

# ATM 기반의 VBR 비디오 서비스를 위한 트래픽 기술자 Dimensioning에 관한 연구

정희원 유 상 조\*, 홍 성 훈\*, 김 성 대\*

## A Study on Dimensioning of Traffic Descriptors for VBR Video Sources on ATM Networks

Sang-Jo Yoo\*, Sung-Hun Hong\*, Seong-Dea Kim\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 ATM 망에서 VBR MPEG 비디오 트래픽에 대한 리키버킷 기반의 UPC 제어 시 적절한 트래픽 기술자 조합을 선정할 수 있는 해석적 방법을 제안한다. 제안된 장면기반 비디오 트래픽 모델링을 통해 UPC에서의 셀 위반확률을 해석적으로 유도하고, 이를 이용하여 원하는 UPC 제어 위반확률을 갖는 트래픽 기술자의 조합을 선정할 수 있음을 보인다. 실험 대상 MPEG 비디오 시퀀스에 대해 본 논문에서 제안한 해석적 트래픽 기술자 dimensioning 결과가 실제 시뮬레이션에 의한 선정결과를 잘 근사화 함을 모의실험을 통해 보인다. 마지막으로 망에서 호 수락제어로 ON/OFF 소스의 등가대역폭을 이용할 경우, 가능한 트래픽 기술자 조합에 대해 할당되는 등가대역폭을 분석하여 효율적인 트래픽 기술자 선정방안을 제안한다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose an analytic method for dimensioning of traffic descriptors at the leaky bucket-based UPC for VBR MPEG video traffic on ATM networks. We analytically derive cell violation probabilities at the UPC by using the proposed scene-based video traffic model, and then we show that it is possible to select sets of traffic descriptors that have the same required violation probability. For two example video traces, numerical results show that our proposed traffic descriptors dimensioning method can approximate well the simulation-based traffic control results of the real video traces. When the effective bandwidth allocation method of an ON/OFF model is used for the call admission control in the networks, we present an efficient traffic descriptor selection method by studying the allocated bandwidth to each possible traffic descriptor set.

### I. 서 론

ATM 망에서는 응용 서비스 별로 다양한 트래픽 특성과 서로 다른 서비스 품질(QoS:Quality of Service)을 요구하게 된다. 이때 사용자가 원하는 서비스의 품질을 만족시키면서 효율적인 망 운용을 위해서는 적절한 트래픽 제어가 필요하다. ITU-T와 ATM 포럼에서는 다양한 응용의 서비스 품질 요구 사항에 맞추어 CBR(Constant Bit Rate), VBR(Vari-

able Bit Rate), ABR(Available Bit Rate), UBR(Unspecified Bit Rate)등의 서비스 클래스를 정의하고 이에 적합한 트래픽 제어 방안을 제시하고 있다. 특히 VBR 서비스 클래스는 통신망의 채널에 여러 VBR 소스 원을 중합 시킴으로써 통계적 다중화 이득을 가질 수 있어 버스트(burst)하고 비트율이 가변적인 비디오 및 기타 멀티미디어 응용 서비스에 적합하다.

ATM 기반의 통신망에서 효율적인 통신망 운용과

\* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (sangjo@sdvision.kaist.ac.kr)  
 논문번호 : 98523-1207, 접수일자 : 1998년 12월 7일

사용자 품질 요구사항을 충족시키기 위해서는 호 수락제어(CAC: Call Admission Control)를 포함한 트래픽 제어가 잘 이루어져야 한다. 단말기 측에서는 망에 새로운 호의 연결 수락을 요구할 때는 트래픽의 특성을 나타내는 몇 가지 트래픽 기술자(traffic descriptor)를 망에 보내게 된다. 또한 호 수락제어를 통해, 요청된 연결이 수락되어 단말기가 망으로 트래픽을 전송하게 되면, 망에서는 실제 입력 트래픽이 협약된 특성을 잘 지키는지는 감시하는 사용자 파라미터 제어(UPC: Usage Parameter Control)를 - policing 기능이라고도 함 - 이용하여 망으로의 입력 트래픽을 제한하게 된다.

본 논문에서는 향후 멀티미디어 트래픽의 핵심 응용 서비스로 생각되는 MPEG(Moving Picture Expert Group) 비디오 트래픽에 대해, 망에서의 호 수락제어와 UPC를 수행하기 위해 단말기로 부터 보내지는 트래픽 기술자의 해석적 도출 방법과 효율적인 선정 방안을 제안한다. 본 논문에서 제안된 트래픽 기술자 dimensioning 방법은 MPEG 비디오 트래픽의 모델링에 기반을 두고 있다. VoD(Video on Demand) 서비스와 같이 미리 비디오가 압축 부호화 되어 있거나 또는 미리 정의된 모델에 잘 따르는 비디오 응용서비스에 대해 간단한 트래픽 모델을 정의하고, 이를 기반으로 사용자가 원하는 레벨의 트래픽 기술자의 조합을 해석적으로 구한다. 또한 본 논문에서는 가능한 트래픽 기술자의 조합이 망에서의 대역할당과 어떠한 관계를 갖는가를 간단한 등가 대역폭 계산 모델을 이용하여 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 VBR 서비스를 위한 트래픽 기술자와 UPC의 기능 및 동작에 대해 살펴보고, III 장에서는 MPEG 비디오 트래픽의 특성을 통계적 관점에서 분석하고 트래픽 기술자 dimensioning 관련 연구 현황에 대해 알아본다. 본 논문의 IV 장에서는 제안된 장면기반 비디오 트래픽 모델링에 대해 기술하고 V 장에서 이를 이용한 리키버킷 기반의 트래픽 기술자 dimensioning 방법에 대해 설명한다. VI 장에서는 모의실험을 통한 해석적 해의 성능을 평가하고, VII 장에서는 트래픽 기술자의 조합에 대한 등가대역폭 관점의 비교를 수행한다. VIII 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 트래픽 기술자와 UPC 기능

ATM 망에서의 호 수락 및 트래픽 관리는 그림 1과 같이 간단히 나타낼 수 있다. 그림 1은 비디오 서비스에 대한 오픈 루프 제어(open loop control)의 예로서, 사용자는 비디오 서비스의 품질을 일정하게 유지하기 위해 양자화 QP 값을 고정시킨다. 부호화된 비트 스트림은 ATM 인터페이스에서 셀로 패킷화 된 후 망으로 보내진다. 사용자는 셀을 망으로 송신하기 전에 망에 원하는 서비스 품질(QoS) 파라미터(셀 손실률, 셀 지연, 셀 지연변이 등)와 VBR의 경우 {PCR, SCR, MBS}로 구성되는 트래픽 기술자를 망에 신고하게 된다. 망에서는 이를 근거로 호 수락제어를 수행하여 다른 기존 연결의 QoS를 보장하면서 해당연결을 수용할 수 있으면 호 설정 요청을 수락하게 된다. 망은 이로서 사용자 단말이 요청한 QoS를 연결 설정부터 종료까지 보장하여야 한다. 망은 사용자가 신고한 트래픽 기술자를 이용하여 망의 선단(first edge)에서 단말로부터의 트래픽이 원래 신고한 트래픽 특성을 만족하는 가를 감시하게 된다.

