

불완전 전력제어를 고려한 동적 확산 이득 제어에 관한 연구

준회원 조성우*, 김백현*, 정회원곽경섭**

On Dynamic Spreading Gain Control considering the Imperfect Power Control Condition

Sung-woo Cho*, Baek-hyun Kim* Associate Members Kyung-sup Kwak** *Regular Member*

요약

기존에 개발되어온 DS-CDMA 네트워크는 음성 트래픽 서비스에 중점을 두고 개발되어져왔다. 그러나 이동통신의 급속한 발전과 함께, 현재의 이동통신 시스템은 음성뿐 아니라, 다양한 멀티미디어 트래픽의 서비스를 요구하고 있다. 본 논문에서는 음성 트래픽과 데이터 트래픽 서비스를 지원하는 DS-CDMA 네트워크를 고려하며, 데이터 서비스에 대한 효율(throughput)을 최대로 하는 동적 확산 이득 제어(DSGC, Dynamic Spreading Gain Control)에 관해 연구 하였다. 음성 트래픽은 시간지연에 민감한 실시간 서비스를 요구하는 트래픽이고, 데이터 트래픽은 시간지연에는 큰 제약을 받지 않지만, 오류에 민감한 트래픽으로 구분 될 수 있다. 확산 이득 제어에 관한 기존의 연구에서는 대부분 완전한 전력제어가 고려되어져 왔다. 그러나, 실제 시스템에서는 전파의 진행 조건이나, 이동국의 속도등 다양한 요소들에 의해 완전한 전력제어는 불가능하다. 이에 따라 불완전한 전력 제어를 고려한 상황과 완전한 전력제어를 가정한 상황에서의 데이터 서비스 효율과 동적 확산 이득 제어에 의한 효율을 비교 분석하였다.

ABSTRACT

Previous mobile communication services are concentrated on voice traffic. However, according to rapid improvement of mobile communication systems, we need various multimedia traffic services. In this paper, we consider a DS-CDMA system that supports voice and data traffics. The voice traffic service requires real-time delivery, but has some tolerance to transmission errors. On the other hand, the data traffic service requires reliable delivery, but has some tolerance to the delay by retransmission of errored packets. To obtain maximum throughput of data services, we consider spreading gain control (SGC). In the most of previous works, they assumed perfect power control. But, in the real system, the received power after power control is still quite variable because of user's mobility and propagation conditions. So, in this paper we analyze the performance of DS-CDMA with SGC in two cases: The one is in the perfect power control and the other is in the imperfect power control.

I. 서론

본 논문에서는 단일 셀의 경우를 고려하여, 두 가지 형태의 트래픽 서비스를 지원하는 DS-CDMA 시

스템을 고려한다. 초창기 CDMA 이동통신 시스템 개발 시에 음성 트래픽 서비스에 중점을 두었던 것과는 달리 최근에는 다양한 멀티미디어 서비스를 위한 연구가 많이 진행되고 있다^{[1][5]}. 본 논문에서는 실시간 서비스를 요구하지만, 오류에 관해서는 여유

*인하대학교 전자공학과 (swcho@korea.com)

**인하대학교 정보통신대학원(kskwak@inha.ac.kr)

논문번호 : 010327-1113, 접수일자 : 2001년 11월 13일

※본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-00213) 지원으로 수행되었습니다.

를 갖는 형태의 음성 트래픽과, 시간지연에 관해서는 여유를 갖지만, 오류에 민감한 형태의 데이터 트래픽을 서비스하는 DS-CDMA 시스템을 가정한다.

다양한 형태의 트래픽을 지원하기 위해서는 각 트래픽의 특성에 알맞은 다양한 서비스 품질(Quality of Service)을 제공해야 한다. 그러므로, 다양한 종류의 트래픽 서비스를 제공하는 차세대 이동통신 시스템에서는, 각각의 트래픽이 요구하는 서비스 품질을 제공하기 위한 무선 자원 할당의 메커니즘 개발이 매우 중요한 문제가 되고 있다^[10]. 이러한 메커니즘의 개발에 있어 어려운 점은 DS-CDMA 시스템의 경우, 정해져 있는 대역폭에서 일정한 확산 이득을 고려하면, 정보 전송률은 한계를 가지게 되므로, 높은 효율을 얻기 위해 무조건적으로 높은 정보 전송률을 적용하기 어렵다는 것이다.

본 논문에서는 데이터 트래픽 서비스의 최대 효율을 얻기 위한 동적인 확산 이득 제어에 관한 연구를 수행한다. 이와 더불어 DS-CDMA 시스템에서의 전력제어에 따른 문제점을 고려한다. 전력제어는 제한된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위한 대표적인 무선 자원 관리 기술 중 하나이다. 전력제어는 원근 문제(near-far problem)를 해결하기 위한 효과적인 방안으로 시스템의 용량과 밀접한 관계를 가진다.

기존의 연구에서는 주로 완전한 전력제어를 가정하였다^[11,16]. 그러나, 각각 이동국의 신호들이 겪는 이동성과 페이딩 현상등 전파의 진행 조건들이 다르므로, 이로 인해 실제 시스템에서는 완전한 전력 제어의 구현이 어렵게 된다. 따라서, 본 논문에서는 불완전 전력 제어에 의한 영향을 추가하여 완전한 전력 제어인 경우와 불완전 전력 제어인 경우의 데이터 서비스 효율을 비교하고, 각각의 경우 효율을 최대로 할 수 있는 확산 이득을 유도하며, 이를 동적으로 제어함으로써 고정된 확산 이득을 적용한 경우에 비해 개선된 데이터 서비스의 효율을 얻을 수 있는 시스템을 분석한다.

