평균 간섭 전력을 계산하였다.

2-2 MMSE 알고리즘(Minimum Mean Square Error Algorithm)

MMSE 알고리즘은 기준 신호를 이용하여 소망과와 간섭과를 구별하고 가중 계수의 제어를 수행한다. 즉, 그림 2에와 같이 기준신호 $d(t)$ 와 어레이 출력 $y(t)$ 와의 오차신호 $e(t)$ 의 제곱 평균을 최소화 하는 알고리즘으로 가중계수 벡터 $W(s)$ 와 오차신호 $e(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$W(s) = W(s-1) - (1/2)R^{-1} \nabla(s-1) \quad (9)$$

$$e(s) = d(s) - W^T X(s) \quad (10)$$

여기서 s 는 스텝수를 의미하고 $\nabla(s-1) = \partial \xi \cdot (s-1) / \partial W$ 이며 $\xi(s-1) = E[e^2(s-1)]$ 이다. 수렴한 정상 상태에서 가중계수의 최적 정상해를 다음과 같이 표현되는 Wiener 해라고 한다^[5].

$$W^* = R^{-1} P \quad (11)$$

식 (11)에서, R 은 신호와 잡음의 자기상관 행렬이며 P 는 구동 벡터이다.

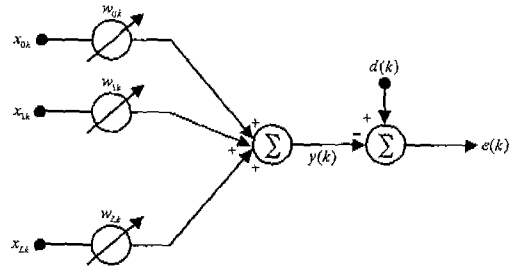


그림 2. 다중 입력 적응 선형 결합기

Fig. 2. Multiple-input adaptive linear combiner.

$G_A^{(k)}$ 를 k 번째 사용자 신호에 대한 평균 어레이 이득으로 정의하면, k 번째 사용자의 어레이 출력 $SNR_o^{(k)}$ 은 입력 $SNR_i^{(k)}$ 에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SNR_o^{(k)} = G_A^{(k)} \cdot SNR_i^{(k)} \quad (12)$$

III. DS/CDMA 시스템의 다중접속 간섭과 블럭킹 확률

셀내에 K 명의 사용자가 존재하고, 각 사용자의 신호 출력이 독립적으로 로그노말 분포를 한다고 가정하면 m 번째 어레이 안테나의 복소 기저대역 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y(t) = A \sum_{k=1}^K 10^{\frac{x_k}{10}} c_k(t - \tau_k) b_k(t - \tau_k) U_k + \sum_{j=2}^{\text{Outer cells}} \sum_{k=1}^K A_{j,k} 10^{\frac{x_{j,k}}{10}} \left(\frac{10^{\frac{s_{j,k}}{10}}}{r_{j,k}^{\alpha}} \right) c_{j,k}(t - \tau_{j,k}) b_{j,k}(t - \tau_{j,k}) U_{j,k} + n(t) \quad (13)$$

위 식에서, 첫 번째 항은 단일셀의 다중접속 사용자를 나타내고 두 번째 항은 다중셀의 다중접속 간섭 사용자를 나타내며 마지막 항은 잡음을 나타낸다. τ_x 는 비트상에 균일하게 분포된 랜덤 시간 지연이며 b_x 와 c_x 는 각각 데이터 심볼과 의사 잡음 수열이다. U_x 는 신호의 위상에 대한 정보를 나타내는 벡터이고 A 는 신호의 입력 진폭이다. $n(t)$ 는 부가성 백색 가우시안 잡음의 출력 벡터 ($N(0, \sigma_n^2)$) 이고 $10^{\frac{x_k}{10}}$ 는 사용자의 전력 제어 오차를 나타내며 x_x

는 $N(0, \sigma_{pcc, dB}^2)$ 이다. $10^{0.70}$ 은 표준 편차가 8 dB인 로그노말 분포를 하는 전파음영($N(0, 64)$)이고 $1/r_{k,i}^4$ 은 단일셀 기저국과 k 번째 간섭 사용자 사이의 거리에 따른 전파 손실이며 전파음영과 전력 제어 오차는 경로에 따라 독립적인 것으로 가정하였다. 그림 3은 단위 반경을 가지는 육각형 셀 구조를 나타낸 것이다. 다중셀 간섭 영역은 원 내부에 포함된 영역이며 이는 단일셀을 제외하면 21.67셀과 등가이다. 육각형 셀안의 작은 점은 각 셀의 기저국 위치를 나타내며 원안에 포함된 셀의 부분 영역은 3.67셀이다.

