

부호화 정보에 기반한 라이브 비디오의 전송률 결정

이 명 진[†]

요 약

본 논문에서는 동적 대역 할당이 가능한 네트워크에서 라이브 비디오의 고품질 전송을 위한 예방형 전송률 결정 방식을 제안한다. 부호기 앞단의 화면 분석기에서 입력 화면의 분산과 장면전환 정도로부터 향후 화면의 비트율을 예측하고, 부호기와 복호기 버퍼의 제약조건에 의한 전송률 범위를 구한다. 이를 토대로 빈번한 전송률 재협상에 따른 비용 증가 문제를 해결하기 위해 최근 재협상 시점으로부터 경과 시간, 비디오 수신 품질 등을 고려한 예방형 전송률 결정 방식을 제안한다. 모의실험을 통해 제안 방식은 정규화된 Least Mean Square 기반 전송률 결정 방식과 비교되었고, 적은 재협상 비용으로도 지연 위반 화면 없이 높은 채널 이용률 달성이 가능함을 보였다.

Transmission Rate Decision of Live Video Based on Coding Information

Myeong-jin Lee[†]

ABSTRACT

In this paper, a preventive transmission rate decision algorithm, called PTRD, is proposed for the transmission of live video over networks with dynamic bandwidth allocation capability. Frame analyzer predicts the bit-rates of future frames before encoding by analyzing the source information such as spatial variances and the degree of scene changes. By using the predicted bit-rates, transmission rate bounds are derived from the constraints of encoder and decoder buffers. To resolve the problem of renegotiation cost increment due to frequent renegotiations, the PTRD algorithm is presented to decide transmission rates considering the elapsed time after the recent renegotiation and the perceived video quality. From the simulation results, compared to the normalized LMS based method, PTRD is shown to achieve high channel utilization with low renegotiation cost and no delay violation.

Key words: Video Traffic Prediction(비디오 트래픽 예측), Rate-Distortion(비트-왜곡 관계), RCBR, Traffic Renegotiation(트래픽 재협상), Traffic Smoothing(트래픽 평활화)

1. 서 론

비디오 전송을 위한 동적 대역 할당에 대한 기존

의 연구는 주로 전송률 재협상을 위한 라이브 비디오의 트래픽 예측과 평활화 알고리즘에 초점이 맞추어져 왔다. 비디오 트래픽 예측에 대한 연구는 적응 선형 예측기를 이용하여 과거 화면의 비트율로부터 미래 화면의 비트율을 예측하고 그 결과를 동적 대역 할당에 응용하는 방법들이다[2,3]. Song[2]과 Adas[3]은 정적 대역 할당과 비교하여 동적 대역 할당 방식이 가변률 비디오 전송에 적합함을 보였다. 그러나, 장면전환이나 빠른 움직임과 같은 고주파 성분에

※ 교신저자(Corresponding Author): 이명진, 주소: 부산광역시 남구 대연 3동 110(608-736), 전화: 051)620-4777, FAX: 051)624-5980, E-mail: artistic@ks.ac.kr

접수일: 2005년 2월 4일, 완료일: 2005년 4월 25일

[†] 경성대학교 전기전자공학전공 전임강사

※ 본 연구는 2004학년도 경성대학교 공학기술연구소 학술지원연구비에 의하여 연구되었음.

의한 채널를 재협상 시점과 그 변동량을 적절하게 파악하지 못하였고, 그 결과 비디오 전송 시스템에서 화질과 직관되는 복호기 버퍼 고갈에 대해 대처하기 못했다.

비디오 전송을 위한 동적 대역 할당은 비디오 트래픽의 평활화를 근간으로 하는데, 트래픽 평활화에 대한 연구는 크게 저장형 비디오와 라이브 비디오로 양분되어 진행되어 왔다. 저장된 비디오 트래픽의 평활화는 전송 스케줄러가 모든 화면의 비트율 정보를 가지고 전송률 변경 시점과 그 크기를 최적으로 결정할 수 있다[4]. 그러나, 라이브 비디오의 평활화는 실시간으로 비디오를 부호화하고 전송해야 하기 때문에, 저장형 비디오에 비해 화면의 발생 비트율 정보가 제한적이고 지연 제약 조건이 엄격하다.

일반적으로 요구되는 중단간 지연이 작을수록 전송률 재협상 비용은 증가한다. 재협상 비용을 줄이기 위해서는 향후 발생 트래픽의 정확한 예측이 필수적이고, 그 정확도가 높을수록 저장형 비디오 전송 성능에 가까운 전송률 스케줄링이 가능하다. 기존의 온라인 평활화 방식들[5,8]은 재협상 비용을 줄이기 위해 비디오 트래픽 예측 기법들을 평활화에 적용하였다. 그러나, 과거 화면의 비트율을 예측에 이용하기 때문에 급격한 또는 점진적 장면전환에 따른 트래픽의 변화를 효과적으로 전송률 스케줄링에 반영할 수 없다.

본 논문에서는 동적 대역 할당이 가능한 네트워크에서 라이브 비디오의 고화질 전송을 위한 예방형 전송률 결정 방식을 제안한다. 본 논문은 원격강의나 영상전화와 같은 저지연의 대화형 비디오 응용을 대상으로 한다. 첫째, 입력 화면의 분석 정보를 토대로 비트-왜곡 관계에 기반한 비디오 트래픽 예측 방식을 제안한다. 둘째, 예측된 미래 화면의 비트율을 이용하여 부호기와 복호기 버퍼 제약 조건에 따른 전송률 범위를 구하고, 이를 토대로 예방형 전송률 결정 (PTRD: Preventive Transmission Rate Decision) 방식을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 입력 화면의 부호화 정보에 기반한 트래픽 예측 방식을 제안한다. 제 3절에서는 라이브 비디오 전송을 위한 예방형 전송률 결정 방식을 제안한다. 제 4절과 제 5절에서는 모의실험 결과를 제시하고, 결론을 맺는다.