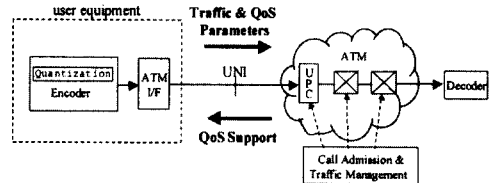


그림 1. 호 수락 및 트래픽 제어

ITU-T<sup>[1]</sup> 및 ATM 포럼<sup>[2]</sup>에서는 VBR 서비스 클래스를 위해 다음과 같은 트래픽 기술자를 정의하고 있다.

- \* PCR(Peak Cell Rate) : ATM 연결에서의 최대 셀 전송률
- \* SCR(Sustainable Cell Rate) : UPC에서 적합(conforming)한 것으로 판정된 셀 스트림의 평균 셀 전송률 중 상위 경계값(upper bound)
- \* MBS(Maximum Burst Size) : 연속하여 PCR로 전송될 수 있는 최대 셀 수
- \* CDVT(Cell Delay Variation Tolerance) : ATM 계층의 멀티프래싱 등으로 단말기에서 생기는 셀 지연 변이값

ITU-T 및 ATM 포럼에서는 망에서의 UPC를 위한 알고리즘으로 GCRA(Generic Cell Rate Algorithm)를 규정하였다. GCRA는 서로 등가(equivalent)인 가상 스케줄링(virtual scheduling) 알고리즘과, 연속상태 리키버킷(continuous-state leaky

bucket) 알고리즘의 두 가지 형태로 규정된다. 본 논문에서는 그림 2와 같은 리키버킷 형태의 GCRA만을 고려한다.

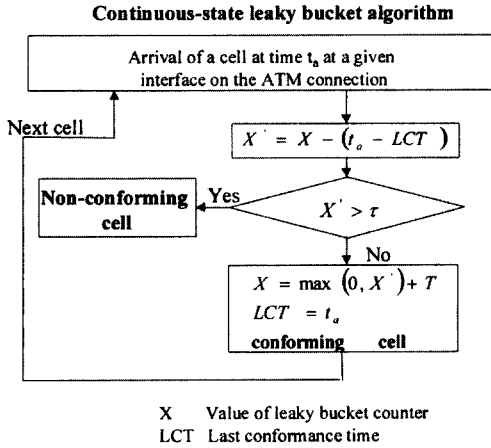


그림 2. 연속상태 리키버킷 알고리즘

그림 2의 GCRA 리키버킷 알고리즘은  $\{T, \tau\}$ 의 두 가지 파라미터로 이루어지는데 PCR 및 SCR 제어에 모두 사용될 수 있다. PCR 모니터링에서  $\{T, \tau\} = \{1/PCR, CDVT\}$ 이고 SCR 모니터링의 경우  $\{T, \tau\} = \{1/SCR, CDVT + \tau_{IBT}\}$ 가 된다(=intrinsic burst tolerances). 본 논문에서는 단말기의 CDVT는 0으로 무시할 만 하다고 가정한다. SCR 모니터링을 위한 GCRA의 버스트 토러런스( $\tau$ ) 값과 트래픽 기술자인 MBS와의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$\tau = [(MBS - 1)(T_{SCR} - T_{PCR})] \text{seconds}$$

$$MBS = 1 + \left\lceil \frac{\tau}{T_{SCR} - T_{PCR}} \right\rceil \text{cells} \quad (1)$$

여기서,  $T_{SCR} = 1/SCR, T_{PCR} = 1/PCR$ .

GCRA의 연속상태 리키버킷 알고리즘은 다음 그림 3과 같이 간단하게 설명될 수 있다. UPC 단으로 입력되는 셀들은 서버에 의해 최대 PCR 레이트 이하로 망으로 전달되고 이때 입력되는 셀들은 가상의 리키버킷에 들어간다. 초기 리키버킷은 비어있고 셀이 리키버킷의 drain 레이트인 SCR 이상으로 들어오면 버킷에 쌓이게 된다. 만약 입력 셀이 버킷에 들어가지 못하고 넘치게 되면 해당 셀은 망과 협상된 트래픽 기술자를 위반한 것으로 간주한다. 위반(violation) 셀의 처리는 두 가지 방법이 있는데 망의 입력 단에서 폐기(discarding) 하거나 또

는 ATM 셀의 헤더에 테깅(tagging)하여 일단 망으로의 전송을 허용하나 나중에 망에서 혼잡(congestion)등의 상황이 발생하면 우선 폐기시키는 방법이 있다. MBS와 LBS(Leaky Bucket Size)와의 관계는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

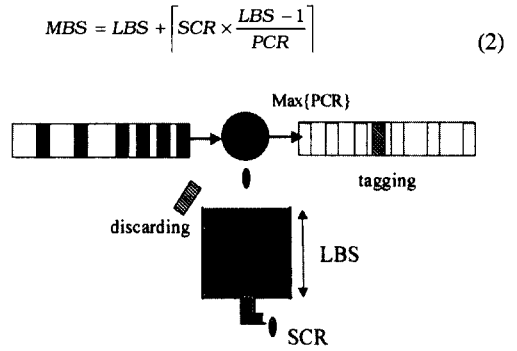


그림 3. 리키버킷 UPC 알고리즘

본 논문에서는 리키버킷 이용률로 LBU(Leaky Bucket Utilization)를 다음과 같이 정의한다.

$$LBU = ACR/SCR \quad (3)$$

여기서 ACR은 전체 비디오 스트림의 평균 셀률이다.

### III. MPEG 비디오트래픽 특성 및 관련연구

동일한 크기의 영상을 부호화 하더라도 영상의 성질에 따라서 부호화된 MPEG 스트림의 크기는 다르다. 움직임이 많고 영상의 공간적 상관도가 낮을 경우에는 그렇지 않을 경우 보다 MPEG 부호화된 스트림의 셀 발생량은 훨씬 많아진다. 그러나 MPEG 비디오 트래픽은 GOP (Group of Picture) 패턴에 따른 I, P, B 픽처 타입의 주기성과 같은 장면내의 같은 픽처 타입간의 유사한 셀 발생량 등 통계적인 상관관계가 존재하며 이를 잘 모델링 하려는 노력들이 있어왔다.

