

ATM 다중화기의 성능 분석 기법에 대한 조사 및 분류

최우용* · 김지수* · 전치혁*

Survey and Classification of Performance Evaluation Techniques for ATM Multiplexer

Woo-Yong Choi · Jisoo Kim · Chi-Hyuck Jun

〈Abstract〉

음성, 데이터, 화상 등의 다양한 멀티미디어 정보를 하나의 통합된 망을 이용하여 전송하기 위한 새로운 방법으로 ATM(Asynchronous Transfer Mode)이 제안되고 있다. 이 방식은 정보를 일정한 크기의 전송 단위로 나누어 전송한다는 것과 통계적 다중화 방식을 사용한다는 두 가지의 커다란 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 갖는 ATM 망을 효율적으로 구축하고 여러 가지 형태의 제어를 통하여 망 자원을 안정적으로 관리하기 위해서는 망의 성능에 대한 다양한 관점에서의 분석이 필수적이며, 그 기본이 되는 것이 ATM 다중화기에 대한 성능분석이다. 본 논문에서는 ATM 다중화기의 성능분석을 위하여 제안된 기존의 연구들을 조사하여 그 연구방법별로 분류하고 각각의 특징에 대하여 설명하고자 한다.

1. 서론

ATM은 음성, 데이터, 화상 등의 멀티미디어 정보를 통합적으로 전송하기 위해서 새로이 제안된 전송 방법이다. 각각의 트래픽(traffic)이 요구하는 서비스 품질(QOS: Quality Of Service)은 매우 다양하여 화상이나 음성 정보의 경우에는 전달 지연에 민감하고, 데이터의 경우에는 손실에 민감하다[42]. 광대역 종합정보통신망(B-ISDN: Broadband Integrated Services Digital Network)에서 이와 같이 다양한 서비스 품질에 대한 요구조건을 만족시키기 위하여 ATM 개념이 제안되었고, 이의 실현을 위해서 현재까지 많은 연구가 이루어져 왔다.

ATM은 두 가지의 커다란 특징을 가지고 있다. 먼저 ATM에서는 모든 정보가 일정한 크기(53 바이트)의 셀(cell)로 나뉘어 전송된다. 5 바이트로 이루어져

있는 헤더(header)에는 addressing 정보등이 담겨져 있고, 나머지 48 바이트에는 전송될 사용자 정보가 담겨져 있다. 일정한 크기의 셀은 ATM 스위치와 다중화기(multiplexer)에서의 처리를 간편하게 하고, 이를 통한 빠른 스위칭을 가능케 한다.

ATM의 두 번째 특징은 통계적 다중화 방식을 사용하는데 있다. 동기적 시분할 다중화(STDМ: Synchronous Time Division Multiplexing) 방식에 기초한 STM(Synchronous Transfer Mode)에서는 매 타임슬롯(time slot)마다 입력원(source) 으로부터 전송되어야 할 셀이 지정되어 있다. 매 프레임(frame)은 N 개의 타임슬롯으로 이루어져 있는데, 만일 N 개의 입력원 중에서 임의의 지정된 입력원이 셀을 생성하지 않을 경우 해당 타임슬롯은 전송할 셀을 가지지 못한다. 이 경우에 다른 입력원으로부터 더 많은 셀이 도착하더라도 이 셀들은 다음 프레임에서의 해당 타임슬롯을 발견할 때

* 포항공과대학교 산업공학과

까지 전송되지 못하고 기다려야 한다. 따라서 전송할 셀을 가지지 못하는 타임슬롯이 많아지면 링크의 사용율(utilization)은 낮아진다. 그러나 비동기적 시분할 다중화(ATDM: Asynchronous Time Division Multiplexing) 방식에 기초한 ATM은 이와는 다른 다중화 방식을 가지고 있다. 전송할 셀이 존재하면 그 셀이 어떤 입력원으로부터 도착했는지에 관계없이, 비어있는 타임슬롯이 존재하는 경우에는 항상 전송될 수 있다. 그러므로 ATM은 STM과 비교했을 때 높은 링크 사용율을 가진다[61]. 이러한 ATM의 개념을 실현시키기 위해서 VP(Virtual Path)와 VC(Virtual Channel) 등의 개념이 제안 되었다[85].

본 논문에서는 ATM을 구성하는 주요 요소인 ATM 다중화기의 성능을 분석하기 위해 기존에 제안된 연구들을 채택된 방식별로 분류하여, 각각의 특징과 주요 결과에 대하여 설명하고자 한다. 기존에 나와 있는 ATM 관련 survey 논문으로는 일반적인 통신 시스템에 대한 마코브 체인(Markov Chain) 모델링 방법 및 그 분석기법에 대한 여러가지 연구들을 정리한 Krieger [46]의 작업이나, ATM 전반에 대한 연구결과들을 정리한 Onvural[68]의 작업 등을 들 수 있다. 본 논문의 특징은 연구대상을 ATM 스위치, 그 중에서도 다중화기에서의 성능분석으로 제한하여 각 연구에 적용된 주된 분석기법별로 이들을 분류하고, 다시 이산시간(discrete time) 모델 및 연속시간(continuous time) 모델, 동질(homogeneous) 입력원 모델 및 이질(heterogeneous) 입력원 모델, 그리고 대기 시스템의 종류별로 세분화하였다는데 있다. 또한, 여기에 언급된 연구들은 ATM 다중화기의 성능분석에 관련된 대표적인 연구들이라 할 수 있으며, 특히 1994년부터 1996년까지의 각종 학술회의 논문집 및 전문 학술지에 수록된 최근 논문들이라는 점에 본 논문의 의의가 있다고 할 수 있다.

개개 입력원에서의 입력 트래픽 모델링에 있어 중요한 부분을 차지하는 도착시간간격(interarrival time)의 상관성(correlation)에 대한 논의는 두 가지 관점에서 이루어 질 수 있는데, 먼저 버스트(burst) 레벨에서의 효과를 살펴보면 각 버스트 단위의 도착이나 전송이 이루어질 때, 순간적인 셀 도착율은 비교적 느린

속도로 변화하므로 도착시간간격 간에 양의 상관관계가 존재한다고 할 수 있다. 한편 셀 레벨에서는 한 버스트 내에서 셀들이 주기적(periodic)으로 방출되므로 도착시간간격은 음의 상관관계를 가진다고 할 수 있다. 실제 데이터를 이용한 분석을 통하여 이러한 상관관계는 명확히 존재하며, 더우기 이 효과가 관심을 가지는 다중화기의 성능에 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[34,84].

따라서 단일 입력원에서의 도착 프로세스를 Poisson 프로세스나 Bernoulli 프로세스와 같은 랜덤 프로세스로 모델링한 연구[66]도 다수 존재하지만 이들의 경우 모델 자체의 정확성이 떨어진다고 볼 수 있기 때문에, 본 논문에서는 버스티한 입력원을 다루는 연구에 초점을 맞추고자 한다. Roberts[75]를 비롯한 다수의 연구에서 랜덤 프로세스 모델은 작동환경(operating condition)에 따라 버퍼에서의 폭주(congestion) 효과를 실제보다 크게, 혹은 작게 반영하는 것으로 나타나 있다. 단일 입력원에서의 도착 프로세스는 대부분의 연구에서 2-상태(state) 모델인 ON-OFF 프로세스로 모델링되고 있으며 가장 대표적인 형태가 이산시간의 경우 IBP(Interrupted Bernoulli Process), 연속시간의 경우 IPP(Interrupted Poisson Process)라 할 수 있다.

