

ATM 망에서의 출력제어 대기행렬 시스템의 분석

正會員 金敬洙*, 李秉基*

Analysis of Output-Controlled Queueing Systems in ATM Networks

Kyeong Soo Kim*, Byeong Gi Lee* Regular Members

要 約

본 논문에서는 출력제어 대기행렬 시스템(OCQS: Output-Controlled Queueing System)의 대기행렬 성능과 출력 전력 스펙트럼을 분석한다. OCQS의 셀 서비스 확률은 입력 도착 및 대기행렬 프로세스의 이전 및 현재 상태와 셀 서비스 프로세스의 이전 상태에 의하여 제어되므로, OCQS는 출력이 시스템 상태에 따라서 변하는 다양한 ATM 트래픽 제어 시스템들의 모델로 사용될 수 있다. 시스템 모델링에서는 셀 차원에서의 시스템 동작이 전체적인 성능에 미치는 영향을 충분히 파악하기 위하여 입력 도착, 대기행렬 및 셀 서비스 프로세스들의 상태로 정의되는 3차원 마르코프 사슬로 시스템을 기술한다. 본 대기행렬 모델의 유용성을 예시하기 위하여 OCQS의 특별한 예인 다준위 트래픽 성형기(MLTS: Multi-Level Traffic Shaper)의 성능분석을 수행한다. 분석에서 서버의 이전 상태에 대한 셀 서비스 확률의 의존도를 반영하기 위하여 셀 준위 히스테리시스 계수의 개념을 도입하고, 이를 바탕으로 수치예들을 통하여 MLTS의 대기행렬 성능 및 출력 전력 스펙트럼을 예시한다.

ABSTRACT

In this paper we analyze the queueing performance and the output power spectrum of an output-controlled queueing system(OCQS). The cell service probability of the OCQS is controlled by the previous and the present states of the input arrival and queueing processes, and the previous state of the cell service process, so it can be used in modeling various traffic control systems with state-dependent output in ATM networks. In system modeling, we describe the system with a three-dimensional Markov chain which is defined by the states of the input arrival, the queueing, and the cell service processes so that we can fully investigate the effects of cell-level local dynamics on the overall performance. In order to demonstrate the versatility of this queue-

*Dept. of Electronics Engineering, Seoul
National University
論文番號: 95168-0506
接受日字: 1995年 5月 6日

ing model, we carry out performance analysis of the multi-level traffic shaper(MLTS), a special case of the OCQS. In this analysis, we newly introduce the concept of the *cell-level hysteresis coefficient* to take into account the dependency of the cell service probability on the previous state of the server, and in support of the analysis we demonstrate the queuing performance and the output power spectrum of the MLTS through numerical examples.

I. 序 論

대기행렬 시스템은 통신망에서 사용되는 여러 가지 시스템의 성능을 분석하기 위한 모델로서 많이 연구되어 왔다. 대부분의 경우, 군집성(burstiness) 및 연관성(correlation)과 같은 입력 트래픽의 특성이 시스템 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 신호원(source) 모델을 주로 연구한 반면, 서비스율은 단순히 고정되어 있다고 가정하였다⁽¹⁾⁽²⁾. 그러나 비동기식 전달 모드(ATM : Asynchronous Transfer Mode)망에서는, 폴리싱(policing), 트래픽 성형(traffic shaping) 등의 트래픽 제어에 사용되는 시스템들을 적절하게 분석하기 위해서 보다 복잡한 대기행렬 모델이 요구된다. 이러한 시스템에서는 서비스율이 더 이상 고정되어 있지 않고 시스템의 상태에 따라서 변한다.

M. Sidi 등은 푸와송(Poisson) 프로세스 입력 모델을 기반으로 리키 버킷(leaky bucket) 방식의 성능을 분석하였다⁽³⁾. F. Bernabei 등은 ON-OFF 신호원 모델에 대하여 버퍼 상태에 따라서 출력률을 제어하는 (N)-준위 성형기를 제안하고 분석하였다⁽⁴⁾. 한편, K. S. Kim과 B. G. Lee는 MMPP(Markov-Modulated Poisson Process) 신호원 모델을 바탕으로 동기기능을 지원하기 위하여 요구되는 최소 및 최대 셀률을 제어할 수 있는 3준위 트래픽 성형기(TLTS : Three-Level Traffic Shaper)를 제안하고 그 성능을 분석하였다⁽⁵⁾. 최근에 S. Chong과 S. Q. Li는 [6], [7]에서 도입했던 스펙트럼 분석 방법을 확장하여 리키 버킷 시스템의 출력 전력 스펙트럼을 구하고, 입력 및 출력 전력 스펙트럼을 이용하여 입출력 상호간의 연관성 및 리키 버킷 시스템이 저주파 출력 전력 스펙트럼에 미치는 효과를 조사하였다. 이 연구결과에 따르면 셀 손실 및 셀 지연과 같은 대기행렬 시스템의 성능은 입력 트래픽의 저주파 전력 스펙트럼에 크게 좌우되므로, 이

상적인 트래픽 성형기는 주어진 제한조건 내에서 입력 트래픽의 저주파 전력 스펙트럼을 최대한 감소시키는 성형기를 의미한다. 따라서 기존의 시간 영역 대기행렬 분석에 더하여 주파수 영역의 스펙트럼 분석의 필요성이 강하게 대두되고 있다.

본 논문에서는 셀 서비스 확률이 입력 및 대기행렬 프로세스의 이전 및 현재 상태와 셀 서비스 프로세스의 이전 상태에 의하여 제어되는 출력제어 대기행렬 시스템(OCQS : Output-Controlled Queueing System)을 제안하고 그 성능을 분석하고자 한다. OCQS는 ATM 망에서 시스템의 상태에 따라 출력이 가변적인 트래픽 제어 시스템들의 모델로 적합하다. 본 논문의 목적은 이처럼 출력 프로세스가 시스템 내의 여러 가지 프로세스의 상태에 따라서 제어되는 경우에 그 입출력 특성을 스펙트럼 분석 방법과 같은 강력한 분석 도구로서 설명할 수 있는 일반적인이고 융통성 있는 대기행렬 모델을 제안하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다 : 2절에서는 OCQS를 3차원 마르코프 사슬(MC : Markov Chain)을 이용하여 모델링하고 정상상태(steady state) 확률을 구한 뒤, 이를 기반으로 OCQS의 성능척도로서 셀 손실 및 셀 지연과 출력 전력 스펙트럼을 유도한다. 3절에서는 제안한 OCQS 모델의 유용성을 보이기 위하여 OCQS의 특별한 예인 다준위 트래픽 성형기(MLTS : Multi-Level Traffic Shaper)의 분석을 행하고 예제들을 통하여 MLTS 파라미터가 대기행렬 성능 및 출력 전력 스펙트럼에 미치는 영향을 조사한다.