본 논문에서는 다중셀 간섭을 고려하기 위해, 전력 제어 오차가 0 dB 일 때 간섭 계수가 0.57인 경우를 가정하였으며 이 값을 그림 3의 모델을 이용한 모의 실험 결과와 일치한다^[6]. 신호들은 어레이 안테나에 입력되고 한 명의 사용자를 희망하는 신호의 단일 신호원이라고 가정하면 기저국 어레이 안테나는 희망하는 신호의 방향으로 빔을 구동하고 간섭 신호의 방향으로는 유한개의 영점(null point)을 구동한다. 또한 어레이 출력은 가우시안으로 근사화하였으며 길이가 $L_c \geq 31$ 인 랜덤 부호를 이용하여 의사 잡음 수열로서 모델링 하였다. 사용자 1을 희망 사용자라고 가정하면 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비 (E_b/N_o)는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c \text{SNR}_o^{(1)}}{\frac{1}{3L_c^2} \sum_{k=2}^K \text{SNR}_o^{(k)} \cdot r_{k,i} + 1} \quad (14)$$

여기서 $\text{SNR}_o^{(k)}$ 는 k 번째 입력 신호에 대한 어레이

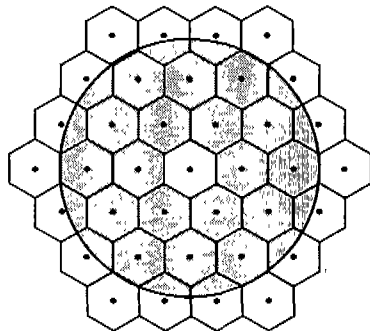


그림 3. 다중셀 간섭 영역
Fig. 3. Interference region for outer-cells.

이 출력 SNR 이고 $r_{k,i}$ 는 i 번째와 k 번째 의사 잡음 수열간의 상호 상관 함수로부터 유도된 값이며 $(E_b/N_o) \approx (T_b/T_c)\text{SNR} = L_c \cdot \text{SNR}$ 이다. 또한 T_b, T_c 는 전송 데이터 주기와 칩 주기를 나타내는 것으로 처리 이득(PG; processing gain)은 $PG = T_b/T_c$ 로 나타낼 수 있으며 L_c 는 의사 잡음 수열의 길이이다.

식 (14)에 사용된 $r_{k,i}$ 값을 유도하기 위해서, 상호 상관 함수(cross correlation function)와 상호 상관 파라미터(cross correlation parameter)를 다음의 식 (15)와 식 (16)과 같이 정의하면^[8],

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \sum_{r=0}^{L-1-l} a_r^{(k)} [a_{r+l}^{(i)}], & 0 \leq l \leq L-1 \\ \sum_{r=0}^{L-1-l} a_{r-l}^{(k)} [a_r^{(i)}], & 1-L \leq l < 0 \\ 0, & |l| \geq L \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{k,i}(n) = \sum_{l=1-L}^{L-1} C_{k,i}(l)C_{k,i}(l+L) \quad (16)$$

i 번째 확산 수열과 k 번째 확산 수열간의 상호 상관값 $r_{k,i}$ 는 식 (15)와 (16)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다^[8].

$$r_{k,i} = 2\mu_{k,i}(0) + \mu_{k,i}(1) \quad (17)$$

식 (17)을 식 (14)에 대입하여 정리하면 (E_b/N_o) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c \text{SNR}_o^{(1)}}{\frac{2}{3} \sum_{k=2}^K \text{SNR}_o^{(k)} + 1} \quad (18)$$

