

## 위치 종속적 채널 에러 특성을 갖는 무선 망에서 인터넷 DiffServ QoS 제공을 위한 패킷 스케줄링 알고리즘

(Wireless Internet DiffServ Packet Scheduling Algorithm over Wireless Networks with Location-dependent Channel Errors)

申康植\*, 爰相朝\*

(Kang-Sik Shin and Sang-Jo Yoo)

### 요약

최근의 인터넷은 기존의 최선형 서비스 구조(best-effort)에서 벗어나 별도의 차별화 된 트래픽 처리와 서비스 품질(QoS)을 요구하는 응용들을 지원할 수 있는 네트워크 구조 및 트래픽 엔지니어링 기술을 요구하고 있다. 더욱이 유선에서 무선으로 인터넷이 확장되면서 위치-종속적이며 베스트하게 발생되는 에러로 인해 기존의 패킷 스케줄링 방법으로는 정의된 서비스 품질을 제공할 수 없다. 따라서 본 논문에서 무선 인터넷 차별화 서비스 네트워크 환경에서도 정의된 서비스 품질을 제공할 수 있는 WDSPS(Wireless DiffServ Packet Scheduling) 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안된 스케줄링 알고리즘은 무선 망 에러로 생기는 클래스 큐의 블록킹 문제를 해결하고 차별화 서비스 망에서 요구하는 각 클래스간 패킷 처리율, 패킷 지연, 패킷 손실률 등의 관점에서 차별화 서비스를 제공하며, 클래스 및 플로우간 효율적인 보상 방법으로 서비스 보상이 점진적으로 이루어져 하나의 클래스 및 플로우가 독점적으로 무선자원을 사용하지 못하도록 하였다. 모의 실험에서는 제안된 WDSPS 스케줄링 방법을 사용하여 다양한 무선 환경에서 서비스 클래스간 차별화된 서비스를 제공하며 전체 서비스 처리율을 향상 시킬 수 있음을 보였다.

### Abstract

The recent Internet is changing from its best-effort service and needs the network structure and traffic engineering, which can support various applications requiring differentiated traffic processing and high quality of service. The extension of the Internet from wired to wireless system generating location-dependent and burst errors make more difficult to support a good service with the existing packet scheduling algorithm. In this paper, we propose a wireless diffserv packet scheduling (WDSPS) algorithm that can provide reliable service in the differentiated wireless internet service network. The proposed scheduling algorithm solves the HOL(head of line) blocking problems of class queue occurred in wireless network, supports the differentiated service for each class which is defined in differentiated service networks and makes possible the gradual and efficient service compensation not only among classes but also among flows to prevent the monopoly of one class or one flow. Through simulations, we show that our proposed WDSPS scheduling algorithm can provide the required QoS differentiation between classes and enhance the service throughput in various wireless network conditions.

**Keywords** : wireless, scheduling, DiffServ, Internet, QoS

\* 正會員, 仁何大學校 情報通信大學院

(The Graduate School of Information Technology and  
Telecommunications, Inha Univ.)

※ 본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 지원(D00

378)으로 수행되었음.

接受日字:2003年11月8日, 수정완료일:2003年12月3日

## I. 서 론

최근 무선통신과 인터넷 사용자의 수는 비약적으로 증가하고 있으며, 이 두가지 기술적 영역의 결합으로 이동 무선 인터넷은 급격한 발전을 이루고 있다. 또한 무선 망에서의 인터넷은 기존의 음성 및 간단한 문자 기반 서비스에서 음성, 영상, 스트리밍 비디오, 웹서비스 등의 멀티미디어 서비스를 포함하는 통합 서비스 통신 망으로 확장되고 있다. 음성 및 데이터 외에 WWW 브라우징, VoD(Video on Demands), 영상회의 등 다양한 응용을 포함하는 무선 멀티미디어 서비스를 지원하기 위해서는 제한된 무선 자원을 서비스별로 요구되는 서비스 품질 (QoS: Quality of Service)을 고려하여 할당하는 것이 필요하다. 차세대 네트워크의 특징은 고속화, 다양한 서비스 품질 보장, 이동성으로 설명 될 수 있을 것이다. 현재 등장하고 있는 다양한 멀티미디어 응용들은 급속도로 파급되어가고 있고, 인터넷 상에서 개발되어 사용되는 응용들은 차세대 네트워크에서 역시 중요한 역할을 하게 될 것임에 틀림없다<sup>[1, 2]</sup>. 이런 다양한 요구에 맞는 양질의 서비스 품질을 제공하기 위해 무선 망에서 해결해야 할 중요한 문제 중의 하나는 패킷 스케줄링이다. 특히 무선 망에서의 채널 오류는 버스트(burst)한 특성과 페이딩, 간섭, 다중경로 등으로 인해 발생하는 위치 종속적인 특성을 가지기 때문에 유선 망과 무선 망에서는 같은 패킷 스케줄링 방법이 적용될 수 없다. 따라서 무선 망에서 현재의 제한적인 기능과 서비스를 개선시키기 위해서 가장 기본적인 정책중의 하나인 패킷 스케줄링 방법은 매우 중요한 부분이며 더 많은 연구가 필요하다.

현재까지 유선 망 환경에서 제안된 WFQ<sup>[3]</sup>, WF2Q<sup>[4]</sup>, SCFQ<sup>[5]</sup>등의 스케줄링 방법들은 버스트한 특성을 보이고, 위치 종속적인 에러 특성을 가진 무선 망 환경에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 무선 망 환경에서의 채널 에러 특성을 고려한 많은 스케줄링 알고리즘이 연구되어졌으나, 다양한 서비스 품질 보장을 위한 무선 망에서 인터넷 차별화 서비스 네트워크에 적합한 스케줄링 방법은 소수에 불과한 실정이다<sup>[6]</sup>. 따라서 본 논문에서는 이러한 통신 네트워크의 전반적인 발전 추세에 맞추어 무선 망 환경에서의 채널 에러에 강인하고 인터넷 차별화 서비스에서의 서비스 품질 보장을 위한 패킷 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 무선 환경에서 기존에 제안된 스케줄링 방법들에 대해 알아보고, 제 III장에서는 본 논문에서 제안된 WDSPS 스케줄링 알고리즘에 대해 기술한다. 제 IV장에서는 모의 실험을 통해 제안된 방법의 성능평가를 수행하였다. 마지막으로 제 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

최근의 인터넷의 IP기술은 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 증가 시켰으며, 무선 망은 인터넷 백본 망에 엑세스 네트워크의 형태로 접속된다. 이를 위해서는 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 플로우(flow)의 집합인 클래스(class) 단위의 QoS 제어를 수행하여 확장성(scability)을 갖는 차별화 서비스에 대한 많은 연구가 이루어 지고 있다. IETF(Internet Engineering Task Force)에서는 차별화 서비스에서 제공하는 몇가지 클래스를 표준화 했다. EF(Expedited Forwarding), AF(Assured Forwarding), DE(Default) PHB(Per Hop Behavior) Group들이 그것이다. EF 클래스는 낮은 손실, 낮은 지연, 그리고 보장된 대역폭을 요구하며, AF 클래스는 drop precedence, 트래픽의 양, 할당된 자원의 양 등에 의해 몇 가지 우선순위를 가진 클래스로 나뉘어진다. 이처럼 차세대 인터넷 서비스에서는 응용서비스 형태 별로 여러 서비스 클래스를 두어 클래스간 차별화된 서비스를 제공한다. 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, 쉐이핑 등을 수행하고 망의 코어에서는 미리 정의된 PHB에 따른 패킷 포워딩을 수행한다. 차별화 서비스에서 스케줄러는 매리어너에서 클래스 단위의 모델에 따라 다음에 서비스 해야 될 적합한 패킷을 선택하여 서비스한다. 무선 인터넷 차별화 서비스에서도 이러한 유선 망의 인터넷 서비스를 지원하기 위해서는 앞에서도 언급한 바와 같이 무선 망 환경의 에러 특성을 고려한 새로운 스케줄링 방