일반적인 IBP 모델에 있어 ON 상태에서 OFF 상태로의 상태전이확률(state transition probability)은 α 이며, OFF 상태에서 ON 상태로의 상태전이확률은 β 이다. 또한 ON 상태에서는 확률 ν 로 셀이 도착하며, OFF 상태에서는 셀이 도착하지 않는다. 하지만 이외에도 각 입력원에서의 도착 프로세스는 D-BMAP(Deterministic Batched Markovian Arrival Process) [72,95]나 MMPP(Markov Modulated Poisson Process) [3,41,44,79], 혹은 train arrival등과 같은 주기적 스트림(stream)[48,49,96]으로 모델링되기도 한다.

최근 새로이 제시되고 있는 트래픽 모델링 방법으로는 TES(Transform Expand Sample) 접근방식을 들 수 있다. 이 방법은 도착시간간격에 대한 데이터를 통하여 이들에 대한 정확한 marginal 분포와 근사적인 autocorrelation 함수를 동시에 얻는데 목적을 두고 있으며, background TES 프로세스와 foreground TES 프로세스의 개념을 이용하여 상당히 정확한 트래픽 모

델을 구성하는 것으로 알려져 있다[28,38,63].

ATM 스위치 및 다중화기에 대한 성능분석에 있어 주된 관심의 대상이 되는 성능척도로는 셀 손실율과 셀 전달지연시간 및 셀 지연변이(jitter) 등을 들 수 있으며, 이제까지 제안된 다양한 연구에서 이러한 성능척도는 정확하게, 혹은 근사적으로 구해지거나 상한치(upper bound)가 제공되는 형태로 도출되고 있다 [7,12]. 그 대표적인 연구방식은 크게 4가지로 분류될 수 있는데, 그 중 하나는 마코브 체인 또는 그 밖의 방법으로 다중화기의 입력원 각각의 상태를 모두 고려하고자 하는 연구방법이다. 두 번째로 여러 개의 입력원으로부터 발생하는 셀의 도착 프로세스를 하나의 간단한 프로세스로 병합(superposition)하여 다중화기의 성능을 분석하고자 하는 방법이 있으며, 세 번째 방식은 유체흐름(fluid flow) 근사기법을 이용하는 것으로 다중화기에 존재하는 버퍼의 크기가 매우 클 경우에 정확한 성능분석을 보장하는 장점을 가진다. 마지막으로 다중화기의 버퍼가 무한 개 있다고 가정하고 버퍼 상태 분포의 점근적 감소율(asymptotic decay rate)을 이용하여 버퍼 상태의 분포와 셀 손실율에 관한 수식을 exponential 형태로 나타내하고자 하는 방법이 있는데, 이는 비교적 최근에 각광을 받는 방식으로 많은 연구가 진행되고 있다. 각각의 연구방식에 해당되는 논문들은 <표 1>에 요약 정리되어 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 개개 입력원의 개별적인 영향을 고려한 성능분석 방식을 다루고 있으며, 3 절에는 복수 입력원에서의 도착 프로세스를 병합시켜 분석하는 연구방식이 나타나 있다. 4 절에서는 유체흐름 근사기법, 5 절에서는 점근적 감소율을 이용하는 방법에 대한 내용을 다루고 있고, 마지막으로 6 절에서 결론짓고자 한다.

2. 개개 입력원의 상태를 고려한 연구방법

개개 입력원의 상태를 고려한 연구로는 마코브 체인을 이용하는 방식을 비롯하여 매우 다양한 연구들이 있는데, 각각의 방법을 간단히 설명하고자 한다. 먼저 2차원 마코브 체인을 이용해서 동일한 도착 프로세스를 따르는 복수 입력원을 가지는 다중화기의

<표 1> ATM 다중화기 성능 분석의 주요 방법 및 관련 논문

분석기법		관련 논문
개개 입력원의 상태를 고려한 분석	Markov Chain	[3], [9], [11], [15], [16], [17], [21], [32], [36], [46], [51], [54], [56], [64], [71], [73], [76]
	기타	[2], [8], [13], [14], [18], [19], [20], [26], [27], [40], [53], [55], [56], [60], [69], [86], [88], [91], [95]
입력원 병합을 이용한 분석	Renewal 프로세스	[59], [84]
	Markov Chain	[16], [35], [57], [58]
	MMPP	[5], [6], [22], [29], [34], [41], [44], [62], [77], [79], [87], [99]
	MMDP	[100], [101]
	D-BMAP	[10], [92]
기타	[33], [74], [78], [102]	
유체흐름 근사기법을 이용한 분석	[1], [4], [8], [45], [47], [65], [67], [70], [90]	
점근적 감소율 이용 분석	[23], [24], [25], [30], [31], [37], [39], [43], [50], [80], [81], [82], [83], [89], [93], [94], [97], [98], [100],	

성능을 분석한 연구들[54,56]이 다수 존재하며, Choi [15,16,17]의 경우는 동일한 모델에 대하여 1차원 마코브 체인을 이용한 성능분석기법을 개발하였다. 주기적인 셀 흐름을 갖는 CBR(Continuous Bit Rate) 입력원에 대한 성능분석은 Dron[21]에서 다루어 졌고, 버스티한 도착 프로세스를 가지는 다중화기의 성능분석은 Bisdikian[9], Morrison[64], Rosenberg[76] 등에서 다루어 졌으며, Hou[36]는 버스티한 입력원과 그렇지 않은 입력원이 혼합된 경우를 고려하였고, Hamdi[32]는 각각의 경우에 대한 다중화기의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 이밖에도 Bae[3]와 Lee[51]는 우선순위제어(priority control) 하에서 다중화기의 성능을 마코브 체인을 이용하여 분석하였고, Ramaswami[71]는 셀의 도착 프로세스가 마코브 체인으로 정의될 때 버퍼에 있는 셀의 수와 각 입력원의 상태를 고려한 마코브 체인의 구조를 이용하여 안정 상태(steady-state) 확률을 구하는 방법을 개발하였으며,

Ratkovic[73]는 비선형 방정식의 해로부터 다중화기의 버퍼 상태 분포의 Laplace-Stieltjes transform을 얻는 방법으로 그 성능을 분석하였다. 또한 Bonatti[11]는 근사기법을 이용하여 마코브 체인의 상태공간을 축소시킴으로써 다중화기의 여러 가지 성능척도에 대한 하한치(lower bound) 및 상한치를 구하는 연구를 수행하였다. 이 외에도 일반적인 통신 시스템에 대한 마코브 체인 모델링 방법 및 그 분석기법에 대한 여러가지 연구들은 Krieger[46]의 논문에 잘 나타나 있다.

ATM 다중화기의 중요한 척도 중 하나인 셀 손실율을 줄이기 위한 방법으로 쉽게 제안될 수 있는 것은 버퍼의 크기를 늘이는 것이다. 그러나 버퍼의 일시적인 동작(transient behavior)에 주된 관심을 둔 여러 연구의 결과를 보면, 버퍼의 크기를 증가시키는 방법은 단지 버퍼가 완전히 채워지는 데까지 걸리는 시간을 연장시켜 줄 뿐 궁극적인 해결책이 되지 못하며, 셀 손실율을 감소시키기 위해서는 버퍼의 동작형태에 대한 분석을 통하여 얻어진, 좋은 성능을 가진 반응적(reactive) 폭주제어기법이 필요하다는 점을 지적하고 있다[40,56,95].

한편 Tsakiridou[88]는 이질 입력원을 가지는 다중화기에서 셀의 평균 지연시간을 계산하는 Viterbi[91]의 공식을 확장하였고, Au[2]와 Parekh[69]는 각 입력원의 시간별 셀 발생수에 대한 가정을 하고 그 가정 하에서 다중화기의 셀 손실율과 셀 전달지연시간에 대한 최악의 상황에서의 성능을 분석하였다. 입력원으로부터 도착하는 셀의 평균 도착률이 서비스 용량과 거의 일치할 때, 버퍼에 존재하는 셀의 평균수를 구하기 위한 효율적인 분석방식은 Falin[27]에서 연구되었다.