식 (18)에서, 분모는 셀 내에서 희망 사용자에 대한 것이고 분자는 희망 사용자를 제외한 다중접속 사용자에 대한 것이다. k 번째 사용자의 입력 $\text{SNR}_o^{(k)}$ 에 대한 어레이 출력 $\text{SNR}_o^{(k)}$ 는 평균 어레이 이득($G_A^{(k)}$)에 대한 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{SNR}_o^{(k)} = 10^{x/10} G_A^{(k)} \text{SNR}_i^{(k)} \quad (19)$$

어레이 이득은 신호의 입력 모델과 어레이의 배열 구조 및 사용된 알고리즘에 따른 함수이다. 어레이 이득과 전력 제어 오차가 상호 독립적이고 사용자의 신호 전력이 로그노말 분포를 한다고 가정하

면 식 (18)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c G_A^{(1)} SNR_i^{(1)} 10^{x_i/10}}{\frac{2}{3}(K-1)G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} 10^{x_k/10} + 1} \quad (20)$$

여기서 $G_A^{(1)}$ 은 희망 사용자에게 대한 어레이 이득이고 $G_A^{(k)}$ 는 간섭 사용자에게 대한 평균 어레이 이득이며 $10^{x_i/10}$ 은 전력 제어 오차이다. 간섭 신호의 방향으로 어레이 이득이 일정하다면 식 (20)에서의 다중접속 간섭은 다음과 같이 근사화 할 수 있다^[9].

$$\frac{2}{3} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} [I_{MA}] = \sum_{k=2}^K 10^{\frac{x_k}{10}} + F \sum_{k=1}^K 10^{\frac{x_k}{10}} + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \quad (21)$$

식 (21)의 첫 번째 항은 단일셀의 다중접속 간섭에 대한 것이고 두 번째 항은 외부 셀의 다중접속 간섭에 대한 것이며 2/3은 의사 잡음 수열간의 상호 상관 함수로부터 유도된 값이다. F 는 다중셀 간섭 계수이며 다중 접속 간섭을 근사화 함에 있어서 다중셀 간섭을 식 (21)과 같이 단일셀 간섭으로 정규화하였다.

단일셀 간섭과 다중셀 간섭을 각각 로그노말 분포로 가정하면, 다중접속 간섭 I_{MA} 는 로그노말 랜덤 변수들의 합이므로 I_{MA} 의 1차 모멘트와 2차 모멘트는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[I_{MA}] &= (K-1)\exp\left(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2\right) \\ &+ F \cdot K \cdot \exp\left(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2\right) + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \\ E[I_{MA}^2] &= E\left[\left(\sum_{k=2}^K \exp(\beta x_k) + F \sum_{k=1}^K \exp(\beta y_k)\right)\right. \\ &\left. + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right] \\ &= (K-1)\exp(2\beta m_x + 2\beta^2 \sigma_x^2) \\ &+ (K-1)(K-2)\exp(2\beta m_x + \beta^2 \sigma_x^2) \\ &+ F^2(K \cdot \exp(2\beta m_y + 2\beta^2 \sigma_y^2) \\ &+ K(K-1)\exp(2\beta m_y + \beta^2 \sigma_y^2)) \\ &+ 2F \cdot K(K-1)\exp\left(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2\right) \\ &\cdot \exp\left(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2\right) + \left(\frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{3}{G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}(K-1)\exp\left(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2\right) \\ &+ \frac{3F}{G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}K \cdot \exp\left(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2\right) \quad (22) \end{aligned}$$

여기서 $\beta = \ln(10)/10$ 이고 랜덤 변수 x 와 y 는 각각 $N(0, \sigma_x^2)$ 과 $N(0, \sigma_y^2)$ 인 분포로 가정하면, 랜덤 변수 x 와 y 의 합인 새로운 랜덤 변수 z 의 평균과 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다^[4].

$$\begin{aligned} m_z &= 2 \ln(E[I_{MA}]) - \frac{1}{2} \ln(E[I_{MA}^2]) \\ \sigma_z^2 &= \ln(E[I_{MA}^2]) - 2 \ln(E[I_{MA}]) \quad (23) \end{aligned}$$

