

ATM 네트워크에서 VBR 비디오 전송을 위한 부호화기-채널 비트율 결합 제어

정희원 이원 열*, 정연식**, 이수종**, 김한주**, 송홍엽**

Joint Encoder and Channel Rate Control for VBR Video Transmission over ATM Networks

Won-Yeol Lee*, Yeonsik Jeong**, Soo Jong Lee**, Han Joo Kim**, Hong-Yeop Song**

Regular Members

요 약

본 논문에서는 ATM 네트워크에서 VBR 비디오의 실시간 전송을 위한 부호화기-채널 비트율의 결합 제어 방법을 제안한다. 제안한 VBR 비트율 제어 기법에서는 먼저 장기간에서의 채널 전송률 제어를 통해 비디오 신호의 통계적인 특성, 버퍼의 상태, 그리고 장면 전환을 고려하여 채널 전송률을 결정한 후, 단기간의 프레임들에 대해서는 라그랑제 승수를 이용하여 각각의 부호화기 비트율 제어를 수행한다. 실험 결과 제안한 방법은 장면 전환에 관계 없이 기존의 방법에 비해 보다 균일한 화질을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, joint encoder and channel rate control scheme for real-time VBR video transmission over ATM networks is proposed. In the proposed method, channel rate is first determined by channel rate control, according to the statistical characteristics of video signals, buffer occupancy and scene change. Then, using Lagrange multiplier, encoder rate control is performed to the short-term frames. Simulation confirms that the proposed method results in more consistent quality, as compared with the conventional real-time implementations regardless of scene change.

I. 서론

미래의 네트워크는 일반 데이터 뿐만 아니라, 음성 및 비디오 데이터 같은 여러 가지 형태의 멀티미디어 정보를 다루는 방향으로 발전하게 될 것이다. 특히 비디오 전송은 일반적인 데이터들의 전송과는 달리 부호화기에서의 출력 비트율이 가변적이며 이 출력 비트율에 의해 복호화기에서의 화질이 결정되므로 화질과 채널 사용률은 서로 상관관계

(tradeoff)가 존재하게 된다. 그러므로 주어진 채널에서 최적의 화질을 얻기 위한 효율적인 비트율 제어 기법이 요구된다. 그러나 고정 비트율(CBR : Constant Bit Rate) 채널하에서의 비트율 제어로는 실시간 전송이 어렵고, 실제 영상의 변화를 제대로 반영할 수 없으며, 특히 장면 전환(scene change)같은 갑작스런 변화에서는 화질 저하가 불가피하다. 이에 비해 가변 비트율(VBR : Variable Bit Rate) 전송은 비디오 신호의 가변적인 속성을 잘 반영하므로 추가적인 지연 없이도 균일한 화질을 얻을 수

* LG 텔레콤(주)
논문번호 : 99078-0303, 접수일자 : 1999년 3월 3일

** 연세대학교 전자공학과

있다. 이와 같은 이유로 인해 다양한 멀티미디어 서비스의 목표인 광대역 종합 정보 통신망(B-ISDN : Broadband Integrated Services Digital Network)의 기반이 되는 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 네트워크에서의 VBR 영상 부호화기 기능에 대한 연구가 매우 중요한 과제로 부각되고 있다¹¹⁾. 특히 비디오 터미널은 균일한 화질을 유지하면서 동시에 네트워크와 협상된 트래픽 변수를 준수해야 하므로 ATM 네트워크와 연계된 비트율 제어 기법들이 요구된다. 그러나 [2]와 [3]에서 제안된 방법들은 부호화기 비트율과 채널 전송률을 단지 버퍼의 상태만을 이용하여 실험적으로 결정하므로 영상의 내용과 특성을 제대로 반영할 수 없으며 장면 전환(scene change)같은 급격한 변화에 대처하지 못하고 심한 화질 저하를 가져온다. [4]와 [5]의 경우에는 전송 제한 조건을 만족하는 최적 조건을 구할 수 있지만 알고리즘의 복잡도가 커서 실시간 전송에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 ATM 네트워크에서의 실시간 VBR 비디오 통신을 목표로 하였다. 일반적으로 VBR 비디오 트래픽은 단기간(short term)과 장기간(long term)에서 통계적으로 다른 특성을 나타내기 때문에 [6] 본 논문에서는 이를 적절히 반영하기 위해서 비트율 제어 기법을 부호화기 비트율 제어와 채널 전송률 제어로 나누어 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 ATM 네트워크에서 VBR 비트율 제어를 위한 이론적 배경과 비트율 제한 조건을 설명한다. 3절에서는 통계적으로 정상(stationary)인 단기간에서의 비트 할당을 위한 부호화기 비트율 제어 기법을 제안하며, 4절에서는 장기간에서의 비디오 트래픽을 고려한 채널 전송률 할당 기법과 장면 전환시 비트율 할당 기법, 그리고 이를 이용한 VBR 채널에서의 부호화기-채널 비트율 결합 제어 기법을 제안한다. 5절에서는 3, 4절에서 제안한 방법들에 대한 실험 결과 및 결과 고찰을 하고 6절에서 결론 및 향후 연구방향에 대해 기술한다.

II. 관련 연구 및 이론적 배경

2.1 ATM 네트워크에서 VBR 비디오 전송

2.1.1 ATM 네트워크

다양한 전송 특성과 요구 품질을 갖는 서비스들을 하나의 통신망으로 제공하는 것을 기본 이념으

로 하는 ATM 네트워크는 차세대 네트워크 교환 기술로써 강력하게 대두되고 있으며, 현재 B-ISDN에 적용되고 있다. ATM 네트워크는 연결 지향(connection-oriented) 방식으로, 일반 데이터나 비디오 비트스트림이 53바이트 셀(cell)로 패킷(packet)화되며 전송 데이터의 QoS를 보장하기 위해서는 전송 시작 전에 사용자들과 위에서 언급한 예상 트래픽 인자에 대한 협상이 요구된다. 이 때 네트워크는 협상된 트래픽 인자를 초과해서 발생하는 네트워크에 대한 악영향을 방지하기 위해서 감시 메커니즘에 의존하게 된다. 리키 버킷은 이러한 트래픽 감시 메커니즘의 대표적인 방법 [7]이며, 리키 버킷 인자들은 사용자와 네트워크에 의해 협상되고 승인된다. 가변적인 비트율로 데이터를 전송 가능하다는 점도 ATM 기술의 중요한 특성 중 하나이다. 이 특성은 네트워크 자원을 많은 사용자들이 통계적으로 공유하여 높은 효율을 얻도록 한다.

