

서비스율을 보장하는 지연시간-대역폭 정규화 스케줄링 모델

(A Delay-Bandwidth Normalized Scheduling Model with Service Rate Guarantees)

이 주 현[†] 황 호 영^{**} 이 창 건^{***} 민 상 렬^{****}
 (Ju Hyun Lee) (Ho Young Hwang) (Chang Gun Lee) (Sang Lyul Min)

요약 Generalized Processor Sharing(GPS) 기반의 공정큐잉(Fair Queueing) 알고리즘들은 세션들에게 서비스율과 지연시간 보장 서비스를 제공할 뿐만 아니라, 순시적 공유(instantaneous sharing)를 통해 각 세션에게 공정서비스를 제공한다. 이 공정서비스는 현재 서버에 대기중인 세션들의 과거에 받은 서비스 양에 관계없이 그 세션의 가중치에 비례하여 서버 용량을 분배한다. 그러나 이 공정서비스는 장기적 측면에서 같은 가중치를 가지는 세션에게 세션의 트래픽 패턴에 따라 다른 지연시간과 대역폭 QoS(Quality of Service)를 제공한다. 이러한 장기적 측면의 불공정 서비스를 최소화하기 위해, 본 논문에서는 지연시간과 대역폭 관점에서 서비스 가치(Value of Service)를 정의한 지연시간-대역폭 정규화 모델을 제안한다. 이 정규화 모델에서 정의한 서비스 가치 개념을 사용하여 각 세션에게 지연시간-대역폭 관점의 공정한 서비스를 제공하는 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘과 기존의 공정큐잉 및 서비스 커브 기반의 알고리즘과 비교를 통해 제안된 알고리즘은 세션들에게 장기적 측면의 공정서비스를 제공하고, 다양한 트래픽 특성을 갖는 세션에 대해 서비스율과 지연시간 보장에 대한 재조정 없이 동적으로 트래픽 특성에 적응하여 서비스하는 것을 관찰할 수 있다.

키워드 : 지연시간-대역폭 정규화(DBN), Generalized Processor Sharing(GPS), 서비스커브, 공정큐잉(Fair Queueing) 알고리즘, 스케줄링, 서비스가치(Value of Service), 순시적 공유

Abstract Fair Queueing algorithms based on Generalized Processor Sharing (GPS) not only guarantee sessions with service rate and delay, but also provide sessions with instantaneous fair sharing. This fair sharing distributes server capacity to currently backlogged sessions in proportion to their weights without regard to the amount of service that the sessions received in the past. From a long-term perspective, the instantaneous fair sharing leads to a different quality of service in terms of delay and bandwidth to sessions with the same weight depending on their traffic pattern. To minimize such long-term unfairness, we propose a delay-bandwidth normalization model that defines the concept of value of service (VoS) from the aspect of both delay and bandwidth. A model and a packet-by-packet scheduling algorithm are proposed to realize the VoS concept. Performance comparisons between the proposed algorithm and algorithms based on fair queueing and service curve show that the proposed algorithm provides better long-term fairness among sessions and that is more adaptive to dynamic traffic characteristics without compromising its service rate and delay guarantees.

Key words : Delay-Bandwidth Normalization (DBN), Generalized Processor Sharing(GPS), Service Curve, Fair Queueing Algorithm, Scheduling, Value of Service, Instantaneous Sharing

· 본 연구는 '정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력핵심기술개발 사업[2006-S-040-01, Flash Memory 기반 임베디드 멀티미디어 소프트웨어 기술 개발]'과 '2007년도 한성대학교 교내연구비' 및 '서울대학교 신입교수 연구정착금'의 지원을 받아 수행되었습니다.

† 학생회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부

jhlee@archi.snu.ac.kr

** 종신회원 : 한성대학교 멀티미디어공학과 교수

hyhwang@hansung.ac.kr

*** 정 회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수

cglee@cse.snu.ac.kr

**** 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수

symin@archi.snu.ac.kr

논문접수 : 2006년 10월 31일

심사완료 : 2007년 6월 4일

1. 서론

최근 인터넷 기술의 진보로 기존의 텔넷, 파일전송, 웹과 같은 비 실시간 응용뿐만 아니라, VoD(Video on Demand), DMB(Digital Media Multicasting) 등과 같은 실시간 응용서비스가 유무선 환경에서 가능하게 되었다. 이러한 실시간 응용서비스가 가능하기 위해서는 서비스를 및 지연시간에 대한 보장이 이루어져야 하며, 비 실시간 응용에게는 잔여 서버 용량이 공정하게 분배되어야 한다. 이러한 보장서비스와 공정서비스를 제공하기 위해 Generalized Processor Sharing (GPS)[1]를 기반으로 하는 다양한 공정큐잉(Fair Queueing: FQ) 알고리즘들이 유무선 환경에서 제안되었다[2,3,5-7,9]. 이 알고리즘들은 각 세션에게 순시적 공유(instantaneous sharing)를 통해 공정서비스를 제공한다. 이 공정 서비스는 과거에 받은 서비스를 기억하지 않고, 오직 현재 서버에 대기중인 세션에게 그들의 가중치에 비례하여 서버 용량을 분배하는 방식이다. 그러므로 장기적 측면에서 각 세션에게 제공되는 서비스를 지연시간과 대역폭으로 나누어 관찰시, 같은 가중치를 가진 세션들간에도 트래픽 패턴에 따라 다른 지연시간과 대역폭으로 서비스를 받을 수 있기 때문에 서비스 차이가 발생할 수 있다. 그러나 이 공정서비스 방식은 그 세션들이 현재 서버에 도착하여 서버용량을 경쟁하는 상황에서도 이 차이를 줄이지 않고 같은 지연시간과 대역폭 서비스를 받기 때문에 장기적 측면에서 불공정 서비스 문제가 발생한다[10]. 특히 간헐적으로 패킷을 생성하는 지연민감 세션과 끊임없이 패킷을 생성하는 처리지향 세션이 경쟁시 처리지향 세션이 상대적으로 더 많은 대역폭 서비스를 받으므로 두 세션간 서비스 차이가 심화되기 때문에, 두 세션이 동시에 도착하여 경쟁시 지연민감 세션에게 더 많은 지연시간-대역폭 관점의 서비스를 제공함으로써 보상해주는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 각 세션에게 대역폭과 지연시간 두관점 모두를 고려하여 세션의 트래픽 특성에 맞게 서비스를 제공하는 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘을 통해 두 가지 형태의 서비스를 제공하려고 한다. 첫째로, 각 세션에게 대역폭과 지연시간 두 관점을 동시에 고려해서 세션의 가중치에 비례하는 공정한 서비스를 제공한다. 기존의 FQ 알고리즘들은 대역폭 관점에서만 공정 서비스를 제공했고, 지연시간 관점에서는 일정 값 이하로 서비스되는 것만을 보장하였다. 그러나 각 세션에게 제공되는 서비스는 서비스의 양 측면뿐만 아니라, 서비스의 신속도 측면도 고려하여 공정하게 제공되어야 한다. 본 논문은 이 두 측면을 동시에 고려한 공정서비스를 제공한다. 둘째로, 대역폭 보장을 원하는 세션에게