그러므로, 다중접속 간섭 I_{MA} 에 대하여 (E_b/N_o) 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_o}\right) &= \frac{L_c G_A^{(1)} SNR_i^{(1)} 10^{\frac{x_i}{10}}}{\frac{2}{3} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} [I_{MA}]} \\ &= \frac{3}{2} L_c \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} 10^{\frac{x_i - 10 \log_{10}(\exp(1))z}{10}} \quad (24) \end{aligned}$$

따라서, 블록킹은 (E_b/N_o) 가 임계값보다 작을 때 발생하며 블록킹 확률에 대한 표현식은 사용자 수 및 어레이 안테나 수에 대한 함수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_B \left(\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{dB} < \xi_{dB} \right) &= Q \\ &\left(\frac{10 \log \left(\frac{3}{2} L_c \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} \right) - 10 \log(\exp(1))m_z - \xi_{dB}}{\sqrt{\sigma_z^2 + 100 \log^2(\exp(1))\sigma_z^2}} \right) \quad (25) \end{aligned}$$

여기서 ξ_{dB} 는 임계값이고, $Q(x) = \int_x^\infty 1/\sqrt{2\pi} e^{-t^2/2} dt$ 이다.

IV. 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 시스템의 성능 비교 및 분석

전파음영과 다중접속 간섭은 CDMA 셀룰라 시스템이나 개인통신 시스템(PCS)의 성능을 제한하는 가장 큰 요인들이며 이러한 성능 감소 요인들의 영향을 줄이기 위해 전력 제어, 선택화 등의 방법들이 사용되고 있으나 전파음영과 다중접속 간섭의 영향

은 여전히 존재한다. 다음의 결과들은 다중접속 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 기지국 어레이 안테나를 DS/CDMA 셀룰라 시스템에 적용하였을 경우, 전파음영과 다중 접속 간섭을 고려한 시스템 용량을 나타내고 있다. 분석에 사용된 파라미터들은 다음과 같다. 입력 SNR=15 dB, 처리 이득 PG=21 dB, 어레이 안테나 수는 1, 8, 12개, 전력 제어 오차 PCE=2.5, 4 dB, 기지국 어레이 안테나에 사용된 알고리즘은 MCGM 알고리즘과 MMSE 알고리즘이다.

그림 4는 단일셀 내의 다중접속 간섭만을 고려하여 블록킹 확률에 따른 사용자 수를 나타낸 것이며 적용된 전력 제어 오차는 4 dB이다. 1%의 블록킹 확률을 가정하면, 등방성 안테나 1개를 사용한 경우에 사용자수는 약 4명이었으나 12개의 어레이 안테나를 사용한 MMSE와 MCGM의 경우에는 사용자수가 각각 51명과 106명으로 시스템 용량은 각각 12배, 26배 이상 증가되었으며 MCGM 알고리즘을 사용한 경우에는 MMSE 알고리즘을 사용한 경우보다 약 2배의 시스템 용량이 증가함을 알 수 있다.

그림 5와 6은 단일셀 다중접속 간섭과 다중셀 다중접속 간섭을 모두 고려하여 블록킹 확률에 따른 사용자 수를 나타낸 것으로 적용된 전력 제어 오차는 각각 2.5 dB와 4 dB이다. MCGM 알고리즘을 사용한 경우에 MMSE 알고리즘을 사용한 경우보다 시스템 용량은 전력 제어 오차에 상관없이 약 2배 이상 증가함을 알 수 있다. 그림 4~6으로부터 전력 제어 오차가 2.5 dB이고 어레이 안테나 수가 8이며

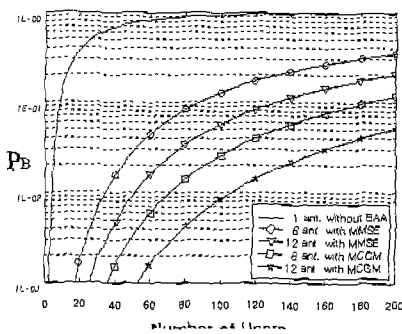


그림 4. 단일셀에서, 어레이 안테나 수와 알고리즘에 따른 사용자 수(SNR=15 dB, PCE=4 dB)
Fig. 4. The number of users according to number of array antennas and algorithm in single-cell(SNR=15 dB, PCE=4 dB).

