

# 전력 스펙트럼 해석에 근거한 VBR 비디오의 QoS 평가 및 Fair-Pricing 기법

정회원 윤찬현\*, 김상범\*, 배정국\*

## Power Spectral Analysis-Based QoS Evaluation of VBR Video and Its Application to Fair-Pricing Scheme

Chan-Hyun Youn\*, Sangbum Kim\*, Jung Guk Bae\* *Regular Members*

### 요약

다양한 응용 서비스의 특성, 마케팅과 규제등으로 인하여 네트워크 서비스에 대한 공정요금을 결정하기란 매우 힘들다. 그러나 이러한 사항들은 네트워크의 운용에만 한정되는 것이 아니라 QoS 보장을 위한 기술적 제약과 관련이 있다. 본 논문에서는 P-MMBBP에 근거한 MPEG 비디오 모형에서 전력 스펙트럼 분석 기법을 사용하여 패킷의 지연 특성과 비디오 화질 저하를 평가하였다. 이를 바탕으로 QoS를 고려한 효율적 요금 기법을 도출하기 위하여 할인율을 적용한 새로운 공정요금 기법을 제안하였다. 그 결과, 제안된 요금 기법은 광역 네트워크에서 요금의 공정성을 보장할 수 있는 특성을 보였다.

### ABSTRACT

Since so many potentials of services, applications, marketing and regulation, it is difficult to decide the fair pricing scheme of network services. However, these considerations are not particular to the operation of a communications network, which is closely related to technological constraints for QoS guarantee. In this paper, the power spectral analysis of MPEG video based on the P-MMBBP model is discussed in the manner of the QoS degradation to the packet delay. As a consequence of the QoS-degradation, a new fair-pricing scheme with the discount factor is proposed. As a result, the proposed scheme shows good characteristics to guarantee the fairness of the charging in the Internet wide-area network.

### I. 서론

인터넷 망에서의 기술적 진보는 멀티미디어 응용 서비스 전개의 토대를 마련하였다. 특히 주문형 비디오, 화상 회의(teleconference), 비디오 멀티캐스트 서비스와 같은 실시간(real-time) 서비스로 급속히 확대되고 있다. 네트워크에서 실시간 비디오는 멀티미디어

서비스 제공의 핵심이라 할 수 있다. 그런데 실시간으로 비디오 서비스를 제공하기 위하여 비디오 화질이 항상 일정하게 유지되어야 한다. 즉, 비디오 서비스에 대한 QoS(Quality of Service) 요구조건이 매우 엄격하다고 할 수 있다. QoS에 관한 많은 연구들은 주로 실시간 트래픽의 표현 기법에 집중하여 수행되고 있다<sup>[1]</sup>. 멀티미디어 트래픽은 상당한 부분이 MPEG (Moving Picture Expert Group) 압축 비디오로

\* 한국정보통신대학원대학교 초고속통신망연구실(chyoun@icu.ac.kr),

논문번호 : 99426-1025, 접수일자 : 1999년 10월 25일

※ 본 연구는 정보통신부 선도기반기술개발사업(98-159-02) 지원으로 수행된 것임

구성되며 이는 또한 VBR(Variable Bit Rate) 트래픽이다. 즉, 매우 높은 버스트 특성(burstiness), 데이터 전송률의 peak-to-mean ratio가 매우 높다. 최근의 MPEG VBR 비디오 모형에 관한 연구들은 발생된 MPEG 비디오 트래픽의 데이터 크기의 자기상관함수(autocorrelation)가 지수적으로 감쇠할 뿐만 아니라 주기성을 지닌다는 사실을 보여주고 있다<sup>[5][6]</sup>. 그러나 기존에 VBR 비디오 모형으로 사용되던 MMPP(Markov Modulated Poisson Process) 혹은 MMBP(Markov Modulated Bernoulli Process)는 위와 같은 MPEG 비디오의 발생 특성을 반영하지 못하는 것으로 알려졌다. 지수적 감쇠는 나타나지만 주기적 특성은 보이지 않기 때문이다. 특히 MPEG 비디오 트래픽의 주기적 특성은 부호화 기법에 기인하는데 이것은 대기행렬 시스템의 버퍼 길이 분포(queue length distribution)의 꼬리 특성(tail behavior)에 큰 영향을 미친다. 즉, 지연 특성에 많은 변화를 가져오며 이것은 궁극적으로 비디오의 화질에 영향을 준다. 그러나 비디오 서비스의 QoS를 확인하는 평가 방법은 트래픽 특성 예측의 어려움으로 불완전한 부분이 많다.

본 논문에서는 P-MMBBP(Periodic Markov Modulated Batch Bernoulli Process)를 MPEG 비디오 모형으로하여 QoS 저하를 평가할 수 있는 방법을 기술한다. MPEG 비디오 어플리케이션의 자기상관함수를 관측함으로써 패킷 지연의 특성을 반영한 전력 스펙트럼 기법(power spectral analysis)을 적용하여 QoS 저하를 평가하고자 하였다. 또한 이를 응용한 QoS의 측정 기반의 과금 기법(measurement-based pricing scheme)을 제안하고 그 특성을 평가한다.

