

다계층 멀티미디어 스트리밍을 위한 의미기반 패킷 스케줄링

(Semantics Aware Packet Scheduling for Optimal Quality Scalable Video Streaming)

원 유 집[†] 전 영 균^{**} 박 동 주^{**} 정 제 창^{***}
(Youjip Won) (Yeonggyun Jeon) (Dongju Park) (Jechang Jeong)

요 약 계층적 압축 기법을 지원하는 스트리밍 시스템 응용은 제한된 네트워크 자원의 효과적인 활용과 사용자가 느끼는 화질을 최대화 해야 한다. 이를 위해서는 적절한 전송 계층의 선택 및 패킷 인터벌 결정이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 계층이 갖는 화질의 영향력을 바탕으로 패킷 인터벌 결정 및 계층 선택 알고리즘 SAPS를 제시한다. 인터-프레임 압축 기법을 사용하는 비디오 스트리밍 시스템에서 패킷 손실의 감소만으로는 재생 화질의 향상을 이룰 수 없고, 재생 화질에 높은 영향력을 가진 패킷의 복원율이 높아질 때, 비로소 재생 화질이 향상된다. SAPS는 패킷의 의존성 그래프를 바탕으로 전송 계층을 결정하며, 이렇게 결정된 전송 계층은 사용자가 느끼는 서비스의 품질을 최대화 만든다. 또한, 선택된 계층에 대한 패킷의 인터벌 조절을 통해 계층 선택에 의한 효과가 유지되도록 한다. 실험을 통해 SAPS 알고리즘이 사용자가 느끼는 서비스 품질의 향상뿐만 아니라, 네트워크 자원 활용도 효과적으로 이루고 있음을 보여준다.

키워드 : MPEG, 스트리밍, VBR, 패킷 스케줄링, 가중적 스무딩, 멀티미디어, 왜곡, 계층별 압축방식

Abstract In scalable streaming application, there are two important knobs to tune to effectively exploit the underlying network resource and to maximize the user perceivable quality of service(QoS): layer selection and packet scheduling. In this work, we propose Semantics Aware Packet Scheduling(SAPS) algorithm to address these issues. Using packet dependency graph, SAPS algorithm selects a layer to maximize QoS. We aim at minimizing distortion in selecting layers. In inter-frame coded video streaming, minimizing packet loss does not imply maximizing QoS. In determining the packet transmission schedule, we exploit the fact that significance of each packet loss is different dependent upon its frame type and the position within group of picture(GOP). In SAPS algorithm, each packet is assigned a weight called QoS Impact Factor. Transmission schedule is derived based upon weighted smoothing. In simulation experiment, we observed that QoS actually improves when packet loss becomes worse. The simulation results show that the SAPS not only maximizes user perceivable QoS but also minimizes resource requirements.

Key words : MPEG, Streaming, VBR, Packet Schedule, Weighted Smoothing, Multimedia, Distortion, Scalable Encoding

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

인터넷을 통해 연결된 컴퓨터에 있는 비디오 데이터를 네트워크 반대편에 있는 컴퓨터에서 재생하는 것은 비디오 데이터의 전송을 통해 데이터를 확보한 뒤 이루어진다. 스트리밍 기술이 등장하기 이전에는 전체 비디오 데이터를 하드디스크 등에 전송받기 전까지는 데이터의 재생을 할 수 없었다. 비디오 데이터의 전송은 많은 시간과 전송 받은 데이터를 보관하기 위한 저장장치

· 본 연구는 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로서 HY-SDR 연구센터의 연구비 지원으로 수행하였습니다.

† 종신회원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 교수
yjwon@ece.hanyang.ac.kr

** 학생회원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과
junddar@ece.hanyang.ac.kr
alban@ece.hanyang.ac.kr

*** 정 회 원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 교수
jjeong@ece.hanyang.ac.kr

논문접수 : 2005년 10월 12일

심사완료 : 2006년 5월 31일

의 확보가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 멀티미디어 스트리밍 기술이 등장하였다. 스트리밍 기술은 재생할 데이터의 일부만을 전송받은 후, 전송받은 데이터를 바로 재생함으로써 기존의 방법으로는 할 수 없었던, 원격 비디오 회의, 인터넷 뉴스 등과 같은 실시간 방송을 가능하게 하였다. 또한, 사용자의 입력에 반응하는 인터랙티브(interactive)한 작업들도 수행할 수 있게 되었다.

인터넷을 통한 멀티미디어 스트리밍 기술은 인터넷망의 특징인 통계적 멀티플렉싱 기법이 갖는 네트워크 대역과 전송 지연시간의 보장을 받지 못하는 문제를 해결해야 하는 문제를 갖고 있다. FTP 또는 메일 서비스와 같이 시간적 구애를 받지 않는 환경에서는 인터넷망의 대역 변화와 패킷 지연시간이 크게 문제되지 않는다. 하지만, 멀티미디어 스트리밍의 경우 데이터의 데드라인이 존재하며, 대역과 지연시간에 대한 보장이 필요하다. 최근 몇 년간 이를 해결하기 위한 멀티미디어 스트리밍 기술이 연구되었지만 완벽히 스트리밍을 제공할 수 있는 방법은 찾지 못하였다.

멀티미디어 스트리밍 기술은 스트리밍 데이터를 전송하는 서버와 전송 받은 데이터를 재생하는 클라이언트로 구성된다. 이와 같은 모델에서 많은 클라이언트가 동시에 서비스를 요청하게 되면, 서버는 제한된 시스템/네트워크 자원으로 보다 많은 클라이언트에 서비스를 할 수 있어야 한다. 이렇게, 시스템 규모의 증가에 따른 성능의 저하 문제를 해결하기 위해서는 스트리밍 서버에서의 자원 활용 효율을 높여야만 한다. 인터넷과 같은 네트워크 환경에서 멀티미디어 스트리밍을 수행하기 위해서는 네트워크의 대역 변화와 패킷 전송 지연시간으로 인한 영향을 최소화하며, 시스템의 자원 사용의 효율이 높은 알고리즘이 반드시 필요함을 알게 되었다. 이후의 내용에서는 멀티미디어 스트리밍 시스템의 요구 사항을 만족시킬 수 있는 방법에 대해 살펴보겠다.

1.2 관련 연구

멀티미디어 스트리밍에서 사용자가 느끼는 서비스의 질(QoS)을 최대화하기 위한 많은 연구가 있었다. 서비스 품질의 최대화하기 위해서는 네트워크 트래픽의 버스트니스(burstiness)를 최소화함으로써 이를 수 있다는 것을 알게 되었다[1-6]. 버스트니스는 연구에 따라, 큐의 길이 변화에 대한 분산[1], 네트워크의 대역폭 요구량[2], 큐의 길이 변화 회수[3], 프리패칭 지연시간[6] 등으로 정의되었다. 이들 연구의 공통점은 패킷의 전송 간격을 조절함으로써 트래픽의 버스트니스를 최소화한다는 것이며, 전송과정의 패킷 손실이 최소화되도록 하는 방법을 연구하였다. 연구에서는 패킷의 손실을 최소화하는 방법을 찾는 과정에서 네트워크의 환경이 완벽하다

는 가정을 하고 있다. 하지만, 실제 네트워크 환경은 이러한 가정이 성립되지 않는다. 전송 지연의 경우 인터넷 상에 3초 간격으로 두 패킷을 전송한다면, 완벽한 네트워크 환경에서는 목적지에 3초의 간격을 유지하여 패킷이 도착할 것이다. 하지만, 실제 인터넷은 패킷의 전송 지연시간을 전혀 보장하지 않는다. 또한, 이들 논문은 스트리밍에 사용되는 패킷이 모두 같은 중요성을 가진다고 가정하고 있다. 전송과정에서 생긴 패킷 손실은 미디어 재생 시 서비스의 질에 나쁜 영향을 미친다. 하지만, 패킷의 손실이 서비스의 질에 미치는 영향은 패킷에 따라 다르다. 실험을 통해 패킷의 손실률이 증가함에도 불구하고 화질이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

