

# cdma2000 1xEV-DO 시스템에서 개선된 역방향 트래픽 제어와 성능 분석

정회원 여운영\*

## An Enhanced Reverse-link Traffic Control and its Performance Analysis in cdma2000 1xEV-DO Systems

Woon-Young YEO\* *Regular Member*

요 약

cdma2000 1xEV-DO 시스템은 기지국이 전송하는 이진(binary) 정보와 간단한 확률모델에 의해 역방향 링크의 전송속도를 제어한다. 하지만, 이 트래픽 제어방식은 각 단말이 자율적으로 전송속도를 결정하기 때문에 역방향 링크를 효과적으로 제어하기 어렵고 역방향 링크의 안정성을 보장하기도 쉽지 않다. 본 논문에서는 역방향 링크의 안정성을 향상시키기 위하여 트래픽 부하에 따른 단계별 전송속도 제어방법을 제안하고, 이를 이산시간 마르코프 프로세스로 모델링하여 성능을 분석한다. 다양한 환경에서 실시한 분석 결과를 통해 제안한 방법이 기존의 방법과 비교하여 보다 높은 전송속도를 지원함을 확인할 수 있다. 더불어, 제안한 방식은 표준규격에서 정의한 물리계층 구조를 변경하지 않으므로 이미 구축되어 있는 1xEV-DO 시스템과 호환이 가능한 장점을 가진다.

**Key Words** : Traffic control, cdma2000 1xEV-DO, Performance analysis, Multiple access control

ABSTRACT

The cdma2000 1xEV-DO system controls the data rates of mobile terminals based on a binary overload indicator from the base station and a simple probabilistic model. However, this traffic control scheme has difficulty in controlling the reverse-link traffic load effectively and in guaranteeing a stable operation of the reverse link because each mobile terminal determines the next data rate autonomously. This paper proposes a new traffic control scheme to improve the system stability, and analyzes the proposed scheme by modeling it as a discrete-time Markov process. The numerical results show that the maximum data rate of the proposed scheme is much higher than that of the conventional one. Moreover, the proposed scheme does not modify the standard physical channel structure, so it is compatible to the existing 1xEV-DO system.

### I. 서 론

cdma2000 1xEV-DO(1x EVolution and Data Only) 시스템은 북미 지역의 이동통신 표준화 기구인 3GPP2(The Third Generation Partnership

Project 2)에서 제정한 제3세대 이동통신 시스템으로 동기식 IS-95 CDMA 방식을 기반으로 패킷 데이터의 전송에 최적화된 서비스를 제공하도록 설계되었다<sup>1,2)</sup>. 특히, 인터넷 서비스의 트래픽 특성을 고려하여 순방향 트래픽과 역방향 트래픽이 비대칭적

※ 본 연구는 2007년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

\* 세종대학교 정보통신공학과 이동통신시스템 연구실(wyyeo@sejong.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-03-130, 접수일자 : 2008년 3월 17일, 최종논문접수일자 : 2008년 8월 12일

으로 설계되었으며, 적응형 변조 및 코딩(adaptive modulation and coding), 혼합 재전송(hybrid automatic repeat request), 다중 사용자 다이버시티(multi-user diversity), 신속한 채널상태 피드백(fast channel feedback information) 등의 기술을 셀룰러 이동통신 표준규격에 최초로 적용하였다.

1xEV-DO 시스템은 순방향 트래픽 채널(forward traffic channel)로 최대 2.4Mbps까지 지원하고, 역방향 트래픽 채널(reverse traffic channel)로는 최대 153.6kbps까지 지원할 수 있다. 여기서 순방향 링크는 셀 내의 모든 단말들에 의해 공유되지만, 역방향 링크는 기존 CDMA 시스템과 같이 각 단말에게 하나씩 전용으로 할당된다는 점을 기억할 필요가 있다. 표준 규격상 역방향 링크의 전송속도는 단말당 153.6kbps까지 지원할 수 있지만, 실제로는 역방향 링크에 적용되는 트래픽 제어 메커니즘에 의해 전송속도는 적절한 수준에서 제어된다. 특히, TCP 트래픽을 지원하는 1xEV-DO 시스템의 순방향 링크 성능은 역방향 채널을 통한 ACK(acknowledgment)의 전송 능력에 따라 큰 차이를 보이고 있으며<sup>[3]</sup>, 최근에 소개되고 있는 다양한 P2P(point-to-point) 및 UCC(user created contents) 무선 데이터 서비스도 역방향 링크의 성능과 밀접한 관련이 있기 때문에 역방향 링크의 중요성은 점차 강조되는 추세라고 할 수 있다.

1xEV-DO 역방향 링크의 가장 큰 특징 중 하나는 각 단말이 독립적인 판단에 의하여 전송속도를 결정하는 것이다. 기지국은 역방향 링크의 부하(load)를 이진정보(binary information)의 형태로 모든 단말들에게 전송하고, 각 단말은 이 정보와 고유한 확률 모델을 바탕으로 역방향 전송속도를 자율적으로 조절하게 된다. 이러한 트래픽 제어 방식을 적용하면 역방향 링크의 부하는 특정한 임계값을 기준으로 오르내리는 특성을 보이게 된다<sup>[4,5]</sup>. 이때, 역방향 링크의 부하가 과도하게 높으면 CDMA 시스템의 특성상 간섭에 의한 성능저하를 초래할 수 있고, 과도하게 낮으면 불필요한 자원 낭비를 가져올 수 있기 때문에, 이러한 트래픽 부하의 변동을 줄이는 방안이 역방향 링크의 성능향상에서 매우 주요한 기술적 과제가 된다. 하지만, 역방향 링크의 부하 변동 폭은 시스템 파라미터와 환경적인 요인에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이를 예측하고 조절하는데 큰 어려움이 따른다. 이와 같은 현상을 설명하기 위하여, 1xEV-DO 역방향 링크에 대한 분석모델이 제안되고 각 시스템 파라미터가 역방향

