

높은 지연을 갖는 네트워크에서 효율적인 스트리밍 전송기법

(A Transmission Scheme for Efficient Streaming in Large-delay Networks)

이 선 현 * 정 광 수 **
(Sunhun Lee) (Kwangsue Chung)

요 약 현재의 표준 스트리밍 전송은 주로 UDP를 기반으로 동작하고 있으며, 혼잡 제어 메커니즘이 없는 UDP의 특성으로 인해 네트워크의 혼잡 상황을 심화시킬수 있다는 단점을 가진다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 1990년대 이후로 혼잡 제어 메커니즘을 적용한 스트리밍 전송기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 이러한 연구들은 네트워크 안정화만을 추구한 나머지 사용자 관점에서 스트리밍 응용 프로그램의 특성을 간과하는 문제점을 가진다. 또한 스트리밍 서비스에 큰 영향을 미치는 네트워크 지연에 대한 고려가 없다는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 기존 스트리밍 전송기법의 한계를 극복하기 위해서 사용자 관점의 요구사항과 네트워크 관점의 요구사항을 동시에 고려한 hybrid 형태의 BEST(Buffer-driven Efficient STreaming) 전송기법을 제안한다. 사용자 관점에서 버퍼상태나, 네트워크 관점에서 네트워크상태만을 고려하는 기존의 기법들에 비해서 제안하는 BEST는 두 관점의 요구사항을 동시에 고려하여 성능 개선을 시도하였다. 그러므로 BEST는 네트워크 상태에 적합하도록 전송률을 조절함으로써 네트워크의 안정성을 향상시킬뿐만 아니라, 수신단 버퍼의 underflow나 overflow를 효과적으로 예방하여 끊김없이 부드러운 재생을 제공한다. 또한 높은 지연을 가지는 네트워크 환경을 고려하여 설계하였다. 실험 결과를 통해서 제안한 BEST 전송기법이 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서 네트워크 관점과 사용자 관점의 요구사항을 모두 만족시킬수 있음을 확인할 수 있었다.

키워드 : 스트리밍 프로토콜, 전송률 조절, 혼잡 제어

Abstract The standard streaming delivery is mostly based on UDP with no end-to-end congestion control. For this reason, wide usage of multimedia applications in Internet might lead to congested networks. To avoid such a situation, studies on the congestion controlled streaming delivery has been increasingly done after the 1990s. However, by considering only the stability aspect of network, these works ignore the characteristics of multimedia streaming applications. Moreover, most of previous works have no consideration on the network delay which produces an effect on streaming service. In this thesis, in order to overcome limitations of the previous transmission schemes for streaming, we propose a new transmission scheme called "BEST(Buffer-driven Efficient STreaming)". The BEST takes a hybrid approach that considers both user-level requirements and network-level requirements. Therefore, the BEST improves the stability of networks by adjusting the sending rate suitable for network status and it also provides the smoothed playback by preventing buffer underflow or overflow. The BEST is designed to consider high-delay networks. Through the simulation, we prove that the BEST satisfies both user-level and network-level requirements in a high-delay network environments.

Key words : Streaming protocol, Rate control, Congestion control

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성, 지원사업과 유비쿼터스 컴퓨팅 프론티어 사업단의 지원에 의한 연구결과입니다.

† 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
sunlee@adams.kw.ac.kr

** 정 회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr
논문접수 : 2004년 11월 15일
심사완료 : 2005년 3월 22일

1. 서론

현재 인터넷에서의 주요 트래픽들은 전송 프로토콜로 대부분 TCP(Transmission Control Protocol)를 사용하고 있다. TCP는 종단간(end-to-end)의 신뢰적인 패킷 전달을 수행하며 혼잡 제어 메커니즘(congestion control mechanism)을 통해 송신단의 전송률을 직접 제어하여 혼잡 상황으로 발생하는 데이터의 무분별한 손실을 막고 네트워크가 안정하게 동작할 수 있도록 한다[1].

최근들어 오디오나 비디오 스트리밍과 같은 멀티미디어 트래픽이 증가하고 있다. 이러한 트래픽들은 지연에 민감하고 어느 정도의 패킷 손실을 허용하며 전송률의 기반으로 동작하는 특징을 가진다. 멀티미디어 트래픽의 이러한 본질적인 특징으로 인해 신뢰적인 패킷 전달을 수행하는 TCP는 스트리밍 서비스의 전송 프로토콜로는 적합하지 않다. 따라서 대부분의 멀티미디어 트래픽은 혼잡 제어를 수행하지 않는 UDP(User Datagram Protocol)를 사용하게 되었다. 하지만 UDP는 TCP와 같은 혼잡 제어 메커니즘이 없으므로 네트워크 혼잡 상황을 야기하여 네트워크를 붕괴(congestion collapse)시킬 가능성이 있으며 기존의 주요 트래픽인 TCP와도 친화적(TCP-friendly)으로 동작하지 않는다는 문제점을 갖는다[1,2].

1990년대 이후로 스트리밍 전송기법과 관련하여 네트워크 안정성을 향상시키기 위해 혼잡 제어 메커니즘 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [2-13]. 이러한 연구들은 네트워크의 상태에 따라 전송률을 조절함으로써 네트워크의 안정화 및 TCP기반 트래픽과의 형평성 보장을 목적으로 하고 있다. 하지만 이러한 연구들은 네트워크상태의 안정화만을 고려하므로 스트리밍 응용 프로그램의 본질적인 특성에 대한 고려가 부족하다는 한계를 가진다. 또한 스트리밍 서비스의 품질에 큰 영향을 미치는 네트워크 지연에 대한 고려가 부족하다는 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서는 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서 스트리밍 특성과 네트워크 상태를 모두 고려하는 스트리밍 전송기법인 BEST(Buffer-driven Efficient Streaming) 전송기법을 제안한다. BEST는 네트워크 관점과 사용자 관점의 요구사항을 모두 고려하는 hybrid 형태로 설계되었다. 즉, 기존의 관련 연구들이 추구하는 네트워크의 안정성 향상을 만족시키면서 사용자 관점에서 끊임없이 부드러운 비디오 재생을 위해 버퍼상태에 따라 전송률 및 비디오 품질을 조절하게 된다.

본 논문의 2장에서는 스트리밍 전송기법과 관련하여 기존 연구들에 대해 기술하였고, 3장에서는 제안하는

BEST 전송기법의 알고리즘에 대해 기술하였다. 4장에서는 시뮬레이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하고 기존 스트리밍 전송기법과의 성능 비교 결과를 기술하였으며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺었다.

2. 관련 연구

인터넷의 주요 트래픽에 사용되는 전송 프로토콜인 TCP는 스트리밍 트래픽의 특성에 적절하지 않으므로 대부분의 스트리밍 트래픽은 UDP를 사용하게 된다. 하지만 혼잡 제어 메커니즘이 없는 UDP를 전송 프로토콜로 사용함으로써 네트워크의 불안정을 발생시키게 되며 TCP를 사용하는 트래픽과 네트워크 자원을 공평하게 사용하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 1990년대 이후로 이러한 문제점을 개선하기위해 혼잡 제어 메커니즘을 적용한 스트리밍 전송기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 장에서는 기존에 제안된 여러 스트리밍 기법들에 대해 설명하고 분류하도록 한다. 그리고 각 관점에서 대표적인 스트리밍 전송기법이 가지고 있는 문제점에 대해서 기술하도록 한다.