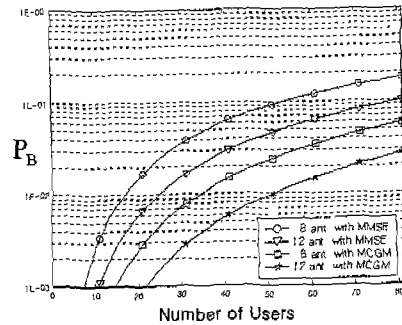


그림 5. 다중셀에서, 어레이 안테나 수와 알고리즘에 따른 사용자수(SNR=15 dB, PCE=2.5 dB)
Fig. 5. The number of users according to number of array antennas and algorithm in multi-cell(SNR=15 dB, PCE=2.5 dB).

다중셀 간섭을 고려한 경우, 단일셀 간섭만을 고려한 경우보다 MMSE 알고리즘과 MCGM 알고리즘을 사용한 시스템 용량은 1% 블록킹 확률에 대해 각각 5.8배와 5.9배가 감소하였으며 블록킹 확률이 2%일 때에는 두 알고리즘 모두가 약 5배의 용량 감소가 있음을 알 수 있다. 그림 5와 6으로부터, 시스템 용량은 다중셀 다중접속 간섭에 의해 큰 폭으로 감소됨을 알 수 있으며 이러한 다중접속 간섭을 좀더 효율적으로 감소시킬 수 있다면 시스템 용량을 더욱 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/

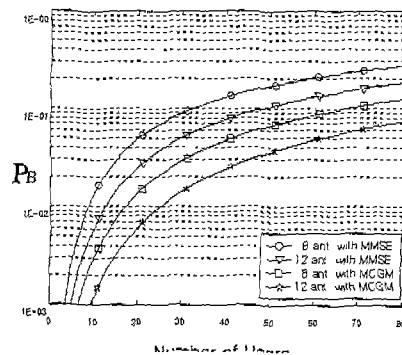


그림 6. 다중셀에서, 어레이 안테나 수와 알고리즘에 따른 사용자수(SNR=15 dB, PCE=4 dB)
Fig. 6. The number of users according to number of array antennas and algorithm in multi-cell(SNR=15 dB, PCE=4 dB).

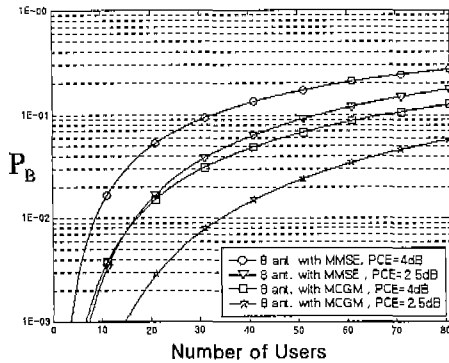


그림 7. 다중셀에서, 전력 제어 오차와 알고리즘에 따른 사용자 수(SNR=15dB, N=8)
 Fig. 7. The number of users according to PCE and algorithm in multi-cell(SNR=15dB, N=8).

CDMA 시스템의 성능에 대한 전력 제어 오차의 영향을 분석하기 위한 것으로 어레이 안테나 수는 8개로 고정하였으며 전력 제어 오차가 2.5 dB에서 4 dB로 증가되면 시스템 용량은 약 50% 정도 감소하게 된다. 결국 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서는 수신신호에 남아있는 전력 제어 오차의 영향을 무시할 수 없다는 것을 알 수 있다.

표 1은 블록킹 확률이 1%와 2%일 경우, 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 전력 제어 오차에 따른 시스템 용량을 다중셀 다중접속 간섭을 고려할 경우와 고려하지 않은 경우

표 1. 단일셀과 다중셀에서, 전력 제어 오차와 알고리즘에 따른 사용자수

Table 1. The number of users according to PCE and algorithm in single- and multi-cell.