II. 시스템 모델링

1. 동작 및 관련 점의 기술

OCQS 및 관련 프로세스들은 그림 1에 보인 것과 같다.

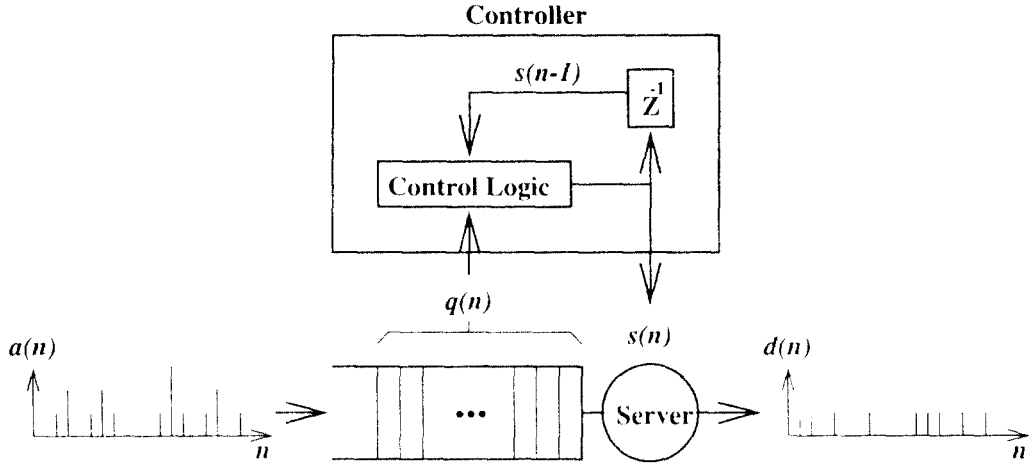


그림 1. 출력제어 대기행렬 시스템.
Fig. 1. Output-controlled queueing system.

OCQS는 크기가 K 인 버퍼와 상태가 제어가능한 서버 및 서버의 제어를 위한 제어기로 구성된다. 그림 1에 보인 것과 같이 모든 프로세스들은 ATM 망에서 한 개의 셀을 전송하는 데에 걸리는 시간인 셀 시간 Δt 를 단위로 정의된다. 분석을 위해서 불규칙 변수 $a(n)$, $q(n)$ 및 $d(n)$ 을 다음과 같이 정의한다: $a(n)$ 은 n 번째 시간 구간 $((n-1)\Delta t, n\Delta t)$ 동안 도착한 셀들의 개수를 나타낸다; $q(n)$ 은 $\{(n-1)\Delta t\}$ 시점에서의 버퍼 내의 셀의 개수를 나타낸다; $d(n)$ 은 시점 $n\Delta t$ 에서 시스템으로부터 출발하는 셀들의 개수를 나타낸다. 또한 $s(n)$ 은 시점 $n\Delta t$ 에서 서비스가 제공되었는 지 여부를 나타내는 불규칙 변수로서 다음과 같이 정의된다:

$$s(n) \equiv \begin{cases} 1, & \text{서버가 서비스를 제공할 때.} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우.} \end{cases} \quad (1)$$

분석의 편의를 위하여 서버에 의해서 제공되는 서비스는 버퍼 내의 셀의 유무와는 상관없이 있다고 가정한다. 이는 $s(n)$ 은 버퍼에 셀이 없는 경우에도 1의 값을 취할 수 있음을 의미한다. $s(n)$ 의 값은 입력 도착 프로세스 및 대기행렬 프로세스의 이전 및 현재 상태와 $s(n)$ 의 이전 상태, 즉 $s(n-1)$ 에 의하여 확률적으로 결정된다. OCQS의 융통성은 바로 이 $s(n)$ 의 제어가능성에 있다.

위의 정의들로부터 다음과 같은 두 가지 관계식을 얻을 수 있다. 대기행렬 프로세스에 대해서는

$$q(n) = [a(n-1) + q(n-1) - s(n-1)]_0^K \quad (2)$$

이며, 출력 출발 프로세스에 대해서는

$$d(n) = [a(n) + q(n)]_0^{*(\infty)} \quad (3)$$

이다. 여기서 $[\cdot]_l^u$ 는 다음과 같이 정의된다:

$$[\cdot]_l^u = \begin{cases} u, & x > u \text{ 일 때,} \\ x, & l < x < u \text{ 일 때,} \\ l, & x < l \text{ 일 때,} \end{cases} \quad (4)$$

2. 시스템 정상상태 확률 분석

상태공간 $\{0, 1, 2, \dots\}$ 인 입력 도착 프로세스 $a(n)$ 을 N 개의 상태를 가지는 이산시간 MMPP로 모델링한다. $r(n)$ 을 n 번째 시간 구간에서 MMPP의 상태라 하면, MMPP는 $r(n)$ 이 취할 수 있는 상태들의 집합인 도착률 벡터 $r = (r_0, r_1, \dots, r_{N-1})$ 와 $r(n)$ 에 대한 전이 확률 (transition probability) 행렬 Q 로 기술할 수 있다. 이때 Q 의 정상상태 확률 벡터 π 는 $\pi Q = \pi$ 및 $\pi e_N = 1$ 인 연립방정식으로부터 구할 수 있다. 여기서 e_N 은

모든 원소가 1인 N 차원 열벡터(row vector)이다. 또 평균 입력 도착률은 $\bar{r} = \pi r^T$ 로 주어진다.

