

論文2003-40TC-6-3

무선 망에서의 지연 비례 인터넷 차별화 서비스 제공을 위한 스케줄링 알고리즘

(Wireless Packet Scheduling Algorithm for Delay Proportional Internet Differentiated Services)

俞相朝*, 李熏哲**

(Sang-Jo Yoo and Hun-Cheol Lee)

요약

본 논문에서는 인터넷 차별화 서비스 구조인 지연 비례 서비스를 무선 망 환경에서도 제공할 수 있는 WDPS(Wireless Delay Proportional Service) 스케줄링 알고리즘을 제안한다. WDPS는 무선 망의 버스트 하고 위치-종속적인 채널 에러 특성을 고려하여 현재까지 서비스 된 클래스간 지연 서비스 정도를 근거로 적응적으로 다음에 서비스할 클래스를 선택한다. 제안된 스케줄링 방법은 무선 망 에러로 생기는 클래스 큐의 블록킹 문제를 해결하고, 클래스간 공정한 지연 서비스 품질을 제공하며 서비스 보상이 점진적으로 이루어져 하나의 클래스가 독점적으로 무선자원을 사용하지 못하도록 하였다. 모의 실험에서는 제안된 WDPS 스케줄링 방법을 사용하여 기존 인터넷 지연 차별화 서비스를 무선 망에서도 원하는 서비스 요구조건에 맞게 서비스 할 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, we propose a wireless scheduling algorithm to provide the Internet delay proportional differentiated services in wireless networks. For considering network environments that have burst and location-dependent channel errors, our proposed WDPS(Wireless Delay Proportional Service) scheduling algorithm adaptively serves packets in class queues based on the delivered delay performance for each class. The remarkable characteristics of WDPS scheduler are supporting a fair relative delay service, providing graceful throughput and delay compensation, and avoiding class queue blocking problem. Through simulations, we show that the algorithm achieves the desirable properties to provide delay proportional services in wireless networks.

Keywords : wireless, scheduling, DiffServ, Internet, QoS

* 正會員, 仁荷大學校 情報通信大學院

(The Graduate School of Information Technology and Telecommunications)

** 正會員, LG電子 디지털TV연구소

(SAT Group, Digital TV Laboratory LG Electronics)

※ 본 연구는 인하대학교 교수연구진흥사업(22765-01) 지원으로 수행 하였음.

接受日字:2003年3月17日, 수정완료일:2003年6月13日

I. 서론

현재 무선 통신망은 기존의 음성 신호 위주의 서비스에서 다양한 멀티미디어 서비스를 포함하는 통합 서비스(integrated service) 통신망으로 확장되고 있다. 음성 및 데이터 외에 WWW 브라우징, VoD(Video on Demands), 영상회의 등 다양한 응용을 포함하는 무선 멀티미디어 서비스를 지원하기 위해서는 제한된 무선자원을 서비스별로 요구되는 서비스 품질(QoS: Quality of

Service)을 고려하여 할당하는 것이 필요하다. QoS 지원을 위해 무선 망에서 해결해야 할 중요한 문제 중 하나는 패킷 스케줄링으로, 패킷 레벨에서의 대역할당과 멀티플렉싱을 위한 메커니즘을 제공한다. 무선 망 환경은 무선 채널의 에러가 버스트(burst)한 특성을 보이고 무선신호의 상호간섭, 페이딩, 다중경로 효과(multipath effect) 등으로 인해 위치-종속적(location dependant) 채널 에러 특성을 가진다. 따라서 기존의 유선 망 환경에서 제안된 WFQ^[1], PGPS^[2], WF2Q^[3], SCFQ^[4], SFQ^[5], EDD^[6] 등의 스케줄링 방법들을 무선 환경에 바로 적용하기에는 어려움이 있다.

위치-종속적 채널 에러 특성의 무선 망 환경을 고려하여, 기존의 FIFO(First In First Out) 큐 대신 플로우(flow) 단위의 큐를 사용하고 채널 상태를 모니터링 하여 오류 상태에 있는 큐는 서비스 하지 않고 라운드 로빈(round robin) 이나 ETF(Earliest Timestamp First), LQF(Longest Queue First) 등의 스케줄링 방법을 이용하여 채널 에러가 없는 다른 큐를 서비스하는 CSDPS(Channel State Dependent Packet Scheduling)^[7] 방식이 제안되었다. 그러나 이 방법은 채널 에러 상태에 있는 플로는 다른 플로우에 비해 공정한 대역폭 용량을 서비스 받지 못하게 되므로, 최근에 유선 망 환경의 공정 큐잉(fair queueing) 알고리즘들을 무선 환경에 적합하도록 적용한 논문이 많이 발표되었다. 이와 같은 방법들은 채널 에러 상태의 플로우들은 할당된 대역을 채널 상태가 좋은 플로우에게 양보하고 스케줄러는 좋은 채널 상태의 플로우가 추가적으로 얻은 대역폭을 트래킹하여, 채널 에러 플로우가 채널 에러가 없는 상태로 회복할 때 이전에 사용하지 못한 레이트를 보상(compensation) 해주게 된다. 대부분의 위치-종속 채널 에러 특성을 고려한 무선 스케줄링 방법은 유선 망에서의 공정 스케줄링 방법을 참조모델로 이용하여 무선링크 자원을 할당한다^[8-9].

IWFQ(Idealized Wireless Fair Queueing)^[10]는 채널 에러가 없을 경우에는 WFQ(Weighted Fair Queueing)과 동일하게 동작한다. IWFQ에서 채널 에러 상태에 있는 플로는 서비스가 중단되고, 에러가 없는 상태로 회복한 후에는 패킷들의 가상 종료시간(virtual finishing time)이 다른 플로우에 비해 작은 값으로 계산 되므로 이전에 에러상태에 있던 플로우에 서비스가 집중된다. CIF-Q(Channel-condition Independent Fair Queueing)^[11]은 SFQ(Start-time Fair Queueing)을 참조모델로

사용한다. IWFQ과 CIF-Q를 개선한 WFS(Wireless Fair Service)^[12-13] 스케줄링 방법에서는 지연과 레이트를 모두 고려한 WFQ을 참조 모델로 이용하고, SBFA(Server-Based Fair Approach)^[14]에서는 별도의 LTFS(Long-Time Fairness Server) 큐를 이용하여 서비스 되지 못하는 채널의 대역폭에 해당하는 슬롯을 저장하였다가 나중에 에러 상태에서 회복한 후 저장한 슬롯을 사용할 수 있는 구조를 사용한다. 그러나 SBFA 방법은 LTFS 큐를 서비스 하기 위한 레이트를 사전에 어느 정도 할당하여야 하는가에 대한 명확한 해답을 얻기 어렵다. 최근에는 공정 큐잉 모델 외에 기존 DRR(Deficit Round Robin)^[15] 방법을 무선 망에 적용한 I-CSDPS(Improved Channel State Dependent Packet Scheduling)^[16] 방법 Extending EDD(Earliest-Due Date)^[17] 방법, ELF(Effort-Limited Fair)^[18] 스케줄링 방법 등이 제안되었다.