2.1.2 VBR 비트율 제어

MPEG이나 H.263같은 압축 기법으로 부호화된 전형적인 동영상에서 일정한 화질을 유지하기 위해서는 많은 움직임이 있는 영역이나 복잡한 영역에 더 많은 비트가 할당되어야 한다. 그러나 CBR 채널에서는 영상의 내용에 관계없이 일정한 비트를 할당하기 때문에 변화가 심한 영상에서의 일시적인 화질 저하를 나타낸다. 반면에 VBR 채널은 영상의 내용에 따라 비트 할당을 달리 할 수 있기 때문에 균일한 화질을 유지할 수 있다. VBR 전송 채널을 제공하는 ATM 네트워크의 경우, 혼잡 발생 가능성을 줄이고 SMG(statistical multiplexing gain)을 개선시키기 위해서 트래픽 인자에 대한 사용자와의 협상을 요구한다. 이 트래픽 인자들과 기존의 부호화기 버퍼, 복호화기 버퍼의 오버플로우와 언더플로우에 대한 조건으로 인해서 ATM 네트워크를 통한 VBR 비디오 신호의 전송시에도 채널 전송률에 대한 명백한 제한 조건 [2]이 존재하게 되며 이런 이유로 네트워크는 VBR의 장점을 최대한 살리기 위한 적절한 비트율 제어 장치를 가져야 한다. 비트율 제어는 양자화 계수의 조절을 통해서 제한 조건 내에서 데이터를 발생시키도록 하는 부호화기 비트율 제어와 네트워크로 유입되는 트래픽의 최대 셀률(peak cell rate)과 버스트성을 감소시킴으로써 셀 손실 가능성을 줄임과 동시에 비디오 트래픽에 대한 제어와 관리를 용이하게 하는 채널 전송률 제어로 나누어 질 수 있다. 본 논문에서는 부호화기 비

트율 제어와 채널 전송률 제어를 합하여 결합 비트율 제어라 하였다.

2.1.3 VBR 비디오 시스템

본 논문에서 사용되는 VBR 비디오 전송 시스템은 그림 1와 같다. 여기서는 모든 비트율들은 30 frame/sec의 영상 재생 속도에서의 한 프레임 구간인 33.33ms 단위로 나타난다. 비디오 전송 시스템에서 부호화기 버퍼는 채널 전송률을 제어하는 역할을, 복호화기 버퍼는 셀 지연 지터(jitter)를 완충시키는 역할을 담당한다. 부호화기에서 i 번째 프레임의 비트율 E_i 는 이 프레임 구간의 마지막에서 부호화기 버퍼를 채우게 되며 동시에 사용자 네트워크 인터페이스(UNI: User-Network Interface)에서 네트워크로 패킷을 전송하기 위한 가변 채널 전송률 R_i 를 선택하여 전송한다. 이 때 일반적인 비디오 전송 시스템에서는 복호화기 버퍼의 언더플로우를 막기 위해서 부호화기에서 부호화가 시작된 후 L 프레임 만큼의 시스템 지연이 지난 후에 복호화를 수행하도록 한다. 부호화기와 복호화기의 점유율은 B_i^e , B_i^d 로, 크기는 B_{max}^e , B_{max}^d 로 나타나며, 최대 비트율 R_{peak} , 유출 비트율(drain rate) R_S , 그리고 리키 버킷의 크기 N_{max} 등과 같은 리키 버킷 인자들은 호 설정 제어(call admission control)와 트래픽 감시에 사용된다. 그림 2는 리키 버킷을 이용한 VBR 비트율 제어 시스템에 대해서 나타내었다.

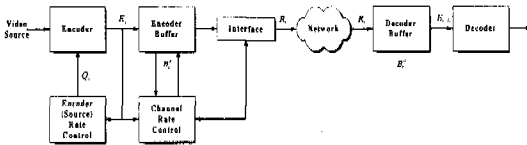


그림 1. VBR 비디오 전송 시스템.

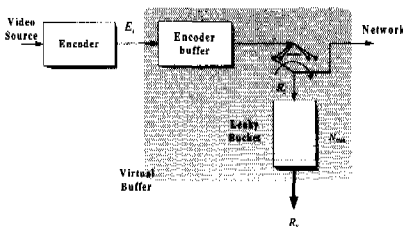


그림 2. VBR 비트율 제어 시스템

2.2 VBR 비디오 전송시 제한 조건

비디오 전송시 부호화기와 복호화기에서 오버플

로우나 언더플로우가 일어나지 않도록 하기 위해서는 전송률 제한 조건을 만족해야 한다. 여기에 사용된 시간 인덱스 i 는 모두 부호화기에서 부호화되는 프레임들을 기준으로 하였다. 앞 절에서 언급한 비디오 전송 시스템에서 채널 전송 지연이 없다고 가정하면 일반적인 전송률 제한 조건은 다음과 같다.

$$C_1 = \{ R_i : E_i - (B_{max}^e - B_{i-1}^e) \leq R_i \leq B_{i-1}^e + E_i \}$$

Encoder overflow Encoder underflow (1)

$$C_2 = \{ R_i : E_{i-L} - B_{i-L-1}^d \leq R_i \leq E_{i-L} + (B_{max}^d - B_{i-L-1}^d) \}$$

Decoder underflow Decoder overflow (2)

VBR 채널에서의 전송은 CBR 전송과는 달리 전송률이 고정값으로 제한 받지는 않지만, 네트워크 감시 함수에 의한 혼잡 방지 조건에 의해서 제한을 받게 된다. 네트워크 감시 함수로는 리키 버킷이 가장 좋은 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 번째 프레임 부호화시, 리키 버킷의 점유율과 제한조건은 다음과 같다.

$$N_i = \max \{ 0, N_{i-1} + R_i - R_S \} \tag{3}$$

$$C_3 = \{ R_i : R_S - N_{i-1} \leq R_i \leq N_{max} - N_{i-1} + R_S \}$$

Leaky bucket underflow Leaky bucket overflow (4)

그러므로 VBR 채널에서의 제한 조건을 만족하는 전송률의 범위는 다음과 같이 나타낸다.

$$R_i \in [R_i^{lower}, R_i^{upper}] = C_1 \cap C_2 \cap C_3 \tag{5}$$

III. 부호화기 비트율 제어 기법

본 절에서는 주어진 채널 전송률에 대해 상관 관계가 비슷한 단기간의 프레임들이 균일한 왜곡을 갖도록 비디오 신호의 통계적인 특성을 이용하여 부호화기 비트율을 제어하는 방법을 제안한다. 장기간의 비디오 신호의 특성을 이용하는 채널 전송률 제어 기법에 대해서는 다음 절에서 다룬다.