또한 개개 입력원이 시스템의 성능에 미치는 영향을 고려하는 접근방식에 있어서의 많은 연구는 버퍼 상태에 대한 generating 함수를 이용하여 그 성능을 정확히 분석하고 있다. Li[52,53,55]와 Elwalid[26]의 경우에는 spectral 분할(decomposition)에 기초한 generating 함수를 이용하였고, Briem[13]과 Steyaert[86]의 경우는 각 입력원에서의 도착 프로세스를 보다 세밀히 묘사하기 위하여, 일반적인 ON-OFF 모델과는 달리, ON 상태가 다시 두 가지로 분할되는 3-상태 트래픽

모델에 대하여 generating 함수를 구성함으로써 다중화기의 성능을 분석하였다.

대부분의 트래픽 모델링에서 동일한, 혹은 서로 다른 도착 프로세스를 가지는 개개 입력원에서의 상태 전이는 상호 독립적인 것으로 간주되고 있다. 그러나 Corte[18,19,20]는 이들간에 주종(master-slave)관계가 존재하는 멀티미디어 다중화기 모델을 제시하고, 이에 대한 성능을 분석하였다.

한편 근본적인 특성이 다른 두 종류의 트래픽, 즉 주(main) 스트림과 배경(background)이 되는 스트림을 MMPP+Poisson, 혹은 MMFF(Markov Modulated Fluid Flow)+FF(Fluid Flow)로 모델링한 연구[14], MMBP(Markov Modulated Bernoulli Process)+B-MMBP(Batched-Markov Modulated Bernoulli Process)로 모델링한 연구[8], 그리고 일반적인 주기적 프로세스와 배치(batched) 프로세스로 모델링한 연구[60] 등도 나타나 있다.

3. 버스티 입력원의 병합 기법

다중화기의 성능분석에 있어서의 주된 어려움은 시스템이 가질 수 있는 상태공간(state space)이 지나치게 방대하다는 점에 기인한다. 다중화기시스템의 상태공간은 임의의 순간에서의 도착 프로세스의 상태, 그리고 버퍼 내에 존재하는 셀의 수에 의하여 결정된다. 확률적 모형화의 대표적인 도구라 할 수 있는 마코브 체인을 통하여 이들을 표현한다면, N 개의 입력원 중 임의의 한 입력원 i 에서의 도착 프로세스가 가질 수 있는 상태의 수를 $S_i(i=1, \dots, N)$ 라 하고, 다중화기의 버퍼 크기를 K 라 할 경우, 가질 수 있는 총 상태의 수는

$$K \prod_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

가 된다. 이와 같은 시스템에 있어 각각의 입력원이 미치는 영향을 개별적으로 분석하기란 대단히 힘든 작업이므로, 버스티한 특성을 가지는 복수 입력원에 대하여 임의의 근사기법을 적용시켜 간단한 형태로 병합된 도착 프로세스를 도출하고, 이를 이용하여 상태공간을 축소시킴으로써 대기 시스템의 성능을 효율

적으로 분석하려는 연구는 다양하게 시도되어 왔다 [58,84,87,92,101,102]. 대부분의 연구는 일단 N 개의 입력원을 병합시켜 S 개의 상태를 가지는 단일 도착 프로세스를 도출함으로써

$$S \times K \quad (2)$$

의 상태 수를 가지는 시스템을 구성하고, 이에 대하여 여러가지 성능척도를 정확하게, 혹은 근사적으로 계산하고 있다. 본 절에서는 단일 도착 프로세스의 도출을 위한 트래픽 모델링을 중심으로 대표적인 근사적 병합 기법 및 관련 논문을 소개하고자 한다.

3.1. 재생과정(Renewal Process)의 병합

먼저 재생과정의 병합을 다루는 연구의 경우에는 평균 도착율과 도착시간간격의 IDI(Index of Dispersion for Intervals)에 관심을 갖는다. 입력원 i 의 도착 프로세스에 대한 특성을 평균 도착율 λ_i 와 도착시간간격에 대한 변동계수(coefficient of variation)의 제곱인 C_i^2 으로 나타낼 때, N 개의 입력원을 병합시킨 도착 프로세스의 특성 중 평균 도착율 $\lambda(=\lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_N)$ 는 정확히 계산되지만 C^2 의 경우는 근사적으로 결정되어야 하며, 그 방법은 대략 세 가지로 나뉜다.

- Stationary Interval Method[59]: 트래픽의 양이 적고, 입력원의 갯수가 많은 경우에 적합
 α : ON 상태를 벗어나려는 상태전이확률, μ : 서비스율, ρ : 트래픽 intensity(= λ/μ)

$$C_{SI}^2 = 1 - \frac{2}{N+1} + (1-\rho)^{N+1} \left(\frac{2}{\alpha} - \frac{2N}{N+1} \right) \quad (3)$$

- Asymptotic Method[84]: 입력원의 갯수는 적고, 트래픽 intensity 가 1에 가까운 경우에 적합

$$C_A^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^N \lambda_k} C_i^2 \quad (4)$$

- Hybrid Method[59]: 위의 두 방법을 적당한 가중치 ($0 < w < 1$)를 통하여 결합

$$C_H^2 = \omega C_A^2 + (1-\omega) C_{SI}^2 \quad (5)$$

3.2. 동질 입력원의 병합

근사적으로 병합 분포를 구하는 연구의 대부분은 MMP(Markov Modulated Process) 모델에 기초를 두고 있는데, 먼저 동질 입력원을 다룬 대표적인 모델로 복수 개의 ON-OFF 입력원을 두 가지 상태를 가진 MMPP로 근사하는 연구를 들 수 있다. 이러한 연구들은 크게 moment matching 기법과 asymptotic matching 기법의 두 가지로 구분되며, 여기서의 두 상태란 총 도착율이 다중화기의 서비스 율보다 작은 UL(underload) 상태와, 서비스 율보다 큰 OL(overload) 상태를 가리킨다. 따라서 다중화기의 서비스 율을 M 이라 하고, 각 입력원에서의 평균 도착율을 1로 가정하면, N 개의 입력원 중 ON 상태를 가지는 입력원의 갯수에 따라 위에서 언급한 두 상태는 다음과 같이 표현된다.

$$UL = \{0, 1, \dots, M\}, OL = \{M+1, \dots, N\} \quad (6)$$

이와 같은 상태를 갖는 해당 MMPP의 파라미터는

- r_{UL} : UL 상태를 벗어나려는 상태전이율
- r_{OL} : OL 상태를 벗어나려는 상태전이율
- λ_{UL} : UL 상태에서의 Poisson 도착율
- λ_{OL} : OL 상태에서의 Poisson 도착율

의 4개로, 먼저 moment matching 기법의 경우에는 다음과 같은 방법으로 이들을 추정한다 [34,44].

$$\lambda_{UL} = \left[\sum_{i=0}^M i \frac{\pi_i}{\pi_{UL}} \right], \lambda_{OL} = \left[\sum_{i=M+1}^N i \frac{\pi_i}{\pi_{OL}} \right] \quad (7)$$

$$U_{k+1} = \begin{cases} \frac{1}{(M+1)\beta}, & K=M \\ \frac{(k-M)(1+\alpha/\beta)}{k+1} U_k + \frac{1}{(k+1)\beta}, & M+1 \leq k \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

(U_k : OL 상태를 벗어나지 않으면서, 입력원의 상태 k 에 머무는 평균시간($k=M+1, \dots, N$))

$$r_{OL} = \frac{1}{U_N}, r_{UL} = \frac{\pi_{OL}}{\pi_{UL}} r_{OL} \quad (9)$$

위에서 π_{UL} 과 π_{OL} 은 UL 및 OL 의 두 상태를 갖는 마코브 체인에서의 각 상태에 대한 안정상태 확률을 의미하며, π_i ($i=0,1,\dots,N$)는 i 개의 입력원이 ON 상태에 있을 안정상태 확률로서, ON 상태에서 OFF 상태로의 상태전이확률을 α , OFF 상태에서 ON 상태로의 상태전이확률을 β 라 할 때, 다음과 같이 표현된다.

$$\pi_i = \binom{N}{i} \left[\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right]^i \left[1 - \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right]^{N-i}, \quad i=0,1,\dots,N \quad (10)$$

이와 유사한 개념의 moment matching 기법은 Saito [77], Yamada[99] 등의 연구에서도 발견된다.

