

# MPLS ATM 시스템에서 응용 기반 차별화 서비스를 지원하는 포워딩 엔진의 설계

김 응 하<sup>†</sup> · 조 영 종<sup>††</sup>

## 요 약

최선형 서비스만을 지원하고 있는 현재 라우터들의 인터넷 속도 개선을 위하여 MPLS ATM 시스템이 제안되었다. 하지만 MPLS ATM 시스템도 다양한 응용을 사용하는 인터넷 사용자들을 충분히 만족시키지는 못한다. 따라서 서비스 클래스에 따라 서비스 처리를 구별하는 차별화 서비스 지원이 요구된다. 본 논문에서는 MPLS ATM 시스템에 차별화 서비스를 지원하기 위하여 각 FEC에 서비스 클래스별로 설정된 LSP를 제어하는 방법과 응용 범주에 따라 차별화 서비스를 정하는 응용 기반 마킹 알고리즘을 이용한 포워딩 절차를 제안한다. 그리고 기존의 MPLS ATM 시스템의 변경을 최소화하여 구현할 수 있는 응용 기반 포워딩 엔진을 설계하고 우선 순위가 높은 응용 범주에 대해 제안한 포워딩 알고리즘이 기존 포워딩 알고리즘 보다 성능이 우수함을 제시한다.

## Design of a Forwarding Engine Supporting Application-based Differential Services in MPLS ATM System

Eung-Ha Kim<sup>†</sup> · Young-Jong Cho<sup>††</sup>

## ABSTRACT

A number of MPLS ATM systems have been proposed to increase the access speed of current routers, which only support the best-effort service. However, the MPLS ATM systems have to support the so-called differential service, which discriminates the applications according to the service class because they do not be satisfied the Internet users who use diverse applications. In this paper, to support this differential service a detailed forwarding procedure based on a LSP control method and an application-based marking algorithm is suggested. The LSP control method establishes several different LSPs for each FEC according to the service class and the application-based marking algorithm chooses a proper differential service depending on the application category. Also, a design scheme of forwarding engine, which can be easily implemented with a minimum modification of existing MPLS ATM systems is proposed. And, the best simulation result of high priority application category is gained when the proposed forwarding algorithm is compared with existing algorithms.

키워드 : 차별화 서비스(Differential Service), 포워딩 엔진(Forwarding Engine), 응용 범주(Application Category), MPLS, ATM

### 1. 서 론

최근 TCP/IP 기반의 인터넷 프로토콜이 컴퓨터 통신망의 실질적인 표준으로 확고히 자리 잡게 되면서 인터넷은 세계적인 공중 데이터망으로 성장하게 되었다[1]. 특히 인터넷이 본격적인 상업망으로 전환되기 시작하고, 고속 모뎀, 케이블 모뎀, ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line) 등의 다양한 고속 액세스 장비, 인터넷 컴퓨터 및 홈 네트워킹 가전 제품들이 보급됨에 따라서 인터넷의 수요가 폭발적으로 증가되고 있다. 그러나 현재 인터넷에서 사용하고 있는 기존 라우

터는 고속의 데이터 전송, 확장성, 인터넷 QoS(Quality of Service) 측면에서 심각한 문제점이 제기되었고, 사용자의 다양한 요구사항을 충족시키기에도 많은 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 MPLS ATM 시스템이 구현되었다[2]. MPLS ATM 망은 MPLS 제어 요소(Control Component)와 ATM 스위치로 구성된 라우터들로 구축된다. MPLS 제어 요소는 인접한 라우터들과 협상하는 레이블 분배 프로토콜(LDP : Label Distribution Protocol)을 수행함으로써 IP 패킷을 전송하기 위한 LSP(Label Switched Path)를 ATM 스위치를 통하여 설정한다. 설정된 LSP로 짧고 고정된 길이의 레이블을 이용하여 동일한 FEC(Forwarding Equivalence Class)에 속하는 IP 패킷을 전달하는 방식으로 기존 라우터의 IP 패킷 전달 방식인 LPM(Longest Prefix Match)

<sup>†</sup> 정 회 원 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<sup>††</sup> 정 회 원 : 아주대학교 정보및컴퓨터공학부 교수

논문접수 : 2001년 9월 25일, 심사완료 : 2001년 12월 11일

방식에 비해서 전달 속도를 향상시킨다. 이와 같이 MPLS ATM 시스템에서 레이블을 이용한 단순한 전달 방식에 의해서 고속화의 달성은 쉽게 이루어질 수 있었지만 QoS 제공이 가능한 라우터가 되기 위해서는 부가적인 기능을 필요로 한다. 특히 서비스 클래스에 따라서 서비스 처리를 차별화하는 IETF에서 연구중인 통합 서비스(IntServ : Integrated Service)와 차별화 서비스(DiffServ : Differentiated Service)를 지원하는 것이 중요한 이슈가 되고 있다[3]. 물론, 기존의 라우터에도 서비스 요구 품질에 대한 차별화를 위해 IPv4 헤더에 서비스를 지정하는 ToS(Type of Service)나 IPv6 헤더에 서비스를 지정하는 Traffic Class 옥텟이 존재했지만 사용하지 않고 최선형 서비스(Best-Effort Service)만을 지원해 왔다. 최근에는 차별화 서비스 모델에서 사용하고 있는 DSCP(Differentiated Service Code-point)를 이용하여 MPLS 시스템에서 차별화 서비스를 지원하는 방법이 많이 연구되고 있다 [3-5]. 이와 같이 통합 서비스나 차별화 서비스를 MPLS ATM 망에서 수용하기 위해서는 기존의 MPLS ATM 시스템 뿐만 아니라 기존의 라우터들도 모두 통합 서비스나 차별화 서비스를 수행할 수 있도록 교체되어야 한다. 하지만 현재의 통합 서비스나 차별화 서비스를 지원하지 않는 라우터들을 모두 차별화 서비스를 지원하는 라우터들로 교체하는 것은 엄청난 비용이 들 것이며, 교체 비용이 증가한다고 해서 현재의 응용들을 아무런 차별화 서비스 없이 최선형 서비스로만 수행하게 되면 인터넷 사용자의 불만은 더욱 더 커질 것이다.

본 논문은 기존의 MPLS ATM 시스템에서 차별화 서비스를 지원하기 위해서 최선형 서비스만을 수용하는 기존의 라우터로부터 전달된 패킷들의 목적지 주소와 포트 번호를 이용하여 사용되는 응용을 구별하고, 응용의 종류에 따라서 차별화 서비스를 지원하는 응용 기반 포워딩 엔진 설계에 대한 연구이다. MPLS ATM 시스템에서 이 차별화 서비스를 지원하기 위해서 기존의 LDP를 이용하여 각 FEC에 서비스 클래스별로 LSP를 설정하고 제어하는 방법을 제안한다. 응용의 범주는 지연 시간과 처리 성능의 특성에 따라 분류하였다. 분류된 응용 범주를 통합 서비스 및 차별화 서비스에 매핑하는 방법을 기술하고, 응용 범주에 따라서 네트워크 혼잡이 발생하였을 때 사용되는 ATM 헤더중 CLP(Cell Loss Priority) 값을 마킹하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 기존의 MPLS ATM 시스템의 변경을 최소화하고 인터넷 사용자를 만족시킬 수 있는 응용 기반 포워딩 엔진을 설계하고, 차별화된 LSP와 이 마킹 알고리즘을 이용한 포워딩 절차를 기술한다. 또한 제안한 포워딩 알고리즘과 기존 포워딩 알고리즘의 지연 시간, 처리율 및 손실율을 비교하여 우선 순위가 높은 응용 범주에 대해 제안한 포워딩 알고리즘의 성능 결과가 우수함을 보인다.