2. 비디오 부호화 정보를 이용한 비디오 트래픽 예측

2.1 비디오 부호화 정보에 기반한 VBR 비디오 트래픽의 예측

일반적인 비디오의 부호화를 제어 방식들[11,12]은 비디오 정보원이 안정성향 과정이라는 가정을 토대로 설계되어 있기 때문에 장면전환이나 화면내 빠른 움직임 등에 적절하게 대처할 수 없다. 움직임 보상 기반 비디오 부호기에서는 장면전환이 발생하면 장면전환된 화면의 발생 비트율이 일반적인 움직임 보상된 화면의 비트율보다 매우 크고, 장면전환 전후의 비디오 트래픽의 통계적인 특성이 변화한다. 따라서, 고화질의 일정한 화질을 요구하는 응용에서는 변화된 트래픽의 통계적인 특성에 따라 새로운 전송률과 전송률 변경 시점을 결정하여 네트워크와 대역을 재협상하는 과정이 필요하다.

본 절에서는 부호기 입력단의 화면 분석기에서 획득한 정보를 이용한 발생 비트율 예측을 위해 다음과 같은 비디오의 지수적 비트-왜곡(ERD: Exponential Rate-Distortion) 특성을 이용한다.

$$D = \beta \sigma^2 \alpha^{-R}, \quad \alpha > 1 \quad (1)$$

여기에서 β 는 화면의 부호화 유형에 따른 상수이고, σ^2 은 비디오 정보원의 분산이다. D , R , α 는 각각 왜곡, 픽셀당 비트율, 비트-왜곡에 관련된 상수를 나타낸다.

현재 입력된 화면을 부호화하기 전에 부호기는 화면을 분석하고, ERD 관계를 이용하여 발생 비트율을 예측한다. 본 논문에서는 저지연 응용을 목표로 MPEG 비디오의 I-와 P-화면만을 고려하였다. 또한, I-화면과 P-화면은 화면내 다른 용장도(redundancy) 때문에 비트-왜곡 특성이 다르므로, 화면 유형별로 비트율을 예측하였다. 각 비디오 화면의 왜곡이 일정하다고 가정하면 현재 화면의 발생 비트율 R_2 는 (2)와 같이 최근 부호화된 동일한 유형의 화면 비트율 R_1 으로부터 예측된다.

$$R_2 = R_1 + \log_{\alpha} \left(\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \right) \quad (2)$$

여기에서 σ_1^2 과 σ_2^2 는 최근에 부호화된 그리고 현재 부호화될 동일한 유형의 화면들의 분산을 각각 나타

낸다. (2)는 현재 화면의 분산이 이전 화면의 분산과 비슷할 때 발생 비트율 역시 이전 화면의 비트율과 비슷함을 의미한다. 또한, 화면의 복잡도 증가에 따라 현재 화면의 분산이 이전 화면의 분산보다 큰 경우 비트율은 증가한다.

P-화면에서 발생한 장면전환은 화면내 인트라로 부호화되는 매크로블럭의 개수에 의해 검출 가능하다. 매크로블럭 유형은 매크로블럭당 인트라 신호와 움직임 보상 후 화면간 차신호의 분산을 비교함으로써 결정 가능하며, 이를 이용하여 부호화 전에 인트라로 부호화되는 매크로블럭의 수를 예측할 수 있다. 장면전환된 P-화면은 대부분의 매크로블럭들이 인트라로 부호화되기 때문에, 비트율 예측을 위해 I-화면의 ERD 관계를 사용하였다. I-화면에서의 장면전환은 급격한 트래픽의 변화를 유발하지는 않으며, (2)를 이용하여 변화된 발생 비트율을 예측할 수 있다.

입력 비디오의 특성이 변화함에 따라 미래 화면들에 대한 예측 비트율은 과거의 발생 비트율과 현재 입력된 화면에 대한 분석 결과를 토대로 갱신된다.

$$(e_I, e_P) = \begin{cases} (\hat{e}(n), e_P), & \text{if } PT(n) = I \text{ or } f_{SC} = 1 \\ (e_I, \hat{e}(n)), & \text{if } PT(n) = P \text{ and } f_{SC} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(3)에서 e_I 와 e_P 는 I-와 P-화면에 대한 기준 비트율을 나타낸다. $PT(n)$, $\hat{e}(n)$, f_{SC} 는 화면 유형, (2)에 의해 예측된 비트율, n 번째 화면의 장면전환 여부를 나타내는 변수이다. 실시간 비디오 전송을 위한 대역폭 재협상은 부호화전에 예측된 비트율을 토대로 수

행된다. 입력 화면을 부호화한 후, e_I 와 e_P 는 (3)을 이용하여 다시 갱신되는데 이때 $\hat{e}(n)$ 는 실제 부호화된 비트율 $e(n)$ 으로 대체된다.

2.2 ERD 모델을 이용한 비디오 트래픽의 예측 성능

제안된 비디오 트래픽 예측 방식의 성능을 평가하기 위해, SIF 형식의 두 비디오 시퀀스 “Multi”와 “Bear”에 대해 모의실험을 수행하였다. “Multi”는 6개의 MPEG-1 테스트 시퀀스들로 구성된 900 프레임 길이의 시퀀스이고, “Bear”는 National Geographic 비디오 시리즈에서 획득한 1200 프레임 길이의 시퀀스이다. 모의실험을 위해 MPEG Simulation Group에서 배포한 MPEG-2 코덱이 사용되었다. 제안된 비트율 예측 기법의 성능 비교를 위해 정규화된 Least Mean Square(NLMS: Normalized LMS)[3]에 기반한 예측 방식을 사용하였다. NLMS 기법은 필터 탭이 20보다 작은 조건하에서 최상의 예측 성능을 갖는 필터 계수를 사용하였다.