이러한 입력 모델에 대해서 OCQS는 상태공간 $E = \{0, 1, \dots, K\} \times \{0, 1\} \times \{0, 1, \dots, N-1\}$ 에서 상태가 $(q(n), s(n), r(n))$ 으로 정의되는 3 차원 MC로 기술할 수 있다. 전이 확률 행렬은

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \cdots & P_{0,K} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \cdots & P_{1,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{K,0} & P_{K,1} & \cdots & P_{K,K} \end{pmatrix} \quad (5)$$

로 주어지며, 여기서

$$P_{i,j} = \begin{pmatrix} P_{(i,0)(j,0)} & P_{(i,0)(j,1)} \\ P_{(i,1)(j,0)} & P_{(i,1)(j,1)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

이며, $P_{(i,k)(j,l)}$ 는 (x, y) 번째 원소가 다음과 같이 정의되는 $N \times N$ 행렬이다:

$$P_{(i,k,x)(j,l,y)} \equiv \Pr \left\{ \begin{array}{l} q(n)=j, s(n)=l, r(n)=y | \\ q(n-1)=i, s(n-1)=k, r(n-1)=x \end{array} \right\} \quad (7)$$

전이 확률 행렬을 구하기 위해서 먼저 도착 확률 행렬 A_m 을 그 (x, y) 번째 원소가 다음과 같이 주어지는 $N \times N$ 행렬로 정의한다:

$$A_m(x, y) = \Pr \{ a(n-1)=m, r(n)=y | r(n-1)=x \}. \quad (8)$$

그러면 이산시간 MMPP의 경우 도착확률 행렬 A_m 은

$$A_m = \text{diag} \left[e^{-r_1 \Delta t} \frac{(r_1 \Delta t)^m}{m!} \right] Q \quad (9)$$

로 주어지며, 여기서 $\text{diag}[\cdot]$ 은 대각 행렬을 의미한다. 다음으로 셀 서비스 확률 행렬 $S_{i,j,k,l}$ 을 (x, y) 번째 원소가 다음과 같이 주어지는 $N \times N$ 행렬로 정의한다:

$$S_{i,j,k,l}(x, y) = \Pr \{ s(n) = l | q(n-1) = i, q(n) = j, s(n-1) = k, r(n-1) = x, r(n) = y \}. \quad (10)$$

$S_{i,j,k,l}(x, y)$ 의 정의는 모델링하고자 하는 목표 시스템에 따라 달라진다. 이러한 정의들로부터 $P_{i,j}$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다:

- $i = j = 0$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} A_0 \odot S_{i,j,k,l}, & k = 0 \text{일 때,} \\ A_0 \odot S_{i,j,k,l} + A_1 \odot S_{i,j,k,l}, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11a)$$

- $j = i-1$ 이고 $0 < i < K$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} O_N, & k = 0 \text{일 때,} \\ A_0 \odot S_{i,j,k,l}, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11b)$$

- $i \leq j < K-1$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} A_{j-i} \odot S_{i,j,k,l}, & k = 0 \text{일 때,} \\ A_{j-i+1} \odot S_{i,j,k,l}, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11c)$$

- $j = K-1$ 이고 $i < K$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} A_{K-i-1} \odot S_{i,j,k,l}, & k = 0 \text{일 때,} \\ \sum_{m=K-i}^{\infty} A_m \odot S_{i,j,k,l}, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11d)$$

- $j = K-1$ 이고 $i = K$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} O_N, & k = 0 \text{일 때,} \\ \sum_{m=K-i}^{\infty} A_m \odot S_{i,j,k,l}, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11e)$$

- $j = K$ 인 경우:

$$P_{(i,k)(j,l)} = \begin{cases} \sum_{m=K-i}^{\infty} A_m \odot S_{i,j,k,l}, & k = 0 \text{일 때,} \\ O_N, & k = 1 \text{일 때.} \end{cases} \quad (11f)$$

- 그 밖의 경우:

$$P_{i,j} = O_{2N}. \quad (11g)$$

여기서 \odot 는 원소들간의 곱셈을 나타내며 O_n 은 모든 원소가 0인 $n \times n$ 행렬을 나타낸다. 이때 P 가 기약행렬(irreducible matrix)이기 위한 충분조건은 $0 < S_{i,j,k,l}(x, y) < 1, \forall (i, j, k, l, x, y)$ 이다. 본 논문에서는 이 충분조건이 만족된다고 가정한다.¹⁾ P 가 기약행렬인 경우, 정상상태 확률 벡터 η 는 다음의 선형 연립방정식으로부터 구할 수 있다:

1) 충분조건이 만족되지 않는 경우에 대해서는 (9)를 참조.

$$\begin{cases} \eta P &= \eta, \\ \eta e^{-2\pi(N+1)} &= 1. \end{cases} \quad (12)$$

여기서 $\eta=(\eta_0, \eta_2, \dots, \eta_k)$ 이고 $\eta_i=(\eta_{i,0}, \eta_{i,1})$ 이다. 이때 $\eta_{i,j}$ 또한 N 차원 벡터로서 $\eta_{i,j}=(\eta_{i,j,0}, \eta_{i,j,1}, \dots, \eta_{i,j,N-1})$ 이며, 원소 $\eta_{i,j,k}$ 는

$$\eta_{i,j,k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{q(n) = i, s(n) = j, r(n) = k\} \quad (13)$$

로 정의된다. 따라서 대기행렬의 길이 분포는 다음과 같이 주어진다:

$$q_i \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{q(n) = i\} = \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \eta_{i,j,k}, \quad (14)$$

$$i=0, 1, \dots, K.$$

이때 P 가 상위 블록 헤센버그 (upper block Hessenberg) 행렬이므로 [10]에서 제시된 효율적인 계산 알고리즘을 적용할 수 있다.

마지막으로 상태공간이 $\{0, 1\}$ 인 출력 출발 프로세스 $d(n)$ 의 정상상태 확률을 구한다. d_i 를 다음과 같이 정의되는 출력 출발 프로세스의 정상상태 확률이라 하자:

$$d_i \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{d(n) = i\}, \quad i=0, 1. \quad (15)$$

버퍼가 비어 있거나 서버가 서비스를 제공하지 않는 경우를 제외하고는 셀은 항상 시스템으로부터 출발하므로, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:

$$d(n) = \begin{cases} 0, & a(n) = q(n) = 0 \text{이거나 } s(n) = 0 \text{일 때,} \\ 1, & \text{그렇지 않은 경우.} \end{cases} \quad (16)$$

따라서 d_i 는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\begin{cases} d_0 = \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^{N-1} \eta_{i,0,j} + \sum_{i=0}^{N-1} e^{-\pi i} \eta_{0,1,i}, \\ d_1 = 1 - \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^{N-1} \eta_{i,0,j} - \sum_{i=0}^{N-1} e^{-\pi i} \eta_{0,1,i}. \end{cases} \quad (17)$$

3. 성능척도 계산

OCQS의 성능척도로서 셀 손실, 셀 지연 및 출력 전력 스펙트럼을 선택하고, 시스템내 각 프로세스의 정상

상태 확률 분포를 이용하여 이들을 계산하도록 한다.

