

시분할-코드분할 다중 접속 시스템에서 비대칭/불균질 트래픽 처리에 대한 수학적 모델

정희원 신 정 채*, 이 유 태**, 김 정 호***, 조 호 신*

A Mathematical Model for Asymmetrical/Heterogeneous Traffic Management in TD-CDMA System

Jung chae Shin*, Yutae Lee**, Jeong ho Kim***, Ho shin Cho* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 비대칭적이고 불균질적인 트래픽이 혼재하는 멀티미디어 서비스 환경에서 시분할 듀플렉싱을 사용하는 시분할-코드분할 다중 접속(TD-CDMA) 시스템의 직교 코드와 시간의 2차원적인 자원을 효율적으로 운용하는 방법을 수학적 모델링을 통해서 알아본다. 호-계층에서는 상/하향 트래픽 부하를 2차원 벡터로 나타내어 대기 이론을 기반으로 하여 호손율을 구하며, 최소의 호손율을 보이는 최적의 스위칭-포인트를 찾는다. 패킷-계층에서는 서킷호와 패킷호로 구분하여 대기 중인 패킷과 서비스 중인 서킷호를 2차원의 상태로 나타내어 패킷 손실율을 구한다. 또한 일정 수준 이상의 서비스 품질을 위해 요구되는 버퍼 크기를 알아본다.

Key Words : TD-CDMA, asymmetrical traffic, queueing model, call blocking probability, packet loss probability

ABSTRACT

This paper proposes a mathematical model to analyze call-and packet-level performance of the TD-CDMA/TDD system which could serve a flexible radio resource management against multi-type heterogeneous and asymmetrical traffic conditions. On call-level analysis, the mathematical model based on queueing theory performs multi-dimensional operations using random vectors or matrices to consider multiple types of traffic and also deal with asymmetrical up- and down-direction transmissions separately. Employing the mathematical model, we obtain call blocking probability for each type of traffic and also the optimum switching-point with the smallest call blocking probability. And on packet-level analysis, employing a non-prioritized queueing scheme between circuit and packet calls, we solve 2-dimensional random vector problem composed of the queue length for packets and the number of circuit calls being served. Finally, packet-level performance is analyzed in terms of the packet loss probability and the buffer size required under mixed-traffic conditions of multiple types of circuit and packet calls.

I. 서 론

IMT-2000으로 대표되는 3세대 혹은 앞으로 도래

할 4세대 이동통신 서비스는 단순 음성 통화뿐만 아니라 다양한 형태의 멀티미디어 서비스를 제공한다. 이들 멀티미디어 서비스의 특징으로 상향 링크

* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (jcshin@ee.knu.ac.kr & hscho@ee.knu.ac.kr),

** 이화여자대학교 정보통신학과 (jho@ewha.ac.kr) *** 동의대학교 정보통신공학과 (ylee@deu.ac.kr)

논문번호 : KICS2004-11-292, 접수일자 : 2004년 11월 27일

* 이 논문은 2004년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (R05-2004-000-10272-0).

(단말기→기지국)와 하향 링크(기지국→단말기)의 트래픽 부하가 서로 다른 비대칭적 구조를 들 수 있다. 또한 동질적(homogeneous) 성질의 음성 통화만을 제공해주는 1, 2세대 이동통신 서비스와는 달리 회선교환호(circuit-switched call)와 패킷교환호(packet-switched call)가 동시에 존재함은 물론 각 호별 요구 서비스 품질(QoS:Quality of Service)이 다르며 시간지연에 대한 민감도 또한 각각 다른 불균질(heterogeneous) 특성을 가진다. 따라서 비대칭적이고 불균질적 특성을 보이는 다양한 형태의 트래픽에 대한 효율적인 무선 자원 운용 기법이 요구되고 있다¹¹⁾.

우선 상/하향 링크의 비대칭 트래픽 부하를 처리하기 위한 방안으로 시분할 듀플렉싱(TDD:Time Division Duplexing) 기법이 활발히 연구되고 있다^{12),13)}. 시분할 듀플렉싱 방식은 동일한 주파수를 사용하면서 시간을 분할하여 상향 링크와 하향 링크에 할당하는 방식이다. 멀티미디어 서비스와 같이 다양한 형태의 트래픽이 존재하는 경우, 상/하향 링크의 용량을 트래픽 부하 양에 따라 자원을 유동적으로 조절, 분배할 수 있는 시분할 듀플렉싱 방식이 상/하향 링크의 용량을 균등하게 사용하는 주파수분할 듀플렉싱(FDD:Frequency Division Duplexing)방식보다 더욱 효율적인 자원관리를 할 수 있다¹⁴⁾. 또한 멀티미디어 트래픽에 대한 효율적 무선 자원 운용 방안으로 시분할-코드분할 다중 접속(TD-CDMA, Time Division-Code Division Multiple Access) 방식이 연구되고 있다. 앞서 말한 시분할 듀플렉싱과 시분할-코드분할 다중 접속 방식을 함께 운용하는 방안이 3세대 이동통신 시스템의 표준으로 채택되었으며 중국의 경우 TD-SCDMA(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access)라는 이름으로 독일의 지멘스(Siemens)와 함께 개발하고 있다. 본 방식은 직교코드(Orthogonal Code)와 시간분할을 동시에 사용하여 2차원적 자원관리를 함으로써 다양한 형태의 서비스를 제공하는데 보다 더 유연하게 대처할 수 있다¹⁵⁾.

기존의 많은 연구에서 시분할-코드분할 다중 접속 방식에서 자원 관리를 다루었다. 먼저 전송 품질을 높이고 전송 성공률을 최대화하는 방안으로 간섭에 의해 바뀌는 전송 품질을 조사하여 가용한 상/하향 채널단위만을 사용자에게 할당하는 스케줄링(Scheduling) 기법이 제시되었다¹⁶⁾. 또한 채널 할당 방식에 있어 상/하향 트래픽 분포에 따라 적응적으로 용량을 변화시키는 동적 채널 할당 방식, 트래픽

분포를 고려하지 않은 고정 채널 할당 방식 그리고 트래픽 분포를 고려한 고정 채널 할당 방식에 대해 유럽 전기통신 표준협회(ETSI: European Telecommunication Standards Institute)에서 정의한 사용자 만족도(Satisfied User Criteria)로써 성능을 비교하였다^{17),18)}. 호의 종류를 실시간(real-time)과 비 실시간(nonreal-time) 특성으로 나누어 실시간 트래픽에 우선순위를 높게 할당하여 서비스 품질을 높이는 방안이 연구되었다¹⁹⁾. 한편, 수학적 분석 모델로서, 상/하향 링크 트래픽 부하를 2차원 랜덤 벡터로 표현하여 다양한 멀티미디어 트래픽 환경에 적합한 최적의 스위칭-포인트 할당 방법이 제시되었다^{10),12)}.