그림 1은 “Multi” 시퀀스에 대해 화면 단위의 트래픽 예측 결과를 나타낸다. 장면전환이나 빠른 움직임 등이 발생하지 않는 비디오의 통계적 특성이 안정화된 구간에서는 제안방식이나 NLMS 기반 예측 방식 모두 동일한 예측 성능을 보인다. “Multi” 시퀀스에는 219번째와 249번째 화면에 장면전환이 발생하는데, NLMS 방식은 장면전환 이후 비트율 예측이 지연되어 나타남을 알 수 있다. 제안 방식은 장면전환된 화면에 대해서도 지연된 예측 없이 상당히 정확한 예측 성능을 보인다. NLMS 방식의 지연된 비트율

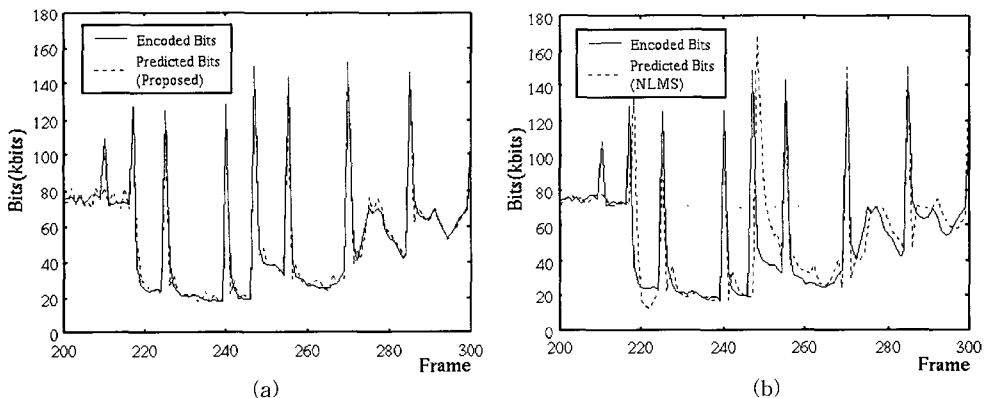


그림 1. 화면 단위의 비디오 트래픽 예측 성능, $Q=14, \alpha=32$: (a) 입력 화면의 정보를 이용한 예측, (b) NLMS 필터를 이용한 예측.

예측은 부호기 버퍼 레벨의 급격한 증감을 초래할 수 있는데, 이는 이후 화면들의 종단간 전송 지연을 과도하게 증가시키거나 낮은 채널 사용률을 유발시킨다.

그림 2는 양자화 계수와 화면 부호화 유형에 따른 ERD 기반 트래픽 예측 성능을 NLMS 방식과 비교한 결과이다. 성능지표로서 $\sum_n (\hat{e}(n) - e(n))^2 / \sum_n e(n)^2$ 의 잡음대신호비(1/SNR)가 사용되었다. 여기에서 $\hat{e}(n)$ 과 $e(n)$ 은 부호화시 예측된 비트율과 실제 발생 비트율을 나타낸다. 잡음대신호비는 동일한 양자화 계수로 전체 비디오 시퀀스를 부호화한 후 각 부호화 유형별로 계산되었다. NLMS 방식과 비교시 제안된 ERD 기반 트래픽 예측 방식은 모든 양자화 계수들과 부호화 유형들에 대해서도 비트율 예측 성능이 우수함을 알 수 있다.

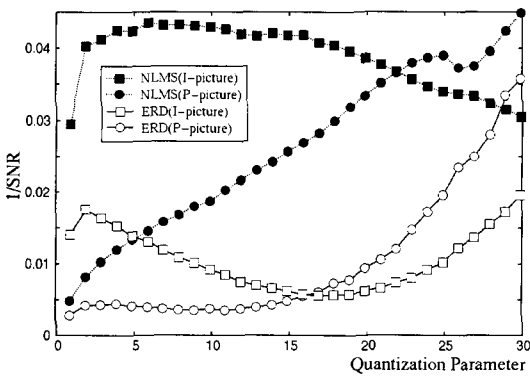


그림 2. 화면 유형과 양자화 계수에 따른 화면 단위 트래픽 예측 성능 비교. "Multi" 시퀀스. $\alpha = 32$

3. 실시간 비디오의 예방형 전송률 결정 방식

본 절에서는 실시간 비디오 전송 시스템에서 전송률 조건을 유도하고, 재협상 기반 항등률(RCBR: Renegotiated Constant Bit Rate)[1] 서비스를 위한 예방형 전송률 결정 방식을 제안한다.

3.1 실시간 비디오 전송을 위한 전송률 제약

비손실형 비디오 전송 시스템에서 부호기와 복호기 버퍼는 넘침이나 고갈 상태에 있지 않도록 부호화율이나 전송률의 제어가 필요하다[9,10]. 부호기와 복호기 버퍼의 넘침은 충분히 큰 버퍼를 사용함으로써 일반적인 비디오 입력원에 대해서는 방지가 가능

하다. 또한, 부호기 버퍼 고갈은 채널 이용율의 저하 문제를 제외하고는 비디오 시스템의 동작에 영향을 주지 않는다. 그러나, 복호기 버퍼 고갈은 정해진 복호 시점에 해당 비디오 데이터가 수신되지 않았을 때 발생하고, 연속적인 복호화 과정을 중단시켜 수신 품질이 저하된다. 따라서, 복호기 고갈은 부호화를 제어나 새로운 전송률의 재협상을 통해 예방되어야 한다.

그림 3의 시스템에서 n 번째 화면 입력시점에서 부호기 버퍼 레벨은 다음과 같다.

$$B^e(n) = B^e(n-1) + e(n) - r(n) \tag{4}$$

여기서 $e(n)$ 과 $r(n)$ 은 각각 부호기 출력 비트율과 유효 전송률을 나타낸다¹⁾. 복호기 버퍼 레벨은 다음과 같이 주어진다.

$$B^d(n) = \begin{cases} \sum_{j=1}^n r(j) - \sum_{j=1}^{n-D} e(j), & \text{if } n \geq D \\ \sum_{j=1}^n r(j), & \text{if } n < D \end{cases} \tag{5}$$

여기서 D 는 비디오 전송 시스템에서 종단간 지연을 나타낸다.

전송률이 $(n+1)$ 번째 화면 입력시점에서 새로운 값 R_k 으로 변경되고, 부호기나 복호기 버퍼의 넘침이나 고갈이 발생하지 않는다고 가정하면²⁾, k 화면 구간 동안 전송률 누적량 kR_k 은 다음과 같은 조건의 제약을 받게 된다.

$$L(n, k) \leq kR_k \leq U(n, k) \tag{6}$$

여기서 $L(n, k)$ 와 $U(n, k)$ 는 누적 전송률의 하한과 상한을 나타내고, (7)과 (8)과 같이 계산된다.

$$L(n, k) = \max \left(B^e(n) + \sum_{i=n+1}^{n+k} e(i) - B^e, \sum_{i=1}^{n-D+k} e(i) - \sum_{i=1}^n r(i) \right) \tag{7}$$

$$U(n, k) = \max \left(B^e(n) + \sum_{i=n+1}^{n+k} e(i), \sum_{i=1}^{n-D+k} e(i) - \sum_{i=1}^n r(i) + B^d \right) \tag{8}$$

1) 전송률이 R 로 정해지면 유효 전송률은 $r(n) = \min \{ B^e(n-1) + e(n), R \}$ 로 주어진다.