먼저 셀 손실 및 셀 지연을 구해 보자. 입력 도착 프로세스 및 출력 출발 프로세스의 평균율로부터 평균 셀 손실률 CLR 은

$$CLR \equiv \frac{\bar{r} - \bar{d}}{r} = \frac{\pi r^T \left(1 - \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^{N-1} \eta_{i,0,j} - \sum_{i=0}^{N-1} e^{-\pi i} \eta_{0,1,i} \right)}{\pi r^T} \quad (18)$$

이다. 한편 정상상태 대기행렬 길이 분포로부터 평균 대기행렬 길이 \bar{q} 와 평균 셀 지연 (셀 시간을 단위로 한 평균 대기시간) \bar{D} 는 각각

$$\bar{q} = \sum_{i=0}^K q_i \cdot i, \quad (19)$$

$$\bar{D} = \frac{\bar{q}}{(1 - CLR)r} = \frac{\bar{q}}{d} \quad (20)$$

로 주어진다.

다음으로 출력 출발 프로세스 $d(n)$ 의 전력 스펙트럼을 구해 보자. $q(n)=i, s(n)=j, r(n)=k$ 및 $a(n)=l$ 일 때의 $d(n)$ 의 값을 $d(i, j, k, l)$ 이라 하면 (16) 식으로부터 다음 관계를 얻는다:

$$d(i, j, k, l) = \begin{cases} 0, & i = 1 = 0 \text{이거나 } j = 0 \text{일 때,} \\ 1, & \text{그렇지 않은 경우.} \end{cases} \quad (21)$$

또한 $\tilde{d}(i, j, k)$ 를

$$\begin{aligned} \tilde{d}(i, j, k) &\equiv \sum_{l=0}^1 d(i, j, k, l) \Pr\{a(n) = l \mid r(n) = k\} \\ &= \begin{cases} 0, & j = 0 \text{일 때,} \\ 1, & j = 1 \text{이고 } i > 0 \text{일 때,} \\ 1 - e^{-\pi k}, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

로 정의하면, $d(n)$ 의 자기상관 (autocorrelation) 함수는 $\tilde{d}(i, j, k)$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_d(n) &\equiv E\{d(m)d(m+n)\} \\ &= \sum_{i,j,k} \sum_{u,v,w} \tilde{d}(i, j, k) \tilde{d}(u, v, w) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\eta_{i,j,k} P^{n \times n} \eta_{u,v,w}^T$$

여기서

$$P^{(n)}_{(i,j,k)(u,v,w)} \equiv \left. \begin{aligned} &\Pr\{q(m+|n)=u, s(m+|n)=v, r(m+|n)=w|q(m)=i, \\ &s(m)=j, r(m)=k \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

이다. 따라서 $R_d(n)$ 의 이산시간 푸리에 (Fourier) 변환을 취하면 출력 전력 스펙트럼을 다음과 같이 구할 수 있다²⁾

$$P_d(\Omega) \equiv \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_d(n) e^{-j\Omega n}$$

$$= \begin{cases} 2\pi \bar{d}^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - 2\pi n) & \Omega = 0\text{일 때,} \\ 2 \sum_{i,j,k} \sum_{u,v,w} \bar{d}(i,j,k) \bar{d}(u,v,w) \eta_{i,j,k} \\ \times \text{Real}\{I - e^{-j\Omega} P\}^{-1}_{(i,j,k)(u,v,w)} \\ - \sum_{i,j,k} \bar{d}^2(i,j,k) \eta_{i,j,k} & \Omega \neq 0\text{일 때,} \end{cases} \quad (25)$$

III. MLTS의 분석

본 절에서는 OCQS의 유용성을 보이기 위하여 OCQS의 특별한 예인 MLTS의 성능을 분석하고 예제를 통하여 MLTS의 파라미터가 셀 손실 및 셀 지연과 출력 전력 스펙트럼 등의 시스템 성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 또한 모의실험 결과와 분석결과를 비교함으로써 2 절에서 행한 분석의 타당성을 검증하겠다.

분석의 대상으로서 다음과 같이 동작하는 3 준위 MLTS를 고려한다: $m=1, 2, 3$ 에 대하여,

$$\Pr\{s(n) = l\} = \begin{cases} p_m, & l_{m-1} < q(n) < l_m \text{이고} \\ & s(n-1) = 0\text{일 때,} \\ hp_m, & l_{m-1} \leq q(n) < l_m \text{이고} \\ & s(n-1) = 1\text{일 때.} \end{cases} \quad (26)$$

여기서 p_m 은 $l \geq 0$ 에 대하여 $p_m \leq p_{m+1}$ 인 서비스 확률이고, l_m 은 $l_0=0$ 이고 $l_3=K+1$ 인 대기행렬의 문턱치 (threshold value)이며, h 는 0과 1 사이의 값을 취하는 셀 준위 히스테리시스 계수이다. (26)의 관계식으로부터 셀 준위 히스테리시스 계수의 역할은 이전에 서

버가 서비스를 제공했을 경우 현재의 서비스 확률을 h 배만큼 줄임으로써 시스템으로부터 셀이 연속적으로 출발할 수 있는 확률을 줄이기 위한 것임을 알 수 있다. 따라서 성능분석에 있어서 이전 상태 $s(n-1)$ 에 대한 현재 상태 $s(n)$ 의 확률적 의존도를 설명할 수 있게 된다. 이러한 경우 (10) 식에서 $S_{i,j,k,l}$ 는

$$S_{i,j,k,l} = \sigma(i, j, k, l) 1_N \quad (27)$$

으로 주어지며, 여기서 1_N 은 N 차원 정방행렬이고, $\sigma(i, j, k, l)$ 은 다음과 같이 정의되는 함수이다: $l_{m-1} \leq j < l_m, m=1, 2, 3$, 에 대하여,

$$\sigma(i, j, k, l) = \begin{cases} p_m, & l = 1 \text{이고 } k = 0\text{일 때,} \\ hp_m, & l = 1 \text{이고 } k = 1\text{일 때,} \\ 1 - p_m, & l = 0 \text{이고 } k = 0\text{일 때,} \\ 1 - hp_m, & l = 0 \text{이고 } k = 1\text{일 때.} \end{cases} \quad (28)$$

따라서 MLTS는 OCQS의 특별한 경우임을 알 수 있다.

