IE Interfaces
Vol. 20, No. 4, pp. 427-437, December 2007.

가입자 통신망 장치의 대역할당 방식 평가

주운기[1†] · 권 율[2]

[1]선문대학교 지식정보산업공학과 교수 / [2]한국전자통신연구원 광대역 통합망 연구단 책임연구원

Performance Evaluation of a Bandwidth Allocation Algorithm of E-PON

Un Gi Joo[1] · Yool Kwon[2]

[1]Department of Knowledge and Industrial Engineering, Sun Moon University
[2]Broadband Convergence Network Research Division, ETRI

As increasing the Internet traffic, many researches on access network are reported for end-to-end high-speed broadband network, where E-PON (Ethernet-Passive Optical Network) is one of reasonable candidates for the network with respect to cost and bandwidth utilization. For the high-speed access network, E-PON needs an efficient bandwidth allocation method. This paper describes a WFBA (Water-Filling Bandwidth Allocation) algorithm for the efficient bandwidth allocation with various simulation test. Based upon the simulation test, we suggest several ways to improve performance of E-PON.

Keyword: ethernet, passive optical network, bandwidth allocation, simulation

1. 서 론

BcN(Broadband Convergence Network) 또는 NGN(Next Generation Network)을 위해서는 서비스 등급 별 차별적인 서비스와 이를 위한 고속 통신망의 구축이 필요하다. 통신망은 국간(backbone) 망과 메트로(metro) 망 및 가입자(access) 망으로 구분할 수 있는데, BcN의 통신 품질을 위해서는 가입자 망에서의 효율적인 대역폭 활용과 서비스 품질 보장이 필요하다. 광대역 통합 정보 제공을 위한 유선 광 가입자 기술로는 xDSL(x Digital Subscriber Line), HFC(Hybrid Fiber Coax), LAN(Local Area Network), FTTH(Fiber-To-The-Home) 등이 있다. 지난 몇 년간 국간 망의 전송용량은 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 등의 기술을 이용해 테라급까지 증가하고 있고, LAN 및 메트로 망의 전송속도도 10M나 100M급에서 출발해서 기가급까지 향상되고 있다(Joo, 2005). 이에 반해 가입자 망의 전송속도는 xDSL의 경우 수 Mbps에 그치고, 이론상 30Mbps까지 가능한 케이블 모뎀도 실제로는 0.4~1Mbps에 그치고 있어 가입자 망이 병목점(last mile)으로 존재하게 되었다. 따라서 가입자 트래픽의 폭발적 증가를 감당하기 위해서는 결국 FTTH가 가입자 망의 궁극적인 형태가 되어야 할 것이다.

FTTH 가입자 망을 위한 방안의 하나로 PON(Passive Optical Network)이 있다. PON은 <그림 1>과 같이 다수의 ONU(Optical Network Unit)가 하나의 광섬유를 통해 수동 소자(passive component)만으로 구성된 광 분배기(splitter)를 통해 하나의 OLT (Optical Line Terminal)를 공유하는 PTM(Point To Multipoint) 구조의 망이다. OLT는 중앙국(CO)에 존재하여 MAN(Metropolitan Area Network), WAN(Wide Area Network), 국간 망 등을 ONU에 연계시키는 역할을 하고, ONU는 가입자나 최종 사용자 측에 위치하여 사용자 단말 장치 간 정보를 OLT를 통해 주고 받는 역할을 한다. PON은 하나의 광 선로를 이용하는 구조이므로, 각 사

†연락저자 : 주운기 교수, 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100 선문대학교 지식정보산업공학과, Fax : 041-541-7426, E-mail : ugjoo@sunmoon.ac.kr
2006년 10월 접수, 1회 수정 후 2007년 02월 게재확정.

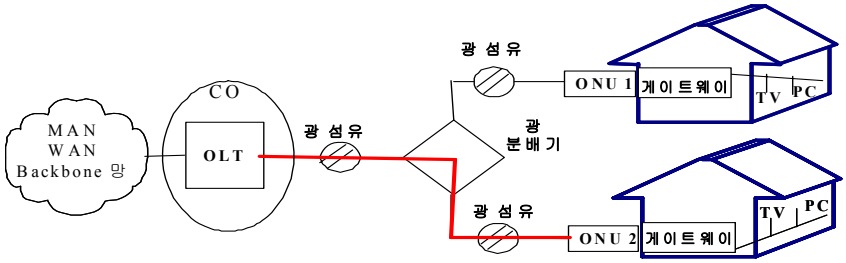

그림 1. PON의 구조

용자 별 별도의 광 선로를 포설하는 경우에 비해 사용자 수가 많을수록 경제적인 이점이 큰 방안이고, 광 분배기(splitter)를 위해 수동소자만을 이용하므로 전력 공급이나 유지 보수 관리가 용이한 방식이므로, FTTH의 현실적인 구현 방안으로 많은 연구가 진행 중이다.

PON의 유형은 상향 트래픽 전송 충돌 문제 해결 방식에 따라서 구분될 수 있다. 여기서. 상향 트래픽이란 <그림 1>의 ONU에서 OLT 방향으로 전송되어야 하는 트래픽을 의미하는데, 하나의 광 섬유를 여러 개의 ONU가 공통으로 사용해야 하므로, 트래픽을 전송하는 과정에서 발생할 수 있는 충돌을 제거하고 공평하고 효율적인 대역을 할당하기 위한 MAC(Media Access Control) 프로토콜의 개발이 필요하다. 상향 트래픽 전송 충돌은TDMA(Time Division Multiple Access) 방식이나 WDMA (Wavelength Division Multiple Access) 방식의 다중화(multiplexing)를 통해 해결할 수 있다. TDMA 방식을 이용하는 PON을 TDMA-PON이라 하는데, TDMA-PON은 E-PON(Ethernet-PON)과 G-PON(Gigabit-PON)이 있다(Kramer, 2005). TDMA-PON은 WDMA를 이용하는 PON에 비해 가격이 저렴하므로 저렴한 가입자 망 장치의 수요 요구에 맞추기 위해서 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다. 이러한 TDMA-PON 중 E-PON은 G-PON에 비해 전송 속도가 낮고 적용 서비스가 이더넷(Ethernet)으로 한정되어 있다는 단점이 있지만, 이더넷이 활성화 된 상황에서는 패킷 전송을 최적으로 할 수 있고, 구현 가격이 저렴하다는 장점이 있어서 이더넷 기반의 초고속망이 확산되어 있는 한국, 일본, 중국 등의 아시아 시장에서 적용되고 있는 상태이다.

E-PON의 하향 트래픽은 OLT에서 방송(broadcasting)하는 형태로 모든 ONU에 데이터를 전달하면, 각 ONU는 자신의 데이터만을 식별하여 수신하는 방식을 이용한다. 따라서, 대역 할당 문제는 발생하지 않으므로 본 논문에서는 하향 통신 문제는 다루지 않았다. 본 논문은 E-PON 망에서의 서비스 등급 별 차별적인 상향 트래픽의 서비스를 위한 대역폭 알고리즘을 하나 제안하고 이에 대한 성능분석을 하였다.

E-PON의 상향 대역폭 할당을 제어하는 방식으로는 중앙제어(centralized) 방식과 분산제어(distributed) 방식이 있을 수 있다. 중앙제어 방식은 OLT에서 모든 ONU에 대한 대역 할당을 하는 방식이고, 분산제어 방식은 각 ONU에서 자신의 대역폭 할당을 담당하는 방식이다. 그러나 분산 제어를 위해서는 각 ONU가 망 내의 다른 ONU의 상태 정보를 모두 알고 있어야 하므로 ONU간 연결을 위한 광섬유나 장치가 필요하다는 문제가 있는데, E-PON의 표준 규격인 IEEE802.3ah에서는 중앙 제어 방식의 대역폭 할당 방식을 채택하였다. 따라서 본 연구의 대역할당 알고리즘도 중앙 제어 방식 형태를 이용하였다.