MPEG 비디오 트래픽은 동일한 영상 품질을 유지하는 목적의 VBR 응용의 경우 픽처 타입별 셀 발생량의 차이가 크고(평균적으로 I 픽처가 가장 많은 셀을 발생시키고 그 다음이 P, B의 순이다), 장면단위로 셀 발생률의 변화가 크기 때문에 VBR 셀 스트림은 매우 버스트하고 영상마다 그 정도의 차이가 크게 된다. 따라서 VoD 서비스와 같이 미리 일정한 양자화 값으로 인코딩 된 스트림에 대해 평

균적인 셀 발생률과 버스트한 정도를 고려하여 적절한 트래픽 기술자를 도출하는 방법에 대한 연구가 필요하다. ATM 망에서 MPEG 비디오 서비스를 위한 트래픽 기술자 선정은 다음의 세가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

- ① 미리 적절한 트래픽 기술자(PCR, SCR, MBS)를 정하고 단말기 측에서는 비트율 제어를 이용해 망측으로는 항상 이를 만족하는 셀 스트림을 전송<sup>[4][5]</sup>,
- ② 사전에 인코딩된 비트 스트림에 대해 가능한 모든 트래픽 기술자 조합에 대한 시뮬레이션을 수행하고 이에 따라 적절한 트래픽 기술자를 선택<sup>[6][7]</sup>,
- ③ 비디오 스트림의 모델링을 통해 해석적으로 적절한 트래픽 기술자를 유도<sup>[8][9]</sup>.

①의 방법은 실시간 비디오 응용에 있어 사전에 정확한 트래픽 기술자 선정이 어려울 경우에 사용 가능한 방법으로 단말기에 비트율 제어기와 가상 UPC기능을 두어 망으로는 항상 적합한 셀만을 전송한다. 그러나 이 방법은 서비스 개시 전에 연결 중 사용될 적절한 트래픽 기술자를 선정하는데 어려움이 있고 부정확한 트래픽 기술자의 선정은 영상 품질을 사용자가 요구하는 수준에 맞게 일정하게 유지하기 어렵다. ②의 방법은 모든 가능한 트래픽 기술자 조합에 대해 UPC 시뮬레이션을 수행하여야 하는 단점이 있다. ③의 방법은 모델링을 이용하기 때문에 수학적 실시간 접근이 가능하나 정확한 모델링 방법이 필요하다. [6]에서 Richardson은 MPEG 비디오에 대해 시뮬레이션을 통해 UPC 파라미터의 선정에 따른 셀 손실과 이에 대한 시각적 효과에 분석하였다. 또한 Pancha<sup>[7]</sup>는 단일 리키버킷 및 다중 리키버킷 UPC에서의 트래픽 기술자 dimensioning을 시뮬레이션을 기초로 수행하였다. Rose는<sup>[8]</sup>에서 MPEG 비디오 스트림을 I, P, B 픽처 타입별 셀 발생 분포를 기초로  $CI^{[X]}/D/1-S$  큐잉 모델을 세워 해석적인 dimensioning 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 MBS값이 적은 영역에서는 원래 비디오 스트림의 UPC 동작을 잘 모델링 하지만 MBS 값이 커지고 SCR이 작아질수록 원래 비디오 스트림의 UPC 동작을 잘 근사 시키지 못하는 단점이 있다 - 그 이유는 히스토그램만을 이용하여 긴 주기의 트래픽 특성을 반영하지 못하기 때문이다. Roh<sup>[9]</sup>는 I, P 프레임으로 구성된 MPEG 비디오 트래픽에 대하여 슬라이스(slice) 단위 모델링을 수행하고, 이를 이용하여 버킷 중간에 임계 점

을 갖는 리키버킷 policer에 대한 해석적인 셀 위반 확률을 계산하였다.

#### IV. MPEG 비디오 트래픽 모델링

본 논문에서의 VBR MPEG 트래픽 기술자 dimensioning을 위한 트래픽 모델은 [10][11]에서 우리가 제안했던 장면기반 트래픽 모델링 방법을 적용한다. [10][11]에서 제안한 모델은 간단한 장면 검출 후 이를 긴 시간 주기의 장면상태와 같은 장면 내에서의 프레임 타입 상태로 이루어 지는 2차원 마코프 체인으로 구성된다. 먼저 모델링 방법을 간단히 설명한다.

전체 MPEG 비디오 스트림에서 장면을 검출하기 위해 식 (4)와 같은 GOP 단위 평균 비트 발생량의 차이 비교를 이용한 장면 검출 알고리즘을 사용한다.  $\{GOP(n): n=1,2,\dots\}$ 은 원 영상의 GOP 단위 비트 발생량이라고 정의하고, 만약  $n$ 번째 GOP가  $i$ 번째 장면의 시작 GOP일 때 다음조건을 만족하는  $n+k$  번째 GOP가  $i$  번째 장면의 마지막 GOP가 되고  $n+k+1$  번째 GOP는 다음  $i+1$  번째 장면의 시작 GOP가 된다. 임계 값  $T_1, T_2$  는 비디오의 특성에 따라 적절히 선택되어 진다.

$$\frac{GOP(n+k+1)-GOP(n+k)}{\sum_{j=n}^{n+k} GOP(j)/(k+1)} > T_1 \quad \text{and}$$

$$\frac{GOP(n+k+2)-GOP(n+k)}{\sum_{j=n}^{n+k} GOP(j)/(k+1)} > T_2 \quad (4)$$

MPEG 비디오 시퀀스의 각 장면은 장면의 평균 프레임 셀 발생량으로 표현된 후, 장면 전환 마코프 체인의 장면 상태 수  $K$ 를 결정한다. 만약 연속된 장면이 같은 장면 상태에 포함될 경우 두 장면은 합쳐져서 한 장면으로 고려된다.  $S_n$ 을  $n$  번째 프레임의 해당 장면상태를 나타내는 확률과정이라 할 때, 임의의 프레임이 장면상태  $i$ 에 있을 때 다음 프레임이 장면상태  $j$ 에 있을 확률  $p_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$p_{i,j} = \Pr\{S_{n+1} = j | S_n = i\} = \begin{cases} \frac{Nf_i - Nsc_i}{Nf_i}, & \text{if } j = i \\ \frac{Nsc_j}{Nf_j}, & \text{if } j \neq i \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

$Nsc_i$  = 장면상태  $i$ 에 속한 총 장면 수,  $Nf_i$  = 장면

상태  $i$ 에 속한 총 프레임 수,  
 $N_{sc_i j}$ =장면상태  $i$ 에 속한 장면이 다음 프레임에서  
 장면상태  $j$ 로 바뀌는 횟수.