지금까지의 무선 망 공정 큐잉 스케줄링 방법들은 채널 에러로 인한 할당 대역 손실을 채널 에러가 없는 상태로 회복한 후에 이를 보상 받게 함으로써 처리율(throughput) 관점의 공정성 보장을 주로 고려하였다. 비록, 기존의 몇 가지 제안들은 채널 에러를 겪지 않은 플로우에 대하여 최대 패킷 지연을 일정 값으로 바운드 시킬 수 있지만, 실제 채널 에러를 경험하는 많은 플로우에 대해서는 지연 값을 바운드 시킬 수 없으며 채널 에러 확률에 따라 각 플로우에 제공되는 QoS도 일정한 레벨로 유지할 수 없으므로 실질적인 플로우 당 QoS 제어는 어렵다.

최근의 인터넷의 IP 기술은 세계 도처의 많은 시스템과 통신 매체를 연결하는 글로벌 네트워크의 형성을 가능하도록 만들었다. 또한 IP 기술을 중심으로 한 통신망 통합화 과정은 무선 망에서의 인터넷 서비스 사용을 증가시켰으며, 무선망은 인터넷 백본 망에 엑세스 네트워크의 형태로 접속된다. 따라서 기존 유선 인터넷 망에서 고려되었던 QoS 지원 구조를 효과적으로 무선 망에서도 제공할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다. 현재 인터넷에서의 QoS 제공 메커니즘으로 플로우 당 QoS 제어를 수행하지 않고 플로우의 집합인 클래스(class) 단위의 QoS 제어를 수행하여 확장성(scalability)을 갖는 차별화 서비스(DiffServ: Differentiated Service)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 차세대 인터넷 서비스에서는 응용서비스 형태 별로 여러 서비스 클래스를 두어 클래스간 차별화 된 서비스를 제공한다. 차별

화 네트워크 구조에 적합한 서비스 방법 중 최근 주목을 받고있는 지연 비례 서비스(DPS: Delay Proportional Service)^[19-21]는 평균지연 관점에서 클래스별 일정 비율의 지연 특성을 갖도록 스케줄링을 수행한다. 이러한 지연 비례 차별화 서비스는 채널 에러 등으로 인해 절대적인 최대 지연 바운드 등의 QoS를 보장하기 어려운 무선 망 환경에 적합한 서비스 형태로 고려될 수 있다.

본 논문에서는 인터넷 차별화 서비스 구조인 지연 비례 서비스를 무선 망 환경에서도 제공할 수 있는 WDPS(Wireless Delay Proportional Service) 스케줄링 방법을 제안한다. WDPS는 채널 에러에 적응적인 스케줄링 방법을 사용함으로써 버스트하고 위치-종속적인 채널 에러 상황에서도 클래스로 정의된 평균지연 비율을 보다 정확히 준수할 수 있도록 한다. 본 논문에서 제안한 WDPS의 특징적인 사항으로는, ① 기존 유선 망에서의 지연 비례 서비스를 위한 WTP(Waiting Time Priority) 스케줄러는 낮은 링크 이용률(link utilization)에서, 정의된 클래스간 지연 비율 간격을 지키지 못하는 단점을 갖는데 WDPS는 이러한 문제점을 개선하였다, ② 인터넷 확장성 및 서비스 제공의 간편화를 위해 클래스 기반 무선 스케줄링을 사용한다, ③ 클래스 기반 큐를 사용할 때 나타나는 채널 에러가 없는 플로우의 블로킹(blocking) 문제를 해결하였다, ④ 채널 에러가 높은 클래스는 지연 특성이 나빠지게 되는데, 처리율 관점의 보상과 함께 적응적 지연 보상 방법을 사용한다, ⑤ 단-구간의 지연 및 처리율 보상이 점진적으로 이루어지도록 하여 특정 클래스가 주요 무선자원을 독점하는 경우를 방지한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 무선 환경에서의 지연 비례 서비스 모델에 대해 살펴보고, 제 3장에서는 제안된 WDPS 스케줄링 알고리즘에 대해 기술한다. 제 4장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능평가를 수행하였다. 마지막으로 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 무선 망에서의 제안된 지연 비례 차별화 서비스 모델

차세대 인터넷에서 차별화 서비스(DiffServ)는 플로우 단위의 QoS 제공 방식이 아닌 클래스 별 QoS를 제공한다. 망의 에지에서는 입력 플로우의 트래픽에 대한 분류, 미터링, 마킹, 셰이핑 등을 수행하고 망의 코아에서

는 미리 정의된 PHB(Per Hop Behavior)에 따른 패킷 포워딩을 수행한다. 차별화 서비스에서 스케줄러는 매 라우터에서 클래스 단위의 서비스 모델에 따라 다음에 서비스 해야 될 적합한 패킷을 선택하여 서비스한다. 무선 망에서도 이러한 유선 망의 인터넷 서비스를 지원하기 위해서는 앞에서 설명한 바와 같이 무선 망 환경의 에러 특성을 고려한 새로운 스케줄링 방법이 요구된다. 일반적으로 무선 망 스케줄러가 갖춰야 할 중요한 기능 및 구현 요소는 다음과 같다^[12].

- 에러 free 서비스 모델: 유선 망에서 제공되었던 스케줄러의 모델로 채널 에러를 갖는 무선 망에서의 참조 모델(reference model).
- 슬롯 큐 와 패킷 큐의 분리: 무선 MAC 계층의 기본 서비스 단위로의 맵핑을 쉽게 하고 (하나의 패킷은 한 개 이상의 슬롯에 대응할 수 있다), 버퍼 공간 부족으로 패킷을 폐기할 때 유연한 폐기 정책을 사용할 수 있게 하기 위해 사용
- 서비스 보상 모델(compensation model): 무선 채널 에러로 인해 공정한 서비스를 받지 못한 경우 이를 보상하기 위한 모델.
- 점진적 보상 메커니즘(graceful compensation mechanism): 무선 채널 에러를 겪은 클래스가 에러 free 상태로 회복하였을 때 서비스 보상을 받기 위해 무선 자원을 독점하여 다른 클래스의 서비스가 일시적으로 블로킹 되는 것을 방지하기 위해 점진적으로 보상을 수행하는 메커니즘.

본 장에서는 제안된 무선 스케줄링 방법에서 사용하는 에러 free 서비스 모델과 이를 무선 망에 적용시키기 위한 새로운 스케줄링 모델에 대해 살펴본다.