## II. MPEG 비디오 트래픽 분석 모형

MPEG 부호화 방법에는 세 가지의 부호화 모드(mode)가 존재하는 데 I-프레임, B-프레임, P-프레임 코딩이 그것이다. 각 프레임에 대한 부호화 방법의 선택은 지정된 파라미터에 의해 결정되고 I-프레임 부호의 주기적 발생이 자기상관함수의 주기성을 나타낸다<sup>[5]</sup>. MPEG 비디오를 I-와 P-프레임으로만 구성된다고 가정된 최근의 한 연구<sup>[2]</sup>는 MPEG 비디오에서 I와 P 프레임을 따로 분해(decomposition)할 수 있음을 보였다. 이렇게 하면 I와 P 프레임에 대하여 각각 2-state 마코프 체인(Markov chain)으로 모델링 할 수 있다. MMBBP는 정상 상태 통계 뿐만 아니라 이차 통계(second-order statistics)를 보여줄 수 있는 모형이다. 이 프로세스는 도착하는 군집(batch)의 크기가 마코프 체

인에 의해 지배되는 각 상태에 따라 결정되는데 슬롯 간에 발생하는 상태의 천이(transition)는 시간에 대해서 독립적이다. 스펙트럼 분해에 의해 MMBBP의 자기상관함수는 복소수 형태의 전력의 선형적인 함으로 표현할 수 있다. 이를 통해 MMBBP의 자기상관함수는 지수적으로 감소하게 된다. P-MMBBP에서는 주기성을 반영하기 위하여 하나의 재생 과정(renewal process)와 두 개의 천이 확률 행렬(transition probability matrix)이 쓰인다. 행렬 S는 재생 주기에 있어서 상태 천이를 지배하며 행렬 Q는 비재생 주기(non-renewal epoch)에서의 상태 천이를 지배한다. 재생 주기는 패킷 망으로 입력되는 I-프레임을 의미한다. 마찬가지로 비재생 주기는 P 프레임의 입력을 의미한다. 먼저 interarrival 시간이 probability mass function  $f(n)$   $n=1$ 으로 주어지는 재생 과정을 생각해 보자. 재생은 반드시 슬롯 경계에서만 일어난다고 가정하자. 그리고 n번째 슬롯에서 재생 과정의 경과수명(elapsed lifetime, 또는 age)을  $A_e(n)$ 라고 표현한다. 행렬  $Q=(q_{ij})_{0 \leq i, j \leq m-1}$ 과  $S=((S_{ij})_{0 \leq i, j \leq m-1})$ 라고 하자. 이제 P-MMBBP에 대하여 상태 공간을  $\{(k, j) | k \geq 0, 0 \leq j \leq m-1\}$ 로 갖는 이차원 마코프 체인  $\{I(n)=(A_e(n), I(n))\}$ 을 정의한다.  $I(n)$ 에 대한 1단계 천이확률 행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$t_{(k, j)(k', j')} = \begin{cases} \left[ 1 - \frac{f(k+1)}{1-F(k)} \right] q_{j'j} & k' = k+1 \\ \left[ \frac{f(k+1)}{1-F(k)} \right] s_{j'j} & k' = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$F(k) = \sum_{n=1}^k f(n) \quad (2)$$

$$\begin{matrix} f(1)S & [1-f(1)]Q & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \frac{f(2)}{1-F(k)}S & 0 & [1-\frac{f(2)}{1-F(1)}]Q & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{f(k+1)}{1-F(k)}S & 0 & 0 & \dots & \dots & [[1-\frac{f(2)}{1-F(k)}]Q & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \quad (3)$$

$\frac{f(k+1)}{1-F(k)}$ 은 마지막 재생 이후로 k번째 슬롯까지 어떤 재생이 일어나지 않았을 때 (k+1)번째 슬롯 후에 재생이 일어날 조건부 확률이다. 즉, 어떤 슬롯에서 재생이 일어난 후 k번째 슬롯이 지날 때까지 어떤 재생도 일어나지 않았는데 (k+1)번째 슬롯 다음에 재생이 일어나게 되는 확률을 말한다. 만

약 어떤 슬롯의 끝에 재생이 일어 났다면 그 슬롯을 재생 슬롯이라 부르며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

즉,  $A_e(n) = k, J(n) = j$  이고  $n$  번째 슬롯은 재생 슬롯이 아니라면 조건하에서는 조건부 확률  $J(n+1) = j$ 는  $q_{jj}$ 으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
 &P\{J(n+1) = j | A_e(n) = k, J(n) = j, \text{ the slot} \\
 &\quad \text{is not a renewal slot}\} \\
 &= \frac{P\{A_e(n+1) = k+1, J(n+1) = j | A_e(n) = k, J(n) = j\}}{P\{\text{the } n\text{th slot is not a renewal slot} | A_e(n) = k, J(n) = j\}} \\
 &= \frac{t_{(k,j)(k+1,j)}}{P\{\text{the } n\text{th slot is not a renewal slot} | A_e(n) = k, J(n) = j\}} \\
 &= q_{jj} \tag{4}
 \end{aligned}$$

식(4)와 마찬가지로,  $A_e(n) = k, J(n) = j$ 이고  $n$  번째 슬롯이 재생 슬롯이라면  $J(n+1) = j$ 는  $S_{jj}$ 로 주어진다.

$$\begin{aligned}
 &P\{J(n+1) = j | A_e(n) = k, J(n) = j, \text{ the } n\text{th slot} \\
 &\quad \text{is a renewal slot}\} \\
 &= \frac{P\{A_e(n+1) = 0, J(n+1) = j | A_e(n) = k, J(n) = j\}}{P\{\text{the } n\text{th slot is not a renewal slot} | A_e(n) = k, J(n) = j\}} \\
 &= \frac{t_{(k,j)(0,j)}}{P\{\text{the } n\text{th slot is not a renewal slot} | A_e(n) = k, J(n) = j\}} \\
 &= S_{jj} \tag{5}
 \end{aligned}$$