상향 트래픽을 위한 전송 대역 설정 방식에 따라서는 미리 정해진 양 만큼씩 만 배정하는 SBA(Static Bandwidth Allocation) 방식과 트래픽 요구량에 따라 가변적으로 대역 배정량을 변동하는 DBA(Dynamic Bandwidth Allocation) 방식으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 대역할당 량 결정에 필요한시간이 작은 SBA와 대역폭 낭비를 줄일 수 있는 DBA의 각각의 장점을 이용하는 SBA와 DBA의 혼합 방식 형태의 대역할당 알고리즘을 하나 소개한다. 본 논문은 국내의 E연구소에서 개발 중인 E-PON의 대역폭 할당 방식에 대한 성능 분석에 대한 것으로, E-PON 시스템에서의 상향 트래픽에 대한 효율적인 대역폭 할당 알고리즘의 영향을 파악하고, E-PON 시스템의 개선을 위한 방안 도출을 위한 목적으로 이루어졌다. 이를 위해 다음과 같은 구성으로 본 연구는 이루어졌다. 제 2장에서는 E-PON의 동작 방식을 기술하였고, 상향 트래픽을 서비스하기 위한 대역 할당 방식을 다루었다. 여기에서 상향 트래픽 서비스를 위한 기존의 방법들을 조사하였고, E 연구소의 E-PON 시스템을 위해 개발한 대역할당 알고리즘을 제시한다. 제 3장에서는 상향 트래픽을 위해 제안한 알고리즘에 대해 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 하였는데, 가입자 망에 많이 이용되는 표준 이더넷 망 성능과의 비교 분석을 통해 E-PON 시스템의 개선 방안을 도출하였다. 마지막으로 제 4장에 분석 결과에 대한 검토를 하였다.

2. E-PON의 동작 방식

E-PON(Ethernet-PON)은 TDMA 방식의 프로토콜 중에서 IEEE 802.3에서 규정한 이더넷 방식을 이용하는 PON 방식이다. 이더넷(IEEE 802.3) 망에서 트래픽은 64~1518바이트 크기의 일정하지 않은 길이의 이더넷 패이로드(payload)를 위해 8바이트 프리엠블(preamble)을 덧붙여서 패킷을 형성하여 전송되는데, 이더넷 망의 운영을 위해 공통의 자원을 활용하는 방식인 CSMA/CD(Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection) 방식과 장치 간 완전이중(full-duplex) PTP(Point-To-Point) 방식의 두 가지 방식을 규정하였다. E-PON은 하향 트래픽(OLT로부터 ONU

로)을 위해서는 공통자원 활용 방식을 이용하고, 상향 트래픽(ONU로부터 OLT)을 위해서는 PTP 방식을 이용한다. E-PON에서 하향 방향의 전송은 OLT에서 트래픽의 임시저장(buffering) 과정이 없이 하나의 공통의 광섬유를 이용하여 방송(broadcast)하는 방식을 사용하며, 상향 방향의 전송 시에는 다수의ONU들이 각자의 버퍼링을 통해 하나의 광 섬유를 특정 시간(time slot) 동안에는 대역폭을 전용하는 PTP 방식(TDMA)의 데이터 전송을 하는데, 이는 PON에서는 수동소자만을 사용하므로 ONU들이 데이터의 전송 시 충돌을 알 수 없어서 CSMA/CD와 같은 기존의 LAN 프로토콜은 사용할 수 없기 때문이다. TDMA 방식의 대역할당을 위해서는 각 ONU별 얼마만큼의 시간을 언제 배정해줄 지를 효율적으로 결정하기 위한 방안이 필요하다. 여기서, 각 ONU는 자신에게 할당된 시간 동안에만 데이터를 전송(burst mode)할 수 있고, 전송하지 않는 동안에는 광 출력 파워를 꺼야(off) 한다.

2.1 E-PON의 표준화

E-PON의 표준화를 위해가입자 댁내와 인접국사 또는 인접 중계 노드간(First Mile)에 이더넷을 도입하는 것을 목적으로 하는 EFM(Ethernet in the First Mile) 연구그룹이 2000년 11월에 결성되었고, 여기에서 2004년 6월에 E-PON에 대한 표준화 연구결과를IEEE 802.3ah로 발표하였다. IEEE 802.3ah의 MPCP(Multi Point Control Protocol)는 데이터의 효율적인 전송을 위하여 PTM(Point-To-Multipoint)에 연결된 OLT와 ONU간의 제어를 위해 규정한 프로토콜로, 이더넷의 802.3 MAC의 부 계층(sub-layer)에서 위치하면서, 중앙 제어 방식으로 LLID(Logical Link ID)의 지정, ONU 등록 처리, 대역폭 할당, 구성관리, 레인징(ranging) 등의 기능을 수행한다(Kramer, 2005). 여기서, LLID(논리링크 식별자)는 각 ONU별 고유의 식별자로, OLT는 어떤 ONU가 송신한 상향 정보인 지를 구분하고, ONU는 OLT에서 보내온 프레임이 자신을 위한 정보인 지 여부를 확인하기 LLID를 이용한다. 이외에 MPCP는 네트워크 자원의 최적화를 위한 방안으로 패킷 간 보호대역시간(guard time)을 줄이기 위해 레인징 기능을 규정하였는데, 레인징은 상향 트래픽 간 충돌 방지를 위해 OLT와 ONU간 거리를 측정하는 기능이다.

트래픽 서비스를 위해 IEEE 802.3ah에서는 IEEE 802.3의 이더넷 패이로드를 재 정의하여 데이터 패킷을위한 프레임과 제어를 위한 프레임의 두 가지 프레임을 규정하였다(Kramer, 2005).

데이터 패킷을 위한 프레임은 64~1518바이트 크기의 이더넷 패이로드에 대해 총 18바이트의 헤더(header)와 나머지 46~1500바이트의 가변적인 길이의 E-PON 데이터(payload) 부분으로 세분하여 정의하였고, 제어를 위한 프레임은 데이터 패킷을 위한 패이로드 중 크기가 가장 작은 46바이트 길이의 패이로드에 대해 제어 정보 유형 구분을 위한 2바이트, 제어의 시간관리를 위한 4바이트, 그리고 제어 정보를 위한 40바이트로 세분하여 사용하는 것으로 규정하였다. 여기서, MPCP에서 정의한 제어 정보로는 제어 정보 구분 필드 값에 따라 GRANT, REPORT, REGISTER_REQ, REGISTER, REGISTER_ACK의 5가지로 정의되어 있고, 이 중 GATE와 REPORT 메시지가 대역폭 요구 및 할당을 위해 사용되는 메시지이다. GATE 메시지는 OLT에서 생성하여 ONU로 전송하는 메시지이고, REPORT 메시지는 ONU에서 생성하여 OLT로 전송하는 메시지이다. 따라서, GATE 메시지는 신규로 설치된ONU의 검색, 또는 검색된 ONU들에 대한 데이터 전송 시점과 전송량을 통보하기 위한 목적으로 이용하고, REPORT 메시지는 각 ONU에서의 요구 대역폭 정보를 OLT에 통보하기위한 수단으로 이용한다.

대역폭 할당을 위해 GATE 메시지는 각 ONU에게 데이터를 전송 시작할 수 있는 시점과 전송 허용 시간을 통지하기 위해 OLT가 생성한다. E-PON에서 모든 시간은 TQ(Time Quanta) 단위로 표시한다. TQ는 OLT와 각 ONU내에서 시간을 관리하는 단위로, 16ns (또는 1Gbps의 전송속도에서 2바이트의 데이터를 전송하는데 필요한 시간)이 1 TQ이다. GATE 메시지를 받은 특정 ONU는 GATE 메시지 내에 OLT가 지정한 전송시작 시점에 자신의 레이저를 ON 상태로 두기 시작하여 지정된 전송 허용 시간 후에 레이저를OFF 시킨다. 여기서, 시간 관리는 레이저를 정상적인 ON상태로 되게 하는데 필요한 시간, OLT와 ONU간 동기화에 소요되는 시간, ONU내의 버퍼에 대기 중인 데이터 전송 시간 및 대기시간, 그리고, ONU의 레이저를 OFF하는데 필요한 시간을 모두 고려하여 결정한다.

REPORT 메시지는 각 ONU당 최대 8개의 버퍼 클래스 별 트래픽 정보를 각각 구분하여 OLT에 통보할 수 있는 구조로 되어 있다. 예를 들어, 각 ONU가 트래픽을 4개의 서비스 등급으로 구분하여 관리하는 경우, 이들 4개의 클래스 별 대역 요구량 정보를 TQ 단위로 환산하여 관리하고 있다가, OLT가 GATE 메시지를 이용하여 정보를 요청하면 이를 하나의 REPORT 메시지를 이용하여 OLT에 통보할 수 있다. 패킷의 CoS(Class Of Service)에 따라 패킷 서비스를 하기 위한 방안으로 ONU내의 버퍼를 여러 개로 논리적으로 구분하여 각 CoS 별 패킷을 다룰 수 있다. 이를 위한 표준 안으로는 IEEE P802.1p, IEEE 802.1 및 IEEE 802.1Q가 있다(Kramer, 2005).

