

효율적인 스트리밍 서비스를 위한 가용대역폭 측정 기법

(An Available Bandwidth Measurement Scheme for Efficient Streaming Service)

이 희 상[†] 이 선 현[†] 정 광 수^{**}
(Heesang Lee) (Sunhun Lee) (Kwangsue Chung)

요 약 가용대역폭(Available Bandwidth) 측정 기법을 이용한 기존 스트리밍 프로토콜들(Streaming Protocol)은 가용대역폭을 측정하는 것에 있어서 정확성이 떨어지는 문제와 측정 속도가 느리다는 문제를 가지고 있다. 본 논문에서는 기존 가용대역폭 측정방법에 대한 연구가 가지고 있는 한계점을 극복하기 위해서 새로운 가용대역폭 측정 기법인 NABO(New Available Bandwidth measurement based on One-Way Delay)를 제안한다. NABO는 OWD(One-Way Delay)에 포함되어 있는 경쟁 트래픽이 없을 때의 전송 지연시간을 추출해 내고, 그 이후에 OWD에 반영하는 전송 지연시간을 제외한 경쟁트래픽에 의한 가변적인 지연을 측정함으로써 경쟁트래픽의 양을 측정한다. 이를 통해서 병목링크의 고정대역폭에서 경쟁트래픽의 대역폭을 제외한 가용대역폭을 정확하고 빠르게 산출한다. NABO의 성능을 검증하기 위한 실험 결과, 제안한 NABO가 다양한 네트워크 환경에서 스트리밍 서비스(Streaming Service)의 요구사항을 효율적으로 만족시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

키워드 : Streaming Service, 가용대역폭, QoS, 전송률 조절

Abstract Streaming protocol with the Available Bandwidth measurement scheme has problems that are to measure a Available Bandwidth uncorrectly and slowly. In this basis, in order to overcome limitations of the previous streaming protocols, we propose the NABO that is a New Available Bandwidth measurement scheme used by OWD(One-Way Delay). Proposed NABO(New Available Bandwidth measurement based on OWD) measures the constant transmission delay occurred by bottleneck link capacity and the variable delay. Competing traffic contribute to the variable delay. Through the measurement of the constant transmission delay and the competing traffic, a NABO can measure the Available Bandwidth correctly and fast in network. The simulation result proves that the proposed NABO has a performance that satisfies both accuracy viewpoint and measurement speed viewpoint.

Key words : Streaming Service, Available Bandwidth, QoS

1. 서 론

스트리밍 서비스란 실시간으로 사용자가 원하는 대용량의 멀티미디어 데이터를 클라이언트로 전송하면서 동시에 재생하는 서비스이다. 스트리밍 서비스는 지연에

민감하고 어느 정도의 패킷 손실을 허용하는 특징을 가진다. 대용량의 멀티미디어 데이터를 스트리밍 서비스하기 위해서는 현재 인터넷의 최선형 서비스(Best Effort Service)로는 부족하다. 최선형 서비스는 종단간의 지연에 대한 상한치(Upper Bound)를 보장하지 않으며 종단간의 가용 대역폭(Available Bandwidth)에 대한 하한치(Lower Bound)를 보장하지 않기 때문이다. 즉, 사용자의 관점에서 볼 때 스트리밍 서비스는 사용자의 QoS를 보장할 수 없게 된다.

현재 대부분의 스트리밍 서비스들은 주로 UDP(User Datagram Protocol)를 사용한다. 하지만 UDP는 TCP(Transmission Control Protocol)와 같은 혼잡 제어 메

· 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음

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

** 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2006년 2월 2일
심사완료 : 2007년 1월 22일

커니즘이 없으므로 현재의 최선형 인터넷 서비스 환경에서 네트워크의 혼잡 상황을 야기하여 네트워크를 혼잡 붕괴시킬 가능성이 있으며 또한, 기존의 주요 트래픽인 TCP와도 친화적(TCP-Friendly)으로 동작하지 않는다는 문제점을 가진다[1-3]. 1990년대 이후로 스트리밍 프로토콜과 관련하여 네트워크 안정성을 향상시키기 위해 혼잡 제어 매커니즘 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4-6]. 하지만 대부분의 연구들은 패킷 손실 후에 전송률을 급격히 감소하기 때문에 스트리밍 서비스를 적절히 제공하지 못 하게 되고 높은 지터(Jitter)가 발생할 수 있으며 네트워크의 고정대역폭을 효율적으로 사용하지 못하는 단점을 가지고 있다.

가용대역폭 측정 기법은 이러한 문제점을 개선할 수 있는 기술로 대두되고 있다. 스트리밍 서버가 실시간으로 가용대역폭을 측정 하여 패킷 손실 전에 측정된 가용대역폭에 따라 미리 전송률을 부드럽게 조절함으로써 패킷 손실에 민감한 스트리밍 서비스에 적합하다. 또한, 전체 경로의 가용대역폭을 알기 때문에 스트리밍 서비스에 맞게 지연 요구사항(Delay Requirement)에서도 충족시킬 수 있는 기반을 만들 수 있다. 이러한 장점으로 인해 가용대역폭 측정에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 하지만 가용대역폭을 자체가 실시간으로 계속 변하는 특성을 가지기 때문에 가용대역폭 측정하기가 어려우며, 측정 시간이 오래 걸리거나 정확성에서도 떨어지게 되면 스트리밍 서비스에서는 가용대역폭을 사용하기 힘든 문제점을 드러내고 있다[7].

본 논문에서는 기존의 가용대역폭 측정 기법의 제한점을 극복하고 스트리밍 서비스의 혼잡 제어 매커니즘에 적용하기 위해서 새로운 가용대역폭 측정 기법인 NABO(New Available Bandwidth measurement based on OWD)를 제안한다. NABO는 가용대역폭 측정 속도의 개선과 정확성을 높이기 위해 기존의 단일-홉 갭 모델(Single-Hop Gap Model)에서 사용하던 패킷 쌍(Packet Pair)의 간격을 분석하지 않고 OWD(One-Way Delay)를 이용한다[8]. OWD는 현재 네트워크 상태를 실시간으로 잘 반영하는 파라미터이기 때문에 정확한 가용대역폭 측정이 가능하며 수신자에게 들어오는 패킷 하나하나씩 측정이 가능하기 때문에 측정 속도 측면에서도 기존의 패킷 쌍 측정 방식보다 더 빠르게 측정이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 먼저 병목링크의 고정대역폭과 가용대역폭의 개념에 대해 설명하고, 기존 연구들을 고정대역폭 측정, 가용대역폭 측정기법들로 분류하여 각각의 특징과 문제점을 분석한다. 3장에서는 2장에서 제시된 문제점을 해결하기 위해 새로 제안한 NABO 측정 기법 알고리즘과 알아보고, 4장에

서는 NS-2 시뮬레이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다. 마지막으로 5장에서 결론과 향후 과제를 제시하였다.

2. 관련 연구

본 장에서는 병목링크의 고정대역폭 및 가용대역폭의 개념에 대해 알아보고 스트리밍 서비스를 하기 위한 가용 대역폭을 측정 시 필요한 병목링크의 고정대역폭을 측정하는 기법, 기존의 가용대역폭을 측정하는 기법에 대해서 기술한다.

