

ATM 망에서 End-To-End QoS 성능 분석*

이 강 원**

End-To-End QoS Performance Analysis of the ATM Network*

Kang Won Lee**

■ Abstract ■

기존의 데이터망과는 달리 B-ISDN은 데이터, variable-rate 비디오 등과 같은 bursty하고 variable bit rate를 갖는 트래픽원으로부터 smooth하고 constant bit rate를 갖는 트래픽원까지 광범위한 계층의 트래픽을 모두 수용해야만 한다. 게다가 이 망은 다양한 계층의 트래픽에게 일정 수준 이상의 품질, 즉 QoS(Quality of Service)를 보장해 주어야만 한다. 셀 손실이나 지연시간 그리고 지연시간 jitter등을 포함하는 QoS 성능척도들은 응용서비스 별로 서로 다를 것이고 특히 실시간(real-time) 응용 서비스를 지원하는 망에서의 QoS문제는 특별히 중요성을 더하게 된다. 따라서 통계적 다중화에 의해 얻어지는 망자원의 효율성을 확보하면서 end-to-end QoS 보장을 해주는 문제는 B-ISDN에서 매우 중요하나 아직 대부분 미해결 문제로 남아 있는 분야이다. 본 연구에서는 end-to-end 분석에 가장 큰 애로점으로 부각되는 multi-hop망 환경하에서 트래픽 분석에 초점을 맞추어 기존 연구결과등을 폭넓게 비교 분석하고 최근 연구 동향 및 추후 연구 사항을 제시하고자 한다.

1. 서 론

기존의 데이터 망과는 달리 B-ISDN은 데이터, variable-rate 비디오등과 같은 bursty하고 variable bit rate를 갖는 트래픽원으로부터 smooth하고 constant bit rate를 갖는 트래픽원까지 광범위한 계층의 트래픽을 모두 수용해야만 한다. 게다가

이 망은 다양한 계층의 트래픽에게 일정 수준 이상의 품질, 즉 QoS(Quality of Service)를 보장해 주어야만 한다. 셀 손실이나 지연시간 그리고 지연시간 jitter등을 포함하는 QoS 성능척도들은 응용서비스 별로 서로 다를것이고 특히 실시간(real-time) 응용 서비스를 지원하는 망에서의 QoS문제는 특별히 중요성을 더하게 된다. 따라서 통계적

* 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

** 서울산업대학교 산업공학과

다중화에 의해 얻어지는 망자원의 효율성을 확보 하면서 end-to-end QoS 보장을 해주는 문제는 B-ISDN에서 매우 중요하나 아직 대부분 미해결 문제로 남아 있는 분야이다.[2, 29]

QoS의 보장시 발생하는 어려운 점들은 각 호(call)가 망에 도착할 때마다 답변해 주어야 하는 문제, “요구호가 현재 진행중인 호들의 QoS보장을 방해하지 않고 원하는 QoS로 망에 수락될 수 있는가?”를 생각한다면 쉽게 이해될 수 있다. 이 질문에 답하기 위해서는 망은 우선 도착한 호에 보장해 줄 수 있는 end-to-end QoS를 계산해야 하고 이 호를 수락함으로써 현재 진행중인 호가 받을 영향도 또한 결정해야만 한다. 또한 초고속 망의 특징상 셀의 전송시간(transmission time)에 비해서 propagation 지연이 훨씬 더 심각하기 때문에 호수락이나, 대역 할당등의 트래픽 제어 수행이 기존의 데이터 망에서와 같은 “reactive”한 방식이 아니라 “preventive”한 방식을 취할 수밖에 없는데 이는 도착하는 각 응용 서비스별 트래픽 특성을 미리 파악해야만 한다는 것을 전제로 하고 있다. 따라서 전통적인 망에서의 성능 관련 문제들(링크의 대역, 버퍼용량, 스위치의 처리 용량 등)이 주로 “off-line” 문제였다면 “performance - driven traffic control mechanism”을 요구하는 환경하에서는 “real-time, on-line” 문제화 되었다. 그러나 무엇보다도 QoS 보장문제를 어렵게 만드는 점은 다음과 같은 ATM망의 고유한 특성 때문이다.

- 패킷화된 음성이나 비디오와 같은 트래픽 원들의 셀간에는 상관관계(correlation)와 시간에 따라 변하는(time varying) 성질이 있다.
- 기존의 망처럼 복합된 망 트래픽의 성능 결정 문제가 아니라 QoS 보장은 개별적인 ‘per-call basis’로 이루어져야 한다.
- 무엇보다도 가장 중요한 점은 성능이 multi-

hop망 환경에서 평가되어야 한다는 것이다. 이때 트래픽이 여러 개의 망 노드를 거쳐나가면서 서로 간섭하기 때문에 호들사이의 복잡한 간섭 효과등이 고려되어야만 한다. 이 경우에 inter-call과 intra-call 패킷들의 상호작용을 고려해야 하고 더 나아가서 망에 유입되는 외부의 입력트래픽 뿐만 아니라 각 노드에서의 departure-process를 고려해 주어야만 한다.

본 연구에서는 위에 언급한 것처럼 end-to-end 분석에 가장 큰 애로점으로 부각되는 multi-hop망 환경하에서의 트래픽 분석에 초점을 맞추고 기존 연구결과등을 폭넓게 비교분석하고 최근 연구 동향 및 추후 연구 사항을 제시하고자 한다. 서론에 이어 2장에서는 ATM망의 end-to-end 트래픽 특성에 대해 논하였다. 3장에서는 ATM망의 end-to-end QoS 성능보장을 위한 접근방법을 크게 4가지로 나누어 각 방법들의 특성 및 최근 연구동향을 제시하였다. 마지막으로 4장에서는 제안된 4가지 방법들에 대한 비교 분석 및 추후 연구 과제를 제시하였다.

2. ATM 망의 End-to-End 트래픽 특성

ATM 망에서 중첩된 셀들의 도착 흐름은 다음과 같은 두가지 종류의 상관관계를 내포하고 있다.[15]

- 셀 전송의 주기적 성질로 인한 연속한 time slot에 도착하는 셀간의 음의 상관관계
- 셀 도착 시간 간격(intercell arrival time) 보다 큰 연속적인 구간에서 나타나는 평균 도착율 사이의 양의 상관관계