MPCP는 이와 같은 제어 정보를 이용하여 다양한 대역할당 알고리즘을 구현할 수 있는 틀(framework)을 제공하지만, 이들 메시지의 활용 절차에 대한 구체적인 것은 규정하고 있지 않다. 따라서 각 개발되는 E-PON 별 대역할당 방식이나 트래픽 제어 방식에 차이가 있을 수 있고, 이러한 차이는 개발된 E-PON 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다.

2.2 대역 할당 알고리즘

E-PON에서는 하향 트래픽은 방송(broadcasting)방식을 이용하고, 상향 트래픽은 TDMA 방식을 이용한다.

상향 트래픽(upstream)은 OLT와 ONU간의 제어 프로토콜인 MPCP 프로토콜에 의해 관리된다. ONU는 할당된 시간(timeslot)

동안에 데이터 프레임들을 전송하게 되는데, OLT는 ONU들로부터의 요구에 따라 할당시간 크기를 조절함으로써 통계적 다중화가 이루어진다. ONU들에 대한 시간할당은 충돌이나 프레임 분할이 일어나지 않도록 관리하여야 한다. 이를 위해 각 OUN는 보내고자 하는 트래픽을 OLT에 보낼 수 있는 시점이 올 때까지 저장을 해야 하므로 버퍼를 이용하여 이를 관리하는데, 자신의 트래픽을 전달할 수 있는 시점이 되면, 자신이 보낼 수 있는 크기만큼의 가변 크기 패이로드를 형성하여 전송한다. 여기서, 자기가 전송할 차례가 되었는데도 전송할 트래픽이 없거나 부족한 경우는 부족한 양만큼은 유휴신호(idle signal)로 채워서 전송하므로, 이 경우에는 대역폭의 낭비가 발생하게 된다.

패킷 전송 서비스는 패킷 분할이 불가한 형태로 작동되는데, 만약잔여 용량이 보내고자 하는 패킷 크기보다 작다면 해당 패킷을 보낼 수 없고 다음주기(cycle)의 전송할당시간(time slot)을 기다려야 한다. 그러나 만약 대기 중인 패킷 중 크기가 잔여 용량보다 크지 않은 패킷이 존재한다면 이를 전송할 수 있다. 즉, 주어진 용량의 상자(bin)에 대기 중인 패킷을 어떻게 채우는 것이 좋은 가를 결정하는 상자 채우기(bin packing) 문제를 해결해야 한다. 상자 채우기 문제는 대표적인 NP-complete 문제이다(Coffman *et al*., 1996). 따라서 상향 트래픽 서비스를 위한 대역 할당을 위해서 발견적 해법을 개발하는 것이 현실적이다. 여기에서는 기존에 발표된 알고리즘의 일부를 살펴보고, 대역할당 알고리즘을 하나 제안한다. 본 논문에서 다루는 대역할당 문제는 다음과 같다.

현 시점에서 서비스를 요하는 ONU가 N개 존재하고, 각 ONU는 OLT를 향해 전송할 패킷의 대기 장소를 위한 하나의 버퍼를 가지고 있으며, 각 버퍼는 확률적인 과정을 거쳐서 도달되는 패킷들을 K개의 논리적인 구분을 하여 K개의 클래스별 패킷을 저장한다. 저장된 패킷은 SP(Strict Priority) 방식으로 관리되는데, 고 순위 패킷의 선점(preemption)을 허용하는 구조를 가정하므로, 클래스 별 할당된 버퍼 용량을 초과한 패킷이 도달되는 경우는 최하위 클래스의 가장 오래 기다린 패킷부터 순차적으로 손실(packet loss)된다고 가정한다. ONU i에 있는 버퍼에 대기 중인 클래스 j의 패킷 양(TQ 단위)을 R_{ij}라고 할 때, ONU i는 그 시점에 총 R_i만큼의 패킷 전송을 요구하게 된다. 여기서, $R_i = \sum_{j=1}^{K} R_{ij}$, i = 1, 2, ⋯, N. 이러한 요구에 대해, 각 ONU i 별 대역 할당량 B_i^g를 정해주는 것이 대역할당 문제의 목적이다. 여기에서, 각 대역폭 할당은 미리 정한 주기(cycle) 시간 T_{cycle}마다 한번씩 이루어지는데, 각 ONU i 별로 할당해 주어야 하는 최소한의 할당 값 $B_i^{\min}$, $B_i^{\min} \geq 0$, 이나 최대한도의 할당값 $B_i^{\max}$, $B_i^{\max} \leq T_{cycle}$를 가질 수 있으므로, 할당 대역폭인 B_i^g는 $B_i^{\min} \leq B_i^g \leq B_i^{\max}$이고 $\sum_{i=1}^{N} B_i^g \leq T_{cycle}$이어야 한다. 각 ONU i는 자신에게 설정된 B_i^g 시간(TQ) 만큼의 패킷을 전송속도 R(bps)로 전송한 후에도 버퍼에 대기 중인 패킷에 대해서는 다음 주기(cycle)에 자신에게 할당되는 전송 시간을 활용하여 패킷을 전송한다. 비록 N이나 R_i값이 시간에 따라 변하는 값들이지만, 모든 ONU가 자신에게 허용된 패킷과 REPORT를 OLT에 수신하기에 충분한 시간 간격의 크기로 주기시간 T_{cycle}를 정한다고 하더라도 하나의 주기시간 내에 여러 번의 N값의 변동이 있을 가능성은 작고, R_i 값은 주기 당 각 ONU 별로 하나의 값만 관리하면 되므로, 표현의 단순화를 위해 시간을 표시하는 첨자는 생략하였다.

2.2.1 정적 대역 할당 방식(SBA)

정적할당 방식(SBA: Static Bandwidth Allocation)은 각 ONU에서의 대역폭 요구량 R_i를 고려하지 않고 모든 주기에서 각 ONU가 미리 정한 양 만큼의 대역폭 B_i^{fixed}를 갖도록 하는 방식이다. $B_i^g = B_i^{fixed}$, 여기서 B_i^{fixed}는 R_i에 관계없이 ONU 별 미리 설정한 양으로, SBA 방식을 이용하여 모든 ONU에 대해 한번씩의 서비스를 해 주기 위해서는 총 N(B_i^{fixed} + G)의 시간이 필요하므로, B_i^{fixed}는 N(B_i^{fixed} + G) ≤ T_{cycle}를 만족하는 값이어야 한다. 그리고 G는 ONU간 데이터 전송 충돌을 방지하기 위한 보호대역시간(guard time)을 나타낸다. 따라서, 만약, N(B_i^{fixed} + G) = T_{cycle} 형태로 B_i^{fixed}를 정하게 되면, B_i^{fixed}는 다음과 같은 값을 가진다.

$$B_i^{fixed} = \frac{T_{cycle} - N \cdot G}{N} \tag{1}$$

SBA는 만약 ONU i의 요구량 R_i가 B_i^g보다 작다면, R_i 만큼의 데이터를 전송 한 후, 나머지 대역폭인 (B_i^g-R_i)는 유휴(idle) 상태로 대역을 낭비하게 되는 문제가 있다.

2.2.2 동적 대역 할당 방식(DBA)

동적 대역 할당 방식(DBA: Dynamic Bandwidth Allocation)은 할당되는 대역폭 B_i^g이 각 주기 마다 R_i에 따라 변동되는 형태의 할당 방식으로, SBA의 대역폭 낭비를 줄이기 위한 방안이다. DBA 방법으로는 IPACT(Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time) 방식(Kramer *et al*., 2002a; Bai *et al*., 2006), 이단계 버퍼링 방식(two-stage buffer)(Kramer *et al*., 2002b), EDBA(Enhanced DBA) 방식(Assi *et al*., 2003), HSSR(Hybrid Slot-Size/Rate) 방식(An *et al*., 2003) 등이 있다.