이를 위해 II절에서는 분석을 위한 음성과 데이터 트래픽의 모델을 살펴보고, III절에서는 완전 전력 제어를 가정한 경우와 불완전 전력 제어를 고려한 경우의 각각에 대해 데이터 서비스 효율을 나타내는 식을 유도한다. IV절에서는 각각의 경우에 대해 데이터 서비스 효율을 최대로 할 수 있는 확산 이득을 구하고, 이를 통해 이상적인 데이터 서비스의 효율에 관해 알아본다. 그리고 V절에서는 수치해석을 통해 그 결과들을 분석하고 마지막으로 VI절에서 결론을

맺는다.

II. 음성과 데이터 트래픽의 모델

활성 음성 트래픽 서비스 사용자들은 R_v bits/s의 정보 전송률로 트래픽을 전송하고, 비활성 사용자는 어떠한 트래픽의 전송도 하지 않는다. 이와 같은 현상은 ON/OFF의 상태로 모델링 할 수 있으며, ON 상태에서 OFF 상태로의 천이율은 μ , OFF 상태에서 ON 상태로의 천이율은 λ 로 정의한다^[1]. 이를 바탕으로 그림 1과 같은 마르코브 체인을 모델링 할 수 있으며, 각 상태의 값은 시스템내의 활성 음성 트래픽 서비스 사용자의 수를 나타낸다. 또한 슬롯의 간격은 $1/\lambda$, $1/\mu$ 와 비교하여 매우 작은 값으로 가정함으로써 한 슬롯에서 두 개 또는 그 이상의 사건이 일어날 확률은 무시할 수 있다.

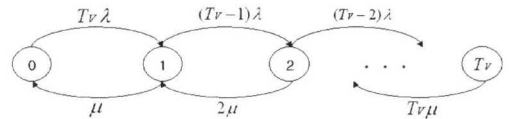


그림 1. 음성 서비스 사용자의 마르코브 모델

앞의 모델을 바탕으로 음성 트래픽 서비스 사용자가 v 가 되는 정상상태 확률 $\Pi_v(v)$ 은 식(1)과 같이 구할 수 있다^[1]. 여기에서 T_v 는 시스템에서 수용 가능한 전체 음성 서비스 사용자 수를 나타낸다.

$$\Pi_v(v) = \frac{\binom{T_v}{v} (\lambda/\mu)^v}{\sum_{j=0}^{T_v} \binom{T_v}{j} (\lambda/\mu)^j} \quad (1)$$

데이터 트래픽에 대해서는 전송 허용 확률(transmission permission probability)에 의한 접속 제어가 이루어진다. 또한, 데이터 서비스는 패킷 전송 시간, 재전송 시간, 큐잉 지연 등을 고려한 평균 시간 지연에 의해 제한을 받는다. 그리고, 오류를 가진 모든 데이터는 재전송 된다.

III. 데이터 트래픽 서비스의 효율

패킷의 평균 시간 지연 D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$D = \frac{LN}{R_c \times P_s(SIR)} \quad (2)$$

식(2)에서 L 은 데이터 서비스에서 트래픽 패킷의 길이, N 은 확산 이득, R_c 는 칩비율(chip rate)을 나타낸다. 그리고 $P_s(SIR)$ 은 패킷 전송 성공 확률을 나타내는 것으로서 변조방식에 의존하는 함수이며, 식(3)으로 표현된다.

$$P_s(SIR) = [1 - P_b(SIR)]^{rL} \quad (3)$$

여기에서, P_b 는 비트오율(BER, bit error rate)를 나타내고, r 은 코딩율(coding rate)을 의미한다. 식(2)의 패킷 평균 시간 지연을 사용하여, SIR 에 따른 데이터 서비스의 효율은 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$S = \frac{Lr}{D} = \frac{rR_c}{N} P_s(SIR) \quad (4)$$

1. 완전 전력제어를 가정한 데이터 트래픽 서비스 효율

데이터 트래픽 서비스의 임의의 한 슬롯 구간 $[t, t+1)$ 동안의 활동 사용자의 SIR 은 식(5)과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$SIR_d(t) = \frac{W}{R_d} \frac{p_d}{\alpha_v p_v M_v(t) + \alpha_d p_d (M_d(t) - 1)} \quad (5)$$

식(5)에서 p_v, p_d 는 각각 음성 트래픽 사용자와 데이터 트래픽 사용자의 수신 전력을 나타내고, $M_v(t)$ 와 $M_d(t)$ 는 시간 $[t, t+1)$ 동안에서의 음성과 데이터 트래픽 서비스의 사용자 수를 나타낸다. 또한 W/R_d 는 데이터 트래픽 서비스 사용자의 확산 이득 N_d 로 표현할 수 있다. α_v 과 α_d 는 각각 음성 트래픽과 데이터 트래픽의 활동도(activity)를 나타내는 값이고, 식(5)에서 배경잡음은 고려하지 않았다.

식(5)와 식(1)의 음성 트래픽의 모델을 사용하여 음성 사용자와 데이터 사용자 수를 고려한 데이터 서비스의 효율을 나타내면 식(6)과 같다.

$$S_{N_d, q}(T_v, b_d) = \frac{r_d R_c}{N_d} \sum_{v=0}^{T_v} \sum_{j=1}^{b_d} j P_s \left(\frac{N_d p_d}{\alpha_v p_v v + \alpha_d p_d (j-1)} \right) \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^j (1-q)^{b_d-j}$$

이 식에서 q 는 데이터 서비스 사용자의 전송 허용 확률을 나타내고, T_v 는 시스템에서 허용하는 음성 서비스의 사용자 수, b_d 는 슬롯의 시작점에서 데이터 서비스의 사용자수를 나타낸다. 또한, 완전 전력 제어를 가정함으로써 p_v 와 p_d 는 동일하다고 할 수 있다.

