

## 퍼지 논리를 이용한 온라인 자기동조기능을 갖는 CDMA 셀룰러 시스템용 PID 전력제어기

### On-line self-tuning PID power controller using fuzzy logic for CDMA cellular systems

°김상민\*, 한진욱\*, 이창구\*, 김성중\*

\*전북대학교 전기·전자·제어공학부(Tel:0652-70-2476; Fax: 0652-70-2451; E-mail: adama@icrn.chonbuk.ac.kr)

**Abstracts** This paper applies fuzzy self-tuning PID controller in DS/CDMA cellular system. Power control is essential in DS/CDMA to compensate for the differing received powers due to both the slowly varying long-term and fast varying short-term fading processes and co-channel interference. The controller proposed is adaptable for the variations of the system dynamics and especially for the variable time delay which exists in mobile radio systems. Accordingly the results is the smaller power control error, that is, the smaller average transmitting power of mobile compared with the conventional control schemes. Because interferences to the other mobiles are reduced, the capacity of CDMA can be increased.

**Keywords** DS/CDMA, self-tuning PID controller, reverse link power control, fading, interference

#### 1. 서론

새로이 개발되어 현재 서비스되고 있는 CDMA 셀룰러 시스템은 기존의 TDMA나 FDMA의 대역제한(band-limited)시스템과는 달리 간섭제한(interference-limited)시스템이다. 기존의 방식(TDMA, FDMA)은 전체대역(시간슬롯, 주파수)을 여러개의 좁은 대역으로 분할하여 채널을 할당한다. CDMA방식은 모든 사용자가 전체대역을 공유하고 각 사용자에게 개별적으로 코드를 할당하기 때문에 다른 사용자신호에 의한 간섭잡음에 의하여 성능이 제한된다. 그러므로 최대한의 사용자에게 서비스를 제공하기 위해서는 각 사용자간의 전력을 서비스에서 요구되어지는 최소한의 양으로 제어함으로써 원·근간의 문제(near-far problem)를 해결해야 한다. 이외에도 기지국과 이동국간의 전송경로를 막고 있는 구조물로 인한 느린 전력 감쇄현상(shadowing), 송신신호의 반사와 이동국의 속도에 따른 fading 현상(multipath fading)을 해결할 필요가 있다. 이를 위해 CDMA에서는 일정한 간격으로 전력제어를 수행하게 되는데, 완벽한 전력제어가 이루어지면 기존 아날로그 방식에 비해 20배 가량의 용량증가를 기대할 수 있다 [1].

초기에는 원·근간문제와 shadowing효과를 제거하기 위해 평균전력 제어방법 [2]이 시도되었으나, 빠르게 변하는 multipath fading의 영향을 받아 전력제어 오차가 발생하고, 이로 인해 평균신호와 간섭 레벨이 천천히 요동하게 되는 현상이 발생했다. 이 문제를 해결하기 위해 multipath fading의 최대감쇄율보다 10배 이상 빠르게 전력 증·감명령을 updating하는 fixed-step power control [2]이 제안되었다. 사용자의 송신전력은 과거에 결정된 전력증가분들의 합으로 결정되었기 때문에 적분(integral)제어기와 거의 비슷했다. Viterbi와 그 동료들은 똑같은 개념을 그들의 power control 방법에 적용했는데, 전력증가분이 bang-bang 제어법칙과 같은 방법에 의해 결정되었다 [3]. 불행히도 적분제어기는 적분기 자체가 불안정한 것이기 때문에 시스템을 불안정하게 할 가능성이 있었다 [4]. 게다가 bang-bang 제어기는

modeling error와 noise가 생길 경우 큰 과도응답과 긴 지연시간, 커다란 정상상태 오차 등의 문제가 발생한다. Chang은 앞서 열거한 적분제어와 뱅뱅제어의 단점을 보완하기 위해 FLC(fuzzy logic controller)를 도입하였다 [5]. Chang이 제안한 Fuzzy PI제어기는 궁극적으로 PI제어기와 비슷한 구조를 가져, 비례(proportional) 항은 과도응답특성을 개선하여 시스템의 불안정성을 제거하는 한편, 적분(integral) 항은 정상상태오차를 zero에 가깝게 줄여주는 역할을 한다. 그러나, Fuzzy 제어기는 시스템의 변화(환경에 따른 채널의 동특성 변화와 특히 이동통신 시스템에 필연적으로 존재하는 가변적인 time delay에 적응성을 갖지 못하고 있다. 제안한 온라인 자기동조 PID제어기 [8]는 기존의 PID 제어 알고리즘에 Fuzzy논리를 이용한 PID동조기능을 제공하도록 한 것으로서 시스템의 변화에 잘 적응하도록 하였다.

