

# 인터넷에서 멀티미디어 스트리밍을 위한 지연 시간 기반 전송률 제어

정회원 송 용 헌\*, 정회원 김 남 윤\*, 이 봉 규\*\*

## Delay-based Rate Control for Multimedia Streaming in the Internet

Yong-Hon Song\*, Nam-Yun Kim\*, Bong Gyou Lee\*\* *Regular Members*

### 요 약

패킷들은 네트워크 혼잡으로 인해 라우터에서 손실되거나 지연된다. 이러한 현상은 높은 QoS를 요구하는 멀티미디어 스트리밍 응용의 품질을 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 본 논문에서 제시하는 알고리즘(DBRC)은 라우터 큐의 점유율이 균형 상태에 도달할 수 있도록 지연 시간의 증가/감소에 따라 트래픽 전송률을 제어한다. 시뮬레이션을 통해 TFRC와 비교 분석한 결과, DBRC 알고리즘은 안정적인 전송률 변화, 거의 일정한 지연 시간, 적은 패킷 손실을 보여주고 있다.

**Key Words** : 혼잡 제어(congestion control), 멀티미디어 스트리밍(multimedia streaming), 지연시간 기반제어(delay-based control), TFRC(TCP Friendly Rate Control), 트래픽 예측(traffic prediction)

### ABSTRACT

Due to the internet network congestion, packets may be dropped or delayed at routers. This phenomenon degrades the quality of streaming applications that require high QoS requirements. The proposed algorithm in this paper, called DBRC(Delay-Based Rate Control), tries to cause router queue occupancy to reach a steady state or equilibrium by throttling the transmission rate of the multimedia traffics when network delays tend to increase and also probing for more bandwidth when network delays tend to decrease. Simulation results show that the proposed algorithm provides smooth transmission rate, nearly constant delay and low packet loss rates, compared with TFRC(TCP Friendly Rate Control) that is one of dominant multimedia congestion control algorithms.

### I. 서 론

최근 인터넷을 통한 비디오 스트리밍 응용들이 많이 등장하고 있다. 예를 들면, 화상 회의, VoIP (Voice over IP), e-learning 등이 있다. 그러나 현재의 인터넷은 패킷 전송률과 지연 시간에 대한 어떠한 보장도 제공하지 못하기 때문에 네트워크 혼잡으

로 인해 패킷은 라우터에서 손실되거나 지연될 가능성이 존재한다. 이는 단말기에서의 비디오 화질을 떨어뜨리는 중요한 원인이 된다. 최근 몇 년 동안 인터넷 환경에서 멀티미디어 스트림의 혼잡 제어(congestion control) 기법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>1),2)</sup>.

인터넷에서 주로 사용되는 TCP의 혼잡 제어 알고

※본 연구는 2006학년도 한성대학교 교내 연구비 지원 과제임.

\* 한성대학교 정보시스템공학과 (isong, nykim@hansung.ac.kr)

\*\* 연세대학교 정보대학원 (bglee@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-08-348, 접수일자 : 2006년 8월 17일, 최종논문접수일자 : 2006년 9월 20일

리즘은 AIMD(Additive Increase / Multiplicative Decrease) 방식으로 동작한다<sup>3)</sup>. TCP 혼잡 제어 방식은 멀티미디어 스트리밍과 같은 응용에는 적합하지 않다. 왜냐하면 손실된 패킷을 재전송함으로써 비디오의 시간 제약 조건을 만족시키기 어려우며, 전송률이 톱니처럼 변동량이 커서 멀티미디어의 화질에 좋지 않은 영향을 주기 때문이다. 따라서 멀티미디어 스트리밍에서는 TFRC(TCP Friendly Rate Control)라고 알려진 기법이 많이 사용되는데<sup>4), 5)</sup>, 이는 UDP위에서 동작한다. TFRC는 이름에서 의미하듯이, TCP와 비교적 공평하게 가용 네트워크 대역폭을 사용하며, TCP의 전송률 변동량보다 작기 때문에 스트리밍 응용에 보다 적합하다고 할 수 있다.