1. 에러 free 서비스 모델 - DPS

지연 비례 서비스(DPS) 모델은 클래스간 제공되는 평균 패킷 지연 성능 값이 네트워크 운용자가 미리 설정한 비율 대로 서비스 되도록 한다^[21]. 네트워크 운용자가 설정한 클래스별 간격(space)은 각 사용자와 네트워크 사업자와의 SLA(Service Level Agreement)를 통해 상호 인지되고 통신망에서는 이를 보장되어야 한다. 인터넷 DPS는 모든 클래스 i, j 에 대하여 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\frac{\bar{d}_i}{d_j} = \frac{\delta_i}{\delta_j} \quad (1)$$

여기서 \bar{a}_i 는 라우터에서 클래스 i 의 장구간(long-term) 평균 패킷 큐잉 지연이고, 파라미터 조합 $\{\delta_i\}$ 는 지연 차별화 파라미터(DDPs: Delay Differentiation Parameters)로 정의되는 클래스간 지연 비례 값이다. $\{\delta_i\}$ 는 클래스별 지연 성능 척도로 $0 < \delta_1 < \delta_2 < \dots < \delta_N$ 로 순서화 된다. 따라서 $\delta_2/\delta_1 = 2.0$ 은 매 라우터에서 클래스 2의 평균지연이 클래스 1의 평균지연의 2배로 서비스 된다는 것을 의미한다

이러한 DPS를 지원하는 스케줄링 방법으로 WTP (Waiting Time Priority)^[19-21] 스케줄링 알고리즘이 사용된다. WTP는 각 클래스의 HOL(Head Of Line) 패킷들에 대해 식 (2)의 $WTP_i(t)$ 을 계산하고 가장 큰 값을 갖는 클래스의 첫번째 패킷을 서비스 한다.

$$WTP_i(t) = \frac{W_i(t)}{\delta_i} = \frac{t - A_i(t)}{\delta_i} \quad (2)$$

여기서, $A_i(t)$ 는 시간 t 에 클래스 i 큐의 첫번째 패킷의 도착 시간이고, $W_i(t)$ 는 해당 패킷의 큐 대기 시간 이다. 따라서, 지연 차별화 파라미터 δ_i 가 작으면 $WTP_i(t)$ 값은 커져서 다른 클래스의 패킷 보다 먼저 서비스 받을 가능성이 커진다.

[19]-[21]에 제시한 결과 대로, WTP를 이용한 DPS는 장-구간 및 단-구간 서비스의 이론적 공정성을 증명할 수는 없지만, 모의실험 결과 높은 링크 이용률 환경에서 장-단 구간의 지연 차별화를 안정적으로 실현할 수 있다. DPS 방법은 사용자에게 사전에 사용자 트래픽의 통계적 특성 정보를 미리 신고할 것을 요구하지 않으며, 네트워크 운용자는 기존의 WFQ 및 WRR(Weighted Round Robin)류의 가중치 기반 스케줄러에서와 같이 클래스(또는 플로우) 별 입력 트래픽 특성과 QoS 요구 사항을 고려하여 가중치를 추정할 필요가 없다.

2. 무선 망에서의 DPS를 위한 스케줄링 모델

클래스 기반 DPS를 무선 망에 적용하기 위해서는 몇 가지 중요한 고려 사항이 존재한다. 첫째, DPS에서는 같은 서비스 요구조건을 갖는 플로우들이 동일한 클래스 큐에 입력되므로, 기존의 유선 망에서 처럼 클래스 큐 내부의 패킷을 FIFO 방식으로 서비스 클래스 큐의 첫번째 패킷의 채널이 에러 상태에 있을 경우 에러가 없는 채널 상태를 갖는 다른 호스트로 향하는 패킷들이 앞 패킷의 채널이 회복되기 까지 서비스를 받지 못하고

블록킹 된다. 따라서 스케줄러는 각 클래스에 속한 플로우들의 이동 호스트간 접속링크를 모니터링하여야 하고 HOL 패킷이 속한 채널이 에러상태에 있더라도 다른 채널 상태가 좋은 플로우의 패킷을 서비스 할 수 있도록 버퍼를 관리 하여야 한다. 본 논문에서는 네트워크의 스케줄러가 무선채널을 상태를 완전히 알 수 있다고 가정하였다. 무선채널의 예측은 무선 패킷 오류가 긴주기의 큰 상관관계를 갖기 때문에 한 개의 패킷이 채널오류로 전송되지 못하였다면 이어지는 패킷들이 계속해서 일정 기간 오류를 경험하게 된다는 점에 기초하여 이루어 진다.

둘째, [11][12]에서와 같이 각 클래스에 대하여 패킷 큐와 슬롯(slot) 큐를 구분하여 구현한다. 패킷 큐는 실제 데이터 패킷이 입력되는 큐이고 슬롯 큐의 슬롯은 매 데이터 패킷이 입력될 때 마다 도착시간(arrival time)을 기록하게 된다. 슬롯 큐의 사용은 무선 스케줄링에 있어 많은 유연성을 제공하는데, 만약 버퍼 공간 부족으로 패킷을 폐기 하여야 할 경우, 응용 서비스의 특성에 따라서 패킷 큐에서 이미 지연을 많이 겪은 제일 앞 단의 패킷을 폐기 할 수도 있고 또는 가장 최근에 도착한 패킷을 폐기 할 수도 있다. 그러나 어떤 경우에도 슬롯은 항상 슬롯 큐의 제일 마지막 슬롯을 폐기 함으로써, 패킷 폐기가 클래스 서비스 우선순위를 낮추는 결과를 막을 수 있다. 슬롯 길이는 무선 MAC 계층 프로토콜과 연계하여 설정할 수 있다. 이 경우 가변 길이를 가지는 패킷은 복수개의 슬롯을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 데이터 패킷과 슬롯의 맵핑 문제는 다루지 않는다. 슬롯 큐를 사용함으로써, 채널 에러로 인해 서비스가 보류된 적이 있는 클래스에 대해 점진적인 보상을 수행할 수 있다. 점진적 보상 방법은 본 논문의 3장에 더 자세히 기술한다.

셋째, 채널 에러가 타 클래스에 비해 높은 클래스에 대한 지연 서비스 보상이 필요하다. (그림 1)과 같이 $\delta_1 = \delta_2 = 1.0$ 이라는 가정에서 시간 $t = 10$ 에 클래스 1과 2에 각 4개의 패킷이 남아있고 $t = 11 \sim 14$ 클래스 당 두개의 패킷이 도착하였다. $t = [10, 14)$ 까지 클래스 1의 모든 채널이 에러일 경우, 클래스 1의 패킷들은 서비스 되지 않는다. $t = 14$ 에 클래스 1의 모든 채널이 에러가 없는 상태로 회복이 되었을 때, 클래스 1의 대기 패킷들은 큐에서의 대기시간이 클래스 2의 남아있는 패킷들의 대기시간 보다 길기 때문에 클래스 1의 패킷들이 우선

적으로 서비스 된다. 기존의 IWFQ등에서 사용하는 방법과 기본적으로 동일한 이러한 보상 방법은 처리율 (throughput) 측면에서는 공정한 보상이 이루어 지지만 지연이라는 QoS 관점에서는 보상이 이루어 지지 못한다. 즉, 채널 회복 후에 전송되는 클래스 1의 패킷들은 <그림 1>에서와 같이 클래스 1에 채널 에러가 없을 때보다 큐에서 많은 지연을 겪게 되고 상대적으로 클래스 2의 패킷들은 지연 측면에서 이득을 보게 된다. 따라서 무선 망에서 지연 차별화 서비스를 구현하기 위해서는 기존의 처리율 관점의 보상에 추가적으로 서비스에서 목적으로 하는 지연 관점의 보상이 이루어 져야 한다.

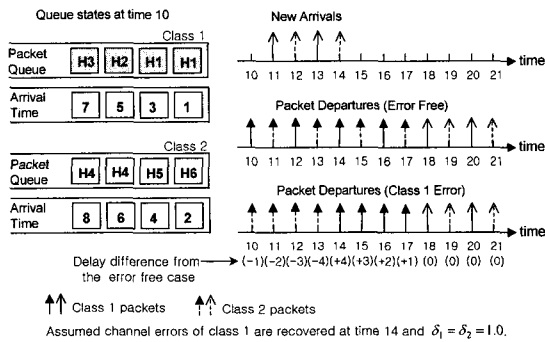


그림 1. 지연 관점의 보상 문제
Fig. 1. Example of unfair service in terms of delay.