2.1 병목링크의 고정대역폭과 가용대역폭의 개념

스트리밍 서비스는 송신자와 수신자간의 연결을 의미하므로 대부분 중간 노드의 도움 없이 연결이 이루어진다. 종단 대 종단(End-to-End)으로 네트워크 경로에 대한 가용대역폭을 측정하기 위해서는 먼저 종단 대 종단 고정대역폭과 가용대역폭 측정 기법들에서 사용되는 기본적인 개념들을 정리해야 된다[9]. 네트워크 경로 L 은 $i = 1, 2, \dots, N$ 개의 개별 링크의 연결로 이루어져 있다. 각각의 링크 i 는 최대 전송할 수 있는 초당 비트 전송률을 가지며, 이를 C_i 라고 한다. 이 때 경로 L 상에서 전송률이 가장 낮은 링크를 병목링크라고 정의하고 링크의 비트 전송률을 해당 경로 L 의 고정대역폭 C_L 로 정의하며 식 (1)과 같다.

$$C_L = \min C_i, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

링크 i 에 대해서 시간 t 에 존재하는 다른 플로우들의 전송률 합을 경쟁 플로우의 잉 $B_i(t) = \sum_{i=0}^N B_i, (0 \leq B_i(t) \leq C_i)$ 으로 정의 한다. 이 때 링크 i 의 시간 $[t, T]$ 동안의 가용 대역폭, $A_i(t, T)$ 는

$$A_i(t, T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (C_i - B_i(t)) dt \quad (2)$$

로 정의할 수 있다. 여기서 전체 경로 L 의 시간 $[t, T]$ 동안의 종단 대 종단 가용대역폭, $A_L(t, T)$ 는

$$A_L(t, T) = \min(A_i(t, T)) \quad (3)$$

로 정의할 수 있다. 그림 1은 위의 식 (1), (2), (3)의 관계를 나타낸 것이다. 본 논문에서 사용되는 가용대역폭 용어의 의미는 종단간의 가용대역폭을 말한다.

2.2 병목링크의 고정대역폭을 측정하는 기법에 대한 관련 연구

초기 병목링크의 고정대역폭을 측정하기 위하여 송신자가 연이은(Back-to-Back) 패킷 쌍을 전송시켰을 때 병목링크에서 큐잉을 겪게 되면 패킷 쌍의 첫 번째 패킷과 두 번째 패킷간의 시간적인 간격이 생기게 되고, 수신자가 이러한 시간적인 간격을 수집하여 병목링크의 대역폭을 측정할 수 있다. 이러한 패킷 쌍 모델은 네트

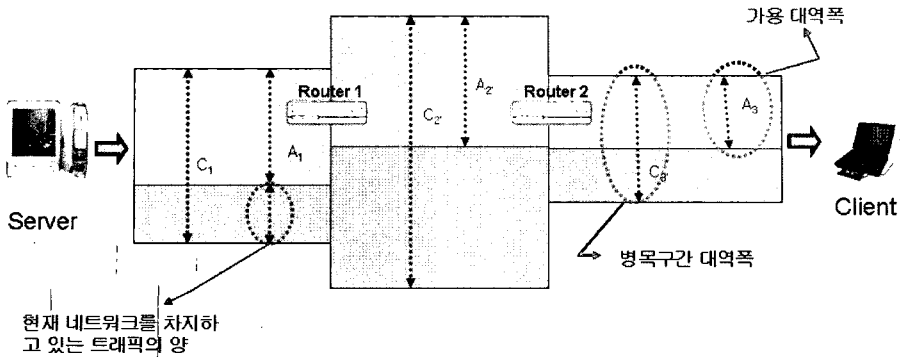


그림 1 세 개 네트워크 경로로 구성된 파이프 모델

워크의 총 고정대역폭을 측정하는 가장 이상적인 방식으로 알려져 있다[10-12].

병목링크의 고정대역폭을 측정하는 기법에는 bprobe [10], ADR(Asymptotic Dispersion Rate)[11], CapProbe [12] 등이 있다. bprobe는 서로 다른 패킷 길이를 갖는 많은 패킷 쌍을 전송하여 최고 전송 시간을 갖는 샘플을 구하고 이를 기반으로 패킷의 길이 당 전송률을 얻어서 경로 상의 고정대역폭을 측정하는 기법이다. ADR은 네트워크의 망 구성 형태에 따라서 고정대역폭에 대한 측정이 높게 측정되거나 낮게 측정될 수 있음을 증명하고 이를 이용하여 히스토그램의 빈도를 분석하여 고정대역폭을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. CapProbe는 지연과 패킷 쌍의 간격을 분석하는 기법을 합친 것이다. 가변하는 패킷 쌍의 분산된 간격을 빠르게 계산하기 위해서 필터링을 사용하며, 패킷 쌍의 최소전송 지연을 갖는 샘플의 분산된 간격을 추출하여 병목링크의 고정대역폭을 측정하는 기법이다.

이러한 병목링크의 고정대역폭을 측정하는 기법들은 송신 측에서 패킷 쌍을 초기 간격 없이 연달아 전송하는 경우, 수신 측에서 측정된 샘플의 간격이 병목링크의 고정대역폭에 의해서만 영향을 받는 점을 고려하고 있다. 따라서 오차를 줄이고 정확한 측정을 위해서는 패킷 쌍이 링크 상의 경쟁 트래픽 패킷에 영향 받는 효과를 최소로 줄이는 것이 중요하고, 이를 위해서는 작은 패킷 사이즈의 패킷 쌍을 사용하는 것이 더 정확하다고 분석되어 있다[8].

2.3 가용대역폭을 측정하는 기법에 대한 관련 연구

가용대역폭 측정의 분야는 크게 단일-홉 겹 모델에 기반을 둔 연구들과 자가 혼잡 유발(Self-Induced Congestion) 기법들로 나눌 수 있다. 단일-홉 겹 모델이란 전체 네트워크를 병목링크를 갖는 단일 홉으로 축소시켜 네트워크를 모델링하고 송신자가 보낸 패킷 쌍의 사이 간격과 수신자가 보낸 패킷 쌍의 간격을 분석하여

가용대역폭을 측정하는 기법을 말하며, 자가 혼잡 유발 기법은 전송하는 패킷의 전송속도를 높여가면서 전송하는 패킷의 속도보다 수신 측에서 측정되는 속도가 큐잉에 의해서 작아지는 순간을 관찰하여 가용대역폭을 측정하는 기법을 의미한다.