예로서, Δt 를 1로 두고, 파라미터가 다음과 같은 2 상태 MMPP 신호원 모델을 가정하자:

$$r_0 = 9.1667 \times 10^{-1}, r_1 = 4.5833 \times 10^{-1},$$

$$Q_{0,1} = 1.0 \times 10^{-2}, Q_{1,0} = 1.0 \times 10^{-3}. \quad (29)$$

이 경우 평균 입력률 \bar{r} 은 0.5이며 입력 전력 스펙트럼은 그림 2와 같다.³⁾

MLTS의 디폴트 (default) 파라미터 값은 표 1에 수록한 것과 같다.

그림 3과 4는 여러 가지 h 값에 대하여 대기행렬 문턱치 l_1 과 서비스 확률 p_1 에 따른 셀 손실 및 셀 지연의 변화를 보여주고 있다.

그림 3에서 l_2 는 $l_3 - l_1$ 으로 두며, 그림 4에서 p_3 는 $1.0 - p_1$ 으로 둔다. 분석결과와 타당성을 검증하기 위해 그림 3과 4에 95 퍼센트 신뢰구간을 포함하는 모의실험 결과를 함께 도시하였다. 그림으로부터 분석 및 모의실험에 의한 결과가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

그림 3에서 $h \leq 0.75$ 일 때에는 평균 셀 지연 \bar{D} 는 l_1 이 증가함에 따라서 감소하지만, $h=1.0$ 인 경우에는 다소 증가함을 알 수 있다. 반면 셀 손실률 CLR은 모

2) 이때 $P_d(\Omega)$ 는 $R_d(n)$ 의 이산성으로 인하여 주기 2π 인 Ω 의 함수가 된다.
3) 입력 전력 스펙트럼의 유도는 (6, 7)을 참조.

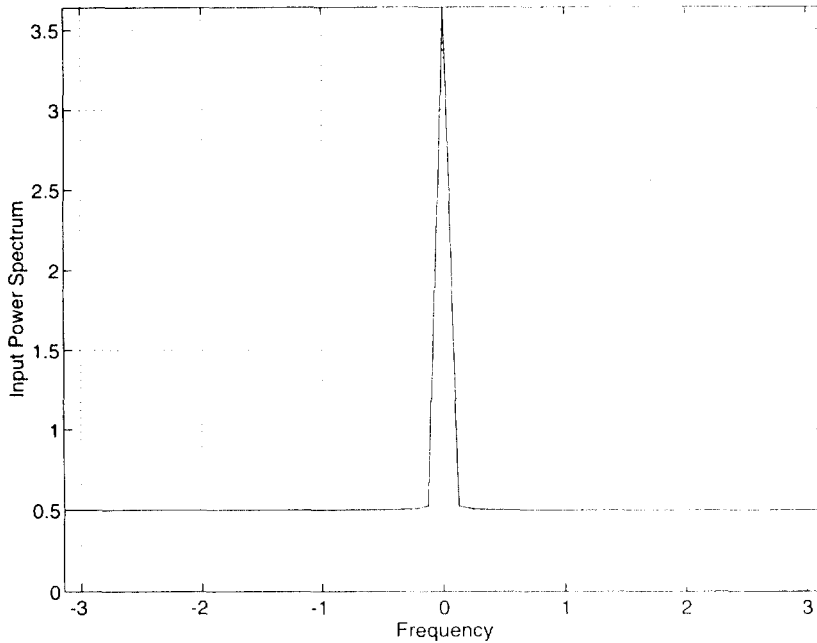


그림 2. 2 상태 MMPP의 입력 전력 스펙트럼.
Fig. 2. Input power spectrum of the two-state MMPP.

표 1. MLTS의 디폴트 파라미터 값.
Table 1. Default parameter values of MLTS.

파라미터	값
l_1	30
대기행렬 문턱치 l_2	71
l_3	101
서비스 확률 p_1	0.2
p_2	0.5
p_3	0.8

든 경우에 l_1 이 증가함에 따라서 감소한다. 그림 5에 보인 대기행렬 길이 분포는 이러한 현상을 잘 설명하고 있다.

그림 5로부터 h 가 증가함에 따라 분포의 대부분이 작은 값 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. $h = 1.0$ 의 경우, 대기행렬 길이 분포는 l_1 과 l_2 사이에 몰려 있고, 대기행렬 길이가 l_1 보다 짧을 확률이 l_2 보다 길 확률에 비해서 크다. 그 결과로 \bar{D} 는 l_1 의 \bar{D} 에 대한 영향 때문에 l_1 이 증가함에 따라서 (또는 l_2 가 감소함에 따라서) 증가한

다. $h=0$ 인 경우에는 버퍼가 대부분의 경우 가득 차거나 그에 가까운 상태에 있게 된다. 따라서 이 경우에는 l_2 의 감소가 \bar{D} 에 별 영향을 미치지 못한다. 그림 6의 대기행렬 길이 분포 또한 그림 4에 나타난 현상을 잘 설명해 준다.