본 논문에서는 비대칭적이고 불균질적인 트래픽이 혼재하는 멀티미디어 서비스 환경에서 시분할 듀플렉싱을 사용하는 시분할-코드분할 다중 접속(TD-CDMA) 시스템의 직교 코드와 시간의 2차원적인 자원을 효율적으로 운용하는 방법을 수학적 모델링을 통해서 알아본다. 호-계층에서는 상/하향 트래픽 부하를 2차원 벡터로 나타내어 대기 이론을 기반으로 하여 호손율을 구하며, 최소의 호손율을 보이는 최적의 스위칭-포인트를 찾는다. 패킷-계층에서는 서킷호와 패킷호로 구분하여 대기 중인 패킷과 서비스 중인 서킷호를 2차원의 상태로 나타내어 패킷 손실율(packet loss probability)을 구한다. 또한 트래픽 환경에 적합한 최적의 버퍼 크기를 알아본다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 2장에서는 수학적 모델에 사용될 시분할-코드분할 다중 접속 시스템의 채널 구조와 시나리오에 대해서 살펴본다. 3, 4장에서는 호-계층과 패킷-계층에서의 수학적 모델을 각각 제시한다. 또한 해석을 위한 트래픽 환경을 설정하고 결과 분석을 통하여 시스템 운용 시 최적의 자원 관리를 위한 시스템 파라미터를 찾아낸다. 마지막으로 5장에서는 호-계층과 패킷-계층에서 찾아낸 시스템 성능지수를 바탕으로 종합적 분석을 통해 결론을 맺도록 한다.

II. TD-CDMA 시스템 모델

2.1 채널 구조

그림 1은 본 논문에서 수학적 모델링에 사용하게 될 시분할-코드분할 다중 접속 시스템의 채널 구조이다. 시간과 직교분할코드의 2차원적인 배열을 이루고 있으며 하나의 타임슬롯과 하나의 코드가 채널단위를 이루고 있다. 채널단위는 사용자 정보를

전송하는 채널의 기본 단위이며 상/하향 링크의 사용자 트래픽 부하는 채널단위의 트래픽 용량으로 표준화(normalization)된 것이다. 즉, 사용자 트래픽 부하는 채널단위의 개수로 표현된다. 타임슬롯의 할당은 상향 링크 트래픽과 하향 링크 트래픽에 따라 다르게 변할 수 있다. 하나의 프레임내에서 타임슬롯의 개수는 S_{max} 로 표시되며 상향 링크와 하향 링크는 스위칭-포인트로 구분이 된다. 예를 들어 스위칭-포인트가 S_{sw} 와 S_{sw+1} 사이에 있다면 1번 타임슬롯부터 S_{sw} 까지는 상향 링크에 할당되며 S_{sw+1} 부터 S_{max} 까지는 하향 링크에 할당된다. 직교분할코드(C)의 개수는 C_{max} 로 나타낸다. 그러므로 상향 링크 채널단위의 개수는 $C_{max} \times S_{sw}$ 이며 하향 링크 채널단위의 개수는 $C_{max} \times (S_{max} - S_{sw})$ 이고 이들의 총합은 $C_{max} \times S_{max}$ 가 된다.

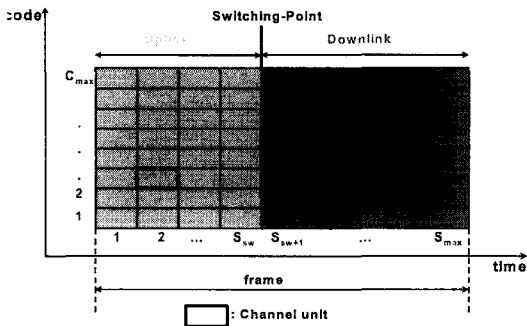


그림 1. 수학적 모델링에 사용된 시분할-코드분할 다중 접속 시스템 채널 구조^{[10]-[12]}.

2.2 채널 할당 시나리오

그림 2는 시분할-코드분할 다중 접속 시스템에서 서로 성질이 다른 서킷호(circuit call)와 패킷호(packet call)에 대한 채널 할당의 예를 보여주고 있다. 비어 있는 즉 사용되지 않는 채널은 임의로 발생하고 사용자에게 할당된다고 가정한다. 또한 채널단위로 트래픽의 부하가 표준화 되어 있다. 그러므로 각각의 호의 트래픽 부하는 채널단위의 개수로 표시된다.

서킷 호의 경우 실시간(real-time) 서비스의 성질을 가지고 호 수락 제어를 통해 호가 성립된 이후에는 호가 종료될 때까지 같은 크기와 같은 위치의 채널단위를 할당 받아 호가 유지된다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 Ckt1, Ckt2, Ckt3의 서킷호가 존재하고 이들의 트래픽 부하의 양은 각각 y_1 , y_2 , y_3 이다. 채널단위로 표준화된 결과 각 서킷호들은 2, 4, 1개의 채널단위를 호가 종료될 때까지 할당받게 된다.

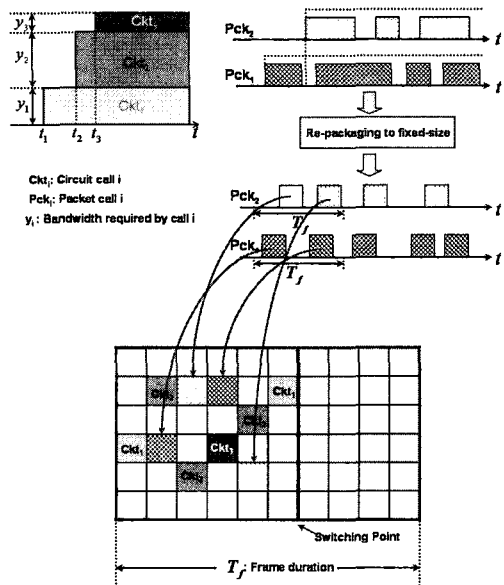


그림 2. 채널 할당 시나리오의 예.

이에 반해서 패킷호의 경우 또한 서킷호와는 달리, 호 수락시 할당된 채널단위를 호 종료시까지 유지하지 않고 필요할 때마다 데이터를 보내는 버스트(burst)의 성질을 가진다. 그리고 고정된 채널단위의 위치나 대역폭을 할당받지 않고 필요시에만 비어 있는 채널단위를 통해 서비스 받게 된다. 데이터를 전송에 필요한 채널 단위를 확보하지 못한 경우 서비스 받지 못한 패킷들은 바로 패킷 손실(packet loss)이 일어나지 않고 시스템 운용에 따라 버퍼(buffer)에 대기 시켜둘 수 있다. 그림 2에서처럼 패킷호들(Pck1, Pck2)은 호 종료시까지 채널단위를 필요할 때에만 할당받게 되고 매 프레임마다 발생한 패킷들은 채널단위의 대역폭에 맞게 재구성되어 전송된다.