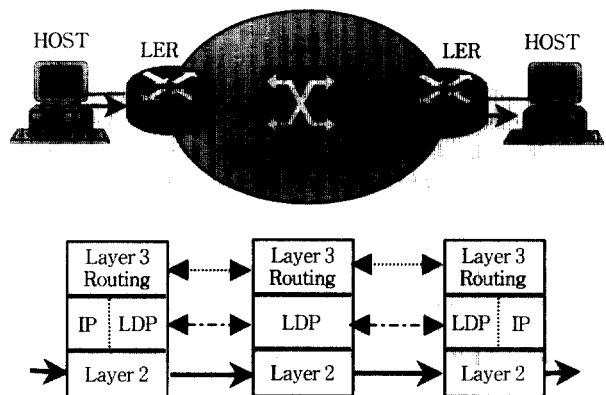
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 MPLS 기술의 개요와 차별화 서비스 기술의 기본 개념을 살펴보고, 3장에서

는 MPLS ATM 시스템의 구성과 차별화 서비스 지원을 위한 LSP 제어 방법에 대해서 기술한다. 4장에서는 응용 범주를 분류하고, 분류된 응용 범주와 차별화 서비스와의 매핑하는 방법을 기술하고, 망 정체시에 응용 범주에 따라 차별화 서비스를 하기 위해 필요한 ATM의 CLP 값을 마킹하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 이 마킹 알고리즘과 차별화된 LSP를 이용한 응용 기반 포워딩 엔진에서의 포워딩 절차에 대해 기술한다. 5장에서는 응용 기반 포워딩 엔진의 성능 결과를 보이고, 마지막으로 6장에서 결론 및 추후 연구 방향에 대하여 기술한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 MPLS

MPLS 망에서 내부에 존재하는 핵심 라우터를 LSR(Label Switched Router)이라 하며, 망 끝단의 LSR과 라우팅 모듈이 결합된 형태의 라우터를 LER(Label Edge Router)이라 한다. 그리고 타 망에서 MPLS 망으로 패킷이 입력되는 쪽에 위치한 LER을 입구(Ingress) LER이라 하고, MPLS 망을 떠나는 쪽에 위치한 LER을 출구(Egress) LER이라고 한다. (그림 1)은 MPLS 망 구성을 보여준다[6].

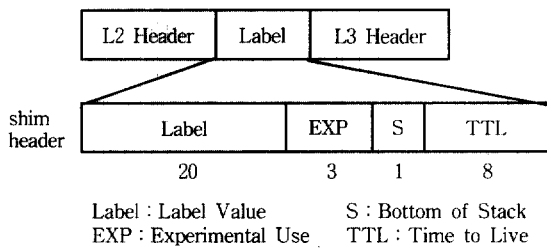


(그림 1) MPLS 망 구성

각 입구 LER과 LSR들은 3계층 라우팅 프로토콜 동작에 의해 생성된 라우팅 정보를 바탕으로 FEC(Forwarding Equivalence Class)에 대한 정보를 담고 있는 FIB(Forwarding Information Base)를 구성하게 된다. 또한 각 입구 LER과 LSR들은 레이블 스위칭을 위해 각 FEC마다 레이블을 할당하게 되는데, 이러한 레이블 할당 및 해지를 위해 각 LER과 LSR에는 LDP(Label Distribution Protocol)가 동작해야 한다[7]. 각 LER 및 LSR은 LDP 동작을 통해 레이블 스위칭에 필요한 LIB(Label Information Base)를 생성한다. 이렇게 설정된 IP 패킷이 전달될 경로를 LSP(Label Switched Path)라 한다. LSR에서는 레이블에 의해서 출력 경로를 선택하고, 입력 레이블을 출력 레이블로 교환하는 단순한 기능만을 수

행한다.

MPLS에서 사용하는 레이블은 하나의 LSR 내에서만 의미를 가지는 지역적 식별자로서, 해당 패킷에 대해 전송 결정을 내리기 위한 정보로 사용되고, 레이블 스택의 구조는 (그림 2)와 같다. 레이블은 20비트로 LSP에 직접적으로 매핑되는 값이고, FEC에 바인딩된다. EXP의 3비트는 향후 새로운 서비스의 정의를 위해 남겨 두었는데 최근 이 영역이 디프서브(DiffServ)로 활용되는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 스택의 1비트는 레이블 스택의 끝임을 나타내고, TTL은 생존시간(Time-to-Live)의 8비트이고 IP의 TTL과 같은 개념을 가진다[8].



(그림 2) MPLS 레이블 스택 구조

FEC는 패킷의 흐름 중 공통되는 서비스들을 분류한 것으로서, 하나의 FEC는 QoS에 의한 하나의 서비스 클래스인 동시에 같은 목적지를 가지는 패킷의 흐름이다[4]. FEC는 네트워크에 패킷이 들어올 때 결정되고, 레이블을 할당하여 포워딩하게 된다. 각 FEC마다 레이블을 할당하는데 하나의 레이블만을 가질 수도 있고, 같은 FEC에 여러 개의 레이블을 할당하는 것도 가능하며, 같은 레이블이 부여된 모든 패킷은 동일하게 처리된다. 패킷 헤더의 정보를 갖고 FEC를 결정하게 되는데 예를 들면 <동일 목적지 IP 주소>, <동일 소스, 목적지 IP 주소, TTL, 포트정보>, <동일한 출구 노드> 등이 있다.

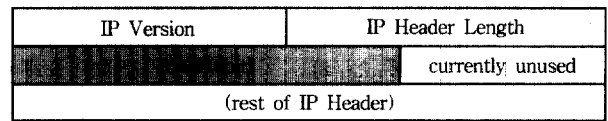
### 2.2 차별화 서비스 모델

IETF에서는 인터넷에서 QoS를 제공하기 위해 두 가지 모델이 연구중인데, 하나는 자원 예약에 근간을 둔 통합 서비스 모델이고, 다른 하나는 자원 예약이 없는 것에 근간을 둔 차별화 서비스 모델이다[9, 10].

통합 서비스 모델은 최선형 서비스 모델에서 탈피하여 보장된 시간 지연(Guaranteed Service)과 제어된 부하(Controlled Service)와 같은 새로운 서비스를 도입한다[11, 12]. 이 모델은 자원 예약 프로토콜(RSVP: Resource Reservation Protocol)을 이용하여 종단간 흐름별로 QoS를 보장하지만 종단간 흐름별로 상태를 유지하여야 하기 때문에 흐름 수가 오히려 증가하는 단점이 있다. 반면, 차별화 서비스 모델은 흐름별로 트래픽을 차별화하는 것이 아니라, 지연 및 손실 민감도에 따라 서로 다른 서비스를 제공할 수 있도록 서비스 클래스를 정의한다. 이 모델은 다수의 QoS를 가진 흐름들을

네트워크 내에서 소규모의 차별화 된 집합으로 분류함으로써 핵심 라우터에서 개별 흐름에 대한 정보를 인식하고 저장할 필요성을 없애 주어 광범위하고 융통성 있는 서비스를 제공하는 확장성(Scalability)이 있다. 따라서 백본망에는 통합 서비스 모델 보다는 차별화 서비스 모델이 사용될 것으로 예상된다.