2.3.1 IGI/PTR

IGI/PTR은 단일-홉 겹 모델을 최초로 적용한 기법이다[8]. IGI/PTR에서는 송신자가 보낸 초기 간격과 패킷 쌍이 병목링크 안을 지나갈 때 경쟁트래픽에 의해 변하는 출력 간격간의 관계를 이용한다. 패킷 쌍의 출력 간격이 초기 간격에 비해서 감소하는 것은 현재 패킷 쌍의 전송률이 가용대역폭 이하의 전송률을 보이고 있음을 의미한다. 이 경우를 DQR(Disjoint Queueing Region)이라 부른다. 이와 반대로 패킷 쌍의 출력 간격이 초기 간격에 비해서 증가한 것은 라우터의 대기열에서 패킷 쌍 사이에 경쟁 트래픽이 들어와서 출력 간격에 영향을 주었기 때문이다. 이런 경우를 JQR(Joint Queueing Region)이라 부른다. JQR일 때에 가용대역폭을 측정할 수 있다. 이 때 초기 간격 g_i 과 출력간격 g_o 의 관계는 식 (4)와 같다.

$$g_o = g_B + B_C \cdot g_i / B_B \tag{4}$$

식 (4)에서 g_B 는 패킷 쌍의 병목구간 내에서의 전송 지연이라 할 수 있으며 이것은 연이은 패킷 쌍 전송 시 병목구간에서 생기는 간격과 일치 한다. B_C 는 경쟁트래픽의 대역폭을 의미하며 B_B 는 병목구간의 고정대역폭을 의미한다. 앞의 가정과 같이 병목링크의 고정대역폭이 일정하고 경쟁트래픽의 양이 측정하는 동안 일정하다면 초기 간격에 비해서 증가한 출력 간격은 초기 간격 동안 라우터의 대기열에 들어온 경쟁 트래픽의 양을 반영하게 된다. 만약 패킷 쌍의 초기 간격이 좁아서 경쟁트래픽이 충분히 반영이 안 될 경우, 실제 가용대역폭보다 더 높게 측정 될 수 있다. 이런 경우에는 경쟁 트래픽의

양이 충분히 반영될 수 있도록 초기 간격을 점차 증가시켜서 출력 간격과 일치 되는 초기 간격을 찾게 되면 가용대역폭을 측정할 수 있다.

2.3.2 Pathload

Pathload는 일정기간동안 송신자가 연속해서 수신자로 측정 패킷들을 보내고 수신자가 이 기간 동안 측정 패킷들의 OWD 성향을 분석하고 가용대역폭을 측정한다[9]. 송신자가 측정하는 패킷의 양을 증가시켜서 스스로 네트워크에 혼잡을 만들게 되고 만약 혼잡이 발생하게 되면 가용대역폭의 상한치를 갱신하고 측정하는 패킷의 양을 다시 줄이게 된다.

OWD가 감소하는 성향을 보이게 되면 가용대역폭의 하한치를 갱신하고 다시 측정하는 패킷의 양을 증가시키게 된다. 측정하는 패킷의 양의 증감에 따라 가용대역폭의 상한치와 하한치의 폭을 줄여나간다. 결국에는 실제 가용대역폭에 점점 접근하게 되고 일정한 영역 안에서 OWD 성향이 안정화 될 때 가용대역폭을 측정하게 된다.

K개의 패킷을 보내는 일정 기간 동안 패킷 스트림(Packet Stream)의 상대적인 OWD를 구한다고 가정하면 수신자 측에서 OWD 성향을 판별하는 식은 두 가지가 있다. 그 중 PCT(Pairwise Comparison Test)는 식 (5)와 같다.

$$S_{PCT} = \frac{\sum_{k=2}^{\Gamma} I(D^k > D^{k-1})}{\Gamma - 1}, (0 \leq S_{PCT} \leq 1, \Gamma = \sqrt{K}) \quad (5)$$

식 (5)에서 $I(D^k > D^{k-1})$ 은 D^1, D^2, \dots, D^K 패킷 중에 D^k 의 OWD가 D^{k-1} 의 OWD보다 클 경우에 두 패킷의 OWD 차를 의미하는 것이며 S_{PCT} 의 결과 값이 0.55 이상이면 OWD가 증가하는 성향이라 판별한다. 나머지 다른 판별하는 식의 PDT(Pairwise Difference Test)는 식 (6)과 같다.

$$S_{PDT} = \frac{D^{\Gamma} - D^1}{\sum_{k=2}^{\Gamma} |D^k - D^{k-1}|}, (-1 \leq S_{PDT} \leq 1) \quad (6)$$

S_{PDT} 의 결과 값이 0.4보다 크다면 OWD가 증가하는 성향으로 판단한다. 측정 패킷을 가용대역폭 이상의 전송률로 전송을 하면 수신자에 도착한 패킷들의 OWD가 증가하는 성향을 띄게 된다. 이것은 송신자의 전송률이 전체 링크의 가용대역폭보다 높다는 것을 의미한다. 식 (5)와 식 (6)에서 전부 OWD가 증가하는 성향으로 판별이 되면 전송률을 조절하는 알고리즘, 그림 3과 같이 전송률을 조절하게 된다.

그림 2에서 측정된 패킷의 전송률이 $R(n)$ 이고 다음 패킷의 전송률이 $R(n+1)$ 을 의미하며 ω 는 사용자가 요구하는 측정 오차의 범위를 뜻한다. 전송되는 트래픽의

$$\begin{aligned} &IF\ R(n) > A \\ &\quad R^{max} = R(n), R(n+1) = (R^{max} + R^{min})/2; \\ &IF\ R(n) < A \\ &\quad R^{min} = R(n), R(n+1) = (R^{max} + R^{min})/2; \\ &terminate\ when\ (R^{max} - R^{min}) < \omega \end{aligned}$$

그림 2 Pathload 가용 대역폭 측정 알고리즘

양이 가용대역폭 보다 크다고 판단하면 측정 최대 임계값, R^{max} 를 측정 패킷의 전송률로 설정하고 다음 측정 패킷의 전송률을 $(R^{max} + R^{min})/2$ 만큼 줄인다. 전송률이 가용대역폭 보다 작다고 판단되면 측정 최소 임계값, R^{min} 를 측정 트래픽의 전송률로 설정하고 측정 패킷의 전송률을 $(R^{max} + R^{min})/2$ 만큼 증가 시킨다. 이 과정을 반복적으로 수행하게 되면 측정하고자 하는 실제 가용대역폭에 접근할 수 있다.

3. OWD에 의한 새로운 가용대역폭 측정 기법

본 장에서는 스트리밍 서비스 관점에서 기존 연구의 문제점을 분석하고, 가용대역폭 측정기법의 정확성 향상과 속도를 개선한 NABO에 대해서 기술한다. NABO는 단일-홉 갭 모델과 자가 혼잡 유발 방식의 장점을 가지고 있다. 단일-홉 갭 모델에 OWD를 적용함으로써 병목링크 고정대역폭과 가용대역폭 측정의 속도와 정확성을 증가시키고 병목링크와의 다른 링크에서 혼잡이 발생하더라도 가용대역폭을 측정할 수 있게 된다.