법이 요구된다. 일반적으로 무선 망 스케줄러가 갖추어야 할 중요한 기능 및 구현 요소는 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

- 에러 프리(error-free) 서비스 모델: 유선 망에서 제공되었던 스케줄러의 모델로 채널 에러를 갖는 무선 망에서의 참조 모델(reference model)
- 슬럿(slot) 큐 와 패킷 큐의 분리: 무선 MAC 계층의 기본 서비스 단위로의 맵핑을 쉽게 하고 (하나의 패킷은 한 개 이상의 슬럿에 대응할 수 있다) 버퍼 공간 부족으로 패킷을 폐기 할 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 클래스 및 플로우가 에러 프리 상태로 회복하였을 때 서비스 보상을 받기 위해 무선 자원을 독점하여 다른 클래스의 서비스가 일시적으로 블록킹 되는 것을 방지하기 위해 점진적으로 보상을 수행하는 메커니즘
- 래그(lag)와 리드(lead) 모델: 각 플로우가 현재 어떤 상태인지를 추정하여 보상할 플로우와 서비스를 하지 말아야 할 플로우를 구별하기 위해서 사용
- 채널 감시와 예측: 각각의 플로우의 패킷을 보낼 것인가 그렇지 않을지를 결정하기 위해서 채널을 감시하고 예측할 수 있는 기능(본 논문에서는 네트워크의 스케줄러가 한 패킷 전송 단위 시간의 채널 특성을 미리 알 수 있다고 가정하였다.)

위에서 설명한 요소들을 갖추면서 기존에 제안된 무선 스케줄링 모델 중 CSDPS (Channel State Dependent Packet Scheduling)<sup>[8]</sup> 방법은 무선 환경에서 스케줄링을 다르게 적용해야 한다고 처음으로 언급한 스케줄링 방법이다. 하지만, CSDPS 방법은 무선 환경에서의 채널의 상태에 의존적으로 스케줄링 한다는 생각은 담고 있지만, 지역 시간 보장과 같은 QoS 보장에 대한 언급은 없으며 주요 목적이 TCP의 성능을 개선하기 위하여 제안된 방법이기에 차세대 네트워크 서비스 환경에 적용하기에는 한계가 있다. IWFQ(Idealized Wireless Fair Queueing)<sup>[9]</sup>에서는 에러 프리 서비스 모델로 WFQ (Weighted Fair Queueing)를 사용하고 있다. 무선 망 환경 IWFQ에서는 채널 에러 상태에 있는 플로우는 서비스가 중단되고, 에러가 없는 상태로 회복한 후에는 패킷들의 가상 종료 시간(virtual finishing time)이 다른

플로우에 비해 작은 값으로 계산 되므로 이전에 에러상태에 있던 플로우에 서비스가 집중되어 유연한 서비스 감소가 이루어지지 못한다. SBFA(Server Based Fair Approach)<sup>[10]</sup>에서는 별도의 LTFS(Long-Term Fairness Server) 큐를 이용하여 서비스 되지 못하는 채널의 대역폭에 해당하는 슬럿을 저장하였다가 나중에 에러 상태에서 회복한 후 저장한 슬럿을 사용할 수 있는 구조를 사용한다. 그러나 SBFA 방법은 LTFS 큐를 서비스하기 위한 레이트를 사전에 어느 정도 할당하여야 하는 가에 대한 명확한 해답을 얻기 어려울 뿐만 아니라 알고리즘 자체는 간단하지만 허가된 자원보다 많은 양의 서비스를 받는 플로우에 대해서는 어떤 제한도 가지지 못한다. 또한 장기간으로 볼 때는 공평성을 제공하지만, 단기간 공평성을 제공하지 못한다. I-CSDPS(Improved Channel State Dependent Packet Scheduling)<sup>[11]</sup>은 기존 DRR(Deficit Round Robin)<sup>[12, 13]</sup> 방법을 무선 망에 적용한 스케줄링 방법으로 SBFA와 같이 허가된 자원보다 많은 양의 서비스를 받는 플로우에 대해서는 어떤 제한도 가지지 못하는 단점을 가지고 있다.

이 외에도 SFQ(Start-Time Fair Queueing)을 참조모델로 사용한 CIF-Q(Channel -condition Independent Fair Queueing)<sup>[14]</sup>, 지역화 레이트를 모두 고려한 FQ을 참조 모델로 사용하며 IWFQ과 CIF-Q를 개선한 WFS(Wireless Fair Service)<sup>[15]</sup> 스케줄링 방법 등이 있으며, 최근에는 SBFA나 I-CSDPS처럼 공정 큐잉 외에도 다른 방법들을 무선 망에 적용한 Extending EDD (Earliest-Due Date)<sup>[16]</sup>, ELF(Effort-Limited Fair)<sup>[17]</sup> 스케줄링 방법 등과 단순 평균 지역 관점의 클래스간 차별화 서비스를 지원하는 WDPS<sup>[7]</sup> 스케줄링 방법들이 제안되었다.

지금까지 무선 망 공정 큐잉 스케줄링 방법들은 차별화 서비스 네트워크를 대상으로 설계된 것이 아니다. 물론 기존의 몇 가지 제안들은 클래스별 서비스를 가능케 하기도 했지만, 실제 채널 에러를 경험하는 많은 플로우에 대해서는 클래스 단위의 보상 외에 플로우 단위의 보상은 고려하지 않았다. 따라서 채널 에러 확률에 따라 특정 클래스 내의 각 플로우에 제공되는 QoS도 클래스에 요구되는 일정한 레벨로 유지할 수 없으므로 실질적인 플로우 당 QoS 제어는 어렵다. 무선 차별화 서비스(wireless differentiated services)에서 잘 동작하기 위해서는 무선 인터넷 환경의 버스트하며 위치 종속적인 에러에 강인해야 하고 차별화 서비스의 기본 개념인 클래

스 단위의 서비스 품질과 함께 더 나아가 플로우 단위의 서비스 품질을 생각해야 한다.

본 논문에서는 무선 인터넷 차별화 서비스 구조에서 보다 정확한 클래스간 서비스 품질 보장을 위해, ① 인터넷 확장성 및 서비스 제공의 간편화를 위해 클래스 기반 무선 스케줄링 방법을 사용하고, ② 무선 인터넷 환경의 채널 에러 특성을 고려하여, 채널 에러가 높은 상황에서도 무선 자원을 효율적으로 사용할 수 있게 설계 하였다. ③ 또한, 클래스 기반 큐를 사용할 때 나타나는 채널 에러가 없는 플로우의 블록킹(blocking) 문제를 해결하였으며, ④ 기존에 제안된 스케줄링 방법과 달리 클래스 별 QoS를 제공함과 동시에 플로우별 QoS를 고려하였다. ⑤ 단 구간의 지연 및 처리율 보상이 점진적으로 이루어지도록 하여 특정 클래스 및 플로우가 주요 무선 자원을 독점하는 경우를 방지하였다.

### III. WDSPS 알고리즘

본 논문에서 제안한 WDSPS(Wireless DiffServ Packet Scheduling)는 무선 차별화 서비스 망에 목표를 맞추어 설계한 스케줄링 방법이다. 본 장에서는 무선 망의 버스트하고 위치 종속적인 에러 특성을 고려하여 각각의 클래스간 공정한 차별화 서비스를 제공할 수 있는 WDSPS 스케줄링 기본 구조를 제시하며 이를 이용하여 차별화 서비스 네트워크에서 제시하고 있는 클래스별 QoS 뿐만 아니라 각각의 플로우간 일정한 QoS도 보장하는 인터넷 차별화 서비스 패킷 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 특별히 무선 망에서 패킷 스케줄링을 위해 고려 해야 하는 부분은 무선 채널의 현재 상태와 앞으로의 상태를 예측하는 부분이다. 본 알고리즘에서는 채널 예측에 대해, 이상적으로 채널의 모든 상태를 알고 있다는 가정을 하였다. 무선 망의 채널 에러 특성을 고려해 보면 채널 상태가 비교적 바로 전 시간의 채널 상태에 의존적이라는 것을 알 수 있다. 실제로 IEEE 802.11 LAN의 RTS(Request To Send)-CTS(Clear To Send)를 통한 채널 예측을 통해서 95% 이상의 정확도로 채널의 상태를 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 패킷 스케줄링 알고리즘과 접목 시킬 수 있을 것이며, 이 부분에 대한 언급은 생략한다.