계층적 압축 기법을 사용할 경우 단일계층으로 이루어진 미디어보다 복잡한 스케줄링 기법이 필요하다. 계층적으로 압축된 미디어에 대해서는 기존의 패킷의 인터벌 조절과 함께 전송 계층에 대한 선택을 해야 하기 때문이다. 다계층 멀티미디어의 스트리밍을 위한 연구로서 Nelakuditi 등은 런-랭스에 의해 재생 화질의 변화를 감소시키는 방법을 제안하였다[7]. 그의 연구에서는 미디어 재생 중 발생하는 화질의 변화가 사용자가 느끼는 서비스 질을 저하시키는 요인이라는 사실에 근거해 I-타입 패킷과 P-타입 패킷의 손실률을 최소화하도록 하는 계층 선택 기법을 제시하였다. Boyce 등은 프레임의 종류에 따른 패킷의 손실률을 연구하였다[8]. Cuetos 등은 네트워크 대역의 사용 효율을 최대화하면서 속도의 변화를 최소화하는 기법을 다이내믹 프로그래밍 기법을 통해 선보였다[9]. Kim 등은 계층의 그룹화를 통해 화질의 변화를 최소화하는 방법을 소개하였다[10]. Jiang 등은 전송성공 확률에 기반을 둔 패킷 선택 알고리즘을 제시하였다[11]. Liu 등의 연구에서는 전송할 계층의 수를 결정하는 알고리즘을 제시하였다[12]. 이들 논문에서 제시한 방법들은 시간에 따라 연속적으로 변하는 네트워크의 대역에 따라 적절한 계층의 선택을 통해 화질의 변화량 또는 손실을 최소화시킨다. 하지만, 이들의 연구도 패킷의 영향력에 대한 부분에서 모든 패킷이 같은 영향력을 가지고 있다는 가정을 사용한다. 이미 언급한 것처럼 각각의 패킷은 화질에 미치는 영향력이 서로 다르며, 이에 대한 고려가 필요하다. 패킷이 가지는 영향력을 고려한 연구로는 Chou 등이 제시한 패킷 스케줄링 기법이 있다[13]. 그의 연구에서는 패킷이 가지는 영향력을 재생 화질에 대해, 계층이 가지는 의존성 그래프를 사용함으로써 왜곡량을 정의하였고, 이를 통한 패킷 스케줄링 기법을 선보였다. Miao 등은 계층의 의존성 그래프 기법에 의거해 재생 화질의 예측값을 구한 패킷 스케줄링 기법을 선보였다[14]. 의존성 그래프를 통한 스케줄링 기법은 전송 계층 선택을 효과적으

로 하도록 하지만, 패킷의 인터벌 조정이 뒷받침 되지 않는다면, 충분한 성능을 얻을 수 없다. 보다 높은 성능을 얻기 위해서는 계층의 화질에 대한 영향력을 패킷 스케줄링 시 사용하도록 해야 한다.

Chebrolu 등은 Earliest Delivery Path First(EDPF)라는 개념을 이용하여, 여러 개의 무선 path가 있을 때 현재 패킷을 전송했을 때 걸릴 시간이 가장 작은 path로 패킷을 전송한다는 개념을 도입했다[15]. 다만 이 개념을 적용하기 전에 “Frame Discard” 작업을 하는데, 이는 해당하는 프레임 또는 패킷을 보냈을 때 deadline으로 인해 손실될 가능성을 EDPF의 개념을 이용하여 미리 프레임 선택 작업을 하게 된다. 수신측에서 가장 적은 손실이 있도록 Min Cost Drop(MC-Drop)이란 방법을 사용하여 성능을 개선하였다. Tu 등은 “rate vector(packet size)”와 “distortion matrix(프레임 드랍으로 인해 해당 프레임을 다른 프레임으로 대체했을 때의 MAE값을 matrix 형태로 표현한 것)”라는 두 개념을 도입했다[16]. 최근에 나온 Chakareski 등은 전형적인 Rate-Distortion Optimization에 관련된 내용을 바탕으로 다만 무선 환경을 고려해 uplink와 donwlink에서의 파라미터를 추가로 도입하였다[17].

인터넷을 사용한 스트리밍을 효과적으로 지원하기 위해 기존의 TCP/UDP 이외의 추가적인 프로토콜이 제안되었다. IETF(Internet Engineering Task Force)에서 소개한 RTP(Real Time Protocol)은 멀티미디어 데이터를 효과적으로 처리하기 위해 추가적인 기능을 담고 있다[18]. Rejaie 등에 의해 제안된 RAP(Rate Adaptation Protocol)에서는 TCP의 혼잡제어 기능을 포함한 멀티미디어 프로토콜을 선보였다[19].

지금까지 멀티미디어 스트리밍 시스템을 구성하는 요소들, 네트워크의 대역폭, 패킷 지연, 계층적 압축 기법 및 각종 프로토콜들에 대해 살펴보았다. 스트리밍 시스템의 성능은 각각의 요소들이 유기적으로 연동되었을 때, 비로소 최고가 될 것이다. 본 연구에서는 지금까지의 연구들이 해결하지 못한, 효과적인 전송 계층의 선택 및 패킷의 인터벌 조절 기법을 제안할 것이다.

이후의 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 패킷 전송 시의 인터벌 조정이 비디오의 화질에 어떤 영향을 미치는지에 대해 살펴본다. 3장에서는 논문에서 제안하는 SAPS 알고리즘에 대해 살펴본다. 4장에서는 실험을 통해 알고리즘의 성능을 살펴보겠다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 트래픽 스무딩

2.1 패킷 인터벌의 결정

네트워크에서 발생한 트래픽의 버스트니스는 클라이

언트측 서비스의 품질에 영향을 미친다. 패킷 손실이 발생할 확률은 인터넷에서의 대역폭의 변화에 따름을 알 수 있다. 대역의 변화는 버스트니스의 효과에 의한 영향이 크기 때문에, 트래픽의 버스트니스를 줄이기 위한 많은 방법들이 연구되어 왔다. 이들의 연구는 패킷의 간격 조절을 통해 트래픽의 버스트니스를 줄이는 방법을 기반으로 한다. 기존의 연구에서 트래픽의 버스트니스를 감소시킴으로써 서비스의 품질이 60%이상 향상될 수 있음을 보였다[20].

스무딩이란 패킷의 인터벌을 조절함으로써 클라이언트의 큐 길이, 네트워크의 대역 등을 조절하는 기술이다. 그림 1은 트래픽 스무딩의 개념을 설명하고 있다. 일반적인 비디오 스트림이 15fps의 프레임율을 가지고 있다고 했을 때, 하나의 픽처의 패킷들은 1/15초 간격으로 전송되어야 한다. 이를 하나의 GOP단위에서 보면 그림 1의 위쪽 그림과 같이 된다. 그림 1의 아래 그림에서는 GOP단위의 총 전송패킷들의 전송간격을 등간격으로 했을 때의 픽처들의 첫 패킷 전송시간을 나타낸다. 그림에서 B-픽처가 시간 축에서 이동한 모습을 볼 수 있으며, 이는 전송시점의 조절을 통해 이루어진다. 트래픽의 버스트니스를 줄임으로써 패킷 손실률의 감소 효과를 얻게 되는데, 이를 통해 클라이언트에 보다 높은 수준의 서비스 품질을 제공할 수 있다. 하지만, 패킷 손실률의 감소가 반드시 서비스의 품질을 향상시키는 것은 아니다. MPEG 등의 영상 압축 기술은 시간적 중복성을 제거하기 위해 움직임 보상의 기법을 사용한다. 움직임 보상기법을 사용하여 압축한 데이터를 복원하기 위해서는 반드시 움직임 보상에 사용한 프레임이 존재해야 한다. 만약, 움직임 보상을 위해 참조하는 픽처가 패킷 손실로 인해 복원되지 않았다면, 해당 픽처뿐만 아니라, 움직임 보상을 위해 손실된 픽처를 참조하는 픽처 또한 복원되지 못하며, 이러한 현상은 움직임 보상을 위

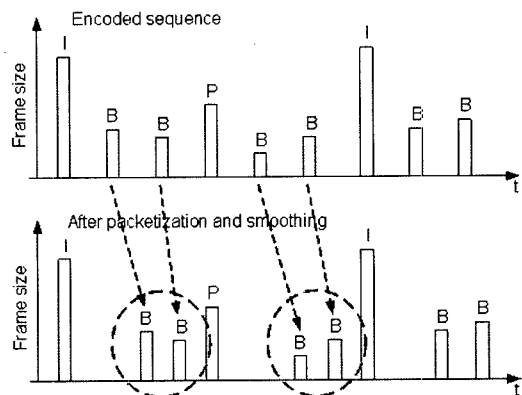


그림 1 패킷의 중요성에 따른 스무딩

해 손실된 픽처를 참조하는 픽처 모두에 일어난다. 패킷은 I-, P-, B-타입의 픽처를 포함한다. 각각의 픽처는 픽처의 타입에 따라 서로 다른 중요성을 가지고 있다. 따라서 패킷이 담고 있는 픽처의 종류에 따라 패킷이 갖는 중요성도 달라진다. 따라서 패킷이 담고 있는 픽처의 종류에 따른 패킷 스무딩 기법이 반드시 필요함을 알 수 있다.