2) 부호기와 복호기 버퍼 제약 조건은 각 버퍼 크기가 B^e 와 B^d 로 주어질 때 다음과 같다. $0 \leq B^e(n) \leq B^e$, $0 \leq B^d(n) \leq B^d, \forall n$.

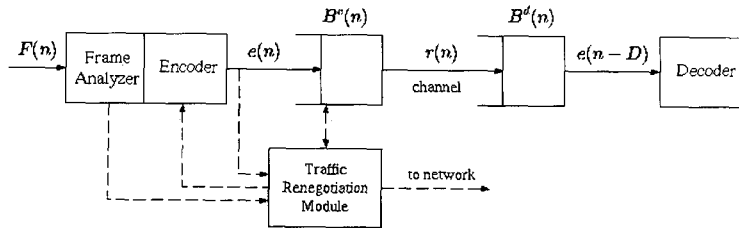


그림 3. 입력 화면의 분석에 기반한 동적인 대역 할당 요청

그림 4는 $(n+1)$ 번째 화면으로부터 k 화면 구간 동안 누적된 전송률의 제약 조건을 나타낸다. 누적 전송률의 상한과 하한선인 CU 와 CL 은 부호기가 전송하고 복호기가 사용한 누적 데이터량을 각각 나타낸다. 이 한계치들은 부호기와 복호기 버퍼 넘침시 손실 데이터는 포함하지 않으며, 전송률은 버퍼 넘침에 의한 데이터 손실이 발생하지 않도록 결정되어야 한다. 하한선인 $CL(n)$ 과 상한선인 $CU(n)$ 은 각각 $CL(n) = L(0, n)$ 과 $CU(n) = U(0, n)$ 으로 나타낼 수 있다.

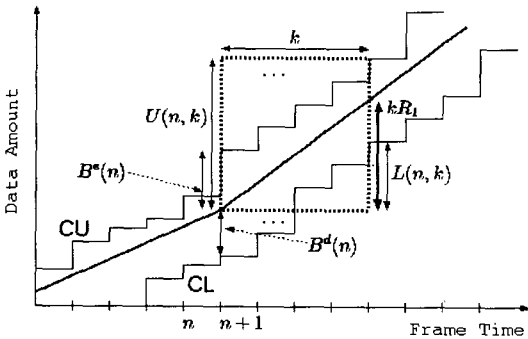


그림 4. 실시간 비디오 전송을 위한 전송률 결정

3.2 라이브 비디오 전송을 위한 예방형 전송률 결정 방식

실시간 비디오 전송시 미래 화면의 비트율이 알려지지 않았기 때문에 저장된 비디오의 전송과 같이 전송률을 최적으로 결정할 수 없다. 제 2절에서 제안된 비트율 예측 방법은 기존의 선형 필터를 이용한 방식들에 비해서는 예측 효율이 높으나 미래의 비트율을 정확히 예측하기는 어렵다. 따라서, 전송률 스케줄러는 발생 비트율을 계속 관찰하고, 부호기 버퍼 넘침이나 복호기 버퍼 고갈과 같은 위급 상황을 미리 예측하여 대처해야 한다.

PTRD는 다음과 같은 두 개의 알고리즘으로 구성된다. 첫째는 제 2절에서와 같이 화면 분석을 통해

미래의 미리보기 화면들에 대한 비트율을 예측하고, 갱신하는 알고리즘이다. 장면전환시 발생할 수 있는 큰 비트율 예측 오류는 전송률의 빈번한 변경이나 급격한 변경을 요구한다. 따라서, 장면전환 검출과 전환된 화면에 대한 정확한 비트율 예측은 매우 중요하다. 둘째는 전송률과 전송률 변경 시점을 결정하는 알고리즘이다. 미리보기 화면들에 대해 예측된 비트율과 (6)의 전송률 제약 조건을 이용하여 전송 스케줄러는 계속 버퍼 위급 상황의 발생 가능성을 관찰한다. 버퍼 위급 상황이 예상되면, 스케줄러는 입력 트래픽 특성의 변화와 위급의 유형에 따라 새로운 전송률을 계산한다.

3.2.1 미리보기 화면들에 대한 비트율 예측

실시간 비디오 전송시 전송 스케줄러는 일반적으로 비트율에 대한 정보가 제한적이고, 종단간 지연의 엄격한 제약을 받는다. 전송률 결정을 위해서 스케줄러는 압축된 비디오 데이터를 일정 시간이상 버퍼링하거나, 충분한 미리보기 구간을 정한 후 과거 비트율 정보로부터 해당 구간의 비트율을 예측하는 방법을 사용한다[5-8]. 그러나, 미리보기 구간의 예측 비트율은 과거의 비트율 정보만을 사용하기 때문에 현재 입력 화면의 장면전환 및 비트율 변화 정도를 예측할 수 없다[8]. 이와 같은 이유로 전송률의 빈번한 변경이 발생할 가능성이 높아지며, 네트워크와의 대역 재협상 비용을 증가시킨다.

제안된 PTRD 방식에서는 $U(n, k)$ 와 $L(n, k)$ 를 (3)과 같이 각 화면 유형에 따라 예측된 비트율을 이용하여 계산하고, 예측된 값을 $\hat{U}(n, k)$ 와 $\hat{L}(n, k)$ 로 표기한다.

3.2.2 예방형 전송률 결정을 위한 변수 정의

제안된 PTRD 방식을 위해 그림 5에서 나타낸 것과 같이 다음 변수들을 정의한다.