3.1 비트율-왜곡 함수 추정

비디오 신호가 수직 성분과 수평 성분으로 분리되는 이차원 신호로 나타나며 각 성분들이 이산 정상 가우시안 과정(discrete stationary Gaussian process)의 특징을 가진다고 가정하면, 비트율-왜곡 함수는

다음과 같이 정의될 수 있다[8][9]

$$D(R) = \gamma^2 \sigma^2 2^{-2R}, \quad 0 \leq \gamma^2 \leq 1 \quad (6)$$

여기서 σ^2 는 가우시안 과정의 분산을, 왜곡 D 는 MSE(mean square error)를 나타낸다. γ^2 는 스펙트럼 평탄 척도(spectral flatness measure)로서 $\gamma^2=1$ 이면 비디오 신호가 비메모리 소스인 경우를 나타낸다. 하지만 실제 부호화에서 비트율-왜곡 함수가 분산이나 시간축에서의 상관 관계뿐만 아니라 기준 프레임(reference frame)의 부호화 결과에 의해서도 영향을 받게 되므로, γ^2 를 실험적으로 구하기가 어렵다. 그래서 정확성을 보장하기 위해서는 이전 영상의 부호화 결과를 이용하는 통계적인 모델을 필요로 하게 된다. 가우시안 비디오 소스의 경우, 왜곡 D_X ($X=I, P, B$ frame)가 식 (6)에서와 같이 $\alpha_X^2 2^{-2R}$ 비례하므로 다음과 같은 선형 회귀 모델 [10]을 도입할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_X &= \alpha_X \sigma_X^2 2^{-2R} + \beta_X = \alpha_X f_X + \beta_X \\ \alpha_X &= \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f_{X,i} D_{X,i} - \bar{f}_X \sum_{i=0}^{N-1} D_{X,i}}{\sum_{i=0}^{N-1} f_{X,i}^2 - N \cdot \bar{f}_X^2} \\ \beta_X &= \bar{D}_X - \alpha_X \cdot \bar{f}_X \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 N 은 표본의 개수를 나타내며, \bar{f}_X, \bar{D}_X 는 f_X, D_X 의 표본 평균을 나타낸다.

제한한 비트율-왜곡 함수 추정 방법은 미리 정해진 비트율-왜곡 모델을 이용할 때 발생하는 오차를, 통계적인 특성을 이용하여 보완하면서, 비트율-왜곡 함수를 구하기 위해 미리 부호화를 해보던 기존의 방법에 비해 복잡도가 줄어들어 실시간에 적용 가능하다는 장점이 있다 왜곡은 양자화 계수의 제곱에 비례하므로[11], 제한한 방법은 이 관계를 나타내는 데도 적용될 수 있다.

$$\begin{aligned} D_X &= A_X q_X^2 + B_X, \\ A_X &= \frac{\sum_{i=0}^{N-1} q_{X,i}^2 D_{X,i} - \bar{q}_X^2 \sum_{i=0}^{N-1} D_{X,i}}{\sum_{i=0}^{N-1} q_{X,i}^4 - N \cdot \bar{q}_X^2} \\ B_X &= \bar{D}_X - A_X \cdot \bar{q}_X^2 \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 GOP 내에서의 부호화기 비트율 할당

장면 전환(scene change)이 없는 비디오 신호는 프레임사이에서 비슷한 통계적인 특성을 나타내지만 각 프레임마다의 부호화 방법에 따라 비트율과 왜곡이 다르게 나타난다. 본 논문에서는 1 GOP 구간을 통계적으로 정상적인(stationary) 최소 단위로 가정하였다. 그리고, GOP 내의 프레임들의 비트율-왜곡 관계를 고려하여 GOP에 할당된 채널 전송률에 대해서 각 프레임들이 균일한 왜곡을 갖는 비트율을 얻도록 하였다.

GOP 내에서는 장면 전환이나 급격한 통계적인 변화가 없다고 가정하면, 앞에서 추정된 비트율-왜곡 함수는 앞으로 1 GOP구간 동안의 모든 프레임에 대해서 적용이 가능하다. 미리 할당된 채널 전송률을 만족하면서 왜곡을 최소로 하는 비트율 R_I, R_P, R_B 을 각 프레임에 할당하기 위해서 다음과 같은 제한 조건을 만족해야 한다.

$$(R_I, R_P, R_B) = \arg \min_{R_I, R_P, R_B} [(D_I + N_P D_P + N_B D_B)] \quad (9)$$

$$R_I + N_P R_P + N_B R_B = R_{GOP} \quad (10)$$

여기서 D_I, D_P, D_B 는 I, P, B 프레임의 왜곡을, R_{GOP} 는 GOP에 할당된 채널 전송률을 나타내며, N_P, N_B 은 GOP당 P, B 프레임의 수를 나타낸다. 이 때, GOP 내의 I, P, B 프레임들에 대한 비트율-왜곡 모델은, 앞에서 언급한 선형 회귀 모델을 이용하여 구한다.

식 (9)와 (10)을 만족하는 R_I, R_P, R_B 를 구하기 위해 아래와 같이 라그랑제 보조 방정식(Lagrange auxiliary equation)을 이용하였다.

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= D_I + N_P D_P + N_B D_B + \\ &\lambda (R_{GOP} - R_I - N_P R_P - N_B R_B) \end{aligned} \quad (11)$$

위 식을 R_I, R_P, R_B 에 대해서 미분한 후 0으로 두면 최적 비트율 R_I, R_P, R_B 는 다음과 같이 나타난다.

$$R_X = -\frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{-\lambda}{2\alpha_X \sigma^2 \log_e 2} \right), \quad X = I, P, B \text{ frame} \quad (12)$$

여기서 σ^2 은 현재 프레임의 분산을 나타내며, $\alpha_I, \alpha_P, \alpha_B$ 은 식 (7)에서 구한 I, P, B 프레임에 대한 비트율-왜곡 모델의 추정치이다. 이는 식 (10)를 만족해야 하므로 λ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda = -2^{g(R_{GOP}, N_P, N_B, \alpha_I, \alpha_P, \alpha_B, \sigma^2)}$$

$$g(\cdot) = (-2R_{GOP} + \log_2 \alpha_I + N_P \log_2 \alpha_P + N_B \log_2 \alpha_B + (1 + N_P + N_B) \log_2 (2\sigma^2 \log_e 2)) / (1 + N_P + N_B) \quad (13)$$

실제로 부호화 과정에서 실험적으로 얻어지는 비트율-왜곡 함수는 제안한 방법으로 추정된 모델과 높은 비트율에서는 어느 정도 잘 들어맞는 반면에 낮은 비트율에서는 많은 오차를 가져오게 된다. 그러므로 R_{GOP} 이 너무 낮게 할당된다면 이 오차로 인해 R_I, R_P, R_B 이 음수로 나타날 수도 있다. 다음 절에서 제안하는 채널 전송률 제어 방법에서는 채널 전송률 R_{GOP} 을 너무 낮게 할당되는 것을 방지하여 R_I, R_P, R_B 이 음수가 되지 않도록 하였다.