2.1 스트리밍 전송기법에 대한 관련 연구

기존에 제안된 스트리밍 전송기법들은 목적에 따라 크게 네트워크 관점과 사용자 관점으로 분류할 수 있다. 네트워크 관점에서는 혼잡 제어 메커니즘을 적용하여 전송률을 조절함으로써 네트워크의 안정성 향상 및 TCP 트래픽과의 형평성 보장을 목적으로 가지며 사용자 관점에서는 네트워크의 안정성보다는 끊임없이 부드럽게 재생되는것을 목적으로 가진다.

네트워크 관점에서 접근한 스트리밍 전송은 사용되는 기법에 따라 TCP의 혼잡 제어 알고리즘인 AIMD(Additive Increase Multiplicative Decrease)를 그대로 사용하거나 수정해서 사용하는 방법, Padhye의 TCP 전송률(throughput) 모델링 공식을 사용하는 방법, 그리고 대역폭 추정(bandwidth estimation)을 통한 방법으로 구분할 수 있다[1].

TCP의 AIMD를 그대로 사용하거나 수정해서 사용하는 스트리밍 전송기법에는 TCP Vegas의 혼잡 제어 알고리즘을 사용하는 SCP(Streaming Control Protocol), 네트워크상태에 따라 패킷의 전달 주기를 조절하는 RAP(Rate Adaptation Protocol)와 TLFC(TCP-Like Flow Control), 데이터 패킷마다 데드라인을 부여하는 TLTCP(Time-Lined TCP), TCP의 흐름 제어(flow control)기법을 수신단에서 에뮬레이션하는 TEAR(TCP Emulation At Receiver), TCP의 AIMD 기법에서 전송률의 변화크기를 감소시킨 SQRT등이 있다 [2-7].

Padhye의 TCP 전송률 모델링 공식을 사용하는 스트리밍 전송기법에는 공식의 산출값으로 전송률을 조절하

는 TFRC(TCP-Friendly Rate Control Protocol)와 SRTP(Smart-RTP), 공식의 산출값과 현재의 전송률을 비교해서 전송률을 조절하는 MSTFP(Multimedia Streaming TCP-Friendly transport Protocol)등이 있다 [8-10].

대역폭 추정 방법을 사용하는 스트리밍 전송기법에는 네트워크 혼잡 상태에서 추정된 대역폭의 값으로 전송률을 조절하는 SMCC(Streaming Media Congestion Control)와 전송률뿐만 아니라 비디오의 품질도 함께 조절하는 VTP(Video Transport Protocol)가 있으며 이 두가지 기법 모두 TCP Westwood에서 제안한 대역폭 추정 알고리즘을 그대로 사용하게 된다[11,12].

네트워크의 안정화와 TCP 트래픽과의 형평성을 목적으로 가지는 네트워크 관점의 연구들과는 달리 사용자 관점에서 끊임없이 부드럽게 재생되는 것을 목적으로 가지는 전송기법로 buffer-driven scheme이 있다. Buffer-driven scheme은 수신단의 현재 버퍼상태를 송신단에서 예측하여 버퍼의 underflow나 overflow를 예방함으로써 스트리밍 서비스 사용자들에게 끊임없이 부드러운 재생을 가능하게 한다[13].

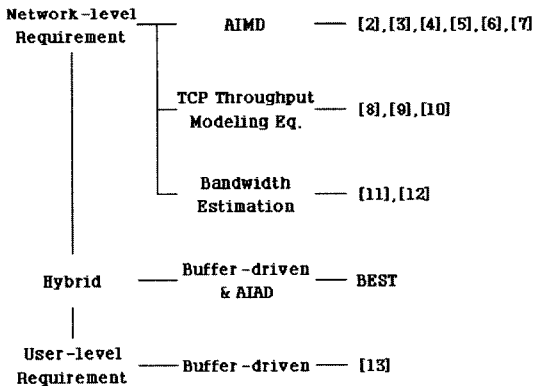


그림 1 기존 연구 분류

그림 1은 앞서 설명한 기존에 제안된 스트리밍 전송기법들을 목적에 따라 일차적으로 분류하고 각각의 목적에서 사용되는 기법에 따라 다시 세부적으로 분류한 것이다. 본 논문에서 제안하는 BEST는 사용자 관점의 요구사항과 네트워크 관점의 요구사항을 모두 고려한 hybrid 형태를 가진다. Hybrid 형태의 BEST는 일차적으로 네트워크상태에 대한 판단을 수행한다. 네트워크상태를 결정할 이후에는 예측된 버퍼상태에 따라 스트리밍 비디오의 품질을 조절하거나 네트워크상태를 고려하여 전송률을 AIAD(Additive Increase Additive Decrease) 방법으로 조절하게 된다.

2.2 네트워크 관점 스트리밍 전송기법의 문제점

UDP를 사용하는 기존의 스트리밍 전송기법은 혼잡 제어 메커니즘의 부재로 인해 네트워크 혼잡 상황을 유발하며 인터넷의 주요 트래픽인 TCP와 친화적으로 동작하지 않는다는 문제점을 갖는다. 이를 개선하기 위해 혼잡 제어 메커니즘을 적용한 스트리밍 전송기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 대표적으로 1998년에 제안된 Padhye의 TCP 전송률 모델링 공식을 사용하여 전송률을 조절하는 스트리밍 전송기법인 TFRC가 있다[14].

$$T = \frac{S}{t_{RTT} \sqrt{\frac{2p}{3}} + t_{RTO} (3 \sqrt{\frac{3p}{8}}) p (1 \pm 32p^2)} \quad (1)$$

식 (1)은 Padhye가 전제한 TCP 전송률 모델링 공식을 보이고 있다. t_{RTT} 는 RTT(Round Trip Time)를, S 는 패킷 크기, p 는 패킷 손실률, t_{RTO} 는 RTO(Retransmission Time-Out)를 의미한다. Padhye의 공식은 TCP 친화적인 전송률을 계산할 수 있다는 장점으로 인해 멀티미디어 스트리밍을 위한 TFRC나 MSTFP, SRTP등의 연구에서 사용되었다.

Padhye의 공식을 사용하는 스트리밍 전송기법은 네트워크상태에 따라 전송률을 조절함으로써 패킷 손실 발생을 감소시키는 장점을 가진다. 하지만 전송률의 변화가 심하게 발생하는 문제와 비디오 품질에 대한 조절을 하지 않을 경우, 버퍼의 underflow가 심하게 발생할 수 있다는 단점을 가진다. 그림 2는 TCP와 경쟁하는 환경에서 Padhye의 공식으로 계산된 전송률의 변화를 나타낸 것으로 혼잡 상황이 발생하는 시점 2초, 20초, 40초 부근에서 전송률의 변화가 크게 발생하는 문제점을 보여주고 있다. 또한 최근의 연구에서 Padhye의 공식이 적용되는 네트워크의 링크 에러율이나 RTT에 따라 정확한 전송률을 계산할 수 없으며 TCP와의 친화성

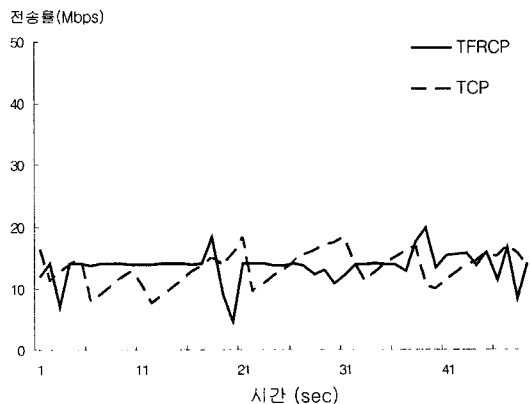


그림 2 TCP 전송률 모델링 공식의 동작 특성

측면에서도 오랜 기간동안의 평균적인 친화성은 보장하지만 짧은 기간에서는 친화성을 보장할 수 없음이 증명되었다[15].