링크의 성능에 미치는 영향이 분석되었다<sup>[6,7]</sup>. 또한, 불확실한 전송속도 조절 방식에 의해 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위하여, 단말의 차기 동작 정보를 기지국에 전송하고 이에 대한 승인을 받는 방법이 제안되었지만<sup>[8]</sup>, 이 방법은 역방향 링크의 채널 구조를 변경시켜야 하는 제약사항을 가지고 있었다. 본 논문에서는 기존의 물리채널 구조를 변경하지 않으면서 기존의 역방향 링크 부하를 효율적으로 조절할 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 전송속도가 급격하게 증가할 경우 역방향 링크의 불안정성이 심화될 수 있다는 점에 착안하여 단말의 전송속도를 차등적으로 증가시켜 시스템의 과부하율(overload probability)을 줄여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II절에서는 1xEV-DO 시스템의 채널 구조와 기존 역방향 링크의 전송속도 제어방식을 정리한다. III절에서는 기존 시스템의 문제점을 바탕으로 이를 해결할 수 있는 새로운 전송속도 제어방식을 제안하고, IV절에서는 제안한 시스템의 성능을 분석하기 위한 수학적 분석모델과 구체적인 분석방법을 설명한다. V절에서는 수치적 분석 결과를 바탕으로 제안한 방식과 기존 방식의 성능을 비교하고, VI절에서 제안한 방식의 특징을 정리하고 향후 연구계획에 대하여 고찰한다.

## II. 역방향 링크와 트래픽 제어

### 2.1 1xEV-DO 시스템의 채널 구조

1xEV-DO 시스템을 위한 순방향 및 역방향 링크의 채널구조를 각각 살펴보도록 한다. 순방향과 역방향 링크의 기본적인 전송 단위는 1.666ms(=2048 chips) 길이의 슬롯(slot)이고, 16개의 슬롯을 합쳐 하나의 프레임(frame)이 구성된다. 순방향 링크는 파일럿(pilot) 채널, MAC(media access control) 채널, 제어(control) 및 트래픽(traffic) 채널로 구성된다. 먼저, 파일럿 채널은 접속 초기의 시스템 획득(system acquisition)과 채널추정(channel estimation)에 사용된다. MAC 채널은 총 64개로 구성되는데, 단말의 동작을 제어하기 위한 정보를 전송한다. 각 MAC 채널은 슬롯당 1비트의 정보를 전송하고 Walsh 코드에 의해 채널이 구분된다. 64개의 MAC 채널들은 용도에 따라 1개의 역방향 활동(RA, reverse activity) 채널, 59 개의 역방향 전력 제어(RPC, reverse power control) 채널, 그리고 향후 기능 확장을 위한 4개의 예비채널로 구분된다.

RA 채널은 역방향 링크의 부하 수준 또는 활성화 정도를 나타내고, RPC 채널은 각 단말에 대한 역방향 링크의 송신 전력을 조절하기 위하여 사용된다. 제어 채널과 트래픽 채널은 각각 단말의 상위계층에서 발생하는 시그널링(signalling) 정보와 사용자 데이터를 전송한다. 참고로, 트래픽 채널은 무선채널의 상태에 따라 38.4kbps에서 2.4Mbps까지의 전송속도를 갖는다.

역방향 링크는 크게 접속(access) 채널과 트래픽(traffic) 채널로 구성된다. 접속채널은 단말이 기지국과의 통신을 개시하거나 호출신호에 대한 응답에 사용된다. 트래픽 채널은 사용자 데이터를 전송할 때 사용되는데, 각 단말에게 독립적인 트래픽 채널이 할당된다. 이 구조는 기존 IS-95 CDMA 시스템의 역방향 링크와 유사하며, 각 트래픽 채널에는 파일럿 정보가 포함되어 있기 때문에 역방향 링크에 대해서도 동기복조(coherent demodulation)를 지원할 수 있다.

역방향 트래픽 채널은 파일럿 채널, 역방향 전송속도 지시(RRI, reverse rate indicator) 채널, 속도 제어(DRC, data rate control) 채널, 응답(ACK, acknowledgement) 채널, 데이터(data) 채널로 구성되어 있다. 파일럿 채널은 기지국에서 각 단말에 대한 동기복조를 지원하고, RRI 채널은 단말이 송신하고 있는 데이터의 전송속도를 지시하여 기지국에서의 복조 과정을 돕는다. DRC 채널은 순방향 링크의 채널상태에 맞는 적절한 순방향 전송속도를 결정한 후 이 정보를 기지국에 알려주고, ACK 채널은 순방향 트래픽에 대한 전송성공 여부를 전송한다. 데이터 채널은 5가지의 전송속도를 가질 수 있는데, 전송속도에 따라 파일럿 채널 대비 적절한 이득(gain)을 갖는 전력으로 송신된다. 구체적으로 설명하면, 순방향 링크의 RPC 채널은 역방향 파일럿 채널의 송신전력을 조절하는데, 기지국에서 수신되는 파일럿 채널의 SINR(signal-to-interference ratio)을 일정하게 유지시킨다. 한편, 단말은 역방향 데이터 채널의 전송속도에 따라 파일럿 채널 대비 일정한 이득을 더하여 데이터 채널의 송신전력으로 사용한다. 표 1에 데이터 채널의 각 전송속도에 대한 파일럿 채널 대비 이득을 보였다<sup>11)</sup>. 표에서 볼 수 있듯이, 전송속도가 2배씩 증가할 때 마다 확산계수(spreading factor)의 감소를 보상하기 위해 채널 이득은 거의 2배(=3dB) 정도씩 높아지고 있음을 알 수 있다 (예외적으로, 153.6kbps는 높은 코딩율을 반영하여 약 4배의 이득을 가짐).