#### 1. 전체적인 스케줄링 구조

무선 망 장치에 입력되는 패킷은 인터넷 차별화 서비스 클래스 분류기를 통해 클래스 별 버퍼에 입력된다.

무선 스케줄러는 클래스 별 서비스 품질 관리기, 채널 예측기, 클래스 및 플로우별 서비스 손실(lagging) 및 이득(leading) 계산기로부터의 정보를 이용하여 다음에 서비스 할 패킷을 선택한다. WDSPS 스케줄링은 EF, AF, BE의 상위 클래스와 AF 클래스내 하위 클래스로 이루어지며, 스케줄러의 전체적인 개괄도는 <그림 1>과 같다.

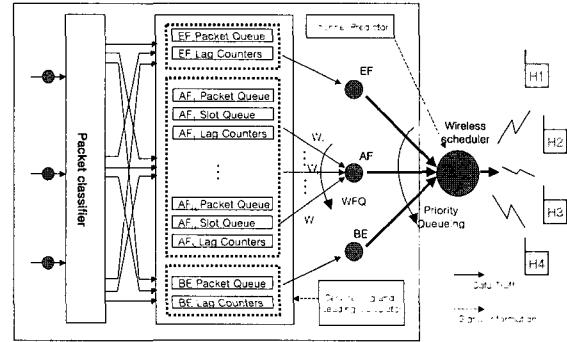


그림 1. 무선 망 인터넷 차별화 서비스를 위한 스케줄링 장치 구조

Fig. 1. Scheduling architecture for wireless differentiated services.

WDSPS 스케줄러의 각 클래스는 실제 데이터 패킷이 입력되는 패킷큐, 클래스 및 클래스 내 플로우의 래깅 및 리딩 정도를 카운트하는 래그(lag) 카운터로 구성된다. 또한 AF 클래스의 경우 AF 내 하위 클래스 ( $AF_1, \dots, AF_N$ )의 선택을 위한 WFQ 패킷 가상 종료 시간을 태깅한 정보를 저장하는 슬럿큐를 갖는다. WDSPS의 슬럿큐의 사용에서, 스케줄러는 다음 시간에 서비스를 위해 선택될 AF 클래스내 하위 클래스를 결정하는데 있어 하위 클래스별 첫 번째 슬럿큐의 정보 중 가장 작은 값을 갖는 하위 AF 클래스를 선택한다. 슬럿큐의 사용은 무선 스케줄링에 있어 많은 유연성을 제공하는데, 만약 버퍼 공간 부족으로 패킷을 폐기 하여야 할 경우, 응용 서비스의 특성에 따라서 패킷큐에서 이미 지연을 많이 겪은 제일 앞 단의 패킷을 폐기 할 수도 있고 또는 가장 최근에 도착한 패킷을 폐기 할 수도 있다. 그러나 어떤 경우에도 슬럿은 항상 슬럿큐의 제일 마지막 슬럿을 폐기함으로써, 패킷 폐기가 클래스 서비스 우선순위를 낮추는 결과를 막을 수 있다. 슬럿 길이는 무선 MAC 계층 프로토콜과 연계하여 설정할 수 있다. 이 경우 가변 길이를 가지는 패킷은 복수개의 슬럿을 발생시킬 수 있다. 슬럿큐의 사용으로 채널 에러

로 서비스를 받지 못했던 클래스에 대하여 점진적인 보상 서비스를 수행 할 수 있다. WDSPS의 시스템 구성도는 <그림 2>와 같고, 클래스와 플로우간의 보상을 위해 사용되어지는 클래스 및 플로우 래그 카운터는 본 논문의 2절에서 좀 더 자세히 기술한다.

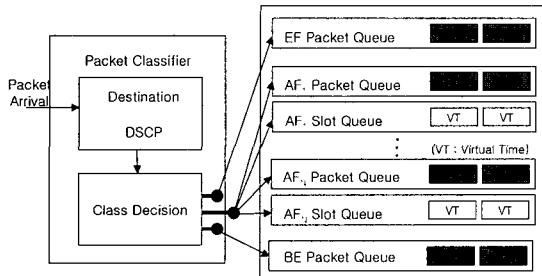


그림 2. 패킷 분류기를 통한 클래스 별 패킷큐와 슬롯 큐로의 정보 입력

Fig. 2. Class-based packet and slot queues with packet classifier.

클래스 기반 인터넷 차별화 서비스 네트워크에 초점을 맞춘 WDSPS에서 낮은 지연, 낮은 손실, 낮은 지연 변이를 요구하는 EF 클래스는 네트워크의 에지단에서 페굴레이션 되어 입력된다고 가정하였고, 차별화 서비스 네트워크의 SLA(Service Level Agreement) 등을 이용하고 필요한 경우에는 수락 제어(admission control)를 통해 전체 무선 망 대역의 일부분의 트래픽 로드를 사용한다고 가정하였다. EF 클래스는 다른 클래스 보다 우선적(priority)으로 서비스되어야 한다. 즉, EF 클래스에 전송할 패킷이 있으면, 다른 클래스는 서비스 하지 않는 것을 원칙으로 한다. EF 클래스의 플로우는 엄격한 QoS를 기대하기 때문에 어떤 플로우가 에러에서 에러 프리로 복귀한 뒤 서비스를 독점하여, 나머지 플로우의 서비스 품질저하를 가져오는 것을 방지하여야하며, AF 클래스는 어느 정도 보장된 대역폭을 요구하는 클래스 이므로 BE 클래스보다는 우선적으로 서비스 되어야한다. 따라서 WDSPS에서의 EF, AF, BE 상위 클래스간 서비스는 절대적 우선순위 스케줄링 방식으로 서비스 한다.

선택된 클래스 내에서 서비스 방법으로 먼저 EF 클래스와 BE 클래스는 각 클래스내 패킷의 도착 시간에 따라 서비스를 시행한다. 특별히 AF 클래스는 더욱 다양한 차별화된 서비스를 위하여 하위 클래스를 두기 때문에 AF내의 서비스 클래스( $AF_1, AF_2, \dots, AF_N$ )는 미리

정의된 하위 클래스별 가중치( $W_1, W_2, \dots, W_N$ )에 따라 WFQ 방식으로 AF 하위 클래스별 슬럿큐를 이용하여 서비스할 클래스를 선택한다. 하위 AF 클래스 내의 서비스 방법으로는  $AF_k$  클래스가 선택되었다면 해당 클래스 내에서의 서비스는 패킷의 도착 시간에 따라 시행한다.

## 2. 무선 망 차별화 서비스를 위한 클래스 내 플로우들 간의 QoS 보상

기존에 유선 망에서 제안된 방법을 무선 망에 그대로 사용 할 경우 어떤 한 클래스 큐 내의 HOL(Head of Line) 패킷이 채널 에러로 인해 블록킹 되어질 때, 큐 내에 다른 클리어(clear) 채널 플로우가 있음에도 불구하고 HOL 패킷의 플로우가 채널 에러에서 에러 프리로 복귀할 때 까지 해당 클래스 큐의 모든 채널의 패킷이 서비스 되지 못한다. 또한 이 문제(HOL 블록킹)를 해결 한다 하여도 채널 에러를 겪은 플로우가 채널 에러 상태에서 에러 프리로 바뀌었을 때, 다른 채널 상태가 좋았던 클래스내의 다른 플로우에 비해 나쁜 QoS를 제공 받게 된다. 그러나 제안된 WDSPS에서의 서비스 보상 모델은 기존에 제안되었던 방식과 달리, 클래스별 리딩과 래깅 개념 뿐만 아니라 플로우별 리딩과 래깅 개념을 두어 클래스 기반 서비스 품질을 보장함과 동시에 플로우들의 서비스 품질까지 일정하게 제공할 수 있도록 설계하였다.