이러한 상관 관계는 다중화기나 스위치의 buffer 내 대기형태(queueing behavior)에 큰 영향을 미치

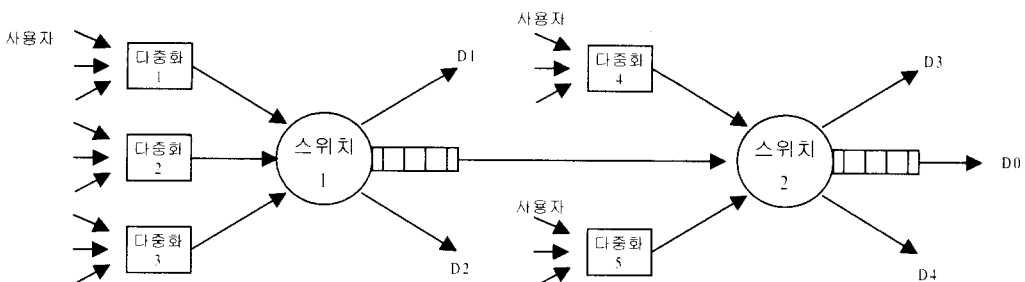
게 되고 하나의 대기 노드 분석조차도 매우 복잡한 과정을 요한다. 이에 대한 연구는 기존에 단일 노드를 중심으로 여러 연구가 진행되어왔다.[1, 15, 22, 33] 그러나, ATM 망의 end-to-end QoS 성능 분석에 가장 큰 장애요인은 트래픽 특성이 망의 여러 노드(다중화기나 스위치등)를 거쳐 나가면서 변형되어 진다는 점이다. 따라서 호 도착시 설정한 본래의 트래픽 특성치들은 호가 망내 다중화기나 스위치들을 거쳐 나가면서 여러 행태로 변형되기 때문에 원래 값을 그대로 대역 할당등 ATM 망 자원 관리를 위한 기초값으로 사용할 수 없다. 만약 호가 망의 여러 노드들을 거쳐 나감에 따라 트래픽의 burstiness등이 감소되어 나간다면 처음 설정된 트래픽 특성치를 기초로 망 자원 분배를 실시할 경우 망자원의 낭비를 초래할 수 있고 그 반대의 경우에는 심각한 congestion문제가 야기 될 수 있다. 본 절에서는 ATM망에서 주어진 입력 트래픽이 변해 나가는 것을 smoothing, cross-correlation, 그리고 입력 트래픽 모델의 3가지 측면에서 살펴보았다.

2.1 Smoothing

Smoothing은 트래픽 흐름의 burstiness가 줄어드는 현상을 말한다. 망 차원에서 보면 bursty 트래픽에 비해 smooth 트래픽을 갖는데 따른 이점으로 대기지연시간과 셀 손실율의 감소, 이에따른 망 자원의 효율적 이용등을 들 수 있다.

Friesen[17]은 사용자 노드에서 발생한 트래픽이 다중화 장치와 스위치를 거치면서 발생하는 트래픽 변화를 다음 <그림 1>과 같은 망에서 살펴 보았다.

사용자노드와 다중화 장치를 거친후 스위치 노드에서의 평균 대기 시간 및 길이를 같은 부하 조건하에서 사용자 노드에서의 그것들과 simulation을 통해 비교하였는데 스위치 노드에서의 대기시간 및 길이가 사용자 노드의 그것들에 비해 훨씬 짧음을 관찰하였다. 이 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 사용자 노드에서는 트래픽 원들이 짧은 시간 동안 peak율 보다 큰 burst나 혹은 일정기간 동안 지속적으로 평균율 보다 큰 burst를 전송하는 것을 막을 수 없다. 하지만 스위치 노드들은 이미 다중화 장치를 거친 셀들을 받는다. 따라서 다중화 장치를 떠나는 링크의 일정 서비스 시간(deterministic service time) 때문에 셀간의 최소 도착 시간 간격은 일정하게 유지될 수 밖에 없고 따라서 스위치 노드에 도착하는 셀 흐름은 덜 bursty 혹은 smooth하게 된다. Ren[10]은 Markov modulated on-off흐름으로 도착하는 입력트래픽이 노드를 거친후 어떻게 변형되는가를 조사하였다. 이 연구에서는 노드에서의 출력트래픽(departure traffic)을 수정된 파라메타를 갖는 Markov modulated on-off 흐름으로 파악하고 ([16]의 simulation결과에 따르면 on과 off 구간의 분산 squared coefficient와 같은 second order 통계량 변형은 평



<그림 1> 망 모델

균 길이 변화와 같은 first order 통계량 변형에 비해 훨씬 작다. 이는 연속적인 on과 off 구간 사이의 상관 관계는 무시 될 수 있음을 보여준다.) on과 off의 변화한 길이를 분석적으로 유도하였다. 결과는 on 구간의 확장과 off 구간의 축소, 그리고 이에따른 출력 흐름의 트래픽을 감소로 나타났는데 이는 [17]의 simulation결과에서 관측된 smoothing 효과를 보여주고 있다. 한편 호의 트래픽은 망내 여러 스위치 노드를 거쳐 나가면서 계속적으로 smoothing 효과를 받게 되는데 물론 이 효과는 트래픽이 스위치 노드를 여러번 거쳐 나감에 따라 지속적으로 감소되어 나간다. 한편 Li[16]는 simulation을 통하여 각 입력원의 peak rate가 총 링크 용량의 5%를 초과한다면 입·출력 트래픽의 변화는 반드시 고려되어야 한다고 밝히고 있다.

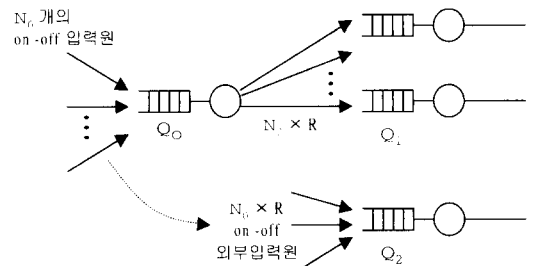
위의 조사 결과는 트래픽 입력원을 모델링하기 위해 사용한 IPP나 MMPP등이 망내부에 있는 노드에 도착하는 트래픽을 적당하게 모델링 해 주지 못한다는 것을 보여주고 있다. 즉 망 내부의 스위치 buffer 용량이라든지 망의 여러 자원 결정(dimensioning)을 위해 트래픽 입력원의 특성치를 그대로 사용한다는 것은 트래픽 부하를 보수적으로 예측하게되어 망 자원의 효율적 이용을 기대할 수 없음을 보여준다.

2.2 Cross Correlation

일반적으로 망내에 있는 노드의 입력 트래픽원은 외부(사용자 노드나 다른망으로부터 노드에 새롭게 도착한 입력원) 혹은 내부(같은 망의 다른 노드로부터 중계된 입력원)일 수 있다. 외부에서 도착한 트래픽 원들은 서로 상호 독립(mutually independent)적 이라고 가정 할 수 있고 또한 내부 도착이라 할지라도 서로 다른 직전 노드로부터 도착하는 트래픽 원에 대해서는 같은 가정이 적용될 수 있다. 그러나 직전 노드가 서로 같은 링크에서

도착하는 트래픽 원들 사이의 상관 관계는 무시할 수 없다. 즉 이러한 트래픽 원들은 망내의 여러 노드를 거쳐 나갈 때 같은 트래픽 상태를 갖는데 한 노드에서 모두 bursty 상태에 있었다면 다음 노드에서도 모두 bursty 상태에 있게 되고 idle하면 다음 노드에서도 모두 idle한 상태에 있게 된다. 따라서 하나의 노드를 떠나는 트래픽 흐름의 상당부분이 다시 다음 단계의 같은 노드로 갈 때 트래픽 원들 사이의 cross correlation을 무시할 수 없다. 이 경우 각 대기 노드를 독립적으로 분리(nodal decomposition)해 생각하는 것이 불가능하므로 분석 과정이 더욱 복잡성을 띠게 된다.