표 1. 데이터 채널 이득의 기본값

전송속도(kbps)	파일럿 채널 대비 데이터 채널 이득(dB)
9.6	3.75
19.2	6.75
38.4	9.75
76.8	13.25
153.6	18.50

## 2.2 역방향 링크의 전송속도 제어

1xEV-DO의 역방향 링크는 CDMA 기술을 사용하기 때문에, 기지국이 수신하는 역방향 링크의 부하가 너무 크면 신호 간 상호 간섭에 의해 시스템의 전반적인 성능이 낮아질 수 있다. 하지만, 너무 부하가 낮으면 그만큼 전송효율은 떨어지게 된다. 따라서 역방향 링크에서는 트래픽 부하를 일정한 수준 이상으로 유지시키는 동시에 과도한 수준을 넘지 않도록 제어할 필요가 있다. 이를 위해 1xEV-DO 기지국은 역방향 링크의 부하 수준을 지시하는 이진(binary) 정보인 RAB(reverse activity bit)를 RA 채널을 통해 모든 단말들에게 전송하고, 이를 수신한 단말은 매 프레임 단위로 고유한 확률 모델에 의해 전송속도를 결정한다.

기지국이 전송하는 RAB값은 구현하는 알고리즘에 따라 다를 수 있지만, 통상적으로 역방향 링크의 부하 수준을 임계값  $L_h$ 와 비교한 후 현재의 부하 수준이 이 임계값보다 작으면 0으로 설정하고 임계값보다 크면 1로 설정한다. 역방향 링크의 부하를 측정하기 위한 대상도 다양할 수 있지만, 보통 역방향 데이터 전송속도의 합, 평균 SINR, 평균 BLER(block error rate), 잡음 상승(noise rise) 등을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 기지국이 수신하는 데이터 전송속도의 합을 역방향 링크의 부하 기준으로 사용한다. 역방향 데이터 채널의 전송속도가 높아지면 송신전력이 증가하기 때문에 다른 단말 신호에 대한 간섭 영향이 증가할 수 있다는 점을 기억하자. 따라서 과도한 전송속도 증가에 의해 시스템의 성능이 저하되지 않도록 역방향 부하(=데이터 전송속도의 합)를 일정한 값 이하로 조절할 필요가 있다.

역방향 링크의 전송속도를 제어하는 RAB는 매우 중요한 정보이기 때문에 여러 슬롯에 걸쳐 반복적으로 전송된다. 표준 규격에 따르면 RAB는 RABLength라는 파라미터가 지시하는 슬롯 동안 연속적으로 전송되고, 하나의 슬롯 내에서도 4차례 반복되므로 실제 환경에서 RAB의 수신오류는 매우 낮다고 할 수 있다.

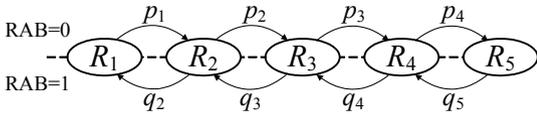


그림 1. cdma2000 1xEV-DO의 역방향 전송속도 제어 방식

그림 1은 각 단말의 전송속도 결정방법을 보여준다. 단말이 지원하는 5가지 전송속도를  $R_1, \dots, R_5$ 라고 표기하면,  $R_i = 9.6 \cdot 2^{i-1}$  kbps ( $i = 1, \dots, 5$ )로 나타낼 수 있다. 단말은 수신된 RAB값에 따라 전송속도를 한 단계씩 높이거나 낮출 수 있지만, 최종적인 전송속도의 증감 여부는 고유한 확률모델을 이용해 결정하게 된다. 이 확률모델은 전이확률(transition probability)을 사용하는데, 단말의 전송속도  $R_i$ 에 따라 두 종류의 전이확률  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 가 있다 ( $i = 1, \dots, 5$ ). 전송속도  $R_i$ 인 단말이 RAB=0을 수신하면 이 단말은  $p_i$ 의 확률로 전송속도를 한 단계 높이고,  $1-p_i$ 의 확률로 현재의 전송속도를 유지한다. 비슷한 방법으로, RAB=1을 수신하면 단말은  $q_i$ 의 확률로 전송속도를 한 단계 낮추고,  $1-q_i$ 의 확률로 전송속도를 유지한다. 이때, 전이확률을  $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$ 와  $q_2 < q_3 < q_4 < q_5$ 의 관계를 갖도록 설정하면, 낮은 전송속도의 단말은 RAB=0 수신시 전송속도를 쉽게 높이고, 높은 전송속도의 단말은 RAB=1 수신시 전송속도를 신속하게 줄이도록 유도하여 시스템을 보다 안정적으로 제어할 수 있다<sup>4,5</sup>. 1xEV-DO 시스템에서 이와 같은 확률모델을 사용하여 전송속도를 결정하는 이유는 확정적인 방식을 사용하여 전송속도를 제어하면 모든 단말의 전송속도 증감이 RAB값에 동기화되어 급격한 부하 변화가 발생하기 때문이다.