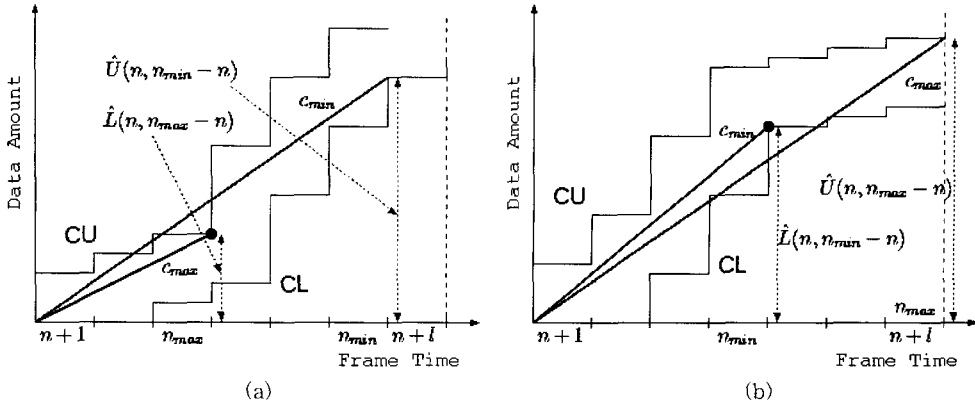


그림 5. PTRD 알고리즘의 새로운 전송률 결정을 위한 변수: (a) 전송률 증가의 경우, (b) 전송률 감소의 경우.

- c_{max} : 화면 구간 $[n, n+l]$ 동안 복호기 버퍼 넘침이나 부호기 버퍼 고갈 없이 전송할 수 있는 최대 전송률

$$c_{max} = \min_{1 \leq k \leq l} \frac{\hat{U}(n, k)}{k} \quad (9)$$

- n_{max} : 화면 구간 $[n, n+l]$ 동안 c_{max} 로 전송시 복호기 버퍼가 가득 차거나, 부호기 버퍼가 비어있는 최초의 시점

$$n_{max} = n + \max_{1 \leq k \leq l} \left(k : \frac{\hat{U}(n, k)}{k} = c_{max} \right) \quad (10)$$

- c_{min} : 화면 구간 $[n, n+l]$ 동안 복호기 버퍼 고갈이나 부호기 버퍼 넘침 없이 전송할 수 있는 최소 전송률

$$c_{min} = \max_{1 \leq k \leq l} \frac{\hat{L}(n, k)}{k} \quad (11)$$

- n_{min} : 화면 구간 $[n, n+l]$ 동안 c_{min} 로 전송시 복호기 버퍼가 비어있거나, 부호기 버퍼가 가득 찬 최초의 시점

$$n_{min} = n + \max_{1 \leq k \leq l} \left(k : \frac{\hat{L}(n, k)}{k} = c_{min} \right) \quad (12)$$

- f_{LB} : 화면별 기준 비트율 e_r 와 e_p , 현재 전송률 r_0 를 기준으로 화면 구간 $[n, n+l]$ 에서 복호기 버퍼 고갈이나 부호기 버퍼 넘침이 예상될 때 설정되는 플래그

$$f_{LB} = \begin{cases} 1, & \exists k \in [n+1, n+l] \text{ s.t. } \frac{\hat{L}(n, k)}{k} > r_0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

장면전환이나 화면의 복잡도 변화에 따라 화면별 기준 비트율이 변화하므로, 전송률을 결정하기 위해서는 누적 전송률의 상한과 하한의 변화를 지속적으로 관찰해야 한다. 계수 l 은 미래의 버퍼 위급 상황을 관찰하기 위한 화면구간의 범위를 나타낸다. 계수 l 의 크기는 계산량과 정확한 전송률 변경 시점을 고려하여 결정되어야 하는데, l 값이 클수록 계산량은 증가하나 전송률 변경 시점은 보다 정확하게 결정될 수 있다.

3.2.3 예방형 전송률 결정

라이브 비디오의 전송을 위해 PTRD 알고리즘은 그림 6의 다섯 경우에 대한 스케줄러의 동작을 정의한다. 그림 7은 PTRD의 구현을 위한 의사코드(pseudo-code)이며, 표 1에 따라 표기하였다. 설정된 미리보기 구간 L 동안(그림 7의 5~18행) 스케줄러는 c_{max} , c_{min} , n_{max} , n_{min} 값들을 계산하여 갱신한다(6~8행). 그림 6(a)는 부호기와 복호기 버퍼의 고갈이나 넘침이 예상되지 않는 경우에 대한 전송률 변경을 나타낸다. 이 경우 저장형 비디오 스트리밍에서 최적인 Salehi[4]가 제시한 전송률 변경 조건이 사용된다(9~12행).

그림 6(b)와 6(c)는 복호기 버퍼 고갈이나 부호기 버퍼 넘침이 임박한 경우 스케줄러가 전송률을 증가시키는 경우를 나타낸다. 그림 6(b)는 비디오 트래픽이 증가하는 경우이고(9~12행), 그림 6(c)는 일정한 트래픽 레벨에서 현재 전송률이 낮게 설정된 경우를 나타낸다(13~14행).