인터넷 차별화 서비스 네트워크에서 클래스 기반 QoS뿐만 아니라 클래스내 플로우들간의 일정한 QoS를 제공하기 위한 클래스내 플로우별 리딩과 래깅 개념은 <표 1>과 같다. <표 1>의  $lag_{i,j}$  는  $i$  클래스 내에서 플로우  $j$ 의 에러프리 서비스 모델과 비교하여 해당 플로우가 받은 서비스 양을 나타낸다.

표 1. 클래스내 플로우별 리딩과 래깅

Table 1. Leading and lagging per flow in a class.

플로우	$lag_{i,j} > 0$	클래스 $i$ 의 플로우 $j$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 더 적은 서비스를 받은 경우
	$lag_{i,j} = 0$	클래스 $i$ 의 플로우 $j$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 서비스 양이 같은 경우
	$lag_{i,j} < 0$	클래스 $i$ 의 플로우 $j$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 더 많은 서비스를 받은 경우

<그림 3(a)>에서처럼 스케줄러에 의해 어떤 한 클래스가 선택되었을 때, 그 클래스 안에서 가장 빠른 도착 시간을 가지는 플로우1(F1)의 패킷이 서비스 된다. 이때, 선택되어진 플로우1이 채널 에러 상태라면 WDSPS는 다른 플로우를 선택한다. 선택할 때에는 먼저, 플로우별 래그 카운터( $lag_{i,j}$ )의 값을 확인하고 래그 카운터( $lag_{i,j}$ )의 값이 높은 플로우를 선택한다. 즉, 해당 클래스내에서 다른 플로우에 비해 서비스를 적게 받은 플로우를 선택한다. 이러한 방식으로 플로우3(F3)이 선택되었다면 플로우1은 이번에 전송하지 못한 채널 에러 상태에서 회복되었을 때 서비스를 보상받기 위하여 플로우의 래그 카운터 값을 1 증가시키고 전송이 되어진 플로우3의 래그 카운터 값은 1 감소시킨다. 만약 선택되어진 플로우를 제외한 모든 플로우가 같은 래그 카운터 값을 가지고 있다면, 스케줄러는 슬럿 큐 내에 가장 작은 시간 태그를 가진 플로우의 패킷을 서비스한다.

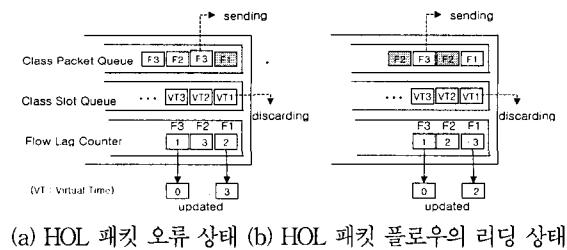


그림 3. 클래스 내 플로우간 서비스 보상(AF1 클래스 예)  
Fig. 3. Service compensation among the flows in a class.

만일 에러 프리이면서 가장 빠른 도착 시간 패킷을 가지는 플로우의 래그 카운터의 값이 0보다작은 경우 ( $lag_{i,j} < 0$ ) 즉, 선택되어진 플로우가 리딩 상태라면 가장 큰 래그 값을 가진 플로우를 위한 보상이 이루어진다. <그림 3(b)>에서 가장 일찍 도착한 플로우1 패킷은 플로우1의 래그 값이 음수, 즉 리딩이므로 다른 래그 플로우에 전송을 양보한다. 따라서 가장 큰 래그 값을 가진 플로우2가 채널 에러 상태이므로 플로우3이 선택되어진 경우이다. 보상이 이루어 지면, 보상을 수행하는 리딩 플로우의 래그 카운터 값은 1 감소시키고, 보상을 받는 플로우의 래그 카운터 값은 1 감소시킨다. 그러나 리딩 플로우의 래그 카운터가 0이 될 때까지 보상을 연속해서 수행하면 리딩 클래스는 이 때까지 전혀 서비스를 받지 못하게 되므로 점진적인 보상이 필요하다. 점진

적 보상을 위해 WDSPS에서는  $P^F_{CPS}$ (flow compensation probability)를 사용한다.  $P^F_{CPS}$ 는 네트워크 운영자에 의해 미리 결정되는 확률값으로 리딩 클래스가 패킷 전송을 위해 선택되었을 때  $P^F_{CPS}$ 의 확률로 보상을 수행하고  $(1-P^F_{CPS})$ 의 확률로 보상을 수행하지 않는다. 보상이 수행되지 않을 경우, 선택된 리딩 플로우의 첫 번째 패킷이 서비스된다. 그렇지 않고 보상이 수행될 경우, 에러 상태가 아닌 다른 플로우들 중에 가장 큰 래그 카운터 값을 갖는 플로우의 패킷을 서비스한다. 만일 선택되어진 플로우가 리딩 상태이지만, 다른 백로그된 플로우가 존재하지 않으면 그대로 서비스를 실시한다.

### 3. 무선망 차별화 서비스를 위한 클래스간의 QoS 보상

WDSPS에서의 클래스간 보상은 AF 클래스에서만 이루어진다. EF 클래스는 엄격한 QoS 제공을 위해 절대적인 우선순위 큐잉 방법을 사용하여 항상 제일 먼저 서비스되기 때문에 EF 클래스를 위한 특별한 보상이 필요하지 않다. 따라서 EF 클래스에서는 클래스 래그 카운터는 두지 않는다. 만약 EF 서비스 클래스에 서비스 할 패킷이 없거나 EF의 모든 플로우가 채널 오류 상태에 있으면 WDSPS에서는 WFQ에 의해 AF 클래스가 선택된다.  $AF_1, AF_2, \dots, AF_N$  중 어떤 한 클래스( $AF_k$ )가 선택되었을 때 그 안에 모든 플로우가 에러 상태일 때, 또는 그 클래스 자체가 리딩 클래스일 때에 다른 클래스내에 플로우를 서비스하거나 보상을 위하여 클래스간 보상이 필요하다. WDSPS에서 클래스간 리딩과 래깅 개념은 <표 2>와 같다. <표 2>의  $lag_i$ 는  $i$  클래스가 에러프리 서비스 모델과 비교하여 받은 서비스 양을 나타낸다.

WDSPS에서 클래스간 보상은 선택되어진 클래스가 리딩 클래스 일 때, 또는 선택된 클래스안의 모든 플로우가 에러 상태일 때 실시한다. <그림 4>는 서비스를

표 2. 클래스별 리딩과 래깅  
Table 2. Leading and lagging per class.

클래스	$lag_i > 0$	클래스 $i$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 더 적은 서비스를 받은 경우
	$lag_i = 0$	클래스 $i$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 서비스양이 같은 경우
	$lag_i < 0$	클래스 $i$ 가 에러 프리 서비스 상태와 비교하여 더 많은 서비스를 받은 경우

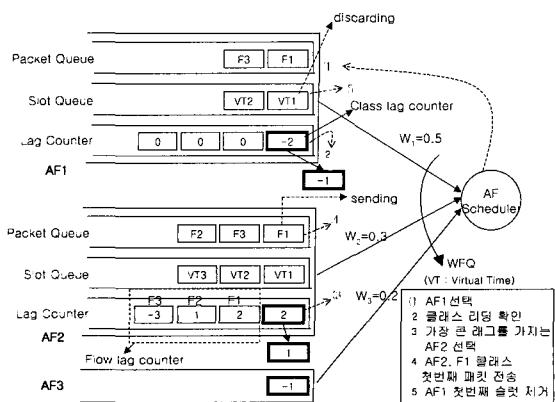


그림 4. 클래스간 서비스 보상

Fig. 4. Service compensation among the classes.