### III. 제한한 트래픽 제어 방법

1xEV-DO 시스템에서 채택한 역방향 전송속도 제어방법에 따르면 단순한 이진 정보를 사용하여 단말의 동작을 제어하기 때문에 정상상태(steady-state)에서 역방향 부하가 임계값을 기준으로 증가하고 감소하는 현상이 반복된다<sup>4,5</sup>. 이러한 전송속도 제어방법은 역방향 링크의 부하를 일정한 수준에서 유지시키려는 소기의 목적은 달성하고 있지만, 시스템의 안정성 측면에 대한 배려가 충분하지 못하다. 다시 말해, 역방향 링크의 특성과 성능은 전이확률 및  $L_{th}$ 와 같은 다양한 시스템 파라미

터의 영향을 받을 수 있는데, 확률상 역방향 부하가 시스템의 성능을 저하시키는 수준까지 과도하게 높아질 수 있다. 이러한 불확실한 전송속도 조절의 문제점을 해결하기 위하여, 단말의 차기 동작 정보를 기지국에 전송하고 이에 대한 승인을 받는 방법이 제안되었지만<sup>6</sup>, 이 방법은 역방향 링크에 대한 표준 규격을 변경시켜야 하는 제약사항을 가지고 있다. 또 다른 방법으로, 전이확률을 작게 설정하는 방법도 있지만<sup>6</sup>, 역방향 링크의 전송속도가 정상상태에 이르기까지 상대적으로 오랜 시간이 소요될 수 있어 전송효율이 저하될 수 있다.

역방향 링크의 불안정성은 1xEV-DO 시스템에서 채택한 확률모델이 단말의 전송속도를 과도하게 증가시킬 수 있다는 점에 기인한다. 임계값  $L_{th}$ 를 중심으로 전송속도를 높이거나 낮추는 동작만을 반복하기 때문에, 단말들이 RAB=0을 수신하면 확률적으로 과도한 트래픽 부하가 초래될 수 있다. 예를 들어, 역방향 부하가 임계값  $L_{th}$ 보다 약간 낮은 수준에 있다면, 기지국은 RAB=0을 송신하여 단말이 전송속도를 높이도록 유도한다. 하지만, RAB=0을 수신한 다수의 단말들이 전송속도를 높인다면 역방향 부하는  $L_{th}$ 를 훨씬 웃도는 수준으로 증가하여 시스템의 안정성을 위협할 수 있다. 따라서 보다 안정적인 동작을 위해서는 보다 정밀한 전송속도 제어방법이 필요하고, 이를 위해 본 논문에서는 과도한 전송속도 증가를 억제하는 방법을 제안한다. 즉, 역방향 링크의 부하 수준이 임계값  $L_{th}$ 보다 약간 낮은 영역에 있을 때 전이확률을  $\{p_i\}$ 보다 작게 설정하여 과도한 트래픽 부하가 유발되지 않도록 한다. 그리고, 역방향 부하가 충분히 낮다면 신속한 전송속도 증가를 위하여  $\{p_i\}$ 를 그대로 사용한다.

제안한 방법에서 기지국은 역방향 링크의 부하를 관찰하고 그 결과를 단말에게 3단계로 구분하여 알려주는데, 이 정보를 RAI(reverse activity indicator)라고 부르기로 한다. RAI의 결정은 기존과 유사하다. 즉, 트래픽 부하가 임계값  $L_{th1}$ 보다 작은 경우,  $L_{th1}$ 보다 같거나 크고 또 다른 임계값  $L_{th2}$ 보다 작은 경우 ( $L_{th1} < L_{th2}$ ), 그리고  $L_{th2}$ 보다 같거나 큰 경우를 구분한다. 하지만, 이 RAI값은 기존의 이진 정보가 지원할 수 있는 범위를 벗어나기 때문에 적어도 2비트가 필요하다. 표 2에 트래픽 부하와 RAI값의 관계를 보였다. 세 개의 RAI값은 임의의 2비트 수치를 할당할 수 있으며, 표 2에서 사용하지 않은 '10'은 예시로 남겨두었다.

표 2. 역방향 부하에 따른 RAI 할당.

RAI	역방향 부하(L)의 범위
00	$0 < L < L_{th1}$
11	$L_{th1} \leq L < L_{th2}$
01	$L \geq L_{th2}$

이제 RAI를 전송하는 방법을 생각해 보자. 제안한 방법에서 RAI를 전송하려면 2비트가 필요한데, 기존의 RA 채널은 1비트만을 전송할 수 있기 때문에 기존의 물리채널 구조를 확장시킬 필요가 있다. 하지만, 새로운 물리채널을 추가하지 않고 4개의 예비 MAC 채널 중 하나를 추가적으로 이용하면 물리채널의 구조를 변경하지 않고도 RAI를 전송할 수 있다. 특히, 단말에서는 소프트웨어 수준에서 특정 Walsh 코드를 사용하는 채널을 수신할 수 있기 때문에 예비 MAC 채널의 수신을 위해 표준 규격을 변경할 필요는 없다. 따라서 기존 RA 채널과 예비 MAC 채널을 동시에 사용하여 RAI의 첫 번째와 두 번째 비트를 각각 전송한다.

이제, 셀 내의 모든 단말은 역방향 트래픽 부하상태를 보다 정밀하게 알 수 있기 때문에, 각 단말은 트래픽 부하에 따른 적절한 동작으로 시스템 안정성을 높일 수 있다. 전송속도  $R_i$ 의 단말은 수신한 RAI 값에 따라 다음과 같이 전송속도를 조절한다.

- RAI=00: 확률  $p_i$ 로 전송속도를 한 단계 높임
  - RAI=11: 확률  $p'_i$ 로 전송속도를 한 단계 높임
  - RAI=01: 확률  $q_i$ 로 전송속도를 한 단계 감소
- 이때, 시스템의 안정성 향상을 위해  $p_i \geq p'_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ 의 관계가 되도록 설정할 필요가 있다.