Kröner[18]는 이의 분석을 위해 한 노드에서 다음 노드로 향하는 트래픽 종류를 몇가지로 나누었다. 즉 처음 노드에의 호 접속수를 N_f , 두 번째 노드에 새롭게 도착하는 호 접속수를 N_a , 처음 노드를 떠나 두 번째 노드 도착전에 다른 노드로 향하는 접속 호의 수를 N_d , 그리고 두 번째 노드에의 호 접속수를 N_{II} 로 분류한 후 연속적인 노드에서의 전송 지연시간의 양의 상관관계를 고려하였다. 한편 Li[16]는 cross correlated 트래픽이 downstream 노드에 미치는 트래픽 특성 및 대기 지연 시간 분석을 위해서 다음 <그림 2>와 같은 망 모델을 고려하고 simulation을 수행하였다. <그림 2>에서 R 은 Q_0 에서 나온 출력 패킷이 Q_1 에 도착하는 비율($0 < R < 1$)을 나타내는데 R 을 변화시킴으로써 트래픽 원들사이의 cross correlation이 Q_1 노드의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.



<그림 2> Cross Correlation 트래픽의 영향

Q_1 의 서비스율은 Q_0 와 Q_1 의 활용도(utilization)가 같도록 조정하였다. 한편 Q_2 는 $N_0 \times R$ 개의 on-off 외부 입력원을 갖고 Q_1 과 같은 활용도를 갖도록 한후 Q_1 과 Q_2 의 대기길이를 비교해보았다. 결과는 R 이 커짐에 따라 Q_1 에서의 평균 대기길이가 짧고 분산도 작은 것으로 나타났는데 이는 일정 간격으로 패킷을 처리하는 Q_0 때문에 Q_1 에 도착하는 트래픽이 smooth해 졌음을 나타낸다. 다시말하면 트래픽 원간 cross-correlation이 downstream 노드에서의 평균대기길이와 분산을 줄이는 효과를 야기시켰음을 볼 수 있다.

한편 많은 수의 노드와 링크를 갖는 큰 규모의 ATM망에서는 트래픽이 ATM 링크들간에 잘 분포되어 있다고 가정 할 수 있다. 이때는 특정 노드를 떠나는 트래픽 흐름중 극히 일부분만 다음 단계의 같은 노드를 거쳐 나간다고 생각 할 수 있기 때문에 트래픽 원들사이의 cross correlation은 무시 할 수 있을 것이다. Li[16]는 simulation을 통해 특정 노드의 출발 트래픽 중 10% 이하 (즉 $R < 0.1$)가 같은 다음 노드로 향하면 트래픽원들간 cross correlation을 무시할만 하다고 밝혔다.

2.3 입력원의 트래픽 모델

Friesen[17]은 입력원의 트래픽 모델이 다중화나 스위치에 의해 발생하는 smoothing 효과 보다 downstream 트래픽 특성과 노드 지연시간 및 대기길이 등의 성능에 더 큰 영향을 미치는 것을 발견했다. 문제는 특정 호가 요구하는 대역이나 buffer 크기를 적절히 나타내 줄 수 있는 트래픽 파라메타로서 어떤 것들을 망에 제공해주느냐이다. CCITT 1.311은 3가지 파라메타, 즉 peak bit rate, 평균 bit rate, 그리고 평균 burst 길이를 제안하고 있지만[30] 이것만으로 입력원의 트래픽 특성치를 나타내기는 불충분하다. 예로 동일한 위의 3가지 파라메타 값을 갖는 IPP나 MMPP 트래픽 모델의 경우를 생각해 볼

수 있는데 [17]에서는 이중 어떤 모델을 사용하느냐에 따라 downstream의 트래픽 특성과 노드 성능(대기지연시간 및 길이)에 큰 차이가 남을 보여 주고 있다. 즉 현재 제안된 3개의 트래픽 파라메타 만으로는 주어진 트래픽 원의 burstiness를 명확하게 나타낼 수 없다. 트래픽 원의 burstiness를 잘 설명해 줄 수 있는 지표 없이는 주어진 트래픽 원이 망 성능에 어떤 영향을 미치는지 정확히 알 수 없고 따라서 얼마만큼의 망 자원을 요구하게 되는지 결정 할 수 없을 것이다.

셀 도착 시간 간격의 coefficient variation(CV)이 트래픽 원의 burstiness를 어느 정도 규명해 줄 수 있다. 앞 절에서 논의한 smoothing 효과로 인해 CV도 트래픽이 망내에서 다중화 장치나 스위치 노드를 거쳐 나감에 따라 감소하게 된다. 따라서 망의 입력에서 정의한 원래 CV가 망내부에 있는 노드의 트래픽을 특성화하는데 사용되어서는 안될 것이다. Ohba[34]는 시스템의 평균지연시간이나 대기길이 등이 셀 도착시간 간격의 CV에 매우 민감하다는 것을 보였다. 일반적으로 트래픽 특성치 예측이 보수적이라는 점을 감안한다면 CV를 토대로 하여 망 성능치를 예측할 때는 매우 세심한 주의가 필요할 것이다.

한편, 노드를 거쳐 나갈 때 트래픽 특성치들의 변화를 파악하고 입력 도착원들의 long term과 short term 상관관계가 이 변화에 어떤 영향을 주는지 명확히 파악하기 위해서는 on과 off 구간의 평균치 뿐만 아니라 coefficient variation이나 auto correlation등과 같은 2nd order 통계량이 필요하다. 그런데 on-off 트래픽 모형은 하나의 파라메타를 갖고 있기 때문에 on과 off 구간의 평균값이 주어지면 coefficient variation은 자동적으로 결정되므로 심층적인 분석이 힘들다. 이 점을 극복하기 위해서는 다수개의 상태를 갖는 MMPP등을 이용하면 on과 off 구간의 평균값을 변형시키지 않고도 coefficient variation 값을 조정해 나갈 수 있을 것이다.

3. ATM 망의 End-to-End QoS 성능 분석

ATM망에서의 QoS 성능 보장을 위해서는 2장에서 언급한 end-to-end 트래픽 특성을 다음 두 가지 측면으로 다룰 수 있다.

- 호들이 다중화 될 때 트래픽 특성치의 변화를 막기 위해서 특별한 다중화 장치를 사용한다.
- 다중화장치나 스위치 노드를 거쳐 나갈 때 발생하는 호의 트래픽 특성치 변화를 고려해 나간다

본 장에서는 ATM망의 QoS 성능 보장을 위한 접근 방법을 크게 다음 4가지로 나누어 살펴보았다.