2.3 사용자 관점 스트리밍 전송기법의 문제점

UDP 기반의 스트리밍 전송기법이 가지는 네트워크의 안정성을 저해한다는 단점을 극복하기 위해 최근의 스트리밍 전송기법에 관한 연구는 혼잡 제어 메커니즘을 적용한 네트워크 관점에서의 연구를 위주로 진행되고 있다. 이와는 다른 목적을 가지는 사용자 관점에서 스트리밍 전송기법에 관한 연구로 buffer-driven scheme이 있다.

Buffer-driven scheme은 네트워크상태에 관한 고려 없이 스트리밍 서비스를 받는 사용자 관점에서 끊임없이 부드러운 재생을 위해 송,수신단 버퍼의 underflow나 overflow를 예방하고 일정 버퍼 레벨을 유지하는 것을 목적으로 한다. 전송되는 비디오의 품질이나 실제 전송률 조절은 수신단의 버퍼상태 예측을 기반으로 하며 수신단의 버퍼상태는 송신단에서 전송한 패킷 수와 비디오 인코딩율에 따라 예측가능하다[13].

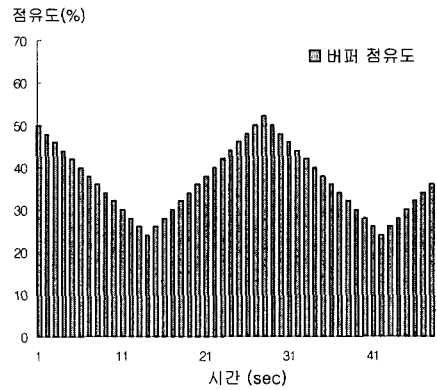
$$B_s(t) = \sum_{j=1}^t s(j) - a_s(j) + B_s(0) = B_s(t-1) + s(t) - a_s(t) \quad (2)$$

$$B_r(t) = \sum_{j=1}^t a_r(j) - d(j) + B_r(0) = \sum_{j=1}^t a_r(j) - f_j + B_r(0) \quad (3)$$

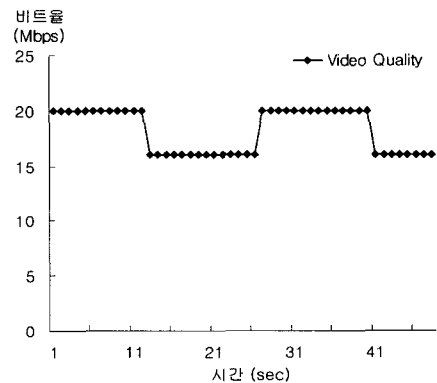
$$B_r(t) = \sum_{j=1}^t s(j) - f_j + B_s(0) + B_r(0) - B_s(t) \quad (4)$$

식 (2)는 buffer-driven scheme에서 시간 t 에서의 송신단 버퍼상태를 나타내고 있다. s 는 송신단 버퍼에 들어가는 데이터, a_s 는 송신단의 전송률, $B_s(0)$ 는 송신단의 초기 버퍼링 상태를 의미한다. 송신단의 버퍼상태는 송신단에서 직접적인 버퍼상태 모니터링으로 예측가능하다. 마찬가지로 식 (3)은 시간 t 에서의 수신단의 버퍼상태를 나타내고 있다. a_r 는 수신단이 받은 수신율, d 는 애플리케이션에 의해 소비되는 데이터, $B_r(0)$ 는 수신단의 초기 버퍼링 상태를 의미한다. Buffer-driven scheme에서 현재 수신단의 버퍼상태 예측은 네트워크의 지연이나 패킷 손실을 무시할 때, 식 (2)와 식 (3)을 조합하여 식 (4)와 같이 전개될 수 있다. f_j 는 j 번째 비디오 프레임의 비트수를 의미한다.

그림 3은 buffer-driven scheme의 버퍼 점유도 변화와 그에 따른 비디오 품질의 변화를 보여주고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 buffer-driven scheme은 송신단에서 현재 수신단의 버퍼상태를 예측하고 그에 따라 스트리밍되는 비디오의 품질을 조절함으로써 수신단 버퍼의 underflow나 overflow를 예방한다. 이러한 특성으로 스트리밍 서비스 사용자에게 끊임없이 부드러운 비디오의 재생을 보장한다는 장점을 가진다. 하지만 버퍼



(a) 버퍼 점유도 변화



(b) 비디오 품질 변화

그림 3 Buffer-driven scheme의 동작 특성

상태에 따라 스트리밍 비디오의 품질만을 조절하고 네트워크상태에 대한 고려가 없으므로 기존 UDP기반의 스트리밍 전송기법이 가지는 네트워크 안정성을 저해하고 TCP와 친화적으로 동작하지 못한다는 단점을 계승한다.

3. BEST 알고리즘

본 장에서는 2장에서 지적한 기존 스트리밍 전송기법들의 문제들을 개선하기 위해서 새롭게 제안한 BEST 전송기법의 알고리즘에 대해 기술한다. 제안한 BEST(Buffer-driven Efficient STreaming)는 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서 RTT 이후의 수신단 버퍼상태에 대한 예측과 네트워크상태 판단을 근거로 전송률 및 비디오 품질을 조절한다. BEST는 사용자 관점과 네트워크 관점의 요구사항을 모두 고려한 hybrid 형태로서 기존 스트리밍 전송기법의 문제점을 개선하였다.

3.1 BEST 개요

기존 스트리밍 전송기법들은 하나의 관점에서 접근하

여 성능 향상을 추구한다. 즉, 사용자 관점의 기법은 버퍼의 underflow나 overflow를 예방하여 사용자에게 부드러운 비디오 재생을 제공하지만 네트워크상태에 대한 고려가 부족한 한계를 가진다. 그리고 네트워크 관점의 기법은 네트워크 안정성을 향상시키지만 사용자에 대한 고려가 부족하다는 한계를 갖는다. 또한 두 관점 모두 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에 대한 고려가 부족하다는 공통적인 한계를 갖는다.

본 논문에서는 사용자 관점과 네트워크 관점의 요구사항을 모두 고려하면서 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에 적합한 BEST 전송기법을 제안하였다. BEST는 버퍼상태와 네트워크상태에 대한 판단을 근거로 스트리밍 비디오의 품질 및 전송률을 조절하게 된다.

그림 4는 BEST의 종단간 구조를 나타낸 것이다. BEST는 기본적으로 표준 스트리밍 프로토콜인 RTP/RTCP 모델을 사용하게 된다. 제어 프로토콜인 RTCP는 패킷 손실율이나 RTT등의 네트워크상태에 대한 정보를 주기적으로 송신단에 보고한다[16]. RTCP 패킷의 정보를 바탕으로 BEST 프로토콜은 네트워크상태를 혼잡상태나 안정상태로 판단하게 된다.