한편 asymptotic matching 기법의 경우에는 r_{OL} 을 추정하는데 있어 τ 를 OL 상태에 머무는 시간을 나타내는 랜덤 변수라 할 때, 적절한 상수 D 를 고려한 survivor 함수 개념을 도입하여

$$G_\tau(x) = D e^{-\eta x} + o(e^{-\eta x}) \quad (11)$$

의 식을 이용한다[5,6]. 여기서 이 함수의 파라미터인 η 가 r_{OL} 의 추정치가 된다. 한편 도착시간간격에 대한 실제 데이터에 대하여 MLE(Maximum Likelihood Estimation)를 이용하여 이들 파라미터를 추정하는 알고리즘[62]도 제시되었다.

이밖에도 도착 프로세스를 $(N+1)$ -상태 MMDP(Markov Modulated Deterministic Process)로 근사하고 분석상의 편의를 위하여 이에 대한 상태공간을 더욱 축소시켜 2-상태, 혹은 m -상태(단, $2 < m < N$) MMDP를 구성한 연구[100,101], 그리고 도착 프로세스에 대한 2-상태 D-BMAP를 구성한 연구[10,92] 및 matching 방법은 제시되어 있지 않지만 도착 프로세스를 SBBP(Switched Batch Bernoulli Process)로 가정하여 분석한 연구[33] 등도 나타나 있다.

3.3. 이질 입력원의 병합

한편 이질 입력원을 다룬 연구로는 L 개의 트래픽 클래스 각각에 대하여 moment matching 기법을 이용

하거나[44,87], 혹은 도착 프로세스의 특성을 이용하여 2-상태 MMPP를 구성한 후, 다시 이들을 2^L -상태 MMPP로 병합시킨 연구[41]가 있다. 이밖에도 Semi-Markov 커널(kernel) 개념을 이용하여 각 입력원에서의 상태전이 발생 여부에 따라 N 개의 MRP(Markov Renewal Process) 입력원을 $2^N(2^N-1)$ 개의 상태를 가진 하나의 MMPP 모델로 병합시킨 연구[22]와 복수 개의 2-상태 마코브 체인 입력원을 입력 power spectral 함수와 도착율분포함수를 이용하여 m -상태 MMPP 모델로 병합시킨 연구[29], 히스토그램 분할 근사기법을 이용하여 복수 개의 m -상태 MMPP 입력원을 하나의 m -상태 MMPP 모델로 병합시킨 연구[79], 그리고 MMRP(Markov Modulated Rate Process) 입력원들을 M 차원의 Ornstein-Uhlenbeck 프로세스로 묘사되는 diffusion 프로세스로 병합시킨 연구[74] 및 도착 스트림의 power spectral 함수의 파라미터를 추정하여 분석한 연구[78] 등이 있다.

또한 Hong[35]과 Malhamreh[57,58]는 복수 개의 ON-OFF 입력원을 long-run average 개념을 이용하여, ON 상태를 가지는 입력원의 갯수를 상태로 취하는 1 차원 마코브 체인 모델로 병합시킴으로써, 2^N 에 달하는 상태 수를 $(N+1)$ 개로 축소시키는 연구를 수행하였다. 일반적인 동질 ON-OFF 입력원을 병합시키는 경우 상태 i 에서 상태 j 로의 정확한 상태전이확률이

$$AP_{ij} = \sum_{k=0}^{\min(i,j)} \binom{i}{k} (1-\alpha)^k \alpha^{i-k} \binom{N-j}{j-k} \beta^{j-k} (1-\beta)^{N-i+j+k} \quad (12)$$

으로 표현되는데 비하여[16], 위의 연구에서는 이질 입력원에 대한 병합을 고려하여

$$\omega_i : i \text{ 번째 입력원의 상태, } \omega_i = 0(\text{OFF}), 1(\text{ON}), i = 0, 1, \dots, N$$

$$\omega : \text{모든 입력원의 상태를 나타내는 벡터, } \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$$

$$r(\omega \rightarrow \omega') : \text{상태 } \omega \text{에서 상태 } \omega' \text{로의 상태전이확률}$$

$$S_i : \text{ON 상태를 가지는 입력원의 갯수가 } i \text{개인 } \omega \text{들의 집합}(i=0,1,\dots,N)$$

등을 정의하고

$$AP_{ij} \cong \sum_{\omega \in S_i} \Pr[\omega | S_i] \left(\sum_{\omega' \in S_j} r(\omega \rightarrow \omega') \right) \quad (13)$$

의 근사식을 도출하였다. 여기서 $\Pr[\omega | S_i]$ 는

$$\Pr[\omega | S_i] = \frac{\Pr[\omega]}{\Pr[S_i]}$$

$$\Pr[S_i] = \sum_{\omega \in S_i} \Pr[\omega]$$

$$\Pr[\omega] = \left[\prod_{i \in W_0} \left(1 - \frac{\beta_i}{a_i + \beta_i} \right) \right] \left[\prod_{i \in W_1} \frac{\beta_i}{a_i + \beta_i} \right] \quad (14)$$

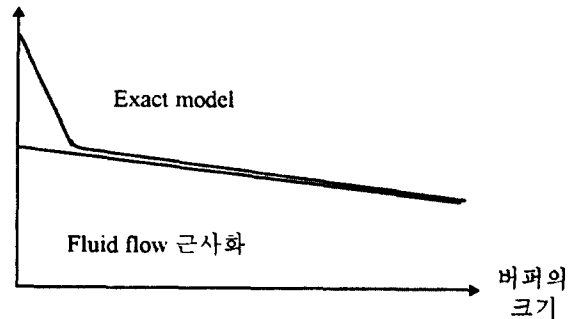
으로 정의되는데, W_0 와 W_1 은 각각 OFF 상태인 입력원들의 집합과 ON 상태인 입력원들의 집합을 나타낸다[35].

4. 유체흐름 근사기법

ATM 개념의 중요한 특징으로는 서론에서 언급한 바와 같이 일정한 크기의 전송단위인 셀의 개념과 통계적 다중화의 두 가지를 들 수 있다. 이에 바탕을 둔 ATM 다중화기의 대기 시스템은 다음과 같이 모델링될 수 있을 것이다. 모든 셀은 임의의 타임슬롯의 초기에 도착하고 크기가 K 인 버퍼에 저장된다. 임의의 셀이 도착했을 때 버퍼가 꽉 차있는 경우에는 도착한 셀은 손실된다. 또한 임의의 타임슬롯에서의 셀 전송은 그 타임슬롯의 마지막에 일어나고, 링크 스피드는 M 이라고 하자. 유체흐름 근사기법은 모든 정보가 무한히 작은 크기의 셀로 나뉘어 전송된다고 가정한다. 셀의 크기가 작아질 수록 데이터는 더 많은 수의 셀로 나누어져서 각각 전송될 것이다. 일반적으로 이 방법은 셀 손실율을 과소평가(underestimate)하는 경향이 있다[5,6]. Baiocchi[5,6]는 유체흐름 근사기법을 이용한 모델과 정확한 모델(시뮬레이션으로 분석)을 셀 손실율의 측면에서 비교하였다. 버퍼의 용량에 따른 두 모델에 있어서의 셀 손실율의 전형적인 추이는 <그림 1>에 나타나 있다.