서킷호와 패킷호가 동일 시스템내에서 공존하는 경우, 호 수락 제어(Call Admission Control)가 필수적이다. 예를 들어, 일반적으로 음성통화 즉, 서킷호는 연결 시도 시 할당 가능한 채널이 부족한 경우 호는 차단(blocking)된다. 이와 반대로 인터넷 서비스와 같은 패킷호는 할당 가능한 채널이 부족한 경우 호는 차단되지 않고 버퍼에 대기하게 된다. 그러나 패킷호 가운데 실시간 전송 서비스 같은 경우 채널 부족으로 전송 데이터가 계속 버퍼에 남아 있다면 이는 자원만 낭비하는 결과를 초래한다. 이러한 경우 수락 제어를 통해서 효율적인 자원 관리가 이루어 질 수 있다. 즉 패킷호가 차단되지 않고 모

두 버퍼에 대기하는 것이 아니라 트래픽 특성에 따라서 호를 차단 혹은 대기가 가능하게끔 수락 제어를 적용함으로써 서로 이질적인 서킷호와 패킷호가 동시에 존재할 수 있다.

호-계층에서의 해석은 호 수락 제어 단계에서, 즉 호가 성립을 위하여 채널 할당을 요구하는 단계에서 이루어지며 호 수락 제어 파라미터로는 서킷호와 패킷호 모두 평균 사용 대역폭만을 사용한다고 가정한다. 대표적인 서비스 품질 파라미터로는 호손율(Call Blocking Probability)을 들 수 있으며 전체 접속 시도 호에 대한 차단된 호의 비율로써 나타낸다. 한편 패킷-계층에서의 해석은 호 수락 제어가 이루어진 이후에 이루어진다. 서킷호의 경우는 호 성립시점부터 호 종료시점까지 채널을 점유하고 있으므로 서비스 품질이 보장이 되지만, 패킷호의 경우에는 데이터 발생시에만 채널을 요구하게 되므로 호-계층에서의 호손율과 같은 파라미터로는 특성을 표현하기가 힘들다. 이를 대신하여 패킷 손실율(Packet Loss Probability)로써 서비스 품질 파라미터를 나타낸다. 패킷 손실율은 전체 발생한 패킷에 대한 손실될 패킷의 비율로 나타낸다^[13].

III. 호-계층 해석

3.1 호-계층 수학적 모델

호-계층의 대표적인 서비스 품질 파라미터 값으로 호손율을 들 수 있다. 이를 구하기 위해 먼저 트래픽의 형태에 따라 서킷호와 패킷호로 다시 각각의 타입별로 호의 종류를 나눈다. 패킷호는 I 만큼의 종류가 있으며 $Type-i$ 의 패킷호는 u_i^p 만큼의 채널 단위를 상향 링크에서 사용하고 d_i^p 만큼의 채널단위를 하향 링크에서 각각 사용한다고 가정한다. 이와 같은 형태로 $Type-i$ 의 서킷호는 I^c 만큼의 종류가 있으며 u_i^c , d_i^c 만큼의 채널단위를 상,하향 링크에서 각각 사용하고 한다고 가정한다. 또한 패킷호와 서킷호가 각각 포아송 도착 과정(Poisson Arrival Process)를 따른다고 가정하면 $Type-i$ 의 패킷호는 λ_i^p 의 호 도착율을 가지고 $Type-i$ 의 서킷호는 λ_i^c 의 호 도착율을 가진다고 할 수 있다. 각각의 호의 발생은 서로 독립적이다. 또한 각각의 통화시간이 지수 분포(Exponential Distribution)를 보인다고 가정하면 μ_i^p , μ_i^c 의 호 서비스율을 가지며 통화 시간 역시 독립적이라고 가정한다. 이에 따라 시스템이

가지는 랜덤 벡터(Random Vector)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$N = (N_1^p, N_2^p, \dots, N_p^p, N_1^c, N_2^c, \dots, N_r^c) \quad (3-1)$$

여기서 랜덤 변수 N_i^p , N_i^c 는 각각 $Type-i$ 의 패킷호와 서킷호의 개수를 나타낸다. 시스템 상태(state)에 대한 평형 방정식(balance equation)은 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 구할 수 있다^[14]. 그러나, 이 방법은 매우 다양한 시스템 상태를 다루기에는 적절치 못하므로 다른 방법을 통하여 시스템 상태를 구해야 한다.

시스템이 평형 상태에 있다고 가정하고, 랜덤 벡터를 다음과 같이

$$n = (n_1^p, n_2^p, \dots, n_p^p, n_1^c, n_2^c, \dots, n_r^c)$$

로 표현되며, 각각의 시스템 상태는 식 (3-2)와 같이 곱의 형태로 표현할 수 있다.

$$P(N = n) = \frac{1}{D} \prod_{i=1}^p \frac{(\rho_i^p)^{n_i^p}}{n_i^p!} \prod_{i=1}^r \frac{(\rho_i^c)^{n_i^c}}{n_i^c!} \quad (3-2)$$

여기에서 D 는 정규화 상수이며 ρ_i^p 와 ρ_i^c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_i^p = \frac{\lambda_i^p}{\mu_i^p}, \quad \rho_i^c = \frac{\lambda_i^c}{\mu_i^c}.$$

식 (3-2)를 이용해서 호손율을 구할 수 있지만 상/하향 링크에서 현재 패킷호와 서킷호에 의해 사용되고 있는 채널단위의 수를 시스템 상태를 나타내면 좀 더 효율적으로 계산이 가능하므로 다음과 같이 채널단위의 개수를 변수로 하는 랜덤 벡터 $J(j_1, j_2)$ 는 $N \cdot B^T$ 로 재정의 할 수 있다. 이 때 벡터 B 는

$$B = \begin{bmatrix} u_1^p & u_2^p & \dots & u_p^p & u_1^c & u_2^c & \dots & u_r^c \\ d_1^p & d_2^p & \dots & d_p^p & d_1^c & d_2^c & \dots & d_r^c \end{bmatrix}$$

와 같다. $J(j_1, j_2)$ 벡터를 다시 쓰면

$$\begin{aligned} j_1 &= (n_1^p u_1^p + n_2^p u_2^p + \dots + n_p^p u_p^p) \\ &\quad + (n_1^c u_1^c + n_2^c u_2^c + \dots + n_r^c u_r^c), \\ j_2 &= (n_1^p d_1^p + n_2^p d_2^p + \dots + n_p^p d_p^p) \\ &\quad + (n_1^c d_1^c + n_2^c d_2^c + \dots + n_r^c d_r^c) \end{aligned}$$

과 같이 쓸 수 있고 각각은 상향 링크에 사용되고 있는 채널단위의 개수와 하향 링크에 사용되고 있는 채널단위의 개수를 나타낸다. 상태 방정식을 간단히 쓰기 위해 $q(j_1, j_2) = P(J(j_1, j_2))$ 와 같이 쓴다면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\rho_i^b q(j_1 - u_i^b, j_2 - d_i^b) = E[N_i^b | J(j_1, j_2)] q(j_1, j_2), \quad (3-3)$$

$$\rho_i^c q(j_1 - u_i^c, j_2 - d_i^c) = E[N_i^c | J(j_1, j_2)] q(j_1, j_2). \quad (3-4)$$

이 때 $(j_1 + j_2) > 0$ 이고 $j_1 < 0$ 또는 $j_2 < 0$ 에서는 $q(j_1, j_2) = 0$ 이다. 식 (3-3)과 식 (3-4)로부터, 본 페이지 하단에 위치한 식 (3-5)와 같이 쓸 수 있고 $q(0, 0) = 1$ 인 조건을 이용하여 정규화가 되지 않은 $q(\cdot, \cdot)$ 구할 수 있다. 그림 3은 식 (3-5)의 순환적인(Recursive) 수식 전개를 도식적으로 나타낸 마코프 체인(Markov Chain)이다.