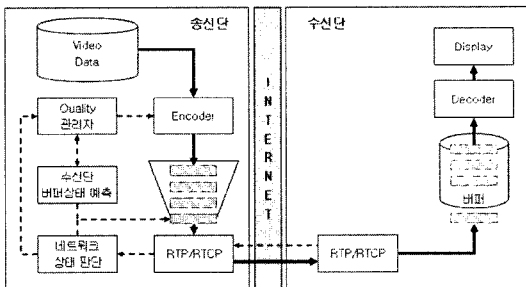


그림 4 BEST 구조

네트워크상태 판단을 수행한 후, BEST는 수신단의 버퍼상태를 예측하게 된다. 높은 지연을 가지는 네트워크 환경을 고려하기위해 RTT 이후의 버퍼상태를 예측하며 이렇게 예측된 수신단의 버퍼상태에 따라 전송률 및 비디오의 품질을 조절하게 된다. 예측된 수신단의 버퍼상태가 너무 낮거나 너무 높을 경우에는 전송률의 변화없이 스트리밍되는 비디오의 품질만을 조절하게 되며 그렇지 않을 경우에는 비디오의 품질 변화없이 네트워크상태에 따라 전송률만을 증가시키거나 감소시키게 된다.

이후 3.2절에서는 네트워크상태 판단 알고리즘에 대해 설명하며 3.3절에서는 BEST 기법이 가지는 수신단의 버퍼상태 예측 알고리즘에 대해 상세하게 설명한다. 그리고 3.4절에서는 네트워크상태와 버퍼상태에 따른 BEST의 전송률 및 비디오 품질 조절 알고리즘에 대해

설명하도록 한다.

3.2 네트워크 상태 판단 알고리즘

BEST 전송기법은 패킷 손실율에 기반하여 네트워크 상태를 판단한다. 패킷 손실율은 RTCP 패킷의 수신자 보고서에서 “Cumulative Number of Packets Lost” 필드 정보를 통해 얻어진다[16].

$$Packet\ Loss\ Rate = 1 - \frac{Number\ of\ Packets\ Received}{Number\ of\ Packets\ Sent} \quad (5)$$

식 (5)는 RTCP 패킷의 수신자 보고를 통해 패킷 손실율에 대한 정보를 제공하기 위해 수신단에서 패킷 손실율을 계산하는 공식을 기술하였다. 즉, 패킷 손실율은 RTCP 패킷 전달 주기동안 전체 전달된 패킷의 수와 손실된 패킷의 수에 대한 비율로 계산할 수 있다.

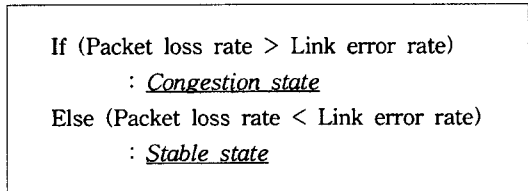


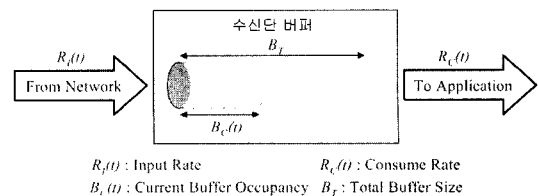
그림 5 네트워크상태 판단

계산된 패킷 손실율을 기반으로 BEST는 네트워크상태를 그림 5와 같이 판단하게 된다. 패킷 손실율이 네트워크 링크의 일반적인 에러율보다 클 경우에는 혼잡상태에 의한 패킷 손실로 간주하고 네트워크상태를 혼잡상태(congestion state)로 판단하며 반대로 패킷 손실율이 네트워크 링크의 일반적인 에러율보다 작을 경우에는 링크 특성에 의한 불가피한 패킷 손실로 간주하여 네트워크상태를 안정상태(stable state)로 판단하게 된다.

3.3 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측 알고리즘

BEST 전송기법은 사용자 관점에서 버퍼의 underflow나 overflow를 예방하기 위해 수신단의 버퍼상태를 예측하고 그에따라 전송률 및 비디오 품질을 조절하게 된다. 버퍼의 underflow나 overflow를 예방하기 위해서 BEST는 RTT 이후의 수신단의 버퍼상태를 예측하는 알고리즘을 사용한다.

그림 6은 임의의 시간에서 수신단의 버퍼상태를 나타



$R_i(t)$: Input Rate $R_c(t)$: Consume Rate
 $B_c(t)$: Current Buffer Occupancy B_T : Total Buffer Size

그림 6 수신단 버퍼 상태

내고 있다. B_T 는 수신단의 전체 버퍼크기를 나타내며 $B_C(t)$ 는 현재 수신단의 버퍼상태를 의미하게 된다. $R_I(t)$ 는 네트워크로부터 수신단에 들어오는 데이터율을 의미한다. 송신단과 수신단 사이의 네트워크 지연을 무시할 경우 $R_I(t)$ 는 송신단에서의 전송률로 기술할 수 있다. $R_C(t)$ 는 수신단 버퍼로부터 스트리밍 애플리케이션에 의해 소비되는 데이터율을 의미하며 현재 스트리밍되는 비디오 데이터의 인코딩율로 기술할 수 있다. 그림 6에서 BEST가 가지는 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측 알고리즘은 식 (6)과 같이 전개할 수 있다.

$$B_C(t+1) = B_C(t) + R_I(t) - R_C(t) \times RTT$$

where, $B_C(t) \approx B_E(t)$

$$R_I(t) = \frac{\text{Number of Packets} \times \text{Packet Size}}{RTCP \text{ Period}} \quad (6)$$

$$R_C(t) = \text{Encoding Rate at Time}(t)$$

BEST는 송신단에서 식 (6)의 알고리즘을 이용하여 RTT 이후의 수신단 버퍼상태를 예측한다. RTT 이후의 버퍼 점유도 증가/감소는 네트워크로부터 유입되는 데이터율인 $R_I(t)$ 과 스트리밍 애플리케이션에 의해 소비되는 데이터율인 $R_C(t)$ 의 차에 RTT를 곱한 것으로 계산된다. RTT 이후의 수신단 버퍼상태, $B_E(t+1)$ 은 현재의 버퍼상태인 $B_C(t)$ 와 RTT 이후의 버퍼 점유도 증가/감소 성분을 더하여 계산된다. 현재 버퍼상태인 $B_C(t)$ 는 이전 주기에 구해진 버퍼상태 예측값, $B_E(t)$ 와 근사값을 가진다. 네트워크상태와 버퍼상태에 따른 전송률 및 비디오 품질 결정 이후, $B_C(t)$ 는 새로운 전송률 및 비디오 품질을 적용하여 다시 계산된다. 이것은 다음 주기에서 수행되는 버퍼상태 예측 알고리즘의 정확성을 위한 것이다.

BEST는 수신단 버퍼상태에 대한 정보를 얻기 위해 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측 알고리즘을 사용한다. RTT 이후, 즉 미래시점의 수신단 버퍼상태를 예측하는 이유는 버퍼상태를 수신단으로부터 명시적으로 보고받을 경우, 기존 RTCP와 같은 제어 메시지의 수정이 필요하며 오버헤드가 증가한다는 단점을 갖는다. 이와달리 현재 수신단 버퍼상태를 예측할 경우, 추가적인 오버헤드는 없지만 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서 버퍼의 underflow나 overflow가 발생할 가능성이 있다는 한계를 갖는다. 하지만 BEST가 가지는 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측 알고리즘은 추가적인 오버헤드없이, 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서도 버퍼의 underflow나 overflow를 효과적으로 예방할 수 있다.