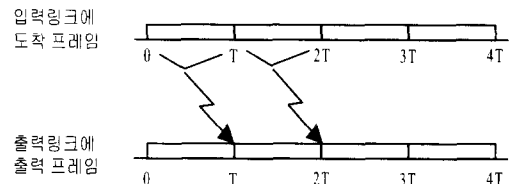
- tightly controlled 접근 방법
- 근사(approximate) 접근 방법
- 한계(bounding) 접근 방법
- 측정(measurement)에 기초한 접근 방법

이 중 tightly controlled 접근 방법은 위의 두 가지 측면중 첫 번째 측면에서 호의 트래픽 흐름을 다루고 있고 나머지 3가지 방법은 두 번째 측면에서 ATM망의 QoS 성능 보장을 시도하고 있다.

3.1 Tightly Controlled 접근 방법

이 방법에서는 호의 출력 트래픽 특성이 다중화 되기전의 입력 트래픽 특성과 같도록 non-work conserving 대기 서비스 체제를 사용한다. 이 접근 방법의 가장 대표적인 예가 stop-and-go 대기 방식이다[14]. 이 방식은 시간 단위인 프레임임을 정의하고 한 프레임 기간(T) 동안 스위치에 도착한 셀들은 셀이 도착한 같은 프레임 시간 내에는 출력 링크로 전송 되지 않는다. 이 조건을

만족시키기 위해서는 출력 링크가 idle한 상태에 있더라도 셀은 스위치의 출력 buffer에 대기 상태로 있는 경우도 발생한다(non-work conserving). Stop-and-go 대기 방식에서는 하나의 입력 프레임에 도착하는 셀들은 바로 다음에 시작하는 출력 프레임에 반드시 전송되는 것을 요구한다(<그림 3>). 따라서 이 조건이 항상 충족되기 위해서는 하나의 입력 프레임에 도착하는 셀들의 도착이 차단 될 수도 있다.



<그림 3> Stop-and-Go 방식

이 방법에서는 프레임 기간동안의 peak bit rate와 같은 트래픽 특성치들이 호가 망을 거쳐 나가면서 변화되지 않고 계속 유지된다. 따라서 최대 end-to-end 지연시간과 같은 QoS 성능이 비교적 간단히 유도 될 수 있는데 특정 호 패킷의 end-to-end 지연시간은 다음과 같이 표현된다.

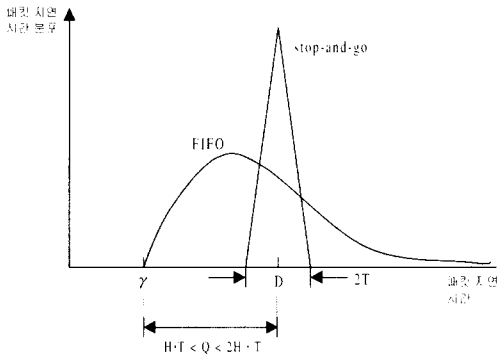
$$D = D' + d$$

여기서 D' 은 연결지연을 나타내는데 연결호의 모든 패킷은 일정 값을 갖는다. 한편 d 는 패킷에 따라 변하는 지연 jitter값을 나타내는데 이 값은 프레임의 크기에 제한된다($-T < d < T$). 연결 지연시간 D' 은 다음과 같이 두 개의 부분으로 구성된다.

$$D' = \gamma + Q$$

여기서 γ 은 end-to-end propagation과 처리(propcessing) 지연시간의 합을 나타내며 Q 는 연결호의 총 대기 지연시간을 나타낸다. 이때 Q 는 $H \cdot T \leq Q \leq 2H \cdot T$ 로 제한되는데 H 는 호가

거쳐나가는 링크의 개수를 나타낸다. 다음 <그림 4>는 FIFO와 stop-and-go 대기 방식의 지연 시간 분포를 나타내 준다.

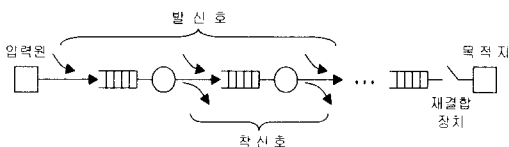


<그림 4> FIFO와 stop-and-go 대기 방식의 지연시간 비교

한편 이 방법의 단점은 non-work conserving 방식을 사용하기 때문에 매호마다 개별적으로 호의 timing requirement를 추적해야 한다는 것이다. 또한 망에 수락된 호는 대역을 peak rate에 근거하여 확보하는데 peak-to-average rate가 높은 형태의 트래픽원들은 확보된 대역중 일부만 사용하기 때문에 망 효율이 떨어지게 된다.

3.2 근사(Approximate) 접근 방법

망에 제공되는 입력 트래픽 원 들은 상대적으로 간단한 IPP나 MMPP와 같은 모델에 의해 특성화 된다. 이때 다중화 된 트래픽 원들이 각각 요구하는 QoS를 받게 되는지를 결정하기 위해서 <그림 5>와 같은 다중화된 트래픽 흐름의 end-to-end 대



<그림 5> End-To-End 분석을 위한 망 모델

기 형태 (queueing behavior)가 대기 이론 (queueing theory)이나 stochastic processes 혹은 simulation 등을 통해 분석된다. 이때 관심의 QoS 측도는 end-to-end 패킷 손실율이나 end-to-end 패킷 지연시간이다.

근사 접근 방법의 장점은 일단 모형이 구축되면 실시간, on-line구현이 가능토록 하는 단순성에 있다. 예로 이 방법에 기초하여 호 수락 제어를 수행하면 필요한 QoS 측도 계산을 거의 실시간 내에 마칠 수 있다. 또한 FCFS와 같은 가장 간단한 서비스 체제를 사용 한다는 점과 tightly controlled 접근 방법이나 곧 논의할 한계 (bounding) 접근 방법과 달리 통계적 다중화 잇점 (statistical multiplexing gain)을 누릴 수 있어 링크의 용량을 초과하는 트래픽도 수용할 수 있다는 장점이 있다.

이 방법의 단점은 망내 복잡한 트래픽 환경하에서 QoS 성능을 보장해 주기 위해 QoS 계산이 보수적으로 치우치게 되어 망 자원을 효율적으로 이용할 수 없다는 점이다[13]. 그러나 무엇보다도 근사 방법의 큰 한계는 다른 트래픽 원과 다중화된 후 트래픽 변화를 고려하지 않고 입력원의 트래픽 특성치를 망내부에서도 그대로 사용하는데 따른 모델의 정확성 결여에 있다. 따라서 트래픽이 망에서 여러 노드를 거쳐 나갈 때 트래픽 변화를 어느정도 고려해 주어야 하는지 또한 이와 같은 트래픽 변화를 고려하지 않는다면 어느 정도 신뢰성 있는 QoS 보장을 해 줄 수 있는지가 중요한 최근 연구 동향이다. 한편 ATM 사용자 요구 QoS는 end-to-end 성능 분석에 기초를 두고 있다. 따라서 기존의 단일 노드 성능 분석에서 벗어나 end-to-end QoS성능을 어떻게 산출하는지와 동시에 end-to-end 성능이 국지적(local)인 성능요구조건으로 어떻게 나뉘어 질 수 있는지가 역시 최근 연구 주제이다. 다음 <표 1>은 이런 관점에서 최근 연구 결과를 요약 정리 하였다.