비록 TRFC는 일정한 전송률 요구 조건을 가지는 응용에 많이 사용되어 왔지만, 네트워크 용량에 대한 예측이 부족하여 빈번한 패킷 손실과 장기적으로 스트림 전송률이 진동하는 단점이 있다<sup>4)</sup>. 본 논문에서는 패킷 지연 시간의 변화를 바탕으로 네트워크 용량을 예측함으로써 패킷 손실을 최소화하고 안정적인 전송률을 제공할 수 있는 지연 시간 기반 전송률 제어 알고리즘(delay-based rate control: DBRC)을 제시한다. 이를 위하여 본 알고리즘은 아래의 두 가지 관측을 통해 멀티미디어 전송률을 제어한다. 먼저 지연 시간의 증감 유무를 통해 라우터의 트래픽 양을 예측하여 라우터 큐의 점유율(occupancy)이 일정하도록 스트림의 전송률 변화량을 결정한다. 둘째, 패킷 손실 이전 최대 지연 시간과 현재 지연 시간의 비교를 통해 라우터 큐의 현재 점유율을 예측하여 점유율이 목표치에 도달할 수 있도록 스트림 전송률의 변화량을 결정한다. 결국, 본 논문에서는 위에서 제시한 두 가지 전송률 변화량의 합을 통해 라우터 큐의 점유율이 목표치에서 일정하게 유지할 수 있도록 전송률을 제어한다. 시뮬레이션을 통해 실험을 수행해 본 결과, 본 알고리즘이 TFRC에 비해 패킷의 손실이 줄어들었으며, 일정한 지연 시간과 낮은 전송률 변화를 제공할 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 인터넷에서 지연 시간과 패킷 손실간의 관계에 대해 서술하고 3절에서는 지연 시간 기반 혼잡 예측 모델에 대해 기술한다. 그리고 4절에서는 지연 시간에 기초한 전송률 제어 알고리즘에 대해 기술한 후, 5절에서 시뮬레이션을 수행한 결과에 대해 분석한다. 마지막으로 6절에서는 결론과 향후 연구 과제에 대해 간략히 서술한다.

## II. 지연 시간과 패킷 손실간의 관계

패킷 손실과 높은 지연 시간은 네트워크에 있는 라우터의 대기 시간에 기인한다. 패킷이 네트워크를 통해 전송될 때, 패킷은 라우터의 큐에 저장된다. 이 때 다른 트래픽 소스로부터 패킷이 빠르게 증가하게 되면 패킷은 높은 지연 시간을 경험하게 된다. 그리고 큐가 가득차게 될 때 패킷의 손실이 발생하게 된다. 따라서 수신자는 지연 시간의 증가를 경험한 후, 결국 패킷 손실이 발생하게 된다.

Moon et al<sup>6)</sup>은 패킷 손실과 지연 시간과의 관계를 실험적으로 분석하였다. 패킷이 손실되는 시점에서 지연 시간을 측정하는 것이 불가능하기 때문에, 패킷 손실이 발생한 경우 이전 그리고 이후 패킷의 지연 시간의 분포를 측정하는 기법을 사용하였다. 분석 결과, 손실이 발생한 시점에 가까울수록 지연 시간이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 큐가 거의 한계에 도달했을 때 도착한 패킷은 큰 대기 시간을 가지며, 큐 오버플로우 이후 도착한 패킷 또한 높은 큐 점유율로 인해 지연 시간이 증가하는 것으로 해석이 가능하다. 따라서 지연 시간의 분포를 통해 패킷 손실을 예측함으로써 패킷의 손실을 줄일 수 있다.

지연 시간에 기반한 혼잡 제어 기법으로 TCP Vegas 기법이 있다<sup>7)</sup>. 이 기법은 최소 RTT(round trip time)과 실측 RTT의 차이를 바탕으로 라우터 큐에 존재하는 패킷의 수가 일정 범위에 있도록 혼잡 제어를 수행하는 기법으로서 기존의 TCP보다 높은 성능을 가지는 것으로 알려져 있다.

## III. 지연 시간 기반 혼잡 예측 모델

### 3.1. 시스템 모델

본 논문에서는 인터넷 환경에서 스트리밍 서버와 클라이언트 사이에 멀티미디어 스트림을 전송하는 시스템을 가정한다. 그림 1에서 서버는 저장된 멀티미디어 파일을 클라이언트에게 전송하고, 클라이언트는 패킷 손실률과 지연 시간 정보를 서버에게 피드백한 후 디코딩 단계를 거쳐 화면에 출력한다. 시스템에서 주요 모듈에 대한 설명은 다음과 같다.

**혼잡 제어 모듈:** 클라이언트로부터 전송된 피드백 정보를 바탕으로 네트워크 상황을 예측하여 스트림의 최대 전송률을 결정하는 모듈이다. 혼잡 여부에 따라 최대 전송률을 결정한 후 화질 제어 모듈에

전달한다.

**화질 제어 모듈:** 현재의 네트워크 상황에 맞게 화질(Quality)을 제어하여 전송률을 조정한다. 화질 제어 기법으로는 인코딩 단계에서 양자화 계수를 조정하거나 비디오 프레임율을 조정하는 방법 등이 존재한다.

**피드백 전송 모듈:** 수신된 패킷을 모니터링하여 패킷 손실률, 패킷 지터, 지연 시간 계산에 필요한 정보를 주기적으로 서버에 전송한다. 서버와 클라이언트간에 시간이 동기화되어 있지 않은 상황에서 지연 시간을 계산하는 방법은 RTCP 방식과 유사하게 동작한다<sup>[8]</sup>.