3.4 전송률 및 비디오 품질 조절 알고리즘

BEST 전송기법은 사용자 관점에서는 버퍼상태에 따라 전송률 및 비디오 품질을 조절하며 네트워크 관점에서는 네트워크상태에 따라 전송률 및 비디오 품질을 조

절하게 된다. 사용자 관점과 네트워크 관점의 요구사항을 모두 고려하는 hybrid 형태의 BEST는 일차적으로 3.2절에서 설명한 패킷 손실율에 근거해서 네트워크 상태를 혼잡상태와 안정상태로 구분하게 된다. 네트워크상태가 결정된 후에는 3.3절에서 설명한 알고리즘에 의해 RTT 이후의 수신단의 버퍼상태를 예측하고 각각의 경우에 대해서 전송률 및 스트리밍 비디오의 품질을 조절하게 된다.

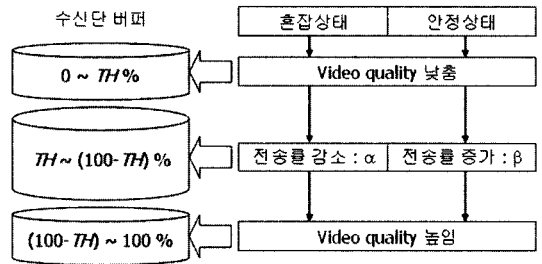


그림 7 전송률 및 품질 조절

그림 7은 BEST의 전송률 및 비디오 품질에 대한 조절을 보여준다. 네트워크상태가 혼잡할 경우, 전송률을 줄임으로써 네트워크를 안정화시킬 필요성이 있다. 하지만 RTT 이후의 수신단의 버퍼상태가 $(0 \sim TH\%)$ 로 예측되는 경우, 버퍼의 underflow가 발생할 가능성이 있으므로 이를 예방하기 위해 비디오 품질을 낮추게 된다. 마찬가지로 $\{(100-TH) \sim 100\}$ 로 예측되는 경우, 버퍼의 overflow가 발생할 가능성이 있으므로 이를 예방하기 위해 비디오 품질을 높이게 된다. 버퍼의 underflow나 overflow의 위험이 없는 $\{TH \sim (100-TH)\}$ 구간에서는 네트워크의 안정성을 위해 전송률을 α 만큼 감소시키게 된다. 전송률 감소 파라미터 α 는 비디오 품질간의 차이보다 작은 범위에서 너무 크지 않은 값으로 설정되며 전송률의 순간적인 변화폭을 줄이기위하여 실험을 통해 비디오 품질 차이의 1/4값을 사용하였다.

네트워크상태가 안정상태로 판단되는 경우, 혼잡상태와 마찬가지로 RTT 이후의 수신단 버퍼상태가 $(0 \sim TH\%)$ 로 예측되는 경우에는 비디오 품질을 낮추며 $\{(100-TH) \sim 100\}$ 로 예측되는 경우에는 비디오 품질을 높이게 된다. 하지만 버퍼의 underflow나 overflow의 위험이 없는 $\{TH \sim (100-TH)\}$ 구간에서는 혼잡상태에서 감소한 전송률의 회복을 위해 전송률을 β 만큼 증가시키게 된다. 전송률 증가 파라미터 β 는 혼잡상태에서 감소한 전송률 α 에 대한 보상값으로써 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\beta = \alpha \times \frac{\text{Number of Packets/sec}}{\text{Number of Packets/Congestion Period}} \quad (7)$$

식 (7)에서 알수 있듯이 전송률 증가 파라미터 β 는 혼잡상태에서 사용되는 전송률 감소 파라미터 α 를 이용하여 계산된다. 혼잡상태에서 감소한 전송률 α 는 다음 혼잡상태가 발생하기 전까지 안정상태에서 증가한 전송률 β 의 합과 같은 값을 갖게 된다. 즉, 전송률 감소와 증가 파라미터 α 와 β 는 서로 보상관계를 가진다. 이러한 파라미터 α 와 β 는 짧은 구간에서는 BEST의 전송률 변화에 영향을 주지만 긴 구간에서 볼 때 BEST 전송기법의 성능에 영향을 주지 않는 독립적인 파라미터가 된다.

BEST는 네트워크가 혼잡하거나 안정한 상태에서 버퍼상태에 반응하는 구간과 네트워크상태에 반응하는 구간을 구분하기 위해 버퍼 점유도에 대한 임계값 (threshold), TH 를 설정하였다. 이러한 임계값이 너무 큰 값으로 설정이 될 경우, 버퍼상태 변화에는 능동적으로 반응하지만 네트워크상태 변화에 대해 소극적으로 반응하게 된다. 반대로 임계값이 너무 작은 값으로 설정이 될 경우, 네트워크상태 변화에는 능동적으로 반응하지만 버퍼상태 변화에 대해 소극적으로 반응하게 된다. BEST 프로토콜에서 임계값은 버퍼상태 변화와 네트워크상태 변화에 공평하게 반응하기 위해서 실험을 통해 25%로 설정하였다.

그림 8은 지금까지 설명한 BEST 기법의 알고리즘을 정리한 것이다. 먼저 패킷 손실율에 근거하여 네트워크 상태를 혼잡상태와 안정상태로 판단하게 되며 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측을 기반으로 전송률을 및 스트리밍 비디오의 품질을 조절하게 된다.

4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 새로 제안한 BEST(Buffer-driven Effi-

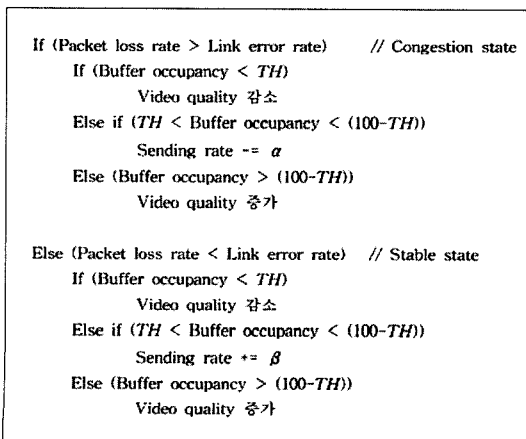


그림 8 BEST 알고리즘

cient STreaming) 전송기법의 성능 평가를 위해 LBNL(Lawrence Berkely National Laboratory)의 ns-2(network simulator)를 사용하여 다양한 실험을 수행하였다[17].

4.1 실험 환경

제안한 BEST의 성능을 평가하기 위해서 그림 9와 같은 실험 환경을 구성하여 성능 실험을 수행하였다. BEST의 성능 및 기존 연구와의 성능 비교를 위해 배경 트래픽으로 TCP 트래픽을 사용하였다. TCP를 배경 트래픽으로 사용하는 이유는 스트리밍 데이터가 전달되는 인터넷 환경에서 대부분의 주요 트래픽들이 TCP를 기반으로 동작하기 때문이다.