<그림 1>로부터 알 수 있듯이 버퍼의 크기가 매우 큰 경우 유체흐름 근사기법은 정확한 셀 손실율을 보장한다. 그러므로 유체흐름 근사기법은 ATM 다중화기의 성능을 분석하기에 매우 적절한 방법이라는 사실을 알 수 있다. 본 절에서는 유체흐름 근사기법을 이용하여 ATM 다중화기의 성능을 분석하는 방법을

Log(cell loss prob.)



<그림 1> 유체흐름 근사기법의 정확성

설명하고자 한다.

ATM 다중화기의 입력원은 모두 N 개이고 각 입력원의 셀 도착 프로세스는 IPP(Interrupted Poisson Process)를 따른다고 하자. 이때 임의의 한 입력원은 2개의 상태(ON, OFF)를 교대로 가지는데, ON 상태에 머무르는 시간은 평균이 $1/\alpha$ 인 지수(exponential) 분포를 따르고, OFF 상태에 머무르는 시간은 평균이 $1/\beta$ 인 지수 분포를 따른다. 그리고 ON 상태에 있는 입력원은 데이터를 연속적으로 일정한 율(1로 가정)로 생성하고, OFF 상태에서는 데이터를 생성하지 않는다. 각 입력원으로부터의 셀 도착 프로세스는 서로 독립이고, 링크 스피드는 c , 버퍼의 크기는 K 라 하자. 다중화기의 도착 프로세스는 ON 상태에 있는 입력원의 갯수를 상태로 지정할 때 $(N+1)$ -상태 Birth-and-Death 프로세스로 정확하게 표현된다.

상태 i 에서 상태 j 로의 상태전이확률, $p(i,j)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(i, i+1) = (N-i)\beta, \quad i=0,1,\dots,N-1 \quad (15)$$

$$p(i, i-1) = i\alpha, \quad i=1,2,\dots,N \quad (16)$$

$F_i(x)$ 를 도착 프로세스의 상태가 i 이고 버퍼의 상태가 x 보다 작거나 같을 안정상태 확률이라고 하고, $F(x)$ 를 $[F_0(x), F_1(x), \dots, F_M(x)]^T$ 라 하면 분석을 위한 $(N+1) \times (N+1)$ 형태의 행렬 D, M 에 대하여 다음과 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$DdF(x)/dx=MF(x), 0 < x < K \quad (17)$$

행렬 $D^{-1}M$ 의 $N+1$ 개의 eigenvalue와 eigenvector를 (z_k, ϕ_k) ($0 \leq k \leq N$)라 하면 앞의 미분 방정식의 해는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F(x) = \sum_{k=0}^N \exp(Z_k X) a_k \phi_k, 0 < x < K \quad (18)$$

위의 식에서 a_k 는 boundary condition에 의하여 구해질 수 있다. 또한 $F(x)$ 를 이용하면 ATM 다중화기의 셀 손실율을 구할 수 있다 [90].

유체흐름 근사기법을 이용한 연구 방법은 Anick[1], Baiocchi[4], Bensaou[8], Kontovasilis[45], Lam[47], Nagarajan[65], Norros[67], Qian[70], Tucker[90]에서도 발견 된다. 특히 Baiocchi와 Qian은 이질 입력원을 가지는 다중화기의 성능을 분석하는 방법을 다루었다. 앞의 설명에서도 알 수 있듯이 유체흐름 근사기법은 행렬 $D^{-1}M$ 의 eigenvector와 eigenvalue를 필요로 하는데, 이질 입력원의 경우 행렬의 크기가 입력원 갯수의 증가에 따라 기하급수적으로 증가한다. 따라서 유체흐름 근사기법을 이용하여 이질 입력원을 다룰 경우, Baiocchi[4]의 연구에서와 같이, 분석을 위한 시간은 입력원의 갯수가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가할 것임을 알 수 있다. 이러한 문제점에 대한 해결방안으로 연구되고 있는 방법 중의 하나로 버퍼 상태 분포의 점근적 감소율을 이용하는 방법이 있다. 이에 관해서는 다음 절에서 설명하고자 한다.

5. 셀 손실율과 버퍼 상태 분포의 점근적 감소율

이질 입력원을 가지며 버퍼의 용량이 무한대인 ATM 다중화기를 생각하자. 이때, 버퍼의 상태 X 가 x 일 안정상태 확률을 $f(x)$ 라 하고 버퍼 상태에 대한 generating 함수를 $G(z) = E[z^X]$ 라 하자. $G(x) = G1(x)/G2(x)$ 라 하고 $G2(x)$ 의 근을 r_1, r_2, \dots, r_n 이라 하자. 그러면 필요한 일정 조건 하에서 $G(x)$ 는 어떤 상수 b_1, b_2, \dots, b_n 에 대하여 다음과 같이 분할된다.

$$G(z) = \frac{b_1}{r_1 - z} + \frac{b_2}{r_2 - z} + \dots + \frac{b_n}{r_n - z} \quad (19)$$

위의 식으로부터 버퍼의 분포 $f(x)$ 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$f(x) = \left(\frac{b_1}{r_1} \right) \left(\frac{1}{r_1} \right)^x + \left(\frac{b_2}{r_2} \right) \left(\frac{1}{r_2} \right)^x + \dots + \left(\frac{b_n}{r_n} \right) \left(\frac{1}{r_n} \right)^x \quad (20)$$

n 개의 근들 중에서 가장 작은 근을 r_1 이라 하면 x 가 매우 큰 경우 $f(x)$ 는 다음과 같이 비교적 정확히 근사화될 수 있다.

$$f(x) \approx \left(\frac{b_1}{r_1} \right) \left(\frac{1}{r_1} \right)^x \quad (21)$$

이때 $1/r_1$ 을 버퍼 상태 분포의 점근적 감소율이라 한다. 점근적 감소율을 이용하는 연구로는 Elwalid [23,24,25], Gibbens[30], Guerin[31], Ishizaki[37], Jelenkovic[39], Kesidis[43], Lee[50], Simonian[80], Sohraby [81,82,83], Tse[89], Weiss[93], Whitt[94], Woodside [97], Xiong[98], Yang[100] 등이 있다. 이질 입력원의 경우에 이산시간 모델에 대해서는 Xiong[98]의 연구, 연속시간 모델에 대해서는 Elwalid[25]의 연구에 점근적 감소율을 정확히 구하는 방법이 나타나 있다. 연속시간 모델에서의 점근적 감소율은 유체흐름 근사기법 하에서도 정확히 구해질 수 있는데 이는 유체흐름 근사기법이 가지는, 버퍼가 매우 큰 경우에 정확한 성능을 구할 수 있다는 특성 때문이다.

6. 결론

ATM은 음성, 데이터, 화상 정보 등을 통합적으로 전송하기 위해서 제안된 새로운 개념의 통식방식이다. 본 논문에서는 ATM 다중화기의 성능분석을 위해서 기존에 제안된 연구방식을 크게 4가지로 분류하고, 각각의 특징과 그 방법을 설명하였다. 첫 번째 범주에 속하는 개개 입력원의 영향을 모두 고려하는 연구방법은 분석을 위해 필요한 시간이, 특히 이질 입력원을 고려하는 경우, 입력원의 갯수와 버퍼의 크기가 커질 수록 기하급수적으로 증가하므로 그 적용 범위에 제한을 갖는다. 하지만 동질 입력원을 고려하는 경우

에는 비교적 적은 시간 내에 정확한 성능분석을 보장한다는 장점이 있다. 그리고 두 번째 연구방법인 입력원의 병합기법은 이질 입력원의 경우 병합을 위해 필요한 상태의 수가 기하급수적으로 증가하므로 입력원의 갯수가 큰 경우에는 적합한 분석기법이라고 할 수 없다. 세 번째 연구방법인 유체흐름 근사기법은 버퍼의 크기가 클 수록 정확한 성능을 보장한다는 측면에서 매우 만족스러운 분석방법이라 할 수 있다. 하지만 이 방법 역시 이질 입력원을 고려하는 경우에는 필요한 분석시간이 입력원의 갯수에 대해서 기하급수적으로 증가한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 네 번째 연구방법인 점근적 감소를 이용한 분석방법이 제안되었다고 할 수 있다. 즉 버퍼의 크기가 커질 수록 정확한 성능을 보장하는 유체흐름 근사기법의 장점을 가지면서 분석을 위해 필요한 시간을 입력원의 갯수 N 에 대해서 $O(N)$ 으로 줄일 수 있다.