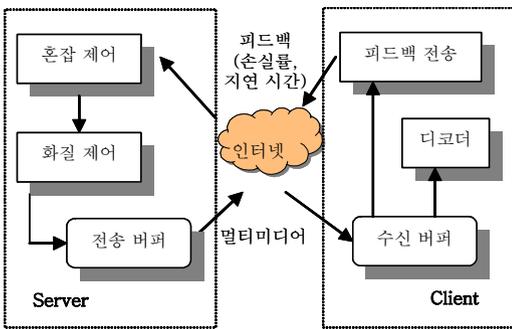


그림 1. 인터넷에서 멀티미디어 전송을 위한 시스템 모델

### 3.2. 라우터 큐 점유율의 증가/감소 예측

패킷의 지연 시간은 라우터 큐에서의 대기 시간과 네트워크를 통한 전송 시간으로 구분된다. Bolot은 패킷 지연 시간의 특징을 나타내기 위해 흥미로운 모델을 제시하였다<sup>[9]</sup>.

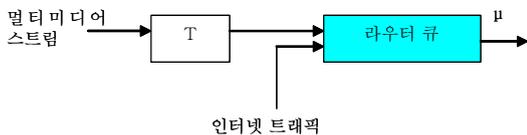


그림 2. 패킷 지연 시간 분석 모델

그림 2는 네트워크 경로상의 라우터들을 단일 큐(FIFO 서비스)로 단순화시킨 모델이지만, 대기 시간이 병목 지점에서 많은 영향을 받기 때문에 분석하기 용이한 모델이다. 기호 T는 패킷의 전송 시간, μ는 라우터의 처리량을 의미한다. 멀티미디어 패킷 i의 전송 주기를 δ, 패킷 크기를 P, 큐 대기 시간을  $W_i$ , 인터넷 트래픽의 양을  $b_i$ 라고 가정하자.

패킷 i의 지연 시간은  $d_i = T + W_i + P/\mu$ 이므로 연속한 두 패킷간 지연 시간 차이는 다음과 같다.

$$d_i - d_{i-1} = W_i - W_{i-1} \quad (1)$$

수식 (1)은 연속적인 패킷의 지연 시간 차이를 통해 라우터 큐의 대기 시간의 변화를 파악할 수 있음을 보여준다. 한편, 대기 시간의 변화량을 살펴 보기 위해 패킷 i-1과 패킷 i의 도착 시각 사이에 큐가 비어있는 시간의 합을 ε라고 할 때(그림 3),

$$\begin{aligned} \delta + W_i &= W_{i-1} + \varepsilon + (P + b_i) / \mu \\ d_i - d_{i-1} &= W_i - W_{i-1} = (P + b_i) / \mu - \delta + \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

만약 혼잡으로 네트워크 트래픽이 많다면 ε가 매우 작을 것이므로 무시할 수 있다. 이 때 지연 시간 증가( $d_i > d_{i-1}$ )는  $(P + b_i) / \mu > \delta$ 을 의미하므로 δ 시간 동안 도착한 데이터(P+b<sub>i</sub>)를 처리할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 지연 시간 증가는 라우터 큐가 점차적으로 쌓이는 것을 의미하므로 큐의 점유율을 일정하게 유지하기 위해서는 스트림의 전송률을 낮추어야 한다.

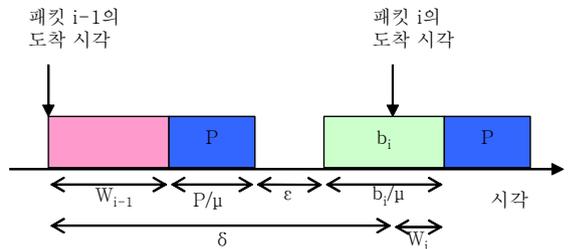


그림 3. 라우터 큐에서의 대기 시간의 분석

### 3.3. 라우터 큐의 현재 점유율 예측

큐가 거의 비어 있는 경우에는 트래픽을 증가시킬 수 있지만 트래픽의 양이 라우터 큐의 크기에 거의 근접한 상태에서는 패킷 손실의 위험이 존재한다. 따라서 현재 점유율을 예측하는 것은 패킷 손실을 막기 위해서 중요한 요소라고 할 수 있다.

라우터 큐의 현재 점유율을 예측하기 위해서 큐의 크기와 저장된 트래픽 양의 비율을 예측하여야 한다. 3.2절의 Bolot 모델에 의하면 패킷의 지연 시간은  $d_i = T + W_i + P/\mu$ 와 같이 정의된다. 이 때 전송 시간 T와  $P/\mu$ 는 고정 값이며  $W_i$ 는 큐에서의 대기 시간으로서 가변 값이다. 결국, 지연 시간은 라

우터 큐에서의 대기 시간에 의존한다. 패킷 손실전의 지연 시간은 큐가 거의 가득찼을 때이며 현재 지연 시간은 큐의 현재 상태를 의미하므로 두 개의 지연 시간을 이용하여 큐 점유율을 예측할 수 있다.