차별화 서비스 모델에서 사용하고 있는 차별화 서비스 영역은 IPv4의 TOS 옥텟 또는 IPv6의 트래픽 클래스 옥텟의 기존 정의 대신 사용되는 헤더 영역을 말하고, (그림 3)과 같이 구성되어 있다[13]. 차별화 서비스 영역중 6비트의 DSCP는 각 노드에서 PHB를 선택하기 위해 사용되고, DSCP 다음의 두 비트(CU: currently unused)는 현재 사용되지 않는다.



(그림 3) 차별화 서비스 코드포인트, DSCP

망내 각 라우터에서는 해당 DSCP 값에 따라 차별화 서비스 행위 집합인 BA(Behavior Aggregate)를 분류하고, BA로 분류된 패킷은 각각 이 패킷을 처리하는 방법인 PHB로 매핑되고 이에 따라 패킷은 처리된다. PHB(Per-Hop Behaviors)는 라우터가 BA에 대하여 자원을 할당하는 수단이고, 다른 PHB에 비해 자원(버퍼, 대역폭), 우선 순위 또는 상대적인 관찰이 가능한 트래픽 특성(지연, 손실)에 의하여 명시될 수 있다[14]. 즉, PHB는 어떤 버퍼 관리와 스케줄링 메커니즘을 사용할 것인가의 문제이지 특정한 구현 메커니즘에 의한 것은 아니다.

MPLS ATM 시스템은 확장성과 자원 절약의 장점을 갖고 있는 차별화 서비스 모델 방식을 수용하고, DSCP가 제공되지 않는 라우터에서 들어오는 패킷 IP 헤더내의 목적지 주소와 TCP 헤더내의 목적지 포트 번호를 구별하여 패킷을 분류하는 방법을 사용하였다.

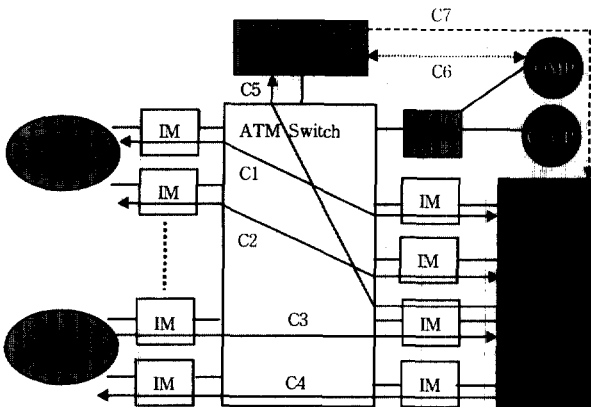
## 3. MPLS ATM 시스템

### 3.1 MPLS ATM 시스템의 구성

MPLS ATM 시스템은 LER 또는 LSR로 사용된다. LER과 LSR의 시스템 구성은 동일하다. LER은 비 MPLS 도메인에 속하는 기존의 라우터들이나 인접 LSR과 연결되어 있고, LSR은 인접 LSR이나 LER과 연결되어 있다. (그림 4)는 LER로 사용된 MPLS ATM 시스템의 논리적인 구성도를 나타낸 것으로 MPLS 제어 부분인 IPCP(Internet Protocol Control Processor)와 OMP(Operation Maintenance Processor), CCCP(Call and Connection Control Processor), FE(Forward Engine), IM(Interface Module)을 포함하는 ATM

스위치로 구성되어 있다.

IM에는 비 MPLS 도메인에 속하는 기존의 라우터들이나 인접 LSR이 영구 가상 채널인 PVC(Permanent Virtual Channel)로 연결되고, 이 PVC를 통하여 LDP 메시지와 라우팅 메시지를 송수신하게 된다. IPCP 프로세서는 라우팅 메시지를 수신하여 라우팅 정보 테이블과 포워딩 정보 테이블을 구성하고, LDP 메시지를 수신하여 포워딩 엔진에서 패킷 포워딩을 하기 위해 필요한 레이블 정보 테이블을 구성한다. IPCP 프로세서와 스위치 제어기 프로세서인 OMP 프로세서 사이에는 스위치 제어를 위하여 표준 프로토콜인 GSMP(General Switch Management Protocol) 프로토콜을 사용하며, GSMP 메시지 전송을 이더넷을 이용한 IPC 메시지에 의해서 전달한다. IPCP 프로세서에 위치한 GSMP 마스터는 LSP 설정을 위해 GSMP 프로토콜을 사용하여 OMP 프로세서에 위치한 GSMP 슬레이브에게 PVC 연결을 요구하는 기능을 한다. GSMP 슬레이브는 자원 관리 프로세서인 CCCP로부터 ATM 스위치의 자원인 VPI/VCI와 대역 할당 및 반환을 받은 다음 IPC 메시지를 이용하여 IM에 PVC 연결을 설정하고 해제하는 기능을 한다.

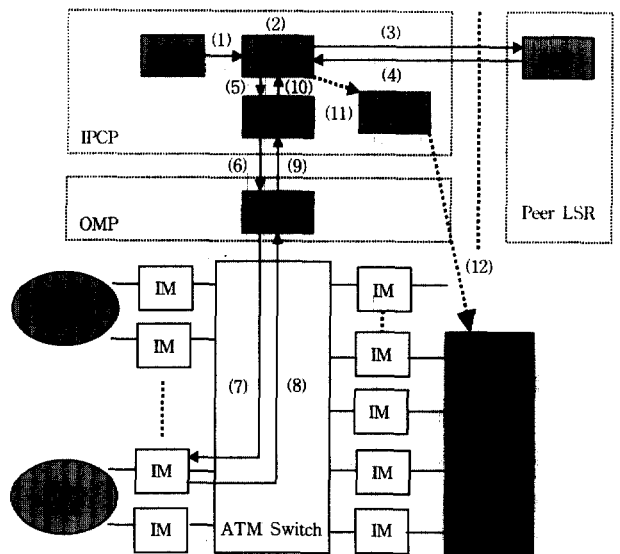


(그림 4) MPLS ATM (LER) 시스템의 논리적인 구성도

(그림 4)에서 보듯이 MPLS ATM 시스템에 존재할 수 있는 연결 종류는 다음과 같다. C1과 C2 연결은 포워딩 엔진과 Non-MPLS 포트간 연결로서 최선형 서비스를 제공하는 라우터들이 연결되어 있고, 이 연결들은 사용자 명령어인 HMI(Human Machine Interface) 명령어를 통해 연결 설정이 이루어진다. C3와 C4 연결은 포워딩 엔진과 MPLS 포트간 연결로서 시스템이 시동될 때에 초기화 작업으로서 GSMP에 의해 Full Mesh 형태로 연결 설정이 이루어진다. C5 연결은 포워딩 엔진에서 처리하지 못하는 패킷을 수신하였을 경우에 IPCP로 전송하기 위한 연결 설정이다. 그리고 C6는 GSMP 마스터와 슬레이브 사이에 통신을 위한 연결이고, C7는 IM과 포워딩 엔진간의 연결을 시키기 위하여 GSMP 마스터에서 IPC 메시지를 통해 포워딩 엔진으로 포트 번호와 레이블 정보를 전달하기 위한 연결 설정이다.