본 논문에서는 기존의 방법과 제안한 방법을 함께 시뮬레이션해서 각각의 응답파형과 전력제어오차를 비교하였다.

#### 2. Fuzzy 자기동조 PID제어기

그림 1. 은 fuzzy 자기동조 PID제어기를 이용한 CDMA 셀룰러 시스템의 전력제어 구성도이다.

제안한 자기동조 PID제어기는 그림 2. 에서와 같이 일반 PID제어기와 릴레이에 의하여 페루우프를 구성하고, 여기에 fuzzy 자기동조기능을 연결하여 제어오차와 오차의 변화량에 따라 PID제어계수를 실시간으로 동조하여 온라인 자동동조하도록 했다. 그리고 감속자층을 두어 fuzzy 자기동조기와 릴레이 제어의 모니터링에 의한 스위칭, 릴레이 제어에 필요한 규칙 및 정보분류를 담당하도록 했다. 따라서, 제어행위는 다음의 두단계로 나뉘어 수행되어진다.

- (1) 릴레이 전환에 의한 초기동조
- (2) 퍼지규칙기반에 의한 자기동조

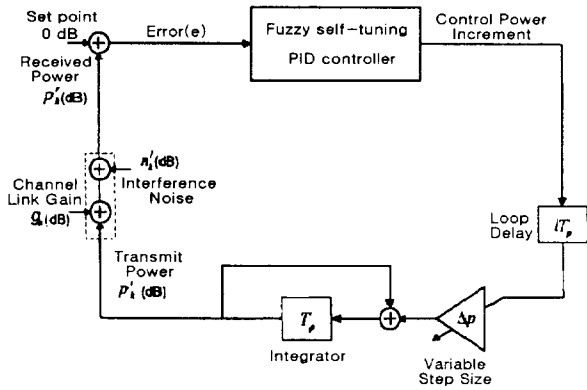


그림 1. 퍼지 자기동조 PID제어기를 이용한 역방향 폐쇄루프 전력제어

Fig 1. Reverse-link closed-loop power control using fuzzy self-tuning PID controller

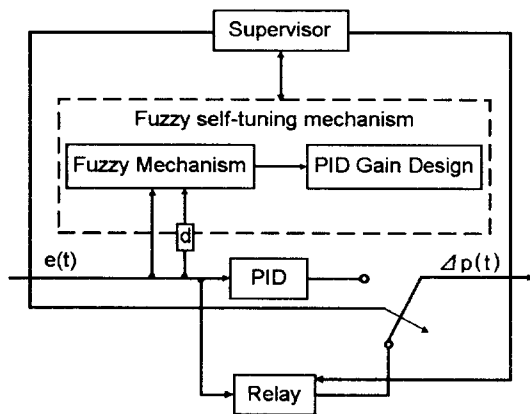


그림 2. 퍼지 자기동조 PID제어기의 블록도

Fig 2. Block diagram of fuzzy self-tuning PID controller

### 2.1 PID제어기의 기본구조

제어대상이 단위입출력 시스템이라면 이에 대한 표준 PID제어기는

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.1)$$

와 같이 표현한다. 위에서  $u(t)$ 는 제어신호,  $e(t)$ 는 제어오차로 기준입력과 출력의 편차이고,  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 는 PID이득으로서 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간이라 칭한다. 식 (2.1)은 2차시스템이나 지연시간이 작은 시스템에는 적합하나 1차시스템이나 지연시간이 비교적 큰 시스템에는  $T_d = 0$ 인 PI제어기가 더욱 바람직스럽다.

동조란 이러한 제어이득을 공정변화(즉, 시스템의 동특성 변화)에 따라 적절히 조절하여 좋은 제어성능을 얻는 것을 말한다. 본 논문에서 제어하고자 하는 CDMA 셀룰러 시스템의 수신전력 신호의 일반적인 유형은 그림 3과 같다. 여기에서 I영역과 II영역의 곡선은 2차계의 step 응답으로 모델링할 수 있으며, III영역의 곡선은 아랫방향의 깊은 감쇄를 보인다. 또한 셀룰러 시스템은 시간지연이 변화가 심한 공정이다. 이러한 사항들을 고려하여 다음과 같은 동조식을 만들 수 있다. 여기서  $\alpha$ 는 동조계수로써 오차의 크기와 변화량에 따라 자동조정된다.