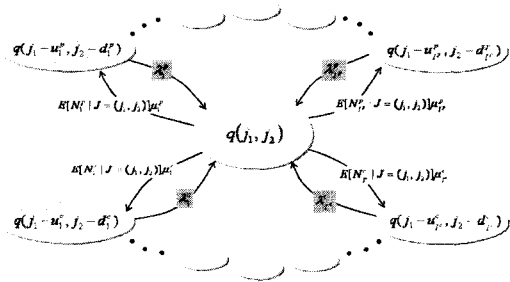


그림 3. $q(j_1, j_2)$ 의 상태 천이도

$q(\cdot, \cdot)$ 를 정규화 시킨 후 Type- i 의 패킷호와 서킷호의 호순율 즉 B_i^b 와 B_i^c 를 본 페이지 하단의 위치한 식 (3-6), (3-7)과 같이 각각 구할 수 있다.

또한 B_i^b , B_i^c 를 이용하여 패킷호 전체의 호순율과 서킷호 전체의 호순율을 본 페이지 하단의 식

(3-8), (3-9)와 같이 구할 수 있다. 이 때 P_i^b 와 P_i^c 는 식 (3-10) 같이 계산된다.

$$P_B^c = B_1^c P_1^c + B_2^c P_2^c + \dots + B_r^c P_r^c = \sum_{i=1}^r B_i^c P_i^c \quad (3-9)$$

$$P_i^b = \frac{\lambda_i^b}{\sum_{j=1}^p \lambda_j^b}, \quad P_i^c = \frac{\lambda_i^c}{\sum_{j=1}^r \lambda_j^c}. \quad (3-10)$$

3.2 호-계층 성능 분석

유럽 전기통신 표준협회의 3세대 이동통신 표준인 UMTS(Universal Mobile Telecommunication System)에서는 트래픽의 종류를 표 1과 같이 분류했다^[15].

UMTS에서 제시한 트래픽의 4가지 종류는 시간 지연에 대한 각 트래픽의 민감도에 따라 구분하였다. 대화형(Conversational Class, CC)의 경우 전송 지연에 대한 민감도가 가장 높은 즉, 실시간 전송이 필요한 트래픽들이며, 그와 반대로 후선형(Background Class, BC)는 전송 지연에는 민감하지 않으면서 정확한 데이터 전송이 필요한 트래픽을 예들 들고 있다.

표 1. UMTS에서 분류한 트래픽의 4가지 종류

트래픽 종류	특 성		응용 예제
	지연 민감도	대칭/비대칭	
대화형 (CC)	Extremely sensitive	대칭	Simple voice, Video conference
흐름형 (SC)	Very sensitive	비대칭	Video on demand, Audio on demand
상호형 (IC)	Sensitive	비대칭	Web browsing, Data retrieval
후선형 (BC)	Insensitive	비대칭	E-mail, Uploading bulky files, Downloading bulky files

$$\sum_{i=1}^p (u_i^b + d_i^b) \rho_i^b q(j_1 - u_i^b, j_2 - d_i^b) + \sum_{i=1}^r (u_i^c + d_i^c) \rho_i^c q(j_1 - u_i^c, j_2 - d_i^c) = (j_1 + j_2) q(j_1, j_2) \quad (3-5)$$

$$B_i^b = 1 - \sum_{j_1=0}^{C_{\max} \times S_{\text{sw}} - u_i^b} \left(\sum_{j_2=0}^{C_{\max} \times (S_{\max} - S_{\text{sw}}) - d_i^b} q(j_1, j_2) \right) \quad (3-6)$$

$$B_i^c = 1 - \sum_{j_1=0}^{C_{\max} \times S_{\text{sw}} - u_i^c} \left(\sum_{j_2=0}^{C_{\max} \times (S_{\max} - S_{\text{sw}}) - d_i^c} q(j_1, j_2) \right) \quad (3-7)$$

$$P_B^b = B_1^b P_1^b + B_2^b P_2^b + \dots + B_p^b P_p^b = \sum_{i=1}^p B_i^b P_i^b \quad (3-8)$$

계산에 사용될 트래픽 환경은 표 2와 같이 구성하였다. 다양한 트래픽 환경을 고려하기 위해서 표 1에서 제시한 트래픽 군을 충실히 반영하였으며 각각의 트래픽 부하는 채널단위로 표준화시켰다. 그리고 계산의 편리성을 위해 1 프레임당 타임-슬롯은 10개, 직교 코드는 6개로 가정하였다.

표 2. 호계층 해석에 사용될 트래픽 환경

	Circuit call		
	Type-1	Type-2	Type-3
트래픽 종류	CC	SC	CC
Uplink Load	1	1	4
Downlink Load	1	6	4
λ [arrivals/min]	0.30	0.05	0.05
μ [1/min]	0.50	0.20	0.10
	Packet call		
	Type-1	Type-2	Type-3
트래픽 종류	IC	BC	BC
Uplink Load	1	5	1
Downlink Load	3	2	7
λ [arrivals/min]	0.25	0.10	0.25
μ [1/min]	0.50	0.75	0.40

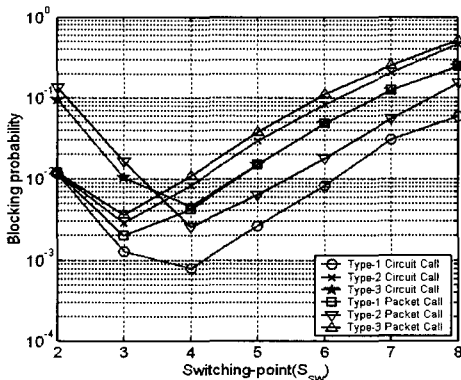


그림 4. 서킷호와 패킷호의 타입별 호손율

그림 4는 식 (3-5), (3-6)에 의해 구해진 서킷호와 패킷호의 타입별 차단율을 나타내고 있다. 각각의 트래픽 타입에 따라 최소의 호손율을 보이는 최적의 스윗칭-포인트가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 예를 들어 타입 Type-1과 3의 패킷호는 스윗칭-포인트 3에서 최소의 호손율을 보이는 반면 타입-2의 패킷호는 스윗칭-포인트 4에서 최소의 호손율을 가진다.