$h = 0$ 의 경우, 대기행렬 길이 분포가 값이 큰 쪽에 주로 몰려 있으므로 \bar{D} 의 증가도가 점점 커진다. 이것은 대기행렬 길이 분포가 큰 값 근처에 몰려 있을 때에는 p_3 의 감소에 따른 효과가 p_1 의 증가에 따른 효과보다

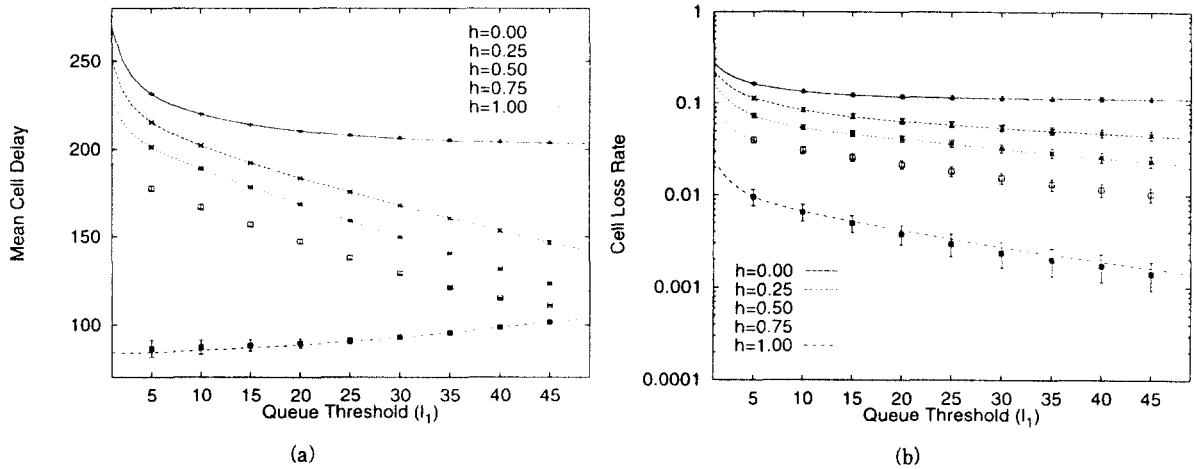


그림 3. I_1 에 따른 대기행렬 성능: (a) 평균 셀 지연, (b) 평균 셀 손실률.
 Fig. 3. Queueing performance vs. I_1 : (a) mean cell delay, (b) cell loss rate.

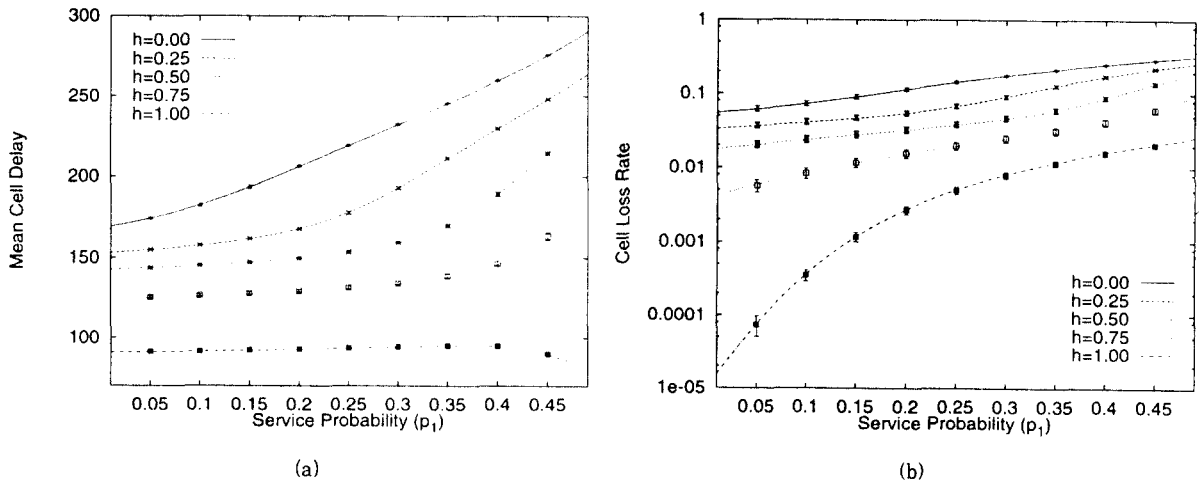


그림 4. p_1 에 따른 대기행렬 성능: (a) 평균 셀 지연, (b) 평균 셀 손실률.
 Fig. 4. Queueing performance vs. p_1 : (a) mean cell delay, (b) cell loss rate.

더 크기 때문이다. $h=1.0$ 일 때에는 $p_1 \geq 0.4$ 인 영역에서 p_1 의 영향이 p_3 에 비해 지배적이므로 $p_1=0.4$ 인 지점부터 \bar{D} 는 감소하기 시작한다.

그림 3에서 6까지를 통해서 셀 순위 히스테리시스 계수 h 가 MLTS의 대기행렬 성능에 큰 영향을 미침을 알

수 있다. MLTS의 성능에 대한 h 의 영향을 직접적으로 조사하기 위해서 h 에 따른 출력 전력 스펙트럼을 포함하는 MLTS의 성능 변화를 그림 7에 보였다.

그림 7 (a)에서는 h 의 값이 0에 근접함에 따라서 출력 전력 스펙트럼의 고주파 성분이 증가하는 반면 저주

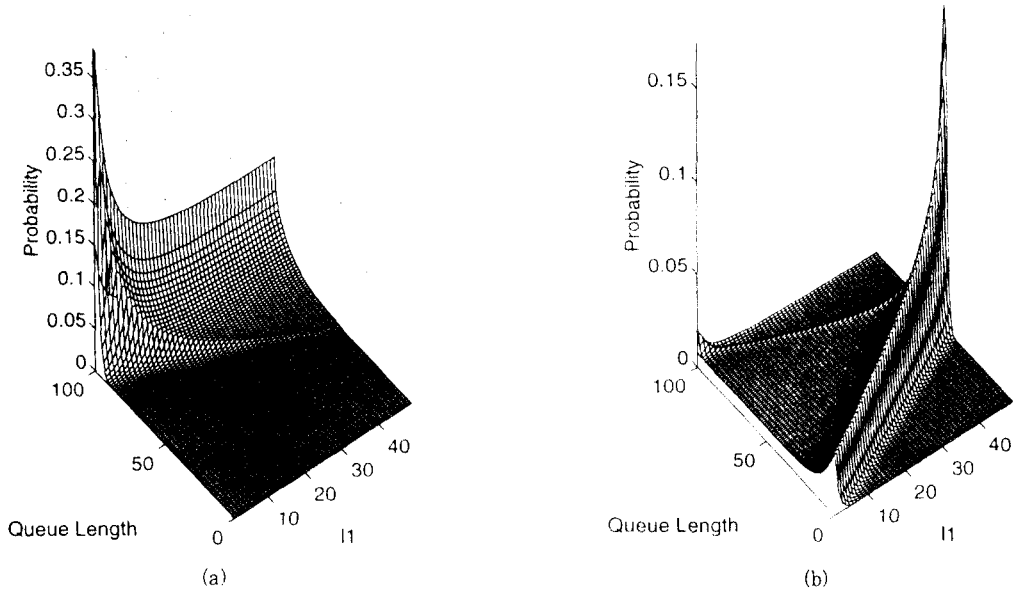


그림 5. l_1 에 따른 대기행렬 길이 분포: (a) $h = 0.0$, (b) $h = 1.0$.
 Fig. 5. Queue length distribution vs. l_1 : (a) $h = 0.0$, (b) $h = 1.0$.