Interference	PB (%)	Array (N)	1 Ant. without BAA		MMSE Algorithm		MCGM Algorithm	
			PCE 2.5dB	PCE 4dB	PCE 2.5dB	PCE 4dB	PCE 2.5dB	PCE 4dB
One cell Interference	1 %	N=8	9.4	3.8	97.4	34.3	203.7	71.0
		N=12			145.6	51.0	300	106.1
	2 %	N=8	10.8	4.8	113.8	43.8	238.1	91.1
		N=12			170.2	65.3	356.8	136.1
One cell + Other cell Interference	1 %	N=8	2.1	1.5	16.7	8.6	34.3	17.0
		N=12			24.7	12.4	51.1	25.1
	2 %	N=8	2.6	1.8	22.6	12.0	46.8	24.3
		N=12			33.6	17.6	69.8	35.9

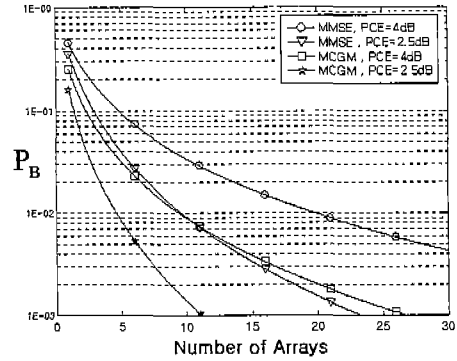


그림 8. 다중셀에서, 전력 제어 오차와 알고리즘에 따른 블록킹 확률 대 어레이 안테나 수(SNR=15 dB, K=20)
 Fig. 8. Blocking probability versus number of arrays according to PCE and algorithm in multi-cell(SNR=15 dB, K=20).

로 나누어 나타내었다.

그림 8은 전력 제어 오차가 2.5와 4 dB인 경우를 모두 고려하여 블록킹 확률에 따른 어레이 안테나 수를 나타낸 것이다. 사용자 수는 20명이고 어레이 이득은 일정하다고 가정하였으며 다중셀 다중접속 간섭을 고려하였다. 1%와 2%의 블록킹 확률을 가정하면, 전력 제어 오차가 2.5 dB에서 4 dB로 증가함에 따라 요구되는 어레이 안테나 수는 두 알고리즘 모두 약 2배 정도 증가됨을 알 수 있다. 또한, 블

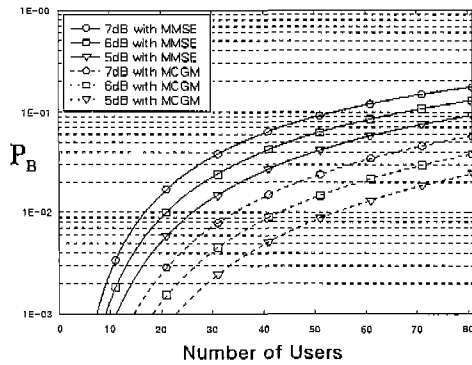


그림 9. 다중셀에서, 요구되는 E_b/N_o 와 알고리즘에 따른, 블로킹 확률 대 사용자 수 (SNR=15 dB, N=8, PCE=2.5 dB)

Fig. 9. Blocking probability versus number of users according to required E_b/N_o and algorithm in multi-cell(SNR=15dB, N=8, PCE=2.5 dB).

블로킹 확률을 유지하기 위해 필요한 어레이 안테나 수는 MCGM 알고리즘이 MMSE 알고리즘에 사용되는 어레이 안테나 수의 약 50%의 정도만을 필요로 하며 이는 MCGM 알고리즘이 MMSE 알고리즘보다 우수한 성능을 가진다는 것을 알 수 있다.