일반적으로 동영상에서의 비트율 제어은 최소 왜곡보다는 균일한 왜곡의 유지에 중점을 두어야 한다. 제안한 비트율 제어에서는 GOP에 할당된 채널 전송률에서 각 프레임들에 대해 최소의 왜곡을 가지는 R_I, R_P, R_B 를 구하도록 하였지만, 제안한 방법에서의 비트율-왜곡 함수는 지수 함수 형태이므로 미분이 원함수의 형태를 유지하게 되며, 이로 인해 식 (12)과 같이 최적화된 비트율 R_I, R_P, R_B 가 식 (6)의 비트율-왜곡 함수와 역함수 관계를 나타내게 된다. 추정된 비트율-왜곡 함수에서 y절편인 β_x 는 비트율이 낮은 경우가 아니면 무시할 수 있을 정도로 작으므로, 각 프레임에서 예상되는 왜곡은 식 (14)와 같이 모두 같은 값으로 나타나게 된다. 결과적으로 제안한 방법은 1 GOP 구간의 왜곡을 최소로 하면서 I, P, B 각 프레임들의 왜곡을 균일하게 유지하도록 한다.

$$D_x = \alpha_x \sigma^2 2^{-2(-\frac{1}{2} \log_2(\frac{-\lambda}{2\alpha_x \sigma^2 \log_e 2}))} = \frac{\lambda}{2 \log_e 2} \quad (14)$$

이 때 추정된 부호화기 비트율은 현재 또는 앞으로의 진행될 부호화에서의 버퍼의 상태가 전혀 고려되지 않은 결과이므로 현재 버퍼의 상태에 따라, 언더플로우나 오버플로우를 유발할 수 있다. 이를

방지하기 위해 추정된 각 프레임들의 비트율을 이용해서 앞으로의 각 버퍼들의 상태를 다음 GOP구간의 첫번째 프레임까지 확인한다. 만약, 버퍼가 언더플로우나 오버플로우가 발생하는 프레임이 있으면, 현재 프레임부터 버퍼 위반이 일어난 프레임까지의 채널 전송률을 버퍼의 위반을 방지할 수 있도록 할당한다. 부호화기 버퍼의 경우, 먼저 구해진 R_I, R_P, R_B 를 이용해서 다음과 같이 채널 전송률 R_{GOP} 를 조정한다.

$$R_{GOP} = N'_I R_I + N'_P R_P + N'_B R_B + R_{adj}$$

$$R_{adj} = \begin{cases} B_{max}^e - B_{est}^e & \text{if } B_{est}^e - B_{max}^e > 0 \\ & \text{i.e. overflow occurs} \\ -B_{est}^e & \text{if } B_{est}^e < 0 \\ & \text{i.e. underflow occurs} \end{cases} \quad (15)$$

이 때 N'_I, N'_P, N'_B 는 버퍼 위반이 일어나는 시점까지의 I, P, B 프레임의 수이며 R_{adj} 는 버퍼 위반을 막기 위한 채널 전송률의 조정 변위이다. 이와 같이 조정된 채널 전송률에 대해서 재설정 구간의 부호화기 비트율 할당 과정을 다시 수행함으로써 앞으로 진행될 부호화 과정에서의 버퍼 위반 가능성을 줄인다(그림 3).

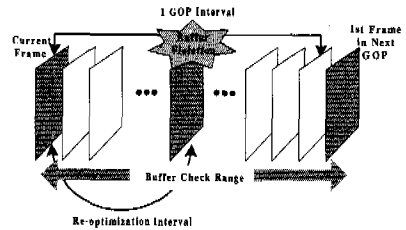


그림 3. 버퍼 위반시 최적화 구간 재설정.

IV. 부호화기-채널 비트율 결합 제어 기법

VBR 비디오 전송 시스템은 CBR과는 달리 영상의 가변적인 특성을 반영할 수 있기 때문에 보다 균일한 화질의 영상을 전송할 수 있지만, 네트워크에서의 혼잡을 막기 위해 장기간에서의 전송률에는 제한이 부과되어야 한다. 이 절에서는 부호화기 비트율 제어에서 사용되는 채널 전송률을 비디오 트래픽의 특성에 따라 할당하기 위한 채널 전송률 제어 기법과 이들을 이용한 VBR 비트율 제어 기법으로 부호화기-채널 비트율 결합 제어 시스템을 제안한다.

4.1 VBR 영상 신호의 특성 분류

비디오 트래픽은 많은 요소들에 의해 영향을 받기 때문에 장기간에서의 비디오 트래픽을 정확히 모델링하는 것은 거의 불가능하다[8]. 이로 인해 앞에서 제안한 단기간에서의 비트율 할당 최적화 기법을 이용할 수 없다. 특히 VBR 비트율 제어는 균일한 화질과 네트워크의 제한 조건을 동시에 만족시켜야 하므로 이전 부호화 결과를 이용이 필수적이며, 유지 가능 비트율(sustainable rate)을 제어의 기준으로 삼아야 한다 이런 이유로 본 논문에서는 트래픽을 확률적으로 모델링하는 대신, 채널 전송률의 가변적인 할당을 위해 각 순간에서의 비디오 트래픽을 이전까지의 통계적인 특성과 유지 가능 비트율을 고려하여 3가지 계층으로 구분하는 방법을 제안하였다. 현재 프레임으로부터 1 GOP 동안 할당될 예상 전송률을 R_{est} , 이전 프레임에서의 전송률을 R_{prev} 라 하고 네트워크가 1 GOP 구간동안 유지 가능한 평균 비트율 $\overline{R_{GOP}}$ 를 $(I+N_P+N_B)R_B$ 라 할 때 비디오 트래픽을 다음과 같이 구분하였다.

Class 0

$$\overline{R_{GOP}} < R_{prev} < R_{est} \tag{16}$$

Class 1

$$\overline{R_{GOP}} < R_{est} < R_{prev}, R_{prev} < \overline{R_{GOP}} < R_{est} \tag{17}$$

Class 2

$$R_{est} \leq \overline{R_{GOP}} \tag{18}$$

이 때 유지 가능 비트율 $\overline{R_{GOP}}$ 은 이전까지의 비트율 제어가 버퍼의 위반 없이 적절히 수행되었다면 트래픽의 평균 비트율로 볼 수 있다. 여기서 class 0은 현재 전송률이 평균 비트율보다 크면서 이전보다 증가하는 상태를, class 1은 전송률이 평균 비트율보다 크지만 감소하는 상태를, class 2는 전송률이 평균보다 낮은 경우이다.