3.1 스트리밍 서비스 관점에서 기존 연구의 문제점

IGI/PTR은 적은 수의 패킷을 이용해서 빠르게 가용대역폭을 찾을 수 있기 때문에 네트워크의 상태가 변화하더라도 가용대역폭을 빠르게 측정할 수 있다. 하지만 처음 초기 값의 입력 간격이 출력간격보다 큰 경우에는 가용대역폭을 측정할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 또한, 전체 링크 중에 혼잡이 발생한 링크가 병목링크가 아닌 경우에는 가용대역폭 측정의 오차가 크게 증가한다. IGI/PTR은 스트리밍 서비스 관점에서 볼 때, 네트워크 상황에 빠르게 적응은 가능하지만 병목구간이 아닌 다른 구간에서 혼잡이 발생한 경우에는 가용대역폭의 측정이 정확하게 이루어 질 수 없으므로 부적합하다. 또한, 초기에 측정된 병목링크의 고정대역폭을 이용하여 가용대역폭을 측정하기 때문에 병목링크의 고정대역폭을 정확하게 측정하지 못하면 오류가 크게 발생하는 문제점도 가지고 있다. 그리고 출력관계를 분석하는 동안 가용대역폭을 알 수 없기 때문에 실시간으로 이루어지는 스트리밍 서비스에서는 부적합하다.

Pathload는 경로 상에 존재하는 병목링크의 위치와 무관하게 가용대역폭을 찾을 수 있는 장점이 있다. 즉, 혼잡링크와 좁은 링크가 서로 다른 경우에도 혼잡 링크

에서 측정 패킷들이 겪게 되는 지연을 통해서 가용대역폭을 측정하기 때문에 병목링크의 위치와 무관하게 가용대역폭을 찾을 수 있다. 하지만 Pathload는 가용대역폭을 측정하기 위해서 혼잡을 유발하기 때문에 측정 패킷 자체가 네트워크의 안정성을 저해하고 측정하는 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. Pathload 같은 자가 혼잡 유발 기법은 스트리밍 서비스의 관점에서 볼 때 네트워크에서의 안정된 전송률 보장과 빠른 가용대역폭의 측정이 불가능하기 때문에 부적합하다. 따라서 가용대역폭의 측정이 정확하고 빠른 측정시간을 가지는 새로운 기법이 필요하다고 할 수 있다.

3.2 NABO 개요

스트리밍 서비스에서는 가용대역폭 측정 속도가 빠른 단일-홉 갭 모델의 장점을 계승하면서 정확한 측정값을 산출할 수 있는 기법이 필요하다. 스트리밍 서비스를 위해 기존 단일-홉 갭 모델을 사용하지만 정확성과 측정 속도를 높이기 위해서 OWD를 이용한다. 가용대역폭을 측정하기 위해서 OWD를 이용하는 이유는 OWD의 특성이 다음과 같기 때문이다. 네트워크 링크로 유입된 패킷들은 기준 시간당 처리할 수 있는 패킷의 양을 초과할 경우 링크의 버퍼가 허용하는 만큼 버퍼에 쌓이게 된다. 그리고 버퍼를 초과해서 유입된 패킷들은 폐기된다. 가용대역폭 이상의 전송률로 링크에 유입된 패킷들은 기준 시간당 링크에서 처리할 수 있는 양을 초과하기 때문에 링크 버퍼에 쌓이게 되고 측정 패킷의 OWD도 증가하게 된다. 그러므로 수신자에서 측정된 OWD의 증가는 현재 링크에서 처리할 수 있는 패킷의 양보다 더 많이 패킷들이 링크에 유입되고 있다는 것을 의미하게 된다. OWD가 이러한 특성을 이용하여 패킷들 간의 OWD 차이를 이용하면 패킷 쌍의 지연 간격을 분석하는 기법과 유사하지만, 패킷 쌍으로 가용대역폭을 측정하는 기법 보다 측정 패킷 하나하나의 OWD를 측정하기 때문에 실시간으로 가용대역폭을 측정할 수 있으며 정확성도 높일 수 있다.

앞에 설명한 것과 같이 OWD에는 링크에 허용될 수 있는 패킷이 유입되었을 경우 발생하는 전송 지연과 링크에 허용될 수 있는 패킷을 초과했을 때 발생하는 경쟁트래픽에 의한 가변적인 지연이 포함되어 있다. 이것을 식으로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$OWD^k = \sum_{i=1}^H \left(\frac{L}{C} + \frac{q^k}{C} \right) = \sum_{i=1}^H \left(\frac{L}{C} + d^k \right) \quad (7)$$

식 (7)에서 OWD^k 는 k 번째 측정 패킷의 OWD를 의미하는 것이고 C 는 병목링크의 고정대역폭, L 은 패킷 사이즈, q^k 는 k 번째 측정 패킷이 있을 때 경쟁하는 트래픽의 양, d^k 는 경쟁하는 트래픽이 병목링크를 지나갈 때 생기는 지연시간을 의미한다. 식 (7)을 통해서 OWD에

는 고정된 전송 지연시간과 경쟁트래픽에 의해 생기는 가변적인 큐잉 지연시간의 합으로 표현하는 것을 알 수 있다. $k+1$ 번째 측정 패킷의 OWD와 k 번째 측정 패킷의 차는 식 (8)과 같다.

$$\Delta D^k = D^{k+1} - D^k = \sum_{i=1}^H \frac{\Delta q^k}{C} = \sum_{i=1}^H \Delta d^k \quad (8)$$

식 (8)에서 ΔD^k 는 OWD의 차를 의미하고 Δd^k 는 경쟁트래픽의 양의 차, Δq^k 는 경쟁트래픽의 양의 차로 인해 변화된 시간을 의미한다. 식 (7), 식 (8)에서 알 수 있듯이 OWD의 차는 경쟁트래픽에 의해 변화된 시간을 의미하게 된다. 그러므로 OWD를 이용하면 병목링크에서 경쟁트래픽에 의한 시간의 변화를 알 수 있게 되고 이것을 이용하여 경쟁트래픽의 대역폭을 측정할 수 있다.

식 (7)에서 알 수 있듯이 OWD에는 고정된 전송 지연시간이 포함되어 있다. 그러므로 OWD에 포함된 경쟁트래픽에 의한 큐잉 지연시간을 제거 하게 되면 고정된 전송 지연시간을 측정할 수 있다. 고정대역폭을 측정하는 알고리즘은 다음 절에서 설명하도록 하겠다. 병목링크의 고정대역폭과 경쟁트래픽의 대역폭을 구하게 되면 단일-홉 갭 모델처럼 가용대역폭은 식 (9)로 구할 수 있게 된다.

$$Available\ Bandwidth(B_A) = B_B - B_C \quad (9)$$

식 (9)에서 B_B 는 병목링크의 고정대역폭을 의미하게 되는 것이고 B_C 는 경쟁트래픽의 대역폭을 의미한다. 식 (9)를 이용하여 측정된 가용대역폭은 스트리밍 서비스에 적용하기 위해 SOWD(Smoothed OWD)을 적용한다. 이것은 송신자가 스트리밍 서비스의 전송률을 급격하게 조절하기 보다는 부드럽게 조절하기 위해서이다. SOWD의 식은 식 (10)과 같다. 식 (10)에서 δ 는 SOWD 변화의 폭을 조절하는 파라미터이다.

$$SOWD^{k+1} = \delta \cdot SOWD^k + (1 - \delta) \cdot OWD^k \quad (10)$$

NABO기법을 사용하게 되면 기존 IGI/PTR, Pathload 보다 빠르게 측정할 수 있다. NABO는 수신자가 패킷 하나씩 OWD를 측정하고 경쟁트래픽이 없을 때의 전송 지연 값을 알기 때문에 바로 실제 가용대역폭에 빠르고 정확하게 접근할 수 있다.