2. 불완전 전력제어를 고려한 데이터 트래픽 서비스 효율

불완전 전력제어를 고려한 경우에 서비스 클래스 i (음성 또는 데이터)의 \overline{SIR}_i 는 수신 SIR 의 국부 평균이고, 대수정규분포(log-normal)로 나타낸다. 또한 수신 SIR 의 표준편차 σ_{x_i} 와 시스템의 신뢰도 β_i 를 사용하여 불완전 전력 제어에 의한 오류의 영향을 나타낼 수 있다. 다음의 전개에 의해 불완전 전력 제어에 의한 오류항 식(24)를 정의하고 이를 이용하여 불완전 전력제어를 고려한 데이터 트래픽 서비스 효율을 알아본다.

데이터 서비스의 SIR 은 해당 시스템의 신뢰도 β_d 하에서 식(7)을 만족해야 한다^[9].

$$SIR_{(\beta_d)} \geq SIR_{dR} = \frac{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dR}}{\frac{W}{R_d}} \quad (7)$$

여기서 SIR_{dR} 은 데이터 서비스에서 요구되는 SIR 값이고, $SIR_{(\beta_d)}$ 는 다음의 식(8)을 만족하는 값이다.

$$\Pr(\overline{SIR}_d \geq SIR_{(\beta_d)}) = \beta_d \quad (8)$$

\overline{SIR}_d 는 데이터 서비스의 수신 SIR 의 국부 평균 값(Local mean)이고, 대수정규분포(log-normal distribution)을 갖는다. 그러므로 다음과 같은 식(9)를 정의할 수 있다.

$$X_d = 10 \log_{10}(\overline{SIR}_d) \quad (9)$$

즉, X_d 는 정규분포를 갖는 새로운 랜덤변수가 되며, 식(7)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{(\beta_d)} \geq 10 \log_{10} \left(\frac{(E_b/N_0)_{dR}}{W/R_d} \right) \quad (10)$$

또한, 정규분포로 표현한 X_d 를 이용하여 식(8)을 정리하면 다음과 같다.

$$P_r(X_d \geq X_\beta) = Q\left(\frac{X_{(\beta_d)} - \mu_{X_d}}{\sigma_{X_d}}\right) = \beta \% \quad (11)$$

식(11)은 다시 다음과 같이 정리되고, σ_{X_d} 는 수신 SIR의 표준편차가 된다.

$$\frac{X_{(\beta_d)} - \mu_{X_d}}{\sigma_{X_d}} = Q^{-1}(\beta_d) \quad (12)$$

여기서 $Q(x)$ 는 식(13)로 정의된다.

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\mu \quad (13)$$

식(12)를 정리하여, 식(10)에 대입하면, 식(14)를 얻을 수 있다.

$$\mu_{X_d} + Q^{-1}(\beta_d)\sigma_{X_d} \geq 10 \log_{10}\left(\frac{(E_b/N_0)_{dR}}{WR_d}\right) \quad (14)$$

또한, \overline{SIR}_d 는 log-normal Random Variable 이므로, 다음과 같은 결과 식을 사용할 수 있다¹⁹⁾.

$$10 \log_{10} \langle \overline{SIR}_d \rangle = \mu_{X_d} + \frac{\sigma_{X_d}^2}{a} \quad (15)$$

식(15)에서 $\langle \overline{SIR}_d \rangle$ 는 \overline{SIR}_d 의 평균값을 의미하며, $a = 10 \log_{10} e$ 를 나타낸다.

식(15)를 이용하여 식(14)를 정리하면 다음의 식(16)을 얻을 수 있다.

$$10 \log_{10} \langle \overline{SIR}_d \rangle + Q^{-1}(\beta_d)\sigma_{X_d} - 0.12 \sigma_{X_d}^2 \geq 10 \log_{10}\left(\frac{(E_b/N_0)_{dR}}{WR_d}\right) \quad (16)$$

다음은, 배경잡음을 무시하는 가정 하에서 데이터 서비스의 E_b/N_0 를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d &= \frac{W}{R_d} * \frac{\overline{P}_d}{\alpha_d * (M_d - 1) * \overline{P}_d + \alpha_v * M_v * \overline{P}_v + \overline{I}_{outer}} \\ &= \frac{W}{R_d} * \frac{\overline{P}_d}{\overline{I}} \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)에서, \overline{P}_d 는 데이터 서비스의 사용자들에 대한 평균 수신 신호의 세기이고, α_d 는 데이터 서비스

의 활성화도, M_d 는 데이터 서비스의 사용자 수, \overline{I}_{outer} 는 외부 셀 들에 의한 간섭을 말하고, \overline{I} 는 기지국의 수신되는 전체 간섭을 말한다.