#### IV. 성능 분석

이 절에서는 제안한 방법의 성능개선 정도를 파악하기 위하여 다차원 마르코프 프로세스(Markov process)에 기반한 시스템 모델을 제안한다. 분석상 편의를 위해 단일 셀을 가정하고, 셀 내에는  $T$ 개의 단말이 역방향 트래픽 채널을 통해 데이터를 송신하고 있다고 가정한다. 또한, 단말이 수신하는 RAI의 각 비트가 반대 값으로 오판될 확률을  $z$ 라고 가정한다. RAI 전송 오류에 의해 단말은 기지국이 송신하지 않은 RAI=10을 수신할 가능성이 있는데, 단말은 수신된 RAI에 오류가 있다고 판단하고 기지국이 RAI=11을 송신한 것으로 간주한다.

본 분석 과정에서는 매 프레임마다 변경될 수 있

는 단말들의 전송속도 변화를 관찰하여 이산시간 마르코프 프로세스로 모델링한다.  $k$ 번째 프레임에서 전송속도가  $R_i$ 인 단말 수를  $S_i(k)$ 라고 표기하면, 5차원 상태변수  $\mathbf{S}(k) = \{S_1(k), S_2(k), \dots, S_5(k)\}$ 는 역방향 링크의 부하를 설명할 수 있는 상태정보로 활용될 수 있다. 역방향 부하는 셀 내의 모든 단말이 역방향 링크로 보내는 전송속도의 합이라고 가정하였으므로, 상태정보  $\mathbf{S}(k)$ 가 주어질 때  $k$ 번째 프레임의 트래픽 부하는 현재 상태인  $\mathbf{S}(k)$ 를 통해 알 수 있다. 즉, 상태정보  $\mathbf{S}(k)$ 에 대하여 역방향 트래픽 부하는  $\sum_{k=1}^5 S_i(k)R_i$ 로 표현되기 때문에,  $\mathbf{S}(k)$ 는 1xEV-DO 시스템의 역방향 링크를 설명할 수 있는 좋은 상태변수가 된다. 특히,  $k$ 번째 프레임의 트래픽 부하가  $\mathbf{S}(k)$ 에 의해 결정되고 이를 통해 RAI값이 결정되는 관계를 고찰해보면,  $k+1$ 번째 프레임의 트래픽 부하는  $k$ 번째 프레임의 상태변수  $\mathbf{S}(k)$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 제안한 시스템은 이산시간 다차원 마르코프 프로세스로 모델링될 수 있다. 더불어, 셀 내 단말 수를 고려하면 임의의  $S_j(k)$ 에 대하여  $S_j(k) = T - \sum_{i \neq j} S_i(k)$ 로 표현되고, 이는  $\mathbf{S}(k)$ 에 포함된 변수들 중 하나가 잉여변수임을 의미한다. 이제 상태변수를  $\mathbf{S}(k) = \{S_1(k), S_2(k), S_3(k), S_4(k)\}$ 의 형태로 조금 더 간단히 표현할 수 있다.

다음 프레임에서 상태변수  $\mathbf{S}(k+1)$ 로 전이할 상태전이 확률(state-transition probability)을 구해보자. 이 상태전이 확률을 직접적으로 구하기는 쉽지 않으므로, RAI값과 단말의 전송속도 변경에 따른 조건부 확률을 이용하도록 한다. 먼저, 전송속도  $R_i$ 를 갖는  $S_i(k)$ 개의 단말들을 다음과 같이 구분하자.

- $U_i$ : RAI=00을 수신하고 전송속도를 한 단계 높이는 단말 수
- $U'_i$ : RAI=11을 수신하고 전송속도를 한 단계 높이는 단말 수
- $D_i$ : RAI=01을 수신하고 전송속도를 한 단계 감소시키는 단말 수

시스템 상태  $\mathbf{S}(k)$ 는  $k+1$ 번째 프레임의 시작과 동시에 다음 상태인  $\mathbf{S}(k+1)$ 로 전이되는데,  $\mathbf{S}(k)$ 와  $\mathbf{S}(k+1)$ 의 표본상태를 각각  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ 와  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ 라고 표현하면, 전이확률  $p_{\mathbf{xy}} = \Pr(\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{y} | \mathbf{S}(k) = \mathbf{x})$ 는 [6, 7]의 결과를 응용하여 다음과 같은 조건부 확률로 표현할 수 있다.

$$p_{\mathbf{xy}} = \Pr(\mathbf{D} = \mathbf{U} + \mathbf{U}' + \mathbf{e} | \mathbf{S}(k) = \mathbf{x}) \quad (1)$$

여기서 벡터  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{U}'$ ,  $\mathbf{e}$ 는 각각  $\mathbf{D}=(D_0, D_3, D_4, D_5)$ ,  $\mathbf{U}=(U_1, U_2, U_3, U_4)$ ,  $\mathbf{U}'=(U_1', U_2', U_3', U_4')$ ,  $\mathbf{e}=(e_1, e_2, e_3, e_4)$ ,  $e_i \equiv \sum_{k=1}^i (y_k - x_k)$ 를 의미한다.