위하여 AF1 클래스의 플로우1이 선택되었으나 AF1의 랭크 카운터값이 -2로 0보다 작은 경우, 즉 리딩 상황인 경우이다. 이런 경우 AF2, AF3의 랭크 카운터 값 중 큰 값을 가지고 있는 AF2가 선택되고 AF2 클래스 내에서 에러 프리이면서 가장 큰 플로우 랭크값을 가진 플로우1이 서비스 되는 경우를 보여준다. 이처럼 클래스 간 보상이 이루어져 다른 클래스가 선택되어질 경우에는 그 클래스안 플로우의 도착시간으로 서비스를 수행하지 않고, 그 클래스안에서 가장 큰 플로우 랭크값을 갖는 플로우를 서비스 한다. 점진적인 클래스 서비스 보상을 위해 클래스간 보상에서도 PCCPS(class compensation probability)의 확률을 이용한다.

#### 4. WDSPS 스케줄링에서 각 클래스의 상황별 동작

본 장에서는 클래스별 스케줄링 알고리즘 예를 통

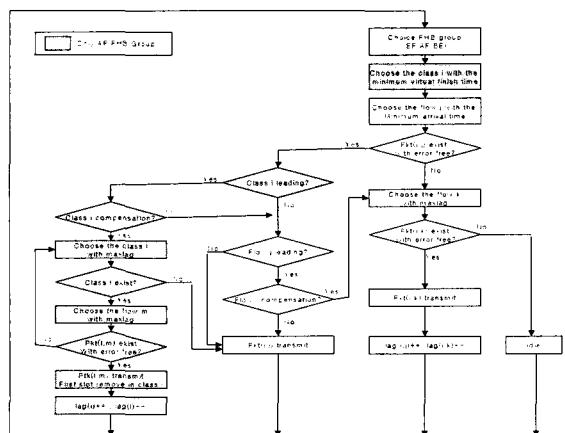


그림 5. 제안된 WDSPS 알고리즘의 스케줄링 절차 순서도

Fig. 5. Flow chart for WDSPS scheduling algorithm.

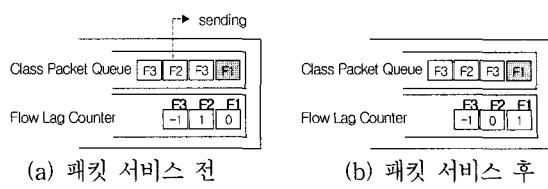
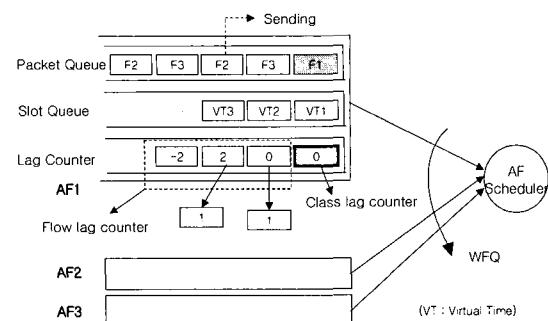


그림 6. EF 클래스 스케줄링

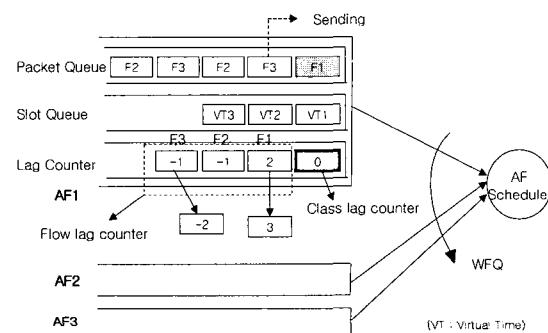
Fig. 6. EF class scheduling.

여 보다 자세히 본 WDSPS 스케줄링 알고리즘의 부가적 동작 방법을 설명한다. <그림 5>는 제안된 WDSPS의 스케줄링 절차 순서도이다. WDSPS는 <그림 5>의 순서에 따라 패킷을 송신하며, 채널 에러 상태의 플로우 및 클래스 보상을 위한 랭크 카운터를 업데이트 한다. <그림 5>는 EF 클래스의 패킷 서비스모습이다. 먼저 <그림 6(a)>는 스케줄러가 EF클래스의 패킷큐에 가장 빨리 도착한 플로우1 패킷을 선택 했을때의 모습이다. 그러나 현재 플로우1은 채널 에러 상태이다. 따라서 스케줄러는 랭크 카운터 값이 가장 큰 플로우2를 선택하고 에러 프리인 채널 상태를 확인한 후 플로우2를 서비스 한다. <그림 6(b)>는 서비스를 수행하고 난 뒤의 모습이다. 패킷큐에서는 채널 에러 프리 상태이며 가장 랭크 카운터의 값이 높았던 플로우2의 패킷이 서비스 되었다. 점진적인 보상을 위해 플로우1의 랭크 카운터는 1증가하여 0→1로 바뀌었고, 플로우2의 랭크 카운터는 처음에 선택 되지 못했음에도 불구하고 실제 데이터 패킷은 서비스 되었으므로 1→0으로 1 감소하였다.

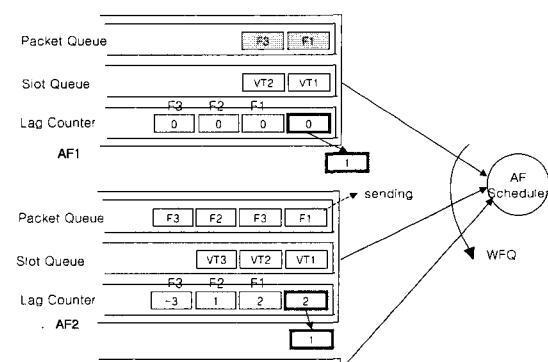
<그림 7>은 AF 클래스 스케줄링 방법의 몇가지 예를 보여준다. <그림 7(a)>에서는 AF 하위 클래스의 슬롯 큐들 중 가장 작은 종료 시간을 가진 AF1이 선택되었고, AF1이 리딩이 아니므로 AF1의 첫 번째 패킷인 플로우1의 패킷을 선택한다. 그러나 현재 플로우1은 채널 에러 상태이므로 그 클래스 안에서 에러 프리이면서 가장 큰 랭크 카운터 값을 가지고 있는 플로우2가 선택되었다. 이때, 플로우1의 랭크 카운터 값은 0→1로 1 증가하였고, 서비스 되어진 플로우2의 랭크 카운터 값은 2→1로 1 감소하였다. <그림 7(b)>에서는 가장 작은 종료 시간을 가진 AF1이 선택되고, AF1의 첫 번째 패킷 플로우 F1이 채널 에러 상태이며, 이때 다른 플로우2, 플로우3이 같은 랭크 카운터 값을 가지고 둘 다 에러 프리 상태인 경우이다. 이때는 플로우2와 플로우3 중 먼저 도착한 플로우3을 선택하여 서비스하고 플로우1의 랭크 카운터 값은 1 증가시키고 플로우3의 랭크 카운



(a) 처음 선택한 플로우가 채널 에러 상태이고, 나머지 플로우들의 래그가 다를 때.



(b) 처음 선택한 플로우가 채널 에러 상태이고, 나머지 플로우의 래그가 같을 때.



(c) 처음 선택한 플로우의 클래스 전체가 채널 에러 상태일 때.

그림 7. AF 클래스 스케줄링

Fig. 7. AF class scheduling.

터 값은 1 감소 시킨다. <그림 7(c)>에서는 가장 작은 종료 시간을 가진 AF1이 선택되었으나 AF1내의 모든 플로우들이 채널 에러 상태인 경우이다. 이때는 다른 AF 클래스의 래그 카운터 값을 확인하고 가장 큰 클래스 래그 카운터 값을 가지고 있는 AF2를 선택한다. AF2 안에서는 가장 빠른 도착 시간을 가진 플로우를

선택하지 않고 바로 AF2의 플로우별 래그 카운터 값을 확인하여 가장 큰 플로우 래그 카운터 값을 갖는 플로우1을 선택한다. AF2 클래스 안의 플로우1를 서비스 한 후에는 AF2의 클래스 래그 카운터의 값을 1 감소 시키고, AF1 클래스 래그 카운터 값은 1증가 시킨다.