기존의 순차적인 대역 할당은 바로 직전에 데이터 전송권을 부여해 준 ONU의 모든 데이터가 OLT로 전송 완료 된 후, 다음 ONU에 대한 GATE 메시지를 송신하는 방식으로, 이는 데이터 전송 시작 시점을 지연하게 되므로 대역폭을 낭비하는 문제가 발생 가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 IPACT에서는 GATE 메시지를 여러 ONU에게 미리 보내는 형태의 병렬적인 대역할당을 이용하였다(Kramer *et al*., 2002a). 그러나 IPACT는

부하가 낮을 때 우선순위가 낮은 패킷의 지연이 급격히 증가하는 현상인 경 부하 벌금(light penalty) 현상이 발생 가능하다는 문제가 있고, 이를 개선하기 위해 이단계 버퍼링 방식이 제안되었다. 이단계 버퍼링 방식은 하나의 버퍼를 두 개로 나누어서 관리하는 방식으로, 두 번째 버퍼에는 전송 우선순위의 구분없이 전송할 패킷 들은 하나의 공통 공간에 저장하고 있다가, 자신의 차례가 오면, 두 번째 버퍼에 대기 중인 패킷 중 허용 전송량 만큼의 패킷을 FCFS(first Come First Service)의 형태로 패킷 우선순위의 구분 없이 전송한다(Kramer *et al.*, 2002b). 따라서, 전송 도중 도달한 고 순위 패킷이 저 순위 패킷 보다 먼저 처리되지 않는 장점이 있으나, 이로 인한 고 순위 패킷의 지연시간이 증가되는 문제가 있다. 그리고 EDBA 방식은 미리 정한 기본적인 대역폭보다 많은 대역폭을 요구하는 ONU 들에 대해서만 주기시간이 종료되는 시점까지 대기 후, 여분의 대역폭을 나누어 주는 형태로 대역을 할당하는 방식으로, 이러한 SBA와 DBA의 혼합 형태의 할당 방식이 대역폭 이용률 증대에 도움이 된다는 것을 보였다(Assi *et al.*, 2003). 마지막으로, HSSR 방식은 각 ONU내의 클래스 별 대역할당을 ONU가 하면, 클래스 별 QoS를 용이하게 관리 할 수 있음을 보였다(An *et al.*, 2003). 본 논문에서의 대역할당 방식은 SBA와 DBA의 혼합 형태의 방식을 취하였고, OLT는 ONU별 할당만 하고 ONU내에서의 각 클래스 별 대역 할당은 우선순위에 따라 자동으로 정해지는 방식을 이용한다. 그러나, 이와 같은 IPACT 방식, 이단계 버퍼링 방식, EDBA 방식, HSSR 방식 등은 모두 대역 할당을 위해 하나의 GATE-REPORT 메시지를 이용하는 구조이다. 하나의 GATE-REPORT를 통해 OLT는 각 ONU의 요구 대역폭을 확인하고, 잔여 대역폭 할당을 위해 현재의 주기시간 종료시점에서 대역폭 할당이 이루어지므로, 주기시간의 초기에 REPORT를 한 ONU의 경우는 주기시간 종료시점에서의 실제 요구되는 트래픽과의 차이가 클 수 있으므로 서비스 지연의 가능성이 큰 방식이다. 본 논문에서는 이러한 문제의 해결을 위해 각 ONU별 두 번의 GATE-REPORT 메시지를 이용하는 알고리즘인 WFBA(Water-Filling Bandwidth Allocation) 방식을 다루었다. WFBA는 E - 연구소의 E-PON 시스템을 위해 개발된 것으로, Kim *et al.*(2007)은 WFBA을 병렬 엔진을 이용하여 구현하는 방식에 대한 평균 지연시간 및 평균 대역폭 이용률의 평가를 하였다. 그러나, Kim *et al.*은 평균적인 척도만을 평가하였고, 다양한 서비스 등급을 가진 트래픽을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 4가지 유형의 서비스 등급(클래스)을 가진 트래픽을 대상으로 지연시간, 패킷손실율, 버퍼점유율, 대역폭 이용률의 평균 및 최대값 성능 분석을 하였고, 현재 널리 쓰이고 있는 이더넷 망과의 비교를 통해 E-PON 시스템의 도입에 따른 성능상의 효과를 평가하였다. 또한 이러한 성능 분석을 통해 WFBA 알고리즘의 개선 방안을 도출하였다.

2.2.3 WFBA

WFBA는 E 연구소의 E-PON 시스템을 위한 MAC의 대역할당 알고리즘으로, SBA와 DBA를 혼합한 혼합형 대역할당(hybrid DBA) 방식의 하나이다.

WFBA는 다음과 같은 단계들을 수행한다.

<단계 1> 각 주기에서, OLT는 주기가 시작되자마자 정적(static) GATE 메시지 생성을 위한 준비 작업 후, 곧 바로 정적 GATE를 N개(ONU 개수) 생성하여 방송한다. 여기서, 정적 GATE 내의 전송허용시간(grant Length)은 64바이트의 REPORT 메시지를 보낼 수 있을 정도의 크기로 설정하고, 전송시작시점(start time)은 ONU가 정적 GATE를 수신하자마자 곧 바로 정적(static) REPORT를 보내도록 설정 한다.

<단계 2> static GATE 송신 후, 모든 ONU에 각각의 동적(dynamic) GATE를 생성(일정 시간의 CPU 시간이 소요됨)하여 <그림 2>와 같이 방송한다(Kim *et al*, 2007). 전송 허용시간은 작은 물바가지를 이용한 물 채우기(water filling) 과정과 같은 방식을 이용하여 결정하고, 결정된 전송허용시간을 이용하여 각 ONU를 위한 전송 시작시간을 정한다. 여기서, 각 ONU에 대한 대역 할당은 잔여 용량 B_{total}^{excess}를 추가가 필요한 ONU에 물 채우기 방식으로 차례로 채워줘 가면서 더 이상 잔여 용량이나 남아있지 않거나 추가로 필요한 용량이 없을 때까지 채운다.

<단계 3> 정적 REPORT가 OLT에 도달하면, 모든 N개의 ONU에서의 대역폭 요구량 R_i의 정보를 알게 되고, 현 주기 내에서 동적(dynamic) REPORT도 도착한 ONU에 대해서는 동적 REPORT의 R_i를 정적 REPORT의 R_i대신 관리한다. 이들 정보는 다음 주기의 초기에서 동적 GATE 메시지에 반영하여 해당 ONU에 송신한다.

<단계 4> ONU에서는 정적 GATE가 도착하면, 즉시 정적 REPORT를 생성하여 OLT에 자신의 요구 대역폭 정보를 송신한다. 이를 위해 OLT는 적절한(GATE 수신 즉시REPORT 발송하도록) 전송 시작시점을 설정해 주어야 하고, 전송 허용시간은 REPORT를 보낼 수 있을 정도만 설정하면 된다.

<단계 5> 동적 GATE가 도착되면, 지정된 전송 허용시점에 지정된 전송 허용기간 동안 패킷을 전송 후, 즉시 동적 REPORT를 보낸다.

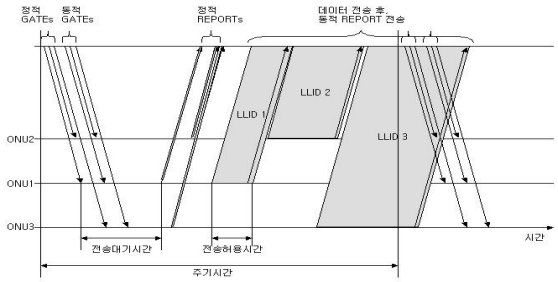

그림 2. WFBA 방식의 절차

WFBA는 GATE 메시지를 하나의 주기 내에서 각 ONU에게 두 번 전송하는 형태로, 첫 번째 GATE 메시지를 정적(static) GATE라 하고, 두 번째 GATE 메시지를 동적(dynamic) GATE라고 명명하였다. 여기서, 정적 GATE는 현재의 주기시간 내에