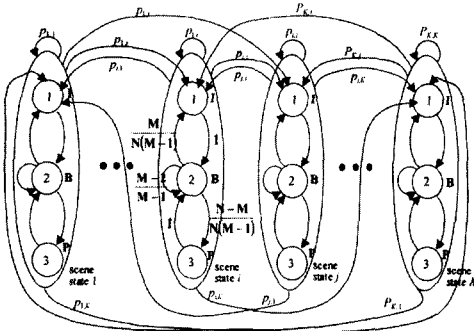


그림 4. 제한된 장면기반 MPEG 비디오 트래픽모델

그림 4는 [10][11]에 제안된 MPEG 비디오 트래픽 모델을 보여준다. 모델은  $K$ 개의 장면상태와 매 장면상태 내에 각 프레임 타입 별 프레임 상태로 이루어 진다. 각 장면상태에서는 GOP 패턴에 따라 I, B, P 프레임이 주기적으로 나타나게 된다. 이러한 주기적 프레임 타입의 천이는 GOP 패턴 파라미터인  $N$ 과  $M$ 으로 표현될 수 있다. 각 프레임은 해당 장면상태  $i$ 에서 매 프레임 주기마다  $p_{ii}$ 로 같은 장면상태  $i$ 에 머물게 되며,  $p_{ij}$ 의 확률로 장면상태  $j$ 로 천이한다. 각 장면상태에서는 역시 매 프레임 주기마다 GOP 패턴에 따라 결정된 확률로 I, P, B 프레임 타입 상태로 천이하게 된다. 또한 각 1, 2, 3 프레임 타입 상태에서는 한 프레임 기간동안 각각 장면상태  $i$ 에서의 프레임 타입별 평균 셀 발생량인  $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}$ 의 초당 셀 레이트로 셀을 발생시킨다. 새로운 장면의 시작은 항상 GOP 단위로 시작되므로 다음 장면의 시작은 확률 1로 I 프레임 타입에서 시작된다.

V. 리키버킷 기반 트래픽기술자 dimensioning

본 장에서는 제 IV장에서 설명한 트래픽 모델을 이용하여 원하는 UPC 위반확률을 만족하는 VBR 트래픽 기술자(PCR, SCR, MBS)를 선정하는 해석적 방법을 제시한다. 본 논문에서는 그림 1의 ATM 인터페이스를 통과한 셀은 레귤레이터(regulator)를 이용하여 한 프레임 구간동안 균일하게 분포한다는 것을 가정한다.  $S_n$ 과  $T_n$ 을  $n$  번째 프레임에 대한 장면상태와 해당 장면상태에서의 프레임 타입 상태를

나타내는 확률과정이라고 정의하면, 제안된 트래픽 모델은  $\{S_n, T_n\}$ 의 이차원(two-dimensional) 마코프 체인 프로세스로 표현될 수 있다.

상태  $(i, j)$ 에서  $(k, l)$ 로 천이할 확률을  $p_{(i,j),(k,l)}$ 로 정의하면, MPEG 비디오 셀 입력 프로세스에 대한 천이 확률 행렬  $P$ 를 얻을 수 있다.

$$P = [p_{(i,j),(k,l)}] = \begin{bmatrix} p_{1,1}A & p_{1,2}B & \dots & p_{1,K-1}B & p_{1,K}B \\ p_{2,1}B & p_{2,2}A & \dots & p_{2,K-1}B & p_{2,K}B \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_{K-1,1}B & p_{K-1,2}B & \dots & p_{K-1,K-1}A & p_{K-1,K}B \\ p_{K,1}B & p_{K,2}B & \dots & p_{K,K-1}B & p_{K,K}A \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = [p_{(i,j),(k,k)}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ M & M-2 & N-M \\ N(M-1) & M-1 & N(M-1) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [p_{(i,j),(k,l)}]_{i \neq j} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

또한, 각 상태  $(i, j)$ 에서의 셀 레이트를 나타내는 행렬  $L$ 을 다음 식으로 정의하면 MPEG 비디오 트래픽은 행렬 조합  $\{P, A\}$ 에 의해 완전히 기술된다.

$$L = \text{diag}(\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{K1}, \lambda_{K2}, \lambda_{K3}) \quad (7)$$

위에서 정의된 천이 확률 행렬은 한 프레임 주기마다 천이가 일어나는 이산시간 마코프 프로세스이다. 본 논문에서는 이산시간 시스템을 식 (8)의 연속시간 시스템으로 근사화 하여 해석한다.

$$Q = \tau(P - I) = \begin{bmatrix} Q_{1,1} & \dots & Q_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{K,1} & \dots & Q_{K,K} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $\tau$ 는 MPEG 비디오 소스의 초당 프레임 수(frames/sec)이고,  $I$ 는  $(K \times 3) \times (K \times 3)$ 크기의 단위행렬(identity matrix)이다.  $B(t), T(t), S(t)$ 를 각각 시간  $t$ 에서의 리키버킷에 있는 셀 수, 프레임 타입 상태, 장면상태를 나타낼 때, 시간  $t$ 에 입력 프로세스가 장면상태  $i$ 와 프레임 타입 상태  $j$ 에 있고 현재 리키버킷 내용이  $x$ 를 초과 하지 않을 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$F_j^i(t, x) = \Pr\{B(t) \leq x, T(t) = j, S(t) = i\} \quad (9)$$

$(j \in \{1, 2, 3\}, i \in \{1, \dots, K\})$

시간  $t$ 에서  $t + \Delta t$ 까지, 식 (9)의 순방향 천이식

은 다음과 같다.

$$F_j^i(t + \Delta t, x) = \sum_{l=1}^3 q_{jl}^i F_l^i(t, x) \Delta t + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^3 q_{kl}^i F_l^k(t, x) \Delta t + \left\{ 1 - \left[ \sum_{l=1}^3 q_{jl}^i + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^3 q_{kl}^i \right] \Delta t \right\} F_j^i(t, x - (\lambda_{ij} - SCR) \Delta t) + O(\Delta t^2) \quad (10)$$

$$F_j^i(t + \Delta t, x) - F_j^i(t, x - (\lambda_{ij} - SCR) \Delta t) = \sum_{l=1}^3 q_{jl}^i F_l^i(t, x) \Delta t + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^3 q_{kl}^i F_l^k(t, x) \Delta t \quad (11)$$

$$\frac{\partial F_j^i(t, x)}{\partial t} + (\lambda_{ij} - SCR) \frac{\partial F_j^i(t, x)}{\partial x} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^3 q_{kl}^i F_l^k(t, x) \quad (12)$$

안정상태 분포는 다음 식으로 표현된다.

$$(\lambda_{ij} - SCR) \frac{dF_j^i(x)}{dx} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^3 q_{kl}^i F_l^k(x) \quad (13)$$

벡터  $F(x)$ 와 행렬  $D$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1^1(x), F_2^1(x), F_3^1(x), F_1^2(x), F_2^2(x), F_3^2(x), \\ \dots, F_1^K(x), F_2^K(x), F_3^K(x) \end{bmatrix}_T \quad (14)$$

$$D = A - SCR \times I \quad (15)$$

식 (13)의 식은 다음과 같은 단일 행렬식으로 표현된다.

$$\frac{d}{dx} F(x) D = F(x) D \quad (16)$$

식 (16)에 대한 안정상태 해는 일반적 마코프 체인의 해석 해로 다음과 같은 형태를 갖는다는 것이 알려져 있다<sup>[12]</sup>.

$$F(x) = \sum_i a_i \varphi_i e^{-z_i x} \quad (17)$$

$\{z_i, \varphi_i\}$ 는 고유치 / 고유벡터(eigenvalue / eigenvector)의 쌍 집합으로  $z_i, \varphi_i, D = \varphi_i Q$  식의 고유치 문제의 해이다.