보장서비스를 제공한다. 오디오나 비디오 세션, 혹은 파일전송 세션의 경우 세션 설정시에 일정한 서버 대역폭 보장을 요구할 수 있는데, 이 세션 설정요구가 수락된 후, 실제 서비스가 진행될 때, 각 세션에게 약속했던 대역폭을 보장한다. 이와 같은 공정 및 보장서비스가 제공되면 오디오나 비디오와 같은 실시간 혹은 멀티미디어 세션에게는 일정 대역폭에 대한 보장서비스를 제공할 수 있고, 웹, 텔넷, 파일전송 세션 같은 비 실시간 세션에게는 지연-대역폭 관점의 공정한 서비스가 제공된다. 즉 VoIP(Voice over IP), 웹, 텔넷 세션들은 파일 전송 세션에 비해 트래픽을 적게 생성하지만, 신속한 처리를 요하는 지연민감 세션들인데, 기존의 GPS기반의 알고리즘들은 비기억 특성을 가지고 있기 때문에, 간헐적으로 트래픽을 생성했던 지연 민감 세션에 신속한 서비스를 제공하진 못한다. 그러나 본 연구에서 제안하는 지연-대역폭 관점의 모델은 세션에게 제공되는 서비스를 지연시간과 대역폭을 분리하여 독립적으로 처리함으로써, 지연민감 세션과 처리지향 세션이 서비스 경쟁시 지연 민감한 세션에게 신속한 서비스를 제공할 수 있는 기반을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구를 소개하고, 3장에서는 본 논문에 사용할 기호를 정의 및 지연시간-대역폭 정규화 개념을 설명한다. 4장에서는 이 정규화 개념에 기반하여 서비스하는 모델을 소개하고, 이 모델을 참조하여 스케줄링을 수행하는 알고리즘을 5장에서 설명한다. 6장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 모델과 스케줄링 알고리즘의 성능을 기존의 GPS, SC기반 알고리즘과 비교분석하고, 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

기존의 공정큐잉 알고리즘은 크게 두가지, 즉 대역폭 관점에서의 서비스를 제공하는 알고리즘과, 지연시간과 대역폭을 분리하여 서비스를 제공하는 알고리즘으로 나눌 수 있다.

서비스를 대역폭관점에서 제공하는 알고리즘은 현재 서버에 대기중인 세션들에게 세션의 가중치에 비례하는 서비스 양을 제공한다. 이 알고리즘들은 GPS 모델을 참조하여 스케줄링을 수행하는 Packet-by-packet Generalized Processor Sharing (PGPS)[1], Weighted Fair Queueing (WFQ)[2], Worst-case Fair Weighted Fair Queueing (WF²Q)[3]와 GPS를 참조하지 않은 상태로 대역폭 보장서비스를 제공하는 Virtual Clock(VC)[4]등이 있다. 이 알고리즘의 구형 복잡도를 개선시킨 Start time Fair Queueing (SFQ)[5], Self-Clocked Fair Queueing (SCFQ)[6], WF²Q+[7], 그리고 Leap Forward

Virtual Clock (LFVC)[8] 등이 제안되었다. 그러나 이러한 알고리즘들은 대역폭 보장 및 대역폭에 의존적인 지연시간의 보장서비스는 제공하지만, 대역폭 관점만 고려되어 공정서비스가 제공되기 때문에, 지연시간 서비스의 관점에서는 각 세션이 불공정한 서비스를 받는다.

서비스를 지연시간과 대역폭 관점으로 분리하여, 각각의 관점에 대해 독립적인 보장서비스를 제공하고자 서비스커브(Service Curve: SC)[11-13]를 비롯한 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 이 SC는 두 개의 선형 세그먼트를 통해 서비스곡선(service curve)를 정의하고, 이 곡선에 의해 지연시간 및 대역폭 보장서비스를 제공한다. 그러나 SC는 한 세션에 대해 서비스곡선이 할당되었을 때, 세션 내의 트래픽 특성이 동적으로 변하는 경우 이에 유연하게 대응하지 못하는 문제점을 갖는다. 뿐만 아니라 SC는 각 세션당 마감곡선(deadline curve), 활성화 곡선(eligibility curve), 그리고 가상시간 곡선(virtual time curve)을 유지해야 하는데, 이 곡선들은 비선형이기 때문에 기존의 FQ 알고리즘에 비해 스케줄링 복잡도가 훨씬 크다. SC이외에도 지연시간과 대역폭을 분리하여 보장서비스를 제공해주는 우선순위기반 공정큐잉방식 (Priority-based Fair Queueing)[14], 프레임 FQ[15]에 기반한 지연시간-대역폭 분리방식(Decoupled Delay-Bandwidth Frame based Fair Queueing)[16] 등이 제안되었다. 우선순위기반 공정큐잉방식은 시간원도우 개념을 사용하여 시간원도우 내에서는 우선순위가 높은, 즉 짧은 지연시간을 요하는 세션을 먼저 서비스하는 방식이다. 프레임 FQ에 기반한 지연시간-대역폭 분리방식은 정상적인 트래픽이 유입되는 상황과 비정상적인 트래픽이 유입되는 상황에 다른 서비스율을 사용함으로써 지연시간과 대역폭을 보장하는 방식이다. 그러나 이 방식들은 지연시간과 대역폭에 대한 보장서비스만 제공하고, 지연시간과 대역폭 관점에서의 공정한 서비스에 대해서는 다루지 않고 있다.