각 ONU가 요구하는 대역폭 양에 대한 정보를 알아내기 위한 역할을 하고, 동적 GATE의 주요 역할은 각 ONU에게 할당한 대역폭과 전송 시작 시점 정보를 각 ONU에게 알려주기 위한 것이다. 따라서 <그림 2>에서와 같이 ONU3에서의 동적 REPORT가 현재의 주기시간 내에OLT에 도달되지 않은 경우, 다음 주기시간에서는 이미 수신한 정적 REPORT 정보를 이용하여 대역 할당을 하게 된다. 단계 1에서 OLT가 각 ONU에 정적 GATE를 보내면, 각 ONU는 단계 4에서 이에 대한 답으로 정적 REPORT를 생성하여 OLT에 송신한다. 정적 GATE내의 전송시작 시점은 각 ONU까지의 RTT시간과 OLT에서의 수신가능 시점을 고려하여 가능한 제일 빠른 시점(<그림 2>의 전송대기시간이 경과 후)으로 정하면 되고, 전송 허용시간은 REPORT 메시지를 1Gbps로 보낼 수 있는 시간 간격(0.672 μs)이면 된다. 이어서, 단계 2에서 동적 GATE를 생성하여 각 ONU에 송신하는데, 이를 위한 전송 허용시간 B_i^g은 다음과 같이 정한다

$$B_i^g = \begin{cases} R_i, R_i < B_i^{\min} \\ B_i^{\min} + B_i^{excess}, R_i \geq B_i^{\min} \text{ 경우} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $B_i^{\min}$는 정적 GATE에서의 전송허용시간 값으로, 운영자가 설정할 수 있는 값이다. SBA와 같이 식 (1)의 $B_i^{\min} = B_i^{fixed}$일 수도 있고 $B_i^{\min} = 0.672\mu s$로 설정 할 수도 있다. $B_i^{\min} = 0.672$인 경우는 ONU에 대한 최소 할당 값을 설정하지 않은 경우와 마찬가지의 역할을 하게 된다. 즉, $R_i < B_i^{\min}$ 경우는 추가로 요구되는 대역폭이 없는 경우이므로, 정적 GATE에 의한 할당 양만 SBA 방식으로 ONU에 배정한다.

할당 요구량 R_i이 정적 GATE에 의한 배당량 $B_i^{\min}$보다 큰 경우는, 추가로 B_i^{excess}만큼의 TQ를 ONU i에 DBA 방식으로 할당한다. 이를 위해서는 $B_i^{\min}$ 만큼씩을 각 ONU에 배당 후 남은 잔여 대역폭 B_{tatal}^{excess}에 대해 추가로 대역할당을 요구한 ONU들에게 대역을 할당해주는데, 여기서, 추가해주는 총 대역폭은 크기가 S (단위: TQ)인 물바가지로 몇 번의 물을 받았는가에 따라 결정되는 값으로, 물바가지를 이용하여 추가할당을 요하는 ONU들에게 차례로 S 만큼씩 추가해 줘서 더 이상 잔여 대역폭이 남아있지 않거나 추가로 대역할당을 요구하는 ONU가 없을 때 까지 나누어 준다. 여기서, B_i^{excess} = Min $\{R_i, B_i^{\max}, B_i^{additiion}\}$로, 최대값 $B_i^{\max}$이 설정되어 있는 경우는 이 최대값 이하의 값을 가져야 하고, 요구량 R_i값 이하여야 한다. 추가되는 대역폭인 $B_i^{additiion}$은 $B_i^{additiion} = \lfloor (\frac{B_{total}^{excess}}{S}) (\frac{R_i}{\sum_{i=1}^{M} RI}) \rfloor \cdot S$이고, 여기서, B_{total}^{excess}은 경부하 ONU ($R_i < B_i^{\min}$인 ONU) 들에 R_i만큼을 배당 후 남은 총 잔여용량을 나타낸다. 그리고 M은 중부하(heavy-loaded), 즉, $R_i \geq B_i^{\min}$인 ONU 들의 개수로, $\sum_{i=1}^{M} R_i$는 중부하 ONU들의 총 할당 요구량을 나타낸다.

단계 5에서는 동적 GATE에 설정되어 있는 전송시작시점에 전송허용시간 만큼 자신의 버퍼 내에 있는 패킷을 SP 방식으로 전송한다. 이 과정에서 <그림 3>의 LLID = 1, 2인 ONU와 같이 현 주기 시간 내에 패킷 전송이 완료되는 경우가 대부분이겠으나, LLID = 3과 같이 현 주기 시간을 넘어서서 전송이 완료되는 경우도 있을 수 있다. 이 경우는 단계 3과는 달리 동적 REPORT가 현 주기 기간 내에 도달하지 못하므로, 다음 주기에서의 LLID = 3인 ONU에 대한 대역 할당은 정적 REPORT 메시지에서 요청한 대역폭을 해당 ONU의 요구 대역폭으로 인식하게 된다.

3. 성능 분석

3.1 가입자 망의 트래픽

입력 트래픽은 4가지 유형의 트래픽이 입력되는 것으로 고려하였다. 각 트래픽의 유형을 P1(클래스 1), P2(클래스 2), P3 (클래스 3), P4(클래스 4)로 표시하기로 하는데, 여기서, 트래픽별 처리 우선순위는 P1의 우선순위가 가장 높고, 그 다음으로 P2, P3, 그리고 P4가 가장 낮은 우선순위를 갖는 것으로 한다.

IEEE P.802.1p와 IEEE 802.1D에 따라서 우선 순위 별로 고려한 트래픽 특성은 다음과 같다.

3.1.1 클래스 1

클래스 1(P1)은 가장 우선순위가 높은 트래픽으로, 이는 망 제어용 패킷이나 음성 패킷과 같이 지연이 10ms 이내인 트래픽으로 지연 및 지연 변동(jitter)에 민감한 서비스이다. 이는 EF(Expedited Forwarding) 서비스를 요하는 것으로, 이더넷의 최소MAC 프레임 크기인 64바이트에 8바이트의 프리엠블(preamble)을 더한 72바이트 (576비트) 크기의 패킷이 입력되는 것을 고려하였다. 여기에서, 시뮬레이션 측정단위 선정의 편리를 위해 576비트 대신 580비트를 패킷 크기로 설정하였고, 이러한 580비트 크기의 패킷은 단위 시간당 평균 λ번의 포아송(Poisson) 분포를 따라서 입력하는 것으로 설정하였다.

3.1.2 클래스 2

클래스 2(P2)는 차 우선 순위의 트래픽으로, IEEE P802.1p에 의하면 비디오 패킷과 망의 운영을 위한 패킷과 같이 100ms 이하의 지연이 필요한 트래픽이다. 이는 AF(Assured Forwarding) 서비스를 요하는 것으로, 지터(jitter)에 대한 관리는 크게 중요하지 않은 서비스이다.

P2 순위의 패킷은 크기가 (64+8)~(1518+8) 바이트의 일양분포(Uniform distribution)를 따르는 것으로 고려하였고, 이는 평균 799바이트 (6328비트)의 크기이고, 이를 편의상 평균 6330비트의 패킷이 입력되는 것으로 설정하였다. 이와 같은 크기의

패킷이 파레토(Pareto) 분포를 따라서 입력되는 것으로 설정하였는데, 파레토 분포는 VBR(Variable-Bit-Rate) 비디오 서비스와 같은 패킷의 모델링에 유용한 것으로, LRD(Long-Range-Dependence)와 자기유사성(self-similarity)의 특성을 묘사하기에 좋은 분포이다. 파레토 분포는 모양(shape) 모수 α와 위치(location) 모수 β에 의해 규정되는 분포로, 일반적으로 VBR 비디오 트래픽은 α=1.4인 것으로 알려졌다(Kramer, 2005; Keucheryavy, 2006).

3.1.3 클래스 3

IEEE P802.1p에 의하면 클래스3(P3)은 중요 사용자의 트래픽이나 일반적인 LAN 트래픽과 같은 BE(Best Effort) 서비스를 요하는 트래픽이다. BE는 지연이나 지터에 대한 관리의 필요성이 크지 않은 트래픽이므로, P3의 입력 트래픽도 P2와 동일하게 설정하였다.

3.1.4 클래스 4

IEEE P802.1p에 의하면 클래스4(P4)는 타 사용자나 응용 서비스에는 무관한, 특정 고객에게만 의미가 있는 트래픽이다. 이는 BE 중에서도 우선순위가 낮은 트래픽이므로, 입력 트래픽은 P2와 동일하게 설정하였다.

이와 같은 설정을 하면, 총 N개의 ONU에 의한 E-PON 시스템에 대한 단위 시간당 입력 트래픽은 (N)[580λ + 18990(α − 1)($\alpha\beta$)] 비트가 된다. 여기서, 일반적인 α값인 α=1.4로 설정하면, N개의 ONU를 통한 단위시간 당 총 입력 트래픽은 다음과 같다.