트래픽 스무딩을 사용하게 되었을 때, B-타입 패킷간의 인터벌이 보다 촘촘해지는 현상이 발생하게 된다. 즉, I-타입 패킷들의 총 전송시간의 간격이 늘어나게 되는 것인데, 이로 인해 클라이언트의 큐에 도착했을 때, 버퍼 오버플로우로 인한 손실의 발생 확률이 적어진다.

Won 등의 연구 결과에 따르면, 비디오 스트리밍에서의 트래픽 스무딩의 중요성을 알 수 있다. 그의 연구에서는 압축 알고리즘, 패킷화 방법, 운영체제 수준에서의 패킷 스케줄링에 의해 스트리밍 시스템의 성능이 바뀌게 됨을 알려준다[21]. 그들은 IEEE 802.11b 환경에서 스트리밍 시스템의 성능에 대한 연구를 하였고, 실험을 통해 스무딩의 사용으로 서비스 품질을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다[1,3]. 한 가지 흥미로운 사실은 그들의 실험에서 패킷 손실률이 증가함에도 QoS의 향상이 있었다는 것이다. 그림 2는 패킷 손실률과 손실된 패킷이 갖는 패킷 크기의 합을 나타낸다. 그림에서 패킷의 손실률은 스무딩 기법을 사용한 경우가 더 높음을 알 수 있다. 하지만, 손실된 패킷의 크기는 스무딩을 사용하지 않은 경우가 많음을 알 수 있다. 패킷의 크기가 큰 경우 더 많은 데이터를 포함하므로, 패킷의 스무딩으로 인해 더 높은 수준의 서비스를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

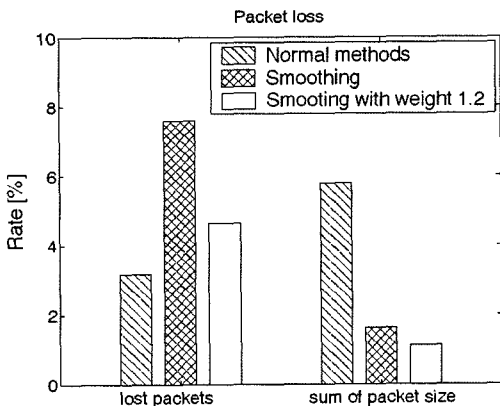


그림 2 손실된 패킷의 개수와 손실된 데이터양의 관계

2.2 패킷 손실의 영향

비디오 데이터의 전송과정에서 각각의 패킷의 손실이

화질에 미치는 영향은 패킷의 GOP에서의 위치에 의해 결정된다. 이것은 MPEG 비디오 데이터가 갖는 의존성에 의한 것으로, 비디오 데이터의 복원 시 참조하는 프레임 또는 계층을 필요로 하기 때문이다. 만약 비디오 데이터의 복원 과정에서 참조하는 계층이 없다면, 비디오의 복원은 이루어질 수 없다. MPEG에서 I-픽처는 GOP내의 모든 프레임이 참조하는 프레임이다. 따라서 I-픽처가 손실된 경우 해당 GOP의 모든 프레임은 폐기해야 하는 사태가 발생한다. P-픽처도 B-픽처와 다른 P-픽처의 복원에 사용되므로, GOP내에서 빠른 순번을 가진 P-픽처의 손실은 많은 프레임을 사용하지 못하게 만들게 된다.

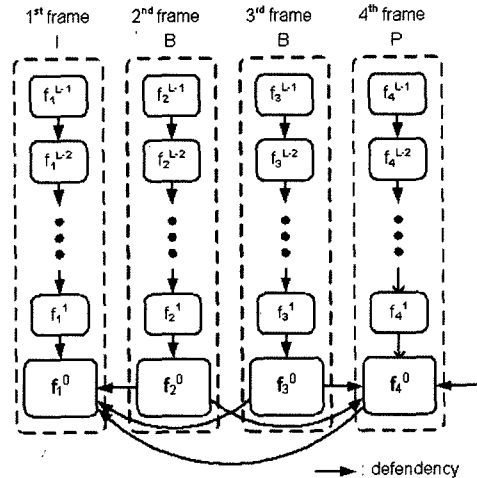


그림 3 MPEG-4 비디오에서의 의존성 그래프

그림 3은 MPEG-4 에서의 계층 간의 의존성을 나타내고 있다. 그림에서 f_v^l 은 v^{th} 프레임에서의 l^{th} 계층을 의미한다. 계층 f_v^0 은 GOP내에서 가장 앞에 위치하며 GOP내의 모든 계층의 참조를 받고 있다. 의존성의 관계는 '→' 기호를 사용하여 표현할 수 있으며, $f_v^l \rightarrow f_v^m$ 은 계층 f_v^l 이 f_v^m 을 참조하고 있음을 의미한다. 이러한 정의를 사용하여 집합 $P(f_v^l)$ 과 $C(f_v^l)$ 을 정의 할 수 있다. 부모 계층의 집합 $P(f_v^l)$ 은 계층 f_v^l 을 복원하기 위해 필요한 계층들의 모임이다. 계층 f_v^l 의 경우, $f_v^0 \in P(f_v^l)$ for $j=0, \dots, l-1$ 이다. 자식 계층의 집합 $C(f_v^l)$ 은 계층의 복원 시 f_v^l 이 필요한 계층의 모임이다. 집합 $C(f_v^l)$ 은 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$C(f_v^l) = \{f_v^j | f_v^j \in P(f_v^l)\} \tag{1}$$

계층 f_v^l 의 손실에 의해 나타나는 화질의 열화는 함수

$D(f_v^i)$ 에 의해 표현 할 수 있다. $D(f_v^i)$ 는 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)의 정의와 같다[22]. 식 (2)는 $D(f_v^i)$ 의 정의를 나타낸다.

$$D(f_v^i) = \frac{255^2}{W \times H \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} |\hat{f}_v^i(x,y) - f_v^i(x,y)|^2} \quad (2)$$

H 와 W 는 화면의 가로와 세로의 해상도를 나타내며, $\hat{f}_v^i(x,y)$, $f_v^i(x,y)$ 는 패킷의 손실이 발생한 데이터를 복원한 이미지와 손실이 발생하지 않았을 때 복원한 이미지의 (x,y) 좌표에서의 픽셀 값을 나타낸다. $D(f_v^i)$ 은 계층 f_v^i 이 성공적으로 복원되었을 때의 화질 향상에 대한 값을 나타낸다. 하지만, $D(f_v^i)$ 은 계층 f_v^i 이 가지는 의존성에 대해서는 충분히 표현하지 못하고 있다. 따라서 의존성을 표현하기 위한 새로운 함수가 필요하다. 계층이 갖는 화질에 대한 영향력을 표현하기 위해 $Q(f_v^i)$ 함수를 정의 한다. 이후 QIF(Quality Impact Factor) 함수라고도 부르겠다.

$$QIF: Q(f_v^i) = \sum_{f_j^i \in C(f_v^i)} D(f_j^i) \quad (3)$$

그림 4는 $Q(f_v^i)$ 을 어떻게 구하는지에 대한 예를 나타낸다. 각각의 상자는 " $D(f_v^i)/Q(f_v^i)$ "의 형태로 표현되어 있다. 식 (3)의 정의에 따르면, GOP 내에서는 I-픽처의 기본계층인 f_0^i 가 가장 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

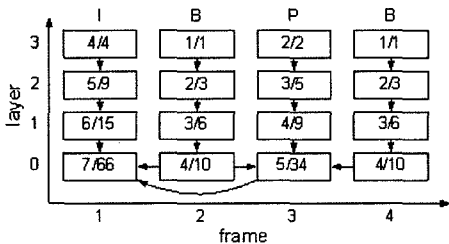


그림 4 $Q(f_v^i)$ 의 적용 예제

3. 의미기반 계층의 선택 및 패킷 간격 할당

3.1 문제 정의

FGS(Fine Granular Scalability) 압축 기법의 향상 계층은 네트워크의 대역에 의해 전송 여부가 결정된다. FGS 압축 방식을 사용한 미디어에서는 계층이 복원 될 때마다, 사용자가 느끼는 화질이 상승하게 된다. 따라서 가능하면 많은 향상계층을 복원할 수 있도록 전송하는 것이 패킷 스케줄러의 설계 목표이다.