그림 5는 식 (3-8), (3-9)를 이용하여 구한 서킷호

와 패킷호의 전체 차단율을 나타낸다. 최소의 호손율을 가지는 최적의 스윗칭-포인트는 패킷호의 경우 3, 서킷호의 경우 4를 가진다.

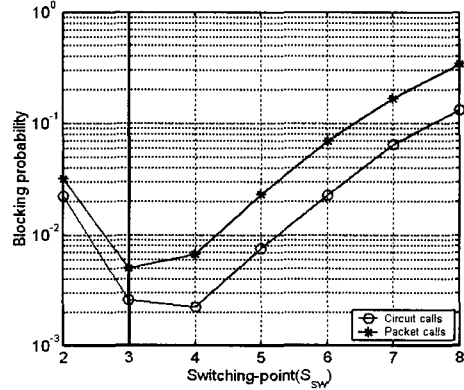


그림 5. 서킷호와 패킷호의 전체 호손율

그림 5에서 굵은 수직선은 수학적 모델을 이용하지 않고 상/하향 트래픽 부하량의 비율만을 고려한 직관적인 방법에 의해서 구한 스윗칭-포인트를 나타낸다. 부하의 비에 의한 스윗칭-포인트 결정은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$x = \frac{T_U}{T_U + T_D} S_{\max} \quad (3-11)$$

이 때 T_U , T_D 는 트래픽 부하와 호 도착율을 고려한 값이며 식 (3-12), (3-13)를 이용하여 구할 수 있다.

$$T_U = \sum_{i=1}^p u_i^p \lambda_i^p + \sum_{i=1}^r u_i^c \lambda_i^c \quad (3-12)$$

$$T_D = \sum_{i=1}^p d_i^p \lambda_i^p + \sum_{i=1}^r d_i^c \lambda_i^c \quad (3-13)$$

직관적 방법인 트래픽 부하에 의한 비의 결과는 수학적 모델을 이용한 결과와 패킷호의 경우는 잘 맞아 떨어지지만 서킷호의 경우는 그렇지 않음을 확인할 수 있다. 실제 시스템 운용시 시간 지연에 매우 민감한 서킷호에 비해 비교적 덜 민감한 패킷호는 버퍼를 뚫으로써 차단율을 낮출 수 있고 활용율도 더 높일 수 있다. 그러므로 패킷호보다 서킷호에 더 큰 비중을 두어 최적의 스윗칭-포인트를 정하는 것이 시스템 운용에 있어 보다 효율적이다. 그러므로 본 논문에서 제시한 트래픽 상황하에서의 최적의 스윗칭-포인트는 4로 잡는 것이 타당하겠다.

IV. 패킷-계층 해석

4.1 패킷-계층 수학적 모델

패킷-계층 해석은 호 수락 제어를 통하여 호가 성립된 패킷호들이 발생시키는 전체 패킷에 대한 시스템과 버퍼의 수용 가능한 용량을 벗어나 손실이 발생하는 패킷의 비율 즉, 패킷 손실율을 성능 지수로 하여 해석한다. 본 논문에서는 제시하는 모델은 하향 링크의 경우 기지국이 가지는 크기 K 인 버퍼, 상향 링크에서는 각 단말이 가지는 크기 k_i ($i=1, 2, \dots, \infty$)인 버퍼들의 합을 K 로 가정하여 모델링하였다. 따라서, 상/하향 링크에서 같은 방법으로 해석이 가능하므로 계산의 편의를 위해 하향 링크만을 고려하기로 한다.

패킷-계층 해석은 T_j 를 주기로 하는 이산-시간-다중-서버(discrete-time-multi-server)의 형태로 모델링이 가능하다. 현재 시스템에 사용 중인 패킷호가 매 프레임마다 발생시키는 패킷의 수는 일괄-기하-프로세스(batch geometric process)^[16]를 따른다고 가정하고, 매 프레임마다 도착하는 패킷의 수는 포아송(Poisson) 확률 분포를 보이며 서로 독립적이며 같은 분포(i.i.d., independent identical distributed)라고 가정한다. 호-계층에서의 해석과 유사하게 트래픽을 서킷호와 패킷호로 구분하고 각각을 하향 트래픽의 부하양에 따라 트래픽 종류를 구분한다.

먼저, 서킷호는 I^c 의 종류가 있으며 $Type-i$ 의 서킷호는 d_i^c 만큼의 채널단위를 하향 링크에서 사용한다고 가정한다. 또한 서킷호가 λ_i^c 의 호 발생율(call arrival rate)을 가지는 포아송 도착 과정을 따르며 μ_i^c 의 호 서비스율(call service time)을 가지는 지수 분포를 보인다고 가정한다.

한 프레임에 도착하는 서킷호의 개수가 k 가 될 확률을 a_k^c 라고 하면 a_k^c 는 Poisson 분포를 가지므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_k^c = \frac{(\lambda_c T_j)^k e^{-\lambda_c T_j}}{k!}, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (4-1)$$

여기서 T_j 는 1 프레임의 주기이고 λ_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^I d_i^c \lambda_i^c$$

여기서 트래픽 부하가 큰 서킷호는 트래픽 부하

가 1인 즉, 채널단위 하나를 필요로 하는 서킷호가 λ_i^c 만큼 여러 개 들어온다고 가정하였다. 서킷호의 서비스율 μ 는 다음과 같이 서비스율의 평균으로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^I d_i^c \lambda_i^c \mu_i^c}{\sum_{i=1}^I d_i^c \lambda_i^c}$$

s_j^i 는 i 개의 서킷호 중에서 j 개의 서킷호가 임의의 프레임에서 종료될 확률이며 다음과 같이 쓴다.

$$s_j^i = \binom{i}{j} (1 - e^{-\mu T_j})^j (e^{-\mu T_j})^{i-j}$$

한편, 매 프레임마다 각각의 패킷호에 서비스되는 패킷은 채널단위의 정수배로 표현되며 연결 수락 제어 시 승인된 평균 패킷 도착율 (λ_p)을 가지는 일괄-기하-과정(batch geometric process)을 따른다고 가정한다. 시스템에 매 프레임마다 도착하는 패킷의 수는 서로 독립적이며 같은 분포를 보이고 포아송 확률 분포를 보인다고 가정하며 특정 프레임에 k 개의 패킷이 도착할 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_k^p = \frac{(\lambda_p T_j)^k e^{-\lambda_p T_j}}{k!}, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (4-2)$$

일반적으로 패킷호는 웹서비스와 같이 필요한 경우에만 간헐적으로 패킷을 발생시키므로 패킷을 발생시키지 않는 경우에도 패킷호 연결은 그대로 유지될 수 있다. 이 점을 고려하여 본 논문에서는 패킷호의 서비스 시간은 서킷호에 비해서 매우 길다고 가정한다. 따라서 서킷호의 경우 호 발생과 종료가 빈번하게 일어나지만 패킷호의 경우 호 종료와 새로운 호의 발생은 일어나지 않고 접속된 패킷호에서 매 프레임마다 발생시키는 패킷에 대해서만 발생과 종료가 그림 6과 같이 일어난다. 또한 모든 패킷들은 채널 유닛에 해당하는 대역폭을 기준으로 단편화(Fragmentation) 또는 패딩(Padding)되어 전송한다고 가정하였으므로 모든 패킷의 서비스 시간은 1 T_j 로서 결정적(Deterministic) 분포를 가진다고 할 수 있다. 따라서, 그림 6에서 볼 수 있듯이 (N)번째 프레임에서 서비스를 받는 패킷(Arrival)은 모두 (N)번째 프레임 끝에서 모두 소멸(Departure)된다.