그러므로 마코프 체인  $\{J(n)\}$ 은 다음과 같이 진행 된다. 만약 재생 슬롯이 아니라면  $\{J(n)\}$ 의 다음 차례 상태 천이는 행렬  $Q$ 를 따라 이루어 지고, 재생 슬롯이라면 행렬  $S$ 를 따른다. 행렬  $Q$ 는 비재생 주기 사이의 상태 천이 확률을 나타내는 행렬이며 행렬  $S$ 는 재생 주기 사이의 천이를 나타내는 행렬이다. 이 연구의 결과에서 의미 있는 것은 P-프레임의 발생은 오직 행렬  $Q$ 에 의해서만 영향을 받는다는 것이다. 즉, 하나의 GOP(Group of Pictures) 발생이 끝나고 다음 차례가 되었을 때 P-프레임의 발생 사이에 I-프레임이 발생되는데 이때의 P-프레임 발생은 행렬  $S$ 와 관계가 없다는, 즉, 각 프레임을 분해하여 독립적으로 모델링이 가능하다는 것이다. 다음의 식은 위와 같은 결과를 정리한 것이다.

$$P_0 Q_{I,1} + P_1 Q_{I,2} = Q_p \tag{6}$$

$$QSQ = Q^2 \tag{7}$$

$Q_p$ : P 프레임에 대한 천이 확률 행렬  
 $P_0, P_1$ : I 프레임에 대한 천이 확률 행렬  
 $Q_{I,1}, Q_{I,2}$ : I 프레임에서 P프레임으로 진행할 때의 천이 확률 행렬

식(7)에 의하여 I-프레임과 P-프레임은 각각 2-state MMBBP로 표현 할 수 있다. 이러한 결론에 의하여 MPEG 비디오 트래픽 모형 및 모의 실험 수행은 매우 간단해 짐을 알 수 있다. 아래의 그림 1은 위의 결론을 통하여 얻어진 모형의 모의 실험 결과이다. GOP 크기는 12로서 MPEG 비디오 하나의 프레임에 의해 발생하는 데이터의 크기에 대한 자기상관함수를 나타내고 있다. 자기상관함수를 구하는 방법은 아래와 같다.  $x(M)$ 을 각 프레임 당 발생하는 데이터 크기를 나타내는 랜덤 함수라고 하면

$$R(n) = E[X(m)X(m+n)] \tag{8}$$

로 나타낼 수 있다. 그림 1은 주기 12의 지수적 감쇠를 하는 자기상관함수를 보여주고 있다. GOP의 구조는 IPPPPPPPPPP와 같다. 주기가 12라고 하는 것은 I-프레임 코딩 모드의 주기적 선택에 의한 것이다. 일반적으로 I-프레임의 발생 비트량은 P-프레임의 것보다 크기 때문에 위와 같은 결과를 보이고 있다.

이러한 결과는 여러 선행 연구<sup>[5][6]</sup>에 행해진 것과 일치함을 알 수 있다.

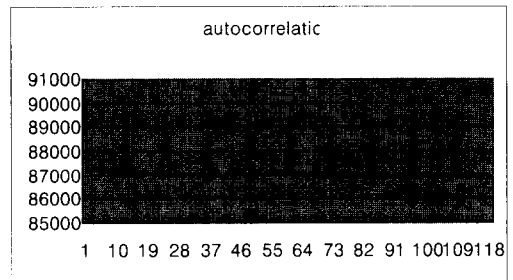


그림 1. GOP 12 MPEG 비디오의 프레임 크기에 대한 자기상관함수 예

트래픽의 특성을 기술하는 기준으로 크게 두 가지를 꼽을 수 있다. 정상 상태 통계와 이차 통계가 그것인데 자기상관함수는 이차 통계의 또 다른 표현

형태라고 볼 수 있다. 이것으로 MPEG 비디오의 특성을 나타낼 수 있고 이를 기반으로 QoS 평가의 측정 기준이 될 수 있을 것이다. 전력 스펙트럼은 자기 상관함수의 주파수 영역에서의 변환 쌍(transform pair)을 가지고 이를 통하여 QoS 저하 여부를 평가할 수 있는 기준치가 될 수 있을 것이다.

### III. 전력 스펙트럼 기법을 기반으로한 QoS 평가

패킷으로 나뉜 MPEG 비디오 스트림이 많은 노드와 링크를 거쳐 전송될 때는 패킷 손실 및 지연을 겪게 된다. 또한 프레임 당 발생하는 패킷의 수 또한 다양한 조건 하에서 매우 가변적이다.

하나의 노드를 단일 시스템으로 보았을 때 단대단(end-to-end) 측면에서의 일반적인 데이터 전송망은 이러한 단일 시스템이 여러 개가 직렬로 연결된 하나의 시스템으로 볼 수 있다. 따라서 그림 2와 같이 입력 트래픽을 가진 통제된 대기 행렬 시스템으로 표현하는 것이 가능하다<sup>[3]</sup>. 실제로 입력 랜덤 함수를 정확하게 기술 한다는 것은 매우 어렵다. Li<sup>[4]</sup>의 연구는 대기행렬의 성능을 평가할 때 고차항 통계보다 이차 통계가 더 중요하다는 것을 보여준다. 앞서 언급했듯이 이차 통계는 주파수 영역에서 입력 전력 스펙트럼  $P_I(\omega)$ 로 기술된다. 기존의 중요한 연구 결과로서 저주파 대역의 입력 전력은 대기행렬 시스템 성능에 중요한 영향을 미친다. 고주파 대역의 전력은 어느 정도까지는 무시될 수 있다. 이 연구 결과가 궁극적으로 의미하는 것은 트래픽의 상관성이 높을 수록 전체 망 성능에 많은 영향을 주며 다른 각도로 보면 망에서 여러 가지 제어를 수행한다면 입력 트래픽 특성에 변화를 줄 수 있다는 것이다. 네트워크의 버퍼를 하나의 필터(Filter)로 보았을 때 빠르게 입력되는 패킷이 버퍼에 저장되어 있다가 전송되기 때문에 단기 상관성(short-term correlation)은 제거된다. 그러나 장기상관성(long-term correlation)은 제거되지 못하고 네트워크 성능에 영향을 준다. 멀티미디어 트래픽의 경우 특히 장기상관성이 높다는 여러 연구 결과를 볼 때, 전력 스펙트럼의 차이를 관찰한다면 QoS 저하를 평가할 수 있는 측정 기반의 기법으로 응용 가능 하다.