식 (17)에서의  $\{a_i\}$ 는 리키버킷 버퍼 크기 LBS가 결정되면 다음의 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{cases} F_j^i(0) = 0 = \sum_i a_i \varphi_i & \text{if } \lambda_{ij} > SCR \\ F_j^i(LBS) = \pi_{ij} = \sum_i a_i \varphi_i e^{-z_i \cdot LBS} & \text{if } \lambda_{ij} \leq SCR \end{cases} \quad (18)$$

위식에서  $\pi$ 는 상태  $(i, j)$ 의 안정상태 확률을 나타

내는  $(K \times 3)$ 차 벡터이고,  $\pi Q = \mathbf{0}, \sum_i \pi_{ij} = 1$ 을 이용하여 구할 수 있다.

마지막으로, 주어진 리키버킷 크기 LBS와 SCR에 대해 리키버킷을 오버 플로우 할 확률, 즉 위반 셀의 확률은 다음 식으로 계산 된다.

$$G(LBS) = \Pr(B > LBS) = 1 - (F(LBS) \mathbf{1}) \quad (19)$$

위 식으로부터 원하는 UPC 위반확률(또는 tagging rate)를 보이는 트래픽 기술자의 조합을 선택할 수 있다. PCR의 경우 프레임 당 발생 셀 수의 최대치를 이용하여 간단히 고정적으로 사용하고, SCR과 LBS는 식 (19)를 만족하는 가능한 조합으로 해석적으로 구할 수 있다. 모든 가능한 조합 중에서 어떤 {PCR, SCR, MBS}를 선택할 것인가는 망에 입력되는 트래픽의 버스트 정도, 또한 망의 대역할당 방법에 따라 가장 좋은 것이 정해 질 수 있다. 본 논문의 VII장에서는 트래픽 기술자의 선정이, 간단한 ON/OFF 모델링에 기반을 둔 등가대역폭 계산에 어떤 영향을 미치며 이 경우 적절한 트래픽 기술자 선정 방안에 대해 기술한다.

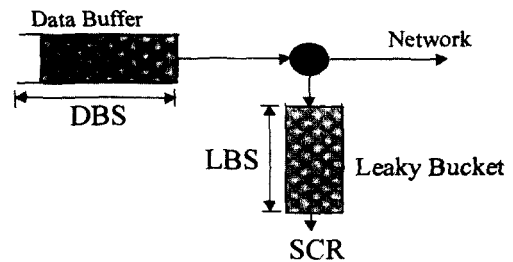


그림 5. 스무딩을 데이터 버퍼 사용 시 리키버킷 동작

MPEG 소스에서는 망에서의 최대 셀 지연과 인코더 및 디코더 단말에서의 지연이 사용자의 종단대중단 지연 요구사항 범위 내에서 만족될 수 있으면, 인코더 단말기에서의 데이터 버퍼가 사용될 수 있다. 데이터 버퍼의 크기는 사용자 레벨의 지연 요구사항을 준수할 수 있도록 정해진다. 본 논문에서는 이러한 데이터 버퍼(스무딩 버퍼)의 사용에 따른 UPC 위반확률을 계산하는 해석적 방법을 제시한다. 본 논문에서 고려되는 스무딩 버퍼는 그림5와 같은 형태의 동작을 가정한다. 즉 데이터 버퍼에 도착하는 셀이 단말기의 가상 리키버킷에 오버 플로우 되지 않고 입력될 수 있으면 즉각 망으로 전달된다. 만일 리키 버킷이 꽉 차있을 때 셀이 도착하면 데이터 버퍼에 저장된다. 또한 데이터 버퍼가 꽉 차있

을 때 셀이 도착하여 데이터 버퍼 오버 플로우가 일어나게 되는 경우는, 데이터 버퍼의 침투 셀부터 망으로 즉시 전달된다(따라서 데이터 버퍼의 실질적인 오버 플로우는 일어나지 않는다).

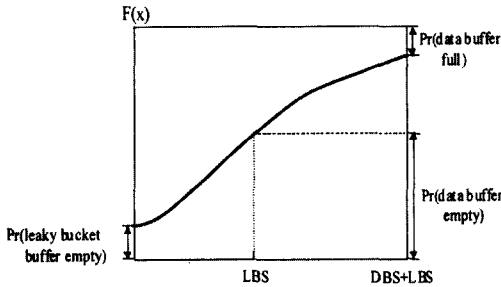


그림 6. 데이터 버퍼 사용 시 UPC 적합 확률 CDF 예

스무딩을 위한 데이터 버퍼의 존재는 스무딩을 위한 지연만 생길 뿐 UPC 위반확률 관점에서는 리키버킷 크기가 데이터 버퍼 만큼 늘어난 것과 같다<sup>[13]</sup>. 즉 스무딩 데이터 버퍼의 사용은 망에서의 UPC 위반확률의 계산이 식 (19)에서 식 (20)로 바뀌는 것의 차이만이 있다.

$$G(LBS + DBS) = Pr[B > (LBS + DBS)] = 1 - Pr(LBS + DBS) \quad (20)$$

그림 6은 스무딩 데이터 버퍼의 사용에 따른 식 (20)의 UPC 적합 확률 CDF인  $F(x)$ 의 예를 보여준다

## VI. 모의실험을 통한 성능평가

제 V장에서의 해석 해를 이용한 트래픽 기술자 dimensioning의 성능을 평가하기 위하여 비교적 움직임이 많고 트래픽이 버스트한 두개의 비디오 영상 시퀀스<sup>[14]</sup>를 실험대상 비디오 시퀀스로 선정하였다. 양자와 스템은 10(I 프레임), 14(P 프레임), 18(B 프레임)이 사용되었고, N=12 M=3의 GOP 패턴을 갖는다. "Star Wars"는 초당 25 프레임의 약 두시간 분량(174,000 프레임)이고 "Simpsons"는 약 30분(40,000 프레임)의 시퀀스 길이를 갖는다. 표 1은 두 실험대상 비디오 시퀀스의 통계적 특성을 보여준다. 또한 모델링에 사용한  $T_1, T_2$ 는 {0.15, 0.18}을 사용하였고 두 실험영상 각각 10개의 장면 상태를 정의하여 사용하였다.

표 1. 실험 비디오 영상의 통계적 특성

	Star Wars			
	Max	Min	Mean	SD( $\sigma$ )
I Frame	12,061	765	3,932	1,287
P Frame	11,347	142	1,502	954
B Frame	4,217	31	468	313
	Simpsons			
	Max	Min	Mean	SD( $\sigma$ )
I Frame	9,668	996	4,821	1,254
P Frame	8,858	69	1,300	1,017
B Frame	15,650	21	685	460

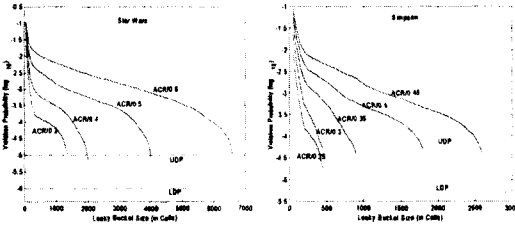
먼저 실험 대상 영상 시퀀스에 대해 시퀀스의 평균 셀 레이트인 ACR을 식 (3)의 관계를 이용하여 LBU로 나누어준 값으로 SCR을 정할 때, MBS를 50 셀부터 증가 시키면서 UPC 위반 확률을 시뮬레이션을 통해 구하여 보았다. 그림 7에서 알 수 있듯이 같은 UPC 위반 확률에 대해 SCR 값이 클 경우(즉 LBU이 작을 경우)에는 작은 MBS (LBS와 MBS와의 관계는 식 (2)와 같다)에 대응되고, SCR이 작을 경우(즉 LBU이 클 경우)에는 보다 큰 MBS가 요구된다. 본 장에서는 {SCR, MBS} 트래픽 기술자 조합의 비교에 대해 MBS 대신 식 (19)로 유도되는 LBS를 이용한다. LBS와 MBS의 직접적 관계는 식 (2)로 주어진다.