〈표 1〉 근사 접근 방법의 최근 연구

입력 트래픽	망내 트래픽 변화	end-to-end 성능 분석 모델	성능측도	참고문헌
<ul style="list-style-type: none"> · IPP · MMPP (셀도착 간격의 coefficient of variation) 	<ul style="list-style-type: none"> · 다중화기와 스위치 노드를 거처나가면서 겪는 입력 트래픽의 smoothing 현상 	<ul style="list-style-type: none"> · simulation 	<ul style="list-style-type: none"> · 대기지연시간 · 대기길이 	17
<ul style="list-style-type: none"> · Markov modulated on-off 	<ul style="list-style-type: none"> · 망내 노드를 거처나갈 때 입력과 출력 트래픽의 on 구간과 off 구간의 변화(smoothing 효과) · cross-correlation 현상 무시 	<ul style="list-style-type: none"> · 대기이론을 이용하여 연속적인 두노드의 입력과 출력 트래픽의 on구간과 off 구간의 변화 분석 · 위 과정을 반복적으로 수행하여 end-to-end 성능분석 	<ul style="list-style-type: none"> · 대기길이 	10
<ul style="list-style-type: none"> · on-off 흐름 	<ul style="list-style-type: none"> · 연속하는 두 개의 노드를 같이 거처나가는 트래픽 원들간 cross-correlation · 노드를 거치면서 발생하는 트래픽 특성치 변화 무시 	<ul style="list-style-type: none"> · 각 노드의 분석은 long-term 변동을 나타내주는 fluid flow 모형과 short-term 변동을 다루는 M/D/1/S 모형을 동시에 사용하여 단일노드에서 지연시간 분포를 유도 · 연속적인 노드분석시 연결호의 경로 경우를 조사하여 연속적인 노드에서 전송지연시간의 양의 상관관계를 고려 · 위 과정을 순차적으로 반복하여 end-to-end 성능분석 	<ul style="list-style-type: none"> · 대기지연시간 	18
<ul style="list-style-type: none"> · on-off 흐름 · MMPP (on과 off 구간의 coefficient of variation 고려) 	<ul style="list-style-type: none"> · 트래픽이 망노드를 거처나갈 때 트래픽 특성치 변화(distortion) · 개별적인 출력원들 사이의 cross correlation 	<ul style="list-style-type: none"> · simulation 	<ul style="list-style-type: none"> · 망내 여러 인자에 따른 트래픽 변화 분석 <ul style="list-style-type: none"> - node의 utilization - peak rate - on과 off 구간길이 - activity 비율 - 사용자수 	16

3.3 한계(Bounding) 접근 방법

이 방법에서는 두가지 형태의 end-to-end 성능 한계치가 제시된다. 하나는 deterministic하게 “호 i 로부터 나오는 모든 셀들의 지연시간은 x 보다 작다.” 라는 보장을 해주는 접근 방법이다. 다른 하나는 probabilistic 한 방법인데 “호 i 로부터 나온 셀들의 지연시간이 x 보다 클 확률은 y 보다 작다” 라는 식의 보장을 해 준다. 이 방법에서는 다중화기나 스위치를 통과 함에 따라 발생하는 트래픽의 변화를 적절히 고려해 주기도 하지만 [13, 24], 매 노드에서 leaky bucket을 사용하거나 burstiness 제약(constraint)에 맞도록 regulator를

통해 입력 트래픽이 도착하도록 하는 방식을 택하기도 한다[5, 6, 19, 20, 21]. 트래픽의 변화를 고려해 주는 경우 망의 입력 트래픽 특성치와 routing 경로가 주어졌을 때 일반적으로 두 개의 단계를 거쳐 성능 한계치를 구해 나간다. 첫 번째 단계에서는 망 입력 트래픽의 한계치(bound)를 구한후 호가 망내 다중화기나 스위치 노드를 거친후 변화된 트래픽의 한계치를 유도한다. 두 번째 단계에서는 이를 토대로 전체적인 end-to-end 성능 한계치를 구해나가는 과정을 밟는다.

한편 본 접근방법에서는 일반적으로 각 노드에 할당된 대역의 합은 그 링크의 용량을 초과할 수 없도록 되어 있다. 즉

$$\sigma_i + \sum_{j \in J^m} \psi_j^m \leq B^m$$

σ_i : 신규호 i 의 요구대역

ψ_j^m : 링크 m 에 기존에 연결된 호들($j \in J^m$)의 대역

B^m : 링크 m 의 대역

따라서 end-to-end 성능 한계치는 다른 연결호의 트래픽 환경과는 무관하게 독립적인 work conserving system의 대기 행렬 분석으로부터 유도 될 수 있다. 그러나 성능 한계치를 구해 나갈 때 각 노드에서 통계적 다중화의 잇점을 살릴 수 없어 이 방법으로 호 수락제어를 수행 할 경우 망에서 수용할 수 있는 최대 가입자수가 상당히 줄어들 수밖에 없다. 따라서 어떻게 하면 대역을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있는가에 대한 연구가 필요한데 [23]에서는 동일한 경로를 갖는 몇 개의 호를 "super session"으로 묶어 통계적 다중화의 효과를 얻는 방안이 제시되고 있다. 한편 deterministic 접근방법에서는 매 연결 호마다 별개의 buffer를 두게 되므로 buffer 공유(sharing)를 기대할 수 없지만 probabilistic방법에서는 각 노드에 공용의 buffer를 두어 그 노드를 거치는 모든 호가 통계적으로 사용할 수 있으므로 효율을 높일 수 있다.

최근들어 이 방법을 토대로 한 호 수락제어 방법이 연구되고 있다. Deterministic한 경우는 DBC(deterministic burstiness curve)를, probabilistic한 경우는 PBC(probabilistic burstiness curve)를 유도한 뒤 한계(bounding) 방법으로 유도된 end-to-end 지연시간이나 패킷 손실을 한계치를 근간으로 호 수락 영역을 결정한다. 한편 DBC의 계산은 rate 함수로부터 비교적 간단히 구할 수 있는 반면 PBC 계산은 트래픽의 rate histogram과 power spectrum을 토대로 stochastic traffic modeling과 대기이론 분석 과정을 필요로 한다. 예로 최근 [32]는 광범위한 범위의 rate histogram과 power spectrum에 부합하는 MMPP의 구축과정을 제시하였는데 이 MMPP를 토대로 수치적으로 PBC를 구해나갈 수 있다. 그러나 실제적으로 호 수락제어

수행시 매 호가 도착 할 때 마다 일일이 PBC를 새롭게 구축하여 사용하는 것은 거의 불가능한 일 이기 때문에 호의 형태에 따라 미리 구축한 PBC를 망의 data base로부터 받아 사용하는 것이 현실적 방안이다.