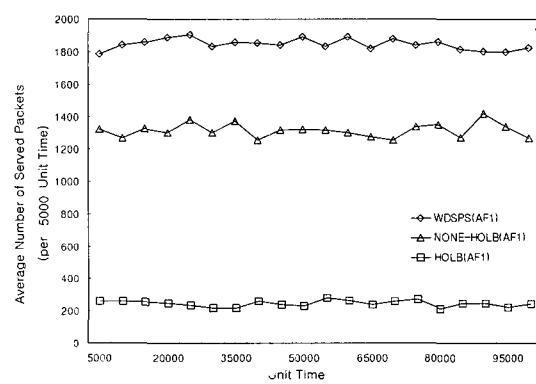
#### IV. 성능 분석

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 WDSPS 스케줄링 알고리즘의 성능 분석을 수행하였다. 무선 망에서 차별화 서비스를 지원하기 위해서는 다양한 채널 에러 환경에서도 서비스간 서비스 차별화를 SLA에 의해 미리 약속된 만큼에 근사하게 유지하여야 한다. 또한 가능한한 짧은 시간 구간 및 긴 시간 구간 동안 서비스간 공정한 서비스를 제공하여야 한다. 본 장에서의 각 모의실험 항목의 결과는 일반적으로 100,000 유닛 타임(unit time) (하나의 유닛 타임은 최소 하나의 패킷 전송 시간과 같다)으로 가정하였다. 즉, 패킷 길이가 1이면 1 유닛 타임동안 전송이 이루어진다) 동안 수행되었고, 동일한 조건에서 20번의 실험을 반복하여 평균값을 구하였다. 제안된 방법과의 실험 비교 대상으로 본 논문에서 제안한 <그림 1>의 구조에서 클래스 패킷큐에 HOLB(Head of Line Blocking)이 존재하는 스케줄링 방법과, HOL 블록킹 문제만을 해결한 NONE-HOLB인 스케줄링 방법을 사용하였다. HOLB 스케줄링 방법은 기존의 FIFO 스케줄링 방법에서처럼 어떤 클래스 내에 HOL 패킷이 채널 오류 상태일 때에 다른 클리어 채널을 가진 패킷이 있음에도 불구하고 HOL 패킷이 채널 오류에서 채널 클리어 상태로 바뀌기 전까지는 그 클래스 내에 다른 모든 패킷도 서비스 되지 못하는 방식이다. NONE-HOLB 스케줄링 방법은 어떤 클래스 내에 HOL 패킷이 채널 오류 상태일 때에도 다른 클리어 채널을 가진 패킷을 찾아 서비스 하는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 WDSPS에서 제안하는 클래스 및 플로우간 효율적인 보상 방법을 제공하지 못하므로 두 가지 성능비교 방법 모두 다 클래스나 플로우간 QoS 보상은 수행하지는 않는다. 성능 분석을 위한 시스템 모델은 다음과 같다. 3 개의 클래스 즉, EF, AF, BE PHB 그룹을 정의하였고, AF 클래스 안에는 더 다양한 차별화된 서비스를 위해 AF1, AF2, AF3의 각 3개의 클래스로 정의하였다. AF1, AF2, AF3의 가중치는  $W_{AF1} = 0.5$ ,  $W_{AF2} = 0.3$ ,  $W_{AF3} = 0.2$ 로 설정하였다. 실험을 위해 각 클래스는 3

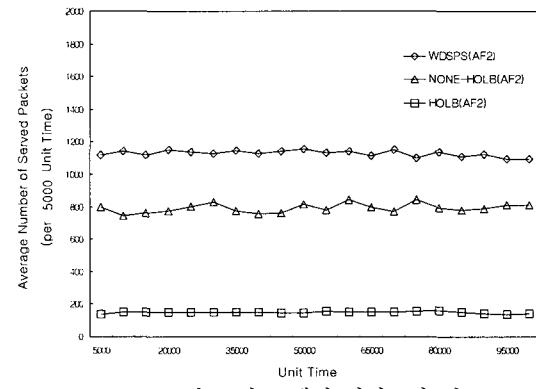
개의 플로우(하나의 플로우는 하나의 호스트 채널에 대응)를 가진다고 가정하였다. 패킷은 정해진 패킷 도착률 ( $\lambda$ )의 프와송(Poisson)분포를 따르도록 생성되고 각 패킷의 크기는 평균 1의 크기를 가지는 exponential 분포를 따르도록 하였다. 또한 각 플로우 채널의 위치 종속 채널 에러를 모델링 하기 위해 본 실험에서는 2개의 상태(Clean, Error)를 갖는 이산 마코프 체인을 사용하였다.  $P_c$ 는 현재 시각에 해당 채널이 에러상태(Error)일 때 다음 유닛 타임에는 에러가없는 상태(Clean)으로 바뀔 확률을 나타내고,  $P_e$ 는 현재의 상태가 Clean일 때 다음 유닛 타임에 Error로 바뀔 확률이다. 정상상태(steady state) 채널 에러 확률  $PE = P_e/(P_c+P_e)$ 로 나타내 진다.

성능 분석을 위한 첫 번째 실험으로, 모든 클래스 플로우들의 채널 에러율을 0.03 으로 설정하고 제안된 WDSPS 스케줄링 방법을 이용한 AF PHB그룹내 3개의 클래스의 요구 사항 만족도를 HOLB(HOL 블록킹 문제를 해결하지 못한 스케줄링 방법)과 NONE-HOLB (HOL 블록킹 문제를 해결한 스케줄링 방법)의 스케줄링 방법과 비교하였다. 이 실험을 위해 트래픽 로드는 각 버퍼에 패킷이 항상 백로그 되도록 하기위해 링크 스피드 보다 크게 하였으며, 무한 버퍼 환경으로 실험하였다. 또한 관찰을 위해 5000유닛 타임동안마다 패킷의 처리양을 측정하였다. <그림 8>은 무신 환경에서 채널 에러가 일어났을 때, WDSPS는 AF 클래스내 하위 클래스의 서비스 요구사항  $W_{AF1} = 0.5$ ,  $W_{AF2} = 0.3$ ,  $W_{AF3} = 0.2$ 의 비를 그대로 만족시키는 모습을 보여주고 있으며, HOL 블록킹이 일어나는 스케줄링이나, HOL 블록킹 문제를 해결한 스케줄링 방법보다 많은 양의 패킷을 처리하는 것을 볼 수 있다. 또한 HOLB, NONE-HOLB의 경우 모두  $W_{AF1}$ ,  $W_{AF2}$ ,  $W_{AF3}$ 의 비를 제대로 유지 하지 못함을 알 수 있다.