(N) [580λ + 5507.1($1/\beta$)] 비트

여기에서, 만약 P1의 트래픽이 25%를 차지하고 하위 순위의 트래픽 비중이 나머지 75%라면, λ = [(5507)(25%)] / [(580)(75%)] $1/\beta$] = 3.16($1/\beta$)가 된다. 따라서, 총 제공 부하는 (N)($1/\beta$)(580)(3.16) + 5507] = (N)($1/\beta$)(7339.8)가 된다. 그리고 서비스 속도가 1Gbps (1Gbps = 10백비트 / 1us)이고 N = 32이라면, 결국 망 제공부하는 다음과 같은 값이 된다.

$$\text{망 부하} = \frac{2349/\beta}{10} = 235/\beta \text{ (단위: 100비트 / us)} \qquad (3)$$

3.2 성능 분석 환경 파라메터

QoS 및 망 성능에 대한 척도로 ITU-T Y.1541에서는 접속 속도(accessing speed), 정확도(accuracy), 의존도(dependability), 가용도(availability)로 측정하기를 권고하였다. 이 중, 패킷 전송 성능 파라메터(모수)로는 패킷 전달지연, 패킷 전달 지연 변동, 패킷 손실율, 패킷 오류율, 패킷 초과율(spurious rate)을 제시하였다(ITU-T, 2002).

본 연구에서는 평균(mean) 및 최대(maximum) 지연시간(delay time), 지연시간 편차(standard deviation), 패킷 손실율(packet loss ratio), 대역 이용률(utilization), 버퍼 점유율 등을 성능 척도로 하여, 망의 부하에 따른 성능 척도의 변화를 AweSim을 이용하여 측정하였다(Prisker and O'Reilly, 1999). 여기서, 시뮬레이션 시간은 400000 시뮬레이션 시간을 수행하였는데, 이는 주기 시간이 1024 시뮬레이션 시간인 경우, 390번의 주기가 반복되어 수행되는 시간이다.

3.2.1 E-PON을 위한 파라메타

E-PON 시스템의 상향 트래픽 서비스 성능 분석을 위해 고려한 파라메터는 다음과 같다. 하나의 광분배기에서 32개(N)로 광 신호가 분기되는데, OLT에서 ONU간 전송 구간에서는 1Gbps의 속도(R)로 서비스되는 상황을 고려한다. 이들 ONU는 가입자의 위치에 따라 설치 위치가 다르므로 OLT와의 거리에 차이가 있을 수 있는데, 별도의 전원을 이용하지 않는 수동 소자의 한계로 인해 E-PON 시스템의 서비스 범위는 일반적으로 2km~20km로 하고 있다, 이러한 거리 차이는 1초당 30만km의 광속거리를 고려할 경우는 ONU 별 6.66~66.6μs 동안의 전송 지연(RTT)을 발생하게 한다.

사용자 단말 장치로부터 ONU에 유입되는 트래픽은 4개(K)의 클래스로 각각 구분하여서 관리하는데, 클래스 1은 지수분포 시간 간격으로 도착되고, 클래스 2~4는 파레토 분포 시간 간격으로 도착되는 상황을 고려한다. 이를 위해 각 ONU는 OLT로 보내기 위한 패킷의 저장을 위해 총 8Mbit의 용량을 각 클래스 별로 2Mbit씩 구분하여 일시적인 저장을 한다. 총 8Mbit 용량을 4개의 클래스가 각각 2Mbit씩 논리적으로 나눠서 사용하는 형태이지만, 우선순위가 높을수록 버퍼 사용권한이 높은 SP(strict Priority) 방식을 따르는 것으로 설정하였다. 여기서, SP는 선점(preemption)이 허용되는 방식이므로, 버퍼 용량이 부족해지면 버퍼 내의 가장 낮은 우선순위의 패킷부터 손실(packet loss)된다.

각 ONU에 할당하는 최소한의 대역폭인 $B_i^{\min}$은 0.672μs로 하였는데, 이는 WFBA의 절차 상, 정적 REPORT를 하나 전송하기 위해 필요한 대역폭이다. 즉, 64바이트 길이의 REPORT 메시지와 이를 위해 필요한 헤더(header) 부분의 총 84바이트를 1Gbps로 전송하는데 소요되는 시간인 672ns (또는, 0.672 μs)가 필요하다. 그리고, 서로 다른 ONU간 패킷 전송을 위해서 필요한 레이저 On/Off 시간의 여유를 위해 IEEE 802.3ah에서 권고한 1856ns 동안의 보호대역 시간(guard time) G를 고려하였다. WFBA는 대역폭 할당을 추가로 원하는 ONU에 용량이 S인 물바가지를 이용한다. 별도로 수행한 성능 분석 결과, 물바가지의 용량에 따른 성능의 차이는 크지 않았으므로 여기에서는 임의로 5μs (S)를 고려하였다. 이러한 파라메터를 이용하여 1024μs를 주기 T_{cycle}로 하는 WFBA 방식의 성능을 분석한다. 여기서, IEEE 802.3ah에 의하면 주기시간은 50ms (또는, 5000만 μs) 내의 값으로 임의의 값을 이용하도록 하고 있는데, 1024μs는 1Gbps의 속도로 전송 시, 1,024Kbit (또는, 128Kbyte)를 전송할 수 있는 시간이다.

3.2.2 이더넷 성능 분석을 위한 파라메터

이더넷은 1973년 제록스사에서 최초로 개발할 당시에는 2.94Mbps의 속도이었으나, 1998년 IEEE 802.3의 HSSG(High-Speed Study Group)에서 표준화한 기가비트 이더넷(1000BaseSX, 1000BaseLX)은 광섬유를 전송 매체로 사용하는 1Gbps의 서비스를 제공한다. 기가비트 이더넷을 이용한 가입자 망의 구조는 OLT와 이더넷 스위치를 하나의 광섬유를 통해 연결하고, 이더넷 스위치와 32개(N = 32 경우)의 ONU를 각각 하나의 광섬유를 통해 연결하는 구조를 가질 수 있다. 여기서, 통신을 위해서는 OLT와 이더넷 스위치 간에 총 2개의 트랜시버(tranceiver)가 필요하고, 이더넷 스위치와 각 ONU간에는 총 64개의 트랜시버가 필요하다.

32개의 ONU가 총 8Mbit 용량의 버퍼를 모두 공통으로 이용하는 상황을 고려한다. 즉, E-PON에서는 각 ONU 별 8Mbit를 버퍼로 이용하지만, 이더넷은 버퍼를 관리하는 이더넷 스위치를 하나만 이용하는 구조이므로 공통 버퍼 이용 방식을 따른다. E-PON과 이더넷의 대역할당 방식은 각각 WFBA와 IEEE 802.3 규격을 이용하였고, 동일한 4개 클래스 별 구분된 입력 트래픽에 대한 서비스 성능을 비교하였다.

3.3 서비스 성능 평가

사용자로부터 발생하는 트래픽은 4가지 클래스로 우선 처리 순위가 구분되는데, 이러한 입력 트래픽에 대해, 식 (3)의 망 부하 0.1~1.2를 위해 파라메터 β값을 변화시켜가며 성능분석을 수행하였다. 여기서, 망 부하가 1.0이상인 것은, 평균적인 입력 트래픽이 서비스 속도인 1Gbps보다 큰 경우로, 서비스 우선순위 별 패킷의 서비스 형태와 버퍼의 활용도를 분석하기 위해 고려하였다.

3.3.1 지연시간 성능

망 부하의 증가에 따른 평균 및 최대 지연시간(단위: us)에 대한 평가 결과는 <그림 3>과 <그림 4>와 같다. 망의 부하 0.1에서 1.2까지의 E-PON 및 Ethernet의 평균지연시간 값 참고를 위해 <그림 3>의 X축에 표를 이용하여 표시하였다. 평가 결과, 망의 부하가 증가함에 따라 최대 지연시간도 증가하는 추세를 가지지만, 평균 지연시간이 크게 증가하지는 않는다. 이는 망의 부하가 증가되어도 평균적인 서비스 품질은 저하가 되지 않는 것을 의미하므로 WFBA을 이용한 E-PON을 이용하면 만족스런 서비스를 수행할 수 있다.

E-PON의 지연시간은 <그림 3>과 <그림 4>에서 보는 바와 이더넷에 비해 더 긴 것으로 보인다. 하지만, 망 부하 0.1~1.0 사이에서의 평균 지연시간이 E-PON의 경우 0.69ms~4.23ms이므로 10ms이하여야 하는 서비스 규격을 만족한다(ITU-T, 2001; 2002). 그러나 망 부하의 증가에 따라 최대 지연시간이 33ms ~374ms로 증가하는 형태를 가지는데, 이는 서비스의 균일성(consistency)에 좋지 않은 성질이다. 따라서 E-PON 시스템의 서비스의 균일성에 대한 추가적인 분석을 하였다.