본 논문에서는 다양한 조건하에서 지연 특성을 중심으로 살펴보았다. 특히, 망 부하(load)에 따른 지연의 변화를 살펴보고 모의 실험을 수행하였다. 적절한 모의 실험을 수행하기 위하여 interarrival 시간의 상

관성을 구하는데 앞서 언급된 MPEG 비디오 모형을 적용하였다.

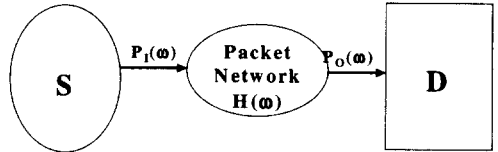


그림 2. 전력 스펙트럼 분석을 적용하기 위한 일반적인 네트워크 모형

그림 3은 12 GOP의 MPEG 비디오 트래픽의 전력 스펙트럼을 관찰한 것이다. 출력 전력 스펙트럼을 구하는 방법은 위의 그림 2의 개념을 이용하면 된다. 다음 4절에서 이에 관한 자세한 내용을 다루기로 한다. P-MMBBP 모형을 기반으로 한 모의 실험 및 해석을 통해 본 논문을 통해 제안된 기법이 QoS 저하를 측정할 수 있는 기준임을 확인 할 수 있다.

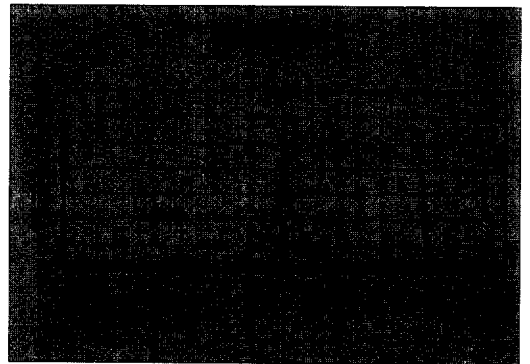


그림 3. 입력 트래픽의 전력 스펙트럼 예시

### IV. 모의 실험 결과 및 분석

효율적인 모의 실험을 위하여 다음의 몇 가지 제약 조건을 둔다.

- 버퍼의 크기는 매우 크다.
- 입력 단에서 트래픽 성형(traffic shaping)을 하지 않는다.
- 체증(Congestion)을 겪은 패킷은 폐기(discard)되지

않는다.

- 중간의 패킷 전달 경로(path)는 측정하는 동안 변하지 않는다.

출력 링크 속도는 20Mbps이며 시험 망에 입력되는 스트림은 모두 5개이다. 하나는 MPEG 비디오 트래픽이며 나머지 4개는 일반적인 VBR 트래픽이다. 또한 망 부하에 따른 지연의 변화를 살펴보기 위해 14개의 트래픽 조건을 구성하였다. 본 논문에서 수행된 모의 실험모형은 그림 4에 나타나 있는데 여기서 노드의 수가 적은 것이 전체 실험의 정확성을 떨어뜨릴 수 있지만 자기상관함수의 변화 정도를 살펴볼 수 있는 것을 목적으로 하기에는 충분하리라 생각한다. 자세한 트래픽 조건은 아래의 표 1에 정리하였다.

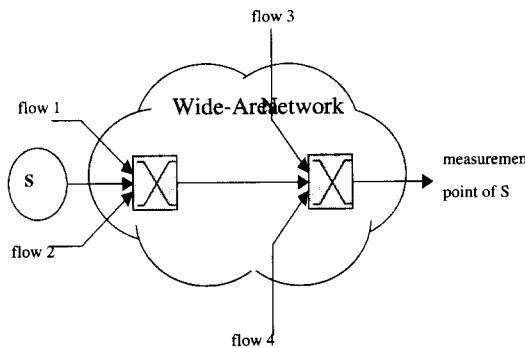


그림 4. 모의 실험 네트워크 모형도

표 1. 입력 트래픽 부하 조건

MPEG stream	flow 1	flow 2	flow 3	flow 4	average load	profile number
19.80	10.34	10.34	12.20	15.56	68.24	1
	10.34	12.20	12.20	15.56	70.10	2
	10.34	12.20	15.56	17.09	74.99	3
	10.34	12.20	15.56	19.57	77.47	4
	11.16	12.20	15.56	19.57	78.29	5
	12.17	12.20	15.56	19.57	79.30	6
	13.41	12.20	15.56	19.57	80.54	7
	14.35	12.20	15.56	19.57	81.68	8
	10.34	15.56	17.09	19.57	82.36	9
	10.34	15.56	17.09	22.20	84.99	10
	10.34	15.56	19.57	22.20	87.47	11
	12.20	15.56	19.57	22.20	89.33	12
	12.20	17.09	19.57	22.20	90.86	13
	15.56	17.09	19.57	22.20	94.22	14

그림 5는 망 부하가 높아 질수록 상관성이 더욱 높아짐을 나타내고 있다. 이러한 상관성은 망 부하 증가에 따라 패킷이 주어진 지연의 문턱 값(threshold)을 넘어설 확률이 높아지는 것을 의미한다. 전력 스펙트럼은 QoS 저하를 평가하는 데 더욱 유용하게 쓰일 수 있다.