그림 6(d)와 6(e)는 부호기 버퍼 고갈이나 복호기

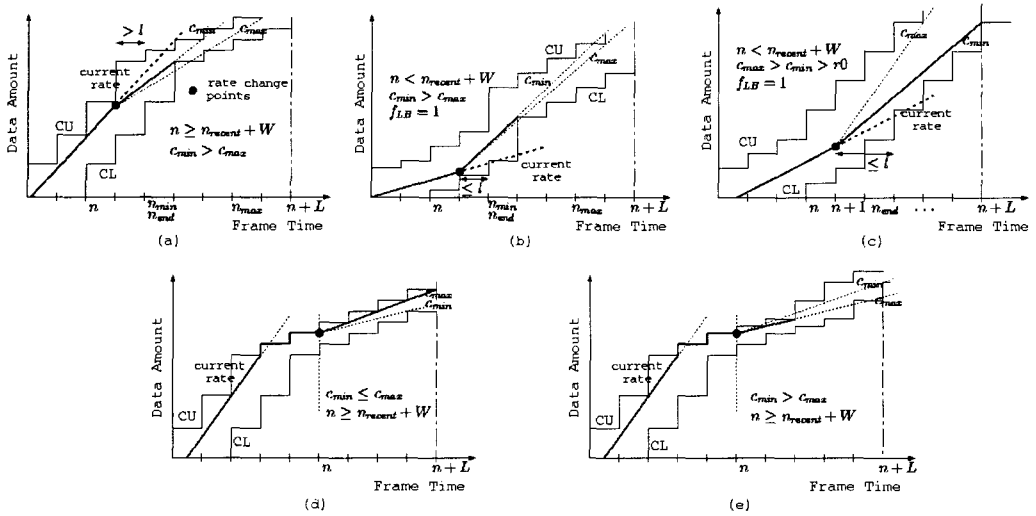


그림 6. 새로운 전송률 결정을 위해 고려된 경우들: (a) 일반적인 경우, (b) 복호기 버퍼 고갈이 임박한 경우(비디오 트래픽 레벨 증가시), (c) 복호기 버퍼 고갈이 임박한 경우(비디오 트래픽 레벨 일정), (d) 부호기 버퍼 고갈(case I), (e) 부호기 버퍼 고갈(case II).

```

1 INPUT ( $B^c(n), \hat{e}(n+1), e_p, e_r, f_{SC}$ )
2 Calculate  $f_{LB}$  over  $[n+1, n+1]$ 
3 IF  $f_{LB} = 1$  or  $n - n_{recent} \geq W$ 
4    $c_{max} = \infty, c_{min} = 0, k = 0$ 
5   WHILE  $k \leq L$ 
6      $k = k + 1$ 
7     Compute  $\hat{U}(n, k), \hat{L}(n, k)$ 
8     Update  $c_{max}, c_{min}, n_{max}, n_{min}$  over  $[n, n+k]$ 
9     IF  $c_{min} > c_{max}$ 
10      IF  $n_{min} < n_{max}$ 
11         $r_0 = c_{min}$ 
12        BREAK
13      ELSE IF  $n_{min} \geq n_{max}$ 
14         $r_0 = c_{max}$ 
15        BREAK
16      END IF
17    ELSE IF  $c_{min} > r_0$  and  $k = L$ 
18       $r_0 = c_{min}$ 
19      BREAK
20    ELSE IF  $c_{max} > c_{min}$  and  $k = L$ 
21       $r_0 = c_{max}$ 
22      BREAK
23    END IF
24  END WHILE
25 END IF
26 Update  $n_{recent}$ 
    
```

그림 7. 예방형 전송률 결정 알고리즘: PTRD

표 1. 실시간 비디오의 온라인 평활화를 위해 사용된 변수

f_{SC}	장면전환 플래그
f_{LB}	복호기 버퍼 고갈 또는 부호기 버퍼 넘침 플래그
$\hat{e}(n)$	n 번째 화면의 예측 비트율
W	기준 재협상 구간
n_{recent}	최근의 재협상 시점
L	미리보기 구간
r_0	채널률
l	버퍼 위급 상황의 관찰을 위한 화면 구간

버퍼 넘침이 임박한 경우에 해당한다(15~17행, 11행). 복호기 버퍼 크기는 중단간 지연을 고려하여 넘침이 발생하지 않도록 충분히 크게 설정할 수 있고, 부호기 버퍼 고갈은 채널 이용률의 일시적 저하 외에는 비디오 전송 시스템의 연속 동작에는 영향을 주지 않는다. 이 두 경우에 대해 PTRD는 최근의 전송률 변경 시점(n_{recent})으로부터 충분한 시간(W)이 경과했을 때만 전송률을 변경한다. 이는 비록 채널 이용률은 저하되더라도 짧은 전송률 재협상 구간을 허용하지 않으므로써 네트워크와의 전송률 재협상 비용을 줄이기 위함이다.

입력 화면들의 통계적 특성이 시간에 따라 변화하므로, 전송 스케줄러는 모든 입력 화면들에 대해 비트율을 예측하고, 화면별 기준 비트율을 갱신한 후 PTRD를 실행한다. 그러나, PTRD에서 새로운 전송

를 결정하는 부분은 f_{LB} 플래그가 설정되거나 최근의 전송률 재협상 이후 충분한 시간(W)이 경과한 다음에만 수행된다(3행). 이들을 통해 PTRD는 비트율 예측 오류에 의해 현재 전송률이 실제 필요량보다 작게 설정되었을 때 발생할 수 있는 복호기 버퍼 고갈 문제를 해결할 수 있다.

온라인 비디오 트래픽 스케줄링에서 미래 화면의 비트율은 장면전환 이후에는 예측이 불가능하기 때문에, 전송률 결정시 장면 길이보다 멀리 떨어져 있는 미래 화면들을 미리보기로 참조할 필요는 없다. 따라서, 비디오의 변화된 통계적 특성을 반영하고 스케줄링을 위한 계산량을 줄이기 위해, PTRD는 전송률 재협상 시점을 최근 전송률 재협상 시점으로부터 W 까지로 제한하고, 미리보기 구간도 현재 화면으로부터 L 까지로 제한한다. 전송률 재협상의 기준치인 W 가 증가할수록 채널 이용률은 감소하고 평균 재협상 기간은 증가한다. 따라서, 네트워크에서 허용하는 최소의 재협상 기간과 네트워크 자원의 가용성을 고려하여 채널 이용률, 스케줄링을 위한 계산량, 평균 재협상 기간과 같은 변수들 간의 적절한 조정이 필요하다.

4. 모의실험 결과

본 절에서는 모의실험을 통해 라이브 비디오에 대한 PTRD의 전송률 결정 성능을 평가한다. 실험용 비디오 시퀀스로는 영화 타이타닉, CNN 뉴스, 시트콤으로부터 SIF 형식으로 획득한 Tita, CNN, Soon을 사용하였고, 모든 화면들의 부호화시 동일한 양자화 계수를 사용하였다. 본 논문에서는 라이브 비디오 전송시 전송률 재협상 기간의 분포를 성능 지표로 정하였기 때문에 전송률 재협상 요청은 항상 네트워크에 의해 수락된다고 가정하였다.

4.1 PTRD의 비디오 트래픽 평활화 성능

PTRD의 비디오 트래픽 평활화 성능 평가를 위해, PTRD는 저장 비디오 평활화시 최적인 MVS(Minimum Variance Smoothing)[4] 방식과 비교되었다.