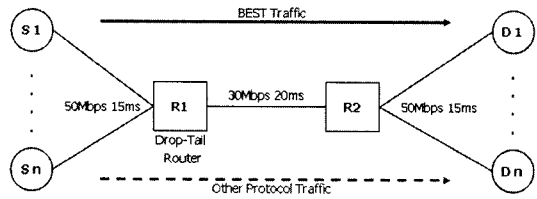


그림 9 실험 환경

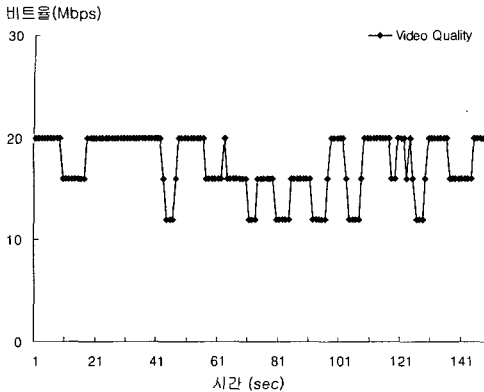
사용하는 스트리밍 비디오의 품질은 20Mbps에서 4Mbps까지 5가지 품질을 사용하였으며, 각 비디오 품질의 차이는 4Mbps로 구분하였다. 수신단의 전체 버퍼 사이즈는 20Mbps의 비디오 스트림을 4초간 버퍼링 가능한 10Mbytes로 설정하였으며 비디오가 재생되기 전에 미리 버퍼링되는 초기 버퍼 점유도는 50%로 가정하고 실험하였다.

4.2 BEST 파라미터 설정

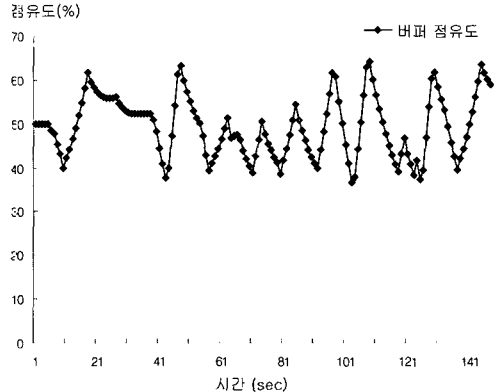
본 절에서는 BEST 알고리즘에서 사용하는 파라미터 설정의 근거에 대한 실험을 수행하였다. BEST 알고리즘은 버퍼상태 변화에 반응하는 구간과 네트워크상태 변화에 반응하는 구간을 구분하는 임계값으로 TH 라는 파라미터를 사용하였다. 실험을 통해 임계값 TH 를 설정하게 된 근거를 입증하였다.

그림 7에서, 예측된 수신단의 버퍼 점유도가 ($0 \sim TH\%$) 구간일 경우는 버퍼의 underflow를 예방하기 위해 그리고 ($(100-TH) \sim 100\%$) 구간일 경우는 버퍼의 overflow를 예방하기 위해 버퍼상태 변화에 반응하게 된다. 그러나 예측된 수신단의 버퍼 점유도가 ($TH \sim (100-TH)\%$) 구간에서는 버퍼의 underflow나 overflow에 대한 위험이 없으므로 네트워크상태 변화에 반응하게 된다.

그림 10은 임계값 TH 를 40%로 설정하여 버퍼상태 변화에 능동적으로 반응하도록 했을 경우의 실험 결과를 보여준다. TH 를 40%로 설정할 경우, 버퍼 점유도가

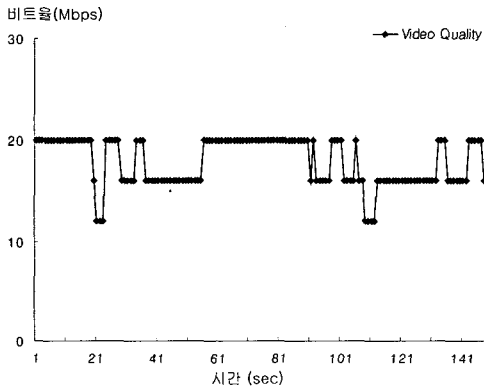


(a) 비디오 품질 변화

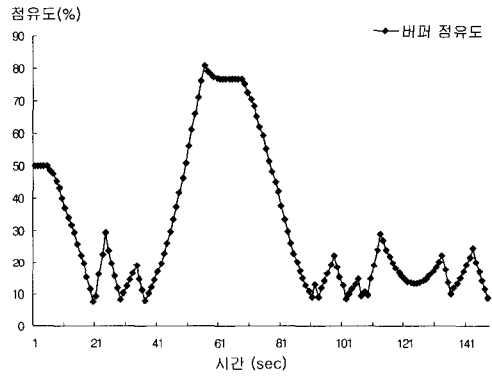


(b) 버퍼 점유도 변화

그림 10 TH=40%인 경우의 성능 평가



(a) 비디오 품질 변화



(b) 버퍼 점유도 변화

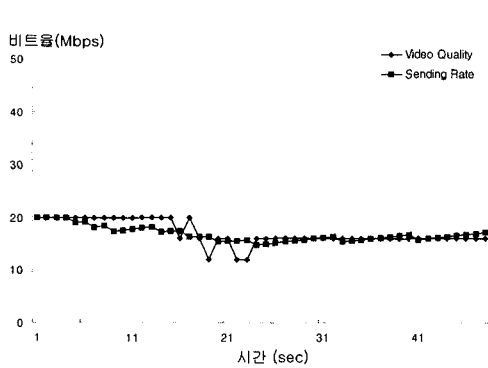
그림 11 TH=10%인 경우의 성능 평가

(0~40%), (60~100%) 구간에서는 버퍼상태 변화에 대한 반응으로 스트리밍 비디오 품질이 변화하게 되며 (40~60%) 구간에서는 네트워크상태 변화에 대해 반응하게 된다. TH를 큰 값으로 설정할 경우 버퍼 점유도는 (40~60%) 구간안에서 안정하게 변화하는 장점을 갖는다. 하지만 버퍼상태 변화에 대한 능동적 반응으로 비디오 품질 변화가 심하게 발생하며 네트워크상태 변화에 소극적으로 반응하므로 패킷 손실 발생이 증가하여 네트워크 안정성이 감소되는 단점을 갖는다.

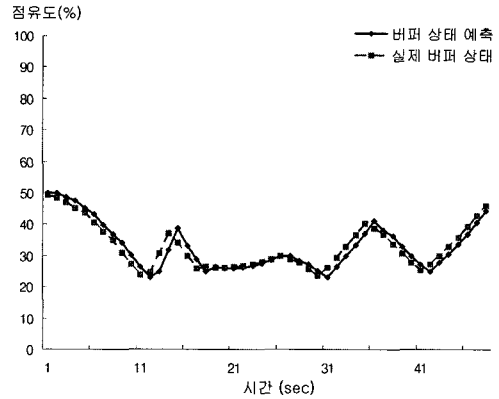
그림 11은 그림 10의 실험과는 다르게 임계값 TH를 10%로 설정하여 네트워크상태 변화에 능동적으로 반응하도록 했을 경우의 실험 결과를 보여준다. TH를 10%로 설정할 경우, 버퍼 점유도가 (0~10%), (90~100%) 구간에서는 버퍼상태 변화에 대한 반응 구간으로 스트리밍 비디오 품질이 변화하게 되며 (10~90%) 구간에서는 네트워크상태 변화에 대해 반응하게 된다. TH를 작

은 값으로 설정할 경우 네트워크상태 변화에 반응하는 구간이 넓어지게 되므로 패킷 손실이 감소하여 네트워크의 안정성이 향상되는 장점을 갖는다. 그림 10의 TH=40%와 비교하여 TH=10%일 경우, 패킷 손실 발생은 약 28%만큼 줄어들게 된다. 또한 버퍼 점유도가 (0~10%), (90~100%) 구간에서만 비디오의 품질 변화가 일어나므로 스트리밍 비디오 품질의 변화가 줄어드는 장점을 갖는다. 하지만 버퍼상태 변화에 대해서는 소극적으로 반응하게 되므로 버퍼 점유도 측면에서 (10~80%) 구간에서 불안정하게 변화하는 단점을 갖는다.