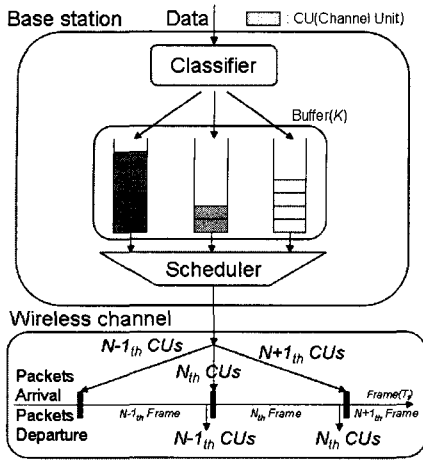


그림 6. 하향 링크에서의 패킷의 생성과 소멸.

패킷호의 생성과 소멸은 없다고 가정하므로 호 수락 제어 시 패킷호가 할당 받은 용량은 $\lambda_b T_g$ 가 되고 서킷호의 용량(C_c)은 하향 링크 용량(C)에서 패킷호의 용량을 뺀 나머지 부분 $C - \lambda_b T_g$ 가 된다. 발생하는 모든 패킷의 서비스 시간이 $1 T_g$ 이므로 패킷호의 용량보다 더 많은 양의 패킷이 발생하면서 서킷호의 채널 용량 중 빈 채널이 있을 경우에는 서킷호의 새로운 호가 발생하여 채널 요구 시까지 사용 가능하다고 가정한다. 한편, 발생한 패킷이 바로 서비스를 받지 못하는 경우 크기 K 인 버퍼에 임지로 저장되며 버퍼에도 저장되는 못하는 패킷들은 손실된다고 가정한다.

n 번째 프레임의 끝에서 버퍼에 남아 있는 패킷의 수를 n_k^b 라고 하며 n 번째 프레임의 끝에서 사용 중인 서킷호의 수를 n_k^c 로 나타내면 시스템 상태 $(n_k^b,$

$n_k^c)$ 는 마코프 체인을 이루게 된다. 각각이 가지는 상태는 행렬의 단순화를 위하여 사전편집의 규칙으로 $(0, 0), \dots, (0, C_c), (1, 0), \dots, (1, C_c), (K, 0), \dots, (K, C_c)$ 로 쓸 수 있다. 정상 상태를 나타내는 벡터 X 는 $0 \leq i \leq K, 0 \leq j \leq C_c$ 의 조건하에서 다음과 같이 정의 된다.

$$x_{i,j} = \lim_{k \rightarrow \infty} P\{n_k^b = i, n_k^c = j\},$$

$$x_i = (x_{i,0}, x_{i,1}, \dots, x_{i,C_c}),$$

$$X = (x_0, x_1, \dots, x_K).$$

따라서 (n_k^b, n_k^c) 의 천이(transition) 행렬 Q 는 식 (4-3)과 같이 나타난다.

$$Q = \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} & \dots & A_{0,K-1} & A_{0,K}^+ \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,K-1} & A_{1,K}^+ \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{C_c,0} & A_{C_c,1} & A_{C_c,2} & \dots & A_{C_c,K-1} & A_{C_c,K}^+ \\ 0 & A_{C_c,0}^+ & A_{C_c,1}^+ & A_{C_c,2}^+ & \dots & A_{C_c,K-1}^+ \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_{C_c,C_c} & A_{C_c,C_c+1}^+ \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_{C_c,C_c-1} & A_{C_c,C_c}^+ \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$(C_c+1) \times (C_c+1)$ 크기의 서브 행렬인 $A_{i,j}$ 는 임의의 프레임의 끝에서 j 개의 패킷이 버퍼에 대기 중이고 다음 프레임의 끝에서는 j 개의 패킷이 버퍼에 쌓여있을 천이 확률을 나타낸다. 서브 행렬 $A_{i,j}$ 와 $A_{i,j}^+$ 는 본 페이지와 다음페이지 하단의 식 (4-4)~(4-7)과 같이 나타낼 수 있다. 한편, $j < 0$ 일 때 $a_j^b = 0$ 이고 $Q_c(m, n)$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{i,j} = \begin{pmatrix} a_j^b & a_j^b & \dots & a_j^b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j^b & a_j^b & \dots & a_j^b \end{pmatrix} * Q_c, \quad i \leq C - C_c \quad (4-4)$$

$$A_{i,j} = \begin{pmatrix} a_j^b & a_j^b & \dots & a_j^b \\ a_j^b & a_j^b & \dots & a_j^b \\ a_{j-1}^b & a_{j-1}^b & \dots & a_{j-1}^b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{j-i+C-C_c+1}^b & a_{j-i+C-C_c+1}^b & \dots & a_{j-i+C-C_c+1}^b \\ a_{j-i+C-C_c}^b & a_{j-i+C-C_c}^b & \dots & a_{j-i+C-C_c}^b \end{pmatrix} * Q_c, \quad i > C - C_c \quad (4-5)$$

$$A_{i,j}^+ = \begin{pmatrix} (a_j^b)^+ & (a_j^b)^+ & \dots & (a_j^b)^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_j^b)^+ & (a_j^b)^+ & \dots & (a_j^b)^+ \end{pmatrix} * Q_c, \quad i \leq C - C_c \quad (4-6)$$

$$Q_c(m, n) = \begin{cases} \sum_{k=0}^n s_m^{-k} a_{n-k}^c & \text{if } n < C_c \\ \sum_{k=0}^n s_m^{-k} (a_{n-k}^c)^+ & n = C_c \end{cases}$$

이때 $(a_j^p)^+$ 와 $(a_j^c)^+$ 는 다음의 식 (4-9), (4-10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$(a_j^p)^+ = 1 - \sum_{k=0}^{j-1} a_k^p \quad (4-9)$$

$$(a_j^c)^+ = 1 - \sum_{k=0}^{j-1} a_k^c \quad (4-10)$$

한편, $M_1 * M_2$ 는 행렬 M_1 과 M_2 의 행렬 원소(element)와 원소끼리의 곱으로 정의한다. 정상 상태(steady state) 확률 X 는 식 (4-3)과 확률의 정의를 이용한 다음의 식 (4-11)에 의해 구할 수 있다.

$$XQ = X, \quad \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^{C_c} x_{i,j} = 1 \quad (4-11)$$

프레임 끝에서의 정상 상태 확률 X 를 이용하여 패킷 손실율(packet loss probability)은 다음 페이지 하단의 식 (4-12)와 같이 구할 수 있다. $(i+j-c)^+$ 는 $\max(i+j-C, 0)$ 를 뜻한다.