한편, F로 표현되는 주파수 재사용 효율은 다음 식(18)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{(1+f)} = \frac{\overline{I}_{inner}}{\overline{I}_{inner} + \overline{I}_{outer}} \\ &= \frac{\alpha_v * M_v * \overline{P}_v + \alpha_d * (M_d - 1) * \overline{P}_d}{\overline{I}} \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)의 \overline{I}_{inner} 는 해당 셀에 의한 간섭이며, \overline{I}_{outer} 는 인접 셀에 의한 간섭이다. 또한, \overline{I} 는 기지국에 수신되는 전체 간섭을 의미한다. 그리고, 시스템에서 각각의 다른 서비스 품질을 갖는 음성 서비스와 데이터 서비스를 고려하면, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d = \frac{1}{\tau_{v,d}} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_v \quad (19)$$

$\tau_{v,d}$ 는 음성 서비스 사용자와 데이터 서비스의 사용자 사이의 품질 관계 계수로서 다음 식(20)과 같이 정의된다.

$$\overline{P}_d = \frac{1}{\tau_{v,d}} * \frac{R_d}{R_v} * \overline{P}_v \quad (20)$$

식(20)을 이용하여 식(18)을 정리하면, F의 식을 식(21)과 같이 정리할 수 있다.

$$F = \left[\alpha_d (M_d - 1) + \alpha_v M_v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} \right] * \frac{\overline{P}_d}{\overline{I}} \quad (21)$$

\overline{SIR}_d 는 전체 간섭 I의 표준편차 σ_I 를 이용하여 식(22)와 같이 표현된다¹⁹⁾.

$$\overline{SIR}_d = \frac{\overline{P}_d}{\overline{I}} 10^{\sigma_I^2 \frac{\ln 10}{100}} \approx \frac{\overline{P}_d}{\overline{I}} \quad (22)$$

여기서 식(16)을 정리하여 식(21)과 식(22)를 이용하면, 최종적으로 식(23)을 구할 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{dR} \leq \frac{W}{R_d} \frac{\langle \frac{1}{1+f} \rangle 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_w - 0.012 \sigma_w^2}}{\left[\alpha_d (m_d - 1) + \alpha_v m_v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} \right]} \quad (23)$$

즉, 완전한 전력제어의 경우를 나타낸 식(5)와 비교하여 불완전 전력제어의 경우에는, 식(24)와 같은 불완전 전력제어로 인한 오류항을 갖게 된다^{[5],[9]}.

$$F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2 \quad (24)$$

그러므로, 불완전 전력제어의 영향을 고려한 데이터 서비스의 활성 사용자수에 따른 SIR은 다음 식(25)와 같다.

$$SIR_d(t) = \frac{W}{R_d} \frac{F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2}{\left[\alpha_v M_v(t) \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (M_d(t) - 1) \right]} \quad (25)$$

식(25)에서 R_v 과 R_d 는 각각 음성 및 데이터 서비스에서의 정보 전송률을 의미하며, $\tau_{v,d}$ 는 음성 서비스 사용자와 데이터 서비스의 사용자간의 품질 관계 계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_d = \frac{1}{\tau_{v,d}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_v \quad (26)$$

식(25)에 표시된 SIR을 사용하여 식(6)과 같이 데이터 서비스의 효율을 나타내면, 식(27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{N_d,q}(T_v, b_d) = \frac{r_d R_c}{N_d} \sum_{v=0}^{T_v} \sum_{j=1}^{b_d} j P_s \left(\frac{N_d F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2}{\left[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right]} \right) \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^{j(1-q)^{b_d-j}} \quad (27)$$

즉, 식(6)의 완전한 전력제어를 가정한 경우의 효율과 비교해 볼 때, SIR에 불완전 전력 제어에 의한 오류의 항이 첨가되고, 이로 인해 패킷 전송 성공 확률의 변화를 가져온다.

IV. 이상적인 동적 확산 이득 제어

이상적인 동적 확산 이득 제어는 데이터 서비스 효율이 최대가 되도록 확산 이득을 동적으로 제어하는 것이다. 이를 위해, 다음과 같은 확산 이득 제어 메커니즘 π_q^* 를 고려할 수 있다^[6]. 확산 이득 제어 메커니즘 π_q^* 는 식(28)과 같이 정의된다. 식(28)은 불완전 전력 제어를 고려한 식이다.

$$\begin{aligned} \pi_q^*(T_v, b_d) &= \arg \max_{N_d \geq 1} \{ S_{N_d,q}(T_v, b_d) \} \\ &= \arg \max_{N_d \geq 1} \left\{ \frac{r_d R_c}{N_d} \sum_{v=0}^{T_v} \sum_{j=1}^{b_d} j P_s \left(\frac{N_d F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2}{\left[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right]} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^{j(1-q)^{b_d-j}} \right\} \quad (28) \end{aligned}$$

식(28)의 확산 이득 제어 메커니즘 π_q^* 은 데이터 서비스 효율과 이를 최대로 하는 확산 이득 N_d 와 의 관계식이라고 할 수 있다. 식(28)에서 데이터 서비스의 확산 이득 N_d 를 구하기 위해 식(29)를 이용한다^[6].

$$\psi^* = \arg \max_{\psi \geq 1} \left\{ \frac{1}{\psi} P_s(\psi) \right\} \quad (29)$$

식(29)를 이용할 수 있는 적당한 식을 만들기 위해 $S_{N_d,1}(T_v, j)$ 를 고려하면, 식(30)과 같으며, 이 식은 식(27)에서 이항분포의 계수부분에 해당한다.

$$\begin{aligned} S_{N_d,1}(T_v, j) &= \frac{r_d R_c}{N_d} \sum_{v=0}^{T_v} j P_s \left(\frac{N_d F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2}{\left[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right]} \right) P_s(\psi^*) \\ &\quad \times \prod_v(v) \quad (30) \end{aligned}$$