3.3 NABO의 병목링크 고정대역폭 측정 기법

NABO는 단일-홉 갭 모델에 적용하기 위해서 OWD를 이용하여 병목링크의 고정대역폭을 측정한다. 고정대역폭을 측정하기 위해서는 측정 패킷이 수신자에게 전달 될 때 라우터의 대기열에서 겪는 지연에 의한 효과를 줄이기 위해서 측정 패킷의 최소 전송 지연을 갖는 샘플을 추출하여 병목링크의 고정대역폭을 측정한다. 이 기법을 통해서 OWD에 포함되어 있는 고정된 전송 지연시간을 측정하게 된다.

NABO의 고정대역폭 측정 기법은 기존 패킷 쌍 방식으로 고정 대역폭을 측정 하는 것처럼 모든 패킷 쌍은 병목링크에 의해 큐잉되는 현상에 근거를 두고 있다. 이때 병목링크의 고정대역폭(B_B)은 패킷 쌍의 크기인 L 과 패킷 쌍의 사이 간격 T 에 의해 식 (11)과 같이 구해진다.

$$B_B = L/T \quad (11)$$

식 (11)에 의해 구해진 병목링크의 고정대역폭은 패킷 쌍마다 다르게 되는데 이것은 고정대역폭의 측정값이 경쟁트래픽에 의해 오차가 생기는 것을 의미한다. 이런 오차가 생기는 패킷 쌍은 경쟁 트래픽의 영향을 받지 않은 최소 OWD를 가지는 패킷 쌍보다 OWD가 더 크다는 것을 의미한다. 경쟁 트래픽의 영향을 받은 패킷 쌍은 고정대역폭을 측정할 수 없기 때문에 최소 OWD를 가지는 패킷 쌍만이 정확한 병목링크의 고정대역폭을 측정할 수 있다.

그림 3을 통해 패킷 쌍이 병목링크의 고정 대역폭을 측정하는데 오차가 생기는 이유를 확인할 수 있다. 그림 3은 패킷 쌍이 병목링크를 지나갈 때 생기는 3가지 경우를 나타낸다. 그림 3(a)는 실제 고정 대역폭을 측정할 수 있는 정확한 패킷 쌍을 의미한다. 이때의 패킷 쌍은 그림 3(b)와 3(c)보다 작은 OWD를 가지게 되며 이 최소 OWD는 경쟁트래픽의 영향을 받지 않은 고정된 전송 지연시간을 의미하게 된다. 그림 3(b)는 패킷 쌍의 첫 번째 패킷이 경쟁트래픽의 간섭에 의해 병목링크 안에서 큐잉이 되었을 경우를 말한다. 그림 3(a)보다 OWD가 커지게 되고 이런 경우 큐잉을 겪지 않은 두 번째 패킷과의 간격이 그림 3(a)보다 상대적으로 작아지기 때문에 병목링크의 고정대역폭 값이 실제 고정대역폭보다 커지게 된다. 그림 3(c)는 패킷 쌍의 두 번째 패킷이 경쟁 트래픽의 간섭에 의해 큐잉을 당했을 경우를 의미한다. 그림 3(a)보다 OWD가 커지게 되고 이런 경우 큐잉을 겪지 않은 첫 번째 패킷과의 간격이 그림

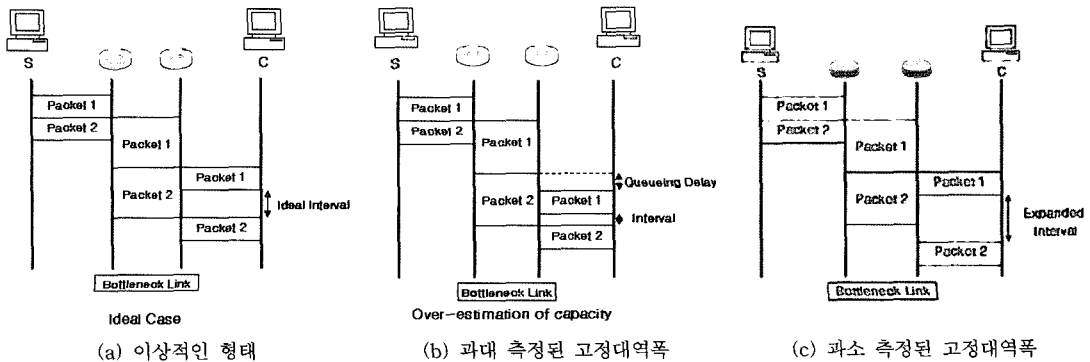
3(a)보다 상대적으로 커지기 때문에 병목링크의 고정대역폭 값이 실제 고정대역폭 보다 작아지게 된다. 그림 3(a)를 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min OWDsum(\delta_n) = \min OWD(a_n) + \min OWD(b_n) \quad (12)$$

식 (12)에서 δ_n 는 N번째 패킷 쌍의 샘플을 의미하는 것이며 a_n 과 b_n 은 δ_n 의 첫 번째 패킷과 두 번째 패킷을 의미하는 것이다. 송신자가 병목링크의 고정대역폭을 측정하기 위해 연이은 패킷 쌍을 초기에 보내고 수신자가 수신된 패킷 쌍 중에 패킷 쌍의 첫 번째 패킷과 두 번째 패킷이 최소 OWD 가지는 것을 추출하게 된다. 최소 OWD를 가지는 패킷 쌍이 정확한 병목링크의 고정대역폭을 측정할 수 있는 샘플로 정해지게 된다. 정해진 샘플 패킷의 크기와 패킷 쌍의 간격을 식 (11) 대입하여 정확한 병목링크의 고정대역폭을 측정할 수 있다.

3.4 NABO의 가용대역폭 측정 기법

NABO에서는 IGI/PTR에서 초기 간격과 출력 간격의 관계를 이용하는 대신 OWD를 사용하여 가용대역폭을 측정하게 된다. 경쟁 트래픽의 양이 측정 패킷을 전송하는 동안 일정하다고 가정하면 단일-휴 겹 모델에서의 출력 간격은 선형적으로 변한다. OWD도 마찬가지로 식 (7)에 의해 경쟁트래픽의 영향에 따라 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 병목링크에 유입되는 경쟁트래픽이 일정하다고 가정하면 병목링크의 고정대역폭을 측정할 최소 OWD를 $\min OWD$ 라 하고 경쟁트래픽의 양을 충분히 반영한 패킷의 OWD를 $COWD$ (Converging OWD)라 한다. $COWD$ 와 $\min OWD$ 의 차를 구하면 경쟁하는 트래픽의 양에 의해 지연된 시간을 얻을 수 있다. 식 (10)의 $SOWD$ 에 의해 현재 변화된 OWD의 양을 실시간으로 측정하게 되고, 송신자가 변화된 $SOWD$ 차이만큼 초기 전송 간격을 증가시키면서 점차 $SOWD$ 가 $COWD$ 에 도달하게 되면 수신자가 경쟁트래픽의 양을 구할 수 있게 된다.