네트워크의 가용 대역은 스트리밍 세션이 할당되고 서비스가 끝날 때까지 계속적으로 변한다. 시간 t 에서의

네트워크의 사용 가능 대역을 $\sigma(t)$ 라 하자. 시간 t 에서 스케줄러는 $\sigma(t)$ 를 초과하는 대역폭을 사용할 수 없다. 계층 f_v^i 의 전송 시간은 $F(f_v^i)$ 로 정의 할 수 있다. 마찬가지로 계층 f_v^i 이 차지하는 비트열의 크기는 $S(f_v^i)$ 로 나타낼 수 있다. 계층 f_v^i 의 전송 시간과 크기를 알고 있으므로, 계층 f_v^i 을 전송하는데 필요한 대역을 계산 할 수 있다. 계층 f_v^i 을 전송하는데 필요한 대역은 식 4를 사용하여 계산할 수 있다.

$$b(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sum_{F(f_v^i) \in (t-\tau, t)} S(f_v^i)}{\tau} \quad (4)$$

위의 식으로부터 우리는 스케줄러가 시간 t 에 전송 할 수 있는 대역을 구할 수 있다.

$$b(t) < \sigma(t), \quad 0 \leq t \quad (5)$$

이제, 주어진 대역폭의 제한 조건으로부터 전송을 하기 위한 계층의 집합 O 를 구할 차례이다. 집합 O 를 구하기 전에 먼저 고려해야 할 사항이 있다. 실제 스트리밍 시스템에서는 모든 비디오 시퀀스에 대해 최적의 계층 선택을 할 수 없다는 것이다. 따라서 MPEG의 GOP가 가지는 특징을 고려하면, 최적에 가까운 해답을 얻을 수 있다. MPEG 비디오는 GOP 단위로 의존성이 갱신되는 구조를 가진다. 따라서 최적의 전송 계층의 집합 O^* 는 GOP내에서의 최적 전송 계층의 합으로 표현이 가능하다. O^* 는 식 (6)과 같이 정의 된다.

$$O^* = \{O_z^* | z = 1, 2, \dots\} \quad (6)$$

이제, O_z^* 를 구함으로써 최적의 스케줄을 얻을 수 있다. 계층 f_v^i 의 전송과정에서 손실이 발생한다면, 클라이언트에서는 $Q(f_v^i)$ 만큼의 화질 손실이 발생하게 된다. f_v^i 의 손실은 집합 $C(f_v^i)$ 에 속한 모든 계층에 영향을 미치며, 이는 식 3에 의해 $Q(f_v^i)$ 과 같다. 따라서 클라이언트측 재생 품질의 함수 $I(O_z)$ 는 서버에서 전송하는 계층에 대해 손실이 발생한 계층의 $Q(f_v^i)$ 을 제외한 것과 같다. 식 (7)은 이러한 관계를 표현한다.

$$I(O_z) = \sum_{v=0}^{V-1} \sum_{i=0}^{L-1} D(f_v^i) - \sum_{f_j^i \in O_z, f_j^i \in C(f_v^i)} Q(f_j^i) \quad (7)$$

식에서, $\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{i=0}^{L-1} D(f_v^i)$ 는 서버에서 전송한 계층이 갖는 화질을 의미하며, $\sum_{f_j^i \in O_z, f_j^i \in C(f_v^i)} Q(f_j^i)$ 는 전송과정에서 발생한 계층의 손실에 해당하는 값이다. 여기서 $f_j^i \in C(f_v^i)$ 는 부모 계층에서 발생한 계층의 손실을 중복하여 계산하지 않도록 하는데 사용된다. 최적의 전송 계층의 집합 O_z^* 은 $I(O_z)$ 가 최대값을 갖는 O_z 이다. 이 관계로부터

최적의 전송 계층 집합의 조건을 얻을 수 있다.

$$O_2^* = \max \{O_2 : I(O_2)\} \quad (8)$$

집합 O_2^* 는 식 (7)의 정의에 의해 최대의 $Q(f_i^j)$ 을 갖는 계층부터 차례대로 선택함으로써 찾을 수 있다. 이제, 계층 선택을 위한 조건인 대역폭의 제한 조건에 대해 살펴보자. 대역폭의 제한 조건은 식 (5)로부터 얻어 낼 수 있다.

$$\sum_{f_i^j \in O_2^*} S(f_v^j) < \int_{t=t_1}^{t_1+w} \sigma(t) dt \quad (9)$$

여기서, t_1 은 GOP의 시작 시간을 나타내며, w 는 GOP가 지속되는 시간을 나타낸다. 따라서 $\int_{t=t_1}^{t_1+w} \sigma(t) dt$ 는 해당 GOP내에서 전송 할 수 있는 데이터의 양을 의미한다.

패킷간의 인터벌은 전송 계층의 집합 O_2^* 의 계층으로부터 얻는다. GOP를 이루는 계층들은 모두 의존성을 가진다. 만약, 계층 f_v^j 이 손실될 확률이 $p = \Pr\{loss\ of\ f_v^j\}$ 로서 모두 같다고 가정한다면, 계층 f_v^j 이 성공적으로 복원될 확률은 부모 계층의 원소의 수 n 에 의해 결정되며, $(1-p)^n$ 과 같을 것이다. 계층을 이루는 패킷은 계층과 마찬가지로 의존성을 가지므로, 패킷이 클라이언트에서 성공적으로 복원될 확률은 $(1-p)^n$ 와 같을 것이다. 패킷의 손실 확률은 큐 이론으로부터 커널의 큐에 입력 될 때의 패킷 간격에 의해 영향을 받는다. 여기서 우리는 커널의 큐에 입력되는 패킷의 간격과 $\{Q(f_i^j)\}^e$ 이 비례관계에 있다는 가정을 하겠다. 즉, 커널과 라우터의 큐를 통과하면서 나타나는 패킷 손실의 함수는 $\{Q(f_i^j)\}^e$ 에 의해 표현할 수 있다는 의미이다. 그림 5는 부모 계층의 수 $n(P(f_v^j))$ 에 따른 복원 확률의 변화를 보여주고 있다.

$$\Pr\{loss\ of\ f_i^j\} \propto \{Q(f_i^j)\}^e \quad (10)$$

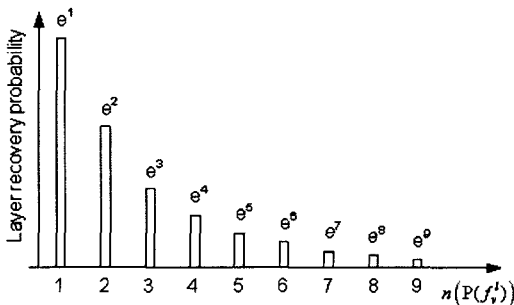


그림 5 부모 계층의 수 $n(P(f_v^j))$ 에 따른 복원 확률의 변화

식 (10)으로부터 계층을 이루는 패킷의 전송 간격을 구할 수 있게 되었다. 즉, GOP내에서 $\{Q(f_i^j)\}^e$ 의 값과 계층이 비트열에서 갖는 길이 $S(f_v^j)$ 에 따라 계층에 해당하는 패킷의 전송 간격을 할당하는 것이다. 계층의 전송 간격은 식 (11)과 같다.

$$\tau(f_v^j) = \frac{N \times w \times S(f_v^j) \times \{Q(f_v^j)\}^e}{\sum_{f_i^j \in O_2^*} S(f_v^j) \times \{Q(f_i^j)\}^e} \quad (11)$$

여기서, $\tau(f_v^j)$ 는 계층 f_v^j 가 할당 받은 전송 간격이며, w 는 GOP의 지속 시간이다. 패킷의 크기는 $\text{mod}(S(f_v^j), MTU)$ 에 의해 구할 수 있고, 패킷의 크기로부터 패킷 간격을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{packet interval} = \tau(f_v^j) \times \frac{\text{mod}(S(f_v^j), MTU)}{S(f_i^j)} \quad (12)$$

지금까지, 계층이 QoS에 미치는 영향으로부터 최고의 QoS를 갖도록 하는 계층의 선택 방법을 살펴보고, 선택된 계층이 네트워크의 대역을 초과하지 않도록 제한 조건을 수립하였다. 마지막으로 선택된 전송 계층으로부터 패킷의 인터벌을 구하였다. 이제, 패킷 인터벌을 바탕으로 패킷 스케줄러를 작성한다.