식(30)에서 확산 이득 N_d 를 다음 식(31)과 같이 정의하면 식(29)를 이용하여 식(32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_d = \sum_{v=0}^{T_v} \frac{\psi^*}{F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2} \left(\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right) \times \prod_v(v) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \arg \max_{N_d \geq 1} \left\{ \sum_{v=0}^{T_v} \frac{j}{N_d} P_s \left(\frac{N_d F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2}{\left[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right]} \right) \times \prod_v(v) \right\} \\ = \max \left\{ 1, \sum_{v=0}^{T_v} \frac{\psi^*}{F 10 \frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{\omega} - 0.012 \sigma_{\omega}^2} \left(\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (j-1) \right) \right. \\ \left. \times \prod_v(v) \right\} \quad (32) \end{aligned}$$

지금까지 정리된 식을 바탕으로 식(30)에 나타난 전송 허용 확률 q 가 1인 경우, 식(33)을 만족함으로

써 데이터 서비스 효율이 최대가 됨을 나타낼 수 있다 [6].

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, q}(T_v, b_d)\} \\ & \leq \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, 1}(T_v, b_d)\} \leq \frac{r_d R_c}{\phi^*} P_s(\phi^*) \quad (33) \end{aligned}$$

우선 식(33)에서 좌측항 즉, 전송 허용 확률 q 가 1보다 작은 경우를 고려하면 식(34)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, q}(T_v, b_d)\} \\ & = \max_{N_d \geq 1} \left\{ r_d R_c \sum_{v=0}^{T_v} \sum_{j=1}^{b_d} \frac{j}{N_d} P_s \left(\frac{N_d F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \right) \right. \\ & \quad \left. \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^j (1-q)^{b_d-j} \right\} \\ & \leq r_d R_c \sum_{j=1}^{b_d} \max_{N_d \geq 1} \left\{ \sum_{v=0}^{T_v} \frac{j}{N_d} P_s \left(\frac{N_d F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \right) \right. \\ & \quad \left. \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^j (1-q)^{b_d-j} \right\} \quad (34) \end{aligned}$$

식(32)를 이용하면, 식(34)에서 부등호 우측항의 중앙부분은 식(35)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \left\{ \sum_{v=0}^{T_v} \frac{j}{N_d} P_s \left(\frac{N_d F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \right) \right\} \times \prod_v(v) \\ & = \sum_{v=0}^{T_v} \frac{j}{\left[\frac{\phi^*}{F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}} \left(\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1) \right) \right]} \\ & \quad \times P_s(\phi^*) \times \prod_v(v) \quad (35) \end{aligned}$$

식(35)를 식(34)에 대입하여 정리하면 식(36)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, q}(T_v, b_d)\} \\ & \leq \frac{r_d R_c}{\phi^*} P_s(\phi^*) \sum_{v=0}^{T_v} \sum_{j=1}^{b_d} \frac{j F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \\ & \quad \times \prod_v(v) \times \left(\frac{b_d}{j} \right) q^j (1-q)^{b_d-j} \quad (36) \end{aligned}$$

다음은, 식(33)에서 전송 허용 확률 q 가 1이 되는

경우에 관해 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, 1}(T_v, b_d)\} \\ & = \max_{N_d \geq 1} \left\{ \frac{r_d R_c}{N_d} \sum_{v=0}^{T_v} b_d P_s \left(\frac{N_d F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(b_d-1)]} \right) \right. \\ & \quad \left. \times \prod_v(v) \right\} \quad (37) \end{aligned}$$

식(37)도 식(36)과 마찬가지로 식(32)를 이용하여 정리하면 식(38)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, 1}(T_v, b_d)\} \\ & = \frac{r_d R_c}{\phi^*} P_s(\phi^*) \sum_{v=0}^{T_v} \frac{b_d F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(b_d-1)]} \times \prod_v(v) \quad (38) \end{aligned}$$

식(36)과 식(38)을 비교해보면, 식(33)에 대한 증명으로 식(39)를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{j}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \\ & \leq \frac{b_d}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(b_d-1)]} \leq 1 \quad (39) \end{aligned}$$

식(39)의 우측항 1은 식(34)의 우측항 ($r_d R_c / \phi^*) \times P_s(\phi^*)$ 의 경우에 해당되며, 이는 데이터 서비스의 사용자가 무한히 증가한 경우의 극한값이라고 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{v=0}^{T_v} \frac{j F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}}{[\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d(j-1)]} \times \prod_v(v) = 1 \quad (40) \end{aligned}$$

앞의 결과에 의해 데이터 서비스의 최대 효율은 전송 허용 확률 q 가 1인 경우에 해당함을 알 수 있다. 그러므로 데이터 서비스 효율을 최대로 하는 이상적인 확산 이득은 식(41)과 같이 정리할 수 있다.

$$\pi_1^*(T_v, b_d) = \arg \max_{N_d \geq 1} \{S_{N_d, 1}(T_v, b_d)\} = N_d^* \quad (41)$$

즉, 불완전 전력제어를 고려한 이상적인 확산 이득

은 식(42)과 같이 된다.

$$N_d^* = \sum_{v=0}^{T_v} \frac{\psi^*}{F 10^{\frac{Q^{-1}(\beta_d)}{10} \sigma_{sd} - 0.012 \sigma_{sd}^2}} \left(\alpha_v v \tau_{v,d} \frac{R_v}{R_d} + \alpha_d (b_d - 1) \right) \times \prod_v(v) \quad (42)$$

완전한 전력제어를 가정한 경우는 위의 식 전개와 마찬가지로 방법에 의해, 식(43)으로 나타낼 수 있다.

$$N_d^* = \sum_{v=0}^{T_v} \frac{\psi^*}{p_d} (\alpha_v v p_v + \alpha_d p_d (b_d - 1)) \times \prod_v(v) \quad (43)$$

식(42)와 식(43)을 살펴보면 이상적인 확산 이득은 $(\alpha_v v \tau_{v,d} (R_v/R_d) + \alpha_d (b_d - 1))$, $(\alpha_v v p_v + \alpha_d p_d (b_d - 1))$ 항에 의해 선형적인 증가를 보임을 알 수 있다. 이것은 다중 접속 간섭에 의해 선형적으로 증가함을 의미하는 것이다. 물론 위 식들에서 배경잡음은 무시되었다.