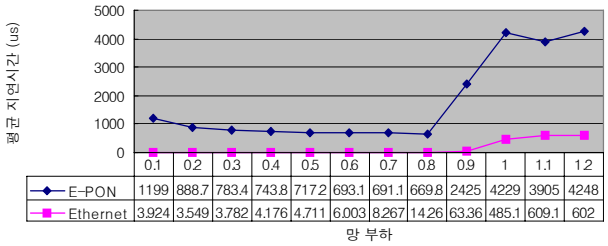

그림 3. 평균 지연시간

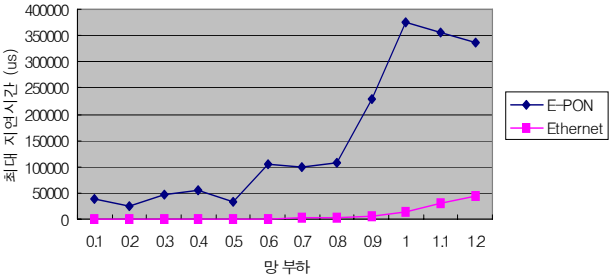

그림 4. 최대 지연시간

E-PON 시스템의 서비스 균일성은 서비스 시간 범위(지연시간 변동)으로 평가하였는데, <그림 5>에서 보는 바와 같이 망의 부하가 0.8일 때까지는 망의 부하가 증가하더라도 평균적인 서비스 지연시간 변동은 커지지 않는다. 이는 E-PON 시스템이 망의 부하가 높지 않을 경우는 동질의 서비스를 제공할 수 있다는 것을 의미한다.

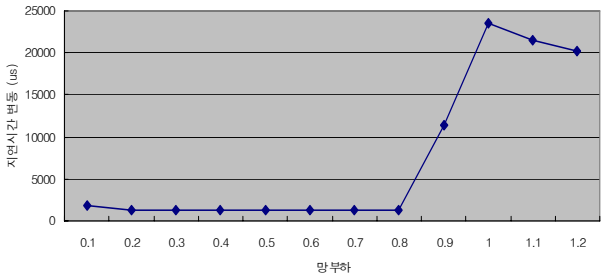

그림 5. E-PON 지연시간 변동

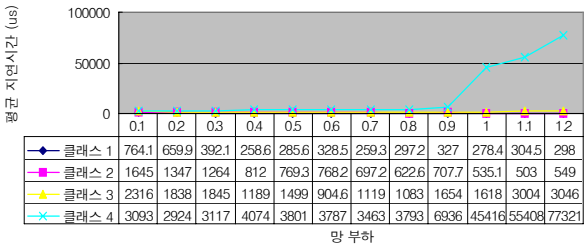

그림 6. E-PON 클래스 별 평균 지연시간

서비스 지연시간을 각 E-PON 시스템의 ONU별로 측정한 결

과로는 각 ONU 별 서비스 지연 시간에 차이는 거의 없는 공평성 서비스를 실시 할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 각 클래스 별 비교를 해보면, <그림 6>의 X축에 표시한 표에서 보는 바와 같이 클래스 1<클래스 2<클래스 3< 클래스 4의 순으로 평균 서비스 시간이 작으며, 망의 부하가 0.8이상일 때 시간 차가 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2 패킷 손실율

망의 부하 증가에 따라 서비스를 요하는 프레임 중 일부는 한정된 버퍼 용량 때문에 손실되게 되는데, 별도로 분석한 결과에 의하면 망의 부하가 1.0이 될 때부터 E-PON과 이더넷 둘 다에서 손실되는 패킷이 발생하였다. 패킷 손실율은 이후 망의 부하 증가에 따라 평균적으로 증가하는 형태를 띠었고, E-PON의 경우 각 클래스 별 손실되는 패킷의 비율을 검토한 결과, 망 부하가 1.1이상일 때 클래스 4에서 패킷 손실이 발생하기 시작하여 이후 차 상위 클래스의 패킷 손실도 발생하였다. 망의 부하가 1인데도 불구하고 패킷 손실율이 0인 이유는 다음의 버퍼점유율 평가를 통해서 알 수 있다.

3.3.3 버퍼 점유율

각 클래스 별 동일한 용량인 2Mbit씩의 버퍼 용량을 배정한 경우, 임의의 한 OUN(ONU 1)에서의 각 버퍼 별 평균 버퍼 점유량 및 최대 버퍼 점유량을 평가하였다.

평균적인 대기 프레임 크기는 망의 부하가 커질수록 버퍼 별 차이가 커지는데, <그림 7>에서 보는 바와 같이 망 부하가 0.9이상이 될 때, 대기 중인 프레임의 평균 크기(단위: 100bit)가 급격히 증가하였다. 평균 버퍼 점유량 측면에서 보면, E-PON이 이더넷에 비해 적은 버퍼가 필요한 것으로 분석되었다. 그러나 E-PON은 각 ONU별 버퍼를 가지고 있는 구조이고, 이더넷은 이더넷 스위치의 구조로 인해 모든 ONU가 하나의 공통의 버퍼를 공유하는 구조이다. 따라서, 버퍼 관리의 문제를 제외한다면, 버퍼가 필요한 곳에 버퍼를 나눠서 분산 배치해주는 E-PON의 방식이 더 효율적이다는 판단을 할 수 있다. 이러한 결과는 버퍼 용량을 클래스별 2Mbit 이상으로 증대하더라도 유사하게 나왔는데, 이는 <그림 8>의 최대 버퍼 점유량에 대한 분석을 통해서도 알 수 있다.

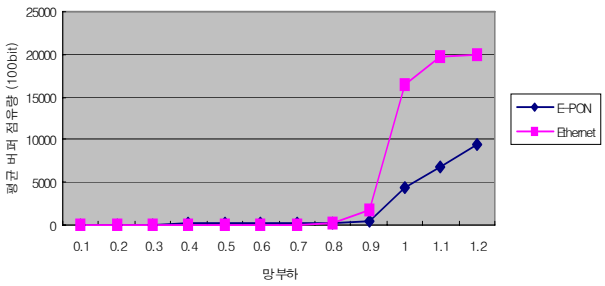

그림 7. 평균 버퍼 점유량 비교

E-PON의 경우 최대 버퍼 점유량을 측정한 결과가 <그림 8>이다. 여기에서도 볼 수 있는 바와 같이 망 부하가 0.9이상이 될 때 클래스 4를 위한 버퍼 4에 대기 중인 프레임의 평균 크기(단위: 100비트)가 급격히 증가하였다, 기본적으로 설정한 각 버퍼 용량은 2Mbit에 근접하는 것은 망 부하가 1.2일 때 버퍼 4에서 뿐이다. 그러나 버퍼 1의 최대 점유량이 2.34Kbit, 버퍼 2의 최대 점유량이 6.21Kbit, 버퍼 3은 212.8Kbit이므로, 시뮬레이션 결과를 이용한다면, 총 8Mbit 중 버퍼 1과 2에는 10Kbit씩을 배정하고, 버퍼 3에는 500Kbit를, 그리고 나머지 5.9Mbit 이상을 버퍼 4에 배정해도 문제가 없을 것으로 보인다.

그림 8. E-PON 버퍼 별 최대 점유량

3.3.4 이용률 성능

망의 증가에 따른 상향 광 대역폭의 활용도를 분석한 결과, E-PON과 이더넷의 차이는 거의 없으며, 둘 다 망의 부하가 0.9일 때까지 망의 부하에 거의 정비례하여 증가하다가 이용률 1로 수렴하는 형태를 보였다.

3.4 E-PON 서비스 향상 방안

WFBA 알고리즘을 이용한 E-PON은 하나의 광섬유를 여러 개의 ONU가 공통으로 활용하는 구조이므로, 이더넷에 비해 경제적으로 설치할 수 있고, 수동 소자(passive component)로만 되어 있으므로 관리 및 유지 보수가 쉽다는 장점이 있다. 그리고 이더넷의 경우는 1Gbps 이상의 고속의 서비스를 위해서는 이더넷 스위치를 교체해주어야 하므로 추가의 비용이 들지만, E-PON의 경우는 설비의 추가나 변경 없이 1Gbps 이상의 전송 서비스도 수용할 수 있는 장점도 있다. 그러나 앞의 성능 평가 결과에서 볼 수 있듯이 E-PON의 성능이 이더넷보다 낮다는 단점이 있다.