4.2 패킷-계층 성능 분석

패킷-계층의 성능 분석을 위해 다음과 같은 시스템 파라미터를 정의한다.

- $T_f = 10$ [msec]
- $C = 30$ [channel units]
- $K = 40$ [channel units]
- $\lambda_c = 0.1$ [calls/sec]
- $\mu^{-1} = 120$ [sec]

그림 7과 그림 8은 패킷 도착율과 서킷호 도착율 그리고 서킷호 서비스율에 따른 패킷 손실율의 변

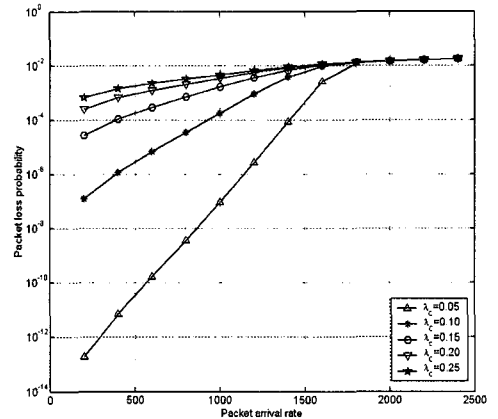


그림 7. 패킷 도착율과 서킷호 도착율에 따른 패킷 손실율의 변화

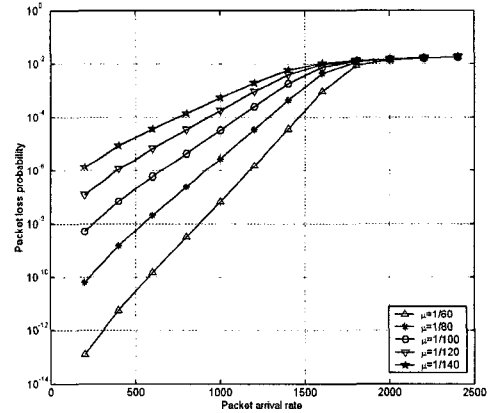


그림 8. 패킷 도착율과 서킷호 서비스율에 따른 패킷 손실율의 변화

화를 각각 나타내고 있다. 우선 패킷 도착율이 증가할수록 패킷 손실율이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 서킷호의 트래픽 부하량이 커질수록 즉, 도착율 또는 평균 서비스 시간이 증가하게 되면 패킷 손실율 또한 커지게 됨을 볼 수 있다. 특히 그림 7과 그림 8에서 모두 패킷 도착율이 약 2000 packets/

$$A_{i,j}^+ = \begin{pmatrix} (a_j^p)^+ & (a_j^c)^+ & \cdots & (a_j^p)^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_j^p)^+ & (a_j^c)^+ & \cdots & (a_j^p)^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{j-i+C-C_c+1}^p)^+ & (a_{j-i+C-C_c+1}^c)^+ & \cdots & (a_{j-i+C-C_c+1}^p)^+ \\ (a_{j-i+C-C_c}^p)^+ & (a_{j-i+C-C_c}^c)^+ & \cdots & (a_{j-i+C-C_c}^p)^+ \end{pmatrix} * Q_c, \quad i > C - C_c \quad (4-7)$$

$$P_L = \sum_{j=0}^{C_c} \sum_{i=0}^K x_{i,j} \sum_{k=K-(i+j-C)^+}^{\infty} a_k^p \cdot \frac{k - K + (i+j-C)^+}{k} \quad (4-12)$$

sec를 넘어서게 되면 서킷호의 도착율과 서비스율에 상관없이 패킷 손실율이 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 서킷호에 할당된 채널이 패킷 도착율의 증가에 따라 감소되고 따라서 서킷호가 채널을 사용하지 않을 확률이 0에 수렴하기 때문이다. 따라서 패킷호는 서킷호의 유휴(idle) 상태 채널을 사용할 수 없게 되어 그래프가 수렴하게 된다.

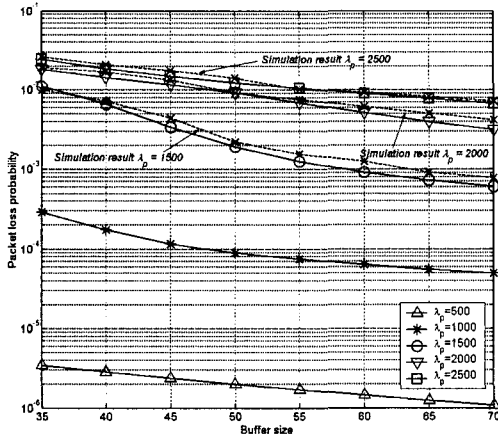


그림 9. 버퍼의 크기와 패킷 도착율의 변화에 따른 패킷 손실율의 변화

그림 9는 버퍼의 크기와 패킷 도착율에 따른 패킷 손실율을 보여주고 있다. 수학적 해석의 정확성을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과도 함께 도시하였다. 그림 9를 통하여 버퍼의 크기와 패킷 도착율과의 일반적인 관계를 확인할 수 있다. 즉, 버퍼의 크기가 커질수록, 패킷 도착율이 낮을수록 패킷 손실율은 감소하며, 반대로 버퍼의 크기가 작을수록, 패킷 도착율이 커질수록 패킷 손실율이 증가한다. 한편, 그림 9를 이용하면 서비스 타입에 따른 필요한 버퍼 크기를 구할 수 있다. 예를 들어, 본 논문에서 제시한 트래픽 환경을 가지는 3세대 이동통신 사업자가 평균 패킷 도착율이 1000 packets/sec 이며 최대 패킷 손실율이 0.0001인 고품질의 동영상 서비스를 제공하고자 한다고 가정하자. 이 때 필요한 버퍼 크기는 그림 9에 의하여 적어도 48이 됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 차세대 이동통신의 특성이라 할 수 있는 비대칭성과 불균질성을 띄는 다양한 트래픽이 혼재하는 시분할-코드분할 다중 접속 시스템에

서 효율적인 무선 자원 관리를 위하여 대기이론에 바탕을 둔 수학적 모델을 통해 호-계층과 패킷-계층의 각각 대표적인 서비스 품질 파라미터인 호손율과 패킷 손실율을 구하였다.