전송속도  $R_i$ 를 갖는 단말 수를  $X_i$ , 이  $X_i$ 개의 단말들 중 RAI의 첫 번째 비트를 0으로 판독한 단말 수를  $M_i$ , 이  $M_i$ 개의 단말들 중 RAI의 두 번째 비트를 0으로 판독한 단말 수를  $N_i$ 라고 가정하자. 식 (1)을  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{U}'$ 에 대한 조건부 확률로 표현하면 다음과 같다.

$$p_{\mathbf{xy}} = \sum_{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \mathbf{u}, \mathbf{u}'} \Pr(\mathbf{D}=\mathbf{u}+\mathbf{u}'+\mathbf{e}|\mathbf{u}', \mathbf{u}, \mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{x}) \times \Pr(\mathbf{U}=\mathbf{u}, \mathbf{U}'=\mathbf{u}'|\mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{x}) \times \Pr(\mathbf{M}=\mathbf{m}, \mathbf{N}=\mathbf{n}|\mathbf{x}) \quad (2)$$

이때,  $\mathbf{M}=(M_1, \dots, M_5)$ ,  $\mathbf{N}=(N_1, \dots, N_5)$ 를 의미한다. 식 (2)의 각 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr(\mathbf{D}=\mathbf{u}+\mathbf{u}'+\mathbf{e}|\mathbf{u}', \mathbf{u}, \mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{x}) = \prod_{i=1}^4 \binom{m_{i+1} - n_{i+1}}{u_i + u_i' + e_i} q_{i+1}^{u_i + u_i' + e_i} \times (1 - q_{i+1})^{m_{i+1} - n_{i+1} - u_i - u_i' - e_i} \quad (3)$$

$$\Pr(\mathbf{U}=\mathbf{u}, \mathbf{U}'=\mathbf{u}'|\mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{x}) = \prod_{i=1}^4 \binom{n_i}{u_i} p_i^{u_i} (1 - p_i)^{n_i - u_i} \times \binom{x_i - m_i}{u_i'} p_i^{u_i'} (1 - p_i')^{x_i - m_i - u_i'} \quad (4)$$

$$\Pr(\mathbf{M}=\mathbf{m}, \mathbf{N}=\mathbf{n}|\mathbf{x}) = \Pr(\mathbf{M}=\mathbf{m}|\mathbf{x}) \cdot \Pr(\mathbf{N}=\mathbf{n}|\mathbf{m}, \mathbf{x}) = \begin{cases} \prod_{i=1}^5 \binom{x_i}{m_i} \binom{m_i}{n_i} z^{x_i - n_i} (1 - z)^{m_i + n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_{00}\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{x_i}{m_i} \binom{m_i}{n_i} z^{m_i + n_i} (1 - z)^{x_i - n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_{11}\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{x_i}{m_i} \binom{m_i}{n_i} z^{x_i - m_i + n_i} (1 - z)^{2m_i - n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_{01}\} \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서  $\{\mathbf{x}_{00}\}$ ,  $\{\mathbf{x}_{11}\}$ ,  $\{\mathbf{x}_{01}\}$ 은 RAI값으로 각각 00, 11, 01을 생성하는 상태변수들의 집합이다. 특히, 각 변수의 범위는 다른 변수에 종속되기 때문에  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{u}'$ 의 범위는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{cases} 0 \leq n_i \leq m_i \leq x_i, & i = 1, \dots, 5 \\ 0 \leq u_i \leq n_i, & i = 1, \dots, 4 \\ \max(0, -u_i - e_i) \leq u_i' \\ \leq \min(x_i - m_i, m_{i+1} - n_{i+1} - u_i - e_i), & i = 1, \dots, 4 \end{cases} \quad (6)$$

지금까지 설명한 마르코프 프로세스가 유일한 정상상태 확률(steady-state probability)인  $\{\pi_{\mathbf{x}}\}$ 를 갖기 위해서는 유한한(finite) 상태공간을 가지며, 비주기적(aperiodic)이고, 상태공간을 더 이상 나눌 수 없는(irreducible) 조건을 만족해야 한다<sup>[9]</sup>. 실제로, 식 (1)-(6)에서 모델링한 마르코프 프로세스는 유일한 정상상태 확률을 가질 조건을 모두 만족시킴을 알 수 있다. 따라서 정상상태 확률  $\{\pi_{\mathbf{x}}\}$ 는 다음의 평형 상태 방정식을 만족하는 해가 된다.

$$\pi_{\mathbf{y}} = \sum_{\mathbf{x}} p_{\mathbf{xy}}, \quad \sum_{\mathbf{x}} \pi_{\mathbf{x}} = 1 \quad (7)$$

식 (7)에서 구한 정상상태 확률을 이용하면 제안한 시스템의 성능을 파악할 수 있는 다양한 성능지표를 얻을 수 있다.

### V. 분석 결과

일반적으로 CDMA 시스템은 신호 상호간의 간섭에 의해 용량이 제한되는 특성을 갖는다(interference-limited). 다시 말해, 역방향 트래픽 부하 수준이 높을수록 신호의 품질이 저하되고, 특히 일정한 한계를 넘어서게 되면 그 성능이 급격히 낮아진다. 따라서 기지국은 역방향 부하가 일정한 수준 이하에서 유지되도록 제어할 필요가 있다. 시스템 과부하(overload)의 기준이 되는 이 기준을  $L_{max}$ 로 표기하면, 역방향 부하는 가능한  $L_{max}$ 를 넘지 않도록 제어되어야 한다. 이를 위해, 기존 방법에서는 시스템 파라미터  $L_{th}$ 를  $L_{th} \leq L_{max}$ 의 관계가 되도록 설정하였다<sup>[6]</sup>. 제안한 방법에서도 유사한 방식을 적용하여  $L_{th1} \leq L_{th2} \leq L_{max}$ 의 관계를 갖도록  $L_{th1}$ 과  $L_{th2}$ 를 설정한다. 여기서 두 임계값의 차이  $L_{th2} - L_{th1}$ 을  $C$ 라고 표현하면,  $L_{th2} = L_{th1} + C$ 의 관계가 성립하므로 제안한 방법에서는  $L_{th1}$ 과  $C$ 를 조절한다.