그림 7의 결과에서 트래픽 기술자 선정에 있어 몇 가지 중요한 사실을 알 수 있다. 첫째로 "Star Wars"와 "Simpsons" 영상 모두 같은 UPC 위반확률을 갖는 {SCR, LBS} 집합에 대해 SCR의 증가나 감소 폭에 비해 LBS(즉 MBS)의 감소나 증가 폭이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 즉 같은 위반확률을 갖기 위해 SCR을 줄일 경우 MBS는 더 큰 비율로 증가 시켜야 한다는 것이다. 본 논문의 VII 장에서는 이러한 관계가 등가 대역폭 관점에서는 어떻게 반영되는 지를 분석한다. 둘째로, LBS가 작은 영역 (300 셀 이하)에서는 LBS의 증가에 따른 위반확률의 감소가 큰 반면, LBS가 큰 영역(300 셀 이상)에서는 LBS가 증가해도 위반확률은 매우 천천히 감소함을 알 수 있다. 이는 비디오 트래픽이 긴 주기에 걸쳐 비교적 큰 상관관계를 가지고 있기 때문이다. 세번째로 LBS의 증가에 따라 특정 위반확률 이하에서 갑자기 위반확률이 0으로 떨어지는 dropping 점이 존재한다는 것이다. 이것은 비디오 시퀀스가 무한히 길지 않기 때문에, 발생하는 셀 수가 제한되어 특정 위반확률 이하로는 위반 셀 (violation cell)이 하나도 존재할 수 없기 때문이다.

이론적으로 위반확률이 0으로 갑자기 떨어지는 점은 비디오 시퀀스의 전체 셀 수의 역수 점이 된다. 그러나 실제 응용에 사용되는 비디오 시퀀스는 같은 통계적 특성을 갖는 서로 다른 시퀀스를 신뢰한 만큼 반복하여 측정할 수가 없으므로 실제 dropping 점은 이보다 큰 위반확률 영역에서 이루어진다. 본 논문에서는 이러한 dropping 점의 영역을 결정하기 위해 다음과 같은 휴리스틱 영역을 정의한다.

$$UDP = \frac{10^2}{(\text{number of frames}) \times (\text{average cells per a frame})}$$

$$LDP = \frac{10}{(\text{number of frames}) \times (\text{average cells per a frame})} \quad (21)$$



(a) Star Wars (b) Simpsons

그림 7. 실험 영상에 대한 SCR 과 LBS에 대한 UPC 셀 위반확률

실험 영상에 대한 시뮬레이션 결과 그림 7에서 볼 수 있듯이 실제 UPC 위반확률의 dropping 점이 UDP(Upper Dropping Point)와 LDP(Lower Dropping Point) 사이에 존재함을 알 수 있다(추가적인 실험영상에 대해서도 모두 이런 결과를 얻을 수 있었다).

그림 8은 본 논문에서 제안한 해석 해에 의한 트래픽 기술자 dimensioning이 시뮬레이션 결과와 어느 정도 근사화 된 값을 갖는지를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 해석적인 트래픽 기술자 dimensioning은 실제 시뮬레이션과 근사하게 일치한다. 단 실제 시뮬레이션 결과는 앞에서 언급한 대로 제한된 셀 수로 인해 dropping 점이 존재하기 때문에 dropping 점 이하의 위반확률 영역에서는 해석 해와 실제 시뮬레이션 결과와의 차이가 발생한다. 본 논문에서는 해석 해를 이용한 트래픽 기술자 dimensioning을 위해, 시뮬레이션에서 위반확률이 0으로 떨어지는 dropping 점을 식 (21)의 휴리스틱 방법을 이용하여 UDP와 LDP 사이에서 정하여 이때의 {SCR,LBS}의 집합들을 가능한 트래픽 기술자 조합으로 선정한다. 본 연구의 실험적 결과에서는

UPC 위반확률이 0이 되는 트래픽 기술자를 선정할 때 식 (21)의 UDP점에서의 해석 해를 적용하여도 비교적 보수적(conservative)인 dimensioning을 할 수 있음을 알 수 있었다.

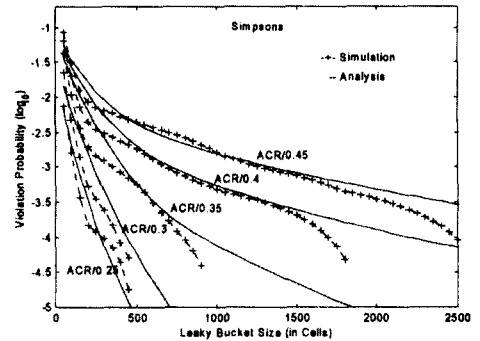
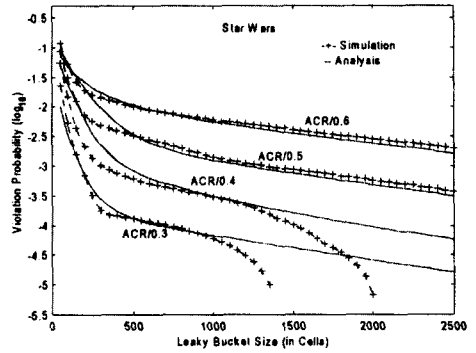


그림 8. {SCR, LBS} 선정에 따른 UPC 위반 확률

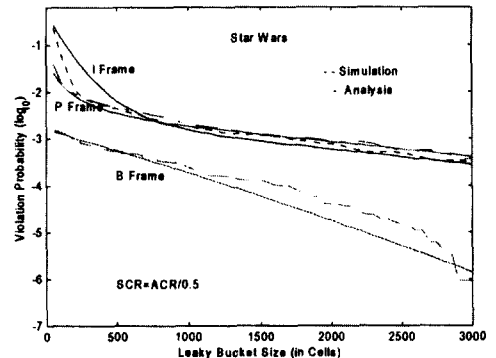


그림 9. 프레임 타입별 UPC 위반확률

그림 9는 “Star Wars” 영상에 대해 ‘CR=ACR/0.5’로 정하였을 때, 프레임 타입별 UPC 위반확률에 대한 시뮬레이션 결과와 해석 해와의 비교를 나타낸다. 해석 해는 각 프레임 타입별 UPC 위반확률을 잘 근사화 함을 알 수 있다.