$R_{prev} < \overline{R_{GOP}} < R_{est}$ 은 class 2에서 class 0으로 곧바로 트래픽이 바뀌는 것을 막기 위해 class 1에 포함시키도록 하였다. 이는 다음 절에서 제안하는 채널 전송률 제어에서 급격한 채널 전송률의 증가를 막는 역할을 한다 실제 경우에서 비디오 트래픽은 감마(Gamma) 분포를 나타내므로[13], 네트워크의 유지 가능 비트율보다 큰 경우(Class 0, Class 1)는 상대적으로 큰 분산을 가진다. 그러므로, 발생

비트율이 많은 경우, 특히 Class 0의 경우는 화질 저하 없이 수용하기는 힘들기 때문에 균일한 화질 보다는 제한 조건 내에서 최소 화질 저하가 발생하도록 하는 것이 바람직하다.

4.2 채널 전송률 할당 기법

현재 프레임에서 부호화기 비트율 제어를 위해 할당되는 추정 채널 전송률 R_{est} 는 이전 프레임들의 왜곡을 최소화 하기 위해서, 이전 1 GOP동안의 평균 왜곡 D_{avg} 을 유지할 수 있어야 한다. 그러므로 R_{est} 는 이전 프레임들의 결과를 이용해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{est} = R_{I,est} + N_P \cdot R_{P,est} + N_B \cdot R_{B,est}$$

$$R_{X,est} = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\alpha_X \sigma^2}{D_{avg}} \right), \quad X = I, P, B \tag{19}$$

하지만 앞에서 언급했듯이 비디오 트래픽은 일반적인 크기의 버퍼가 수용할 수 있는 분산을 넘어서기 때문에 추정된 채널 전송률을 그대로 할당할 수는 없으므로 리키 버킷의 상태에 따라 어느 정도 미리 계획된 채널 전송률 할당이 요구된다. 본 논문에서는, 일반적인 비디오 트래픽이 장면 전환을 제외하고는 급격한 통계적인 특성의 변화가 거의 발생되지 않는 점을 고려하여 리키 버킷의 점유율 LB 에 따라 버퍼의 상태를 3 상태 마코프(Markov) 체인으로 모델링하고(그림 4), 화질 저하를 최소화 하기 위해서 표 1와 같이 채널 전송률을 할당하도록 하였다. 실제로 비디오 트래픽은 장면 전환을 제외하고는 급격한 통계적인 특성의 변화가 거의 발생하지 않으므로 채널 전송률은 연속적인 변화를 나타내게 되어, 표 1에서의 같이 연속된 특정 구간에서의 채널 전송률을 하나의 계층으로 대표하도록 할 수 있다.

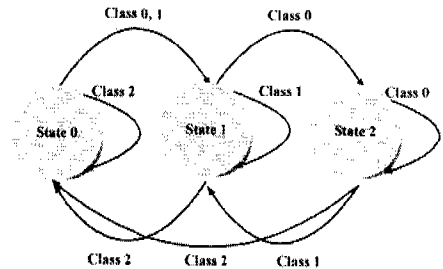


그림 4. 리키 버킷 상태 천이 다이어그램.

표 1. 채널 전송률 R_{GOP} 할당.

	Class 0	Class 1	Class 2
State 0 $0 < LB < N_{max}/3$	R_{est}	$Min(R_{est}, \overline{R_{GOP}} + \frac{N_{max}}{3})$	$\overline{R_{GOP}}$
State 1 $N_{max}/3 < LB < 2N_{max}/3$	$Min(R_{est}, \overline{R_{GOP}} + \frac{N_{max}}{3})$	$\overline{R_{GOP}}$	$Max(R_{est}, \overline{R_{GOP}} - \frac{N_{max}}{3})$
State 2 $2N_{max}/3 < LB < N_{max}$	$\overline{R_{GOP}}$	$\overline{R_{GOP}} - \frac{N_{max}}{3}$	$\overline{R_{GOP}} - \frac{2N_{max}}{3}$

4.3. 장면 전환에서의 부호화기 비트율 할당

비디오 신호에서 장면 전환은 이전 화면들의 특성과의 통계적인 특성의 불연속으로 인한 급격한 비트율의 증가 때문에 부호화기 버퍼의 오버플로우나 복호화기 버퍼의 언더플로우가 발생하여 급격한 화질 저하를 나타낸다. I 프레임에서 장면 전환이 발생한 경우는 이를 기준 프레임으로 하는 B 프레임들은 양방향 예측이 불가능하며 P 프레임을 기준으로 순방향 예측만이 성립하게 된다. 그래서 B 프레임들은 실제로는 P 프레임의 형태로 부호화된다. P 프레임에서의 장면 전환의 경우, P 프레임은 예측 부호화를 수행하지 않으며, B 프레임들은 순방향 예측만이 가능하게 된다. 그래서 P프레임은 I 프레임의 역할을, B 프레임은 P 프레임의 역할을 한다. B프레임에서의 장면 전환의 경우도 P 프레임에서의 경우와 마찬가지로 나타난다. 이와 같은 이유로 장면 전환이 일어난 대부분의 경우, 급격한 비트율의 증가로 인해 GOP에 할당된 비트율이 부족하게 된다. VBR 비디오 전송은 채널 전송률 선택의 유연성으로 인해 장면 전환에서의 부호화 방향의 변화를 적절히 반영하여 초과된 비트율을 흡수할 수 있다. 이를 위해서 식 (19)를 다음처럼 확장한다.

$$R_{est} = N_I^{scn} R_{I,est} + N_P^{scn} R_{P,est} + N_B^{scn} R_{B,est} \quad (20)$$

여기서 $N_I^{scn}, N_P^{scn}, N_B^{scn}$ 은 장면 전환시 움직임 예측 방법의 변화를 고려해서 구한 GOP 내의 I, P, B 프레임의 수이다. 식 (20)과 표 1을 이용해서 R_{GOP} 를 구한 후, 부호화기 비트율 제어 기법을 적용하면 식 (13)는 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\lambda = -2^{g(R_{GOP}, N_I^{scn}, N_P^{scn}, N_B^{scn}, \alpha_I, \alpha_P, \alpha_B, \sigma^2)}$$

$$g(\cdot) = (-2R_{GOP} + N_I^{scn} \log_2 \alpha_I + N_P^{scn} \log_2 \alpha_P + N_B^{scn} \log_2 \alpha_B + (N_I^{scn} + N_P^{scn} + N_B^{scn}) \log_2 (2\sigma^2 \log_e 2)) / (N_I^{scn} + N_P^{scn} + N_B^{scn}) \quad (21)$$

이 과정은 프레임내 모든 매크로블록이 같은 방법으로 부호화된다는 가정을 전제로 하였다. 그러므로 장면 전환이 서로 상관 관계가 없는 경우에는 정확히 들어맞는 반면에 상관 관계가 있는 경우에는 어느 정도 오차가 발생한다. 하지만 부호화 방향의 변화가 비트율 할당에 반영됨으로써 급격한 화질 저하는 막을 수 있다.