다음 <표 2>는 최근 연구 결과를 요약 정리하였다.

3.4 측정(Measurement)에 기초한 접근 방법

이 방법은 분류된 트래픽 형태들에 대한 사전 측정에 의존하거나 on-line 측정을 수행하는 두가지로 크게 대별된다.

먼저 첫 번째 방법 [26, 27]에서는 특정 형태의 트래픽 원들에 대하여 사전에 미리 측정을 행한후 새롭게 도착하는 호가 이중 어떤 형태의 트래픽인지 파악하여 호 수락 여부를 결정한다. 이 방법의 장점은 호가 자신의 트래픽 파라메타를 선언 할 필요가 없다는 점이다. 그러나 호는 미리 설정된 몇가지의 트래픽 형태 중 하나에 속해야 하며 QoS 보장이 어느정도 이루어 지기 위해서는 호의 트래픽이 선정된 형태의 트래픽 특성과 일치 해야만 한다.

두 번째 on-line 측정 방법 [9, 12, 25, 28]에서는 이미 수락된 호들의 대역은 처음 호 연결 요구시 호가 요청한 트래픽 파라메타들을 사용하지 않고 이 트래픽의 현재 측정치로부터 결정된다. 이 측정치는 다시 새롭게 도착하는 호의 요구 트래픽 파라메타와 함께 도착 호의 호 수락 여부를 결정 하는데 사용된다. 일반적으로 새롭게 도착하는 호의 요구 트래픽 파라메타는 호 트래픽의 불확실성 등으로 과대 평가되는 경향이 있다. 본 방법에서는 호 연결 요구시 과대 요구된 트래픽이 호 연결 후에는 측정을 통해 수정되므로 망의 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 예로 도착하는 셀의 개수를 측정하여 연결된 호로부터 도착하는 셀 개수의 확률분포를 추정한후 호 수락제어를 수행하는 경우를 생각해 보자.

〈표 2〉 한계 접근 방법의 최근 연구

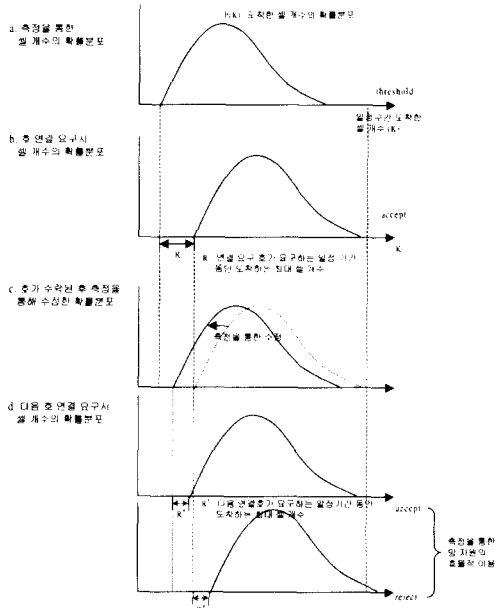
셀 도착 과정	노드에서 서비스 체제	성능 한계치	트래픽 변화	보장 형태	참고 문헌
<ul style="list-style-type: none"> no assumption - 일정 구간에 도착하는 셀 수에 대한 stochastic bound 	<ul style="list-style-type: none"> FCFS 	<ul style="list-style-type: none"> 지연시간 분포의 bound buffer 점유율 	<ul style="list-style-type: none"> 특정 링크 다중화기에 도착한 호의 트래픽 특성치로부터 호가 링크를 거쳐 다른 호와 다중화 될 때 출력 트래픽 특성치 한계치 유도 	<ul style="list-style-type: none"> probabilistic 	13
<ul style="list-style-type: none"> exponentially bounded burstiness 	<ul style="list-style-type: none"> work-conserving 	<ul style="list-style-type: none"> 지연시간 및 대기 길이 분포의 bound 	<ul style="list-style-type: none"> 입력 트래픽이 다중화 장치나 스위치를 거친 후의 출력 트래픽 한계치 유도 	<ul style="list-style-type: none"> probabilistic 	24
<ul style="list-style-type: none"> MMPP 	<ul style="list-style-type: none"> work-conserving PGPS (rate proportional processor sharing) fixed rate processor sharing 	<ul style="list-style-type: none"> end-to-end 패킷 손실율 		<ul style="list-style-type: none"> probabilistic 	23
<ul style="list-style-type: none"> no assumption - 각 노드에서 leaky bucket을 통한 트래픽 도착 	<ul style="list-style-type: none"> work-conserving PGPS 	<ul style="list-style-type: none"> end-to-end 지연 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 각 노드에서 leaky bucket을 (token rate와 bucket 용량) 통한 burstiness 제어 	<ul style="list-style-type: none"> deterministic 	5, 6
<ul style="list-style-type: none"> no assumption - 각 노드에서 regulator를 통한 트래픽 도착 	<ul style="list-style-type: none"> FCFS 	<ul style="list-style-type: none"> end-to-end 지연 시간 buffer 크기 효율 	<ul style="list-style-type: none"> burstiness 제약을 설정한 후 어떤 노드에서 이를 만족하지 않는 트래픽은 leaky bucket과 유사한 regulator를 통하여 burstiness 제약을 충족시키는 트래픽으로 변환(반드시 같은 파라메타일 필요는 없음) 	<ul style="list-style-type: none"> deterministic 	19, 20
<ul style="list-style-type: none"> no assumption - MNA(maximum number of arrival), ANA(average) or VNA(variance) 	<ul style="list-style-type: none"> FCFS 	<ul style="list-style-type: none"> 셀 손실 확률 	<ul style="list-style-type: none"> 각 호의 MNA, AVA, VNA는 변화시키지 않고 그대로 이용 	<ul style="list-style-type: none"> deterministic 	8, 9
<ul style="list-style-type: none"> no assumption 	<ul style="list-style-type: none"> fixed rate processor sharing 	<ul style="list-style-type: none"> end-to-end 지연 시간 		<ul style="list-style-type: none"> deterministic 	31
<ul style="list-style-type: none"> no assumption - leaky bucket을 통한 트래픽 도착 	<ul style="list-style-type: none"> FCFS 	<ul style="list-style-type: none"> 최악의 입력 트래픽 하에서 token rate와 bucket 용량 대 지연시간 한계치 유도 	<ul style="list-style-type: none"> 각 노드에서 leaky bucket을 통해 도착하는 최악의 입력 트래픽 파악 	<ul style="list-style-type: none"> deterministic 	19

다음 <그림 6>의 a는 측정을 통해 예측한 셀 개수의 확률 분포를 나타낸다. 이때 도착한 호가 요구하는 트래픽 파라메타를 고려한 호 연결요구 시 도착하는 셀 개수의 분포가 그림 b에 나와있다. 그림 c는 호가 수락된 후에 도착하는 셀 개수를 측정을 통해 수정한 확률분포이며 그림 d는 측정

을 통해 망 자원을 효율적으로 이용할 수 있게 됨을 보여 주고 있다.