#### IV. 지연 시간에 기초한 전송률 제어 알고리즘(DBRC)

DBRC 알고리즘은 패킷의 지연 시간에 기반하여 멀티미디어 스트림의 전송률을 제어한다. DBRC 알고리즘은 네트워크 혼잡이 발생하기 전에 지연 시간의 분포를 통해 혼잡을 미리 감지하여 전송률을 감소시킨다. 그리고 낮은 혼잡에서는 TCP-Friendly 하게 전송률을 증가시킨다. 따라서 DBRC 알고리즘은 혼잡에 의한 패킷 손실을 줄이고 패킷의 높은 지연 시간을 예방함으로써 QoS를 보장한다.

##### 4.1. 시스템 요구 조건

본 논문에서는 다음과 같은 조건을 만족시킬 수 있도록 혼잡 제어를 수행한다.

표 1. 용어 정의

심볼	정의
$\alpha$	패킷 손실이 없을 경우, 감소율 상수
$\beta$	패킷 손실이 존재할 경우, 감소율 상수
$\bar{d}_i$	주기 i에서의 평균 지연 시간
$\sigma$	$\bar{d}_i$ 의 편차를 결정하기 위한 상수
MD	허용 가능한 최대 지연 시간
$\tau$	목표 지연 시간을 결정하기 위한 상수 목표 지연 시간 = $\tau * MD$ ( $0.5 \leq \tau < 1$ )
$R_i$	주기 i에서의 전송률
$s_i$	주기 i에서 지연 시간 증가/감소 유무를 나타내는 상수
$c_i$	MD에 대한 평균 지연 시간의 비율
$\delta$	전송률 제어 알고리즘의 주기

공정성(fairness): 인터넷의 트래픽의 대부분을 이루는 TCP 흐름과 대역폭을 공평하게 사용할 수 있어야 한다. 또한 UDP를 사용하는 스트리밍 응용과도 공평하게 사용할 수 있어야 한다.

처리량(throughput) 및 안정성(stability): 멀티미디어 스트림은 부드러운 전송률을 가져야 하며 네트워크 대역폭을 효율적으로 사용하여야 한다.

패킷 손실(packet loss): 패킷 손실은 비디오 화질

에 좋지 않은 영향을 끼치므로 손실률을 최소화하여야 한다.

본 논문에서 제시한 DBRC 알고리즘은 일정한 주기( $\delta$ )마다 전송률을 제어한다. 즉, 각 주기마다 패킷의 손실 유무를 파악하여 손실 시에는 기존 알고리즘과 유사하게 전송률을 일정 비율로 감소하며 패킷 손실이 없을 경우에는 지연 시간의 증감 유무와 현재 지연 시간을 기초로 전송 가능한 최대 전송률을 계산한다. 표 1은 본 논문에서 사용한 용어를 보여주고 있다.

##### 4.2. 지연 시간의 증감을 통한 전송률 제어

현재 주기 i에서 지연 시간 증감 여부를 다음과 같이 판단한다.

$$\begin{aligned} &\text{if } \bar{d}_i > \bar{d}_{i-1} + \bar{d}_{i-1} * \alpha, \text{ then } s_i = -1 \\ &\text{else if } \bar{d}_i < \bar{d}_{i-1} - \bar{d}_{i-1} * \alpha, \text{ then } s_i = 1 \\ &\text{else } s_i = 0 \end{aligned}$$

여기서  $\alpha$ 는  $\bar{d}_i$ 의 미세한 변동을 반영하지 않기 위한 상수로서  $0 \leq \alpha \leq 1$  이다. 그리고  $s_i$ 는 지연 시간 증가 여부를 나타내는 상수 값으로 -1 이면 지연 시간 증가, 1 이면 지연 시간 감소, 0 이면 변동이 없음을 나타낸다.

3.2절에서 살펴본 바와 같이 지연 시간의 증감은 라우터 큐 점유율의 증감과 관련이 있으므로, 큐의 점유율을 일정하게 유지하기 위해서는 지연 시간의 증감 여부  $s_i$ 에 따라 전송률을 제어할 필요가 있다. 현재 주기에서 전송할 수 있는 최대 전송률  $R_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_i = R_{i-1} + s_i * R \tag{3}$$

결국, 지연 시간이 감소 추세에 있으면  $s_i = 1$ 이므로  $R_i$  값은 증가하게 된다. 한편  $R$  값은 변동량을 결정하는 변수로서, 4.4절에서 설명하기로 한다.