본 논문에서 제안하는 무선 지연 차별화 서비스 스케줄링 방법은 현재 각 클래스 별 실제 제공되고 있는 지연 비례 관계를 모니터링 하여 이를 근거로 DDP(δ_i) 값을 시간에 따라 적응적으로 갱신한다. 무선 지연 차별화 서비스를 위해 사용되는 WWTP(Wireless Waiting Time Priority) 값의 설정은 식 (3)과 같다.

$$WWTP_i(t) = \frac{W_i(t)}{\delta_i(t)} = \frac{t - A_i^S(t)}{\delta_i(t)} \quad (3)$$

여기서, $WWTP_i(t)$ 는 시간 t 시점에서 클래스 i 의 적응 WWTP 값, $\delta_i(t)$ 는 클래스 i 의 적응 지연비례 파라미터 값, $A_i^S(t)$ 는 클래스 i 슬롯 큐의 첫번째 슬롯에 기록된 도착 시간이다. $\delta_i(t)$ 는 다음 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\delta_i(t) = \delta_i^R \cdot \left(\frac{\delta_i^R}{\delta_i^M(t)} \right)^\alpha \quad (4)$$

δ_i^R 은 사용자와 네트워크 운용자 간에 맺은 지연 비례 파라미터 값으로, 요구되는 클래스간 지연 서비스 간격을 의미한다. 평균 지연 요구사항이 가장 엄격한 클래스부터 정렬되고 $\delta_1^R = 1.0$ 을 사용한다. $\delta_i^M(t)$ 는 시간 t 시점에서 관측된 클래스 i 의 클래스 1에 대한 평균지연 비율이다. 만약 $\delta_i^M(t) = \delta_i^R$ 이라면, 실제 관측된 클래스 i 의 클래스 1에 대한 지연 차별화 간격이 요구된 값과 같음을 의미한다. 식 (4)에서 α 는 수렴속도를 결정짓는 파라미터로 본 논문에서는 실험적으로 계산된 $\alpha = 2.0$ 을 사용한다. $\delta_i^M(t)$ 의 관측은 다음과 같다.

$$\delta_i^M(t) = \frac{\bar{d}_i[t - T_M, t]}{\bar{d}_1[t - T_M, t]} \quad (5)$$

여기서, $\bar{d}_i[t - T_M, t]$ 는 시간 구간 $[t - T_M, t]$ 동안에 서비스된 클래스 i 패킷의 평균 지연 값이다. T_M 은 관측 시간 구간 파라미터로 원하는 시간 스케일의 지연 공정성 제공 목표에 따라 적당한 값으로 결정된다

결국 각 클래스의 서비스 순서를 결정짓는 WWTP 값은 식 (6)과 같이 구해진다.

$$WWTP_i(t) = \frac{W_i(t)}{\delta_i^R} \cdot \left(\frac{\delta_i^M(t)}{\delta_i^R} \right)^2 \quad (6)$$

예를 들어 $\delta_1^R = 1$, $\delta_2^R = 2$ 일 때 실제 $[t - T_M, t]$ 동안 관측된 $\delta_2^M(t) = 1.5$ 라면, 이는 클래스 2의 패킷들이 관측구간에서 상대적으로 클래스 1에 비해서 좋은 서비스를 받았다는 것을 뜻한다. 따라서, 다음 패킷 서비스 결정에서는 $(1.5/2)^2$ 만큼의 가중치를 곱하여 $WWTP_2(t)$ 값을 줄이게 된다. 따라서 클래스 1에 대한 지연관점의 보상이 이루어 질 수 있다.

III. WDPS 스케줄링 알고리즘

WDPS는 유선 인터넷에서 정의된 지연비례서비스를 무선망에 적용한 서비스 개념이다. 본 장에서는 제 2장에서 제시된 서비스 모델을 기반으로, 무선 망의 버스트하고 위치-종속적인 에러 특성을 고려하여 클래스간 공정한 지연 차별화 서비스를 제공할 수 있는 무선지연비례서비스(WDPS) 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

본 장에 제시된 WDPS 스케줄링 알고리즘은 간단한

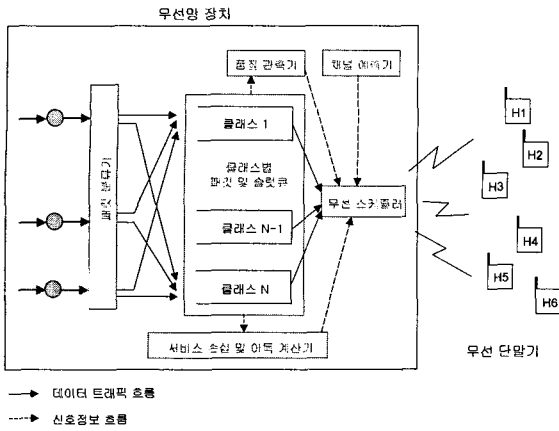


그림 2. 무선망 지연비례 인터넷 차별화 서비스 스케줄링 장치 구조
 Fig. 2. Scheduling architecture for wireless delay proportional Internet services.

기술을 위해 고정된 패킷 크기를 가정하였다. <그림 2>에서와 같이 무선망 장치에 입력되는 패킷은 인터넷 차별화 서비스 클래스 분류기를 통해 클래스 별 버퍼에 입력된다. 무선 스케줄러는 클래스 별 서비스 품질 관리기, 채널 예측기, 클래스 별 서비스 손실 (lagging) 및 이득 (leading) 계산기로 부터의 정보를 이용하여 다음에 서비스 할 패킷을 선택한다. 각 클래스는 <그림 3>과 같이 실제 데이터 패킷이 입력되는 패킷큐와 매 패킷 입력 시 도착 시간을 태깅한 정보가 입력되는 슬롯 큐로 구성된다.

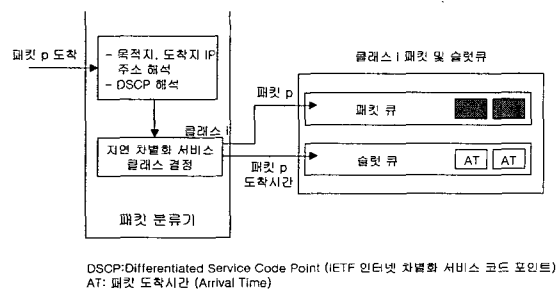


그림 3. 패킷 분류기를 통한 클래스 별 패킷큐와 슬롯 큐로의 정보 입력
 Fig. 3. Class-based packet and slot queues with packet classifier.

스케줄러는 매 서비스 시작 시간에 각 클래스 슬롯 큐의 첫번째 슬롯에 기록된 도착시간과 각 클래스의 $\delta_i(t)$ 를 이용하여 $WWTP_i(t)$ 를 계산한 후, 가장 큰 값을 갖는 클래스를 다음에 서비스할 클래스로 선택한다.