인코더 단에서 스무딩 데이터 버퍼를 사용할 경우의 해석적 트래픽 기술자 dimensioning은 식 (20)에 의해 수행된다. 식 (20)은 스무딩 데이터 버퍼 크기가 DBS일 때 원하는 UPC 위반확률에 대응되는 LBS를 얻을 수 있게 한다. 그림 10은 해석적 해에 대해 세 프레임 스무딩 버퍼를 사용할 경우와 데이터 버퍼가 없을 경우의 'SCR=ACR/0.5'와 'SCR=ACR/0.3'에 대해 LBS 증가에 따른 UPC 위반 확률을 나타낸다. 한 프레임에 대응되는 스무딩 데이터 버퍼의 크기는 SCR로 한 프레임 시간 중에 보낼 수 있는 셀 수이다.

그림 10의 결과를 살펴보면, LBS가 작은 영역에서는 정해진 SCR에 대해 스무딩 데이터 버퍼의 사용으로 UPC 위반 확률이 많이 감소하나 LBS가 커질수록 UPC 위반 확률은 스무딩 데이터 버퍼를 사용하지 않았을 때 보다 별로 감소하지 않는다. 이 결과를 통해 스무딩 버퍼의 사용으로 SCR 및 LBS의 크기를 줄이고자 할 때에는 LBS가 작은 값(그림에서는 500 셀 크기 이하)으로 dimensioning을 하여야 스무딩 데이터 버퍼 사용의 이점을 살릴 수 있음을 알 수 있다.

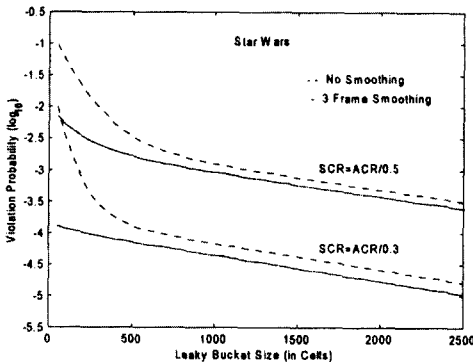


그림 10. 스무딩 버퍼의 사용 시 UPC 위반 확률

그림 11은 "Simpsons" 영상에 대해 식 (21)로 계산된 UDP의 UPC 위반 확률 ( $=5.17 \times 10^{-5}$ )을 UDP에서의 UPC 위반확률은 실제 "Simpsons" 실험영상 시뮬레이션에서 위반 확률이 0이 되는 보수적 트래픽 기술자 dimensioning 방법이다 - 갖도록 본 논문에서 제안한 해석적 dimensioning으로 얻은 {SCR, MBS}의 집합을 나타낸다. 여기에서 한 가지 주목할 것은 SCR의 감소율 보다 대응되는 MBS의 증가율이 훨씬 크다는 것이다. 이러한 가능한 트래픽 기술자에 대한 선택이 실제 망에서의 대역할당 시 등가 대역폭에 어떤 영향을 미치는 가를

다음 장에서 살펴본다.

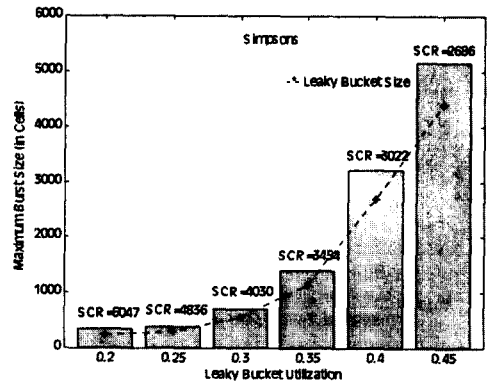


그림 11. 동일한 UPC 위반 확률을 갖는 {SCR, MBS} 집합

### VII. 트래픽 기술자 조합의 등가 대역할당 비교

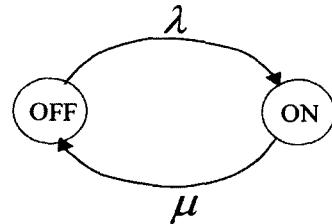


그림 12. ON/OFF 모델

본 장에서는 그림 11에서의 예에서와 같이 같은 UPC 위반 확률을 갖는 트래픽 기술자 집합에 대해서, 만약 망에서의 호 수락 제어 시 대역할당을 위해 간단한 ON/OFF 모델을 이용한 등가 대역폭 계산 방법을 이용할 경우, 가능한 트래픽 기술자 조합들에게 어떻게 대역이 할당되는 지를 비교한다. [15]의 등가대역 모델은 {PCR, SCR, MBS}를 식 (22)를 이용해 ON/OFF 모델을 위한 파라미터로 바꾸고 사용자가 요구한 QoS 파라미터를 이용해 개별 소스에 대해 독립적으로 등가대역을 할당한다. 이 등가대역 모델은 실제 필요한 대역 보다 등가 대역을 과다하게 추정한다. 그 이유는 식 (23)은 망에서 무한 버퍼를 가정하고 무한 버퍼는 망에서 더 많은 셀 손실을 야기 시킨다), VBR 소스의 다중화를 고려하지 않고 각 개별소스에 독자적인 대역을 할당하기 때문이다. 실제 망에서는 보다 복잡한 대역할당 및 호 수락제어 방법을 사용할 수 있지만 본 논문에서는 간단한 비교를 위해 ON/OFF 등가대역 모델을

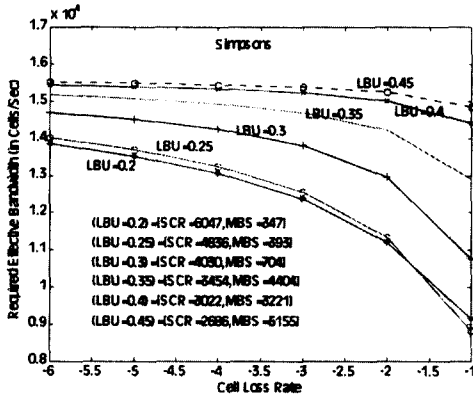
사용한다. 그림 12는 ON/OFF 모델을 나타내고 사용자 QoS에 대응되어 식 (23)에 사용된 파라미터는 셀 손실률과 망에서의 최대 셀 지연에 해당하는 셀 단위의 버퍼 사이즈  $x$ 이다. PCR은 "Simpsons" 영상의 최대 셀 발생률은 15,650이 된다.

$$\lambda = \frac{\rho}{b(1-\rho)}, \mu = \frac{1}{b}$$

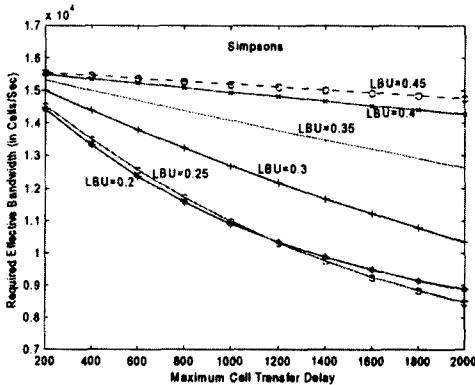
$$b = E[\text{burst period}] = \frac{\text{MBS}}{\text{PCR}}, \rho = \frac{\text{SCR}}{\text{PCR}} \quad (22)$$

$$\bar{C} = \frac{ab(1-\rho) \times \text{PCR} - x}{2ab(1-\rho)} + \frac{\sqrt{[ab(1-\rho) \times \text{PCR} - x]^2 + 4xab\rho(1-\rho) \times \text{PCR}}}{2ab(1-\rho)} \quad (23)$$

여기서  $\alpha = \ln(\epsilon)$ .