3. 지연시간-대역폭 정규화 개념

본 논문에서는 네트워크 라우터와 스위치 같은 서버에 N 개의 세션이 서버용량(혹은 출력링크 용량) C 를 공유한다고 가정하였다. 각 세션은 예약용량 r_i 를 가지며, 모든 세션의 예약용량의 합은 전체 서버의 용량보다 적어야 한다. 각 세션의 가중치 $w_i(0 \leq w_i \leq 1)$ 는 그 세션의 예약용량과 서버용량의 비로 정의하며, 모든 세션의 가중치의 합은 1보다 적어야 한다. 서버는 패킷이 입력 큐에 대기 중일 때 항상 서비스를 제공하는 작업보존(work-conserving) 방식으로 동작한다. 서버에는 세션 i 가 생성한 패킷 $P_i(k)$, $k=1,2,\dots$, 들이 도착한다. 세션 i 의 k 번째 패킷 $P_i(k)$ 는 길이 $L(P_i(k))$ 를 가지고 시각 A

$(P_i(k))$ 에 도착하여 스케줄러에 의해 서비스된 후 시각 $F(P_i(k))$ 에 서버를 떠난다. 이때 패킷 $P_i(k)$ 의 지연시간 $d_i(k)$ 는 도착시각과 종료시각의 차이이다.

서버가 각 세션에게 제공하는 서비스는 두 가지 측면이 있다. 즉 얼마만큼 많은 서비스가 제공되었는가 하는 서비스 양(또는 대역폭) 측면과 이 서비스 각각이 얼마나 신속히 제공되었는가 하는 지연시간 측면이다. 서버가 각 세션에게 서비스를 제공할 때는 이 두 측면 모두를 고려하여 공평하게 서비스해야 한다.

본 논문에서는 대역폭 측면과 지연시간 측면을 하나의 개념으로 통합시킨 서비스 가치(Value of Service: VoS)를 제안한다. VoS는 세션이 서버에 의해 받은 서비스 양과 서비스 각각의 지연시간을 정규화 시킨 개념이다. 이 VoS는 받은 서비스 양이 많아질수록, 받은 서비스의 지연시간이 작아질수록 커지게 된다. 세션은 서버로부터 각 패킷에 대해 패킷 길이만큼의 서비스양과, 그 패킷에 대한 지연 시간 서비스를 받는다. 각 패킷의 지연시간은 패킷이 서버 내에서 대기시간과 실제 서비스되는 시간의 합이 되는데, 이 지연시간의 값을 평가하기 위해선 이 지연시간 값의 길이를 판단할 수 있는 상대적인 기준이 필요하다. 현재 서버에 대기중인 세션들의 패킷이 세션의 가중치에 비례하여 공정하게 서비스된다면, 이는 GPS에 의해 실행된 것과 같은 결과를 낼 것이다. 그러므로 지연시간에 대한 평가 기준은 GPS 모델이 적당하다. 위 사항을 고려하여 K 번째 패킷까지 서비스했을 때 서비스 가치 VoS는 각 패킷의 길이와 그 패킷의 GPS지연시간대비 실제 지연시간을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$VoS(P(k)) = \sum_{k=1}^K L(P(k)) * f\left(\frac{d^{GPS}(P(k))}{d(P(k))}\right) \quad (1)$$

여기에서 $L(P(k))$ 는 k 번째 패킷의 길이를 의미하며, $d^{GPS}(P(k))$ 는 GPS모델로 실행시 k 번째 패킷의 지연시간을 의미한다. 함수 $f(\cdot)$ 는 기준 지연시간인 $d^{GPS}(P(k))$ 과 실제 지연시간 $d(P(k))$ 간 비를 기준으로 정의되며, 실제 시스템에서의 지연시간의 가치에 따라 로그함수, 선형함수, 지수함수 등의 다양한 형태로 정의될 수 있다. 만약 이 함수가 선형함수로 정의 된다면, 이는 기준 지연시간과 실제 지연시간간의 비 값이 선형적으로 변할 때, 서비스 가치 역시 선형적으로 변한다는 것을 의미한다.

4. 지연시간-대역폭 정규화 모델

지연시간-대역폭 정규화(Delay-Bandwidth Normalization: DBN) 모델은 각 세션이 제공하는 서비스를 서비스 양과 서비스 지연 두가지 측면으로 분리하고, 이 두 측면을 VoS 개념을 이용하여 통합함으로써 각 세션

에게 세션의 가중치에 비례하는 서비스를 제공하고자 하는 모델이다. 이 모델은 각 세션의 VoS값을 기준으로 대기중인 세션들의 패킷을 서비스 한다. 이 모델에서 패킷을 서비스 할 때, 대기중인 모든 세션에게 자신의 예약용량 $r_i = C * w_i$ 가 보장되도록 서비스되고, 최소 VoS값을 가진 세션, 즉 가장 작은 지연시간-대역폭 관점의 서비스를 받은 세션에게는 잔여 서버 용량까지 더해져 서비스 된다. 여기에서 잔여 서버용량은 전체 서버용량에서 현재 대기중인 세션의 예약용량의 합을 뺀 값이다. 이 모델은 구체적으로 다음과 같이 정의된다.

- 1) 세션 i 는 세션 VoS를 유지하는데, 이것은 식 (1)의 일반적 VoS정의를 이용하여, 세션 i 가 현재까지 받은 지연시간-대역폭 관점의 서비스를 자신의 가중치로 정규화한 값으로 식 (2)와 같이 정의된다. 즉 세션 i 가 현재 길이 L 인 k 번째 패킷을 서비스 받았다면 이 세션의 VoS 값은 식 (1)의 VoS값과 자신의 가중치 w_i 를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$VoS_i(P(k)) = \frac{\sum_{k=1}^K L(P_i(k)) * f\left(\frac{d^{GPs}(P_i(k))}{d(P_i(k))}\right)}{w_i} \quad (2)$$

각 세션이 받은 지연시간-대역폭 관점의 서비스를 가중치로 정규화함으로써, 각 세션의 VoS값의 크기만으로 각 세션의 가중치 대비 각 세션이 받은 서비스량의 정도를 판단할 수 있다.