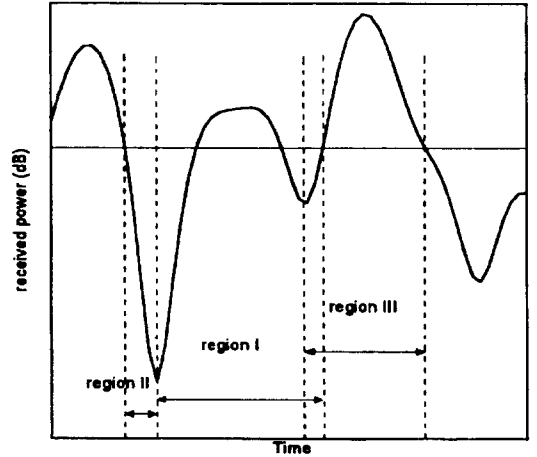


그림 3. 전형적인 감쇄 전력신호

Fig 3. A typical fading power signal

지연시간이 작은 경우:

$$K = 1.2k_c, T_i = 0.75t_c/(1 + \alpha), T_d = 0.25T, \quad (2.2)$$

지연시간이 큰 경우:

$$K = 0.5k_c, T_i = 0.38t_c/(1 + \alpha), T_d = 0 \quad (2.3)$$

깊은 감쇄가 생길 경우:

$$K = k_c, T_i = 0.96t_c/(1 + \alpha), T_d = 0 \quad (2.4)$$

초기동조구간에서는 임계값과 함께 공정의 동특성에 따른 제어기의 구조를 선정하고  $\alpha$ 값을 0.5로 하고, 온라인 동조구간에서는 제어오차와 오차의 변화량에 따라 퍼지 자기동조 메카니즘에 의하여  $\alpha$ 를 온라인으로 조정하므로써 PID이득을 자동동조한다.

### 2.2 릴레이 변환에 의한 초기동조

초기동조시에는 먼저 릴레이 변환을 형성하고 출력신호의 주기, 즉, 임계주기( $t_c$ )를 측정하고, 릴레이이득( $d$ )과 첨두치값( $a$ )을 측정하여 식 (2.5)에 의하여 임계이득( $k_c$ )을 구한다. 그리고, 이 값에 따라 공정을 분류하고 각각의 동조식(2.2)-(2.4)에 의해 PID 제어이득을 결정한다.

$$k_c = 4d/\pi a \quad (2.5)$$

각 공정은 다음과 같은 모델분류 규칙에 의하여 분류되어 그에 따른 최적의 동조규칙이 적용된다 [9][10].

$$\begin{aligned} & \text{if } (\tau < 0.07t_c) \\ & \text{then 1차시스템} \\ & \text{else if } (|G(i\omega - 90)| = |G(i\omega - 180)|) \\ & \text{and } (\omega - 180 = 2\omega - 90) \\ & \text{then 1차지연시스템} \\ & \text{else 2차시스템} \end{aligned} \quad (2.6)$$

공정이 1차지연시스템으로 분류되었을 경우는 다음식 (2.7)에 의하여 지연시간이 큰 시스템과 그렇지 않은 시스템으로 세분하여 각각 적절한 동조규칙을 적용한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } (\tau > t_c/4) \\ & \text{then지연시간이큰시스템} \end{aligned} \quad (2.7)$$

### 2.3 퍼지 자기동조 메카니즘

퍼지 자기동조 메카니즘은  $e$ 와  $\Delta e$ 이 주어졌을 때,  $\alpha(t)$  값을 산출하는 퍼지논리 메카니즘과 식 (2.2)-(2.4)를 이용하여 PID이득을 설계하는 PID이득 설계구간으로 구성된다. 여기서 퍼지논리 메카니즘은 퍼지논리부와  $\alpha(t)$ 의 연산부로 나뉘어진다.

### 2.3.1 퍼지논리부

이 부분은 Chang [5]이 제안한 fuzzy PI 제어를 응용한 것으로 입력변수는 오차(e(t))와 오차의 변화량(Δe(t))으로 하고, 출력변수는 전력증가분(Δp(t))으로 정하였다. 각 입력출력변수에 대한 언어변수(linguistic variables)는 LP(large positive), MP(medium positive), SP(small positive), ZE(zero), SN(small negative), MN(medium negative), LN(large negative)의 7개 용어 집합(term set)으로 정의하였다. 그리고, 입출력변수에 대한 전체집합(universe of discourse)은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E &= \{e \mid -18dB \leq e \leq 18dB\} \\ \Delta E &= \{\Delta e \mid -12dB \leq \Delta e \leq 12dB\} \\ \Delta P &= \{\Delta p \mid -18dB \leq \Delta p \leq 18dB\} \end{aligned}$$

추론의 합성법칙은 최대-최소(max-min) 합성규칙을 이용하였고, 비퍼지화는 무게중심법(COG)을 이용하였다.