그림 8은 MVS와 PTRD에 의해 평활화된 VBR 비디오 트래픽을 나타낸다. PTRD에 의해 평활화된 출력은 MVS에 의한 출력에 상당히 근접해 있음을 알 수 있다. 그림 9는 전송률 재협상 길이에 따른 누

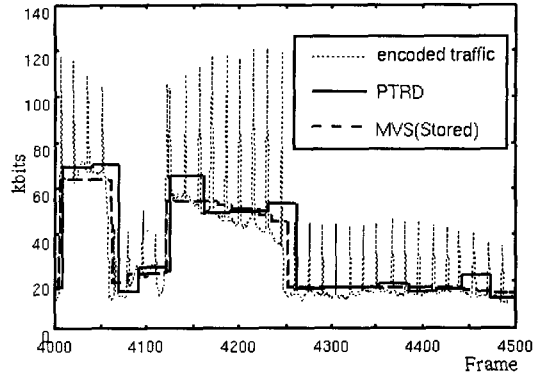


그림 8. PTRD와 MVS 방식에 의한 비디오 트래픽 평활화 Soon 시퀀스, $D=5, Q=20, L=100, W=30$

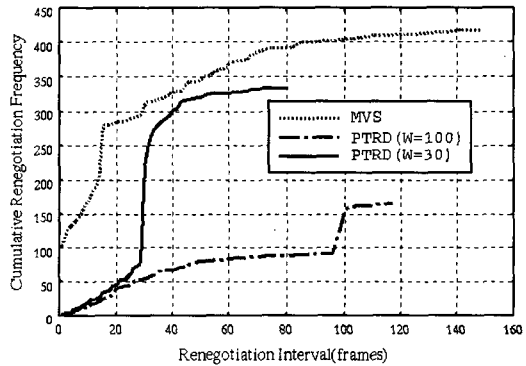


그림 9. PTRD와 MVS의 전송률 재협상 성능 비교 $D=5, Q=20, L=30$

적 재협상 횟수를 나타낸다. MVS는 PTRD와 비교 시 대부분의 전송률 재협상이 짧은 기간에 발생하고 있는데, 이는 MVS의 재협상 비용이 PTRD보다 크고, 전송률 재협상의 실패 가능성이 높음을 의미한다. 그림 9에서 전송률의 누적 재협상 횟수는 MVS, PTRD($W=30$), PTRD($W=100$)에 대해 각각 164, 334, 418이고, 채널 이용률은 각각에 대해 1.0000, 0.9763, 0.8738이다. 채널 이용률의 적은 감소에도 PTRD는 MVS보다 매우 적은 빈도로 전송률을 재협상하여 변경한다.

모의실험 결과로부터, PTRD의 비디오 트래픽 평활화 성능은 MVS의 성능에 근접하고 있으며, 작은 전송률 재협상 횟수를 가짐을 알 수 있다. 이는 PTRD가 미래 화면들에 대한 정보 없이도 현재 입력된 화면의 분석을 통하여 변화된 트래픽 레벨을 정확하게 예측하고, 적기에 새로운 전송률을 재협상할 수 있기 때문이다.

4.2 NLMS 기반 RCBR 서비스와의 비교

라이브 비디오의 실시간 전송시 PTRD의 성능은 NLMS 기반 RCBR 서비스[3] 성능과 비교되었다. 표 2는 전송률이 매 GOP 단위로 예측된 비트율에 기반하여 재협상되는 NLMS 기반 RCBR 서비스의 성능을 나타낸다. Adas[3]는 예측된 전송률을 채널 이용지수로 나눈 값을 전송률 재협상에 사용함으로써 장면 전환 등에 의한 급격한 부호기 버퍼 증가를 방지하려 하였다. NLMS 기반 전송률 재협상을 위해 두 가지 방법이 사용되었다. 첫째는 GOP 크기의 고정된 재협상 구간을 가지며, 둘째는 [3]과 같이 재협상 횟수를 줄이기 위해 가변의 재협상 구간을 갖는다. 본 절에서는 각 방법에 대해 각각 'fix'와 'var'로 표시한다. 가변 재협상 구간 방식인 'var'에서 새로운 전송률 결정을 위해 사용하는 비트율의 문턱치는 비디오의 특성에 따라 달라질 수 있기 때문에 모의실험 결과는 NLMS 기반 RCBR 방식의 최고 성능이 아닐 수 있으나, 'fix' 방식과 비교하였을 때의 일반적인 재협상 성능 변화 추세를 알아볼 수 있다. Adas는 각 비디오 화면에 대해 종단간 지연 제약을 고려하지 않았고, NLMS 필터는 제 2절의 결과와 같이 변화된 비디오 트래픽 레벨을 효과적으로 예측하기 어렵다. 따라서, 장면전환이나 비디오 트래픽 레벨이 증가하는 장면 구간에 대해 복호기 버퍼의 고갈을 방지할 수 있는 방법은 없다.

표 3은 PTRD와 NLMS 기반 RCBR 방식의 전송

표 2. NLMS 기반 RCBR의 성능 (W=15)

채널 이용지수	채널 이용률		복호기 고갈 횟수	
	Tita(fix)	Tita(var)	Tita(fix)	Tita(var)
0.5	0.4987	0.4814	0	0
0.6	0.5984	0.5777	0	0
0.7	0.6982	0.6740	8	0
0.8	0.7979	0.7702	22	5
0.9	0.8976	0.8665	240	149
0.95	0.9475	0.9147	1042	558

표 3. PTRD와 NLMS 기반 RCBR의 성능 비교

기준 재협상 구간	PTRD				NLMS 기반 RCBR			
	Tita		CNN		Tita		CNN	
	W=25	W=50	W=20	W=30	fix	var	fix	var
채널 사용률	0.942	0.914	0.952	0.896	0.948	0.915	0.941	0.857
복호기 고갈 횟수	0	0	0	0	1042	558	3147	1787
평균 재협상 구간	20.96	37.04	17.51	25.38	15.00	30.46	15.00	47.57

률 재협상 성능을 비교한 표이다. 공정한 비교를 위해 PTRD의 기준 재협상 구간 계수(W)를 가변시키면서 각 방식에 대해 동일한 채널 이용률 레벨에 대한 성능 데이터를 선정하였다. PTRD 방식은 NLMS 기반 방식에 비해 복호기 버퍼 고갈이 발생하지 않았고, 평균 재협상 시간도 일반적으로 크게 나타났다. NLMS 기반 방식은 높은 채널 이용률 설정에서 매우 많은 복호기 버퍼 고갈이 발생하였는데 이는 수신단에서 연속적인 복호와 화면 표시가 불가능함을 의미한다.