##### 4.3. 현재 지연 시간을 통한 전송률 제어

3.3절에서 현재 라우터의 점유율을 예측하기 위해서 패킷 손실전의 최대 지연 시간과 현재 지연 시간을 이용할 수 있음을 보았다. 주기 i에서 패킷 손실이 발생하고 주기 i-1에서 손실이 없을 경우 최대 지연 시간 MD는 다음과 같이 정의된다.

$$MD = \min \{ \bar{d}_{i-1}, D \}$$

패킷 손실이 발생하지 않을 경우에 MD를 계산하기 위해서, 중단간 지연 시간인 D를 고려한다.

MD는 라우터 큐가 거의 가득 찼을 상태의 지연 시간을 예측한 값으로서 현재 지연 시간이 MD의 일정 비율( $\tau$ )에 도달할 수 있도록 조정함으로써 큐의 점유율이 목표치에 근접하도록 한다. 예를 들어  $\tau = 0.8$ 일 경우 현재 지연 시간이 라우터 큐의 80%에 육박할 수 있도록 조정한다는 의미이다. 이를 위해 목표 지연 시간 ( $\tau * MD$ )와 현재 지연 시간  $\bar{d}_i$ 의 비율을 나타내는 값을 다음과 같이 정의한다.

$$c_i = \max\left(\frac{\tau * MD - \bar{d}_i}{\tau * MD}, -1\right)$$

$c_i$  값은 -1과 1사이의 실수 값으로 정의된다.

결국, 현재 지연 시간에 기반한 전송률 제어 수식은 다음 수식으로 표현된다.

$$R_i = R_{i-1} + c_i \times R \quad (4)$$

$c_i$  값이 양수이면  $\bar{d}_i$ 가 목표 지연 시간보다 작으므로  $R_i$ 는 증가하게 된다.

#### 4.4. 멀티 미디어 스트림 전송률 제어 수식

현재 주기에서 패킷 손실이 없을 경우, 전송률 제어는 수식 (3), (4)를 고려해 다음과 같이 계산된다.

$$R_i = R_{i-1} + (s_i + c_i) \times R \quad (5)$$

$s_i$ 가 1일 경우(지연 시간 감소시)  $-1 \leq c_i \leq 1$ 이므로  $s_i + c_i$ 는 항상 0 이상 값을 가지므로 전송률이 증가함을 알 수 있다. 여기서  $s_i$ 는 전송률 증가/감소 유무를 결정하고  $c_i$ 는 변동량을 조절하는 역할을 담당하고 있다. 즉, 현재 큐 점유율보다는 점유율의 증가/감소 상태가 보다 많은 영향을 끼치고 있음을 의미한다.

수식 (5)에서 R은 전송률 변동량을 결정하는 값으로서 다음과 같은 기준에 의해 결정된다. 전송률 증가 시에는 TCP 친화적으로 RTT당 1 패킷씩 단조 증가(linear increase)시킨다. 한편 전송률 감소 시에는 현재 전송률에 비례하여 비율 감소(multiplicative decrease) 시킴으로써 멀티미디어 스트림간의 공정성을 제공하도록 한다. 결국, R은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{if } s_i + c_i > 0, \quad R = \frac{1Kbyte}{(RTT = 2 \times \bar{d}_i) / \delta} \\ & \text{else } R = R_{i-1} \times \alpha \quad (0 < \alpha < 1) \end{aligned}$$

한편, 현재 주기에서 패킷 손실이 존재할 경우에는 TCP와 같이 전송률을 비율 감소시킨다.

$$R_i = R_{i-1} - \beta \times R_{i-1} \quad (0 < \beta < 1) \quad (6)$$

## V. 성능 분석

DBRC의 성능을 평가하기 위해 네트워크 시뮬레이션 도구인 ns-2를 사용하였다<sup>[10]</sup>. 멀티미디어 스트림의 전송률 변화를 통한 처리량, 패킷 손실률 그리고 지연 시간을 측정하여 TFRC와 비교 분석하였다. 표 2는 시뮬레이션 파라미터를 보여주고 있다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
패킷 손실이 없을시 감소율( $\alpha$ )	0.05
패킷 손실시 감소율( $\beta$ )	0.2
지연 시간 편차( $\sigma$ )	0.1
MD에 대한 목표 지연 시간의 비( $\tau$ )	0.8
라우터 큐(drop-tail) 크기	200 패킷
멀티미디어 스트림의 초기 전송률	60Kbyte/sec
전송률 제어 주기( $\delta$ )	1 sec

### 5.1. 단일 라우터를 가진 토폴로지

그림 4는 단일 라우터로 연결된 네트워크 토폴로지를 보여주고 있는데, S1~S4는 멀티미디어 스트림을 전송하는 송신자를 나타내고 R1~R4는 수신자를 나타낸다. TS1~TS6는 TCP 송신자를 의미하고 TR1~TR6는 수신자를 의미한다. 그리고 라우터 1과 2 사이의 대역폭은 2 Mbps이며 전파 지연 시간(propagation delay)는 250 ms 이다.