이 절에서는 시스템의 과부하율(overload probability)과 데이터 전송효율(throughput)을 통해 시스템의 성능을 비교한다. 시스템의 과부하율은 역방향 트래픽 부하가  $L_{max}$ 를 넘을 확률을 의미하므로, 정상상태 확률을 이용해 다음과 같이 표현된다.

$$\text{과부하율} = \Pr(\text{과부하 상태}) = \sum_{\mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_0\}} \pi_{\mathbf{x}} \quad (8)$$

여기서  $\{x_o\}$ 는 역방향 링크가 과부하 상태인 상태 변수들의 집합이다. 유사한 방법으로, 역방향 링크의 데이터 전송효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{전송효율} = \sum_{\mathbf{x}} \left( \sum_{i=1}^5 x_i R_i \right) \pi_{\mathbf{x}} \quad (9)$$

이 절에서 사용할 시스템 파라미터는 다음과 같다. 먼저, 시스템의 성능에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 전이확률  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 는 시스템의 안정성을 고려하여  $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$ 와  $q_2 < q_3 < q_4 < q_5$ 의 관계를 갖도록 설정한다. 특히, 전이확률  $\{q_i\}$ 는 신속한 과부하 해소를 위해 전송속도가 높을수록 큰 확률을 할당하여  $\{q_2, q_3, q_4, q_5\} = \{0.1, 0.3, 0.6, 0.9\}$ 으로 설정하고, 본 분석과정에서 고정적으로 사용한다. 전이확률  $\{p_i\}$ 는 조심스럽게 전송속도를 증가시킬 수 있도록  $p_1 = 2p_2 = 4p_3 = 8p_4$ 의 관계를 유지한다(예:  $\{p_1, p_2, p_3, p_4\} = \{0.4, 0.2, 0.1, 0.05\}$ ). 다음으로, RAI의 전송주기인  $RABLength$ 는 16 슬롯으로 가정하여 매 프레임마다 새로운 RAI가 전송될 수 있도록 한다. 따라서 RAI의 각 비트는  $RABLength$  동안 64회 반복되고, RAI의 각 비트에 대한 수신오류율  $z$ 는 매우 작은 값을 가질 것이다. 하지만, 본 분석과정에서는 무선채널의 감쇄(fading)와 불완전한 전력제어를 고려하여 다소 높은 값인  $z = 5\%$ 로 설정한다. 기존 방법의 RAB 수신오류율도 동일한 값으로 설정한다. 마지막으로, 단일 셀 환경에서 기지국이 2개의 수신 안테나를 사용하고 단말 수가 15개 이하인 경우, 지원 가능한 최대 전송속도는 450kbps이므로<sup>[10]</sup>, 이 값을  $L_{max}$ 의 기준값으로 사용한다.

그림 2는 제안한 분석방법의 적정성을 평가할 수 있도록 분석결과와 시뮬레이션 결과를 비교한다.  $p_1 = 0.4$ ,  $p_i' = p_i/4$ ,  $i = 1, \dots, 4$ 로 설정하고  $L_{th1} = 400\text{kbps}$ 로 고정시킨 후,  $C$ 를 40kbps와 80kbps로 변경하면서 셀 내 단말 수에 따른 역방향 링크의 전송효율과 과부하율을 도식하였다. 이 그림을 통해 제안한 분석방법의 결과와 시뮬레이션 결과가 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한,  $C$ 값이 증가할수록  $L_{th2}$ 가 커지면서 전송효율이 증가함을 관찰할 수 있다. 하지만, 이 경우 과부하율도 함께 증가하므로 시스템의 안정성이 저하될 수 있다. 이 그림은 기존 방법에 대한 전송효율과 과부하율도 함께 보여주는데, 기존 방법에 대한  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 는 제안한 방법과 동일하고  $L_{th} = 400\text{kbps}$ 로 설정하였다.

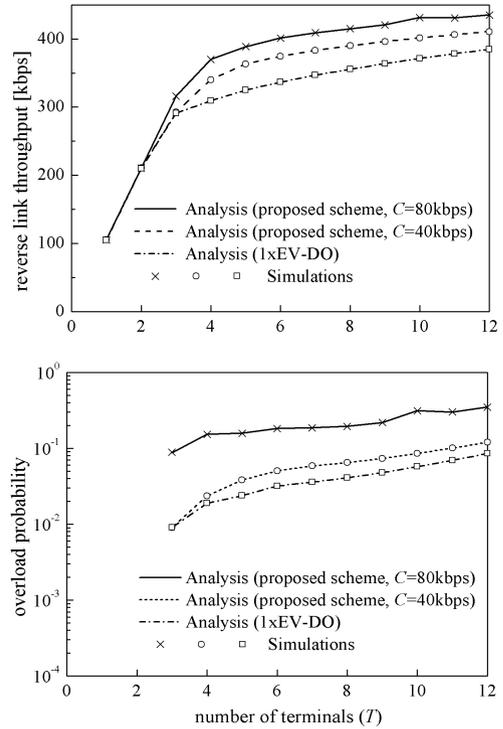


그림 2. 제안 방법과 기존 방법의 전송효율 및 과부하율 예

제안한 방법과 기존 방법의 성능을 비교하기 위해서는 보다 객관적인 성능지표가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 각 방법에 대하여 역방향 링크의 과부하율이 5%를 넘지 않으면서 지원할 수 있는 최대 전송속도를 비교한다. 보다 유사한 조건에서 성능을 비교하기 위하여 전이확률  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 는 동일하게 설정하고( $\{p_1, p_2, p_3, p_4\} = \{0.4, 0.2, 0.1, 0.05\}$ ,  $\{q_2, q_3, q_4, q_5\} = \{0.1, 0.3, 0.6, 0.9\}$ ), 임계값을 조절하면서 최대 전송속도를 찾는다. 추가적으로, 제안한 방법에서는  $C=40\text{kbps}$ 로 고정시키고  $p_i'$ 를 각각  $p_i' = 0$ ,  $p_i' = p_i/4$ ,  $p_i' = p_i/8$  ( $i = 1, \dots, 4$ )로 변경하면서 최대 전송속도를 구한다. 그림 3은 제안한 방법과 기존 방법의 최대 전송속도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제안한 방법에서는 기존의 방법과 비교하여 단말 수에 관계없이 최대 전송속도가 개선되고 있음을 알 수 있다. 특히,  $p_i'$ 가 상대적으로 작은 값을 가질수록 성능개선이 뚜렷해진다. 성능향상 수준은 각각  $p_i' = p_i/4$ 인 경우 최대 11.5%,  $p_i' = p_i/8$ 인 경우 최대 12.6%,  $p_i' = 0$ 인 경우 최대 17.4%를 보여주고 있다.