그림 9와 10은 전력 제어 오차가 2.5와 4 dB인 경우에, 요구되는 임계값에 따른 블로킹 확률 대 사용자 수를 나타낸 것이며 어레이 안테나 수는 8개이다. 블로킹 확률이 1%이고 전력 제어 오차가 2.5 dB인 경우, 임계값(7, 6, 5 dB)에 따른 사용자의 증가는 MMSE 알고리즘보다는 MCGM 알고리즘을 사용한 경우에 평균 2배 이상의 증가를 보이고 임계값이 작아질수록 사용자 수는 MMSE 알고리즘이 각각 4.2

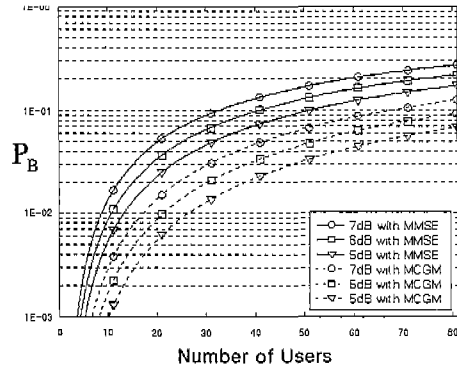


그림 10. 다중셀에서, 요구되는 E_b/N_o 와 알고리즘에 따른, 블로킹 확률 대 사용자 수 (SNR=15 dB, N=8, PCE=4 dB)

Fig. 10. Blocking probability versus number of users according to required E_b/N_o and algorithm in multi-cell(SNR=15 dB, N=8, PCE=4 dB).

표 2. 전력 제어 오차와 알고리즘에 따른 어레이 안테나 수

Table 2. The number of array antennas according to PCE and algorithm.

	MMSE Algorithm		MCGM Algorithm	
	PCE=2.5 dB	PCE=4 dB	PCE=2.5 dB	PCE=4 dB
N(개)/P _B =1%	9.6	19.9	4.6	9.5
N(개)/P _B =2%	7.1	13.7	3.4	6.5

명과 5.2명, MCGM 알고리즘이 각각 8.7명과 11명으로 두 알고리즘 모두 증가의 폭이 커지며 MMSE 알고리즘보다는 MCGM 알고리즘의 사용자 증가폭이 크다는 것을 알 수 있다. 분석 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3. 다중셀에서 요구되는 E_b/N_o 와 전력 제어 오차에 따른 사용자 수

Table 3. The number of users according to required E_b/N_o and PCE in multi-cell.

	MMSE Algorithm						MCGM Algorithm					
	PCE=2.5 dB			PCE=4 dB			PCE=2.5 dB			PCE=4 dB		
(E_b/N_o) required	7 dB	6 dB	5 dB	7 dB	6 dB	5 dB	7 dB	6 dB	5 dB	7 dB	6 dB	5 dB
K(명)/P _B =1%	16.7	20.9	26.1	8.6	10.6	13.1	34.3	43.0	54.0	17.0	21.2	26.5
K(명)/P _B =2%	22.6	28.3	35.5	12.1	14.9	18.5	46.8	58.7	73.7	24.3	30.3	37.9

V. 결 론

다중접속 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 기지국 어레이 안테나를 DS/CDMA 셀룰라 시스템에 적용하였을 경우, 전력 제어 오차와 다중접속 간섭에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 셀내에 K 명의 사용자가 존재하고 각 사용자의 신호 출력이 독립적으로 로그노말 분포를 한다고 가정하였으며 어레이 출력을 가우시안으로 근사화하였다. 다중셀 간섭을 고려하기 위해, 전력 제어 오차가 0 dB 일 때 간섭계수가 0.57인 경우를 가정하였고, 길이가 127인 랜덤 부호를 사용하여 의사 잡음 수열로서 모델링하였다. 다중접속 간섭을 근사화 함에 있어 다중셀 간섭을 단일셀 간섭으로 정규화 하였으며 단일셀과 다중셀 다중접속 간섭을 각각 로그노말 분포로 가정하고 새로운 랜덤 변수의 합인 z 로 유도하여 평균과 분산을 계산하였다. 계산된 다중접속 간섭량과 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비(E_b/N_0) 및 어레이 안테나 파라미터를 사용하여 블록킹 확률에 대한 표현식을 유도하였으며 전파음영과 다중접속 간섭을 모두 고려한 시스템의 성능을 분석하였다. 1개의 전방향성 안테나를 사용하는 경우보다는 기지국 어레이 안테나 8개를 사용하였을 경우, 과도한 전력 제어 오차(4 dB)에도 불구하고 시스템용량은 MMSE와 MCGM 알고리즘을 적용하면 1% 블록킹 확률에 대해 각각 9배와 18.7배가 증가하였으며 MCGM 알고리즘을 사용할 경우 MMSE 알고리즘을 사용한 경우보다 약 2배의 사용자를 더 수용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 전력 제어 오차가 2.5 dB이고 어레이 안테나 수가 8개이며 다중셀 간섭을 고려한 경우, 단일셀 간섭만을 고려한 경우보다 MMSE 알고리즘과 MCGM 알고리즘을 사용한 시스템 용량은 1% 블록킹 확률에 대해 각각 5.8배와 5.9배가 감소하였으며 블록킹 확률이 2%일 때에는 두 알고리즘 모두가 약 5배 정도의 용량감소가 있었다. 전력 제어 오차가 2.5 dB에서 4 dB로 증가함에 따라 요구되는 어레이 안테나 수는 두 알고리즘 모두 다 2배정도 증가하였고 특정 블록킹 확률에 대해 MCGM 알고리즘의 경우, MMSE 알고리즘에 사용되는 어레이 안테나 수의 약 50%만을 필요