신호 전력의 차이를 쉽게 구할 수 있기 때문이다. 그러나 여기서 유의해야 할 점은 기준 값을 무엇으로 정하느냐 하는 것이다. 단대단(end-to-end) 측정에서 입력의 전력 스펙트럼을 미리 알고 있지 않는 한 비교가 불가능하기 때문에 종단 지점에서 측정 및 비교 기준이 선정 되어야 한다. 본 연구에서는 망 부하가 제일 낮은 부하 조건 (load profile) 1을 기준으로 삼았다. 이러한 결과들은 할인율(discount factor)을 계산하는데 필요한 비용 함수(cost function)로 사용될 수 있다.

그림 7의 측정된 비디오 화질은 부하 변동에 따른 화질 저하 변화를 나타내고 있다. 그림 7의 (b) ~ (f)는 각각 표 1의 부하량에 따라 관측한 것이다.

## V. 할인율을 적용한 Fair-Pricing 기법

### 1. QoS 기반의 과금 모형에 대한 적용

이번 절에서는 QoS를 고려한 과금 모형에 대해 논의 한다. 과금 기법에는 peak rate, 리키 버킷 파라미터(leaky bucket parameter)와 같이 사전에 미리 알 수 있는 정적 파라미터와 데이터 연결의 시간이나 사용량과 같이 사후에 알 수 있는 동적 파라미터가 있다. 일반적으로 과금 기법은 유효 대역폭(effective bandwidth) 개념을 바탕으로 해석한다. 고속의 링크에서 도착 프로세스를 독립 유형  $j$  소스(source)의 중첩(superposition)이라 하고  $n_j$ 를 유형  $j$  연결의 수라고 하자. 그러면  $n=(n_1, \dots, n_j)$ 이다. 이산 시간 모형을 가정하여  $X_{jk}[0, t]$ 를 주기 1, 2, ...,  $t$ 에서 유형  $j$ 의  $k$ 번째 소스에 의해 생성된 전체 부하라고 하자.  $X_{jk}[0, t]$ 를 정상 증분이라고 가정하면 소스의 유효대역폭은 다음과 같이 정의된다.

$$a_j(s, t) = \frac{1}{st} \log E[e^{sX_{jk}[0, t]}] \quad 0 < s, t < \infty \quad (9)$$

Courcoubetis<sup>[8]</sup>는 매우 큰  $t$  값 및 버퍼의 꼬리 특성에 대한  $a_j(s, t)$ 의 평가를 연구하였다. 유효 대역폭은 스위치에서 하나의 커넥션이 사용하는 자원량

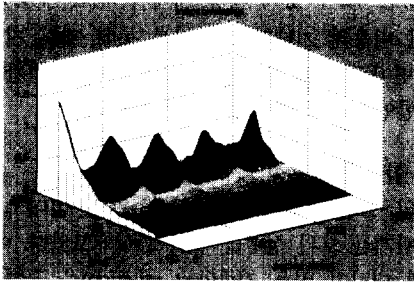


그림 5. 10개의 망 부하 조건에 따른 MPEG 비디오의 자기상관함수

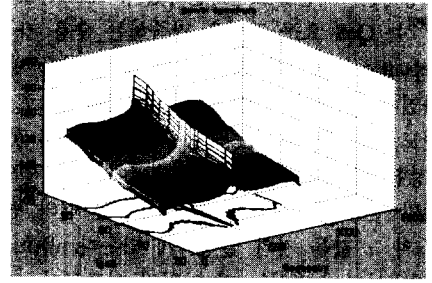
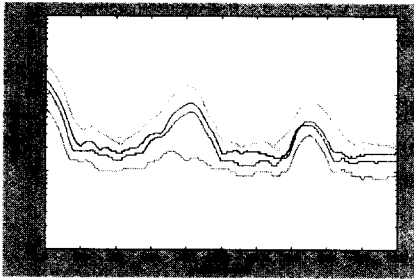


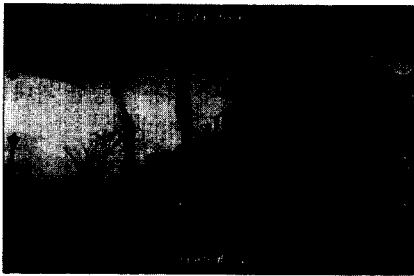
그림 6. 그림 5의 자기 상관 함수의 전력 스펙트럼



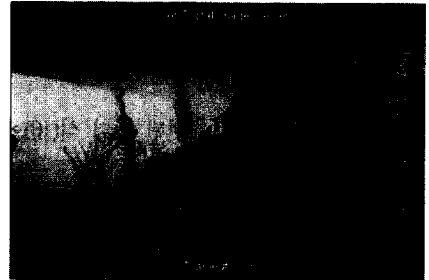
(a) autocorrelation



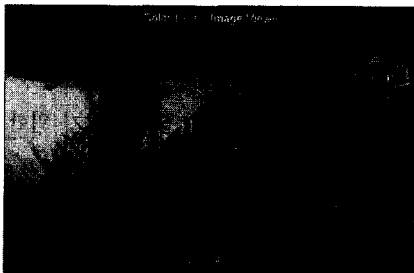
(b) load 8 (81.68%)



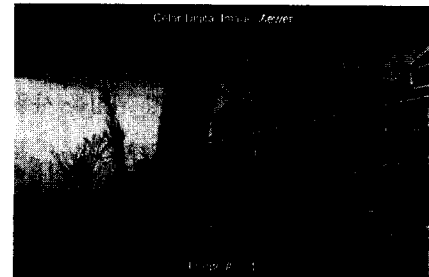
(c) load 7 (80.54%)



(d) load 4 (77.47%)



(e) load 3 (74.99%)



(f) load 1 (68.24%)