한편 측정에 근거한 접근방법의 단점은 호 수락 여부 결정시 측정되는 현재 진행중인 호들의 트래픽 부하가 호가 수락된 후 얼마든지 변해 나갈수 있기 때문에 정확한 QoS 보장을 해줄 수 없다는

점이다. 이런 이유로 측정에 기초한 QoS 보장은 "predictive service" 이상의 의미를 부여 할 수 없다.



<그림 6> 측정에 의한 망 자원의 효율적 사용

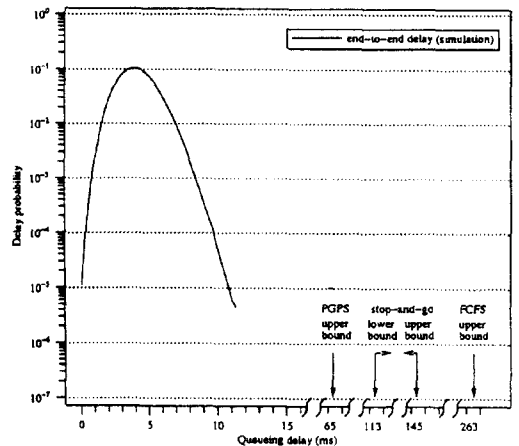
4. 결 론

4.1 각 방법들의 비교 검토

다음 <그림 7>은 4개의 스위치를 거쳐 나가는 ATM망에서 end-to-end 지연시간의 분포를 위한 simulation 결과를 나타내주고 있다[2]. 아울러 PGPS 한계 방법, stop-and-go 방법, 그리고 FCFS 근사방법의 지연시간 bound를 유도하였다.

<그림 7>에서 볼 수 있듯이 PGPS 한계, stop-and-go, 그리고 FCFS 근사 방법순으로 지연시간 bound의 정확성을 보여주고 있다. 그러나 각 방법들을 평가할 때 정확한 지연시간 bound 외에 또 중요한 요인 중의 하나가 각 방법 하에서 얼마나 잘 망 자원들이 효율적으로 사용될 수 있는가이다. 동일한 트래픽 환경과 부하 하에서 각 방법들의 망 효율을 정량적으로 비교한 연구는 아직 없지만

각 방법들의 특성에 비추어보면 일반적으로 측정에 의한 방법 하에서는 효율적인 망 사용이 가능하지만 tightly controlled 방법과 한계 방법 하에서는 망의 효율적 사용을 기대하기 힘들어 보인다. 근사적 방법에서는 통계적 다중화의 이점으로 망 자원의 효율적 사용이 어느정도 보장된다. 그러나 모델의 부정확성으로 인해 QoS 예측이 너무 보수적으로 치우치게되면 이로인한 망 자원의 낭비가 생길 수 있다. 다음 <표 3>은 위 두가지 측면에서 각 방법들을 살펴보았으며 그들의 장·단점 또한 요약 정리 하였다.



<그림 7> 4개의 스위치를 통과하는 ATM 망의 지연시간 분포와 한계치

4.2 추후연구

ATM 망에서 통계적 다중화에 의해 얻어지는 망 자원의 효율성을 확보하면서 end-to-end QoS 보장을 해주는 문제는 B-ISDN에서 매우 중요하지만 아직 많은 부분이 미해결 문제로 남아 있으며 계속 연구되고 있는 분야이다. 국내에서 ATM 망의 end-to-end QoS 성능분석에 관한 연구는 아직 시도되지 않고 있다. 다만 입력 트래픽 원이 하나의 다중화 장치를 지날 때 발생하는 지연시간 문제라든지 아니면 호선실등에 관한 문제를 적당한 queueing모형이나 아니면 속산 시뮬레이션 등

〈표 3〉 End-to-End QoS 보장을 위한 4가지 접근 방법

	QoS bound	망의 효율적 사용	장 점	단 점
Tightly Controlled 방법	비교적 loose bound	peak rate에 근간을 두고 있기 때문에 망의 효율 낮음	지연시간 jitter를 일정 수준 이상 줄일 수 있다	지연시간이 과도하게 예측될 수 있으며 망 효율이 매우 낮음
근사 방법	loose bound	통계적 다중화의 이점으로 어느 정도 망의 효율적 사용 가능하나 보수적인 QoS 예측시 망 효율 저하	호 수락 제어 절차에 사용시 real-time on-line 적용가능	망내 깊숙히 있는 노드에서의 근사적인 트래픽 모델 설정으로 인한 과도한 지연시간예측 및 이로 인한 망의 비효율적 사용
한계 방법	비교적 tight bound	통계적 다중화의 이점을 고려치 않고 있기 때문에 망 효율 낮음	간단한 계산을 통한 비교적 정확한 bound	트래픽의 stochastic bound 과다 설정시 망 효율의 급속한 저하
추정에 의한 방법	tight bound	호의 트래픽 선언과 측정을 통한 보완과정을 거쳐 망 효율 높음	높은 망 효율	추정에 따르는 overhead 문제

의 기법을 사용하여 분석을 시도하고 있는 정도이다. 다음 <표 4>는 본 조사 연구 결과를 토대로 각 4가지 접근방법별로 추후 연구 과제를 살펴 보았다. 이는 아직 하나의 노드(다중화 장치 또는 스

위치) 분석에 머물고 있는 국내의 ATM 트래픽 연구를 end-to-end QoS 분석을 위한 multi-hop망 환경으로 끌어 올리는데 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

〈표 4〉 추후 연구 분야

접근방법	연구 분야
Tightly Controlled 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 다수개의 프레임 사이즈를 제시 · 다양한 서비스를 제공하는 B-ISDN 망에서 모든 서비스에게 peak rate에 근거한 동일한 프레임 전략(frame strategy)을 적용하면 망 효율의 급속한 저하를 피할 수 없다. 따라서 다른 트래픽 관리 정책(traffic management policy)과 stop and-go와 같은 프레임 전략을 통합하는 연구 수행
근사 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 트래픽의 smoothing과 트래픽 원들간의 cross correlation등을 고려하여 모델링 할 경우 망 자원의 효율적 이용에 대한 정량적 분석 · 트래픽 관리 정책 혹은 congestion control에 따른 트래픽 변화 조사
한계 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 보다 정확한(tight) QoS bound를 제공하면서 buffer 공유(sharing)나 트래픽 통합(integration)등을 통해 망 효율을 극대화 시키는 분야 · 한계 방법에 기초한 CAC(call admission control)방법 제안 · 트래픽 특성치의 효율적인 트래픽 분포 bound 형태 제시
추정 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 현재 진행중인 호들의 트래픽을 효율적으로 측정할 수 있는 방법과 이로부터 트래픽 파라메타를 예측하는 방법 · 망의 효율을 극대화하기 위한 최적의 트래픽 파라메타 선정 방법