- 2) 서버는 서버 VoS값을 유지하는 데, 이는 서버에 의해 제공된 누적된 서비스를 나타낸다. 이 변수는 서버에 도착하는 세션의 초기 VoS값을 지정해 주기 위해 필요하다. 이 서버 VoS값은 각 세션 VoS값의 가중평균 값으로 정의한다. 즉 각 세션의 VoS값에 가중치를 곱한 후, 이를 전체 세션의 가중치합으로 나누면 식 (3)과 같이 정의된다. 이 값은 초기에는 0으로 정해지며, 패킷이 서비스를 받을 때 마다 식 (2)에서 정의된 각 세션 VoS의 가중평균값으로 갱신된다. 구체적으로 크기가 $L(P(k))$ 인 k 번째 패킷의 서비스가 끝나는 시점에 서버 VoS값 $V(P(k))$ 는 다음과 같이 갱신된다.

$$V(P(k)) = V(P(k-1)) + \frac{L(P(k)) * f\left(\frac{d^{GPs}(k)}{d(k)}\right)}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

- 3) DBN모델은 각 세션에 할당된 예약용량 r_i 와 현재 서버에 대기중인 세션의 VoS값에 의해 각 세션의 서비스용량을 결정한다. 모든 대기중인 세션에게는 자신의 예약용량으로 서비스를 제공하며, 최소 VoS값을 가진 세션에게는 그 세션의 예약용량과 잔여

서버용량의 합으로 서비스를 제공한다. 즉 대기중인 세션 i 가 받는 서비스 용량 SC_i 는 다음과 같다.

$$SC_i = \begin{cases} C - \sum_{j \in B, j \neq i} r_j & \text{최소 VoS값을 가진 세션} \\ r_i & \text{나머지 대기중인 세션} \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 B 는 현재 서버에 대기중인 세션의 집합이다. 이와 같이 최소 VoS값을 갖는 세션에게는 모든 잔여 서버 용량을 제공하여 과거에 못 받은 서비스에 대한 보상을 해주며, 나머지 대기중인 세션에게는 기본적인 예약용량을 제공함으로써 자신의 예약 용량만큼은 보장이 되도록 한다.

5. 패킷 단위 지연시간-대역폭 정규화 알고리즘

패킷 단위 지연시간-대역폭 정규화(Packet-by-packet delay-bandwidth normalization: PDBN) 알고리즘은 앞 절에서 정의된 DBN모델을 구체화하여 패킷을 서비스한다. DBN 모델은 각 세션의 예약용량을 보장하면서 서버에 대기중인 세션들을 VoS를 기준으로 서비스 하는 것이었다. 실제 서버에서는 한번에 한 패킷씩 서비스 받기 때문에, 이 장에서는 이 사항을 고려하여 서비스를 제공하는 PDBN 알고리즘을 소개한다.

PDBN알고리즘에서는 서버를 위해 1개의 변수, 그리고 각 세션의 패킷을 처리하기 위해 세션당 1개의 변수, 패킷당 4개의 변수를 유지한다. 즉 서버를 위해 식 (3)에서 정의된 서버 VoS변수를 유지하고, 세션당 식 (2)에서 정의된 현재까지 받은 지연시간-대역폭 정규화 서비스 가치인 세션 VoS값을 유지하고, 패킷당 도착시간, 종료시간, 서비스 시작시간(Eligible Start time: ES), 그리고 기대 종료시간(Expected Finish time: EF)값을 유지한다. 서비스 시작시간은 다른 세션의 예약용량을 보장하기 위해 필요한 매개변수이다. 현재 한 패킷이 서비스 될 준비가 되었어도, 이 패킷의 서비스 시작시간은 다른 세션에게 예약용량 서비스를 제공하기 위해 최대한 패킷의 기대종료 시간까지 늦추어질 수가 있다. 패킷의 기대 종료시간은 이 패킷이 최소한 예약용량 이상으로 서비스 받기 위해 필요한 변수이다. 이 시간 값은 이 패킷을 생성한 세션이 최소 VoS값을 갖는 경우, 그 세션의 예약용량과 서버의 잔여용량의 합으로 서비스를 받을 때 종료시간을 나타내고, 세션이 최소 VoS값을 갖지 않는 경우, 그 세션의 예약용량으로 서비스 받았을 때 종료시간을 나타낸다. 서비스 시작시간과 기대 서비스 종료시간은 세션의 예약용량을 보장하면서 스케줄링하기 위해 필요하다.

$A(P_i(k))$, $F(P_i(k))$, $ES(P_i(k))$, $EF(P_i(k))$ 를 각각 세션 i 의 k 번째 패킷의 도착시간, 서비스 종료시간, 서비스 시

작시간, 그리고 기대 종료시간이라 하면 알고리즘의 구체적인 동작은 다음과 같다.

- 1) 세션 i 의 k 번째 패킷이 도착한 경우, 도착시간은 실시간으로 정해지며, 서비스 시작시간은 각 세션의 예약용량을 보장하기 위해 정의된 서비스 개시 가능성각으로 다음과 같이 정해진다.

$$ES(P_i(k)) = \max(A(P_i(k)), EF(P_i(k-1))) \quad (5)$$

- 2) 패킷 전송이 끝난 경우, 종료시간은 실시간으로 정해지며, 스케줄러는 현재 서비스가 종료된 패킷의 도착시간과 종료시간을 이용하여 서버 VoS값과 현재 서비스가 끝난 세션의 VoS값을 식 (2)과 (3)를 참조하여 갱신한다.

- 3) 스케줄러는 이 VoS값, 식 (4)에서 정의된 각 세션의 서비스용량, 그리고 현재 대기중인 각 세션들의 대기 큐에 있는 첫번째 패킷 $P_i(\cdot)$ 의 서비스 시작시간을 이용하여 이 패킷의 기대 종료시간 $EF(P_i(\cdot))$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$EF(P_i(\cdot)) = \begin{cases} ES(P_i(\cdot)) + \frac{L(P_i(\cdot))}{C - \sum_{j \in B, j \neq i} r_j} & \text{최소 VoS값을 가진 세션} \\ ES(P_i(\cdot)) + \frac{L(P_i(\cdot))}{r_i} & \text{나머지 대기 중인 세션} \end{cases} \quad (6)$$

- 4) 스케줄러는 패킷들의 기대 종료시간 $EF(P_i(\cdot))$ 값을 기준하여 오름차순으로 서비스한다.

제안된 알고리즘은 스케줄링 결정을 내릴 때마다 각 세션의 기대종료 시간을 계산하여야 하므로, 서버에 최대 n 개의 세션이 존재시 세션들의 기대 종료시간 계산으로 인해 $O(n)$ 복잡도를 가진다. 이는 PGPS나 WF²Q의 복잡도와 같은 정도이지만, 이 복잡도를 개선하여 나온 SFQ나 SCFQ와 같은 알고리즘들은 $O(\log(n))$ 의 복잡도를 가지므로, 이 알고리즘들에 비해선 떨어진다. 향후 연구를 통해 제안된 알고리즘의 복잡도를 개선시켜, SFQ나 SCFQ와 같은 정도 혹은 더 향상된 복잡도를 가질 수 있도록 하려고 한다.