S1~S4는 3초 간격으로 60K byte/sec 전송률로 전송되며 TS1~TS6는 3초 간격으로 AIMD 방식으로 전송된다. 즉, S1, TS1은 0초에, S2, TS2는 3초에 전송된다. 그리고 DBRC의 적응성을 검토하기 위해서 300초 후에 S1, S2 스트림을 제거하였다.

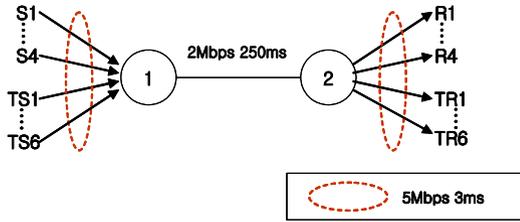


그림 4. 단일 라우터를 가진 네트워크 토폴로지

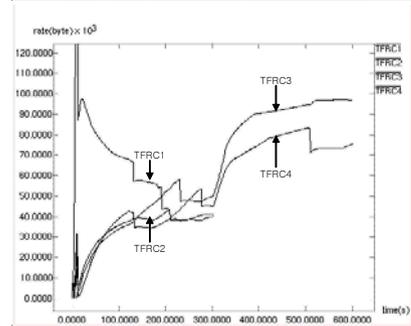
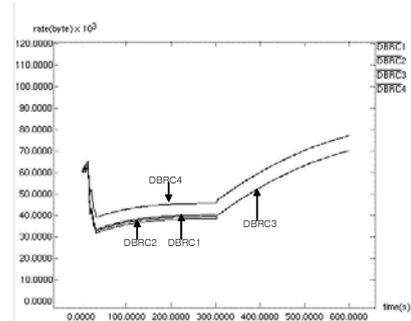
그림 6은 DBRC와 TFRC의 성능을 세 가지 관점에서 비교한 결과를 보여 주고 있다.

**전송률:** DBRC에서 S1~S3 스트림의 전송률은 네트워크 링크 2Mbps를 넘지 않으므로 서서히 증가한다. 그리고 S4 스트림 전송 시 2Mbps를 초과하므로 패킷 손실을 경험하여 전송률을 급격히 낮추게 되며 그 이후 300초까지 서서히 증가한다. 300초 이후, S1~S2 스트림이 제거된 경우에는 보다 빠르게 전송률이 증가하게 된다. 한편 TFRC에서 스트림 S1의 전송률은 초기에 급격히 증가하여 그림에는 표현이 되어 있진 않지만 약 320Kbyte까지 증가하게 된다. S2~S4 스트림이 추가된 경우에는 S1의 전송률은 급격히 감소하고 S2~S4의 전송률은 점차로 증가함을 알 수 있다. TFRC는 초기에 변동량이 심하게 변하며 그 이후에도 DBRC에 비해 전송률의 변화가 다소 심한 것을 알 수 있다. 결론적으로, DBRC는 대체로 전송률을 급격한 변동이 없이 부드럽게 변화시키기 때문에 멀티미디어 스트림 화질에 좋은 영향을 줄 것으로 판단된다.

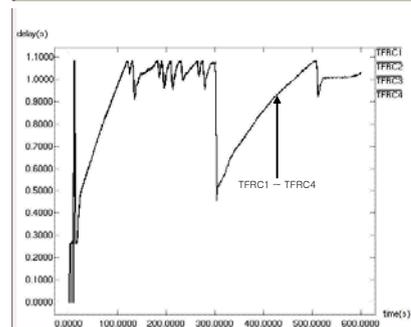
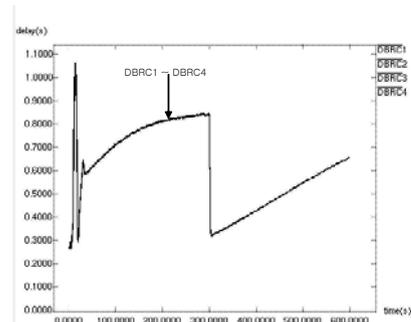
**지연 시간:** 라우터 큐가 200개의 패킷(크기=1Kbyte)을 저장한다고 할 때, 최대 대기 시간은(200\* 1Kbyte \* 8bit)/2Mbps=0.8 초라고 할 수 있다. 전파 시간을 포함한 전송 시간은 (0.003+1Kbyte\*8bit/5Mbps) \*2+ (0.25+1Kbyte\*8 bit/2Mbps)=0.2632 이다. 따라서 대기 시간과 전송 시간의 합인 최대 지연 시간은 약 1.06초 정도라고 할 수 있다. 그림 6 (b)는 지연 시간의 흐름을 보여주고 있는데, 4 개의 스트림이 거의 유사한 형태를 나타내고 있다. 본 실험에서 τ를 0.8로 정했으므로 DBRC 알고리즘은 S1~S4 스트림이 모두 생성한 후에는 300초까지 0.8초에 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고 300초 이후에 S1, S2가 제거된 이후에는 지연 시간이 급격히 감소한 후 점차 0.8초로 근접해 가는 것을 알 수 있다. TFRC는 지연 시간 변동이 다소 있으며, 전송률 증가로 인해 지연 시간이 다소 높게 나타나고 있다. 결론적으로, DBRC 알고리즘은 목표 지연 시간에 거의 수렴해가며 안정적인 형태를 나타내고 있다.