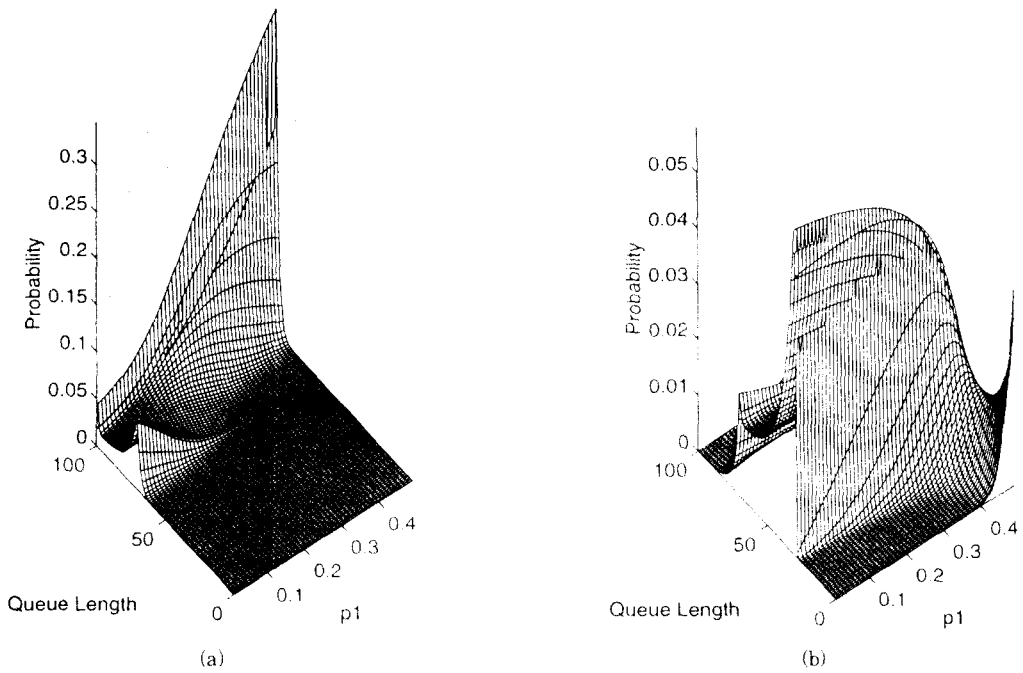


그림 6. p_1 에 따른 대기행렬 길이 분포: (a) $h = 0.0$, (b) $h = 1.0$.
 Fig. 6. Queue length distribution vs. p_1 : (a) $h = 0.0$, (b) $h = 1.0$.