이와 더불어, 그림 4는 제안한 방법을 기존 방법의 다양한 상황과 비교하기 위하여 기존 방법의

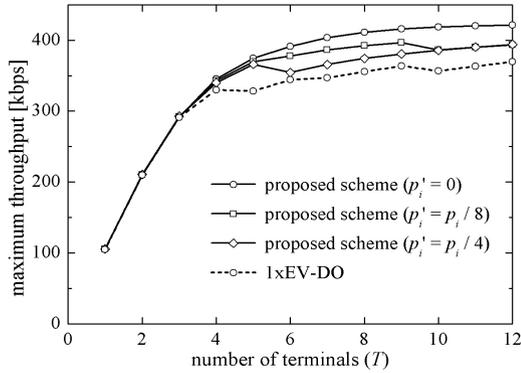


그림 3. 제안한 방법과 기존 방법의 성능 비교 ( $p_i'$  조절)

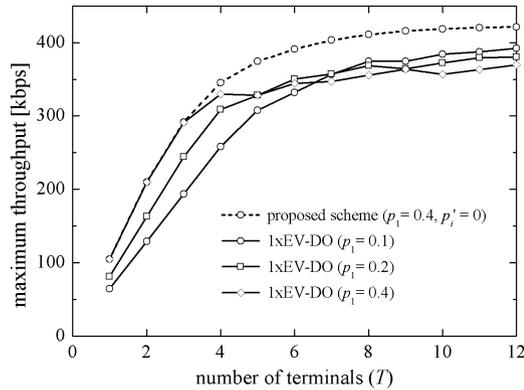


그림 4. 제안한 방법과 기존 방법의 성능 비교 ( $\{p_i\}$  조절)

$\{p_i\}$ 를 변경하면서 최대 전송속도를 도출하고 있다. 제안한 방법은 그림 3과 동일한 조건을 사용하였으며, 가장 성능향상 수준이 높았던  $p_i' = 0$ 의 경우를 도출하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 기존 방법의 다양한  $\{p_i\}$  조건에도 불구하고 제안한 방법이 더 높은 성능을 보임을 알 수 있다. 기존 방법에서  $p_i = 0.4$ 로 설정시 단말이 적으면 제안 방법과 비슷한 수준의 성능을 보이지만, 단말 수가 증가하면서 최대 전송속도는 제안한 방법보다 낮은 수준에 머물게 된다. 한편,  $p_i$ 를 더 작게 설정할수록 단말이 많은 영역에서 성능이 다소 개선되지만, 제안한 방법의 성능에는 이르지 못하고 있다. 특히, 단말이 적은 영역에서는 성능이 크게 저하됨을 관찰할 수 있다. 이와 같은 전반적인 성능 비교를 통해 제안한 방법이 기존 시스템의 성능을 개선하고 있음을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 cdma2000 1xEV-DO 시스템의 역방향 링크에 대한 새로운 트래픽 부하 제어방식을 제안하고 분석하였다. 기존 방법에서는 단순한 이진 정보만을 전송하여 역방향 부하를 효과적으로 제어하기 어려웠지만, 제안한 방법에서는 역방향 트래픽의 부하 수준을 3단계로 세분화하고 각 단계에 맞는 진이확률을 사용하여 시스템의 안정성을 향상시켰다. 본 논문에서는 제안한 시스템을 단일 셀 환경에서 이산시간 마르코프 프로세스로 모델링하였으며, 정량적인 분석 결과 기존의 방식과 비교하여 동일 조건에서 최대 17.4%의 성능향상을 확인할 수 있었다. 특히, 제안한 방식은 기존의 물리채널 구조를 그대로 사용할 수 있는 장점을 가진다. 앞으로 본 논문의 연구결과를 바탕으로 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘이 공존하는 환경에 대한 성능분석과 자원할당 공정성(fairness) 측면에 대한 연구를 진행할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 3rd Generation Partnership Project 2, "cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification," 3GPP2 C.S20024 v.4.0, October 2002.
- [2] 박창수, 박진수, 홍순호, "cdma2000 1x 및 1xEV-DO (HDR) 표준동향," 한국통신학회, 한국통신학회지 정보통신 제17권 8호, pp.83-98, 2000.
- [3] H. Balakrishnan, "How to get good TCP performance over asymmetric networks," <http://www.sds.lcs.mit.edu/talks/tcp-asym>, 1999.
- [4] E. Esteves, "The high data rate evolution of the cdma2000 cellular system," *Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications*, Vol.5, pp.61-72, December 2000.
- [5] S. Chakravarty, R. Pankaj, and E. Esteves, "An algorithm for reverse traffic channel rate control for cdma2000 High Rate Packet Data systems," *IEEE Globecom 2001*, pp.3733-3737, November 2001.
- [6] W.Y. Yeo and D.H. Cho, "A Markovian approach for modeling IS-856 reverse link rate con-