그러므로, 동적 확산 이득 제어 방법은 식(42)과 (43)을 이용하여 증가하는 사용자 수에 따라 동적으로 확산 이득을 정해주는 방법이다. 즉, 결과적으로 다중 접속 간섭의 크기에 따라 다양한 정보 전송률을 갖는 데이터 트래픽 중에서 서비스 가능한 데이터의 형태를 결정할 수 있다.

V. 수치해석 및 결과분석

본 논문에서 고려되는 시스템의 파라미터는 표1과 같으며, 변조방식을 DPSK로 고려하여 수치해석을 시행하였다. 또한, 주파수 재사용 효율은 1로 가정하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 파라미터

파라미터	크기
코딩율 (r)	1/2
칩 비율 (R_c)	3.84 Mcps
$1/\lambda$	1.5 sec.
$1/\mu$	1 sec.
음성 활성화도 (α_v)	3/8
데이터 활성화도 (α_d)	1
주파수 재사용 효율 (F)	1
시스템 신뢰도 (β %)	99 %
변조방식	DPSK
데이터 패킷 길이 (L)	640 bits

그림 2와 그림 3에서 알 수 있듯이, 데이터 서비스의 최대 효율은 데이터 전송 허용 확률 q 가 1인 경우에 최대 효율을 가지게 된다. 그리고, 그림 3의 경우는 불완전 전력제어를 고려한 경우로서 데이터 서비스의 수신 SIR 의 표준편차 σ_{sd} 를 1 dB로 고려한 경우이다. 그림 2에서 $q=1$ 인 경우 최대 데이터 서비스 효율은 426kbps를 나타낸다. 그러나 그림 3의 $q=1$ 인 경우 최대 데이터 서비스 효율은 약 209kbps

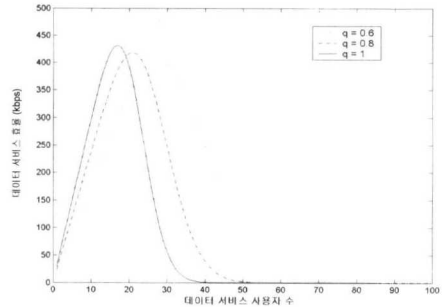


그림 2. 다양한 전송 허용 확률에서 데이터 서비스 사용자 수에 따른 데이터 서비스 효율 (완전 전력 제어, $N_d = 64$, $T_v = 10$)

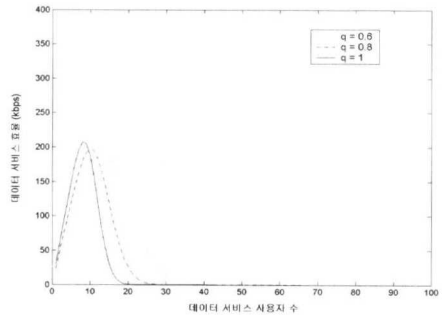


그림 3. 다양한 전송 허용 확률에서 데이터 서비스 사용자 수에 따른 데이터 서비스 효율 (불완전 전력 제어 $\sigma_{sd} = 1$ dB, $N_d = 64$, $T_v = 10$)

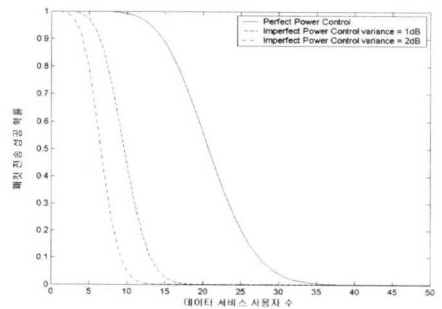


그림 4. 데이터 서비스 사용자 수에 따른 패킷 전송 성공 확률($N_d = 64$, $T_v = 10$)

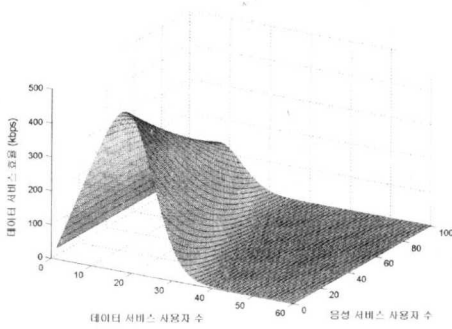


그림 5. 음성 사용자 수와 데이터 사용자 수의 변화에 따른 데이터 서비스 효율(완전 전력 제어)

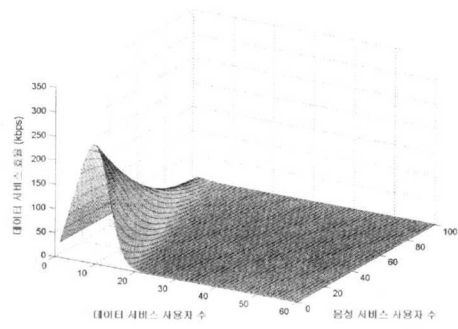


그림 6. 음성 사용자 수와 데이터 사용자 수의 변화에 따른 데이터 서비스 효율(불완전 전력 제어 $\sigma_{xd} = 1\text{dB}$)