(a) 이상적인 형태

(b) 과대 측정된 고정대역폭

(c) 과소 측정된 고정대역폭

그림 3 패킷 쌍의 사이 간격 형태

$$COWD_k = SOWD_k, \text{ (if } SOWD_{k-1} \equiv SOWD_k \text{)} \quad (10)$$

식 (13)에서 COWD는 SOWD가 변화가 없을 때의 OWD 값을 의미한다. 즉, 경쟁트래픽의 영향으로 인해 OWD가 변하지 않을 경우를 의미한다. 전송률을 실시간으로 조절하는 것을 식 (14)에 나타내었다.

$$g_{i^{k+1}} = \frac{L}{B_B(1 - \frac{OWD_k - SOWD_{k-1}}{\min OWD})} \quad (14)$$

식 (14)에서 여기서 L 은 측정패킷의 사이즈를 뜻한다. 식 (14)로 계산된 초기 간격, $g_{i^{k+1}}$ 으로 송신자가 전송률을 조절하게 되고 다시 OWD를 반복적으로 측정하게 되면서 SOWD를 갱신하게 된다. 식 (13)에 의해 구해진 COWD로 경쟁트래픽의 대역폭을 구하는 것은 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Competing Traffic Bandwidth}(B_C) \\ = \frac{COWD - \min OWD}{\min OWD} \cdot B_B \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 의해 경쟁 트래픽의 대역폭을 얻으면 식 (11)에 의해 $\min OWD$ 를 이용하여 얻어진 고정대역폭과 경쟁트래픽의 대역폭의 차를 이용하여 식 (9)처럼 가용대역폭을 계산할 수 있게 된다.

4. 실험 및 성능평가

새로 제안한 NABO의 성능 평가를 위하여 본 논문에서는 LBNL(Lawrence Berkly National Laboratory)의 ns-2(Network Simulator)를 이용하여 실험하였다[13].

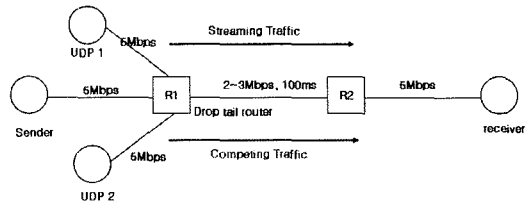
4.1 실험 환경

제안한 NABO 가용대역폭 측정 기법의 성능을 평가하기 위해서 그림 4와 같은 실험 환경을 구성하여 성능 실험을 수행하였다. NABO 가용대역폭 측정기법의 성능 실험을 위해서 경쟁하는 트래픽으로 UDP를 사용하였으며 병목링크의 고정대역폭은 실험에 2~3 Mbps로 변화시키며 진행하였다. 또한, 성능비교대상인 가용대역폭 측정 기법으로는 단일 홉-갭 모델을 사용하는 IGI/PTR과 자가 혼잡 유발 기법을 사용하는 Pathload를 사용하였으며 고정대역폭측정과 가용대역폭 측정 실험을 수행하였다. 병목링크의 라우터의 버퍼는 정확한 고정대역폭 측정을 하기 위해 없는 것으로 가정하였다.

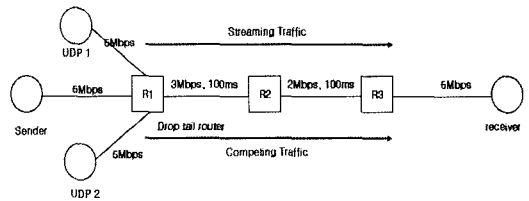
실험에서 측정 패킷의 주요 설정 값인 패킷의 사이즈와 패킷의 개수는 다음과 같다. 연이은 패킷을 전송하여 링크의 고정대역폭을 측정하는 경우에는 측정 패킷의 사이즈가 작을수록 경쟁트래픽에 의한 오차를 줄일 수 있지만 가용대역폭을 측정할 때는 적절하게 경쟁트래픽의 영향을 받는 것이 중요하다. 특히, 인터넷 패킷은 40, 500, 1500 Bytes에 집중되어 있기 때문에 가용대역폭을 측정할 때는 중간 정도의 크기인 500~700 bytes를 갖

는 패킷 크기가 적절한 것으로 알려져 있다. 따라서 성능실험에서는 멀티미디어 데이터의 크기를 고려하여 측정 패킷의 사이즈를 700 bytes로 고정하였다.

또한 측정 패킷의 개수에 따라서 원하는 시간 동안 경쟁트래픽이 영향을 미치는 라우터의 대기열 상태를 반영할 수 있다. 측정 패킷의 개수가 많으면 가용대역폭을 측정할 때 측정하고자 하는 라우터의 큐 상태를 반영하는 시간을 늘릴 수 있다. 하지만 많은 측정패킷의 개수는 빠른 측정이 불리하고 네트워크 상황이 빠르게 변하는 경우는 적합하지 않다 따라서 적절한 측정패킷의 개수를 선택하여야 한다. 이 실험에서 사용되는 측정 패킷의 개수를 60개로 설정하였다. 그 이유는 IGI/PTR의 실험을 근거로 측정값의 정확도가 높으면서도 측정에 걸리는 시간이 길지 않도록 하기 위해서이다.



(a) 단일 홉 실험을 위한 망구조



(b) 다중 홉 실험을 위한 망구조

그림 4 실험 환경

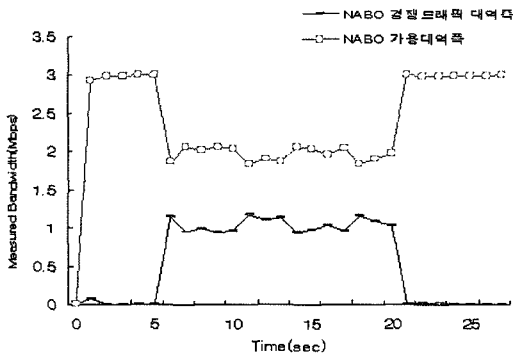
4.2 NABO 가용대역폭 측정 기법의 정확성 검증

본 절에서는 NABO 가용대역폭 측정 기법의 정확성을 검증하는 실험을 기술하였다. 먼저 가용대역폭을 측정하는 도중에 경쟁트래픽을 UDP로 1Mbps 유발시킴으로써 변화하는 네트워크 상태에 어떻게 적응하는지를 측정해보았다. 그림 5는 병목링크의 고정대역폭을 3Mbps로 설정하고, 측정 도중 약 5초에서 20초 사이에 경쟁트래픽으로 UDP를 1Mbps로 전송했을 때 변화한 네트워크 상황에 능동적으로 어떻게 적응하는지를 보여주는 결과이다. 경쟁트래픽이 약 5초에서 20초 사이에 발생하였을 때 그림 5(a)의 NABO를 살펴보면 그림 5(b)의 IGI 보다 실제 가용대역폭인 2Mbps에 근접하게 측정되는 것을 알 수 있다. 그림 5(a)에서 측정값이 일정하지 않은 이유는, SOWD 값이 경쟁트래픽을 충분히