### 3.2 포워딩 정보 테이블 구성 절차

LSP 설정을 통한 포워딩 정보 테이블 구성 절차는 (그림 5)와 같으며, 아래에서 (그림 5)에 표기된 (1)~(12)까지 순서대로 처리된다. (그림 4)의 연결 C1을 통해 들어온 패킷은 목적지 IP 주소와 포트 번호를 이용하여 포워딩 테이블을 검색해서 포워딩 테이블에 포워딩 엔트리가 구성되어 있지 않는 경우 RIB의 정보를 추가하기 위해서 라우팅 프로토콜 처리 블록인 RPHF(Routing Protocol Handling Function)에게 알려주어 입력된 패킷 헤더의 정보를 갖고 RIB(Routing Information Base) 정보를 만든다. 그러나 실제로 MPLS ATM 시스템 운용시에는 이러한 경우는 거의 없고 운용자가 사전에 HMI 명령어를 통하여 RPHF에게 알려주어 시스템에서 처리될 IP 주소에 대한 RIB정보를 만드는데 (그림 6(a))와 같이 구성된다. RPHF로부터 생성된 RIB 정보를 LDP가 수신하면 RIB 정보와 FEC를 이용하여 (그림 6(b))와 같이 FIB 정보를 구성한다. 그리고 LIB 정보를 생성하기 위해서 해당 LSP 설정을 위한 LDP 절차가 구동된다. LDP는 인접 노드에게 레이블 바인딩을 요구하고, 이 요구가 최종 IP 주소를 처리하는 출구 LER을 경유하여 응답 메시지를 받게 되면 (그림 6(c))와 같은 LIB를 구성한다. LDP는 GSMP 마스터인 GMPHF(GSMP Master Protocol Handling Function)를 통해 ATM 스위치에게 PVC 연결을 GSMP 메시지를 이용하여 GSMP 슬레이브인 GSPHF(GSMP Slave Protocol Handling Function)에게 요구한다. GSMP 메시지를 GSPHF가 수신하면 메시지내의 입력 포트, 입력 레이블과 출력 포트, 출력 레이블을 갖고 요구된 LSP 연결을 설정한다.



(그림 5) 포워딩 정보 테이블 구성 절차

LSP 설정이 완료되었다는 GSMP 응답 메시지를 GSPHF가 수신하여 그 결과를 GMPHF에게 전송하고, 다시 그 결과

를 GMPHF가 LDP에게 전송한다. LDP는 설정된 LSP 연결 정보로 구성된 LIB 정보와 FIB 정보를 FIB 관리 블록인 FIBMF (FIB Management Function)에게 전달하면 FIBMF는 FIB 정보와 LIB 정보를 가지고 포워딩 정보를 구성하여 포워딩 정보를 포워딩 엔진으로 전달한다.

Destination IP	Next Hop Address	Net Mask	Destination Port	Interface

(a) RIB 정보 테이블

Destination IP	Next Hop Address	Net Mask	Destination Port	Interface	FEC

(b) FIB 정보 테이블

Input Port	Input Label	Output Port	Output Label

(c) LIB 정보 테이블

(그림 6) 포워딩 정보 구성을 위한 정보 테이블

### 3.3 차별화 서비스 지원을 위한 LSP 연결 제어

기존의 MPLS ATM 시스템의 변경을 최소화하면서 차별화 서비스를 지원하기 위해서 LDP 구동 절차는 그대로 사용하면서 각 FEC마다 표준화된 PHB 종류인 EF(Expedited Forwarding), AF(Assured Forwarding), DF(Default Forwarding)를 지원하는 LSP들을 설정하도록 하였다. 기존의 MPLS ATM 시스템에서는 라우팅될 IP 주소 즉 FEC당 한 개의 LSP가 설정되었으나 차별화 서비스를 지원하는 MPLS ATM 시스템에서는 FEC당 EF, AF, DF의 LSP가 설정되어야 하기 때문에 기존 시스템보다 2배의 LSP 연결이 더 필요하다. 하지만 LSP를 연결하는 VPI와 VCI의 범위가 각각 0~256과 32~65535까지 사용될 수 있으므로 차별화 서비스를 지원하기 위해 추가로 필요한 LSP 연결 개수는 수용이 가능하다. 이와 같이 설정된 LSP는 MPLS ATM 시스템에 입력된 패킷을 목적지 주소와 포트 번호를 갖고 다음 장에 설명할 해당되는 응용 범주를 찾아서 EF에 속하는 응용 범주인 경우에는 EF LSP로 패킷을 전달하고, AF에 속하는 응용 범주의 경우에는 AF LSP로 패킷을 전달하고, DF에 속하는 응용 범주의 경우에는 DF LSP로 패킷을 전달하도록 차별화된 LSP를 제어한다. 이렇게 차별화되어 전송된 패킷은 그 다음 홉에 있는 LSR로 전달되고, 패킷을 전달받은 LSR은 LIB만을 보면서 레이블 스위칭을 하여 패킷을 최종 LER까지 전달되도록 LSP를 제어한다.

## 4. 응용 기반 포워딩 엔진 설계

### 4.1 응용 범주

MPLS ATM 시스템에서 응용 기반 차별화 서비스를 하기 위해 지연 시간과 처리 성능의 특성에 따라서 응용의 종류를 4가지로 나누었고 그 응용 범주는 다음과 같다[15].

첫 번째 범주는 인터넷 비디오나 오디오 실시간 응용으로써 보장된 대역이 필요하고 장시간의 개별적인 패킷 지연을 허용하지 않는 범주이다. 두 번째 범주는 TELNET과 같은 상호 작용하는 인터넷 응용인데, 이러한 종류의 응용은 많은 대역을 필요로 하지 않지만 장시간의 지연은 허용되지 않는다. 세 번째 범주는 웹 브라우징이나 FTP와 같은 가장 대중적인 TCP 기반의 응용이다. 이러한 응용들의 사용자는 개별적인 패킷 지연보다는 전체적인 처리 성능에 의미가 있다. 마지막 범주는 EMAIL과 같은 신속을 요하지 않는 응용들이다. 이러한 종류의 응용들은 데이터가 목적지에 도달하는데 걸리는 시간에 대해서는 덜 민감하다.

LER은 패킷이 어떤 범주에 속하는 지를 결정하기 위하여 패킷의 목적지의 포트 번호를 검사하여 범주를 분류한다. 예를 들면 TELNET은 23을 사용하고, EMAIL은 25을 사용하며 HTTP는 80을 사용한다는 것이다. 그리고 잘 알려진 포트 번호를 가지고 있지 않거나 사용하지 않는 응용들에 대해서만 LER에게 시그널링 메시지를 사용하여 패킷의 정보를 패킷 범주 테이블에 추가하여 패킷의 범주를 구별할 수 있도록 한다. 이렇게 디폴트 포트 번호를 사용하는 것은 연결 설정의 부하를 상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 현재 존재하는 인터넷 응용들이 차별화 서비스와 결합되기 전에 시그널링 프로토콜을 지원할 필요가 없다는 것이며, 현재 인터넷 구조상에서 차별화 서비스를 더 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

### 4.2 응용 범주의 차별화 서비스 매핑

앞에서 정의된 응용 범주와 이에 대응하는 차별화 서비스 클래스 매핑에 대해서 살펴보도록 하겠다. 먼저 기존 라우터와 같은 프레임 모드 방식에서 사용하고 있는 MPLS의 EXP 필드의 구성 및 EXP 값과 MPLS 서비스 클래스 매핑에 대해서 살펴본다. MPLS ATM 시스템과 같은 셀 모드 방식에서는 EXP 값을 보지 않기 때문에 EXP 값과 MPLS 서비스 클래스 매핑과 유사한 방법으로 응용 범주와 ATM 헤더의 CLP를 이용하여 차별화 서비스 클래스와 매핑하는 방법을 기술하고자 한다. 일반적으로 네트워크 운용자에 의해서 MPLS의 EXP 값과 BA사이의 매핑이 정의되고, 이와 같은 매핑은 MPLS 망내에서 정의된다[16].