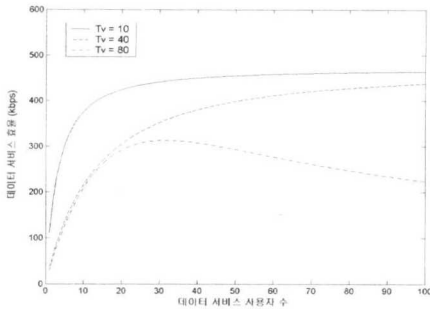


그림 7. 동적 확산 이득 제어에 의한 이상적인 데이터 서비스 효율(완전 전력 제어)

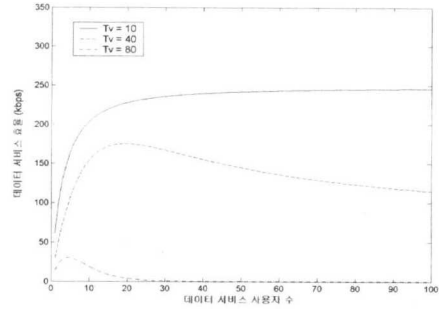


그림 8. 동적 확산 이득 제어에 의한 이상적인 데이터 서비스 효율(불완전 전력 제어 $\sigma_{xd} = 1\text{ dB}$)

가 된다. 이것은 식(24)에서 보이는 불완전 전력에 의한 오류항의 영향으로 표준편차 $\sigma_{xd}=1\text{ dB}$ 일 때 식(25)에 의해서 완전 전력제어의 SIR의 약 0.482배, 약 1.7dB의 감쇄를 보인다. 이로 인해 그림 4에서 알 수 있듯이 패킷 전송 성공 확률이 매우 낮아지게 된다. 결과적으로, 식(27)에서 나타내는 데이터 서비스의 효율이 낮아지게 된다. 또한 허용 가능한 (최소 효율) 데이터 서비스의 사용자 수도 패킷 전송 성공 확률이 낮아지는 만큼 매우 작아짐을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6은 데이터 서비스 사용자 수와 음성 서비스 사용자 수를 변화시킬 때의 데이터 서비스 효율이다. 음성 사용자의 수가 증가함에 따라 그에 따른 다중 접속 간섭이 증가하고, 이로 인해 데이터 서비스의 패킷 전송 성공 확률이 감소하게 된다. 그러므로 음성 서비스 사용자 수가 증가함에 따라 데이터 서비스의 최대 효율 값이 감소하게 되고, 수용할 수 있는 데이터 서비스 사용자의 수도 감소하게 됨을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8에서는 다양한 음성 서비스 사용자 수 (T_v)를 고려한 경우로서, 식(42)과 식(43)을 이용하여 얻은 데이터 서비스 효율을 최대로 하는 확산 이득을 데이터 서비스 사용자 수의 증가에 따라 동적으로 할당한 경우의 데이터 서비스 효율을 나타낸다.

음성 사용자 수가 10명인 경우에는 데이터 서비스 효율을 거의 최대값에 유지시킬 수 있었다. 그러나, 음성 사용자 수가 크게 증가했을 경우, 동적으로 확산 이득 제어를 했음에도 불구하고, 데이터 서비스 효율이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 즉, 그림 4를 보면 불완전 전력 제어에 의해 수신 SIR이 감소하면, 패킷 전송 성공 확률이 매우 낮아진다. 이와 같은 효과로 음성 사용자 수가 많이 증가하면 그 만큼 다중 접속 간섭이 증가함으로 수신 SIR은 감소하게 되고, 패킷 전송 성공확률이 감소하게 된다. 음성 사용자 수가 클수록 패킷 전송 성공 확률은 더욱 급격히 감소하기 때문에 동적 확산 이득 제어를 사용한

경우의 이상적인 데이터 서비스 효율도 음성 서비스 사용자 수가 크게 증가함에 따라 크게 감소함을 볼 수 있다.

또한, 그림 8과 같이 불완전 전력제어를 고려한 경우에는 수신 SIR이 불완전 전력 제어에 의한 오류에 의해 감소함으로써 음성 사용자 수에 더 크게 영향을 받게 됨을 볼 수 있다. 즉, 불완전 전력제어를 고려한 경우가 완전 전력제어를 가정한 경우보다 다중 접속 간섭에 민감한 형태를 나타낸다.

VI. 결론

본 논문에서는 음성과 데이터의 두 가지 형태의 트래픽 서비스를 지원하는 DS-CDMA 시스템에 관하여 고려하였다. 데이터 서비스의 효율을 최대하기 위한 동적 확산 이득 제어에 관한 연구로서 완전한 전력 제어를 가정한 경우와 불완전한 전력 제어를 고려한 경우, 각각에 관하여 데이터 서비스의 효율과 이상적인 확산 이득을 수치해석을 통해 비교 분석해 보았다. 또한 동적 확산 이득 제어를 통한 이상적인 데이터 서비스 효율에 관해 분석하였다. 이상적인 확산 이득은 식(42)와 식(43)에 의해 다중 접속 간섭에 선형적으로 비례함을 알 수 있었고, 불완전한 전력제어를 고려했을 경우에는 수신 SIR의 표준편차 σ_{x_d} 와 시스템 신뢰도 β_d 에 의한 오류 항 식(24)에 의해 수신 SIR이 감소하게 되고, 이로 인해 패킷 전송 성공 확률 $P_s(SIR)$ 이 감소한다. 결국, 데이터 서비스의 효율은 완전 전력제어를 가정한 경우에 비해 감소하게 된다.