그림 7. 망 부하 증가에 따른 비디오 화질 저하 측정(모의 실험 결과를 바탕으로)

을 측정하는 기준으로 개발되었다. Courcoubetis와 Kelly<sup>[8][9]</sup>는 QoS 요구 조건을 만족하는 수용 가능 영역(acceptance region)에 대한 여러 가지 접근 방법을 제시하였다. 그들이 제시한 모형은 궁극적으로 어떤 커넥션도 링크 용량의 많은 부분을 점유하지 못한다고 가정한 것이다. 그러므로 트래픽이 수용 영역 근처에서만 진동할 경우 트래픽 점유율은 거의 변하지 않고  $s$ 와  $l$  값을 거의 일정하게 만든다. 유효 대역폭은 커넥션이 소비하는 망 자원의 지표로서, 그리고 사용량 기반의 과금에 대한 기본 데이터로서의 역할을 하지만 유효 대역폭을 결정하기란 그리 쉽게 해결할 수 있는 문제가 아니다. 그것은 셀의 도착 과정의 모멘트 생성 함수(moment generating function)를 포함하기 때문이다.

$(m, h)$ 는 평균 전송률이  $m$ 이고, 트래픽 제약  $h$ 에 의해 부과된 제약 조건을 만족시키는 가능한 최대의 유효 대역폭의 상한이라고 하자. 천이 확률이  $P_{ij}[u_i]$  인 마코프 결정 과정  $\{X_k\}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )가 주어졌을 때 상태  $i$ 에서 action process  $u(i)$ 는 결정된다.  $m, h$ 로 파라미터화된 과금 함수  $J$ 의 형태로 요금은 다음과 같이 주어진다.

$$f(m, h, X_k, u_k) = \bar{\alpha}(m, h) + \lambda_m (g(X_k, u_k) - m) \quad (10)$$

$a_0 + a_1 g(X_k, u_k)$ 의 형태로 표현된 위의 식(10)에서

$$\begin{aligned} a_0(m, h) &= \bar{\alpha}(m, h) - \lambda_m - m, \\ a_1(m, h) &= \lambda_m = \frac{\partial}{\partial m} \bar{\alpha}(m, h) \end{aligned} \quad (11)$$

로 주어진다. 이 계수들은 가입자의 선택 파라미터인  $m$ 에 의존한다. 2절에서도 설명하였듯이, 비디오 프레임 크기의 상태 천이는 이산사건시스템(discrete event system)으로 모형화 할 수 있다. 따라서 QoS를 고려한 과금 기법에서 마코프 결정 과정을 사용하는 것은 타당하다.

전력 스펙트럼 분석기법을 이용하여 할인율에 대해서 논의해 보자. 이것은 패킷 지연 및 지연변이와 밀접한 연관성을 갖게 된다. 도착지 노드에서 할인율에 적용할 수 있는 VBR 비디오의 전력 스펙트럼의 민감도(sensitivity) 값을 쉽게 구할 수 있다. 할인율을 고려한 비용 함수 기준은 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

$$V_\pi(i) = E_\pi \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \beta^k f(m, h, X_k, u_k) \right] \quad (12)$$

$V_\pi(i)$ 는 초기 상태  $i$ 에 대해서 무한 구간동안의 할인된 비용의 기대값으로 이를 통해 패킷 지연 및 지연 변이로 인해 발생하는 QoS 저하와 연관된 지표인 할인율  $\beta$ 를 측정할 수 있다.

## 2. 할인율의 추정 및 계산

4절의 그림 7에서 전력 스펙트럼과 비디오 화질 간의 관계를 모의 실험을 통하여 살펴보았다. 이러한 조건에 대하여 비용 기준(cost criterion)을 구하기 위해서는 식(12)의 할인율  $\beta$ 를 이산 사건 시스템에 근거하여 구해야 한다. 전력 스펙트럼 변이에 대한 표본 경로(sample path)에서 섭동된(perturbed) 경로는 QoS 저하로 인해 정상 경로(normal path)의 편이추정량(biased-estimate)이 된다. 편이추정량의 변이는 망에서 발생하는 지연 및 손실과 관련이 있다. 관측된 전력 스펙트럼 변이가 랜덤하고 그의 분포가 포아송(Poisson)이라고 가정하자. 섭동 경로의 경우 전력 스펙트럼의 편이추정량은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P_0(\theta_\omega) = (\Delta \theta_\omega / \theta_\omega) \sum_{j=1}^{\infty} P_j \quad (13)$$

여기서  $\Delta(\theta_\omega)$ 는 명목 값(nominal value)  $\theta$ 에 대한 섭동량이고,  $P_j$ 는 각 표본 데이터의 전력 스펙트럼을 나타낸다. 전력 스펙트럼의 편이 추정량이 위의 식(13)으로 주어질 때 할인율에 적용 가능한 과대 추정치는 다음 이론 1에 의해 구해진다<sup>[10][11]</sup>.

[이 론]

과섭동된(over-perturbed) 전력 스펙트럼에 의해 구해지는 할인율에 대한 최소 추정치는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_{\min} = \frac{(1/N) \sum_{i=1}^N \Delta P_0(\theta_\omega)}{1 + (2\sigma^2 / g(\theta_\omega)) \rho^2 \Delta \theta_\omega N} \quad (14)$$

여기서  $N$ 은 전력  $\Delta P_0(\theta_\omega)$ 을 계산하기 위한 관측 패킷 수 이다.  $\sigma^2$ 는 섭동 값의 분산이다.  $g(\theta_\omega)$ 와  $\rho^2$ 는 각각  $[\theta_\omega, \theta_\omega + \Delta \theta_\omega]$ 의 구간 동안 상태가 천이할 때의 확률 밀도 함수와 분산을 나타낸다.  $\Delta \theta_\omega$ 는 자기상관함수를 계산할 때 섭동량을 나타낸다.