<표 1>은 EXP를 <FCI, DPI>쌍으로 구성하였다. FCI(Forwarding Class Indicator)는 MPLS 포워딩 클래스를 나타내고, DPI(Drop Precedence Indicator)는 혼잡 회피 메커니즘

에서 사용하기 위한 드롭 우선 순위 정도를 나타낸다. <표 2>는 Intserv 서비스 형태와 Diffserv의 DSCP 값을 EXP 값에 매핑하도록 구성하는 방법을 보여준다. 네트워크 운용자는 MPLS 네트워크에서 제공하는 8개의 BA가 Diffserv DSCP 클래스보다 작기 때문에 비슷한 서비스를 요구하는 패킷 플로우들을 하나의 MPLS 서비스 클래스로 그룹화할 수 있다. 즉 <표 1>에서 FCI 값이 동일한 것들끼리 같은 서비스로 그룹화시키는 것이다. MPLS ATM 시스템에서는 응용 범주를 4개로 분류하여 4개의 BA로 나누었고 EXP의 FCI 값이 동일한 것을 동일한 응용 범주에 매핑되도록 하였다. 따라서 각각의 응용 범주는 EXP의 FCI에 해당하고 ATM 헤더의 CLP는 EXP의 DPI에 해당하도록 EXP 값과 매핑되는 방법을 이용하였다. 응용 범주 1은 MPLS Gold 서비스에 해당되고, 드롭 우선 순위가 낮기 때문에 CLP 값을 0으로 하여 EXP 값 110에 해당하도록 하고, 응용 범주 2는 Silver 서비스에 해당하고 드롭 우선순위가 낮으므로 CLP 값을 0으로 하고 EXP 값 101에 해당하도록 하였다. 또한 응용 범주 3은 Bronze 서비스에 해당하고 드롭 우선 순위가 높거나 낮을 수 있어서 CLP 값을 0 또는 1로 하여 EXP 값 010 또는 011에 해당하도록 하

고 Category4는 Best Effort 서비스에 해당하고 드롭 우선 순위가 높으므로 CLP 값을 1로 하여 EXP 값 000에 해당하도록 매핑하였다. 이와 같이 CLP의 값을 응용 범주에 따라 0 혹은 1로 결정한 것은 응용 범주 1 서비스 클래스의 드롭 우선 순위가 낮고, 응용 범주 4 클래스는 드롭 우선 순위를 높게 하여 네트워크 혼잡(Congestion)이 발생한 경우 드롭 우선 순위가 높은 응용의 패킷 플로우를 먼저 폐기하도록 한 것이다.

<표 1> EXP 값과 MPLS 서비스 클래스 매핑

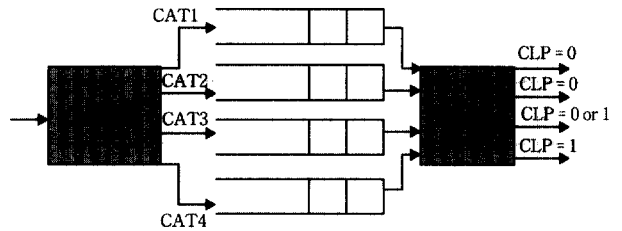
MPLS service class	MPLS EXP field value		Drop precedence
	FCI	DPI	
Network ctrl Gold	11	1	N/A
	11	0	N/A
Silver	10	1	Low
	10	0	High
Bronze	01	1	Low
	01	0	High
Best Effort	00	1	Low
	00	0	High (less than BE)

<표 2> 응용 범주의 QoS와 차별화 서비스 매핑

Intserv Service Type	Diffserv class		EXP	Application category	
	PHB	DSCP			
GS	EF	101110	110	Category 1	
Control load	AF11	001010	101	Category 2	
	AF12	001100	100		
	AF13	001110	100		
	AF21	010010	101		
	AF22	010100	100		
	AF23	010110	100		
	Control load	AF31	011010	011	Category 3
		AF32	011100	010	
		AF33	011110	010	
		AF41	100010	011	
AF42		100100	010		
BE	DF	000000	000	Category 4	

4.3 응용 기반 마킹 알고리즘

LER은 응용 범주별로 차별화 서비스를 제공하기 위하여 EF, AF 및 DF 서비스를 지원해야 한다. EF 서비스를 받은 패킷은 거의 큐잉 지연없이 포워딩되어야 하고 AF IN 서비스를 받은 패킷은 망 정체시에 거의 폐기되지 않는다. 반면에 AF OUT 서비스와 DF 서비스를 받은 패킷은 망 정체시에 폐기된다.



(그림 7) 응용 기반 마킹 모델

```

if Category1 then
    mark CLP '0'
    transfer the cells into EF queue
else if Category2 then
    mark CLP '0'
    transfer the cells into AF queue
else if Category3 then
    if AF IN is OK then
        mark CLP '0'
        transfer the cells into AF queue
    else
        mark CLP '1'
        transfer the cells into DF queue
else if Category4 then
    mark CLP '1'
    transfer the cells into DF queue
    
```

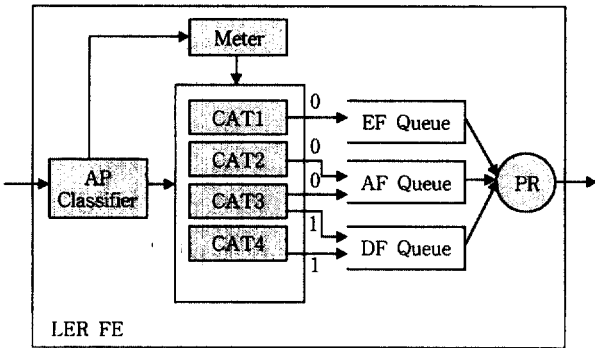
(그림 8) 응용 기반 마킹 알고리즘

(그림 7)에서 CAT1에서 CAT4는 각각 응용 범주 1에서 응용 범주 4에 속하는 응용 범주를 표시한다. CAT1은 EF 서비스를 사용하고, CAT2는 AF 서비스를 사용하며, CAT3는 AF와 DF 서비스를 사용하고 CAT4는 단지 DF 서비스만을 사용한다. CAT1에 속하는 패킷들은 EF 서비스에 해당하여 CLP 값을 '0'으로 마킹하고 CAT2에 속하는 패킷들은 AF IN 서비스에 해당하여 CLP 값을 '0'으로 마킹하고 CAT3에 속하는 패킷들은 AF IN 서비스를 받을 수 있으면 CLP 값을 '0'으로 마킹하고 AF IN 서비스를 받을 수 없으면 해당 패킷

을 바로 폐기시키지 않고, CLP 값을 '1'로 표시하여 DF 서비스를 받을 수 있는지를 검사하여 DF 서비스를 받을 수 있다면 DF 큐에 저장하여 최선형 서비스를 수행하는 CAT4와 같이 처리되도록 하였으며, CAT4에 속하는 패킷들은 최선형 서비스만을 사용하는 DF 서비스에 대하여 CLP 값을 '1'로 마킹하도록 하였다. 이와 같이 처리하는 MPLS ATM 시스템에서의 응용 기반 마킹 알고리즘이 (그림 8)과 같다.