WDPS에서, 모든 클래스는 lag_i 카운터의 값에 따라 'lagging 클래스'와 'leading 클래스'로 구분될 수 있다. 만약 $WWTP_i(t)$ 가 가장 큰 값을 가져 클래스 i 가 서비스될 클래스로 선택되었지만, 패킷 큐에 대기 중인 모든 패킷의 채널이 에러 상태에 있어 다른 클래스에 패킷 전송 권한을 양보하였다면 클래스 i 슬롯 큐의 첫 슬롯을 제거한 후 lag_i 카운터 값을 1 증가시키고, 양보된

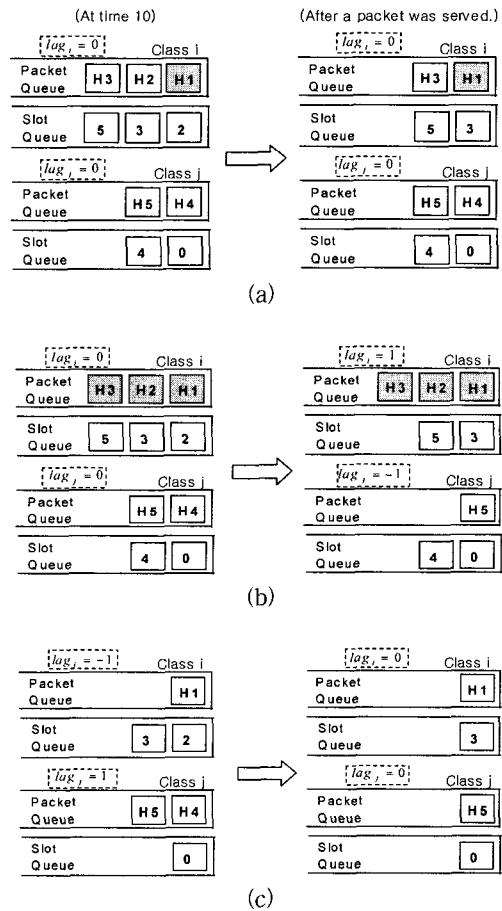


그림 4. WDPS 스케줄링 예 (a) lagging 클래스 i 선택, 클래스 j 의 H2 패킷 서비스 (b) lagging 클래스 i 선택 (모든 채널 에러상태), 클래스 j 의 H4 패킷 서비스 (c) leading 클래스 i 선택 (보상), lagging 클래스 j 의 H4 패킷 서비스.
 Fig. 4. An example of WDPS scheduling. (a) Choose the lagging class i , serve the H2 packet of class i (b) Choose the lagging class i (all channels are in error), serve H4 packet of class j (c) Choose the lagging class i (compensation), serve H4 packet of the lagging class j .

패킷 전송 권한을 사용한 클래스 j 의 lag_j 카운터 값은 1 감소시킨다. 따라서 임의의 시간 t 에서 lag_i 값이 0 이상이면 'lagging 클래스', 반대이면 'leading 클래스'로 구분한다

<그림 4(a)>에서 처럼 $t=10$ 에 스케줄러에 의해 선택된 클래스 i 가 lagging 클래스($lag_i \geq 0$)이면 패킷 큐에서 채널 에러가 없는 첫번째 패킷을 송신하고 슬롯 큐의 첫번째 슬롯을 제거한다. 만약 <그림 4(b)>와 같이 선택된 lagging 클래스의 모든 채널이 에러 상태에 있으면, 에러가 없는 채널의 패킷을 가진 다른 클래스들 중에 가장 큰 lag 카운터 값을 갖는 클래스의 채널 에러가 없는 첫번째 패킷을 송신한다.

<그림 4>와 같이 $WWTP_i(t)$ 가 가장 큰 클래스 i 가 leading 클래스($lag_i < 0$)이면, lagging 클래스를 위한 보상이 이루어 진다. 즉 가장 큰 lag 값을 갖는 lagging 클래스에 서비스를 양보한다. 보상이 이루어 지면, 보상을 수행하는 leading 클래스의 lag 카운터는 1 증가시키고, 보상을 받는 클래스의 lag 카운터는 1 감소시킨다. 그러나 leading 클래스의 lag 카운터가 0가 될 때까지 보상을 연속해서 수행하면 leading 클래스는 이때까지 전혀 서비스를 받지 못하게 되므로 점진적인 보상이 필요하다. 점진적 보상을 위해 본 논문에서는 P_{CPS} (compensation probability)를 사용한다.

P_{CPS} 는 네트워크 운영자에 의해 미리 결정되는 확률값으로 leading 클래스가 패킷전송을 위해 선택되었을

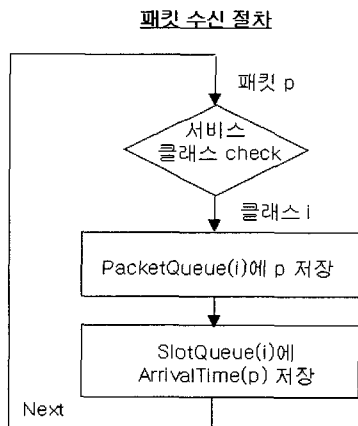


그림 5. 제안된 WDPS 알고리즘의 패킷 수신 절차 순서도

Fig. 5. The procedure for packet receiving step of the proposed WDPS algorithm.

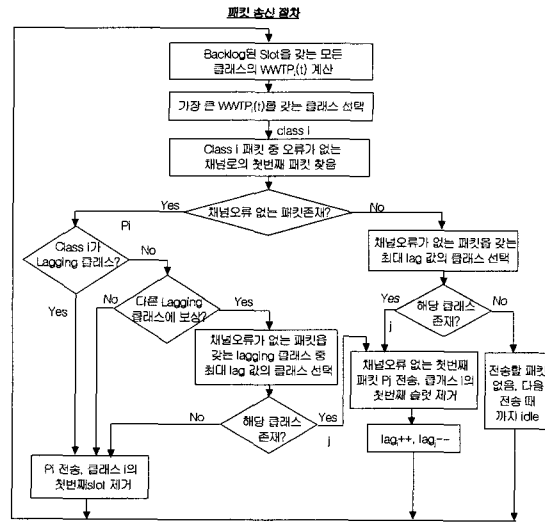


그림 6. 제안된 WDPS 알고리즘의 패킷 송신 스케줄링 절차 순서도

Fig. 6. The proposed WDPS packet scheduling procedure.

때 P_{CPS} 의 확률로 보상을 수행하고, $(1 - P_{CPS})$ 의 확률로 보상을 수행하지 않는다. 보상이 수행되지 않고 에러 없는 채널 패킷이 존재할 경우 선택된 leading 클래스의 첫번째 에러 없는 채널 패킷이 서비스된다. 그렇지 않고 보상이 수행될 경우, 에러가 없는 채널 패킷을 가진 다른 클래스들 중에 가장 큰 lag 카운터 값을 갖는 lagging 클래스의 첫 에러 없는 채널 패킷을 서비스한다.

<그림 5>와 <그림 6>은 제안된 WDPS 스케줄링 알고리즘의 순서도이다.