3.2 의미기반 패킷 인터벌과 계층 선택 알고리즘

SAPS 알고리즘은 계층적 압축 기법을 사용하는 스트리밍 서버에 적용할 수 있는 알고리즘으로, 계층의 선택에서부터 패킷의 전송 간격 할당까지를 수행하는 알고리즘이다. 그림 6은 SAPS 알고리즘을 나타내고 있다.

```

SAPS(e)
1  k ← 1
2  for i ← 1 to N
3    do F ← GOP[i]
4    for j ← 1 to F.layers
5      do A[k] ← F[j]
6      k ← k+1
7
8  SORT-QoS(A)
9
10 sum ← 0
11 for i ← 1 to GOP.layers
12   do sum ← sum + A[i].size
13   if c < sum
14     then break
15   else B[i] ← A[i]
16
17 RORDER(B)
18
19 total ← 0
20 for i ← 1 to B.layers
21   do total ← total + ((B[i].size) (B[i].QIF)^e)
22
23 k ← 1
24 for i ← 1 to B.layers
25   do d ← [B[i].size / MTU]
26   for j ← 1 to d
27     do P[k] ← S_LICR(B[i], j)
28     P[k].time ← ((B[i].size) (B[i].QIF)^e) / (d × total × T × GOP.frames)
29     k ← k+1
30
31 return P
    
```

그림 6 제안하는 SAPS 알고리즘

SAPS 알고리즘은 인수로서 앞 절에서 언급한 $\{Q(f_i^*)\}^e$ 에서의 지수 e 를 입력 받는다. 지수 e 를 사용하여 GOP 내에서의 패킷 전송 간격을 할당한다. 알고리즘은 기능에 의해 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 1-7라인까지는 GOP내의 모든 픽처들의 계층의 데이터를 배열 A에 저장하는 작업을 수행한다. 배열 A로의 복사가 끝난 이후, 8라인에서는 배열 A의 내용을 $Q(f_i^*)$ 에 의해 정렬하는 과정을 거친다. 이 과정은 O_2^* 를 찾기 위해 필요한 것으로, 그리디(greedy) 접근방법을 사용하여 최적의 전송 계층을 찾아낸다. 10-17라인은 GOP에서 전송에 사용할 수 있는 네트워크의 대역폭 c 에 맞추어 계층을 선택하는 루틴을 담는다. 네트워크의 가용 대역폭은 시스템에 의해 측정되며, 변수 c 에는 GOP 지속 시간 동안 전송할 수 있는 데이터의 양이 기록되어 있다. 이렇게 얻은 배열 B가 우리가 찾고자 하는 O_2^* 이다. 하지만, 이렇게 얻어낸 배열 B에는 QoS의 크기에 따라 정렬이 되어 있으므로, 실제 전송을 하기에는 적합하지 않다. 배열 B를 재정렬 없이 바로 전송할 경우 클라이언트는 추가적인 버퍼를 사용하여 계층을 정렬해야만 하는 문제가 생기게 된다. 따라서 복원의 순서에 맞도록 계층을 재정렬 하는 것은 필수적이다. 16라인에서 계층의 복원을 담당하는 함수 Reorder(B)를 호출함으로써 계층을 정렬한다. 17-29라인은 전송을 위해 선택된 계층 O_2^* 를 패킷으로 변환하는 부분으로, 19-21라인에서는 GOP의 지속시간 w 에 맞추어 패킷의 인터벌을 할당하기 위해 정규화를 하기 위한 준비를 한다. 23-24라인은 계층의 $Q(f_i^*)$ 와 계층의 크기에 따라 패킷의 인터벌을 할당하는 루틴이다. 계층 f_i^* 은 27-28라인의 Slice() 함수에 의해 패킷으로 나뉜 후 인터벌을 할당 받는다. 나뉜 패킷들은 패킷을 담은 배열 P에 저장되어 SAPS 알고리즘의 호출자에게 되돌려진다.

4. 실험 및 분석

4.1 실험환경

기존의 알고리즘들은 각기 다른 네트워크 환경을 고려한 패킷 전송 알고리즘을 제안했다[14-17]. 그 때문에 제안하는 알고리즘과 직접적인 비교를 통한 결과 검증할 수가 없다. 위 4편의 논문과 SAPS의 가장 큰 차이는 두 가지가 있다. 첫째, 프레임을 기본 단위로 하는 위 3편과는 달리, 제안하는 알고리즘은 계층 데이터를 주 단위로 하고 있다. 둘째, SAPS 알고리즘은 패킷 전송 간격을 조절한다는 점이 큰 특징이다.

앞에서 우리는 적절한 계층의 선택과 패킷의 전송 간격의 조절을 통해 사용자가 느끼는 QoS를 향상시킬 수

있다는 것을 알게 되었다. SAPS 알고리즘은 계층의 선택과 패킷의 전송 간격을 조절하여 사용자가 느끼는 QoS를 향상시키도록 설계되어 있다. 따라서 실험을 통해 서버에서의 전송 간격 조절이 사용자의 QoS에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 관찰이 필요하다.

실험의 진행은 ns-2상에서 이루어졌다[23]. 논문에서 제안한 SAPS 알고리즘은 C/C++ 언어를 사용하여 구현하였고, ns-2에 포함하여 실험을 하였다. SAPS에서 생성한 패킷은 RAP 프로토콜을 사용하여 클라이언트까지 전송한다. 비디오 데이터는 MPEG-4의 FGS 압축 기법을 사용하여 작성한 데이터와 같은 통계적 특징을 갖는 의사 데이터를 사용하였다.

TCP와 UDP 패킷에 의해 네트워크의 혼잡한 상황에서 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 추가적인 트래픽을 발생시키는 노드가 존재한다. 실험에 사용된 네트워크의 구조는 그림 7과 같으며, 네트워크의 대역폭은 노드 0과 1 사이의 링크에서 측정하였다. SAPS 알고리즘을 사용하여 생성한 패킷은 RAP 프로토콜을 사용하여 전송하였다. 실험에 사용한 파라미터들은 표 1에 나타나 있다.

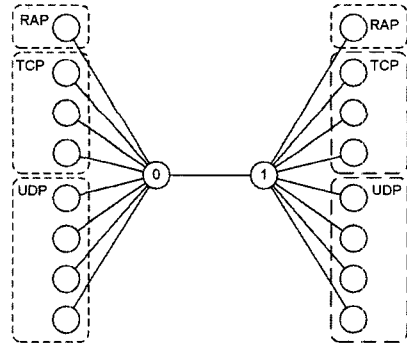


그림 7 실험에 사용된 네트워크 구조

표 1 실험에 사용한 파라미터들

항목	값
실험 진행 시간	3600 초
GOP Pattern	N = 15
P 프레임 간격(M)	M = 3
프레임 레이트	30 프레임/초
비디오 비트레이트	500 Kbps
대역폭	3 Mbps
프리패치 지연시간	5초
병목지점 큐길이	50 packet
TCP 노드의 수	16개
TCP 프로토콜	TCP Reno
TCP 트래픽 생성 어플리케이션	FTP
UDP 노드의 수	5개
UDP 프로토콜	UDP
UDP 트래픽 생성 어플리케이션	CBR traffic
각각의 UDP가 사용하는 대역	25.6Kbps

4.2 성능 분석

그림 8은 성공적으로 복원된 패킷과 손실된 패킷의 비율을 나타낸다. 그림 8(a)는 일반적인 스트리밍 시스템의 경우를 나타낸다. 복원에 사용된 패킷과 손실된 패킷 모두 B-타입>P-타입>I-타입의 순서로 패킷의 수가 나타나 있는데, 비디오 데이터의 GOP의 구조에 의한 것이다. 비디오 데이터의 GOP는 N=15, M=3인 GOP 패턴을 가지며, 한 개의 GOP에는 1개의 I-픽처, 4개의 P-픽처와 10개의 B-픽처가 존재하게 된다. SAPS 알고리즘을 사용한 그림 8(b)-8(d)의 경우에는 일반적인 스트리밍 알고리즘과 비교하여 패킷 손실이 현저히 줄었는데, 이는 알고리즘 자체에서 네트워크의 가용 대역만큼의 패킷만을 전송하기 때문이다. 한 가지 고려해야 할 사항은 인수 e 의 값에 따라 패킷의 타입에 따른 수가 변한다는 것이다. 그림 8(b)에서는 일반적인 스트리밍 시스템과 비슷한 수의 패킷이 분포하고 있는데 비해, 그림 8(c), 8(d)에서는 B-타입 패킷의 수가 P-타입 패킷의 수보다 적게 나타났음을 알 수 있다. 이러한 현상은 인수로 사용하는 e 의 값에 따라서 I-, P-, B-타입 패킷의 전송간격을 결정하기 때문이다. e 의 값이 커질 경우 $Q(f_v)$ 의 값이 큰 I-타입 패킷은 긴 패킷 인터벌을

할당받게 되고, e 의 값이 작아질 경우 $Q(f_v)$ 의 값이 큰 I-타입 패킷은 짧은 패킷 인터벌을 할당 받게 된다.