4.4 응용기반 차별화 서비스 지원 포워딩 엔진 모델

응용 기반 차별화 서비스 지원 포워딩 엔진은 패킷이 전달되기 전에 각 응용 범주의 서비스를 제공할 수 있도록 동일한 FEC에 대해서 EF, AF, DF에 해당하는 LSP의 연결을 설정한 다음 EF LSP, AF LSP, DF LSP 우선 순위로 스케줄되어 차별되게 다음 흡인 LSR로 패킷이 포워딩 되도록 설계하였다. 응용 기반 포워딩 모델은 (그림 9)와 같고, 패킷이 LER로부터 LSR로 전달되는 과정을 보여주는 포워딩 절차는 다음과 같다.



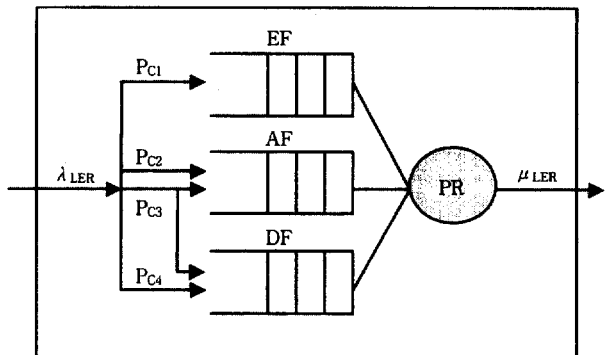
(그림 9) 응용 기반 포워딩 엔진 모델

패킷 플로우가 LER 포워딩 엔진으로 들어가면 포워딩 엔진내의 패킷 분류기에서는 패킷 플로우 정보중에 목적지 주소와 디폴트 포트 번호를 통하여 들어온 패킷 플로우가 어떤 응용 범주에 포함되는지를 분류한다. 그런 다음 미터가 트래픽 프로파일을 기반으로 측정하여 각각의 패킷 플로우가 계약을 준수하는 IN 프로파일인지 계약을 준수하지 않는 OUT 인지를 판단하여 마커에게 알려주고 마커는 패킷 플로우가 응용 범주 1에 속하면 EF 서비스로서 CLP의 값을 0으로 마킹하고, 응용 범주 2에 속하면 AF IN 서비스로서 CLP의 값을 0으로 마킹을 하고, 응용 범주 3에 속하면 AF IN 서비스로 수용될 수 있으면 CLP의 값을 0으로 마킹하고 그렇지 못하다면 DF 서비스로 수용되기 위하여 CLP의 값을 1로 마킹을 한다. 마지막으로 응용 범주 4에 속하면 DF 서비스로서 CLP의 값을 1로 마킹을 한다. 그런다음 입력된 패킷의 목적지 주소에 해당하는 FEC와 응용 범주에 대응하는 LSP의 VPI/VCI 레이블로 ATM 헤더를 인코딩시킨다. 인코딩된 패킷 플로우들중에서 응용 범주 1에 속하며 CLP 값이 0으로 마킹된 패킷

플로우는 EF LSP 큐에 저장되고, 응용 범주 2에 속하며 CLP 값이 0으로 마킹된 패킷 플로우들과 응용 범주 3에 속하며 CLP 값이 0으로 마킹된 패킷 플로우는 AF LSP 큐에 저장되며 응용 범주 3에 속하며 CLP 값이 1로 마킹된 패킷 플로우들이나 응용 범주 4에 속하며 CLP 값이 1로 마킹된 패킷 플로우는 DF LSP 큐에 저장된다. 그런다음 패킷 스케줄러에 의해서 가장 높은 우선 순위를 갖고 있는 EF 큐부터 가장 낮은 순위를 갖고 있는 DF 큐에 있는 패킷 플로우들을 출력 포트 번호와 레이블을 보고 다음 흡인 LSR로 레이블된 패킷 플로우를 전달한다. LER로부터 레이블된 패킷 플로우가 입력된 LSR FE는 LSR 포워딩 테이블을 보고 입력된 패킷 플로우의 입력 포트와 레이블에 대응되는 출력 포트와 레이블로 교환하고 입력된 CLP 값을 그대로 가지고 다음 흡인 LSR 혹은 LER로 패킷을 전달하여 최종 사용자에게 까지 신속하게 패킷을 전달하는 과정으로 구성된다.

5. 성능 분석

이 장에서는 시뮬레이션 기법을 활용하여 MPLS ATM 시스템의 응용 기반 차별화 서비스 성능 평가를 수행하고자 한다. 특히 응용 범주 차별화 서비스 매핑을 통한 마킹 기법 및 응용 범주에 따른 차별화된 포워딩 기법에 중점을 두었고, 범용 시뮬레이션 툴(AweSim)[17]을 사용하여 성능 분석을 수행한다. 응용 기반 차별화 서비스 마킹 및 포워딩 알고리즘이 사용된 MPLS ATM 시스템의 포워딩 엔진 시뮬레이션 모델은 (그림 10)과 같다.

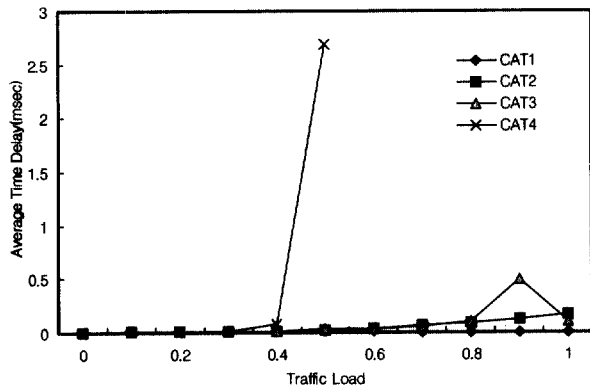


(그림 10) 포워딩 엔진 시뮬레이션 모델

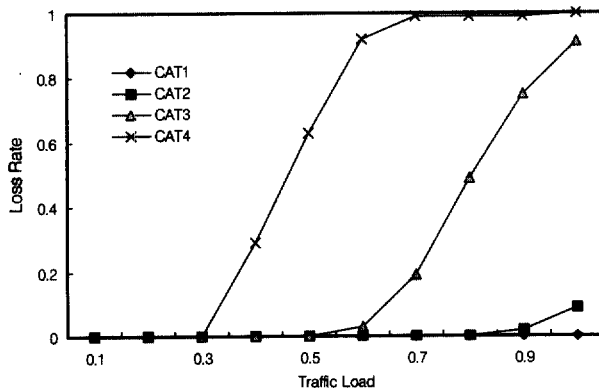
포워딩 엔진 시뮬레이션 모델에서 사용된 파라미터는 다음과 같다.