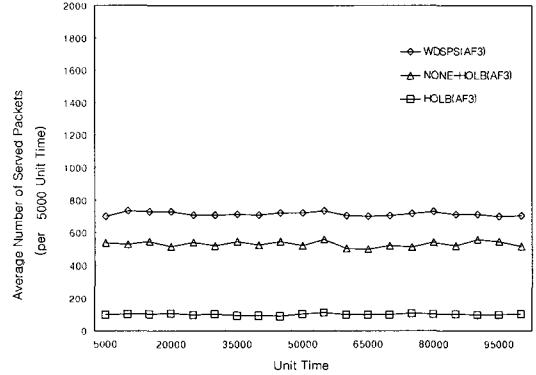
두 번째 실험으로, 모든 클래스 플로우들의 채널 에러율을 0 ~ 0.5 까지 변화 시켰다. 채널 오류 확률이 0, 0.05...0.5로 증가할 때마다 각각 20번 이상의 실험을 통해 평균값을 취한 결과이며, 각각의 채널 오류 확률은 어떤 클래스나 플로우에 대해 고정적인 확률이 아니라 모든 채널 오류에 대한 전체적인 확률값을 나타내고 각각의 클래스나 플로우에 대한 채널 오류 확률은 각 유닛타임마다 불규칙(random)적으로 달라지는, 즉 위치-종속적인 채널에러상황을 나타내는 확률값이다. 이 때



(a) AF1 클래스 평균 패킷 서비스량 비교



(b) AF2 클래스 평균 패킷 서비스량 비교

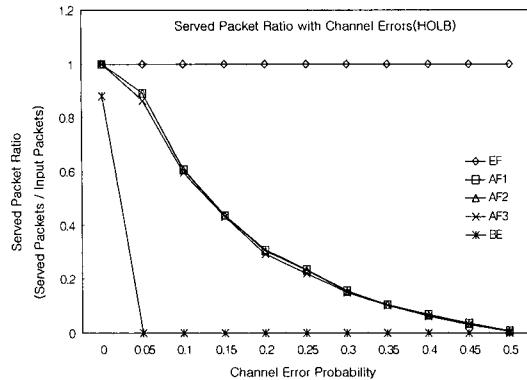


(c) AF3 클래스 평균 패킷 서비스량 비교

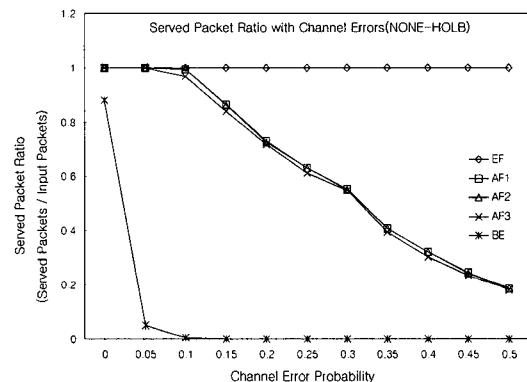
그림 8. HOLB, NONE-HOLB, WDSPS 의 AF 클래스 평균 패킷 서비스량 비교

Fig. 8. Comparison of average packet service in HOLB, NONE-HOLB, WDSPS.

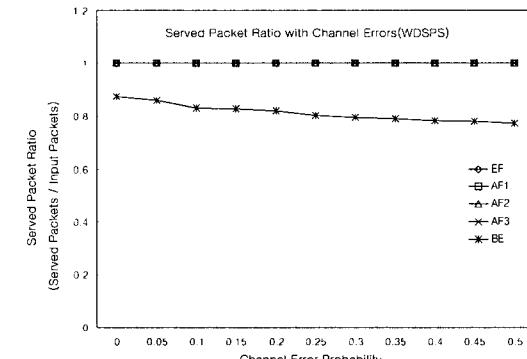
전체 트래픽 로드는 0.75를 유지 하였으며 각 클래스의 평균 입력 레이트는 동일하게 설정하여 WDSPS, NONE-HOLB, HOLB 스케줄링의 패킷 서비스 비율을 관찰하였다. 서비스 비율은 시스템으로 들어오는 패킷과



(a) 채널 변화에 따른 패킷 서비스율(HOLB)



(b) 채널 변화에 따른 패킷 서비스율(NONE-HOLB)

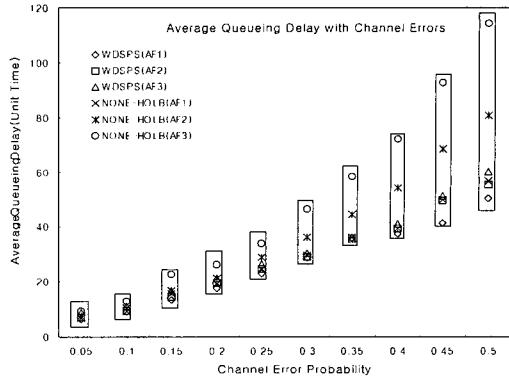


(c) 채널 변화에 따른 패킷 서비스율(WDSPS)

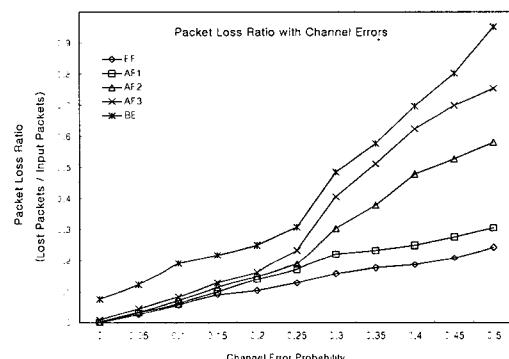
그림 9. 채널 에러 상황에서 각 클래스간 패킷 서비스 비율

Fig. 9. Packet service ratio with channel error.

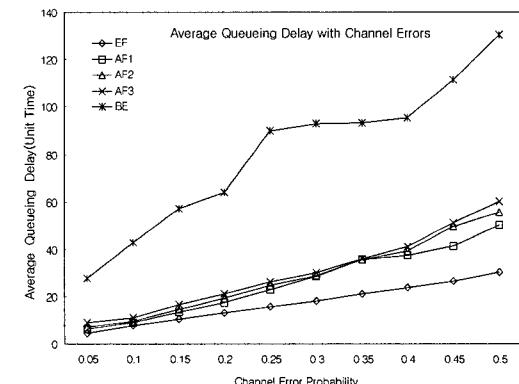
실제로 서비스되는 패킷과의 비율이며 버퍼는 무한 버퍼를 사용하였다. <그림 9(a)>와 <그림 9(b)>에서 HOLB, NONE-HOLB 스케줄러의 경우 채널 에러가 증가하면, 서비스 비율이 큰폭으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 반면에 WDSPS 스케줄링은 채널 에러율을 0.5까



(a) HOLB, NONE-HOLB, WDSPS 의 채널 변화에 따른 큐잉 지연 비교



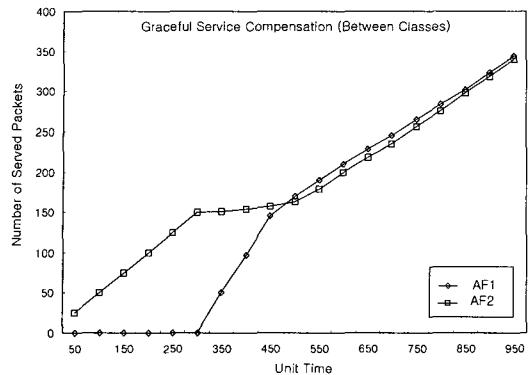
(b) WDSPS에서 채널 변화에 따른 패킷 손실률



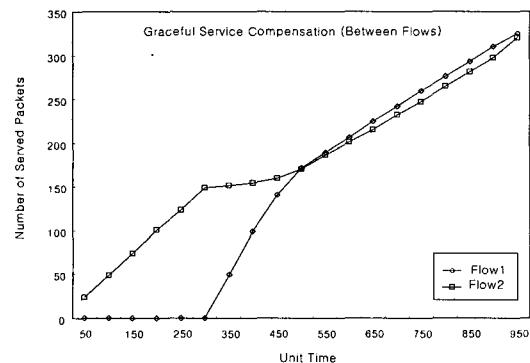
(c) WDSPS에서 채널 변화에 따른 평균 큐잉 지연

그림 10. WDSPS에서의 평균 큐잉 지연 및 패킷 손실률  
Fig. 10. Average queueing delays and packet loss with channel error.

지 발생 시켰을 때에도 EF 클래스 뿐만 아니라 AF 클래스의 서비스율도 1에 근사함을 알 수 있다(<그림 9(c)>). 제안된 WDSPS 스케줄링 방법은 특정 플로우의 에러시 다른 에러가 없는 플로우를 QoS 만족도에 따라



(a) 클래스간 점진적인 서비스 보상



(b) 클래스내 플로우간 점진적인 서비스 보상

그림 11. 점진적인 서비스 보상

Fig. 11. Graceful service compensation.