로 하였으며 요구되는 임계값이 7 dB에서 5 dB로 작아지는 경우 시스템 용량은 MMSE 알고리즘보다는 MCGM 알고리즘을 사용한 경우에 평균 2배 이상 증가됨을 알 수 있었다.

향후, 다중경로 채널 환경하에서 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 시스템의 성능을 분석할 예정이며 본 연구결과를 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 셀룰라 시스템 설치 시, 전파음영과 다중접속 간섭을 고려한 가입자 용량 계산에 이론적인 근거로 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Choi and D. Yun, "Design of an adaptive antenna array for tracking the source of maximum power and its applications to CDMA mobile communications", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 45, no. 9, pp. 1393-1404, Sep. 1997.
- [2] R. Lupas and S. Verdú, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 35, no. 1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [3] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*, Prentice Hall, 1999.
- [4] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems", *IEEE Papers. Comm. Mag.*, vol. 1, pp. 28-34, 3rd quarter, 1994.
- [5] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive signal processing*, Prentice Hall, 1985.
- [6] D. D. Lee, D. H. Kim, Y. J. Chung, H. G. Kim, and K. C. Whang, "Other-cell interference with power control in macro/microcell CDMA networks", *IEEE 46th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 1120-1124, April/May 1996.
- [7] J. E. Miller and S. L. Miller, "DS-CDMA reverse link performance with a smart antenna array, fading and imperfect power control", *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*.

vol. 2, pp. 622-626, May 1997.

[8] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread spectrum multiple -access communication-part I: system analysis", *IEEE Trans. on Communications*, vol. COM-25, no.

8, pp. 795-799, August 1977.

[9] C. L. Ho, "Calculating the mean and variance of power sums with two log-normal components", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 756-762, November 1995.

김 형 채



1999년: 청주대학교 정보통신공학과(공학사).
1999년~현재: 충북대학교 정보통신공학과(공학석사)
[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선 시스템

김 남



1981년: 연세대학교 전자공학과(공학사)
1983년: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
1988년: 연세대학교 전자공학과(공학박사)
1992년~1993년: 미 Stanford 대학 방문교수

2000년~2001년: 미 California Technology Institute (Caltech) 방문교수

1989년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템, 전자파 해석, EMR/EMC, Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX Optical Memory, Holography Application

김 향 래



1995년: 청주대학교 전자공학과(공학사)
1997년: 청주대학교 전자공학과(공학석사)
1997년~1997년: 한국전자통신연구원 위촉연구원
1999년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 박사수료

[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템

한 태 영



1981년: 2월 연세대학교 전자공학과(공학사)
1985년 4월: 금성 반도체(주) 입사
1988년 8월: 연세대학원 전자공학과(공학석사)
1992년 4월: 한국이동통신(주) 입사
1999년 3월: 주성대학 조교수

[주 관심분야] 이동통신, 적응제어