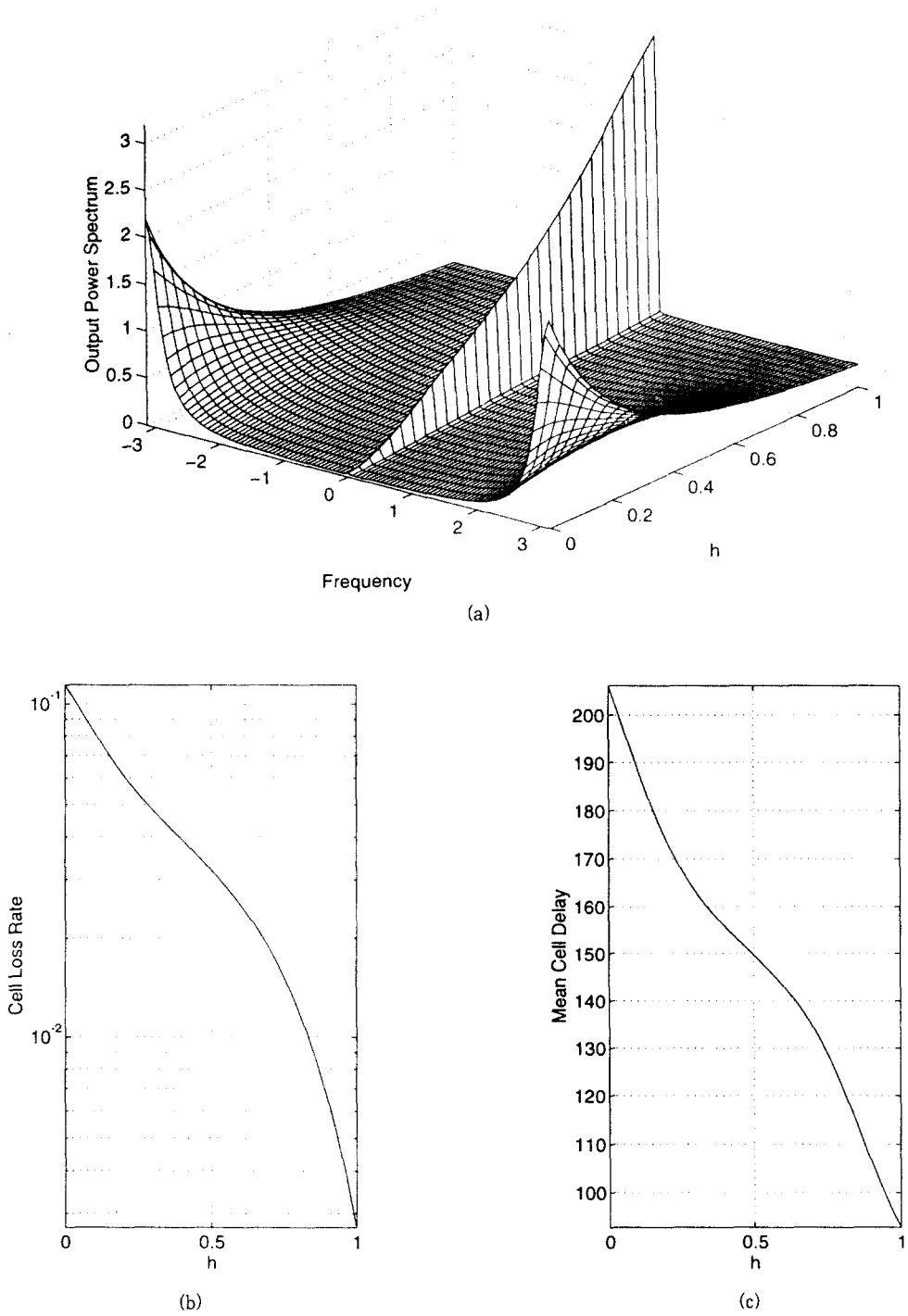


그림 7. h 에 따른 MLTS의 성능: (a) 출력 전력 스펙트럼, (b) 평균 셀 지연, (c) 평균 셀 손실률.
 Fig. 7. Effect of h on the performance of the MLTS: (a) output power spectrum, (b) mean cell delay, (c) cell loss rate.

과 성분은 거의 0으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 h 의 값을 줄임으로써 연속적인 셀 출발 확률이 작아지는 데에 따른 것이다. 망 성능 측면에서 볼 때, 망의 대기행렬 성능에 크게 영향을 미치는 출력 전력 스펙트럼의 저주파 성분이 감소하는 것은 매우 바람직하다¹⁾. 그러나 이러한 바람직한 측면, 즉 트래픽 성형 성능의 개선은 셀 지연 및 셀 손실률의 증가를 수반한다는 사실이 그림 7의 (b) 및 (c)에 잘 나타나 있다. 따라서 트래픽 성형 성능과 셀 지연 및 셀 손실률 사이에는 절충이 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

IV. 結 論

본 논문에서는 ATM 망에서 출력이 시스템의 상태에 따라서 변하는 다양한 트래픽 제어 시스템들의 모델로서 사용될 수 있는 OCQS를 제안하고 그 성능을 분석하였다. 분석에 있어서는 이산시간 접근방식을 취하여 ATM 망의 이산적인 특성을 반영하였고 3 차원 MC로 시스템을 기술하여 그 정상상태 확률을 구하였다. 이를 바탕으로 셀 손실 및 셀 지연과 출력 전력 스펙트럼의 세 가지 성능최도를 유도하였다.

이러한 OCQS 모델과 그 분석결과를 MLTS에 적용하여 셀 순위 히스테리시스 계수를 포함하는 MLTS 파라미터가 대기행렬 성능 및 출력 전력 스펙트럼에 미치는 영향을 조사하였다. 예제들로부터 셀 순위 히스테리시스 계수 h 가 MLTS의 대기행렬 성능 및 출력 전력 스펙트럼에 크게 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었고, 트래픽 성형 성능은 셀 지연 및 셀 손실과 상호 절충 관계에 있음을 파악하였다. 따라서 주어진 환경에서 최적의 성능을 도출하는 MLTS 파라미터를 결정하는 것이 매우 중요하다고 하겠다. 또한, MLTS는 OCQS의 특수한 경우에 해당함을 감안할 때, (10) 식에 보인 바와 같이 서비스 확률의 입력 도착 프로세스에 대한 의존도까지 고려할 수 있도록 보다 일반적인 OCQS에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. D. Anick, D. Mitra, and M. M. Sondhi,

"Stochastic theory of data handling systems with multiple sources," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 61, no. 8, pp.1871-1894, Oct. 1982.

2. H. Heffes and D. M. Lucantoni, "A Markov modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-4, pp.856-868, Sep. 1986.
3. M. Sidi, W. Z. Liu, I. Cidon, and I. Gopal, "Congestion control through input rate regulation," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM '89*, pp.1764-1768, 1989.
4. F. Bernabei, L. Gratta, M. Listanti, and A. Sarghini, "Analysis of ON-OFF Source Shaping for ATM multiplexing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '93*, pp.1330-1336, 1993.
5. K. S. Kim and B. G. Lee, "Three-level traffic shaper and its application to source clock frequency recovery for VBR video services," in *Proceedings of ICCCN*, pp.251-256, 1993.
6. S. Q. Li and C. L. Hwang, "Queue response to input correlation functions: Discrete spectral analysis," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 5, pp.522-533, Oct. 1993.
7. S. Q. Li and C. L. Hwang, "Queue response to input correlation functions: Continuous spectral analysis," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 6, pp. 678-692, Dec. 1993.
8. S. Chong and S. Q. Li, "Spectral analysis of access rate control in high speed networks," Submitted to *IEEE/ACM Trans. Networking*.
9. K. S. Kim and B. G. Lee, "Frequency-domain optimal dimensioning of multi-level traffic shaper in ATM networks," Submitted to *IEEE/ACM Trans. Networking*, 1994.
10. J.-Y. Le Boudec, "An efficient solution method for Markov models of ATM links with loss priorities," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 9, no. 3, pp.408-417, Apr. 1991.



金敬洙(Kyeong Soo Kim) 정회원

1966년생

1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업

1991년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1995년 8월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1995년 9월~현재 : 서울대학교 뉴미디어 통신 공동연구소 특별연구원

※주관심 분야 : 디지털 전송, 데이터 통신, 디지털 신호처리 및 유전자 이론 등



李秉基(Byeong Gi Lee) 정회원

1951년생

1974년 : 서울대학교 전자공학과 졸업

1978년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업

1982년 : University of California, Los Angeles(공학박사)

1974년~1979년 : 해군사관학교 교관

1982년~1984년 : Granger Associates, Santa Clara, CA, 연구원

1984년~1986년 : AT&T Bell Laboratories, North Andover, MA, 연구원

1986년 9월~현재 : 서울대학교 전자공학과 교수

※주관심 분야 : 디지털 신호처리, 디지털 전송, 광대역 통신망 및 회로이론 등