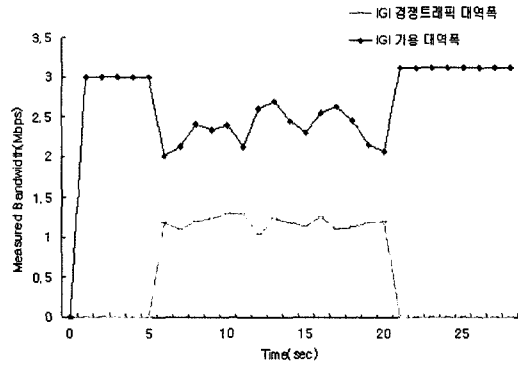
반영하는 COWD까지 근접하는데 지연이 발생하는 현상 때문이다. 그림 5(b)에서 보듯이 IGI는 경쟁트래픽의 유입에 따라 출력간격의 변화를 겪게 되는데 이때 연이은 패킷 쌍의 고정대역폭 측정값이 라우터의 대기열에서 겪는 지연 때문에 고정대역폭이 높게 측정된다. 또한, 경쟁트래픽을 측정함에 있어서 네트워크의 부하에 영향을 받기 때문에 경쟁트래픽의 측정의 정확성이 네트워크의 부하에 따라 다를 수 있다. 따라서 가용대역폭의 값이 실제 가용대역폭 값보다 조금은 높게 측정이 되며 그 측정값의 변화가 NABO보다 크게 일어나는 것을 알 수가 있다.

네트워크에서 가용대역폭이 실시간으로 가변하기 때문에 이때 측정하는 성능 평가를 하기 위해서 경쟁트래픽 유입 양의 변화에 따라 네트워크의 가용대역폭을 반복적으로 변화를 주었다. 그림 6은 병목링크의 고정대역폭을 3Mbps로 고정하고 초기 경쟁트래픽으로 0.5 Mbps UDP 트래픽을 유입시키며 약 9초에는 2Mbps,

약 18초에 1Mbps로 유입시킴으로써 네트워크의 가용대역폭의 변화에 따라 NABO와 IGI의 측정기법들이 어느 정도 정확성을 가지며 빠르게 측정하는지에 대한 실험을 하였다. 그림 6(a)에서 보듯이 IGI는 네트워크의 부하에 따라 고정대역폭을 측정하는 값이 변화를 겪게 된다. 그 이유는 경쟁트래픽에 의해 병목링크의 고정대역폭을 측정하는 패킷 쌍이 영향을 받기 때문이다. NABO는 경쟁트래픽의 영향을 제거하기 위해 OWD를 최소값으로 유지함으로써 이런 문제를 해결하였으며 IGI보다 더 정확한 것을 알 수 있다. 그림 6(b)에서 NABO와 IGI는 가용대역폭 변하는 시점인 9초와 18초에서 네트워크의 상태 변화에 빠르게 변하는 것을 알 수 있다. 하지만 NABO는 IGI보다 실제 가용대역폭에 근접하게 측정하는 것을 알 수 있는데 그 이유는 IGI는 네트워크의 부하에 따라 고정대역폭과 경쟁트래픽의 대역폭의 변화가 생기기 때문이다. 하지만 NABO는 네트워크의 부하에 관계없이 minOWD를 찾아 해당 시점에 측정된

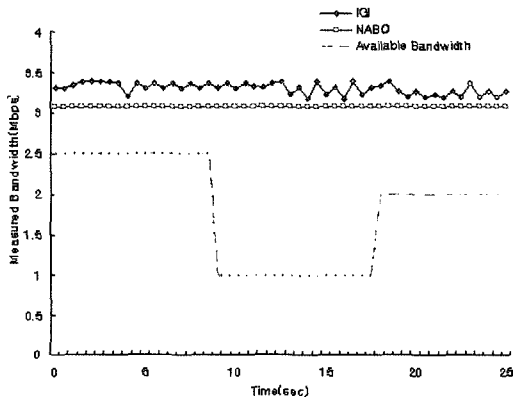


(a) NABO

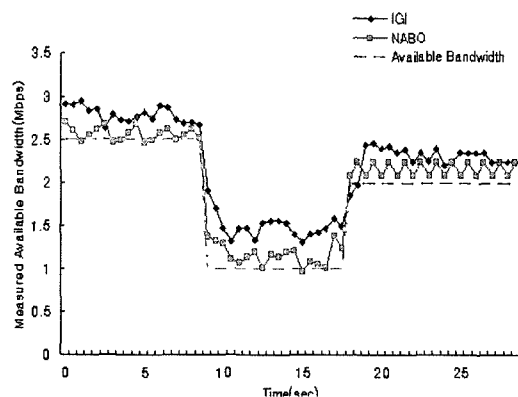


(b) IGI

그림 5 UDP 1 Mbps 경쟁트래픽 유입시켰을 때 정확성 비교



(a) 병목구간 고정대역폭의 측정값의 변화



(b) 가용대역폭 측정의 변화

그림 6 네트워크 가용대역폭 변화에 따른 가용대역폭 정확성 비교

고정대역폭의 값을 유지하기 때문에 정확성이 더 높아졌다.

그림 7은 그림 6의 실험처럼 네트워크의 가용대역폭을 변화를 주었을 때 기존의 자가 혼잡 유발 기법을 사용하는 Pathload와 제안한 NABO를 비교하였다. Pathload는 패킷의 최저 전송 속도, 평균 전송속도, 최대 전송속도 등과 같은 초기 값의 설정에 따라 가용대역폭 수렴 속도 및 측정의 정확도에 많은 영향을 받는다. 또한, OWD의 성향을 분석해야 하기 때문에 네트워크의 가용대역폭의 변화가 생겨도 성향 분석을 한 후에 송신자가 전송률을 조절하게 되므로 측정 속도가 느리다.

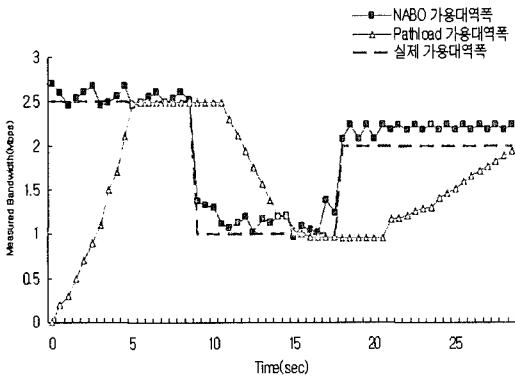


그림 7 NABO와 Pathload의 가용대역폭 측정 비교

4.3 다중 흐름에서 가용대역폭 측정의 정확성 검증

본 실험은 다중 흐름에서 NABO 가용대역폭 측정 기법의 성능을 평가하기 위한 것이다. 경쟁하는 트래픽의 양을 계속적으로 유입을 하면서 그림 4(b)의 실험환경에서 실험하였다.