그림 9는 커널 버퍼에서 블록킹된 패킷의 인터벌에 따른 분포를 나타내고 있다. 그림 9(b)-9(d) 전체에서 많은 수의 패킷이 인터벌 0.004초와 0.01초 일 때 손실 되었음을 알 수 있다. 전체 패킷의 분포가 0.01초의 물려 있었기 때문이다. 그림 9(b), 9(c)에서는 손실된 패킷의 수가 매우 적었는데, 특히 I-타입의 패킷의 손실이 전혀 발생하지 않았다. 이 결과를 통해 큰 $Q(f_v)$ 값을 갖는 I-타입 및 P-타입 패킷들이 복원의 성공 확률이 높아졌음을 알 수 있다.

그림 10은 커널 큐에서 블록킹된 패킷의 크기에 분포를 나타낸다. 그림 10(a)의 결과에서 손실된 I-타입 패킷은 크기에 관계가 없음을 알 수 있다. P-, B-타입의 경우에는 각각 400바이트와 200바이트에서 많은 패킷이 손실된 것으로 나타났는데, 이는 압축기에서 생성한 패킷의 평균값과 일치한다. 결국 그림 10(a)의 결과에서는 패킷의 크기에 따른 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 그림 10(b), 10(c)에서는 I-타입 패킷의 손실이 없었으며, P-, B-타입의 경우에는 400바이트와 200바이트에서 많은 패킷이 손실되었음을 알 수 있다. 그림 10(d)에서는

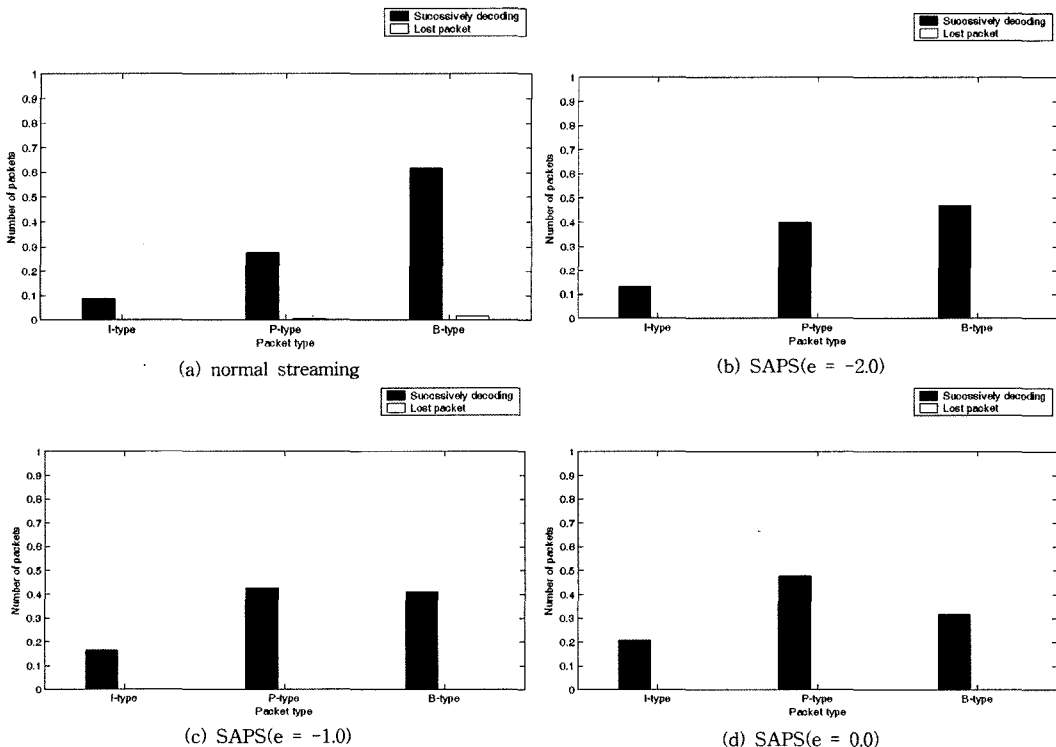


그림 8 영상 복원에 성공한 패킷과 손실된 패킷에 대한 통계
SAPS(e = X)는 SAPS 알고리즘의 인수로 사용된 값을 의미함

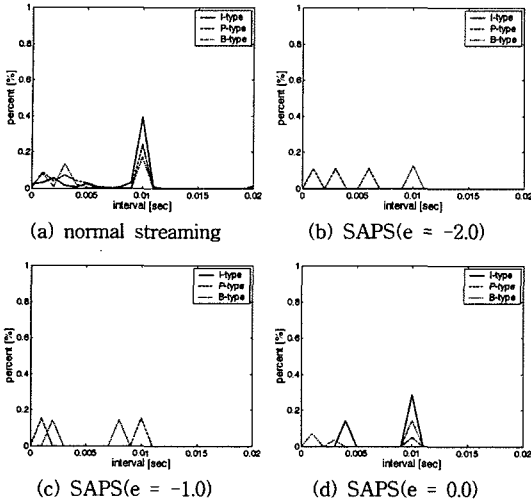


그림 9 커널 큐에서 블록킹된 패킷의 인터벌에 따른 분포

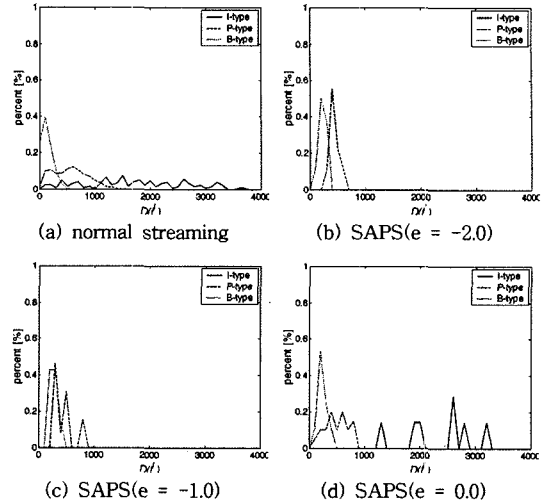


그림 11 커널 큐에서 블록킹된 패킷의 $D(v)$ 에 따른 분포

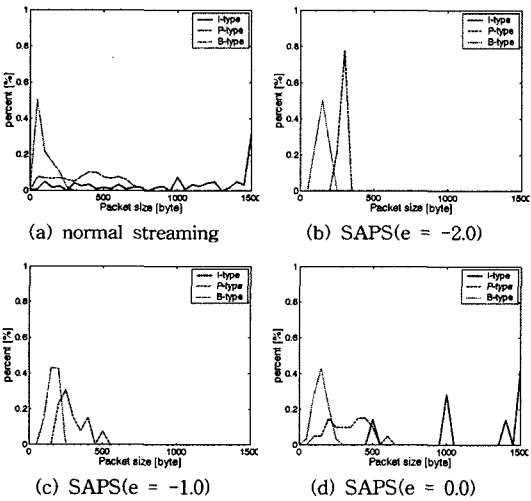


그림 10 커널 큐에서 블록킹된 패킷의 크기 따른 분포

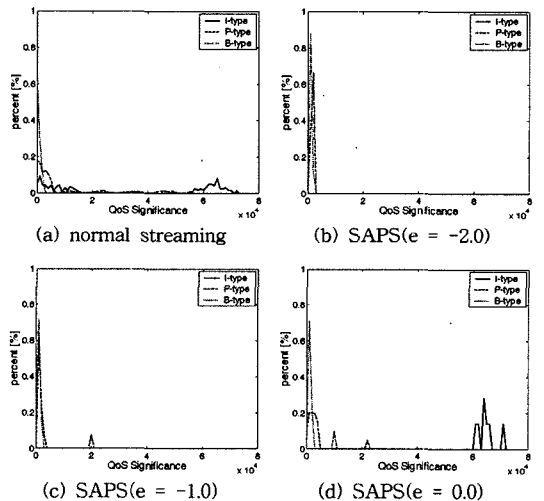


그림 12 커널 큐에서 블록킹된 패킷의 $Q(v)$ 에 따른 분포

I-타입 패킷의 경우 패킷의 크기가 500, 1000, 1500인 경우에 패킷의 손실이 나타난 것을 확인할 수 있다. I-타입 패킷의 경우 일반적으로 높은 $Q(v)$ 값을 갖고며, 인수 e 의 값이 커짐에 따라 I-타입 패킷의 손실 확률이 높아지기 때문에 나타나는 결과이다.