참고 문헌

- [1] Xing, Y., Bruneel, H., "A Simple Approach to Obtain Tight Upper Bounds for the Asymptotic Queueing Behavior of Statistical Multiplexers with Heterogeneous Traffics," *Performance Evaluation*, Vol.22(1995), pp.159-173.
- [2] Akyildiz, I. F., "End-to-End Modeling and Analysis of Integrated Network Architectures," School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology.(1995)
- [3] Kurose, J., "Open Issues and Challenges in Providing QoS Guarantees in High Speed Networks," *Computer Communication Review*, Vol.23, No.1(1993), pp.1-15.
- [4] Kurose, J., "On Computing Per-session Performance Bounds in High Speed Multi-hop Computer Networks," Proc. 1992 ACM SIGMETRICS/IFIP Performance '92 Conf., pp.128-139.
- [5] Parekh, A. K., Gallager, R. G., "A Generalized Processor sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks : The Single-Node Case," *IEEE Transaction on Networking*, Vol.1, No.3(1993), pp.344-357.
- [6] Parekh, A. K., Gallager, R. G., "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Service Networks: The Multiple Node Case," *IEEE Transactions on Networking*, Vol.2, No.2 (Apr. 1994), pp.137-150.
- [7] Satio, H., Shiimoto, K., "Dynamic Call Admission Control in ATM Network," *IEEE JSAC*, Vol.9, No.7(Sept. 1991), pp.982-989.
- [8] Satio, H., "Call Admission Control in an ATM Network Using Upper Bound of Cell Loss Probability," *IEEE Transaction on Comm.*, Vol.40, No.9(Sept., 1992), pp.1512-1521.
- [9] Satio, H., *Teletraffic Technology in ATM Networks*, Artech House (Boston · London), (1993).
- [10] Ren, J. F., Mark, J. W., Wong, J. W., "End-to-End Performance in ATM Networks," *Globe Comm.*(1994), pp.1768-1773.
- [11] Atkinson, A., "A Traffic Control Scheme for Virtual Paths in an ATM Network," *Globe Comm.*(1994), pp.996-1002.
- [12] Abe, S., "A Traffic Control Method for Service Quality Assurance in an ATM Network," *IEEE JSAC*, Vol.12, No.2(1994), pp.322-331.
- [13] Guerin, R., Ahmadi, H., Naghshineh, M., "Equivalent Capacity and its Application to Bandwidth Allocation in High Speed Network," *IEEE JSAC*, Vol.9, No.7(Sept. 1991), pp.968-991.
- [14] Golestani, S. J., "A Stop and Go Queueing Framework for Congestion Management," *ACM*.(1990), pp.8-18.
- [15] Akar, N., Arikan, E., "Markov Modulated Periodic Arrival Process Offered to an ATM Multiplexer," *IEEE INFOCOM*(1993), pp.783-787.
- [16] Lau, W. C., Li, S. Q., "Traffic Analysis in Large Scale High Speed Integrated Networks : Validation of Nodal Decomposition Approach," *IEEE INFOCOM*(1993), pp.1320-1329.
- [17] Friesen, V. J., Wong, J. W., "The Effect of Multiplexing, Switching and Other Factors on the Performance of Broadband Networks," *IEEE INFOCOM*(1993), pp.1194-1203.

- [18] Kroner, H., Eberspocher, M., T. H. Theimen, P. J. Kuhn, U. Briem, "Approximate Analysis of the End-to-End Delay in ATM Networks," *IEEE INFOCOM*(1992), pp. 978-986.
- [19] Lee, D. C., "On Effect of Arrival Rate and Burstiness in the Queueing System : Analysis of $L^b/d/1$," Queueing Systems(to appear)
- [20] Cruz, R., "A Calculus for Network Delay, Part I : Network Elements in Isolation," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Vol.37, No.1 (Jan. 1991), pp.114-131.
- [21] Cruz, R., "A Calculus for Network Delay, Part II : Network Analysis," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Vol.37, No.1(Jan. 1991), pp. 132-141.
- [22] Nikolaidis, I., Akyildiz, I. F., "Source Characterization and Statistical Multiplexing in ATM Networks," *College of Computing, GIT, Atlanta, GA*(July, 1993)
- [23] Chong, S., Li, S. Q., "Probabilistic Burstiness-Curve-Based Connection Control for Real-Time Multimedia Services in ATM Networks," *IEEE JSAC*, Vol.15, No.6(Aug. 1997), pp.1072-1086.
- [24] Yaron, O., Sidi, M., "Calculating Performance Bounds in Communication Networks," *Proceeding of INFOCOM '93*, pp.539-546.
- [25] Clark, D., Shenker, S., L. Zhang, "Supporting Real Time Applications in an Integrated Service Packet Network : Architecture and Mechanism," *Proc. ACM SIGCOMM 92*, pp.14-26.
- [26] Hyman, J., Lazar, A., Pacifici, G., "Real Time Scheduling with QoS Constraints," *IEEE JSAC*, Vol.9, No.7(1991), pp.1052-1063, Sept.
- [27] Hyman, J., Lazar, A., Pacifici, G., "Joint Scheduling and Admission Control for ATS-Based Switching Nodes," *Proc. ACM SIGCOMM '92*, pp.223-234.
- [28] Jamin, S., Shenker, S., Zhang, L. and Clark, D., "An Admission Control for Predictive Real Time Service," *Proc. 3rd Int. Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video*(1992), pp.308-315.
- [29] Woodruff, G. M., Kositpaiboon, R., "Multi-media Traffic Management Principles for Guaranteed ATM Network Performance," *IEEE JSAC*, Vol.8, No.3(Apr. 1990), pp.437-446.
- [30] Rathgeb, E. P., "Policing Mechanisms for ATM Networks-Modeling and Performance Comparison," *ITC Specialist Seminar*, 1990, Session 10. 1.
- [31] Low, S., Varaiya, P., "A Simple Theory of Traffic and Resource Allocation in ATM," *in Proc. IEEE GLOBECOM '91*, pp.1633-1637.
- [32] Hwang, C. L., Li, S. Q., "On the Convergence of Traffic Measurement and Queueing Analysis : A Statistical-Match Queueing (SMAQ) Tool," *IEEE INFOCOM '95*, (Apr. 1995), pp. 602-612.
- [33] Heffes, H., Lucantoni, D. M., "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Performance," *IEEE JSAC*, Vol.4, No.6(Sept. 1986), pp.856-867.
- [34] Ohba, Y., Murata, M. and Miyahara, H., "Analysis of Interdeparture Processes for Bursty Traffic in ATM Networks," *IEEE JSAC*, Vol.9, No.3(Apr. 1991), pp.468-476.