4.4 채널 전송률 존재 조건

앞에서 언급한 비디오 전송률 제한 조건들의 해는 닫힌 형태로 나타나지 않으며 교집합의 존재도 보장할 수 없다. 식 (1)의 상한값인 부호화기 언더플로우 제한 조건이 식 (2)의 하한값인 복호화기 언더플로우 제한 조건보다는 항상 크게 나타나므로, 부호화기 제한 조건과 복호화기 제한 조건의 교집합이 존재하기 위해서는 복호화기 오버플로우 제한 조건이 부호화기 오버플로우 제한 조건보다 항상 크게 나타나야 한다. 이 조건은 다음과 같이 요약된다.

$$\sum_{j=i-L+1}^i E_j < B_{max}^e + B_{max}^d \quad (22)$$

리키 버킷 제한 조건이 위에서 구한 해집합과 교집합을 이루기 위해서는 리키 버킷 제한 조건의 상한값이 위에서 언급한 해집합의 하한값보다 커야

하며, 리키 버킷 제한 조건의 하한값이 해집합의 상한값보다 작아야 한다. 이 조건을 [2]에서 제안한 바와 같이 버퍼의 크기를

$B_{max}^e = B_{max}^d = N_{max} = L \cdot R_s$ 로 두고 정리하면 다음과 같이 나타난다.

$$iR_s < \sum_{j=1}^i E_j < N_{max} + R_{max}^e + iR_s \quad (23)$$

식 (23)에서 $B_{max}^e + N_{max}$ 는 그림 2에서 언급한 가장 버퍼의 최대값이므로, 버퍼의 위반을 발생시키지 않는 채널 전송률의 해집합은 식 (22)의 조건을 만족하면서 이전 프레임까지 버퍼의 제한 조건이 위반되지 않았다면 반드시 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 조건들은 부호화기 비트율 제어 기법에서 반드시 고려되어야 한다.

또, VBR 채널에서의 전송률은 식 (5)의 형태로 나타나며, 범위 내에서는 어느 값이나 사용 가능하다. 실제로 앞 절에서 얻어진 1 GOP 구간 동안에 할당된 채널 전송률이 현재 프레임의 전송률로 사용될 수도 있지만 단기간에서의 통계적인 특성 변동을 적절히 반영하고 앞으로의 부호화 과정에서 각 버퍼의 제한 조건들을 위반할 가능성을 줄이기 위해 제한 조건의 경계의 중간값이 되도록 다음과 같이 선택한다.

$$R_i = \frac{R_{upper} + R_{lower}}{2} \quad (24)$$

4.5 전체 시스템

본 논문에서는 앞에서 제안한 부호화기 비트율 제어 기법과 채널 전송률 제어 기법을 이용하여 다음과 같은 VBR 채널에서의 부호화기-채널 비트율 결합 제어 기법을 제안하였다.

1. 이전 프레임의 부호화 결과를 이용한 선형 회귀 모델로 비트율-왜곡 함수를 추정한다.
2. 식 (19)을 이용하여 이전 왜곡을 유지할 수 있는 채널 전송률 R_{est} 을 추정한다.
3. 추정된 채널 전송률과 리키 버킷의 상태를 고려하여 채널 전송률을 할당한다.
4. 주어진 채널 전송률에 대해 식 (12)과 (22)를 이용하여 최적화된 비트율을 구한다. 만약 장면 전환이 발생하면 각 경우에 따라 식 (20)을 적용해서 최적화 비트율을 구한다.

5. 다음 GOP 구간의 첫번째 프레임까지 각 버퍼들의 상태를 점검한다. 버퍼의 위반이 발견되면 위반된 양을 고려한 새로운 채널 전송률에 대해서 위반이 일어난 프레임까지 다시 step 4의 최적화 과정을 수행한다.

6. 결정된 비트율을 이용해서 식 (5)에서 각 버퍼들의 제한 조건과 채널 전송률의 범위를 구하고 이를 이용해서 식 (24)으로 채널 전송률을 구한다.

7. 식 (8)에서 선형 회귀 모델에 의해 결정된 양자화 계수로 해당 프레임을 부호화한다.

8. 모든 인자들을 갱신한 후 다음 프레임에 대해서 위 과정을 반복한다.

제안한 방법은 버퍼의 상태뿐만 아니라 영상의 여러 가지 통계적인 요소도 이용하여 부호화기 비트율과 채널 전송률을 할당하므로 기존의 방법에 비해 비디오 전송에서 좋은 효율을 얻을 수 있다는 장점을 지닌다. 뿐만 아니라 제안한 방법에서 채널 전송률 제어 부분인 step 2,3,4 대신에, 채널 전송률을 고정값으로 두고 나머지 과정을 진행하면 CBR 비트율 제어 기법으로도 적용이 가능하다.

V. 실험 및 결과 고찰

본 실험에서 사용된 시스템은 그림 1과 같으며 부호화 방법은 MPEG-2 TM5[14]를 기반으로 하였다. GOP의 크기는 15, 기준 프레임간의 거리는 3으로 하였으며 시스템 지연 L 은 3 프레임으로 하였다. 그리고 프레임율은 30 frame/sec, 평균비트율은 1.3Mbps(43333bit/frame)으로 하였으며 부호화기 버퍼, 복호화기 버퍼, 리키 버킷의 크기는 [2]에서의 조건을 이용하여 평균 비트율의 3배인 129999bit로 동일하게 적용하였다. 실험 영상으로는 MPEG 표준 입력 영상 포맷중 하나인 352 x 240 CIF(common intermediate format)를 사용하였다. 본 실험에서는 2개의 장면 전환을 가지는 "Table Tennis" 영상에 대해 기존의 CBR 비트율 제어 기법인 MPEG-2 TM5와 제안한 부호화기 비트율 제어를 이용한 CBR 비트율 제어 기법, [3]에서 제안된 VBR 비트율 제어 기법과 제안한 VBR 비트율 제어 기법을 차례로 적용하였다.