ATM 다중화기의 성능분석의 궁극적인 목적은 ATM 망 전체의 성능분석이다. 복수 개의 다중화기와 스위치가 복잡하게 연결된 ATM 망의 성능분석을 위해서는 각 다중화기와 스위치의 성능분석 뿐만 아니라 다중화기와 스위치로부터 빠져 나오는 셀의 흐름에 대한 분석 역시 필요할 것이다.

【참고 문헌】

- [1] Anick, S, D. Mitra, and M.M. Sondhi, "Stochastic Theory of Data-Handling Systems with Multiple Source", *Bell System Tech. J.*, Vol. 61, No. 8(1982), pp. 1871-1894.
- [2] Au, T.M. and H. Mehrpour, "On the Worst Data Loss Behavior in Statistical Multiplexing", *IEEE Proc. ICC '95(1995)*, pp. 309-315.
- [3] Bae, J.J., T. Suda, and R. Simha, "Analysis of Individual Packet Loss in a Finite Buffer Queue with Heterogeneous Markov Modulated Arrival Processes: A Study of Traffic Burstiness and Priority Packet Discarding", *Proc. INFOCOM '92(1992)*, pp. 219-230.
- [4] Baiocchi, A., N.B. Melazzi, and A.R. Salvatore, "Stochastic Fluid Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with Heterogeneous ON-OFF Sources", *IEEE Proc. INFOCOM '92(1992)*, pp. 3C.3.1-10.
- [5] Baiocchi, A., N. Blefari Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, and R. Winkler, "Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with High-Speed ON-OFF Sources", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3 (1991), pp. 388-393.
- [6] Baiocchi, A., N. Blefari Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, and R. Winkler, "Modelling Issues on an ATM Multiplexer within a Bursty Traffic Environment", *IEEE Proc. INFOCOM '91(1991)*, pp. 83-91.
- [7] Balay, R.I. and A.A. Nilsson, "Performance Modeling of an ATM Multiplexer with Heterogeneous Speed Links", *IEEE Proc. ICC '95(1995)*, pp. 778-782.
- [8] Bensaou, B., J. Guilbert, J.W. Roberts, and A. Simonian, "Performance of an ATM Multiplexer Queue in the Fluid Approximation Using the Benes Approach", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 137-160.
- [9] Bisdikian, C., "Performance Analysis of Single-Stage, Output Buffer Packet Switches with Independent Batch Arrivals", *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 27(1995), pp. 627-652.
- [10] Blondia, C. and O. Casals, "Performance Analysis of Statistical Multiplexing of VBR Sources", *IEEE Proc. INFOCOM '92(1992)*, pp. 828-837.
- [11] Bonatti, M. and A.A. Gaivoronski, "Guaranteed Approximation of Markov Chains with Applications to Multiplexer Engineering in ATM Networks", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 111-136.
- [12] Boxma, O.J. and J.A.C. Resing, "Tandem Queues with Deterministic Service Times", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 221-239.
- [13] Briem, U., T.H. Theimer, and H. Kroner, "A General Discrete-Time Queueing Model: Analysis and Applications", *Proc. ITC '13(1991)*, pp. 13-19.

- [14] Choi, B.D., B.C. Shin, K.B. Choi, D.H. Han, and J.S. Jang, "Priority Queue with Two State Markov Modulated Arrivals", *IEEE Proc. ICC '96(1996)*, pp. 1055-1059.
- [15] Choi, W. and C. Jun, "Analysis of a Discrete-Time Queueing System with a Markov-Modulated Input Process and Constant Service Rate", *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, Vol. 10(1996), pp. 429-441.
- [16] Choi, W. and C. Jun, "Exact Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer with Homogeneous Discrete-Time ON-OFF Sources", *IEEE Proc. GLOBECOM '95(1995)*, pp. 824-827.
- [17] Choi, W. and C. Jun, "Long-Run Behavior of an ATM Multiplexer with Homogeneous Discrete-Time ON-OFF Sources", to appear in *IEEE Proc. GLOBECOM '96(1996)*.
- [18] Corte, A.L., A. Lombardo, and G. Schembra, "Jitter Analysis in an ATM Multimedia Multiplexer", *IEEE Proc. GLOBECOM '95(1995)*, pp. 1238-1242.
- [19] Corte, A.L., A. Lombardo, and G. Schembra, "Modeling Superposition of ON-OFF Correlated Traffic Sources in Multimedia Applications", *IEEE Proc. INFOCOM '95(1995)*, pp. 993-1000.
- [20] Corte, A.L., A. Lombardo, and G. Schembra, "Skew Performance Evaluation in an ATM Multimedia Multiplexer", *IEEE Proc. INFOCOM '96(1996)*, pp. 986-993.
- [21] Dron, L.G., G. Ramamurthy, and B. Sengupta, "Delay Analysis of Continuous Bit Rate Traffic Over an ATM Network", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3(1991), pp. 402-407.
- [22] Elsayed, K.M., "On the Superposition of Discrete-Time Markov Renewal Processes and Application to Statistical Multiplexing of Bursty Traffic Sources", *IEEE Proc. GLOBECOM '94(1994)*, pp. 1113-1117.
- [23] Elwalid, A. and D. Mitra, "Analysis, Approximations and Admission Control of a Multi-Service Multiplexing System with Priorities", *IEEE Proc. INFOCOM '95(1995)*, pp. 463-472.
- [24] Elwalid, A. and D. Mitra, "Effective Bandwidth of General Markovian Traffic Sources and Admission Control of High Speed Networks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 1, No. 3(1993), pp. 329-343.
- [25] Elwalid, A., D. Heyman, and T.V. Lakshman, "Fundamental Bounds and Approximations for ATM Multiplexers with Applications to Video Teleconferencing", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 13, No. 6 (1995), pp. 1004-1016.
- [26] Elwalid, A., D. Mitra, and T.E. Stern, *Statistical Multiplexing of Markov Modulated Sources: Theory and Computational Algorithms*, ITC-13, A. Jensen and V.B. Iversen, North-Holland, 1991.
- [27] Falin, G., "Heavy Traffic Analysis of Integrated Service System", *Performance Evaluation*, No. 24 (1996), pp. 295-302.
- [28] Frost, V.S. and B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunications Networks", *IEEE Comm. Magazine*, March(1994), pp. 70-81.
- [29] Fulton, C. and S.Q. Li, "Delay Jitter Correlation Analysis for Traffic Transmission on High Speed Networks", *IEEE Proc. INFOCOM '95(1995)*, pp. 717-727.
- [30] Gibbens, R. J. and P. J. Hunt, "Effective Bandwidths for the Multi-Type UAS Channel", *Queueing Syst.*, Vol. 9(1991), pp. 17-28.
- [31] Guerin, R., H. Ahmadi, and M. Naghshineh, "Equivalent Capacity and Its Application to Bandwidth Allocation in High-Speed Networks", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9(1991), pp. 968-981.
- [32] Hamdi, M. and J. Muppala, "Performance Evaluation of ATM Switches under Various Traffic and Buffering Schemes", *IEEE Proc. GLOBECOM '95(1995)*, pp. 828-832.
- [33] Hashida, On, Y. Takahashi, and S. Shimogawa, "Switched Batch Bernoulli Process (SBBP) and the