### 2.3.2 α(t)의 update

앞절의 Δp(t)를 이용하여 α를 갱신하기 위한 개념은 다음과 같다. 먼저 오차의 크기 |e(t)|가 증가하는 경우와 감소하는 경우로 나누어서 |e(t)|가 증가할 경우에는 α를 감소시켜 오차의 증가를 억제하고, |e(t)|가 감소할 경우에는 α를 증가시켜 오차의 감소를 가속시킨다. 이것은 식 (2.8)로 표현된 Δp(t)의 부호 조절 규칙과 식 (2.9)에 의하여 α(t)를 갱신한다.

$$\begin{aligned} \text{if}(E * \Delta E < 0) \\ h(t) &= |h(t)| \\ \text{else} \\ h(t) &= -|h(t)| \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)(1 - \alpha(t)), \text{ for } \alpha(t) > 0.5 \\ \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)\alpha(t), \text{ for } \alpha(t) \leq 0.5 \end{aligned} \quad (2.9)$$

식 (3.6)에서 α(0)=0.5로 정한다. 이 식에 의한 α(t)의 증가는 K를 증가시키고  $T_i, T_o$ 를 감소시켜 오차가 빠르게 수렴하도록 하는 반면 α(t)의 감소는 K를 감소시키고  $T_i, T_o$ 를 증가시켜 발산을 더디게 한다. 또한 α(t)의 값을 0~1사이로 한정하여 PID 제어계수가 완만하고 한정된 적응성을 갖도록 하였다.

## 3. 시스템 모델

그림 1에서 보는 바와 같이 이동기에서 송신한 신호는 채널을 통과하여 기지국의 수신단에 도착하게 된다. 이러한 채널의 특성에 따라서 여러가지 분석 방법이 달라지게 되므로 이를 정의할 필요가 있다.

기지국 수신전력 Pr (W)은

$$P_r = G \cdot P_t \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 Pt는 이동국 송신전력이고, G는 channel link gain이며 다음과 같이 정의한다.

$$G = L \cdot S \quad (2)$$

여기서 L과 S는 각각 long-term과 short-term fading 이다.

(1)식을 dB단위로 표현하면

$$p_r = g + p_t \text{ (dB)} \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있다.

L은 주로 이동국과 기지국사이의 지형이나 인간이 만든 환경에 의해 야기되는 신호의 감쇄를 나타내며

$$L = r^{-\alpha} \cdot 10^{\xi/10} \quad (4)$$

과 같이 표현한다. r은 기지국과 이동국사이 거리이고, α는 경로 손실 지수이며, 일반적으로 ξ는 평균이 0이고 표준편차가 8 dB 인 Gaussian 랜덤변수이다.

S는 신호의 반사와 이동국 속도에 의해 발생하는 다중경로 감쇄(multipath fading)를 나타내며, 본 논문에서는 경로수가 4인 레일리 페이딩(Rayleigh fading)으로 모델링하였다.

한편 동일 셀 내에 k-1 개의 독립적인 이동국으로부터 받은 다중역세스 간섭전력  $P_I$ 는 각 간섭전력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_I = \sum_{i=0}^{k-1} P_i \quad (6)$$

여기서 Pi는 i번째 이동국으로부터 기지국이 수신한 전력이다. 실제 측정 결과 수신전력의 표준편차가 4 dB 미만 [6]이므로 Fenton이 계산한 결과를 이용하면, k-1개의 간섭 이동국으로부터 수신된 전력의 표준편차  $\sigma_I(k-1)$  및 평균값  $m_I(k-1)$ 은 각각 다음 식과 같이 주어진다 [7].

$$\sigma_L(k-1) = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{k-1} \exp \sigma^2 + \frac{k-2}{k-1}\right)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m_I(k-1) &= \ln(k-1) + m_d + \frac{\sigma^2}{2} \\ &\quad - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{k-2}{k-1} + \frac{1}{k-1} \exp \sigma^2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