그림 11은 커널 큐에서 손실된 패킷의 $D(v)$ 값에 따른 분포를 나타내고 있다. 그림 11(a)의 결과에서는 일반적인 스트리밍의 경우는 손실된 패킷이 $D(v)$ 에 상관없이 같은 비율로 손실이 발생하므로, $D(v)$ 의 영향을 받지 않고 있음을 확인할 수 있다. 그림 11(b), 11(c)의 경우 패킷의 손실은 $D(v)$ 값이 500인 경우를 중심으로 몰려 있음을 볼 수 있다. 이는 손실된 P-, B-타입

패킷의 $D(v)$ 이 작은 값을 갖기 때문이다. 그림 11(d)에서는 I-타입 패킷의 손실이 $Q(v)$ 의 값이 큰 경우에 발생했음을 보이고 있다. $Q(v)$ 값은 $D(v)$ 의 값이 큰 경우에 크기 때문이다.

그림 12는 커널 큐에서 블록킹된 패킷에 대해 QIF의 값을 기준으로 분포 함수를 나타낸 것이다. 이 실험의 결과에서 알고리즘의 설계 의도와 일치하고 있음을 알 수 있는데, 알고리즘의 인수 e 에 따라 커널에서 손실된 패킷 수의 분포가 변하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 12(a)에서는 QIF와 상관없이 패킷의 손실이 발생하고 있으며, 그림 12(b), 12(c)에서는 P-, B-타입 패킷의 손실률이 높고, 그림 12(d)에서는 QIF 값이 큰 I-타입 패킷의 손실률이 높게 나타난 것이다. 이로써, 알고리즘

에서의 패킷의 중요성 $Q(f_v)$ 에 의한 패킷 간격 할당 정책이 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 커널 큐에서의 손실된 패킷의 수를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림 13(a)에서는 관찰 구간에서 많은 수의 패킷 블록킹이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 반면 SAPS 알고리즘을 사용하는 그림 13(b)-13(d)에서는 관찰 구간 내에서 패킷 손실이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

그림 14에서는 클라이언트에서 측정된 $Q(f_v)$ 의 변화이다. 그림에서 $Q(f_v)$ 의 평균값은 클라이언트측에서 느끼는 QoS 정도를 나타낸다. 평균값이 크게 나타나는 것은 단말기에서의 재생 화질의 질이 향상됨을 의미하므로, SAPS 알고리즘이 사용자에게 보다 높은 서비스 품질

을 제공할 수 있음을 알 수 있다.

그림 15는 서버에서 출력되는 패킷들의 $Q(f_v)$ 와 클라이언트에 입력되는 패킷들의 $Q(f_v)$ 값을 함께 나타낸 것이다. 그래프에서 $Q(f_v)$ 의 평균값은 1이 되도록 설정하였는데, 함수의 평균값으로 나누었기 때문이다. 그래프에서 클라이언트의 $Q(f_v)$ 의 모양이 서버에서 전송한 것과 다르게 나타나는데, 이는 패킷의 전송과정에서 라우터에 의한 지연 등으로 인해 발생하는 현상이다. 따라서 서버와 클라이언트측의 $Q(f_v)$ 의 모양이 많이 다르다면, 스케줄러에 의한 효과가 크지 않다는 것을 의미하게 된다.

그림 16은 그림 15에 대해 서버의 $Q(f_v)$ 함수와 클라이언트의 $Q(f_v)$ 함수에 대한 상관관계를 나타낸 것이다. 상관관계는 두 함수의 비슷한 모양을 가질 때, 높은 값을 갖는 특징이 있다. 따라서 상관관계의 값을 살펴봄으로써 스트리밍 서버의 성능을 평가할 수 있다. 그림 16(a)는 $r=0$ 에서 11의 피크값을 가지고 있다. 반면, SAPS 알고리즘을 사용하는 그림 16(b)-16(d)에서는 $r=0$ 에서 50 정도의 피크값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 서버에서의 스케줄링이 잘 적용됨을 의미한다.

그림 17에서는 스트리밍 서버가 사용하는 네트워크의 대역을 나타내고 있다. 앞서 살펴본 그림 14(a)의 경우에서 스트리밍 서버가 제공하는 서비스의 품질은 SAPS 알고리즘을 사용한 경우와 같았다. 하지만, 그림 17(a)를 살펴보면, 같은 서비스의 품질을 유지하는데 SAPS 알고리즘을 사용한 경우보다 많은 네트워크의 대역폭을 사용하고 있음을 알 수 있다. 즉, 대역의 낭비가 있다는 것을 의미한다.