그림 10은 PTRD와 NLMS 기반 RCBR 방식의 종단간 지연을 비교한 결과이다. NLMS 방식은 종단간 지연 제약을 고려하지 않고, 부호기 버퍼 레벨을 감소시키는 방향으로 전송률을 재협상한다. 또한, 2.2절에서와 같이 NLMS 방식은 발생 비트율을 뒤늦게 예측하고 그 예측값이 정확하지 않기 때문에 장면 전환이나 화면내 빠른 움직임 등이 발생하는 경우 급격히 증가된 발생 트래픽은 종단간 지연 제약 내에 수신단으로 전송되지 못한다. 따라서, NLMS 방식은 그림 10에서와 같이 창시간에 걸쳐 빈번한 화면들의 종단간 지연 제약 위반이 발생할 수 있다. 이와 비교하여 PTRD 방식은 예측된 미래의 비트율로부터 종단간 지연 제약을 고려하여 전송률 재협상을 하기

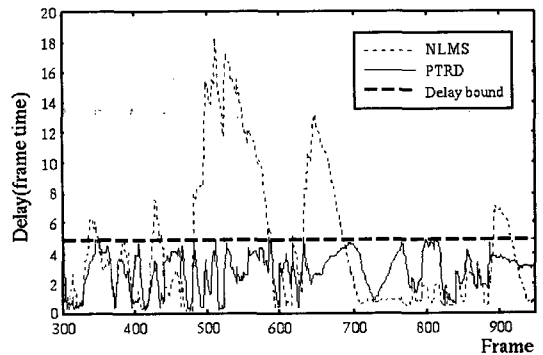


그림 10. 전송률 재협상 방식에 따른 라이브 비디오의 종단간 지연 비교 Bear 시퀀스, 채널이용지수=0.95, D=5, Q=20, W=30

때문에 지연 제약 위반 화면이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

모의실험 결과로부터 PTRD 방식은 NLMS 기반 방식에 비해 입력 화면의 분석을 통해 장면전환을 검출하고 변화된 트래픽 레벨을 효과적으로 예측함을 알 수 있고, 결과적으로 적은 재협상 비용으로도 종단간 지연 위반 없이 고품질의 라이브 비디오 전송을 실현할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서 라이브 비디오 전송을 위한 적응적 트래픽 재협상 방식을 제안하였다. 비디오의 지수적 비트-왜곡 관계에 기반한 비디오 트래픽 예측 방법이 제안되었다. 또한, 부호기와 복호기 버퍼 제약을 토대로 전송률의 상한과 하한 조건이 유도되었다. 전송률 제약 조건하에서 트래픽 예측 방법을 이용하여 예방형 전송률 결정 방식을 제안하였다. 모의 실험 결과로부터 제안된 전송률 결정 방식은 복호단에서 지연 위반된 화면 없이 높은 채널 이용 효율과 적정 수준의 평균 재협상 기간을 가짐을 알 수 있었다.

평균 재협상 기간은 제안 방식에서 수 GOP 시간으로 증가시킬 수 있으나, 여전히 짧은 기간의 재협상 요청이 존재하고, 네트워크의 상황에 따라 재협상의 실패의 가능성도 존재한다. 따라서, 실시간 비디오 전송을 위해서는 제안된 전송률 결정 방식과 기존의 채널 적응형 비디오 부호화 방식이 결합되어 사용되는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] M.Grossglauser, et al, "RCBR : A Simple and Efficient Service for Multiple Time-Scale Traffic," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 5, No. 6, pp. 741-755, 1997.
- [2] S.Chong, S.Li, and J.Ghosh, "Predictive Dynamic Bandwidth Allocation for Efficient Transport of Real-Time VBR Video over ATM," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 13, No. 1, pp. 12-23, Jan. 1995.
- [3] A.Adas, "Using Adaptive Linear Prediction to Support Real-Time VBR Video Under RCBR Network Service Model," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 6, No. 5, pp. 635-644, 1998.
- [4] J.Salehi, Z.Zhang, J.Kurose, and D.Towsley, "Supporting stored video: reducing rate variability and End-to-End Resource requirements through optimal smoothing," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 6, No. 4, pp. 397-410, Aug. 1998.
- [5] S.Sen, J.Rexford, J.Dey, J.Kurose, and D.Towsley, "Online smoothing of variable-bit-rate streaming video," *IEEE Trans. Multimedia*, Vol. 2, No. 1, pp. 37-48, Mar. 2000.
- [6] J.Rexford, S.Sen, J.Dey, W.Feng, J.Kurose, J.Stankovic, and D.Towsley, "Online smoothing of Live, Variable-Bit-Rate Video," *IEEE NOSSDAV*, pp. 235-243, 1997.
- [7] K.Joseph and D.Reininger, "Source Traffic Smoothing and ATM Network Interfaces for VBR MPEG Video Encoders," *IEEE ICC*, pp. 1761-1767, 1995.
- [8] S.S.Lam, S.Chow, and D.K.Y.Yau, "An algorithm for lossless smoothing of MPEG video," *ACM SIGCOMM*, Aug. 1994.
- [9] A.R.Reibman and B.G.Haskell, "Constraints on Variable Bit-Rate Video for ATM Networks," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Vol. 2, No. 4, pp. 361-372, 1992.
- [10] T.V.Lakshman, A.Ortega, and A.R.Reibman, "VBR Video: Tradeoffs and Potentials," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 5, pp. 952-973, May. 1998.
- [11] N.S.Jayant and P.Noll, *Digital Coding of Waveforms*, Prentice Hall, 1984.
- [12] J.Katto and M.Ohta, "Mathematical Analysis of MPEG Compression Capability and its Application to Rate Control," *IEEE ICIP*, pp. 555-558, 1995.



이 명 진

1990년 3월~1994년 2월 KAIST
전기및전자공학과 학사

1994년 3월~1996년 2월 KAIST
전기및전자공학과 석사

1996년 3월~2001년 8월 KAIST
전자전산학과 박사

2001년 3월~2004년 2월 삼성전
자 SYSTEM LSI 사업부 책임

2004년 3월~현재 경성대학교 전기전자공학전공 전임
강사

관심분야 : 영상 압축/신호처리, 멀티미디어 통신, 인터넷
QoS, SoC 설계