데이터 서비스 효율은 일정 사용자 수까지는 증가하다가 그 이상이 되어 패킷 전송 성공 확률이 절반 이하로 내려가게 되면, 전체적인 데이터 서비스 효율이 감소하게 된다. 그러나, 음성 사용자의 수가 매우 크게 되면 이에 따른 다중 접속 간섭에 의해 데이터 서비스 효율을 최적의 상태로 유지하기 어렵고, 성능이 저하됨을 알 수 있다. 이는 다중 접속 간섭이 커짐에 따라 패킷 전송 성공 확률이 큰 기울기로 감소하기 때문에, 단순한 데이터 서비스의 동적 확산 이득 제어만으로 최적의 효율을 유지하기 어렵다는 것을 나타낸다. 즉, 동적 확산 이득 제어뿐 아니라, 효과적인 호 수락 제어 등을 동반하여 동적 확산 이득제어로서 나타낼 수 있는 최대의 서비스 효율을 유지할 수 있도록 사용자의 수를 조정하면 더욱 향상된 서비스 효율을 나타낼 수 있다. 동적 확산 이득

제어를 이용하여 최적의 데이터 서비스 효율을 나타내는 경우에도 불완전 전력을 고려한 경우가 완전 전력 제어를 가정한 경우에 비해 그 값이 현저히 감소함을 알 수 있다, 그러므로 완전 전력 제어를 구현하기 어려운 실제 시스템에서, 다양한 멀티미디어 서비스를 지원하고, 그 효율을 높이기 위해서는 각 사용자의 수신 전력 편차를 가능한 줄일 수 있도록 더욱 정밀한 전력 제어 알고리즘을 필요로 하게 된다.

참고 문헌

- [1] Ashwin Sampath and Jack M. Holtzman, "Access Control of Data in Integrated Voice/Data CDMA Systems: Benefits and Tradeoffs," IEEE Journal Select. Areas Commun., vol. 15, no. 8, pp. 1511-1526, Oct. 1997.
- [2] Insoo Koo, Jeongrok Yang and Kiseon Kim, "Analysis of Erlang Capacity for Voice/Data DS-CDMA Systems with the Limited Number of Channel Elements," IEICE Trans. Commun. vol. E84-B, no. 3, pp. 527-538, Mar. 2001.
- [3] Joon Bae Kim and Michael L. Honig, "Resource Allocation for Multiple Classes of DS-CDMA Traffic," IEEE Trans. on Vehicular Tech. vol. 49, no. 2, pp. 506-519, Mar. 2000.
- [4] M. Soroushnelhad and E. Geraniotis, "Multi-access Strategies for an Integrated Voice/Data CDMA packet radio network," IEEE Trans. on Commun. vol. 43, no. 2/3/4, pp. 934-945, 1995.
- [5] I. Koo, H. Seo, A. Ahmad and K. Kim, "A generalized capacity formula for the multimedia DS-CDMA system," Proc. APCC'97, pp.46-50, 1997.
- [6] Seong-Jun Oh and Kimberly M. Wasserman, "Dynamic Spreading Gain Control in Multiservice CDMA networks," IEEE Journal Select. Areas Commun., vol. 17, no. 5, pp. 918-927, May. 1999.
- [7] Sirikiat Ariyavisitakul and Li Fung Chang, "Signal and Interference Statistics of a CDMA system with Feedback Power Control," IEEE Trans. on Commun. vol. 41, no. 11, pp. 1626-1634, Nov. 1993.
- [8] W. M. Tam and F. C. M. Lau, "Analysis of Imperfect Power Control in CDMA Cellular Systems," Proc. PIMRC'97, vol. 3, pp. 892-897, 1997.

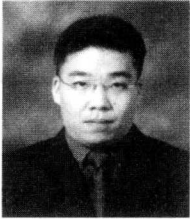
[9] Qiang Wu, Wei-Ling Wu and Jiong-Pan Zhou, "Effects of Slow Fading SIR Errors on CDMA Capacity," Vehicular Technology Conference, vol. 3, pp, 2215-2217, 1997.

[10] 김성륜, 한영남, "차세대 DS-CDMA 이동통신 시스템에서의 무선 자원 관리," Telecommunication Review, 제10권 4호, pp. 652-661, 7-8월 2000.

2000년 3월~2002년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원 원장
 2002년 1월 ~ 현재 : 통신학회 부회장
 <주관심 분야> 위성 및 이동 통신, 멀티미디어 통신

조 성 우(Sung-woo Cho)

준회원



2000년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
 2002년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사 졸업
 2002년 3월 ~ 현재 : 삼성전자 연구원

<주관심 분야> 디지털통신, CDMA, IMT-2000

김 백 현(Baek-hyun Kim)

준회원



1994년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
 1996년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사 졸업
 1996년 3월~현재 : 인하대학교 전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 이동통신, 위성통신, 전력제어

곽 경 섭(Kyung-Sup Kwak)

정회원



1977년 2월 : 인하대학교 전기공학과 학사 졸업
 1979년 2월 : 인하대학교 전기공학과 석사 졸업
 1981년 12월 : 미국 University of Southern California 전자공학과 석사졸업

1988년 2월 : 미국 University of Southern California 통신이론 및 시스템 박사
 1988년 2월~1989년 2월 : 미국 Hughes Network Systems 연구원
 1989년 2월~3월 : 미국 IBM Network Analysis Center 연구원
 1995년 1월~12월 : IEEE Seoul Section 총무 이사