IV. 성능분석

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 WDPS 스케줄링 알고리즘의 성능 분석을 수행하였다. 무선 망에서 지연 비례 차별화 서비스를 지원하기 위해서는 다양한 채널 에러 환경에서도 클래스간 지연 비례 간격을 약속된 파라미터 값에 근사하게 유지하여야 한다. 또한 가능한 짧은 시간 구간 및 긴 시간 구간 동안 클래스간 공정한 서비스를 제공하여야 한다.

본 장에서의 각 모의실험 항목의 결과는 일반적으로 100,000 타임 슬롯(time slot)(하나의 타임 슬롯은 하나의 패킷 전송 시간과 같다고 가정) 동안 수행되었고, 동일한 조건에서 20 번의 실험을 반복하여 평균값을 구하

였다. 제안된 방법과의 실험 비교 대상으로 유선 망 환경에서 제안된 기존의 WTP¹⁹⁻²¹ 알고리즘과, 모든 클래스에 대해 클래스 큐 첫번째 패킷의 채널에 에러가 있더라도 뒤의 채널 에러가 없는 패킷에 대해 $WTP_i(t)$ 를 계산한 후 가장 큰 값을 갖는 클래스를 서비스 하도록 하여 클래스 큐의 블록킹 문제를 해결할 수 있도록 본 논문에서 WTP를 단순 변형한 WTP-BR(WTP-Blocking Resolution) 방법이 사용되었다.

성능분석을 위한 시스템 모델은 다음과 같다. 무선 망에서의 인터넷 지연 차별화 서비스를 위해 3개의 클래스 (C_1, C_2, C_3)를 정의하였고, 클래스간 지연 간격으로 $\delta_1^R = 1.0$, $\delta_2^R = 2.0$, $\delta_3^R = 3.0$ 을 사용하였다. 즉 클래스 1의 평균 패킷 지연에 대해 클래스 2의 평균 지연이 2배, 클래스 3는 3배를 유지 시키는 것이 서비스 요구 사항이다. 각 클래스는 실험을 위해 3개의 플로우(하나의 플로우는 하나의 호스트 채널에 대응)를 가진다고 가정하였다. 또한 클래스 버퍼는 충분히 크다고 가정하였다. 인터넷 트래픽은 버스트하고 self-similar한 특성을 갖는다고 잘 알려져 있다. 따라서 본 실험에서는, 각 플로우의 발생 트래픽이 이러한 특성을 갖을 수 있도록 패킷 도착간격(inter-arrival time)이 식 (7)의 'Pareto' 분포를 갖도록 하였다. 식 (7)의 Pareto 분포에 대해 $\sigma > 0$ 이고 $1 < \beta < 2$ 일 때 점근적으로 self-similar 하다는 것이 증명되어 있다. 실험에서는 $\sigma = 1.0$, $\beta = 1.5$ 를 사용하였다. Pareto 분포의 self-similar 정도를 나타내는 H(Hurst) 파라미터 값은 $H = (3 - \beta)/2$ 이므로 실험에 사용된 각 플로우의 트래픽은 $H = 0.75$ 의 self-similarity를 갖는다.

$$\Pr(X > t) = 1 - F_X(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^{-\beta}, & t \geq \sigma \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

또한 각 플로우 채널의 위치-중속 채널 에러를 모델링 하기 위해 본 실험에서는 2개의 상태(Clean, Error)를 갖는 이산 마코프 체인을 사용하였다. P_c 는 현재 시각에 해당 채널이 에러상태(Error)일 때 다음 타임 슬롯에는 에러가 없는 상태(Clean)으로 바뀔 확률을 나타내고, P_e 는 현재의 상태가 Clean일때 다음 타임 슬롯에 Error로 바뀔 확률이다. 정상상태(steady state) 채널 에러 확률 $P_E = p_e / (p_c + p_e)$ 로 나타내 진다.

성능분석을 위한 첫번째 실험으로, 모든 클래스 플로우들의 채널 에러가 없을 때(유선 망 환경과 동일) 기존의 인터넷 지연 차별화 서비스 스케줄링 방법인 WTP 방법과 제안된 WDPS 스케줄링 방법과의 지연 비례 요구사항의 만족도를 비교하였다. WTP는 트래픽 로드(load)가 높을 때에는 클래스간 지연 간격이 요구정도에 근사하지만 로드가 낮을 때에는 클래스간 지연간격이 요구 간격보다 좁아지게 된다. 제안된 WDPS 스케줄링 방법은 채널 에러가 없을 때에도 클래스간 지연정도를 모니터링하여 $\delta_i(t)$ 를 갱신함으로써, 낮은 로드 상황에서도 WTP 보다는 정의된 지연간격을 잘 지킬 수 있다. <그림 7>은 모든 클래스 플로우들의 평균 입력 레이트 합(총 입력 로드)이 무선링크 자원의 0.1에서부터 0.9까지 변할 때 관측된 클래스간 평균 지연 비율을 나타낸다. 단 모든 입력 플로우의 평균 입력 레이트는 동일하게 발생시켰다. WDPS를 위해 $T_M = 2,500$ time slots을 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제안된 방법은 모든 범위에서 WTP 보다 우수한 성능을 보인다. T_M 값 변화 ($T_M = 1000, 2500, 5000$ time slots)에 따른 제안된 방법의 성능 차이를 분석한 결과 제안된 방법은 실험에 사용된 T_M 값에 대해서는 큰 성능 차이를 보이지 않았다. 그러나, 아주 작은 값의 T_M 사용은 $\delta_i(t)$ 값의 큰 변동을 초래 하여 짧은 시간 간격에서 클래스간 지연 특성이 크게 변동(fluctuation) 할 수 있으며 아주 큰 값의 T_M 사용은 짧은 시간 간격의 채널 에러 상황에 빠르게 대응하지 못할 수 있다.

두 번째 실험으로, 모든 클래스 플로우들의 채널에 에러가 발생할 수 있는 상태에서 클래스간 지연 비례 특성을 분석하였다. 클래스의 각 플로우의 평균 채널 에러율(P_E)을 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ 까지 변화시켰다 ($P_c = 0.05$ 로 고정, P_e 를 변화시킴). 모든 플로우의 평균 입력 레이트는 같고 총 트래픽 로드는 0.8이다. 또한 제안된 방법을 위해 $T_M = 2,500$ time slots을 사용하였다. <표 1>은 이와 같은 조건에서, WTP, WTP-BR, WDPS의 성능을 보여준다. WDPS는 가장 우수한 성능을 보이고 클래스간 지연 비례 역시 요구된 정도에 거의 근사하게 제공됨을 알 수 있다. WTP 및 WTP-BR 방법은 채널 에러 확률이 증가 하면서 지연 비례 준수 성능이 제안된 방법보다 더 나빠지는 것을 알 수 있다. <그림 8>은 실제 서비스 된 각 클래스 패킷들의 평균

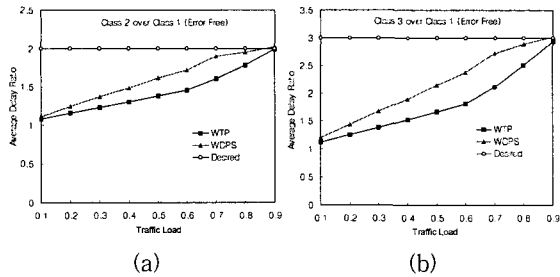


그림 7. 채널 에러가 없는 상태에서 각 클래스간 지연 비례 성능 (a) 클래스 1에 대한 클래스 2의 평균 지연 비 (b) 클래스 1에 대한 클래스 3의 평균 지연 비

Fig. 7. Ratios of average delays between classes that are error-free.