호-계층에서의 해석은 호 수락 제어 단계에서, 즉 호 성립을 위하여 채널 할당을 요구하는 단계에서 이루어졌으며 호손율은 전체 접속 시도 호에 대한 차단된 호의 비율로써 나타내었다. 상/하향 트래픽 부하를 2차원 상태로 나타내고 대기 이론을 통해 호손율을 구할 수 있었다. 이와 함께 상/하향 트래픽 부하에 따른 최소의 호손율을 나타내는 스위칭-포인트를 구할 수 있었다.

한편 패킷-계층에서의 해석은 호 수락 제어를 통해 호 성립 후 발생한 전체 패킷에 대한 손실된 패킷의 비율로 패킷 손실율을 나타냈다. 버퍼에 대기하는 패킷의 수와 서비스 중인 서킷호의 수를 2차원적 배열을 통해 패킷 손실율을 구할 수 있었으며 패킷 도착율과 서킷호의 도착율 그리고 서비스율에 따른 관계를 알아보았다. 또한 특정 트래픽 환경에서 필요한 버퍼 크기를 구할 수 있었다. 이와 같은 결과를 실제 적용시 중요한 시스템 파라미터가 될 수 있으며 무선자원의 효율적 관리에 많은 도움을 줄 것으로 예상된다.

참고 문헌

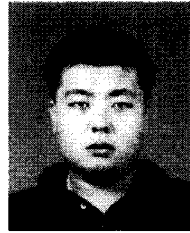
- [1] Prodipta Chaudhury, "The 3GPP Proposal for IMT-2000," *IEEE Communication Magazine*. Dec. 1999.
- [2] D. G. Jeong and W. S. Jeon, "Comparison of Time Slot Allocation Strategies for CDMA/TDD Systems," in *Proc. IEEE VTC 2000-Spring*, vol. 2, pp. 1186-1190, May 2000.
- [3] Povey, G. J. R.; Holma, H. ; Toskala, A; "Hybrid FDD/TDD-CDMA for third generation cellular systems," *CDMA Techniques and Applications for Third Generation Mobile Systems*(Digest No : 1997/129), *IEE Colloquium*, pp. 2/1-2/6, May 1997.
- [4] T. Ojanperä and R. Prasad, "An Overview of Air Interface Multiple Access for IMT-2000/UMTS," *IEEE Communication Magazine*. Sep. 1998.
- [5] Hsiao-Hwa Chen, et. al., "China's Perspectives on 3G Mobile Communications and

Beyond : TD-SCDMA Technology," *IEEE Wireless Communications*, vol. 9, issue : 2, pp. 48-59, April 2002.

- [6] Marco Conti, Enrico Gregori, "Traffic and Interference Adaptive Scheduling for Internet Traffic in UMTS," in *Proc. ISCC 2002*, pp. 391-396, July 2002.
- [7] T. Kriengchaiyapruk, Ingo Forkel, "Adaptive Switching Point Allocation in TD/CDMA Systems," in *Proc. IEEE VTC 2002-Fall*, vol. 3, pp. 1456-1460, Sep. 2002.
- [8] ETSI., TR 101 112, *Selection Procedures for the Choice of Radio Transmission Technologies of the UMTS*, V3.2.0, April 1998.
- [9] Oliver Yu, "Optimal Medium Access and Admission Controls of Multimedia Traffic over TD-CDMA Systems," in *Proc. WCNC 2003*, vol. 3, pp. 1573-1578, March 2003.
- [10] 신정채, 조호신, "TD-CDMA 이동통신 시스템에서 타임 슬롯 할당 방법," *한국통신학회 하계종합학술대회*, July 2003.
- [11] Ho-Shin Cho, et al., "A Time-Slot Assignment Scheme in TD-CDMA/TDD Systems," *IEICE Tr. Comm.* vol. E86-B, no. 12, pp. 3622-3625, Dec. 2003.
- [12] Ho-Shin Cho, et al., "Call Blocking Probability for Heterogeneous and Asymmetrical Traffics in a TD-CDMA System," *IEEE Comm. Letter*, vol. 8, no. 8, pp. 706-708, Dec. 2004.
- [13] Toni Janevski, *Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks*, Artech House, INC., 2003.
- [14] M. F. Neuts, *Structured Stochastic Matrices of M/G/1 Type and Their Applications*, Marcel Dekker, INC., 1989.
- [15] 3GPP TS 23.107, *Technical Specification Group Services and System Aspects; QoS Concept and Architecture (Release 5)*, V5.5.0, Jan. 2002.
- [16] H. Bruneel and B. Kim, *Discrete-time models for communication systems including ATM*, Kluwar Academic Publishers, 1993.

신정채 (Jung chae Shin)

정회원



2002년 8월 경북대학교 전자전기공학부 공학사
 2004년 8월 경북대학교 정보통신학과 공학석사
 2004년 9월~현재 경북대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 휴대인터넷

이유태 (Yutae Lee)

정회원

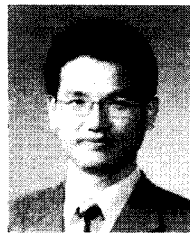


1992년 2월 한국과학기술원 수학과 이학사
 1994년 2월 한국과학기술원 응용수학과 이학석사
 1997년 8월 한국과학기술원 수학과 이학박사
 1997년 9월~2000년 2월 한국

전자통신연구소 선임연구원
 2000년 3월~현재 동의대학교 정보통신공학과 조교수
 <관심분야> 확률과정론, 큐잉이론, 통신망해석

김정호 (Jeong ho Kim)

정회원

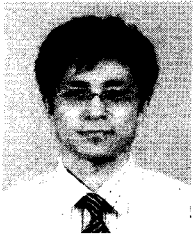


1991년 2월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
 1993년 2월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1999년 2월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
 1993년 1월~1995년 7월 LG전

자 멀티미디어 연구소
 1999년 3월~2000년 2월 LG정보통신 중앙연구소 선임연구원
 20009년 3월~2001년 6월 Virginia Tech. MPRG (Mobile Radio Research Group) Visiting Scholar
 2001년 7월~2002년 8월 LG전자 UMTS 시스템 연구소 책임연구원
 2002년 9월~현재 이화여자대학교 공과대학 정보통신학과 조교수
 <관심분야> 스마트 안테나 시스템, 무선 디지털 통신, 확산 대역통신, 이동통신, 네트워크, 휴대 인터넷

조 호 신 (Ho shin Cho)

정회원



1992년 2월 한국 과학기술원

전기 및 전자공학과 공학사

1994년 2월 한국 과학기술원

전기 및 전자공학과 공학석사

1999년 2월 한국 과학기술원

전기 및 전자공학과 공학박사

1999년 3월~2001년 2월 한국

전자통신연구원 선임연구원

2001년 3월~2003년 2월 한국항공대학교 전자정보

통신컴퓨터공학부 전임강사

2003년 3월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

조교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽 제어, 휴대인터넷