**패킷 손실:** DBRC는 초기에는 패킷 손실이 발생하지만 그 이후에는 패킷 손실을 볼 수 없었다. 그

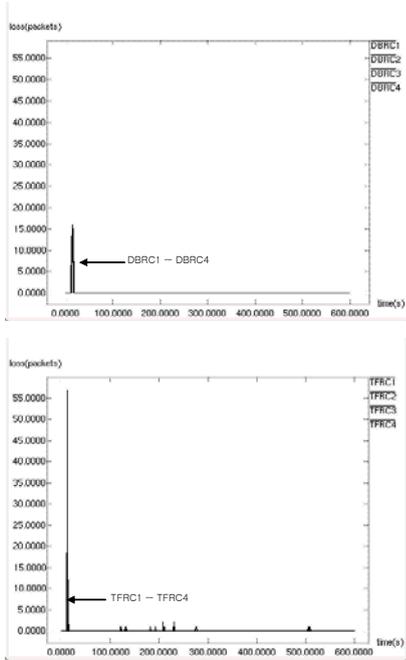
이유는 DBRC 알고리즘이 패킷 손실 전에 전송률을 조정하기 때문이다. TFRC는 병목지점 큐의 점유율을 예측하는 기법이 없으므로 계속 패킷 손실이 발생하는 것을 볼 수 있다. 결론적으로, DBRC는 패킷 손실 전에 혼잡 제어를 수행함으로써 패킷 손실을 줄일 수 있다.



(a) 전송률



(b) 지연 시간



(c) 패킷 손실

그림 6. 단일 라우터를 가진 시스템에서의 DBRC와 TFRC 알고리즘의 성능 비교

5.2. 다중 라우터를 가진 복잡한 토폴로지

그림 5는 다수 개의 라우터를 가지는 복잡한 토폴로지로서 점선으로 표현된 경로는 병목 현상 구간을 의미한다. 스트림과 TCP 트래픽은 각각 3초 단위로 시작하고 있다고 5.1절에서 언급하였다. 결국, 초기에는 라우터 3번과 4번사이가 병목 지점이 되며, 15초 이후에는 라우터 2번과 4번, 그리고 라우터 5번과 6번사이가 새로운 병목지점이 된다.

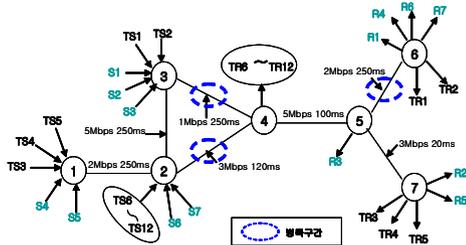
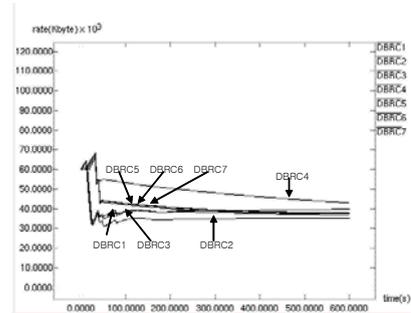


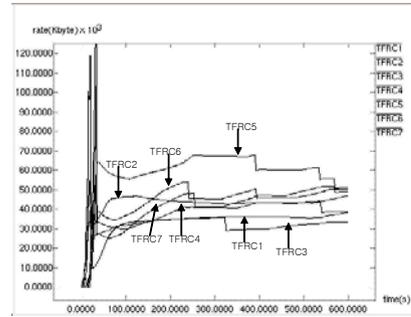
그림 5. 다중 라우터를 가진 네트워크 토폴로지

그림 7은 실험 결과를 보여주고 있는데, 이전 실험과 같이 DBRC의 전송률 변동량이 작고 지연 시간이 목표 지점에 수렴하는 것을 알 수 있다. 각

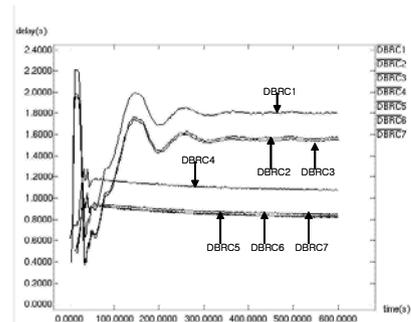
스트리밍 목표 지연 시간의 차이는 네트워크 경로가 상이하기 때문이다. 또한 DBRC는 초기에 패킷 손실을 경험한 이후에는 패킷 손실이 없다.