표 1. 채널 에러 상황에서 각 클래스간 지연 비례 성능

Table 1. Ratios of average delays between classes with channel errors.

채널오류 확률	관측된 평균 지연 비율							
	Class 2 over Class 1				Class 3 over Class 1			
	목표치	WTP	WTP-BR	WDPS	목표치	WTP	WTP-BR	WDPS
2.0×10^{-3}	2.0	1.76	1.77	1.95	3.0	2.50	2.53	2.93
4.0×10^{-3}	2.0	1.73	1.77	1.96	3.0	2.40	2.46	2.86
6.0×10^{-3}	2.0	1.72	1.77	1.95	3.0	2.37	2.46	2.85
8.0×10^{-3}	2.0	1.62	1.72	1.93	3.0	2.25	2.41	2.84
1.0×10^{-2}	2.0	1.59	1.67	1.88	3.0	2.20	2.32	2.76
1.2×10^{-2}	2.0	1.68	1.74	1.93	3.0	2.25	2.37	2.80
1.4×10^{-2}	2.0	1.61	1.69	1.90	3.0	2.19	2.34	2.79
1.6×10^{-2}	2.0	1.64	1.73	1.93	3.0	2.24	2.38	2.82
1.8×10^{-2}	2.0	1.61	1.70	1.90	3.0	2.13	2.32	2.75
2.0×10^{-2}	2.0	1.57	1.66	1.89	3.0	2.05	2.24	2.75

지연을 나타낸다. WTP 방법은 채널 에러가 증가할수록 블로킹 현상이 발생하므로, 클래스의 평균지연이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 제안된 WDPS 방법은 안정된 평균지연을 제공하고 클래스간 지연 간격도 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

<그림 9>는 모든 플로우의 채널 에러 확률이 1.0×10^{-2} 일 때 제안된 WDPS 스케줄링을 이용한 시간에 따른 클래스간 지연특성을 보여 준다. 10,000 타임 슬롯까지의 관측이며, 각 포인트는 100 타임 슬롯 동안의 평균 지연이다. 약 2000 슬롯시간에서 지연이 갑자기 증가하는 것은 일시적으로 트래픽 로드가 증가했기 때문이다. WDPS 방법은 짧은 주기의 시간에 대해서도 우수한

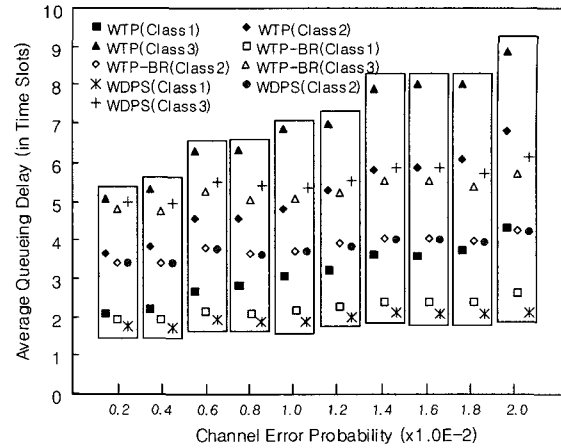


그림 8. 채널 에러에 따른 평균지연 비교
Fig. 8. Average queuing delays with channel errors.

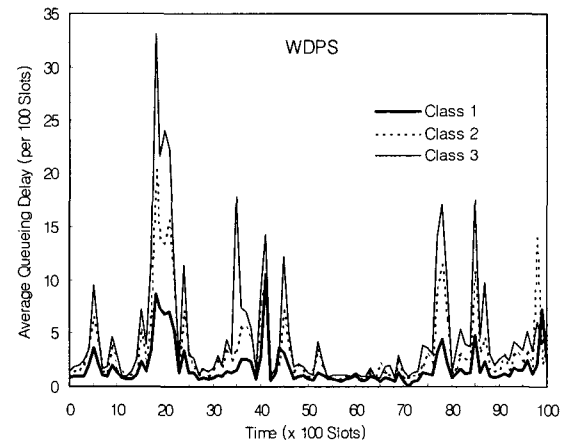


그림 9. WDPS 방법의 시간에 따른 클래스간 평균 지연 변화
Fig. 9. Changes of average delays between classes.

지연 비례 특성을 보임을 알 수 있다. <그림 10>은 <그림 9>의 실험에서 제안된 WDPS의 식 (4)로 표현되는 적응 지연비례 파라미터의 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 방법은 관측된 지연특성에 근거하여 지연비례 파라미터를 적응적으로 변화 시킨다.

마지막 실험으로, 점진적인 보상에 대한 성능평가를 수행하였다. 각 3개의 플로우를 갖는 클래스 1과 클래스 2에 대하여 전체 로드가 0.8이 되도록 모든 플로우에 동일한 평균 입력 레이트의 트래픽을 발생시켰다. 타임 슬롯 10,001-10,100 까지 클래스 1의 모든 채널이 에러 상태에 있도록 하였고, 그 외 구간에서는 모든 채널의 에러는 없도록 하였다. 제안된 WDPS를 위해 $P_{CRS}=0.5$,

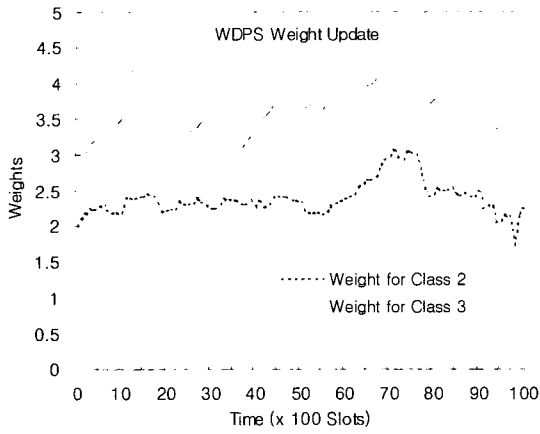


그림 10. WDPS 방법의 적응 지연비례 파라미터 값의 변화

Fig. 10. Changes of the adaptive delay proportional parameter values for the WDPS method.

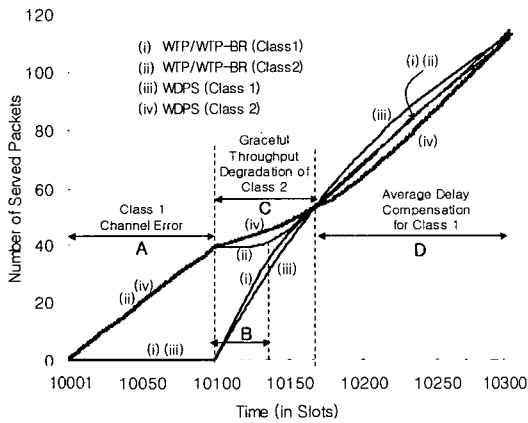


그림 11. 점진적인 서비스 보상

Fig. 11. Graceful service compensation.