- Discrete-Time SBBP/G/1 Queue with Application to Statistical Multiplexer Performance", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3(1991), pp. 394-401.
- [34] Heffes, H. and D.M. Lucantoni, "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 4, No. 6(1986), pp. 856-868.
- [35] Hong, S. and H.G. Perros, "A Discrete-Time Queueing Model of the Shared Buffer ATM Switch with Bursty Arrivals", *Telecommunication Systems*, Vol. 2(1993), pp. 1-20.
- [36] Hou, T. C. and H. K. Wong, "Queueing Analysis for Switching of Mixed Continuous-bit-rate and Bursty Traffic", *IEEE Proc. INFOCOM '90*(1990), pp. 660-667.
- [37] Ishizaki, F., T. Takine, H. Terada, and T. Hasegawa, "Loss Probability Approximation of a Statistical Multiplexer and Its Application to Call Admission Control in High-Speed Networks", *IEEE Proc. GLOBECOM '95*(1995), pp. 417-421.
- [38] Ismail, M.R., I.E. Lambadaris, M. Devetsikiotis, and A.R. Kaye, "Modeling Prioritized MPEG Video Using TES and a Frame Spreading Strategy for Transmission in ATM Networks", *IEEE Proc. INFOCOM '95*(1995), pp. 762-770.
- [39] Jelenkovic, P.R. and A.A. Lazar, "Evaluating the Queue Length Distribution of an ATM Multiplexer with Multiple Time Scale Arrivals", *IEEE Proc. INFOCOM '96*(1996), pp. 521-528.
- [40] Kamoun, F. and M.M. Ali, "A New Theoretical Approach For the Transient and Steady-State Analysis of Multiserver ATM Multiplexers with Correlated Arrivals", *IEEE Proc. ICC '95* (1995), pp. 1127-1131.
- [41] Kang, S.H. and D.K. Sung, "Two-State MMPP Modeling of ATM Superposed Traffic Streams Based on the Characterization of Correlated Interarrival Times", *IEEE Proc. GLOBECOM '95* (1995), pp. 1422-1426.
- [42] Kesidis, G. and J. Walrand, "Buffer Design for Multiclass Traffic in ATM Networks", *Memorandum*, No. UCB/ERL M92145, Electronics Research Laboratory, UC Berkeley, 1992.
- [43] Kesidis, G., J. Walrand, and C.S. Chang, "Effective Bandwidth for Multiclass Fluids and Other ATM Sources", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 1, No. 4(1993), pp. 424-428.
- [44] Kim, S., M. Lee, and M. Kim, " Σ -Matching Technique for MMPP Modelling of Heterogeneous ON-OFF Sources", *IEEE Proc. GLOBECOM '94* (1994), pp. 1090-1094.
- [45] Kontovasilis, K.P. and N.M. Mitrou, "Bursty Traffic Modeling and Efficient Analysis Algorithms via Fluid-Flow Models for ATM IBCN", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 279-323.
- [46] Krieger, U.R., B.M. Clostermann, and M. Sczittnick, "Modeling and Analysis of Communication Systems Based on Computational Methods for Markov Chains", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 8, No. 9 (1990), pp. 1630-1648.
- [47] Lam, C.H. and T.T. Lee, "Fluid Flow Models with State-Dependent Service Rate for Data-Handling Systems", *IEEE Proc. GLOBECOM '95*(1995), pp. 1412-1416.
- [48] Landry, R. and I. Stavrakakis, "Multiplexing Generalized Periodic Markovian Sources with an Application to the Study of VBR Video", *IEEE Proc. ICC '94*(1994), pp. 1014-1018.
- [49] Landry, R. and I. Stavrekakis, "Non-Deterministic Periodic Packet Streams and Their Impact on a Finite-Capacity Multiplexer", *IEEE Proc. INFOCOM '94*(1994), pp. 224-231.
- [50] Lee, H.W. and J.W. Mark, "Characterization of Statistical Multiplexing of Heterogeneous ATM Sources", *IEEE Proc. INFOCOM '95*(1995), pp. 345-353.
- [51] Lee, M., Y. Mun, and B. Kim, "Performance

- Analysis of Delay-Loss Priority Mechanism Using Markov Modulated Arrival Stream", *IEEE Proc. GLOBECOM '95*(1995), pp. 1417-1421.
- [52] Li, S.Q. and H.D. Sheng, "Discrete Queueing Analysis of Multi-Media Traffic with Diversity of Correlation and Burstiness Properties", *IEEE Proc. INFOCOM '91*(1991), pp. 368-381.
- [53] Li, S.Q., "A General Solution Technique for Discrete Queueing Analysis of Multi-Media Traffic on ATM", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 39(1991), pp. 1115-1133.
- [54] Li, S.Q., "A New Performance Measurement for Voice Transmission in Bursty and Packet Switching", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 35, No. 10 (1987), pp. 1083-1094.
- [55] Li, S.Q., "Generating Function Approach for Discrete Queueing Analysis with Decomposable Arrival and Service Markov Chains", *IEEE Proc. INFOCOM '92*(1992), pp. 2168-2177.
- [56] Li, S.Q., "Study of Information Loss in Packet Voice Systems", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 37, No. 11(1989), pp. 1192-1202.
- [57] Makhamreh, I.I., D. McDonald, and N.D. Georganas, "Approximate Analysis of a Packet Switch with Finite Output Buffering and Imbalanced Correlated Traffic", *IEEE Proc. ICC '94*(1994), pp. 1003-1007.
- [58] Makhamreh, I.I., N.D. Georganas, and D. McDonald, "Analysis of an Output-Buffered ATM Switch with Speed-Up Constraints under Correlated and Imbalanced Bursty Traffic", *IEE Proc. Comm.*, Vol. 142, No. 2(1995), pp. 61-66.
- [59] Marafih, N.M., R.L. Pikholtz, and Y.Q. Zhang, "New Approximation for Analyzing the Multiplexing of Bursty Sources in ATM Networks", *IEEE Proc. GLOBECOM '94*(1994), pp. 1085-1089.
- [60] Matragi, W., C. Bisdikian, and K. Sohraby, "On the Jitter and Delay Analysis in ATM Multiplexer", *IEEE Proc. ICC '94*(1994), pp. 738-744.
- [61] McDysan, D.E. and D.L. Spohn, *ATM: Theory and Application*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [62] Meier, K.S., "A Fitting Algorithm for Markov-Modulated Poisson Processes Having Two Arrival Rates", *European Journal of O.R.* Vol. 29(1987), pp. 370-377.
- [63] Melamed, B., Q. Ren, and B. Sengupta, "The QTES/PH/1 Queue", *Performance Evaluation*, No. 26(1996), pp. 1-26.
- [64] Morrison, J.A., "Blocking Probabilities for Multiple Class Batched Poisson Arrivals to a Shared Resource", *Performance Evaluation*, No. 25(1995), pp. 131-150.
- [65] Nagarajan, R., J.F. Kurose, and D. Towsley, "Approximation Techniques for Computing Packet Loss in Finite-Buffered Voice Multiplexers", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3(1991), pp. 368-377.
- [66] Ngo, C.Y. and V.O.K. Li, "Poisson Approximation of Input Traffic Sources in Asynchronous Transfer Mode (ATM) Network", *IEEE Proc. INFOCOM '94*(1994), pp. 1046-1053.
- [67] Norros, I., J.W. Roberts, A. Simonian, and J.T. Virtamo, "The Superposition of Variable Bit Rate Sources in an ATM Multiplexer", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3(1991), pp. 378-387.
- [68] Onvural, R.O., H.G. Perros, and G. Pujolle, "A Bibliography of ATM Related Papers", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 347-371.
- [69] Parekh, A.K., and R.G. Gallager, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Network: The Single-Node Case", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 1, No. 3(1993), pp. 344-357.
- [70] Qian, K. and D. McDonald, "An Approximation Method for Complete Solutions of Markov-Modulated Fluid Models", *IEEE Proc. GLOBECOM '95* (1995), pp. 1406-1411.
- [71] Ramaswami, V. and J.L. Wang, "A Discrete Time Queueing Analysis of ATM Systems with Phase-