- $\lambda_{LER}$  : 외부로부터 입력되는 셀의 도착률
- $P_{C1}$  : 응용 범주 1에 해당하는 셀들이 들어올 확률
- $P_{C2}$  : 응용 범주 2에 해당하는 셀들이 들어올 확률
- $P_{C3}$  : 응용 범주 3에 해당하는 셀들이 들어올 확률
- $P_{C4}$  : 응용 범주 4에 해당하는 셀들이 들어올 확률
- $\mu_{LER}$  : 셀에 대한 서비스률

각 큐의 도착률은 포아송 프로세스를 따르며 서비스 시간 간격은 지수 분포로 가정하겠다. 응용 범주를 구별하여 해당 셀을 저장하는 큐는 EF, AF, DF 세 개의 우선 순위 큐가 있고 이 세 개의 큐를 처리하는 서버는 한 개이다. 그리고 모든 큐는 제한된 큐의 크기를 갖고 그 크기는 지연 시간에 민감한 EF와 AF 큐는 동일하게 20으로 하고, DF는 100으로 가정하였다. 또한 최선형만 지원하는 MPLS ATM 시스템에서 하나의 셀을 처리하는데 걸리는 시간이 대략 1 셀 타임에서 최악의 경우에 10 셀 타임을 가지고, 1 셀 타임은 2.72 s가 된다[18]. 차별화 서비스를 지원하는 MPLS ATM 시스템에서는 차별화 서비스 처리가 소요되는 시간을 고려하여 ATM 셀 처리 시간을 2셀 타임이 소요된다고 가정하였다. 그리고 패킷의 크기는 ATM 셀 크기와 동일한 53 byte로 하고, 도착되는 응용 범주들은 동일한 비율로 들어 온다고 가정한다.



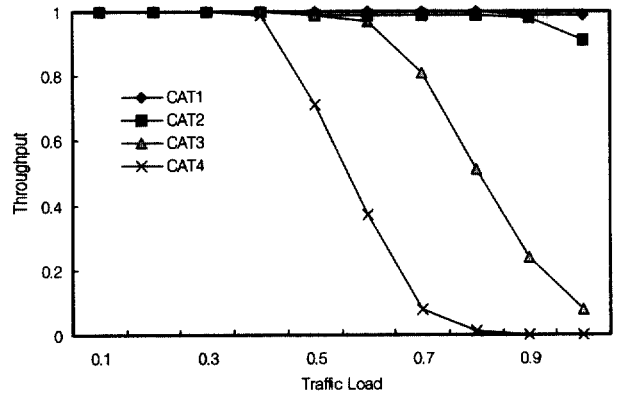
(그림 11) 응용 범주별 지연 시간



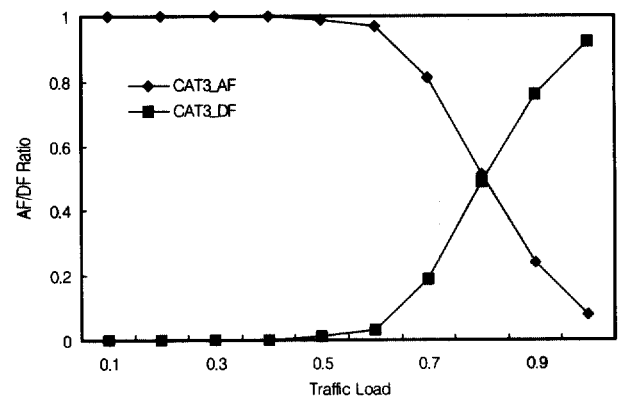
(그림 12) 응용 범주별 손실율

(그림 11)은 트래픽 부하를 변화시켰을 때 응용 범주별 평균 지연 시간을 나타낸 것이다. 응용 범주 1과 응용 범주 2는 트래픽 부하가 증가되어도 지연 시간이 짧은 반면 응용 범주 4는 트래픽 부하가 0.5를 넘으면서 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 따라서 지연 시간에 민감한 응용 범주 1과 응용 범주 2의 특성이 잘 반영되고 있음을 알 수 있다. (그림 12)는 트래픽 부하에 따른 응용 범주별 손실율을 나타낸 것이다. 응용 범

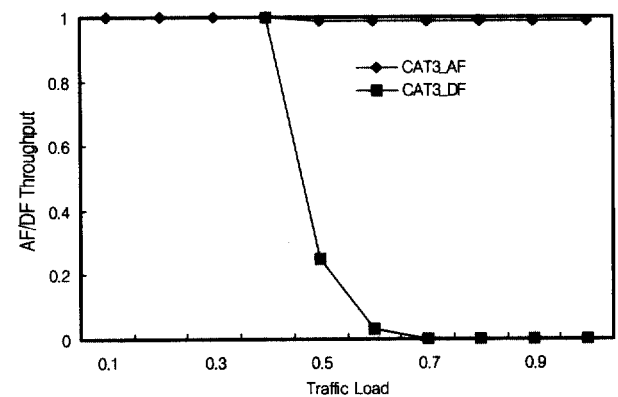
주 1과 응용 범주 2는 트래픽 부하가 증가되어도 손실율이 작은 반면 응용 범주 3은 트래픽 부하가 0.7를 넘으면서 급격하게 증가하고 응용 범주 4는 트래픽 부하가 0.4를 넘으면서 급격하게 증가됨을 알 수 있다.



(그림 13) 응용 범주별 처리율



(그림 14) 응용 범주 3의 AF 및 DF 비율



(그림 15) 응용 범주 3의 AF 및 DF 처리율

(그림 13)은 트래픽 부하에 따른 응용 범주별 처리율을 나타낸 것이다. 응용 범주 1과 응용 범주 2는 거의 처리율이 일정하게 유지되어 응용 범주 3과 응용 범주 4에 비해 처리율이 높은 반면 응용 범주 4는 트래픽 부하가 0.4를 넘으면서 응용 범주 3에 비해서 처리율이 떨어져 응용 범주 3이 응용 범주 4



〈표 3〉 제안, 기존 차별화 및 무차별화 서비스의 성능 비교

Item Load	Delay				Throughput				Loss			
	P-Diff		E-Diff	N-Diff	P-Diff		E-Diff	N-Diff	P-Diff		E-Diff	N-Diff
	C 2	C 3			C 2	C 3			C 2	C 3		
0.1	0.006	0.006	0.006	0.006	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2	0.007	0.007	0.007	0.007	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3	0.009	0.009	0.009	0.010	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4	0.015	0.015	0.015	0.037	1.0	1.0	1.0	0.99	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.024	0.028	0.025	0.185	0.99	0.99	0.99	0.84	0.0	0.0	0.0	0.15
0.6	0.035	0.039	0.041	0.252	0.99	0.97	0.99	0.66	0.0	0.03	0.0	0.33
0.7	0.063	0.060	0.110	0.312	0.99	0.81	0.93	0.48	0.0	0.19	0.06	0.51
0.8	0.095	0.106	0.162	0.319	0.99	0.51	0.75	0.42	0.0	0.49	0.24	0.57
0.9	0.128	0.488	0.189	0.321	0.98	0.24	0.61	0.37	0.02	0.75	0.38	0.62
1.0	0.166	0.104	0.212	0.322	0.91	0.08	0.50	0.33	0.09	0.91	0.50	0.66

(P-Diff : 제안한 차별화 서비스, E-Diff : 기존 차별화 서비스, N-Diff : 무차별화 서비스)

에 비해서 처리율이 높음을 알 수 있다. 또한 (그림 14)는 트래픽 부하에 따른 응용 범주 3의 AF 서비스 및 DF 서비스로 처리되는 비율을 보이고 있다. 트래픽 부하 0.7일 때에 AF 서비스 및 DF 서비스가 동일한 비율로 처리됨을 알 수 있다. 그리고 (그림 15)는 응용 범주 3이 AF 서비스 및 DF 서비스로 처리되었으나 손실없이 처리된 비율을 나타낸다. AF 서비스로 처리된 응용 범주 3은 트래픽 부하가 증가하여도 손실없이 처리가 되었으나 DF 서비스로 처리된 응용 범주 3은 트래픽 부하가 0.6을 넘으면서 거의 손실됨을 알 수 있다.