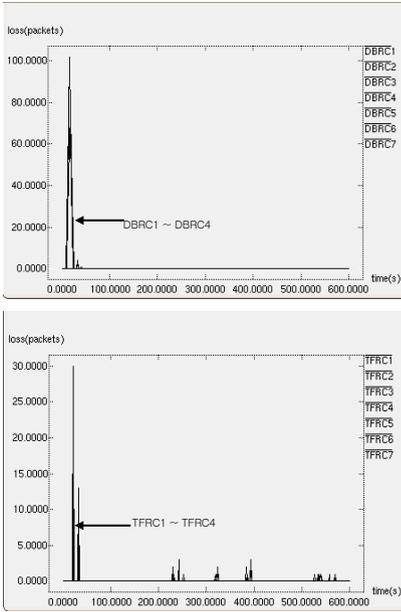


(a) 전송률



(b) 지연 시간





(c) 패킷 손실

그림 7. 다중 라우터를 가진 시스템에서의 DBRC와 TFRC 알고리즘의 성능 비교

## VI. 결론

본 논문에서는 지연 시간 분석을 통한 혼잡 예측을 바탕으로 멀티미디어 스트림의 전송률을 제어하는 혼잡 제어 알고리즘을 제시하였다. 즉, 지연 시간의 변화와 최대 지연 시간/현재 지연 시간의 비율을 통해 라우터 큐의 점유율이 목표치에서 일정하도록 전송률을 제어하였다. 시뮬레이션을 통해 TFRC와 비교 분석 결과, DBRC 알고리즘은 안정적인 전송률 변화, 거의 일정한 지연 시간, 적은 패킷 손실을 보여주고 있다. 이러한 결과는 멀티미디어 스트림과 같이 완만한 전송률 변화나 적은 패킷 손실을 요구하는 응용에 적합하다고 할 수 있다.

향후 연구 과제로서 실제 멀티미디어 스트림의 트레이스 데이터를 바탕으로 혼잡 제어를 수행했을 때 DBRC 알고리즘이 멀티미디어 재생 성능에 어떤 영향을 주는지를 파악할 계획이다.

## 참고 문헌

[1] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An End-to-End Rate-based Congestion Control Mechanism for Realtime Streams in the Internet," IEEE INFOCOMM, 1999.

[2] D. Sisalem and H. Schulzrinne, "The Loss-Delay Adjustment Algorithm: A TCP-Friendly Adaptation Scheme," Proceedings of NOS SDAV, 1998.

[3] V. Jacobson, "Avoidance and Control," ACM SIGCOMM, 1988.

[4] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, "Equation-Based Congestion Control for Unicast Applications," ACM SIGCOMM, 2000.

[5] L. Xu and J. Helzer, "Media Streaming via TFRC: An Analytical Study of the Impact of TFRC on User-Perceived Media Quality," IEEE INFO COM, 2006.

[6] S. Moon, J. Kurose, P. Skelly, and D. Towsley, "Correlation Packet Delay and Loss in the Internet," Technical Report, University of Massachusetts, Amherst, 1998.

[7] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, "TCP Vegas: End to End Congestion Avoidance on a Global Internet," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 13(8), Oct. 1995.

[8] J. Fonseca and Michael A. Stanton, "A Methodology for Performance Analysis of Real-Time Continuous Media Applications," DSOM, 2001.

[9] J. C. Bolot, "Characterizing End-to-End packet Delay and Loss in the Internet," Journal of High-Speed Networks, vol. 2, no.3, 1993.

[10] The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

송 용 현(Yong-Hon Song)

정회원



2004년 2월 : 한성대학교 정보 시스템공학과 졸업  
 2006년 8월 : 한성대학교 정보 시스템 석사  
 2006년 8월 ~ 현재 미지리서치 솔루션 사업팀 근무  
 <관심분야> 네트워크 프로토콜, 임베디드 시스템

김 남 윤(Nam-Yun Kim)

정회원



1992년 2월 : 서울대학교 컴퓨터  
공학과 졸업

1994년 2월 : 서울대학교 컴퓨터  
공학과 석사

2000년 2월 : 서울대학교 컴퓨터  
공학과 박사

1999년~2002년 2월 삼성전자 무  
선사업부 책임 연구원

2002년 3월 ~ 현재 한성대학교 정보공학부 조교수

<관심 분야> 멀티미디어 통신, 정보 보안

이 봉 규(Bong Gyou Lee)

정회원



1988년 2월 : 연세대학교 상경대  
학 경제학과 졸업

1992년 5월 : 코넬대학교 도시공  
학과 석사

1994년 1월 : 코넬대학교 도시공  
학과 박사

1997년~2004년 : 한성대학교 정  
보시스템공학과 교수

2005년 ~ 현재 : 연세대학교 정보대학원 교수

<관심분야> 텔레매틱스, 이동 통신 시스템