그림 8은 경쟁 트래픽의 양이 증가함에 따른 가용대역폭의 정확도를 다중 흐름에서 IGI, Pathload와 비교한 결과이다. Pathload는 경쟁 트래픽이 증가함에 따라 네

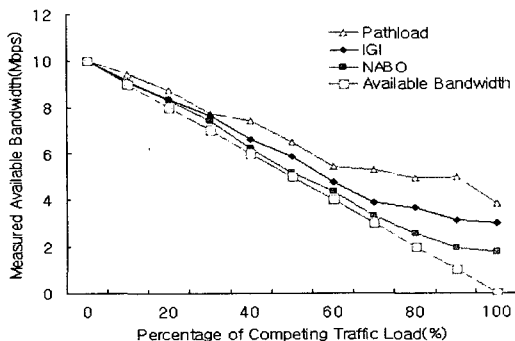


그림 8 다중 흐름에서 경쟁트래픽의 증가에 따른 가용대역폭 측정 성능 비교

트위크의 부하가 많이 걸리게 되는데 이런 상황에서는 Pathload는 경쟁트래픽의 유입에 따라 전송률을 줄여야 함에도 불구하고 자가 혼잡 유발 기법은 느린 측정 속도에 의해 경쟁트래픽과 같이 측정 패킷 트레인이 혼잡 상태를 스스로 겪게 된다. Pathload는 측정시간에서 상대적으로 NABO와 IGI보다 느리기 때문에 측정 오류가 크게 난다. IGI의 경우는 경쟁 트래픽이 증가함에 따라 측정 패킷 쌍의 초기 간격이 충분히 크더라도 출력 간격에 반영된 경쟁 트래픽이 많기 때문에 경쟁 트래픽의 양이 높게 측정이 된다. 반면 NABO의 경우에는 측정 패킷 하나마다 가용대역폭을 측정하고 전송률을 조절해 나가기 때문에 경쟁트래픽의 양이 증가하여도 네트워크의 변화에 빠르게 적응해 나가며 Pathload와 IGI에 비해 가용대역폭을 정확하게 측정하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

기존 가용대역폭 측정 기법에 대한 연구들은 스트리밍 프로토콜에 적용하기에는 측정 속도가 느리고 측정값의 정확성이 나쁘다는 한계를 갖는다. 본 논문에서 스트리밍 프로토콜에서 적용할 수 있는 가용대역폭 측정 기법의 연구를 위해서 지금까지 인터넷에서 종단 대 종단으로 고정대역폭과 가용대역폭을 측정하는 기법에 대해서 살펴보았으며 기존 연구들의 문제점을 개선하기 위해서 NABO(New Available Bandwidth measurement based on OWD)를 제안했다. NABO는 기존의 가용대역폭 측정방식의 두 가지 방식의 장점을 고려하여 디자인하였으며 실시간 스트리밍 서비스를 위해 고정대역폭을 정확하게 측정하고 가용대역폭을 빠르게 측정하는 것에 목적을 두었다. 가용대역폭의 측정의 속도가 빠르고 정확성이 검증된 단일-흐름 모델에서 OWD의 변화를 패킷 마다 측정함으로써 기존 단일-흐름 모델보다 더 정확성을 높이고 측정 속도도 빠르게 되었다.

시뮬레이터를 이용한 실험을 통해서 NABO 가용대역폭 측정기법의 기본적인 성능을 검증하고 관련 연구와의 성능 비교하였다. 실험 결과를 통해서 NABO는 다양한 네트워크 환경에서도 가용대역폭을 빠르고 정확하게 측정 할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 기존의 가용대역폭 측정 기법인 IGI/PTR, Pathload와의 성능비교를 통해 제안한 NABO의 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. NABO 가용대역폭 측정 기법을 실시간 스트리밍 프로토콜인 RTP/RTCP에 적용하여 가용대역폭으로 혼잡제어를 하는 스트리밍 프로토콜을 제안하였다. 실험 결과를 통해 제안한 NABO 가용대역폭 측정 기법은 인터넷에서 효율적인 스트리밍 서비스를 가능하게 하는 요구사항을 만족시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후, 제안한 NABO 가용대역폭 측정기법이 현재 네트워크의 주요 트래픽인 TCP와 친화적으로 동작할 수 있도록 하는 방법에 대한 연구가 수행될 것이며, 멀티캐스트 환경에서의 적용에 대한 연구도 같이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control," *In Proceedings of ACM SIGCOMM'88*, pp. 314-329, August 1988.

[2] S. Floyd and F. Kevin, "Router mechanisms to support end-to-end congestion control," *Technical Report, LBL-Berkeley*, February 1997.

[3] S. Cen, C. Pu, and J. Walpole, "Flow and congestion control for internet streaming applications," *In Proceedings of Multimedia Computing and Networking*, January 1998.

[4] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate based congestion control mechanism for real-time streams in the Internet," *In Proceedings of IEEE INFOCOMM'99*, March 1999.

[5] Q. Zhang, Y. Zhang, and W. Zhu, "Resource allocation for multimedia streaming over the Internet," *IEEE Transactions on Multimedia*, pp. 339-355, September 2001.

[6] S. Lee, J. Lee, K. Chung, W. Choi, and S. Rhee, "BEST: Buffer-driven efficient streaming protocol," *In Proceedings of ICCSA 2005*, LNCS 3483, pp. 1231-1240, May 2005.

[7] N. Aboobaker, D. Chanady, M. Gerla, and M. Y. Sansadidi, "Streaming media congestion control using bandwidth estimation" *In Proceedings of IFIP/IEEE International Conference on management of multimedia networks and services*, October 2002.

[8] Hu, N. and Steenkiste, P., "Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21. No. 6, pp. 879-894, August 2003.

[9] Jain, M. and Dovrolis, C., "End-to-end available bandwidth: measurements methodology, dynamics, and relation with TCP throughput," *In Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, pp. 295-308, August. 2002.

[10] Carter, R. and Crovella, M., "Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks," *Performance evaluation*, Vol. 27, No. 28, pp 297-318, October 1996.

[11] Dovrolis, C., Ramanathanm, P., and Moore, D., "What do packet dispersion techniques measure?," *In Proceedings of IEEE INFOCOM'01*, pp. 905-914, April 2001.

[12] Rohit Kapoor, Ling-jyh Chen, Li Lao, Mario Gerla, and M. Y. Sanadidi. "CapProbe: A simple and accurate capacity estimation technique," *In Proceedings of ACM SIGCOMM 2004*, Portland, USA, August 2004.

[13] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nanam/ns/>



이 희 상

2004년 경기대학교 전자공학과 학사. 2006년 광운대학교 전자통신공학과 석사. 2006년~현재 (주)밀레니엄 얼라이언스 소프트웨어 엔지니어. 관심분야는 인터넷 QoS, 비디오 스트리밍, 유비쿼터스 컴퓨팅



이 선 현

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



정 광 수

1981년 한양대학교 전자공학과 학사. 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 미국 University of Florida 전기공학과 박사(컴퓨터공학전공). 1983년~1993년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1991년~1992년 한국과학기술원 대우 교수. 1993년~현재 광운대학교 전자공학부 교수(정보통신 연구원)