(증 명) 부록에서 증명한다. □

이러한 할인율 추정치에 대한 결과를 분석하여 표

2와 그림8에 나타내었다. 표2는 할인율  $\beta$ 의 변화 결과를 예시한 것으로, 여기서 섭동량  $\Delta\theta_\omega$ 를 0.0005, 분산값  $\rho^2$ 를 0.2로 가정하여,  $\beta_{min}$ 을 산출하였다. 산출된 결과에 의하면, 할인율  $\beta$ 의 값은 부하율의 증가에 따라 함께 증가함을 보인다. 또한 그림 8은 섭동량  $\Delta\theta_\omega$ 의 다양한 값에 따른 할인율  $\beta$ 의 변화를 예시하고 있다. 섭동량  $\Delta\theta_\omega$ 가 큰 값을 가질 때, 부하에 따른 할인율도 증가하는 것을 알 수 있다.

결과적으로 섭동량  $\Delta\theta_\omega$ 가 큰 값을 가진다는 것은 네트워크의 상태가 불안정한 것을 의미하므로, 비디오 화질의 저하를 예측할 수 있으며, 부하율의 증가도 네트워크에 영향을 미친다는 것으로 나타난다. 따라서 이런 QoS의 열화 상태를 할인율을 기초로하여 과금 모형에 반영할 수 있는 것이다. 즉, MPEG 비디오의 네트워크 서비스에 대한 사용자의 불만족 수준은 도착지 노드에서의 전력 스펙트럼의 민감도를 보여주는 할인율을 계산하여 과금 기법에 적용하는 것으로 충분하다.

표 2. 할인율  $\beta_{min}$ 에 대한 계산 결과

$$\rho^2 = 0.2, g(\theta_\omega)\Delta\theta_\omega = 0.0005$$

oad (%)	value of $\beta_{min}$	cost function $1/(1+\beta_{min})$
3(74.99)	0.031517	0.969446
4(77.47)	0.048426	0.953811
5(78.29)	0.056937	0.94613
7(80.54)	0.057529	0.9456
9(82.36)	0.064427	0.939472
10(84.99)	0.084608	0.921992
12(89.33)	0.127952	0.886563
13(90.86)	0.1916887	0.8391453

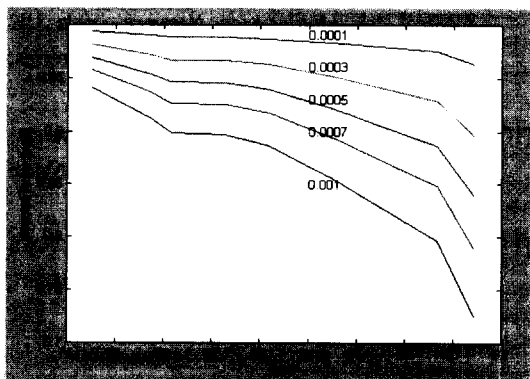


그림 8. 부하에 따른 할인율 비교

## VI. 결론

본 논문에서는 측정 기반의 전송률에 관한 자기상관함수를 QoS 저하 평가의 지표로서 제안하였다. 분석적 모형은 패킷 전송률의 전력 스펙트럼의 변화는 비디오 트래픽 특성과 관련 있다는 것을 보여주고 있다. MPEG VBR 비디오 전송에서 QoS 저하 평가에 대해 스펙트럼 기법에 의한 접근 방법이 논의되었다. MPEG 비디오의 자기상관함수의 관찰을 통하여 패킷 지연의 특성이 비디오 트래픽 특성에 관하여 논의되었다. 특히 본 논문에서는 입력 트래픽 특성을 바탕으로 QoS 저하를 지연의 측면에서 평가하였을 때 전력 스펙트럼과의 연관성이 높고 또 그것을 과금 기법에 응용하는 사례를 보였다. QoS 기반의 과금 모형은 고속 광역 네트워크(Wide-Area Network) 환경의 비디오 서비스에 대해 적용이 가능하다.

## 부 록

### (이 론)의 증명

무한소(infinitesimal)  $\Delta\theta_\omega$ 에 의한 섭동 효과는 매우 작아 무시할 수 있다고 가정하자.  $m-1$ 번째 경로에서 과섭동된 값을  $\Delta\beta^{m-1}(\Delta\theta)$ 라 하면 전력 스펙트럼의 변이는 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta P_j^m(\Delta\theta) = \Delta\beta^{m-1}(\Delta\theta) + (\Delta\theta/\theta) \sum_{j=1}^N P_j^m \quad (A.1)$$

이 방정식은 과섭동된 값이  $\Delta\theta_\omega$ 의 함수라는 것을 보여주고 있다. QoS 기준 조건을 만족시키기 위해서는 전력 스펙트럼의 과섭동된 추정치에 의한 할인율은 가능한 비편이추정치(unbiased-estimate)가 되어야 한다. 과섭동된 값은 가우시안 분포를 따르기 때문에 MAP(maximum a posteriori)에 근거하여 할인율을 유도할 수 있다. 일반적으로 파라 미터 공간(parameter space) S에서 과섭동된 값  $\beta$ 는 순시치(time instant)에서 관측된다고 가정한다. 관측 값은  $s_{min}$ 와  $s_{max}$  사이에 존재한다. 단일 변수의 경우 이 값은 직선  $-\infty < S < \infty$ 의 부분 구간 즉,  $(s_{min}, s_{max})$ 와 일치한다. 관측점이 관측 공간(observation space) (T)에 주어져 있다면 T를 관측한 후 S의 값을 추정할 수 있다. 가설 검증에서 항상 참인 명제만 선택한다면