〈표 3〉은 동일한 실험 환경에서 응용 범주 2(C2)와 응용 범주 3(C3)에 대해서 서론에서 언급한 DSCP를 이용한 기존 차별화 서비스[3] 및 무차별화 서비스로 수행되었을 경우와 성능 비교를 한 것이다. DSCP를 이용한 기존 차별화 서비스는 응용 범주 2와 응용 범주 3을 동일 범주로 분류하고, 제안한 차별화 서비스와 동일하게 우선 순위 큐를 사용하였다. 응용 범주 2의 경우는 기존 차별화 서비스나 무차별화 서비스로 수행되었을 경우에 비해서 지연 시간, 처리율, 손실율이 모두 우수하다. 하지만 응용 범주 3의 경우에는 기존 차별화 서비스로 수행되었을 경우에 비해서 지연 시간은 대체적으로 우수한 것으로 나타나는 반면 트래픽 부하가 0.7를 넘어서면 손실율이 높아지기 시작해서 처리율이 기존 차별화 서비스로 수행된 것에 비해서 나빠지는 것을 알 수 있다. 또한 무차별화 서비스로 수행되었을 경우에 비해서는 지연 시간, 처리율, 손실율이 대부분 우수하나 트래픽 부하가 0.9를 넘어서면 손실율이 높아져 처리율이 무차별화 서비스로 수행된 것에 비해서 나빠지는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

현재 대부분의 최선형 서비스만을 수용하는 라우터들 상에서 차별화 서비스를 지원하기 위하여 대역과 지연 시간을 기

반으로 하여 응용 프로그램을 구별하여서 MPLS ATM망에서 차별화 서비스를 수용할 수 있도록 하였다. 차별화 서비스 클래스를 응용 범주 1, 응용 범주 2, 응용 범주 3, 응용 범주 4로 구별함으로써 최선형 서비스만을 수행하는 응용 범주 4에 비해서 응용 범주 1, 응용 범주 2, 응용 범주 3이 차별화된 서비스를 수행하도록 하였다. 이렇게 함으로써 사용자는 실시간 및 높은 처리율을 요구하는 응용에 대해서 차별화 서비스를 지원받아 다양한 서비스 품질을 요구하는 사용자의 욕구를 만족시킬 수 있으리라고 본다. 그리고 잘 알려진 포트 번호를 가지고 응용들을 구별하고 기존의 LDP 메시지를 사용하여 차별화된 LSP를 설정하고 제어하여 기존의 MPLS ATM 시스템에 최소의 기능 변경을 통하여 차별화 서비스를 쉽게 구현할 수 있도록 설계하였다. 또한 기존 포워딩 알고리즘과의 성능 비교 결과 우선 순위가 높은 응용 범주에 대해서는 지연 시간, 처리율, 손실율이 모두 우수하게 나타났고, 우선 순위가 낮은 응용 범주에 대해서는 지연 시간이 우수하게 나타났다. 하지만 트래픽 부하가 큰 경우에는 기존 포워딩 알고리즘에 비해서 손실율이 높아져 처리율이 떨어지는 단점도 나타났다.

현재 초고속 통신망을 구성하고 있는 ATM 시스템은 구축되어 있지만 순수 ATM 응용이 부족하기 때문에 ATM 서비스를 지원하는 시스템으로 사용되기 보다는 응용이 많은 인터넷 서비스를 지원하는 MPLS ATM 시스템으로 구축될 가능성이 많아졌고, ADSL과 같은 고속 액세스 장비를 이용한 인터넷 가입자가 증가함에 따라 차별화 서비스를 지원해주는 MPLS ATM 시스템이 인터넷 백본망으로 수용될 것으로 판단된다.

추후 연구 과제로는 응용 기반 포워딩 엔진에 다양한 스케줄링 방법을 적용한 성능 평가와 차별화 서비스 모델을 수용하는 라우터들 상에서 차별화 서비스를 지원하기 위한 포워딩 엔진의 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

[1] B. Davie, et al., "MPLS Technology and Applications," Morgan Kaufmann, 2000.

[2] 한국전자통신연구원, ATM 기반 인터넷 서비스 시스템(MPLS) 연구보고서, 1999.

[3] N. Rouhana, et al., "Differentiated Services and Intergrated Services use of MPLS," IEEE Symposium on Computer and Communications, pp.194-199, 2000.

[4] I. Andrikopoulos, et al., "Supporting Differentiated Services in MPLS Networks," International Workshop on Quality of Service, pp.207-215, 1999.

[5] R. Rabbat, et al., "Traffic Engineering Algorithms Using MPLS for Service Differentiation," IEEE International Conference on Communications, Vol.2, pp.791-795, 2000.

[6] E. Rosen, et al., "Multiprotocol Label Switching Architecture," Internet Draft <draft-ietf-mpls-arch-07.txt>, July, 2000.

[7] L. Andersson, et al., "LDP Specification," Internet Draft <draft-ietf-mpls-ldp-11.txt>, Aug. 2000.

[8] E. Rosen, et al., "MPLS Label Stack Encoding," Internet Draft <draft-ietf-mpls-label-encaps-03.txt>, Sep. 1998.

[9] R. Braden, et al., "Integraed Services in the Internet Architecture : an Overview," RFC 1633, June, 1994.

[10] S. Blake, et al., "An Architecture for Differentiated Services," RFC2475, Dec. 1998.

[11] S. Shenker et al., "Specification of Guaranteed Quality of Service," RFC 2212, Sep. 1997.

[12] J. Wroclawski, "Specification of the Controlled-Load Network Element Service," RFC 2211, Sep. 1997.

[13] K. Nichols et al., "Definition of the Differentiated Services Field(DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers," RFC2474, Dec. 1998.

[14] Brim, et al., "Per Hop Behavior Identification Codes," Internet Draft, Oct. 1999.

[15] F. Wang, et al., "An Application Based Differentiated Service Model," IEEE International Conference on Networks, pp.424-430, 2000.

[16] Francois, et al., "MPLS Support of Differentiated Services," Internet Draft <draft-ietf-mpls-diff-ext-07.txt>, Aug. 2000.

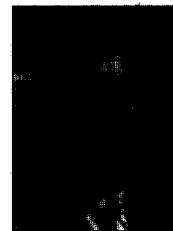
[17] A. Alan B. Pritsker, et al. "Simulation with Visual SLAM and AweSim I," System Publishing Corporation, 1997.

[18] 류호용 외 4인, "IP 서비스 지원을 위한 MPLS ATM 스위치의 성능 분석", ETRI TM-1200-1999-332, 1999.



### 김 응 하

e-mail : ehkim@etri.re.kr  
 1987년 중앙대학교 전자계산학과 학사  
 1989년 중앙대학교 전자계산학과 석사  
 2000년 아주대학교 컴퓨터공학과 박사수료  
 1989년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원  
 관심분야 : MPLS, 차별화 서비스, 트래픽 엔지니어링, 초고속 통신망



### 조 영 종

e-mail : yjcho@adang.ajou.ac.kr  
 1983년 서울대학교 전자공학과 학사  
 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사  
 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사  
 1990년~1996년 LG정보통신연구소 ATM 교환실 실장  
 1991년 미국 AT&T Bell Lab 교환연구원  
 1996년~현재 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 부교수  
 관심분야 : 광대역 통신, 유/무선 ATM, 성능분석, MPLS