6. 성능평가

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 GPS, PGPS, SFQ, 그리고 SC기반 알고리즘과의 비교실험을 수행하였다. 실험은 네 가지 즉, 제안된 알고리즘과 기존의 GPS기반알고리즘과 비교하는 실험, 웹 세션과 파일전송 세션을 PDBN으로 스케줄링 시 VoS값의 변화 추이를 관찰하는 실험, 지연민감 세션과 처리지향 세션을 서비스시 기존의 GPS와 SC기반의 스케줄링 알고리즘과 제안된 스케줄링 알고리즘의 지연시간성능을 분석하는 실험, 그리고 마지막으로 세션들이 지연민감 트래픽과 처리지향 트래픽을 교대로 생성시 기존의 GPS와 SC기반의 스케줄링 알고리즘과 제안된 스케줄링 알고리즘의 지연시간성능을 분석하는 실험을 수행하였다. 이 네 가지 실험에서 VoS 정의시 필요한 $f(x)$ 는 선형함수라고 가정하였고 서버용량은 100Mbps로 가정하였다.

6.1 트래픽 모델

모의실험을 위해 텔넷, 파일전송, 멀티미디어, 그리고 웹 등의 네 종류의 세션을 고려하였다. 텔넷 세션은 100 Bytes 패킷을 생성하며 패킷 간 도착시간은 파레토 분포로 모델링하였다[17]. 파레토 분포의 누적분포 함수는 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - (\alpha/x)^\beta, \quad \alpha, \beta \geq 0, x \geq \alpha \quad (7)$$

위 함수에서 척도 파라메타인 α 와 형태 파라메타인 β 를 각각 1과 0.9로 정하여 텔넷세션의 패킷 간 도착시간이 자기유사적(self-similar) 특성을 갖도록 하였다. 파일전송 세션은 1 KB 패킷을 지속적으로 생성한다고 가정하였고, 멀티미디어 세션은 CBR(Continuous Bit Rate) 형태로 모델링하였으며, 8KB 패킷을 매 33msec마다 전송한다고 가정하였다. 마지막으로 웹 세션은 on/off모델로 모델링 하였는데, on 주기 중 생성되는 패킷의 수와 off주기의 길이 모두 파레토 분포를 갖는다고 가정하였다. on주기 모델링 시, 척도 파라메타와 형태 파라메타를 각각 1.1과, 2.27로 정하였고[18], off주기 모델링 시는 각각 1.5와 1로 정하였다[19].

6.2 세션간 VoS 누적편차비교

첫 번째 실험에서는 GPS, GPS기반 알고리즘인 PGPS, SFQ, 그리고 PDBN알고리즘으로 각각 서비스시, 각 세션의 VoS간 누적편차를 비교 분석하였다. 이 VoS간 누적편차를 나타내기 위해 다음과 같은 상대적 편차(Relative Difference(RD))라는 성능 인자를 정의하였다.

$$RD(T) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \int_0^T (VoS_i(t) - VoS_j(t))^2 dt \quad (8)$$

이 성능인자 $RD(T)$ 는 구간 $[0, T]$ 동안 각 세션이 받은 VoS들의 차이를 적분한 값으로서, 이 값이 작을수록 세션간 받은 VoS의 차이가 작다는 것을 의미한다. 이는 각 세션이 받은 정규화된 지연시간과 대역폭 서비스의 차이가 작다는 것을 의미한다. 스케줄러는 각 세션간 서비스차이가 최소화 되도록 스케줄링을 수행해야 하는데, 이 실험에서는 정규화된 지연시간과 대역폭 서비스 관점에서 각 스케줄러가 세션들을 서비스시 어느정도 VoS누적편차를 보이는지 관찰하였다. 이 실험에서는 표 1에서와 같이 두 개의 텔넷 세션, 그리고 하나씩의 파일전송, 멀티미디어, 웹 세션이 사용되었다.

그럼 1은 세션들이 GPS, PGPS, SFQ, 그리고 PDBN으로 서비스 되었을 때 각 세션 VoS의 누적된 편차를

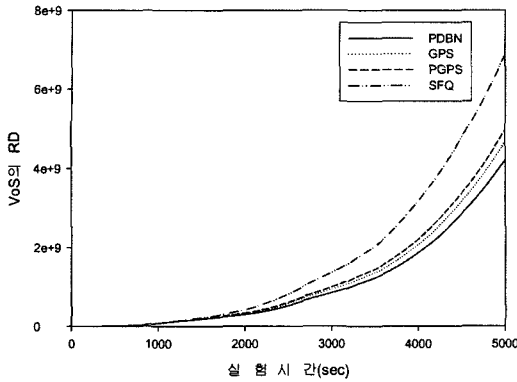


그림 1 세션 VoS간 상대적 누적편차

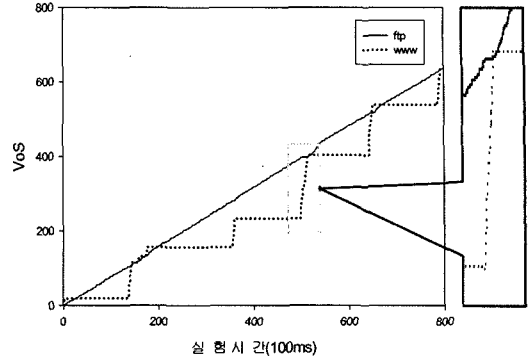


그림 2 웹과 파일전송세션 VoS값의 변화추이

보여주고 있다. 누적된 편차값은 식 (8)에서 정의한 상대적 편차(RD)를 이용하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 PDBN은 각 세션이 받은 서비스 양과 지연시간을 정규화한 VoS 값을 기준으로 스케줄링하므로, 가장 작은 편차를 유지하고 있다. 반면에 GPS 및 GPS 기반 알고리즘들은 서비스를 PDBN과 같이 서비스 양과 지연시간 두 관점을 다 고려하는 것이 아닌, 서비스 양(혹은 대역폭) 관점으로만 고려하기 때문에 PDBN에 비해 상대적으로 큰 VoS간 누적 편차를 보인다. 특히, SFQ는 구현 복잡도를 줄이기 위해 단순화된 서버 가상시간 등의 매개변수를 사용한다. 이러한 사용이 세션간 받은 서비스의 편차가 더 커지는 효과를 발생시키기 때문에 SFQ의 경우 다른 스케줄러에 비해 훨씬 더 큰 편차를 보인다.