확률 밀도  $P_{t_i s}(T_i|S)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{t_i s}(T_i|S) = P_{x_i}(T_i - S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left(-\frac{(T_i - S)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (A.2)$$

$$P_{x_i}(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (A.3)$$

$t_i$ 는 통계적으로 독립이기 때문에 결합 확률 밀도 함수는 단순히 각각의 확률 밀도의 곱으로 표현된다.  $\beta_{\min}$ 을 구하기 위해서는 조건 확률  $P_{s_i}(S|T)$ 를 이용한다.

$$P_{s_i}(S|T) = K(T) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - S)^2}{\sigma_x^2} + \frac{S^2}{\sigma_s^2}\right)\right]$$

$$K(T) = \frac{\left(\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}}\right)}{P_{s_i}(T)} \quad (A.4)$$

일반적으로  $\beta_{\min}(T)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_{\min}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} ds S P_{s_i}(S|T) \quad (A.5)$$

posteriori variance에 근거하여 할인율은 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_{\min} = \frac{1}{1 + \sigma_x^2 / N \sigma_s^2} \left[ (1/N) \sum_{i=1}^N \Delta P_o(\theta_{\omega}) \right] \quad (A.6)$$

정확한 추정을 하기 위해서는 분산 비 (variance ratio)의 근사값을 사용할 수 있다<sup>[12]</sup>. 따라서 최종 추정 값은

$$\beta_{\min} = \frac{(1/N) \sum_{i=1}^N \Delta P_o(\theta_{\omega})}{1 + (2\sigma_x^2 / g(\theta_{\omega}) \rho^2 \Delta \theta_{\omega} N)} \quad (A.7)$$

### 참고 문헌

- [1] Girish Chiruvolu, Ravi Sankar and N. Ranganathau "Issues and Approaches Towards VBR Video Traffic Management in ATM Networks", *IEEE Infocom*, pp.306-310, 1998
- [2] B. D. Choi, G. U. Hwang, Y. W. Jung and H. Chung "The periodic Markov modulated batch Bernoulli process and its application to MPEG video traffic", *Performance Evaluation*, pp.301-317, 1998
- [3] Song Chong and San-qi Li "Spectral Analysis of Access Rate Control in High-Speed Networks", *Proc. IEEE Infocom'93*, pp.662-671, April 1993
- [4] San-qi Li and Chia-Lin Hwang "Queue Response to input correlation functions: Discrete spectral analysis", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 5, pp.522-533, 1993
- [5] P. Pancha, M.E. Zarki, "MPEG coding for variable bit rate video transmission", *IEEE Comm. Mag.*, pp.54-66, May 1994
- [6] M. Conti, E. Gregori, and A. Larsson, "Study of the Impact of MPEG-1 Correlations on Video-Sources Statistical Multiplexing", *IEEE JSAC*, pp.1455-1471, Sep. 1996
- [7] F. P. Kelly, Notes on effective bandwidth, In F. P. Kelly, S. Zachary and I. Zeidins, eds., *Stochastic Network : Theory and Applications*, pp.141-168, Oxford University Press.
- [8] C. Courcoubeties, F. P. Kelly, V. A. Siris, and R. Weber, *A study of simple- usage based charging schemes for broadband networks*, In Proc. of IFIP International Conference on Broadband Communications (BC98), Stuttgart, Germany, April 1998
- [9] F.Kelly, *Tariffs, Policing and Admission Control for Multiservice Network*, 10th UK IEE Teletraffic Symposium, BT Laboratories, Martlesham Heath, April 1993
- [10] C. G. Cassandras, *Discrete Event System-Modeling and performance analysis*, Aksen Associates, Sept. 1993.
- [11] C. H. Youn et. al, "Media scheduler for AAL under ATM-based network environments", *IEICE Transaction on communications*, Vol. E78-B, No.3 pp. 324-335, March 1995
- [12] X. R. Cao, "Convergence of parameter

sensitivity estimates in a stochastic experiment", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-30, No.9 pp. 845-853, Sept. 1985.

윤 찬 현(Chan-Hyun Youn)                                  정회원



1981년 2월 : 경북대학교 전자 공학과 (학사)  
 1985년 8월 : 경북대학교대학원 전자공학과(석사)  
 1994년 3월 : 일본 東北大學 전기 및 통신공학과(박사)

1981년 2월~1983년 6월 : 육군 통신 장교  
 1986년 2월~1997년 12월 : 한국통신 통신망 연구소 연구팀장  
 1997년 12월~현재 : 한국정보통신대학원대학교 교수

<주관심 분야> 네트워크 QoS 측정, 멀티캐스트, Routing Arbiter 기술, 차세대 네트워크 등.

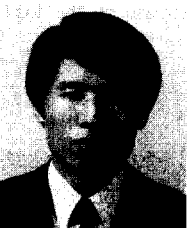
김 상 범 (Sangbum Kim)    준회원



1998년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (학사)  
 2000년 2월 : 한국정보통신대학원 대학교 공학부 졸업 예정  
 2000년 1월~현재 : 미디어링크 연구원

<주관심 분야> 네트워크 성능 분석, ATM 네트워킹, Internet QoS 평가 등

배 정 국 (Jung-Guk Bae)    준회원



1980년 2월 : 경북대학교 전자 공학과 (학사)  
 2000년 2월 : 한국정보통신대학원 대학교 공학부 졸업 예정  
 1980년 5월~1981년 9월 : KBS (안동방송국)

1983년 1월~1984년 3월 : 삼성 반도체 통신  
 1984년 4월~현재 : 한국통신 부장  
 <주관심 분야> Charging 기법, 네트워크 성능 분석, ATM 네트워킹 등