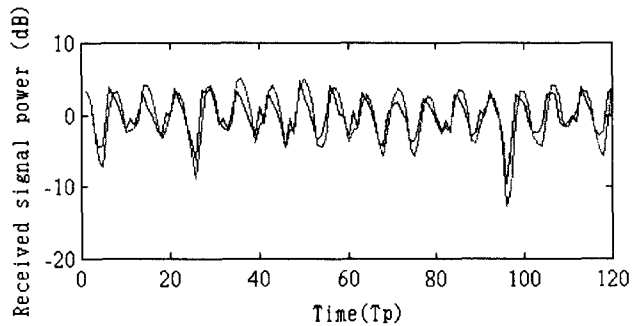


그림 4. 자기동조 PID제어와 fuzzy 제어에 의해 얻어진 수신전력 신호의 비교 ( $l=1, f_D T_p=0.1$ )

Fig 4. Comparison of the received power signals achieved by self-tuning PID control and fuzzy control ( $l=1, f_D T_p=0.1$ )

## 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 다이버시티 방법으로 선택 다이버시티 (Selection diversity)를 사용하였고, 결과 중에서 전력제어 오차 (power control error)는 수신 SIR 값의 표준편차 값을 의미한다.

시뮬레이션에 사용된 파라메타값들은 다음과 같다. 반송파는 850 MHz, 전력제어 명령주기( $T_p$ )는 1.25 ms, 사용 주파수대역은 1.5 MHz, 처리이득 PG는 22 dB, 필요한  $E_b/N_o$  값은 7 dB, PG와 필요한  $E_b/N_o$  값을 이용하면 필요한 SIR의 임계값은 -15 dB 이다. 레일리 페이딩 채널의 경로수는 4일 경우를 생각하였다. long-term fading의 α는 4, ξ의 표준편차는 8 dB로 가정하였다. short-term fading에 대해  $f_D T_p$ 는 0.01과 0.1사이에 분포한다고 가정하였다 ( $f_D$ 는 Doppler shift라고 한다).

그림 4는 시간지연  $l=1$ , 이동국수  $k=10$ ,  $f_D T_p=0.1$ 일 때의 자기동조 PID제어와 fuzzy 제어를 이용한 수신전력의 파형을 비교한 것이다. 두 파형을 비교해 보면 자기동조 PID제어를 이용한 경우가 overshoot가 작고 rise time이 짧은 편이다.

그림 5와 그림 6은 각각 지연시간이 0.5, 1인 경우의 속도에 따른 전력제어 오차를 비교한 것이다. 그림에서 보면 이동국의 속도가 증가할수록 전력제어오차간의 간격이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 즉, 속도가 높아질 수록 자기동조 PID를 이용한 제어가 다른 것들에 비해 더 좋은 성능을 나타내며, 속도가 50 km/s를 지나면서 fuzzy 제어를 이용한 경우보다 속도증가에 따른 오차의 증가율이 더 작은 것을 볼 수 있다.