6.3 VoS 값의 변화

두 번째 실험에서는 지연민감 세션과 처리지향 세션을 PDBN으로 서비스 시 각 세션의 VoS값의 추이를 관찰하였다. 이번 실험에서는 표 1에서와 같이 한 개의 웹 세션과 한 개의 파일전송 세션이 PDBN에 의해 스케줄링 되었다. VoS는 식 (2)에서 정의된 세션 VoS를 사용하여 파일전송 세션과 웹 세션이 서버에 도착하여 PDBN에 의해 서비스 시 실제 각 세션 VoS값의 변화를 관찰하고 이를 그래프로 나타내었다.

그림 2는 두 세션이 서비스 시 VoS값의 변화를 보여주고 있다. 파일 전송세션은 지속적으로 패킷을 생성하

여 서비스 받기 때문에 VoS값이 일정한 속도로 증가하고 있으며, 웹세션은 간헐적으로 서버에 도착하여 패킷을 집중적으로 생성하기 때문에 VoS값이 계단식으로 증가한다. 이 웹 세션은 on/off 모델로 모델링하였기 때문에, off기간 중에는 패킷이 도착하지 않아 웹 세션의 VoS값은 정체상태에 있고, 파일 전송 세션의 패킷만이 서비스 받기 때문에, 파일 전송 세션의 VoS값 만이 증가한다. 웹 세션이 서비스 시에는 파일전송 세션보다 더 큰 속도로 VoS값이 증가하는 데, 이는 두 세션의 패킷이 서비스 경쟁시, 적은 VoS값을 갖는 웹 세션의 패킷들이 먼저 서비스됨으로써 상대적으로 적은 지연시간으로 서비스되는 데, 이로 인해 이 세션 VoS값은 빠르게 증가하기 때문이다. 모의 실험 시간 500~550(100ms)대를 확대한 그림에서 보듯이 웹 세션 같은 지연민감 세션의 패킷이 도착 시에는 우선적으로 이 세션의 패킷들을 서비스함으로써 웹 세션의 VoS값은 높은 속도로 증가한다. 웹 세션의 VoS값이 높은 속도로 증가하는 동안 파일전송세션의 VoS값은 낮은 속도로 증가하는데 이는 이 기간동안 파일전송세션은 예약용량만으로 서비스되기 때문이다.

6.4 정적인 트래픽에 대한 지연시간

세 번째 실험에서는 PDBN, SC, 그리고 PGPS 알고리즘의 지연시간 성능을 관찰하였다. 이번 실험에서는 텔넷 세션의 가중치를 변화시켜 가면서 각 알고리즘의 지연시간 성능을 관찰한 결과, 텔넷 세션의 가중치가 파일

표 1 실험에서 사용된 세션종류와 각 세션의 가중치

	세션 수	세션 종류				
		텔넷	파일전송	멀티미디어	웹	혼합 세션
실험1	5	$w_{tel1}=0.1$ $w_{tel2}=0.2$	$w_{ftp}=0.1$	$w_{mm}=0.2$	$w_{web}=0.1$	-
실험2	2	-	$w_{ftp}=0.2$	-	$w_{web}=0.1$	-
실험3	2	$w_{tel}=0.01$	$w_{ftp}=0.1$	-	-	-
실험4	5	-	-	-	-	$w_i=0.1$ ($i=1, \dots, 5$)

전송 세션의 가중치와 비슷하거나 큰 경우는 PGPS도 텔넷 세션의 패킷에게 빠른 서비스를 제공하여 PDBN, SC, 그리고 PGPS의 지연성능의 차이는 미미하지만, 텔넷 세션의 가중치가 작아질수록 PGPS와 PDBN, SC의 지연 성능의 차이는 커지게 되는 것을 관찰하였다. 이에 본 실험에서는 이 지연 성능의 차이를 보이기 위해 위와 같이 텔넷 세션의 가중치를 0.01이라는 충분히 작은 값으로 정하였다. 파일 전송 세션의 가중치는 0.1로 정하여 실험하였다. 실험에는 각각 하나씩의 텔넷과 파일 전송 세션이 사용되었다. 이 텔넷과 파일전송 세션들이 PDBN, SC, 그리고 PGPS로 서비스 시 각 패킷들의 실제 지연시간을 측정하였다. SC의 경우는 각 세션에게 두개의 선형함수로 정의된 서비스 곡선을 할당하였다. 세션 i 에게 할당된 서비스곡선은 세개의 매개변수, 즉 최대 지연시간 d_i^{max} , 최대 서비스 양 u_i^{max} , 그리고 평균 서비스율 r_i^{avg} 로 나타낼 수 있다[13]. 만약 한 세션에 할당된 서비스곡선이 $u_i^{max}/d_i^{max} > r_i^{avg}$ 를 만족시 그 곡선은 오목형 서비스곡선을 나타내고, 반대로 $u_i^{max}/d_i^{max} \leq r_i^{avg}$ 를 만족 시에는 볼록형 서비스곡선을 나타낸다. 이번 실험에서 텔넷 세션에는 오목형 서비스 곡선을, 파일전송 세션에는 볼록형 서비스곡선을 할당하였다. 실험에 사용된 각 서비스곡선의 매개변수는 표 2에 나타났다.

그림 3, 4, 5는 각각 PGPS, SC, 그리고 PDBN으로 서비스 시 텔넷과 파일 전송 세션의 실제 패킷 지연시간을 보여주고 있다. PGPS의 경우 GPS의 두 기역 특