(a) 최대 셀 전송지연이 고정된 경우



(b) 셀 손실률이 고정된 경우

그림 13. 트래픽 기술자 조합에 대한 등가대역 할당

그림 13은 "Simpsons" 영상에 대해 UPC 위반확률이 0이 되도록 dimensioning된 트래픽 기술자 조합에 대해 식 (23)를 이용한 등가 대역을 나타낸다.

(a)는 사용자 QoS 중 최대 셀전송지연(MCTD)이 600셀로 고정되었을 때 요구되는 셀 손실률이  $10^{-1} - 10^{-6}$  까지 변할 때에 각 트래픽 기술자 조합에 할당되는 등가대역을 나타낸다. (b)는 사용자 QoS의 셀 손실률을  $10^{-3}$ 으로 고정시키고 최대 셀 지연을 200-2000 셀까지 변화 시킬 때 이에 대응되는 등가 대역을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 ON/OFF의 등가대역 할당의 경우 동일한 UPC위반확률을 가지는 트래픽 기술자 조합 중에 SCR을 작게 한 것 보다는 MBS를 작은 값으로 dimensioning 한 것이 망에서의 등가 대역할당 시 유리하다는 것을 알 수 있다. 단 SCR을 ACR/0.2 이하로 dimensioning 할 경우 필요로 하는 대역폭이 점점 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 이때의 MBS의 감소 폭은 점점 둔화되고 SCR은 해당 영상 시퀀스의 PCR에 가까워 지기 때문이다. 통신망 운용시의 트래픽 관리측면에서는 MBS가 크면 그 만큼 버스트 특성도 커져 망에서의 트래픽 제어를 어렵게 하므로 MBS는 되도록 작은 값으로 유지하여야 할 것이다.

## Ⅶ. 결론

본 논문에서는 ATM 망에서의 VBR MPEG 비디오 서비스를 위해, 제안된 장면기반 트래픽 모델링 방법을 이용하여 리키버킷 기반의 UPC 제어 시 적절한 트래픽 기술자를 선정할 수 있는 해석적 dimensioning 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 원하는 UPC 위반확률을 갖는 트래픽 기술자를 큐잉 해석을 통해 해석적으로 선정할 수 있음을 제시하고 그 값이 원래 비디오 스트림에 대한 시뮬레이션 결과를 잘 근사화 함을 모의실험을 통해 보였다. 스무딩 데이터 버퍼에 대한 분석결과 스무딩 버퍼의 사용은 작은 값의 MBS를 선정할 때 그 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 가능한 트래픽 기술자의 조합에 대해 ON/OFF 모델을 이용한 등가 대역할당에 대한 분석을 통해 SCR을 줄이는 것 보다는 MBS를 작게 유지하는 것이 유리하다는 것을 보였다.

## 참고 문헌

- [1] ITU-T Recommendation I.371, "Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN", March 1993.

[2] ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0, April 1996.

[3] Piya Tanthawichan, Akihro Fujii, and Yoshiaki Nemoto, "Usage parameter control scheme for ATM networks : Markovian state-dependent approach", *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E80-B, No.12, pp. 1780-1789, 1997.

[4] A. R. Reibman and A. W. Berger, "Traffic descriptors for VBR video conferencing", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.3, pp. 329-339, 1995.

[5] Wenjun Luo and Magda El Zarki, "Quality control for VBR video over ATM networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 15, No.6, pp. 1029-1039, 1997.

[6] Iain E G Richardson and Martyn J Riley, "Usage parameter control cell loss effects on MPEG video", *IEEE ICC95*, pp. 970-974, 1995.

[7] Pramod Pancha and Magda El Zarki, "Leaky bucket access control for VBR MPEG video", *IEEE INFOCOM95*, pp. 796-803, 1995.

[8] O. Rose and M. Ritter, "MPEG-video sources in ATM-systems-A new approach for the dimensioning of policing functions", *IFIP 3<sup>rd</sup> International Conference on Local and Metropolitan Communication Systems*, pp. 99-117, 1994.

[9] B-H. Roh and J-K. Kim, "An efficient traffic control framework for VBR MPEG video sources in ATM networks", *IEEE ICC97*, 1997.

[10] Sang-Jo Yoo and Seong-Dae Kim, "Scene-based traffic modelling and queueing analysis of MPEG video sequence", *IEE Electronics Letters*, Vol. 34, No. 15, pp. 1484-1486, 1998.

[11] 유상조, 박수열, 김성대, "ATM 망에서의 MPEG 비디오 트래픽 모델링을 통한 큐잉해석 및 망 자원 할당에 관한 연구", *한국통신학회논문지*, Vol. 23, No.10, pp. 2675 - 2687, 1998.

[12] D. Anick, D. Mitra, and M. M. Dondhi, "Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources", *Bell Syst. Technical*

*Journal*, Vol. 61, No. 8. pp. 1871-1894, 1982.

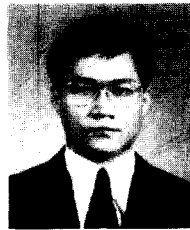
[13] Anwar I. Elwalid and Debasis Mitra, "Analysis and design of rate-based congestion control of high speed networks, I: stochastic fluid models, access regulation", *Queueing Systems* 9, pp. 29-64, 1991.

[14] ftp-info3.infomatik.uni-wuerzburg.de/pub/MPEG

[15] Roch Guerin, Hamid Ahmadi, and Mahmoud Naghshineh, "Equivalent capacity and its application to bandwidth allocation in high-speed networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 9, No.7, pp. 968-981, 1991.

유 상 조(Sang-Jo Yoo)

정회원



1988년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)

1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

1990년 3월~현재 : 한국통신 연구개발본부

1997년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 학과 박사과정

<주관심 분야> 멀티미디어 통신, 트래픽 모델링 및 큐잉해석, 멀티미디어 QoS 제어

홍 성 훈(Sung-Hoon Hong)

정회원

1995년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 학과 박사과정

한국통신학회 논문지 제 23권 5호 참조

김 성 대(Seong-Dae Kim)

정회원



1977년 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1979년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

1983년 : 프랑스 INPT ENSEEIHT 졸업(공학박사)

1984년~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

<주관심 분야> 영상처리, 영상통신, 컴퓨터 비전, VLSI 구현등