TM5의 경우는 버퍼의 크기에 대한 상대적인 점유율이 아니라 절대적인 점유율을 양자화기에 선택에 이용하므로 주어지는 버퍼의 크기를 충분히 할

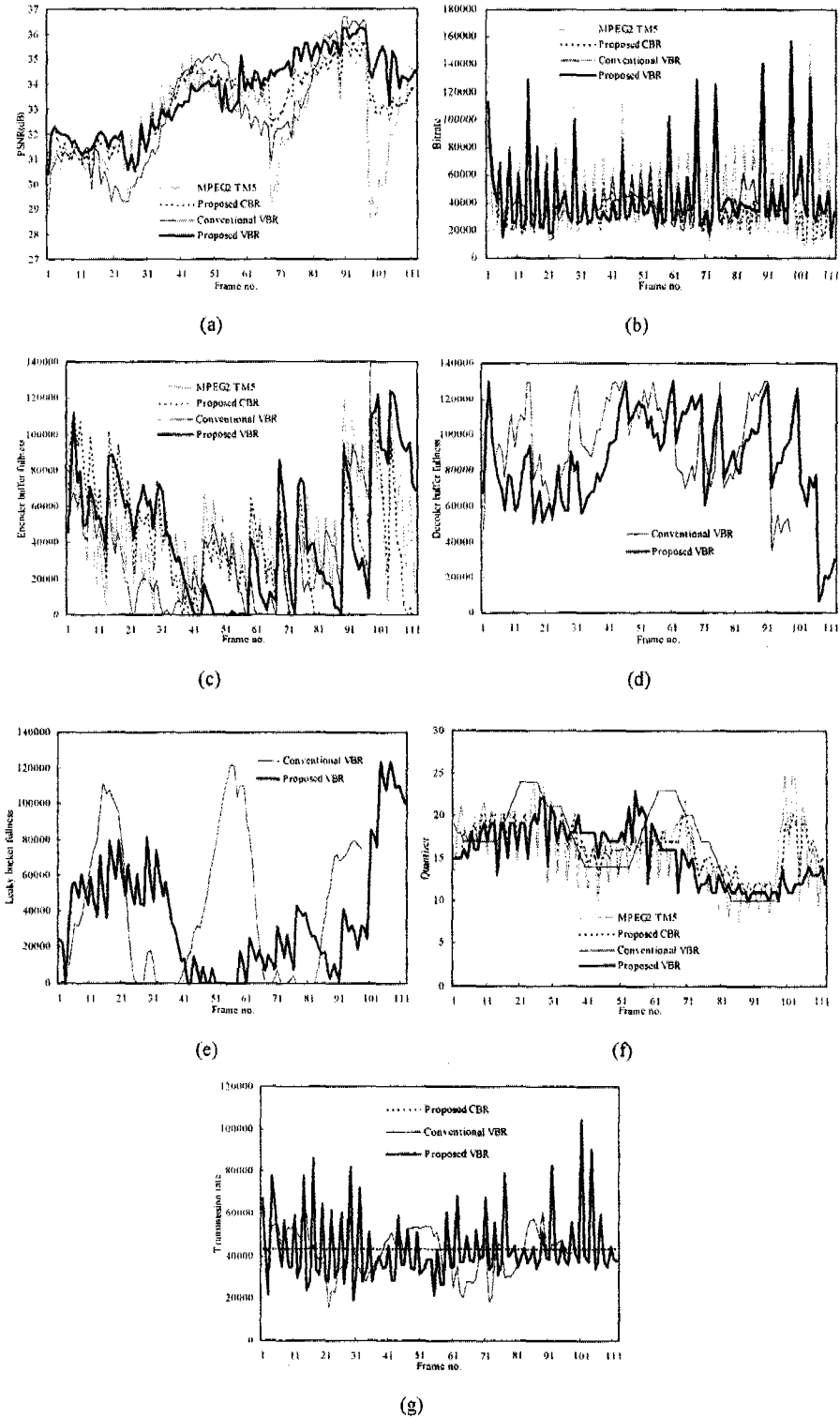
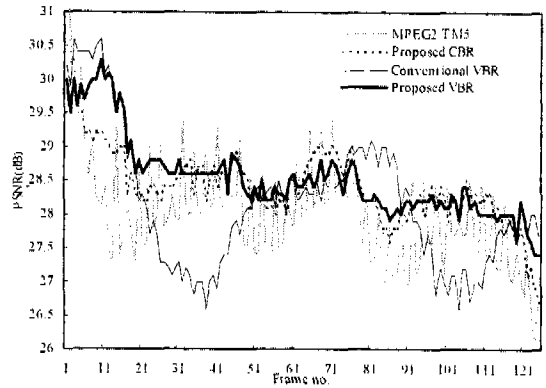


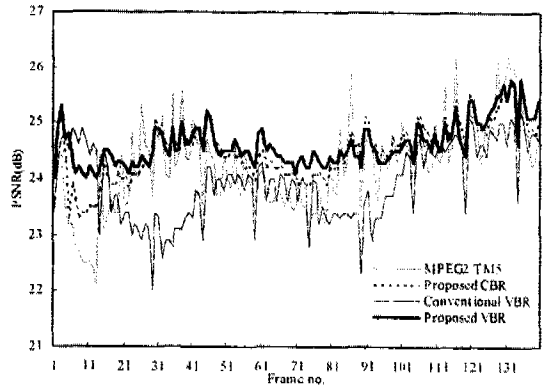
그림 5. "Table Tennis" 영상에 대한 VBR 비트율 제어 실험 결과
 (a) PSNR, (b) 부호화기 비트율, (c) 부호화기 버퍼 점유율, (d) 복호화기 버퍼 점유율,
 (e) 리키 버킷 점유율, (f) 양자화기, (g) 채널 전송율

용하지 못하며, I, P, B 프레임 각각에 대한 독립적인 양자화기 선택으로 인한 양자화기의 불연속(그림 5(f))으로 인해 I, P, B 프레임사이에서 PSNR의 심한 변동을 유발한다. 반면에 제안한 부호화기 비트율 제어 기법을 이용한 방법에서는 1 GOP 동안 I, P, B 프레임의 왜곡과 비트율을 동시에 고려하므로 프레임 사이의 연속적인 화질을 얻을 수 있다. 또 미리 1 GOP동안의 버퍼 상태를 점검하므로 버퍼의 크기를 충분히 이용하면서 동시에 버퍼 위반을 방지한다.