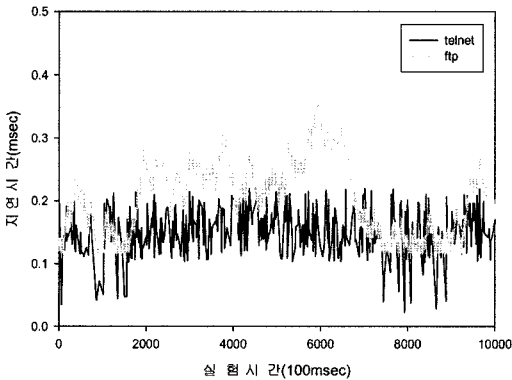


그림 3 PGPS로 서비스시 텔넷과 파일전송세션의 패킷 지연시간

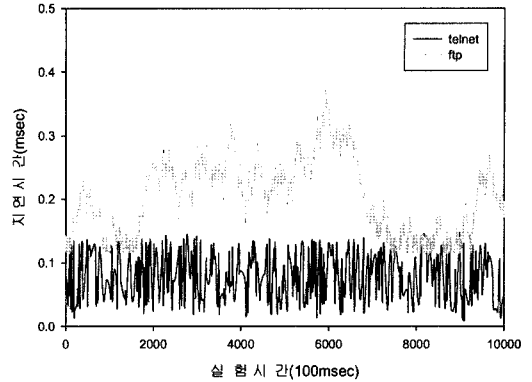


그림 4 SC로 서비스시 텔넷과 파일전송세션의 패킷 지연시간

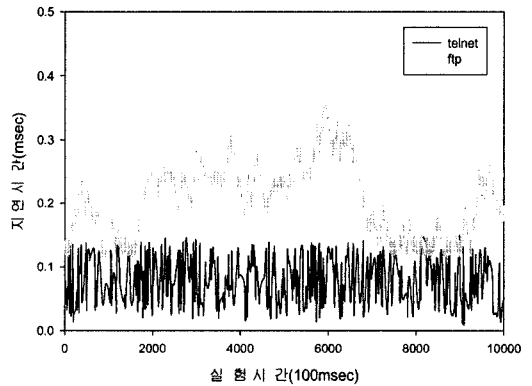


그림 5 PDBN로 서비스시 텔넷과 파일전송세션의 패킷 지연시간

성을 그대로 이어받아 서비스 되므로, 과거에 특정 세션이 받은 서비스 양에 관계없이 현재시점에 서버에서 대기중인 세션들이 똑같은 우선순위로 서비스 된다. 그러므로 텔넷과 같은 지연민감 세션이 파일전송 세션과 서비스 경쟁시 두 세션간 지연시간의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 반면, SC의 경우 PGPS와 비교 시 텔넷 세션에서 전송된 패킷들이 적은 지연시간으로 서비스 되는 것을 보여주고 있는데, 이는 텔넷세션에 오목형 서비스 커브를 할당함으로써, 파일전송세션의 패킷들과 경쟁시 우선적으로 서비스되기 때문이다.

표 2 실험 3과 4에 사용된 서비스 곡선의 매개변수값

		매개변수		
		최대지연시간	최대서비스양	평균서비스율
실험3	오목형SC	0.32msec	300bytes	1Mbit/s
	볼록형SC	24msec	3kbytes	10Mbit/s
실험4	오목형SC	10msec	18.75kbytes	5Mbit/s
	볼록형SC	10msec	6.25kbytes	15Mbit/s

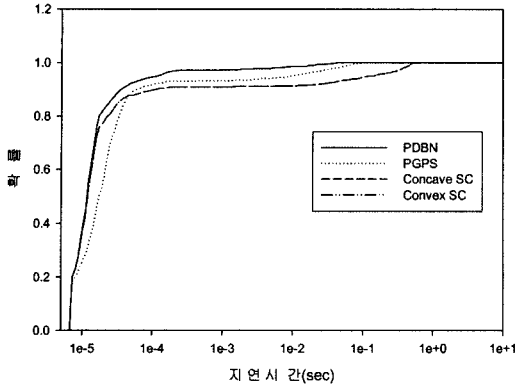


그림 6 혼합세션의 텔넷부분 패킷에 대한 지연시간 누적분포

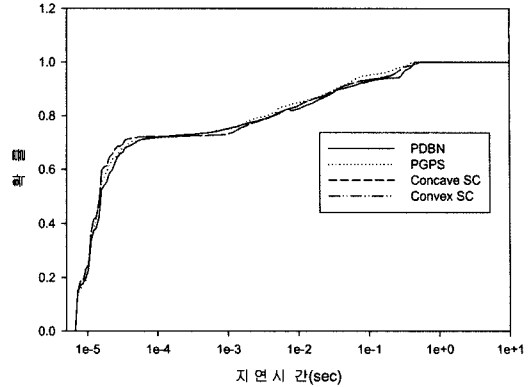


그림 7 혼합세션의 파일전송부분 패킷에 대한 지연시간 누적분포

PDBN 역시 PGPS에 비해 텔넷 세션에서 전송된 패킷들이 적은 지연시간으로 서비스 되는 것을 보여주고 있다. 이는 텔넷 세션이 과거에 받은 서비스의 가치가 파일전송 세션이 받은 서비스의 가치에 비해 일반적으로 적기 때문에, 두 세션의 패킷들이 경쟁 시, PDBN 알고리즘은 텔넷 세션의 패킷들을 우선적으로 서비스하기 때문이다. SC와 PDBN은 두 알고리즘 모두 파일전송 세션의 패킷보다 텔넷 세션의 패킷들을 우선적으로 서비스하기 때문에 텔넷 세션의 패킷들의 지연 시간의 차이가 거의 발생하지 않는다.

6.5 동적인 트래픽에 대한 지연시간

네 번째 실험에서는 세션의 트래픽 특성이 동적으로 변할 때 PGPS, SC, 그리고 PDBN의 지연시간 성능을 관찰하였다. 이번 실험에서는 세션 내에서 텔넷 트래픽과 파일전송 트래픽이 교대로 생성되는 혼합 트래픽 세션을 고려하였다. 각 트래픽의 길이는 다음과 같은 로그노말 분포를 갖는다고 가정하였고, 이 분포함수를 정의하는 데 필요한 매개변수 μ 와 σ 는 텔넷의 경우, $\log 2240$, $\log 27.8$ 을 파일전송의 경우, $\log 23000$, 4로 정하였다 [20]. 이 분포의 누적분포 함수는 다음과 같다.

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (9)$$

이와 같은 혼합 트래픽이 전송될 때, PDBN, PGPS, 그리고 SC가 전송할 패킷들을 적절히 서비스하는지를 관찰하기 위해, 이 패킷들을 각 트래픽 별로 구분하였다. 구분된 각 트래픽 내의 패킷에 대한 실제 지연시간을 측정한 다음, 이 지연시간 값에 대한 확률분포를 지연시간-누적분포로 나타내었다. SC는 모든 혼합형 트래픽 세션에게 오목형 서비스곡선을 할당한 오목형 SC (Concave SC)와 볼록형 서비스 곡선을 할당한 볼록형 SC(Convex SC)를 고려하였다. 실험에 사용된 각 서비

스곡선의 매개변수는 표 2에 나타났다. 이 두 종류 SC에 대해 혼합 트래픽에 적용하여 발생하는 패킷 지연시간을 관찰하였다. 이번 실험에서는 표 1에서와 같이 다섯개의 혼합트래픽 세션이 모두 가중치 0.1로 서비스된다고 가정하였다.