E-PON은 가입자 망에서 다양한 데이터 유형에 대한 고속의 전송 서비스를 저렴하게 공급하기 위한 방안 중의 하나로, 서비스 별 지연 허용 시간, 지연 시간 변동, 공평성 등의 QoS 측면에서 만족스런 성능을 가져야 하며, 대역 이용률이나 버퍼 활용도 등의 서비스 공급자측면에서도 좋은 성능이 요구된다.

성능 분석 결과, 지연시간, 버퍼점유율 및 패킷 손실율 등의 망 성능을 개선하기 위한 한 방안으로, ONU내 패킷 스케쥴링 방식의 개선을 들 수 있다. 즉, 현재의 WFBA는 각 ONU 별로 클래스 구분 없이 하나의 REPORT와 하나의 GATE 메시지를 주고받아서 전송 서비스를 하는데, 4개의 각 클래스 별 별도의

REPORT 및 GATE 메시지를 이용하는 방안을 고려할 수 있다. 각 클래스 별 대역 할당을 하는 방식은 우선순위 클래스 별 대역폭을 정적/동적으로 할당하는 지, SP 방식으로 전송 서비스 권한을 주는 지 여부에 따라 다양한 방안을 고려할 수 있다(Luo and Ansari, 2005; Zheng and Mouftah, 2005).

성능 개선을 위한 방안의 또 하나로, ONU간 패킷 스케쥴링 방안의 개선도 고려할 수도 있다. 현재의 WFBA 대역할당 알고리즘은 OLT에 등록되어있는 ONU의 번호(LLID) 순으로 순환(Round Robin) 방식으로 GATE 메시지를 전송하는데, GATE 메시지의 전송 순서는 타 ONU에 대한 전송 시작 시점 및 대기시간에 영향을 주므로, 적절한 순서를 고려할 수 있는데, 예를 들면, 오랜 시간 기다린 패킷 먼저 전송 서비스를 할 수도 있고, 반대로 최근에 버퍼에 도달한 패킷 먼저 서비스 해주는 방법도 고려할 수 있다. 이 외에도 주기시간을 관리하는 방식도 고려할 수 있다. 현재의 WFBA는 고정된 주기시간을 이용하고 있는데, 트래픽에 따라 변동하는 동적인 주기시간을 취하면, 지연시간 성능에 개선 가능성이 있는 것으로 보인다.

4. 결 론

E-PON은 이더넷을 가입자 또는 근거리 내에 광섬유를 포설하여 이더넷을 일반 가입자에게 제공하는 것을 목적으로 하며, 이를 통해 확장된 대역폭을 제공함으로써 기존 가입자 네트워크의 병목현상을 제거하는 기술이다. E-PON은 가입자 망에서 다양한 데이터 유형에 대한 고속의 전송 서비스를 저렴하게 공급하기 위한 방안 중의 하나로, 서비스 별 지연 허용 시간, 지연 시간 변동, 공평성 등의 QoS 측면에서 만족스런 성능을 가져야 하며, 대역 이용률이나 버퍼 활용도 등의 서비스 공급자 측면에서도 좋은 성능이 요구된다. IEEE802.3ah에서는 E-PON을 위한 프로토콜인 MPCP(Multi Point Control Protocol)를 규정하였으나, MPCP는 전반적인 틀(framework)만 규정하였을 뿐이고, 절차에 대한 구체적인 것은 규정하고 있지 않다. 따라서 각 개발되는 E-PON 별 대역할당 방식이나 트래픽 제어 방식에 차이가 있을 수 있고, 이러한 차이는 개발 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다

본 연구는 E-PON의 상향 트래픽 서비스를 위한 대역 할당 알고리즘에 대한 것으로, E 연구소에서 개발한 E-PON 시스템의DBA(Dynamic Bandwidth Allocation) 알고리즘을 위한 WFBA (Water-Filling Bandwidth Allocation)를 분석하고, 이의 성능을 AweSim을 이용하여 평가하였다. 여기서, 4개 유형의 QoS 등급별 성능 분석을 통해 차별화된 서비스를 원활하게 할 수 있는지를 평가하였는데, 망의 부하가 0.8이하인 상황에서는 서비스 기준 규격에 만족스런 서비스를 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 가입자 통신망 장치의 성능 분석을 위해 E-PON 요구 규격에 따른 파라메터 설정을 통한 시뮬레이션 분석을 하였지만, ONU 내부에서의 패킷 스케쥴링 (ONU scheduling) 방식에 대한 해석적인 분석을 한다면, 성능 개선에 이용할 수 있을 것으로 생각한다. E-PON은 하나의 광섬유를 TDMA 방식으로 공유하는 구조이므로, 가입자 수에 따른 전송속도 감소는 피할 수 없다. 예를 들어, 1 : 32 분기율을 사용하여 최대 32개의 동등한 ONU가 존재하는 경우는 1Gbps의 전송 서비스는 ONU 당 약 31Mbps가 할당되므로, BcN (Broadband Convergence Network)을 위한 50~100Mbps에는 못 미친다. 따라서 1Gbps 이상의 전송 속도를 위한 프로토콜(protocol)이 필요하다. 그러나 1Gbps 이상의 고속 장치를 위한 프로토콜 개발을 위해서도 통신 프로토콜에 대한 이해를 바탕으로 하는 성능 분석 연구는 추가로 요구된다.

참고문헌

An, F.-T., Bae, H., Hsueh, Y.-L., Kim, K. S., Rogge, M. S., and Kazovsky, L. G. (2003), A NewMedia Access Control Protocol Guaranteeing Fairness among Users in Ethernet-based Passive Optical Networks, *IEEE OFC, 1*, 134-136.

Assi, C. M., Ye, Y., Dixit, S., and Ali, M. A. (2003), Dynamic Bandwidth Allocation for Quality-of-Service over Ethernet PONs, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **21**(9), 1467-1477.

Bai, X., Shami, A., and Assi, C. (2006), On the Fairness of Dynamic Bandwidth Allocation Schemes in Ethernet Passive Optical Networks, *Computer Communications*, **29**, 2123-2135.

Coffman, Jr. E. G., Garey, M. R., and Johnson, D. S. (1996), *Chapter 2. Approximation Algorithms for Bin Packing: A Survey,* in *Approximation Algorithms for NP-hard Problems*, D. Hochbaum (ed.), PWS Publishing.

ITU-T G.1010 (2001), *End-user Multimedia QoS Categories*.

ITU-T Y.1541 (2002), *Network Performance Objectives for IP-based Services*.

Joo, U. G. (2005), Heuristic Algorithms for Efficient Routing on RPR, *WSEAS Transactions on Communications*, 4(12), 1411-1418.

Kim, C., Yoo, T. W., and Kim, B. T. (2007), An Improved Cyclic Water-filling EPON DBA Providing Priority Scheduling and Faster Allocation Time, appear in *International Conference on Advanced Communications and Technology*.

Koucheryavy, Y., Moltchanov, D., and Harju, J. (2006), A Novel Two-step MPEG Traffic Modeling Algorithm based on a GBAR Process, www.cs.tuf.fi/tlt/*npg/icefin/documents/GBAR-YK-DM-JHSent2.pdf*.

Kramer, G., Mukherjee, B., and Pesavento, G. (2002a), IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (E-PON), *IEEE Communications Magazine*, 74-80.

Kramer, G., Mukherjee, B., Dixit, S., Ye, Y., and Hirth, R. (2002b), Supporting Differentiated Classes of Service in Ethernet Passive Optical Networks, *Journal of Optical Networking*, 1(8&9), 280-298.

Kramer, G. (2005), *Ethernet Passive Optical Networks*, McGraw-Hill.

Luo, Y. and Ansari, N. (2005), Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONs, *IEEE Optical Communications*, 516-521.

Pritsker, A. A. B. and O'Reilly, J. J. (1999), *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, Wiley.

Zheng, J. and Mouftah, H. T. (2005), Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview, *IEEE Communications Magazine*, 145-150.

주 운 기
한국과학기술원 산업공학과 박사
한국전자통신연구원 선임/초빙연구원
미국 Auburn 대학교 교환교수
현재: 선문대학교 지식정보산업공학과 교수
관심분야: 통신 시스템, 생산시스템, 산업정보화

권 율
부산대학교 전자공학과 박사
부산동의공업전문대학 전임강사
국방과학연구소 연구원
현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
관심분야: 통신 시스템, 트래픽 제어