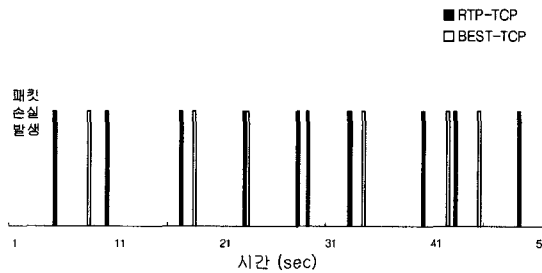
3장에서 설명하였듯이 BEST 알고리즘의 임계값 TH는 버퍼상태 변화와 네트워크상태 변화에 공평하게 반응하도록 하기 위해 25%로 설정하였다. 25%의 TH 설정은 최적의 성능을 위한 설정은 아니며 TH 설정에 따른 장점과 단점을 적절히 조화시키는 실험적 근사치로 설명할 수 있다. 다음 절에서 기술하고 있는 BEST 전



(a) 전송률 및 비디오 품질 변화



(b) 버퍼 점유도 변화



(c) 패킷 손실 발생 분포
 그림 12 BEST 알고리즘 성능

송기법의 성능 실험 결과는 TH를 25%로 설정한 상태로 수행되었다.

4.3 BEST 성능 실험

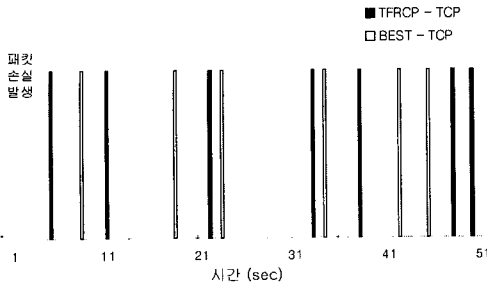
본 실험은 BEST의 성능을 평가하기 위한 것이다. TCP 트래픽과 경쟁하는 상황에서 BEST의 기본적인 성능을 살펴보고 사용자 관점과 네트워크 관점에서 BEST의 성능 향상에 대한 평가 실험을 수행하였다.

그림 12는 TCP 트래픽과 경쟁하는 상황에서 BEST 알고리즘의 기본적인 성능에 대한 실험 결과를 보여준다. 그림 12의 (a)는 스트리밍 비디오의 품질 변화 및 전송률의 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 시작에서 BEST는 기본적으로 20Mbps의 비디오 스트림을 전송하게 되며 TCP 트래픽과 경쟁하는 상황에서 혼잡 상황이 발생하게 되면 네트워크 안정화를 위해 전송률을 조절하게 된다. 수신단의 버퍼상태 예측값이 임계값보다 커지는 16초, 19초, 23초 시점에서는 버퍼의 overflow를 예방하기 위해서 스트리밍되는 비디오 품질을 낮여주게 되며, 임계값보다 작아지는 15초, 17초, 18초, 21초 시점에서는 버퍼의 underflow를 예방하기 위해서 스트리밍되는 비디오의 품질을 낮추게 된다.

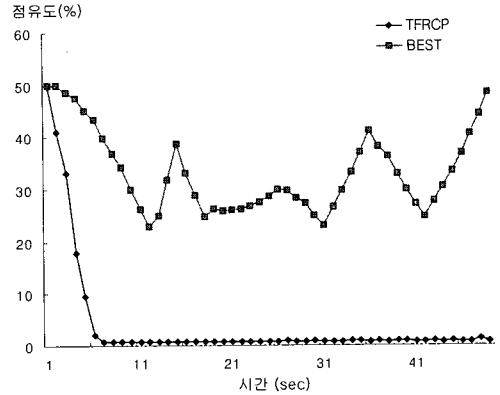
BEST는 네트워크상태 판단 이후에 버퍼상태에 따라 전송률이나 스트리밍 비디오의 품질을 조절하게 된다.

따라서 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측기법은 BEST 성능을 결정하는 가장 중요한 알고리즘이 되며 그 정확성에 대한 검증이 필요하다. 그림 12의 (b)는 송신단에서 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측값과 실제 수신단에서 측정된 버퍼상태를 시간에 따라 나타낸 것이다. 버퍼 점유도가 증가하거나 감소하는 것에 상관없이 예측값과 실제 측정값이 거의 일치하는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다. 즉, BEST가 가지는 RTT 이후 수신단의 버퍼상태 예측기법에 대한 정확성을 검증할 수 있다.

그림 12의 (c)는 기존의 표준 스트리밍 프로토콜인 RTP와 TCP가 경쟁하는 상황과 BEST와 TCP가 경쟁하는 상황에서 패킷 손실 발생 분포를 비교한 실험 결과이다. 주로 UDP를 사용하는 RTP는 네트워크 상황에 대한 고려가 없으므로 네트워크가 혼잡한 상태에서도 전송률 조절을 하지 않는다. 하지만 BEST 프로토콜은 사용자 관점에서 버퍼상태뿐만 아니라 네트워크상태를 고려하여 전송률을 조절하므로 패킷 손실 발생이 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. BEST는 기존 RTP와 비교해서 약 50%정도 패킷 손실 발생이 감소하였으며 이러한 결과를 통해 BEST가 네트워크의 안정성을 향상시킬 수 있었다.

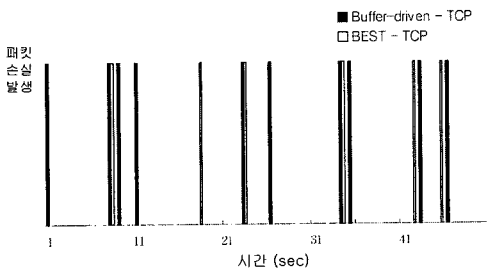


(a) 패킷 손실 발생 비교

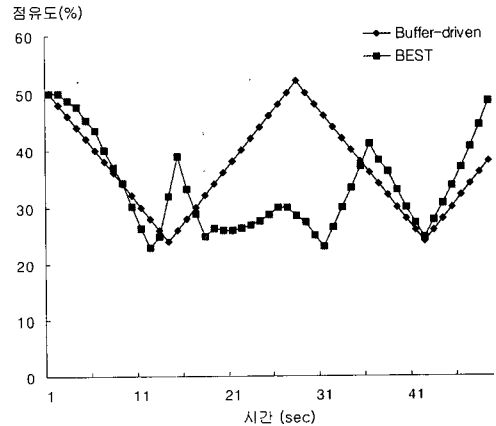


(b) 버퍼 점유도 비교

그림 13 TFRCP와 BEST의 성능 비교



(a) 패킷 손실 발생 비교



(b) 버퍼 점유도 비교

그림 14 Buffer-driven scheme과 BEST의 성능 비교

4.4 기존 전송기법과의 성능 비교 실험

본 실험은 기존에 제안된 스트리밍 전송기법과, 제안하는 BEST의 성능을 비교하기 위한 것이다. 성능 비교 대상으로는 2장에서 설명한 Padhye의 전송률 모델링 공식을 사용한 TFRCP와 buffer-driven scheme을 사용하였다.