그림 6과 7은 PDBN, PGPS, 오목형과 볼록형 SC로 혼합 트래픽 세션을 서비스 했을 때, 텔넷과 파일전송부분의 패킷 지연시간에 대한 누적분포를 각각 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 혼합세션의 텔넷 부분에서 발생한 패킷의 경우 PDBN이 적은 지연값(약 10~100 μ sec)에서 상대적으로 큰 누적분포 확률 값을 갖는데, 이것은 오목형, 볼록형 SC나 PGPS에 비해 상대적으로 많은 패킷들이 적은 지연시간으로 서비스 되었다는 것을 의미한다. 이는 PDBN이 다른 스케줄링 알고리즘과는 다르게, 동적으로 변하는 혼합 트래픽 패턴에 대해 VoS를 통해 적은 대역폭으로 서비스된 트래픽에 대해 짧은 지연시간으로 보상해주는 때문이다. 그림 7에서 보듯이 혼합세션의 파일전송부분에서 발생한 패킷의 경우 PDBN, PGPS, 오목형과 볼록형 SC 모두 패킷 지연시간이 큰 차이 없이 서비스됨을 보여주고 있다. 결론적으로 PDBN은 혼합 트래픽 패턴을 가지는 세션에 대해, 파일 전송 부분에 대해서는 다른 스케줄러와 지연시간이 큰 차이 없이 서비스를 해주면서, 텔넷 부분에 대해서는 신속한 서비스를 제공하는 것을 관찰할 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 세션에게 주어지는 서비스를 지연시간과 대역폭으로 분리하고, 이 두 가지를 정규화시킨 서비스 가치(VoS)를 정의하였다. 이 VoS 개념을 이용하여 지연시간과 대역폭 관점에서 공정한 서비스를 할 수 있는 모델과 이 모델을 참조하여 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 모델과 알고리즘을 통해 두 종류의 서

비스, 즉 세션에게 자신의 가중치에 비례하는 지연시간-대역폭 관점의 공정서비스 와 일정 대역폭 보장을 원하는 세션에게 보장서비스를 제공할 수 있다. 이러한 서비스를 제공시 지연민감 세션과 처리지향 세션이 서버용량을 경쟁할 때, 지연민감 세션이 우선서비스를 받을 수 있는 기반이 제공된다.

성능평가를 통해 제시된 모델과 알고리즘의 특성을 분석하였고, 다른 FQ 및 SC 기반 알고리즘과 지연시간 성능을 비교하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 세션의 트래픽 특성이 정적인 상황뿐만 아니라, 동적인 상황에서도 좋은 지연시간 성능을 보였다.

앞으로의 연구계획은 본 논문에서 제안한 모델의 확장에 관한 것과 제안한 알고리즘의 구현복잡도 향상에 관한 것이다. 현 모델을 확장하여 지연시간과 대역폭을 완전 분리하여 각각에 대해 보장서비스 제공 및 잔여 서버 용량에 대해 지연시간과 대역폭 관점에서 공정한 서비스를 제공하는 모델을 고려할 예정이다. 또한 제안된 알고리즘의 구현복잡도는 현재 $O(n)$ 으로 기존의 PGPS나 WF²Q와 같은 정도이기 때문에 개선이 필요하다. 기존의 구현복잡도가 개선된 알고리즘인 SFQ나 SCFQ와 비견될 수 있는 복잡도를 갖도록 연구를 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Parekh and R. Gallager, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-Node Case," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 344-357, 1993.
- [2] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, pp. 1-12, 1989.
- [3] J. Bennett and H. Zhang, "WF²Q: Worst-case Fair Weighted Fair Queueing," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 120-128, 1996.
- [4] L. Zhang, "VirtualClock: A New Traffic Control Algorithm for Packet-Switched Networks," *ACM Trans. on Computer Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 101-124, May 1991.
- [5] P. Goyal, H. Vin, and H. Cheng, "Start-Time Fair Queueing: A Scheduling Algorithm for Integrated Services Packet Switching Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 5, no. 5, pp. 690-704, 1997.
- [6] S. Golestani, "A Self-clocked Fair Queueing Scheme for Broadband Applications," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 636-646, 1994.
- [7] J. Bennett and H. Zhang, "Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 675-689, Oct. 1997.
- [8] S. Suri, G. Varghese and G. Ghandramnenon, "Leap Forward Virtual Clock: A New Fair Queueing Scheme with Guaranteed Delays and Throughput Fairness," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 557-565, 1997.
- [9] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, "Fair Scheduling in Wireless Packet Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 7, no. 4, pp. 473-489, 1999.
- [10] T. S. E. Ng, D. C. Stephens, I. Stoica, and H. Zhang, "Supporting Best-Effort Traffic with Fair Service Curve," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 1799-1807, 1999.
- [11] R. Cruz, "Quality of Service Guarantees in Virtual Circuit Switched Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 1048-1056, 1995.
- [12] H. Sariowan, "SCED: A Generalized Scheduling Policy for Guaranteeing Quality-of-Service," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 669-684, 1999.
- [13] I. Stoica, H. Zhang, and T. S. E. Ng, "A Hierarchical Fair Service Curve Algorithm for Link-Sharing, Real-Time, and Priority Services," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 8, no. 5, pp. 185-199, April. 2000.
- [14] S. Wang, Y. C. Wang, and K. J. Lin, "A Priority-Based Weighted Fair Queueing Scheduler for Real-Time Network," in *Proc. of IEEE RTCSA*, pp. 312-319, 1999.
- [15] D. Stiliadis and A. Verma, "Efficient Fair Queueing Algorithms for Packet-Switched Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 175-185, April 1998.
- [16] F. Agharebparast and C. V. M. Leung, "Efficient Fair Queueing with Decoupled Delay-Bandwidth Guarantees," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 2601-2605, 2001.
- [17] V. Paxson and S. Floyd, "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, no. 3, pp. 226-244, June. 1995.
- [18] ITU: US TG 8/1, Radio Communication Study Group, The Radio cdma2000 RTT candidate submission, TR45-5, June98 1998.
- [19] P. Barford and M. E. Crovella, "Generating representative workloads for network and server performance evaluation," *Proceedings of ACM SIGMETRICS 98*, pp. 151-160, 1998.
- [20] V. Paxson, "Empirically Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, no. 4, pp. 316-336, Aug. 1994.



이 주 현

1992년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사
1994년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
1994년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공
학 박사과정. 관심분야는 스케줄링, 무선
및 이동통신망

황 호 영

정보과학회논문지 : 시스템 및 이론
제 34 권 제 6 호 참조

이 창 건

정보과학회논문지 : 시스템 및 이론
제 34 권 제 6 호 참조

민 상 렬

정보과학회논문지 : 시스템 및 이론
제 34 권 제 6 호 참조