- Type Distributed Talk Spurts Traffic Sources", *IEEE Proc. ICC '96(1996)*, pp.1093-1098.
- [72] Rananand, N., "Approximating a Variable Bit Rate Source by Markov Processes", *IEEE Proc. GLOBECOM '94(1994)*, pp. 1107-1112.
- [73] Ratkovic, A. and I. Rubin, "Performance Analysis of ATM Switches under a Multi Mode Traffic Mode", *IEEE Proc. GLOBECOM '95(1995)*, pp. 838-842.
- [74] Ren, Q. and H. Kobayashi, "Diffusion Process Approximations of a Statistical Multiplexer with Markov Modulated Bursty Traffic Sources", *IEEE Proc. GLOBECOM '94(1994)*, pp. 1100-1106.
- [75] Roberts, J.W. and J.T. Virtamo, "The Superposition of Periodic Cell Arrival Streams in an ATM Multiplexer", *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 39, No. 2 (1991), pp. 298-303.
- [76] Rosenberg, C., F. Guillemin, and R. Mazumdar, "New Approach for Traffic Characterization in ATM Networks", *IEE Proc. Comm.*, Vol. 142, No. 2(1995), pp. 87-90.
- [77] Saito, H., M. Kawarasaki, and H. Yamada, "An Analysis of Statistical Multiplexing in an ATM Transport Network", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3 (1995), pp. 359-367.
- [78] Saulnier, E.T. and K.S. Vastola, "A Simple Approximation of Multimedia Traffic with Long Term Correlation", *IEEE Proc. ICC '96(1996)*, pp. 333-337.
- [79] Shroff, N. and M. Schwartz, "Improved Loss Calculation at an ATM Multiplexer", *IEEE Proc. INFOCOM '96(1996)*, pp. 561-568.
- [80] Simonian, A. and J. Guibert, "Large Deviations Approximation for Fluid Queues Fed by a Large Number of On/Off Sources", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 13, No. 6(1995), pp. 1017-1027.
- [81] Sohraby, K., "On the Asymptotic Analysis of Statistical Multiplexers with Hyper-Bursty Arrivals", *Annals of O.R.*, Vol. 49(1994), pp. 325-346.
- [82] Sohraby, K., "On the Asymptotic Behavior of Heterogeneous Statistical Multiplexer with Applications", *IEEE Proc. INFOCOM '92(1992)*, pp. 839-847.
- [83] Sohraby, K., "On the Theory of General ON-OFF Sources with Applications in High-Speed Networks", *IEEE Proc. INFOCOM '93(1993)*, pp. 401-410.
- [84] Sriram, K. and W. Whitt, "Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. SAC-4 (1986), pp. 833-846.
- [85] Stallings, W., *ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [86] Steyaert, B. and Y. Xiong, "Analysis of a Discrete-Time Queue with General Three-State Markovian Traffic Sources", *Performance Evaluation*, No. 24 (1996), pp. 277-294.
- [87] Sykas, E.D., K.M. Vlakos, and E.N. Protonotarios, "Mathematical Tools for Analysis of ATM Systems", *Proc. ITC '91(1991)*, pp. 781-786.
- [88] Tsakiridou, S. and I. Stavrakakis, "Mean Delay Analysis of a Multiplexer with Batch Arrival Processes: A Generalization to Viterbi's Formula", *Performance Evaluation*, No. 25(1996), pp. 1-15.
- [89] Tse, D.N.C., R.G. Gallager, and J.N. Tsitsiklis, "Statistical Multiplexing of Multiple Time-Scale Markov Streams", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 13, No. 6 (1995), pp. 1028-1038.
- [90] Tucker, R.G., "Accurate Method for Analysis of a Packet-Speech Multiplexer with Limited Delay", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 36, No. 4(1988), pp. 479-483.
- [91] Viterbi, A.M., "Approximate Analysis of Time-Synchronous Packet Networks", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 4, No. 6(1986), pp. 879-890.
- [92] Wang, S.S. and J.A. Silvester, "A Discrete-Time Performance Model for Integrated Service ATM Multiplexers", *IEEE Proc. GLOBECOM '93(1993)*,

- pp. 757-761.
- [93] Weiss, A., "An Introduction to Large Deviations for Communication Networks", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 13, No. 6(1995), pp. 938-952.
- [94] Whitt, W., "Tail Probabilities with Statistical Multiplexing and Effective Bandwidths for Multi-Class Queues", *Telecommun. Syst.*, Vol. 2(1993), pp. 71-107.
- [95] Widjaja, I., M.F. Neuts, and J.M. Li, "Conditional Overflow Probability and Profile Curve for ATM Congestion Detection", *IEEE Proc. INFOCOM '96* (1996), pp. 970-977.
- [96] Wittevrongel, S. and H. Bruneel, "Queue Length and Delay for Statistical Multiplexers with Variable-Length Messages", *IEEE Proc. GLOBECOM '94*(1994), pp. 1080-1084.
- [97] Woodside, C.M. and E.D.S. Ho, "Engineering Calculation of Overflow Probabilities in Buffers with Markov-Interrupted Service", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 35, No. 12(1987), pp. 1272-1277.
- [98] Xiong, Y. and H. Bruneel, "A Simple Approach to Obtain Upper Bounds for the Asymptotic Queueing Behavior of Statistical Multiplexers with Heterogeneous Traffic", *Performance Evaluation*, Vol. 22, No. 2(1995), pp. 159-173.
- [99] Yamada, H. and S. Sumita, "A Traffic Measurement Method and Its Application for Cell Loss Probability Estimation in ATM Networks", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3(1991), pp. 315-324.
- [100] Yang, H. and W.B. Gong, "Efficient Calculation of Cell Loss in ATM Multiplexers", *IEEE Proc. GLOBECOM '95*(1995), pp. 1226-1230.
- [101] Yang, T. and D.H.K. Tsang, "A Novel Approach to Estimating the Cell Loss Probability of an ATM Multiplexer Loaded with Homogeneous Bursty Sources", *IEEE Proc. GLOBECOM '92* (1992), pp. 511-517.
- [102] Yei, J. and T. Yang, "A State-Space Reduction Method for Computing the Cell Loss Probability

in ATM Networks", *IEEE Proc. ICC '94*(1994), pp. 726-732.



최우용

현재 포항공과대학교 산업공학과 박사 과정에 재학중이며 ATM 망에서의 성능분석, 수리계획 등을 연구하고 있다. 포항공과대학교 산업공학과에서 공학사(1992), 공학석사(1994) 학위를 취득하였다.



김지수

포항공과대학교 산업공학과에서 공학사(1994), 공학석사(1996) 학위를 취득하였으며, 현재 포항공과대학교 산업공학과 박사과정에서 재학중이다. 관심분야는 ATM 망의 성능분석 및 트래픽 제어 등이다.



전치혁

현재 포항공과대학교 산업공학과에서 부교수로 재직중이다. 서울대학교 자원공학과에서 공학사(1977), 한국과학기술원에서 공학석사(1979), 미국 University of California, Berkeley 산업공학과에서 공학박사(1986) 학위를 취득하였다. 주요 관심분야는 Stochastic Process, 신뢰성 이론, 시뮬레이션, 통계적기법을 이용한 품질예측 등이다.