그림 13은 전송률 모델링 공식을 사용한 전송기법인 TFRCP와 제안하는 BEST의 성능을 패킷 손실 발생 분포와 버퍼 점유도 변화를 통해 비교한 결과이다. 먼저 그림 13의 (a)는 네트워크 안정성 향상에 대한 성능비교 실험을 위해 TCP와 경쟁하는 상황에서 각 전송기법의 패킷 손실 발생 분포를 나타낸 결과이다. 패킷 손실이 발생하는 시점은 차이가 있지만 두 전송기법 모두 비슷한 패킷 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 제안하는 BEST가 네트워크 안정성 측면에서 네트워크 관점만을 고려한 기존 연구와 유사

한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 13의 (b)는 (a)와 같은 조건에서 각 전송기법의 버퍼 점유도 변화를 비교한 실험 결과이다. 전송률 모델링 공식을 사용한 전송기법은 비디오 품질에 대한 조절이 없으므로 6초 이후에 심각한 버퍼 underflow 상황을 보인다. 하지만 BEST의 경우, 네트워크상태뿐만 아니라 버퍼상태를 고려하여 비디오 품질을 조절하므로 버퍼의 underflow나 overflow를 효과적으로 예방할 수 있다.

그림 14는 buffer-driven scheme과 제안하는 BEST의 성능을 패킷 손실 발생 분포와 버퍼 점유도 변화를 통해 비교한 결과이다. 그림 13의 실험과 마찬가지로 각 전송기법이 TCP와 경쟁하는 상황에서 실험을 수행하였다.

그림 14의 (a)는 네트워크 안정성 향상에 대한 성능비교 실험을 위해 각 전송기법의 패킷 손실 발생 분포를 나타낸 결과이다. Buffer-driven scheme은 버퍼상태

만을 고려하여 비디오 품질을 조절하므로 기존 UDP기반의 RTP와 유사하게 많은 패킷 손실이 발생한다. 하지만 BEST는 buffer-driven scheme에 비해 패킷 손실 발생이 크게 줄어들었으며, 이러한 결과를 통해 네트워크의 안정성에 있어서 큰 성능 향상을 보였다.

그림 14의 (b)는 (a)와 같은 조건에서 각 전송기법의 버퍼 점유도 변화를 비교한 실험 결과이다. 결과를 통해 버퍼 점유도 변화에 있어서 두 전송기법 모두 버퍼의 underflow나 overflow를 효과적으로 예방하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

스트리밍 전송 프로토콜의 표준인 RTP는 대부분 혼잡 제어 메커니즘이 없는 UDP를 기반으로 하므로 네트워크의 안정성을 저해하는 원인이 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 1990년대 이후로 네트워크의 안정성을 고려한 스트리밍 전송기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 네트워크 관점의 요구사항만을 고려한 스트리밍 전송기법은 네트워크 안정성 향상만을 고려하므로 사용자 관점의 요구사항에 대한 고려가 부족하다는 한계를 갖는다. 또한 스트리밍 서비스 품질에 큰 영향을 끼치는 네트워크 지연에 대한 고려가 부족하다는 한계를 갖는다.

본 논문에서는 기존 스트리밍 전송기법들이 가지는 한계를 극복하는 BEST 전송기법을 제안하였다. BEST는 기존 관련 연구들처럼 사용자 관점이나 네트워크 관점의 요구사항만을 고려하지 않고 두 관점의 요구사항을 동시에 고려하는 hybrid 형태의 접근방법을 제시하고 있다. 패킷 손실에 기반하여 네트워크를 안정상태와 혼잡상태로 구분하고 각 상태에서 RTT 이후의 수신단 버퍼상태 예측을 기반으로 전송률이나 스트리밍 비디오의 품질을 조절하게 된다. 그러므로 BEST 전송기법은 네트워크 상태에 맞도록 전송률을 조절함으로써 네트워크 안정성을 향상시키며, 수신단 버퍼의 underflow나 overflow를 효과적으로 예방하여 사용자에게 끊임없이 부드러운 비디오 재생을 보장하게 된다.

시뮬레이터를 이용한 실험을 통해서 BEST 전송기법의 기본적인 성능을 검증하고 관련 연구와의 성능 비교를 위해 네트워크 관점의 전송기법과 사용자 관점의 전송기법을 비교 분석하였다. 실험 결과를 통해 제안한 BEST 전송기법은 높은 지연을 가지는 네트워크 환경에서도 네트워크 관점과 사용자 관점의 요구사항을 모두 만족시킬수 있음을 확인할 수 있었다. 향후, 제안한 BEST 전송기법이 현재 네트워크의 주요 트래픽인 TCP와 친화적으로 동작할 수 있도록 하는 방법에 대한 연구가 수행되어야 하고, 멀티캐스트 환경에서의 적용에

대한 연구도 같이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] S. Floyd and F. Kevin, "Router mechanisms to support end-to-end congestion control," *Technical Report, LBL-Berkeley*, February 1997.
- [2] S. Cen, C. Pu, and J. Walpole, "Flow and congestion control for internet streaming applications," *Multimedia Computing and Networking*, January 1998.
- [3] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate based congestion control mechanism for real-time streams in the Internet," *IEEE INFOCOMM*, March 1999.
- [4] B. Mukherjee and T. Brecht, "Time-lined TCP for the TCP-friendly delivery of streaming media," *International Conference on Network Protocols*, 2000.
- [5] S. Na and J. Ahn, "TCP-like flow control algorithm for real-time applications," *IEEE International Conference*, September 2000.
- [6] I. Rhee, V. Ozdemir, and Y. Yi, "TEAR: TCP emulation at receivers-flow control for multimedia streaming," *Technical Report, NCSU*, April 2000.
- [7] D. Bansal, and H. Balakrishnan, "Binomial Congestion Control Algorithms," *IEEE INFOCOMM*, April 2001.
- [8] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "A model based TCP-friendly rate control protocol," *NOSSDAV'99*, 1999.
- [9] Q. Zhang, Y. Zhang, and W. Zhu, "Resource allocation for multimedia streaming over the Internet," *IEEE Transactions on Multimedia*, September 2001.
- [10] B. Song, K. Chung, and Y. Shin, "SRTP: TCP-friendly congestion control for multimedia streaming," *16th International Conference on Information Networking*, January 2002.
- [11] N. Aboobaker, D. Chanady, M. Gerla, and M. Sanadidi, "Streaming media congestion control using bandwidth estimation," *IFIP/IEEE International Conference on Management of Multimedia Networks and Services*, 2002.
- [12] A. Balk, D. Maggiorini, M. Gerla, and M. Sanadidi, "Adaptive MPEG-4 video streaming with bandwidth estimation," *QoS-IP*, February 2003.
- [13] D. Ye, X. Wang, Z. Zhang, and Q. Wu, "A buffer-driven approach to adaptively stream stored video over Internet," *High Speed Networks and Multimedia Communications 5th International Conference*, July 2002.
- [14] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation," *ACM SIGCOMM*, 1998.

- [15] L. Grieco and S. Mascolo, "Adaptive rate control for streaming flows over the Internet," *ACM Multimedia Systems Journal*, Vol. 9, pp. 517-532, June 2004.
- [16] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for real-time applications," *IETF, RFC 1889*, January 1996.
- [17] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nanam/ns/>



이 선 현

2003년 광운대학교 전자공학부 학사
2005년 광운대학교 전자통신공학과 석사
2005년~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사 과정. 관심분야는 인터넷 QoS, 비디오 스트리밍, 유비쿼터스 컴퓨팅

정 광 수

정보과학회논문지 : 정보통신
제 32 권 제 2 호 참조