적응적으로 서비스 하므로 무선 환경에서의 다양한 채널 에러 특성을 상당히 강인한 면을 볼 수 있다.

세 번째 실험으로 모든 클래스 플로우들의 채널 에러율을 0 ~ 0.5 까지 변화 시켰다. 이 때 전체 트래픽 흐름은 0.85를 유지 하였으며 각 클래스의 평균 입력 레이트는 동일하게 설정하였고 버퍼 크기는 작게 유지하여 패킷의 손실율과 채널 에러에 대한 평균 큐잉 지연을 관찰하였다. NONE-HOLB 스케줄링 방식과 WDSPS 와의 평균 지연을 비교하였을 때, 채널 에러가 높아지면서 HOL 블록킹 문제만을 해결한 스케줄링 방법은 평균 큐잉 지연이 급격히 증가함을 관찰할 수 있었고, WDSPS는 <그림 10(a)>와 같이 짧은 기간 뿐만 아니라 비교적 긴 기간 동안에도 채널 에러에 우수하면서 안정적인 모습을 볼 수 있었다. <그림 10(b)>와 <그림 10(c)>는 WDSPS의 모든 클래스에 대해서 실험한 결과이다. <그림 10>의 실험에서 제안된 WDSPS의 스케줄링 방법으로 채널 에러를 변화시킨 상황에서 각 클래스

간에 패킷 손실율이 지속적으로 차별화되는 것을 볼 수 있고, 큐잉 지연 또한 각각의 클래스 별로 다양한 채널 에러 변화에도 차별화 되어 무선 인터넷 차별화 서비스 네트워크에 매우 매우 유연하며 기능적인 스케줄러임을 확인할 수 있다.

마지막 실험으로 점진적인 보상에 대한 성능평가를 수행하였다. 각 3개의 플로우를 갖는 AF 클래스1과 AF 클래스2에 대하여 전체 로드가 1이 되도록 모든 플로우에 동일한 평균 입력 레이트의 트래픽을 발생시켰다. <그림 11(a)>는 1-300 유닛 타임 동안 AF 클래스1의 모든 채널이 에러 상태에 있도록 하였고, 그 외 구간에서는 모든 채널의 에러는 없도록 하였다. 제안된 WDSPS를 위해 PCCPS=PFCPS=0.5로 설정하였다. AF1 클래스는 1-300 유닛 타임 동안 채널 에러로 인해 전혀 서비스를 받지 못하고 AF2 클래스만 서비스를 받게 된다. <그림 11(b)>는 AF1 클래스 내의 플로우1과 플로우2에 대한 점진적인 보상 실험이다. 1-300 유닛 타임까지 플로우1은 채널 에러로 인해 전혀 서비스받지 못하고 플로우2만 서비스를 받는다. 제안된 방법은 어떤 한 클래스나 플로우가 에러 상태에서 에러 없는 상태로 회복한 후에도 <그림 11(a)>의 AF2 클래스와 <그림 11(b)>의 플로우2처럼 보상 확률 PCPS에 따라 일정 비율 서비스 될 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 방법은 클래스나 플로우 레벨에서 특정 클래스나 플로우가 에러에서 복구된 뒤 링크 자원을 독점하지 않고 서비스의 보상이 점진적으로 일어나 무선 환경에서 매우 적응적으로 대처할 수 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 무선 망 환경에서의 위치-종속적이고 버스트한 특성의 채널 에러를 고려한 무선 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 차세대 무선 인터넷 차별화 서비스 망에서 클래스간 차별화된 서비스를 유지하면서 적응적이고 안정적으로 동작할 수 있도록 새로운 서비스 모델을 제안하였고, 클래스 당 QoS뿐만 아니라 클래스 내 플로우별 일정 QoS도 제공할 수 있도록 클래스 및 플로우 QoS 서비스 보상 방법을 보였다. 기존에 제안되었던 무선 망 환경의 스케줄링 방법보다 채널 에러에 더욱 강하며, 채널 에러를 겪는 클래스 및 플로우에게도 점진적인 보상을 수행 할 수 있도록 하였다.

모의 실험을 통하여 제안된 WDSPS 방법은 무선 환

경에서 클래스간의 차별화된 서비스와 플로우당의 서비스 품질까지도 제공할 수 있음을 보였다. 향후 연구 과제로, 가변적인 패킷 크기에 대해서 좀 더 공정한 스케줄링 방법에 대한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y.Y, Y.S, T.K, Y.H and J.P, "W2F2Q: Packet Fair Queueing in Wireless Packet Networks", ACM WOWMOM'2000, pp. 2-9, 2000.
- [2] Dovrolis.C, Stiliadis.D, Ramanathan P, "Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.10, pp. 12-26, 2002.
- [3] 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.
- [4] J. R. Bennett and H. Zhang, "WF2Q: Worst-case fair weighted fair queueing", IEEE INFOCOM'96, pp.120~128, 1996.
- [5] S. J. Golestani, "A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications", IEEE INFOCOM'94, pp. 636-646, 1994.
- [6] Hemant M Chaskar, Upamanyu Madhow, "Fair Scheduling With Tunable Latency: A Round-Robin Approach", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.11, No.4, pp.592~601, 2003.
- [7] 유상조, 이훈철, "무선 망에서의 자연 비례 인터넷 차별화 서비스 제공을 위한 스케줄링 알고리즘", 전자공학회 논문지, 제40권, TC편, 제6호, pp. 225-235, 2003년 6월
- [8] P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. K. Tripathi, "Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling", IEEE INFOCOM'96, pp. 1133-1140, 1996.
- [9] S. Lu, V. haghvan, and R. Srikant, "Fair scheduling in wireless packet networks", ACM SIGCOMM'97, pp. 254-262, 1997.
- [10] P. Ramanathan and P. Agrawal, "Adapting packet fair queueing algorithms to wireless networks", ACM MOBICOM'98, pp. 1-9, 1998.
- [11] J. Gomez, A. T. Campbell, and H. Morikawa, "A Systems Approach to Prediction Compensation and Adaptation in Wireless Networks", ACM WOWMOM'98, pp. 920-100, 1998.
- [12] 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.
- [13] Kanhere, S.S, Sethu, H, "Fair, efficient and low-latency packet scheduling using nested deficit round robin", IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, pp. 6-10, Dallas, USA, 2001.
- [14] T. S. Eugene Ng, I. Stoica, and H. Zhang, "Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors", IEEE INFOCOM'98, pp. 76-87, 1998.
- [15] S. Lu, V. Bharghvan, and R. Srikant, "Fair scheduling in wireless packet networks", IEEE/ACM Transaction on Networking, Vol.7, No.4, pp. 473-489, 1999.
- [16] S. L. Tsao, "Extending earliest-due-date scheduling algorithm for wireless networks with location-dependent errors", IEEE VTC'2000, pp. 223-228, 2000.
- [17] D. A. Eckhardt and P. Steenkiste, "Effort-Limited fair (ELF) scheduling for wireless networks", IEEE VTC'2000, pp. 1097-1106, 2000.

## 저자소개



申 康 植(學生會員)

2003년 2월 : 인하대학교 전자공학  
과(공학사). 2003년 3월 ~ 현재 : 인  
하대학교 정보통신대학원 석사 과  
정. <주관심분야 : 컴퓨터 네트워크,  
인터넷QoS, 트래픽 엔지니어링>



俞 相 朝(正會員)

1988년 2월 : 한양대학교 전자통신  
학과(공학사). 1990년 2월 : 한국 과  
학 기술원 전기 및 전자공학과(공  
학석사). 2000년 8월 : 한국 과학 기  
술원 전자전산학과(공학박사). 1990  
년 3월 ~ 2001년 2월 : 한국통신 연  
구개발본부 전임 연구원. 2001년 3월 ~ 현재 : 인하대학교  
정보통신대학원 조교수. <주관심분야 : 인터넷QoS, 초고  
속 통신망 구조, 멀티미디어 네트워킹, 트래픽 엔지니어  
링>