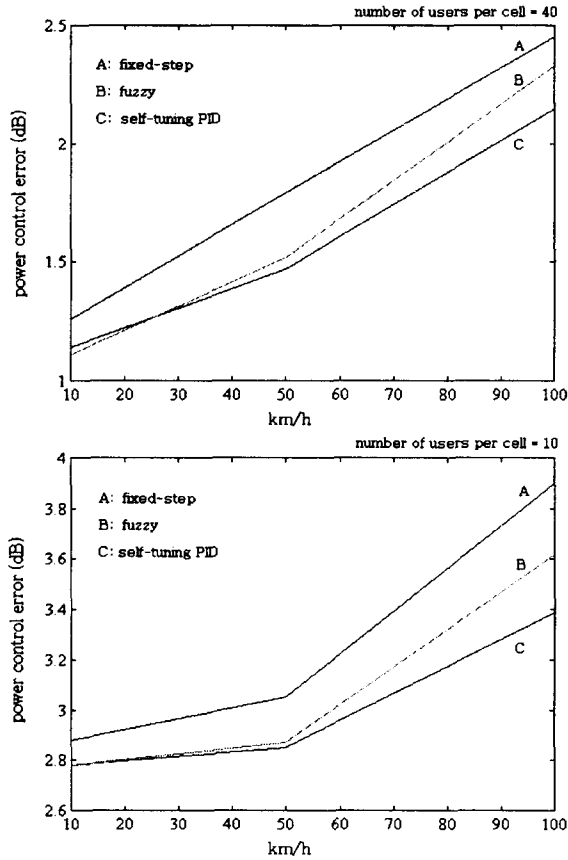


그림 5. 지연시간  $l=0.5$  일때의 이동국 속도에 따른 전력제어 오차

Fig 2. Power control errors against mobile velocity when delay time  $l = 0.5$

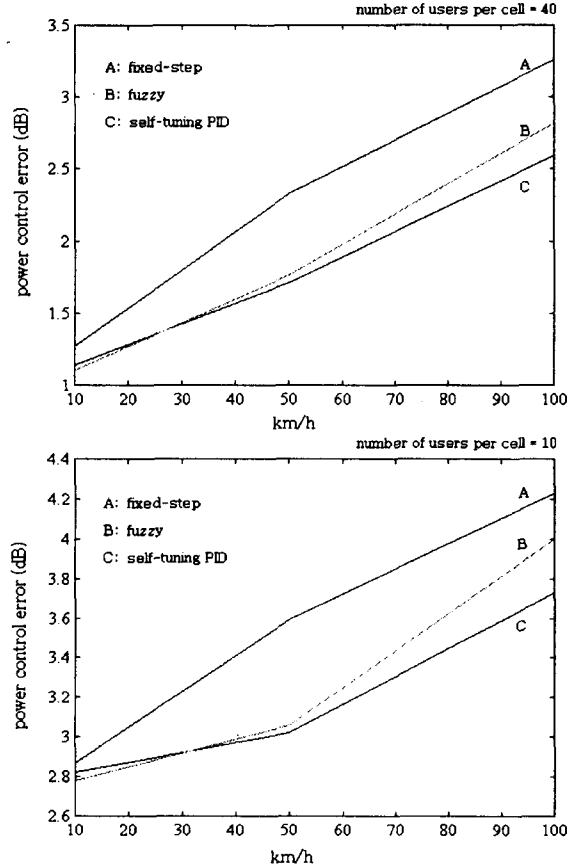


그림 6. 지연시간  $l=1$  일 때의 이동국 속도에 따른 전력제어오차 비교

Fig 3. Power control errors against mobile velocity when delay time  $l=1$

## 5. 결론

본 논문에서는 퍼지논리 메카니즘에 의해 제어이득이 자동으로 동조되는 PID제어기를 소개하였다. 기존의 방식이 공정의 변화(즉, 이동국 속도에 따른 fading율의 변화)에 잘 적응하지 못하는 반면, 제안한 제어기는 공정의 변화에 적절히 적응하고 있는 것으로 나타났다. 시뮬레이션에서 지연시간을 전력제어 updating 주기만큼으로 가정했을 때의 응답특성과 전력제어오차를 분석해 보았는데, 그 결과 제안한 제어기가 기존 방식에 비해 빠른 rise time, 작은 overshoot를 가지며, fuzzy제어와 비교하여 10% 이상의 성능향상을 보이고 있는 것으로 나타났다. 앞으로 지연시간의 다양한 변화에 따른 제어이득의 조정문제를 계속 연구하여 더 나은 제어성능을 도출해 내고자 한다.

## 참고문헌

[1] K. S. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, A. Viterbi, L. Weaver, and C. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, pp. 303-312, 1991

[2] S. Ariyavisitakul and L. F. Chang, "Signal and interference statistics of a CDMA system with feedback power control,"

*IEEE Trans. Communi.*, vol.41, no.11, 1993.

[3] A. J. Viterbi, A. Viterbi, and E. Zehavi, "Performance of power controlled wideband terrestrial digital communication," *IEEE Trans. Communi.*, vol.41, pp. 559-569, 1993.

[4] C. L. Philips and H. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984.

[5] P. R. Chang and B. Wang, "Adaptive fuzzy power control for CDMA mobile radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.45, n1.2, pp. 225-236 1996.

[6] A.M.Viterbi and A. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," *IEEE J. Select. Areas Communi.*, vol.11, pp.892-899, 1993

[7] L.F. Fenton, "The sum of log-normal probability distribution in scatter transmission systems," *IRE Trans. on Communi., System*, vol.C5-8, pp.57-67, 1960.

[8] 이창구, 김성중, "Fuzzy 논리를 이용한 온라인 자기동조 PID 제어기 개발," 대한전기학회 논문지, 제 43 권, pp. 1938-1945, 1994.

[9] 이창구의 2인, "경험적 규칙을 이용한 자동동조 PID제어기," 전기학회 논문지, vol.39, no.5, pp.485-493,1990.

[10] 이창구, 김성중, "규칙기반 자동동조 PID제어기에 관한 연구," 전기학회논문지, vol.40, no.11, pp.1161-1168, 1991.