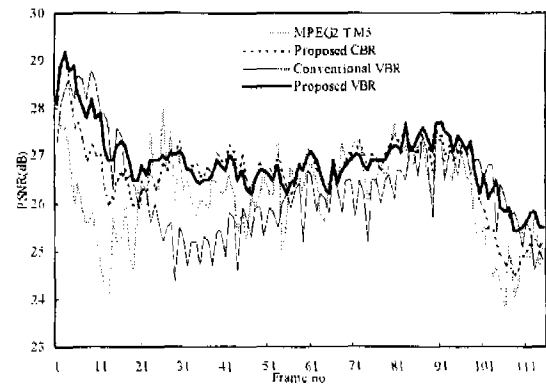
제안한 VBR 비트율 제어 기법은 앞에서 언급한 부호화기 비트율 제어의 장점을 그대로 수용하면서 트래픽의 특성에 따라 가변적인 채널 할당을 수행하므로 급격한 화질 변화를 나타내지 않는다. 즉 CBR 비트율 제어에서의 고정 채널 전송률의 제한을 벗어나 리키 버킷의 크기만큼 유연성을 가지게 되므로 부호화기 버퍼를 충분히 이용할 수 있게 된다(그림 5(c)). 그러므로 그림 5(a)에서와 같이 CBR 비트율 제어 기법들에 비해 급격한 화질 저하 현상을 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다. 기존의 VBR 비트율 제어 기법[3]은 인접 프레임간에서는 급격한 화질 저하는 나타내지 않는 반면에 단지 버퍼의 상태를 이용해서 양자화기를 선택하므로 주기적인 화질의 변동이 나타나게 된다. 하지만 장면 전환을 고려하지 않은 경우에는 CBR 채널과 VBR 채널 모두에서 화질 저하를 나타내었다. 기존의 [3]의 방법의 경우는 영상이 서서히 변한다는 것을 전제로 하였기 때문에 장면 전환에서는 버퍼 위반이 발생한다. 제안한 장면 적응적 방법에서는 기존의 방법과는 달리 장면 전환에서의 움직임 예측 방법의 변화를, 버퍼 상태와 비디오 트래픽의 특성과 함께 고려하여 최적화 기법을 사용하므로 버퍼 위반을 방지함과 동시에 화질저하를 어느 정도는 막을 수 있었다. 그러나 비트율-왜곡 모델의 추정자들은 장면 전환이 일어난 프레임에서는 구할 수 없으며, 실제 장면 전환은 앞 절에서 가정한 것과는 달리, 전혀 상관 관계가 없는 장면으로의 전환이 발생하지 경우도 많으므로 오차가 발생할 수 있다. 하지만 화질 저하를 막는 동시에 어느 정도의 비트율 예측은 가능하므로 버퍼와 네트워크의 제한 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 그림 6에서는 다른 영상들에 각 비트율 제어 기법들을 적용한 결과를 그림 7에서는 장면 전환 프레임의 복호화 영상을 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 다른 영상에서의 VBR 비트율 제어
 (a) "Football" 영상
 (b) "Mobile & Calendar" 영상
 (c) "Flower Garden" 영상

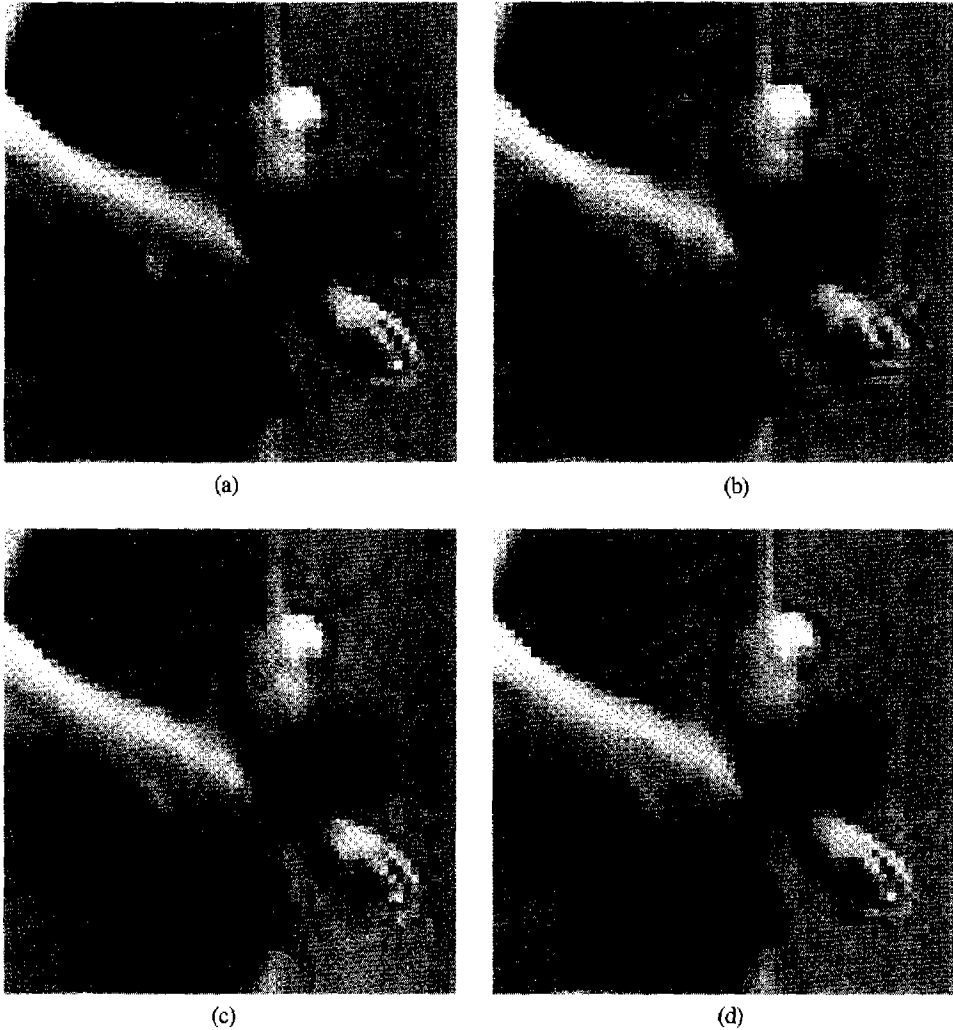


그림 7. 장면 전환 프레임의 복호화 결과("Table Tennis" 70번째 영상의 일부)
 (a) 원영상, (b) MPEG-2 TM5(29.2dB), (c) 기존의 방법(30.9dB), (d) 제안한 방법(34.5dB)

VI. 결론

본 논문에서는 ATM 네트워크에서 VBR 비디오의 실시간 전송을 위한 부호화기-채널 비트율의 결합 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 효율적인 VBR 비트율 제어를 위해 단기간에서의 비트율 제어를 위한 부호화기-비트율 제어 기법과 장기간에서의 가변적인 채널 할당을 위한 채널 전송률 제어 기법으로 나누어 지며, 부호화기 비트율 제어 기법은 채널 전송률을 고정시킴으로써 CBR 채널에도 적용이 가능하다. 본 논문에서 제안된 방법은 기존에 제안된 최적 비트율 제어 기법에 비해 낮은 복

잡도를 가지며, 실시간 전송 시스템으로 구현이 가능하다. 또 실시간 시스템으로 제안된 기존의 방법에 대해서도 영상의 통계적인 특성과 버퍼의 제한 조건, 그리고 장면 전환을 동시에 고려함으로써 좋은 성능을 나타낸다. 그러므로, 제안한 방법은 ATM 네트워크를 기반으로 하는 B-ISDN에서의 실시간 멀티미디어 통신 시스템에 적합하다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] W. Verbiest, L. Pinnoo, and B. Voeten, "The