$T_M = 2,500$ time slots을 사용하였다. <그림 11>은 타임 슬롯 10,001 부터 10,300 까지 서비스된 클래스 1 과 클래스 2의 누적 패킷 수를 시간에 따라 보여 준다. 클래스 1은 10,001-10,100 까지 (구간 A) 채널 에러로 인해 전혀 서비스를 받지 못하고 클래스 2만 서비스를 받게 된다. 클래스 1의 채널들이 에러가 없는 상태로 회복되면, WTP 및 WTP-BR 방법에서는 채널 에러 상태 동안 서비스 받지 못했던 클래스 1의 패킷들이 독점적으로 서비스를 받게 되므로 클래스 2의 패킷들은 일정 시간 동안(구간 B) 전혀 서비스를 받지 못하게 된다. 이러한 문제점은 WDPS 방법에서 제안된 점진적인 보상 방법을 사용함으로써 해결 될 수 있음을 알 수 있다. 제

안된 방법은 클래스 1이 에러상태에서 에러 없는 상태로 회복한 후에도 클래스 2의 패킷들도 보상확률 P_{CPS} 에 따라 일정 비율 서비스 될 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 매우 중요한 사실은, 제안된 WDPS 방법은 WTP 방법과는 달리 클래스 1이 채널 에러로 인해 클래스 2에 비해 상대적으로 불공정한 지연 관점의 서비스를 받았으므로 클래스 1의 처리율 관점의 보상이 모두 이루어진 (C 구간) 후에도 일정 시간 동안 (구간 D) 클래스 1을 더 많이 서비스 함으로써 클래스 1의 지연을 빠르게 보상한다. 이것은 WDPS에서 실제 제공된 클래스간 지연 비례 정도에 따라 $\delta_i(t)$ 값을 적응적으로 변화시키기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 위치-종속 채널 에러를 고려한 무선 망에서의 지연 차별화 서비스 제공 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 인터넷에서 클래스간 지연 정도를 일정 간격으로 다르게 서비스 할 수 있는 모델을 무선 망에 효율적으로 적용하기 위해, 새로운 무선 망 서비스 모델을 제시하고 이를 이용하여 클래스간 제공된 서비스 레벨에 적응적으로 동작하는 WDPS 스케줄링 방법을 제안하였다. 기존의 무선 망 스케줄링 방법들이 처리율 관점의 공정성만을 고려한 것과는 달리 처리율과 함께 평균 지연 비를 클래스간 공정하게 제공할 수 있도록 하였고, 서비스의 보상도 점진적으로 수행 될 수 있도록 하였다.

모의 실험을 통하여 제안된 WDPS 방법은 무선 망 환경에서 클래스간 패킷 지연 비를 서비스 요구조건에 근사하게 제공할 수 있음을 보였다. 향후 연구 과제로, 클래스간 패킷 손실 비율 까지 고려한 지연 및 손실 차별화 서비스를 제공하는 무선 망 스케줄링 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Analysis and simulation of a fair queueing algorithm", in Proc. ACM SIGCOMM'89, pp. 3~12, 1989.
- [2] A. K. Parekh and R. G. Gallager, "A generalized processor sharing approach to flow control in

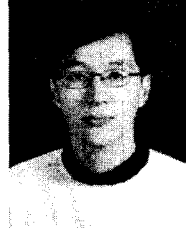
- integrated services networks: the single-node case”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, No. 3, pp. 344~357, 1993.
- [3] J. R. Bennett and H. Zhang, “WF2Q: Worst-case fair weighted fair queueing” in *Proc. IEEE INFOCOM’96*, pp. 120~128, 1996.
- [4] S. J. Golestani, “A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications”, in *Proc. IEEE INFOCOM’94*, pp. 636~646, 1994.
- [5] P. Goyal, H. M. Vin, and H. Chen, “Start-time fair queueing: a scheduling algorithm for integrated service access”, in *Proc. ACM SIGCOMM’96*, 1996.
- [6] D. Kandlur, K. Shin, and D. Ferrari, “Real-time communication in multi-hop networks”, in *Proc. 11th Int. Conf. Distributed Computer System*, pp. 300~307, 1991.
- [7] P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. K. Tripathi, “Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling”, in *Proc. IEEE INFOCOM’96*, pp. 1133~1140, 1996.
- [8] V. Bharghavan, S. Lu, and T. Nandagopal, “Fair queueing in wireless networks: issues and approaches”, *IEEE Personal Communications*, February, pp. 44~53, 1999.
- [9] Y. Cao and V. O. K. Li, “Scheduling algorithms in broad-band wireless networks”, *IEEE Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 1, January, pp. 76~87, 2001.
- [10] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, “Fair scheduling in wireless packet networks”, in *Proc. ACM SIGCOMM’97*, 1997.
- [11] T. S. Eugene Ng, I. Stoica, and H. Zhang, “Packet fair queueing algorithm for wireless networks with location-dependent errors”, in *Proc. IEEE INFOCOM’98*, pp. 1103~1111, 1998.
- [12] S. Lu, T. Nandagopal, and V. Bharghavan, “A Wireless Fair Service Algorithm for Packet Cellular Networks”, in *Proc. ACM MOBICOM* ’98, 1998.
- [13] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, “Fair scheduling in wireless packet networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 7, No. 4, pp. 473~489, 1999.
- [14] P. Ramanathan and P. Agrawal, “Adapting packet fair queueing algorithms to wireless networks”, in *Proc. ACM MOBICOM’98*, pp. 1~9, 1998.
- [15] M. Shreedhar and G. Varghese, “Efficient fair queueing using deficit round-robin”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, No. 3, pp. 375~385, 1996.
- [16] J. Gomez, A. T. Campbell, and H. Morikawa, “The Havana framework for supporting application and channel dependent QoS in wireless networks”, in *Proc. ICNP’99*, pp. 235~244, 1999.
- [17] S.-L. Tsao, “Extending earliest-due-date scheduling algorithms for wireless networks with location-dependent errors”, in *Proc. IEEE VTC’2000*, pp. 223~228, 2000.
- [18] D. A. Eckhardt and P. Steenkiste, “Effort-limited fair (ELF) scheduling for wireless networks”, in *Proc. IEEE INFOCOM’2000*, pp. 1097~1106, 2000.
- [19] C. Dovrolis, D. Stiliadis, and P. Ramanathan, “Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling”, in *Proc. ACM SIGCOMM’99*, 1999.
- [20] C. Dovrolis and P. Ramanathan, “A case for relative differentiated services and the proportional differentiation model”, *IEEE Network*, Vol. 13, No. 5, pp. 26~34, September, 1999.
- [21] C. Dovrolis, D. Stiliadis, and P. Ramanathan, “Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling”, *IEEE/ACM Transactions in Networking*, to appear in the Feb 2002 issue.

저 자 소 개



俞相朝(正會員)

1988년 2월 : 한양대학교 전자통신 공학과(공학사). 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 2000년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사). 1990년 3월~2001년 2월 : 한국통신 연구개발본부 전임연구원. 2001년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 조교수. <주관심분야 : 인터넷 QoS, 초고속 통신망 구조, 멀티미디어 네트워킹, 무선 인터넷>



李 薰 哲(正會員)

1995년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 학사. 1997년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 2002년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 2002년 8월~현재 : LG전자 디지털TV연구소 선임 연구원. <주관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전, ASIC 설계>