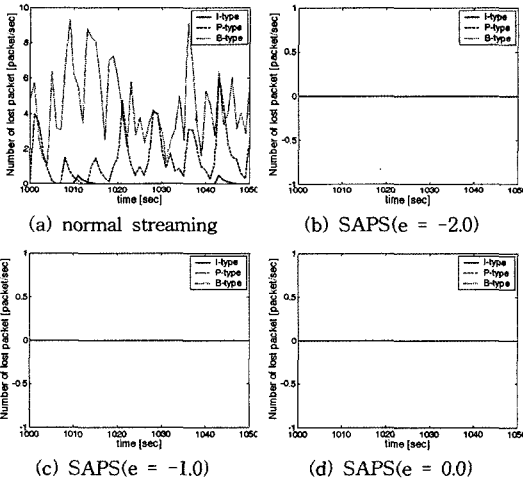


그림 13 시간에 따른 커널 큐에서의 패킷 손실

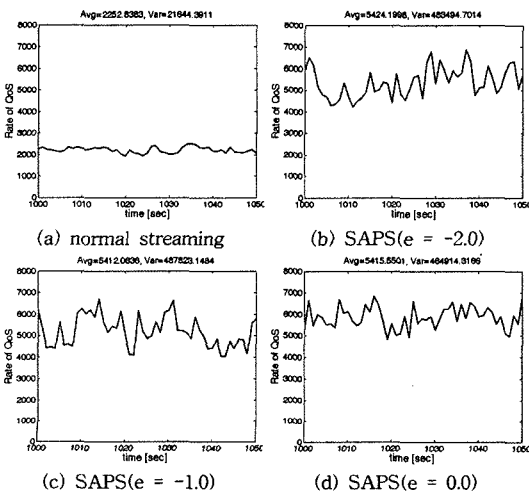


그림 14 시간에 따른 클라이언트의 $Q(f_v)$

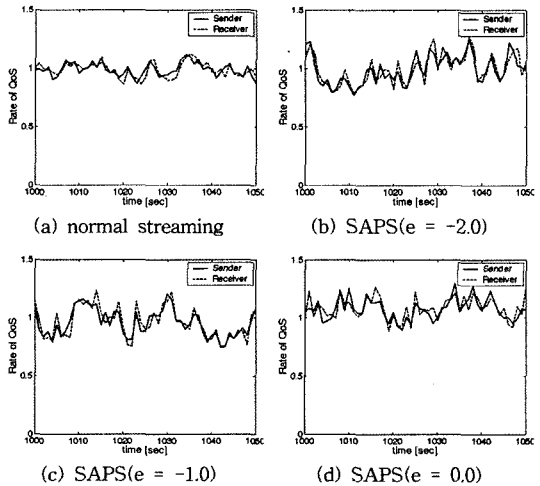


그림 15 시간에 따른 서버의 전송 $Q(f_v)$ 와 클라이언트의 수신 $Q(f_v)$ 의 변화량

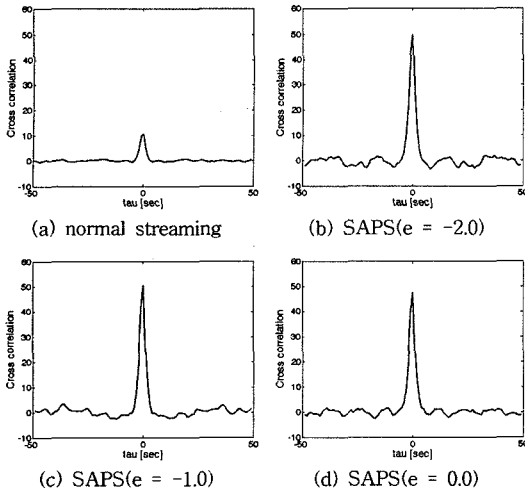


그림 16 서버측 $Q(f_v)$ 와 클라이언트측 $Q(f_v)$ 함수의 상관관계

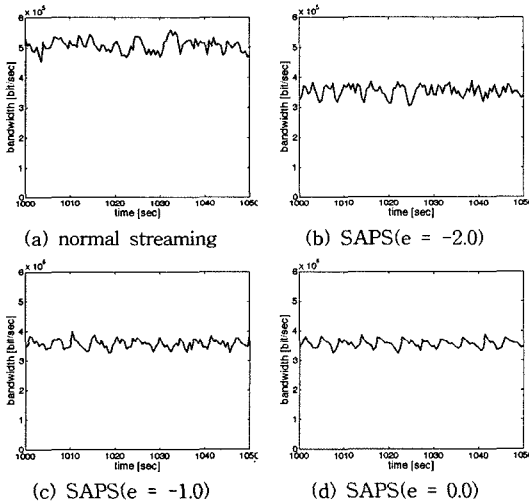


그림 17 스트리밍 서버가 사용하는 대역의 변화량

5. 결론

현재의 인터넷 환경과 같이 네트워크의 대역폭과 패킷의 지연 시간이 보장되어 있지 못한 환경에서 네트워크를 통해 스트리밍 서비스를 제공하기 위해서는 네트워크 자원을 효율적으로 사용해야 한다. 대역폭 변화에 효과적으로 적응하는 위한 방법으로서 계층적 압축 방식이 필요함을 알았고, 계층적 압축 방식의 이점을 효과적으로 사용하기 위한 스케줄러의 필요성도 알게 되었다.

본 연구에서 제안한 SAPS 패킷 스케줄링 알고리즘은 네트워크 자원에 대한 보장이 없는 인터넷 환경에서 효율적인 스트리밍을 지원할 수 있다. 알고리즘의 의존

성 그래프를 이용한 전송 계층의 선택과 패킷의 인터벌 할당 정책은 클라이언트의 비디오 재생 시 사용자에게 보다 높은 서비스 품질을 제공할 수 있도록 하며, 그와 함께 네트워크와 커널 큐에서 발생할 수 있는 패킷의 손실을 최소화시킨다. 실험을 통해 논문에서 제안하는 알고리즘의 네트워크 자원에 대한 사용 효율이 높음을 알았으며, 사용자가 인지할 수 있는 화질을 향상시키고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 SAPS 알고리즘은 네트워크 자원에 의해 많은 제약을 받는 스트리밍 환경에서 응용될 수 있으며, 또한, 대규모 스트리밍 서버 시스템과 같이 네트워크 및 시스템 자원의 사용 효율이 중요한 응용에 효과적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] J. D. Salehi, Z.-L. Zhang, J. Kurose, and D. Towsley, "Supporting Stored Video: Reducing Rate Variability and End-to-End Resource Requirements through Optimal Smoothing," *IEEE Transactions on Networking*, Vol.6, No.4, pp. 397-410, Aug. 1998.
- [2] R.-I. Chang, M.-C. Chen, J.-M. Ho, and M.-T. Ko, "An Effective and Efficient Traffic Smoothing Scheme for Delivery of Online VBR Media Streams," in *Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom)*, March 1999.
- [3] S. S. Lam, S. Chow, and D. K. Y. Yau, "An Algorithm for Lossless Smoothing of MPEG Video," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 24, No.4, pp. 281-293, 1994.
- [4] W.-C. Feng and J. Rexford, "Performance Evaluation of Smoothing Algorithms for Transmitting Pre-recorded Variable-Bit-Rate Video," *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol.1, No.3, pp. 302-312, Sept. 1999.
- [5] Z. Guo, J. Ni, and T. Yang, "Traffic Smoothing and Bandwidth Allocation for VBR MPEG-2 Video Connections in ATM Network," in *Proceedings of Fourth International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 554-561, Sept. 1995.
- [6] O. Verscheure, P. Frossard, and J.-Y. L. Boudec, "Optimal Media Streaming in A Rate-distortion Sense for Guaranteed Service Networks," in *Fifteenth International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Aug. 2002.
- [7] S. Nelakuditi, R. Harinath, E. Kusmierek, and Z.-L. Zhang, "Providing Smoother Quality Layered Video Stream," in *Proceedings of NOSSDAV 2000, The 10th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video*, Jun. 2000.

[8] J. M. Boyce, "Packet Loss Resilient Transmission of MPEG Video over The Internet," *Signal Processing: Image Communication*, Vol.15, pp. 7-24, Sept. 1999.

[9] P. de Cuetos and K. W. Ross, "Adaptive Rate Control for Streaming Stored Fine-Grained Scalable Video," in *Proceedings of the 12th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*, ACM Press, pp. 3-12, 2002.

[10] T. Kim and M. H. Ammar, "Optimal Quality Adaptation for MPEG-4 Fine-grained Scalable Video," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.

[11] Z. Jiang and L. Kleinrock, "A Packet Selection Algorithm for Adaptive Transmission of Smoothed Video over A Wireless Channel," *J. Parallel Distrib. Comput.*, Vol.60, No.4, pp. 494-509, 2000.

[12] J. Liu, B. Li, Y. T. Hou, and I. Chlamtac, "Dynamic Layering and Bandwidth Allocation for Multi-session Video Broadcasting with General Utility Functions," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.

[13] P. A. Chou and Z. Miao, "Rate-distortion Optimized Streaming of Packetized Media," *Microsoft Research Center, Research Technical Report MSR-TR-2001-35*, Feb. 2001.

[14] Z. Miao and A. Ortega, "Optimal Scheduling for Streaming of Scalable Media," in *Proceedings of 31th Asimolar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Nov. 2000.

[15] K. Chebrolu and R. R. Rao, "Selective Frame Discard for Interactive Video," in *Proceedings of ICC 2004*, Paris, France, Jun. 2004.

[16] Wei Tu, Wolfgang Kellerer, and Eckehard Steinbach, "Rate-Distortion Optimized Video Frame Dropping on Active Network Nodes," in *Packet Video Workshop 2004*, Irvine, California, Dec. 2004.

[17] J. Chakareski and P. Frossard, "Rate-Distortion Optimized Distributed Packet Scheduling of Multiple Video Streams over Shared Communication Resources," *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol.8, pp. 207-218, Apr. 2006.

[18] C. Perkins, *RTP: Audio and Video for the Internet*, Addison Wesley, 2003.

[19] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An End-to-End Rate-based Congestion Control Mechanism for Realtime Streams in The Internet," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Vol.3, pp. 1337-1345, Mar. 1999.

[20] S. Song, Y. Won, and I. Song, "Empirical Study of User Perception Behavior for Mobile Streaming," in *Proceedings of the tenth ACM international conference on Multimedia*, ACM Press, pp. 327-330. 2002.

[21] Y. Won and B. Shim, "Empirical Study of VBR Traffic Smoothing in Wireless Environment," in *Innovative Internet Computing Systems : Second International Workshop*, ser. Lecture Notes in Computer Science, Vol.2346. Springer-Verlag Heidelberg, pp. 193-204, Jun. 2002.

[22] S. Olsson, M. Stroppiana, and J. Baina, "Objective Methods for Assessment of Video Quality: State of The Art," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol.43, No.4, pp. 487-495, December 1997.

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

원 유 집

한국정보과학회논문지 : 시스템 및 이론
제 33 권 제 4 호 참조



전 영 균

2001년 한양대학교 전자전기공학부(학사). 2003년 한양대학교 전자통신전공학과(석사). 2003년~현재 한양대학교 전자통신전공학과 박사과정. 관심분야는 영상처리 및 영상압축



박 동 주

2005년 건국대학교 물리학(학사). 2005년~현재 한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터공학부 석사과정. 관심분야는 멀티미디어 시스템, 멀티미디어 네트워크



정 제 창

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 KAIST 전기전자공학과 석사. 1990년 미국 미시간대학 전기공학과 공학박사. 1982년~1986년 KBS 기술연구소 연구원. 1991년~1995년 삼성전자 멀티미디어 연구소(MPEG, HDTV, 멀티미디어 연구). 1995년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수. 1998년 과학기술자상 수상. 1998년 정보통신부장관상 표창. 관심분야는 영상처리 및 영상압축