

論文 2003-40TC-7-1

Ethernet PON의 MAC 프로토콜의 대역폭 할당 및 성능 분석

(Bandwidth Allocation and Performance Analysis of MAC Protocol for Ethernet PON)

嚴鍾勛*, 張容碩*, 金昇浩*

(Jonghoon Eom, Yongseok Chang, and Sung-Ho Kim)

요약

Ethernet PON(Passive Optical Network)은 최근 활발하게 연구되고 있는 경제적이고 효율적인 가입자 망이다. 차세대 가입자망인 Ethernet PON의 MAC(Media Access Control) 프로토콜은 TDMA(Time Division Multiple Access)방식을 기본으로 하며, QoS(Quality of Service)를 보장해야 하는 전용회선(Leased Line) 가입자에 적합한 고정 할당 방식과 LAN/MAN의 최선형(Best Effort) 방식에 적합한 동적 할당 방식으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 이들 프로토콜의 성능을 분석하기 위하여 OPNET 시뮬레이션 도구를 이용해 Ethernet PON 모델을 설계한다. 설계된 모델에 대한 단대단 Ethernet 지연(end-to-end Ethernet delay), 큐잉 지연(queueing delay), 처리량(throughput)과 사용률(utilization) 분석을 통해서 MAC 프로토콜을 검증하고, 하나의 OLT(Optical Line Terminal)가 수용할 수 있는 최적의 ONU(Optical Network Unit) 개수를 산정한다. 또한, 적절한 ONU의 버퍼 크기를 제안하여 Ethernet PON의 망 효율을 극대화하는 방안을 제시한다.

Abstract

An Ethernet PON(Passive Optical Network) is an economical and efficient access network that has received significant research attention in recent years. A MAC(Media Access Control) protocol of PON, the next generation access network, is based on TDMA(Time Division Multiple Access) basically and can classify this protocol into a fixed length slot assignment method suitable for leased line supporting QoS(Quality of Service) and a variable length slot assignment method suitable for LAN/MAN with the best effort. For analyzing the performance of these protocols, we design an Ethernet PON model using OPNET tool. To establish the maximum efficiency of a network, we verify a MAC protocol and determine the optimal number of ONUs(Optical Network Unit) that can be accepted by one OLT(Optical Line Terminal) and propose the suitable buffer size of ONU based on analyzing the end-to-end Ethernet delay, queuing delay, throughput, and utilization.

Keywords : Ethernet, Ethernet PON, Access Network, Optical Network

I. 서론

* 正會員, 慶北大學校 컴퓨터工學科
(Department of Computer Engineering, Kyungpook National University.)
接受日字:2003年3月21日, 수정완료일:2003年7月15日

인터넷 서비스에 대한 수요가 하루가 다르게 늘어나고 있는 정보화 사회에서 기간 망의 전송용량은 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 등의 기술을 이용해 Tbps급까지 증가하고 있고, LAN의

전송속도도 1Gbps는 보편적으로 사용되고 있으며 10Gbps는 표준화가 완성되어 상용화를 눈앞에 두고 있다. 이에 반해 현재 가입자 망의 전송속도는 수 Mbps급에 그친다. 이로 인해 세계의 많은 통신사업자는 초고속 가입자 망의 구축을 위한 연구들을 수행하고 있다. 그러나 이러한 가입자망에 대한 연구는 통일된 형태로 수행되지 않고, 다양한 형태의 연구로 최종 목적인 FTTH(Fiber To The Home)에 접근하고 있다¹¹⁻³⁾. 현재의 대표적인 초고속 가입자망 xDSL(Digital Subscriber Line)은 향후 고속 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해서는 전송 능력이 부족하고, 수요 밀집지역에는 유리한 방식이지만, 수요 산발지역에는 부적합한 방식이다. 이러한 상황에서 반경 20Km 내에 있는 가입자들을 FTTx의 형태로 연결할 수 있는 PON은 가입자 망의 대안으로 등장한 기술이라 할 수 있다. 또한, PON은 하나의 광케이블을 분배기(splitter)를 통해 여러 가닥으로 분기하여 최대 64대의 광 가입자 장치가 동시에 연결되어 사용할 수 있는 구조이기 때문에 대용량 전송능력 뿐만 아니라 구축비용이 저렴한 장점을 가지고 있다⁴⁻⁶⁾.

PON 기반으로 데이터를 전달할 수 있는 여러가지 방법 중에서 가장 먼저 연구된 것은 ATM PON이지만 ATM 망의 복잡성과 경제성 문제로 상용화가 늦어지고 있다. 반면에, 새로운 가입자 망을 구성하려고 할 때, Ethernet PON이 두 가지 면에서 이점을 가진다. 첫째는 가격 경쟁력이 우수하다는 것이고, 둘째는 가정내의 통신 단말기가 Ethernet 인터페이스를 가지고 있다는 사실이다. 이러한 이유로 IEEE 802.3에서는 2001년에 EFM(Ethernet in the First Mile) 연구 그룹을 설립하고 Ethernet PON의 표준화 작업이 진행 중에 있다.

그러나, Ethernet PON은 아직 표준화 단계이고, 실험 망 또한 부족한 상황이다. 새로운 매체를 포설하고 통신 장비를 설치하려면 이에 앞서 망에 대한 성능 분석을 통하여 주어진 여건에서 필요한 망 장비의 규모를 산출해야 한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 OPNET을 사용해서 Ethernet PON 시뮬레이션 모델을 설계하고 구현한다. Ethernet PON 시뮬레이션 모델을 구현하기 위해서는 배치(ranging) 프로토콜과 MAC 프로토콜이라는 핵심 기술이 요구되며, 배치 프로토콜은 ONU들이 OLT에게 트래픽을 전송할 때, 매체가 공유되는 구간에서 충돌을 방지하기 위해 서로 다른 위치에 있는 ONU들을 가상적으로 동일한 위치에 배치하는 프로토콜이다. MAC 프로토콜은 매체를 공유하는

ONU들간의 통신을 허용하기 위해서 매체 접근을 제어하는 프로토콜을 말한다⁹⁻¹²⁾.

Ethernet PON의 MAC 프로토콜은 TDMA방식을 기본으로 하며, QoS를 보장해야 하는 전용회선 가입자에 적합한 고정 할당 방식과 LAN/MAN의 최선형 방식에 적합한 동적 할당 방식으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 고정 할당 방식과 Ethernet 특성을 고려한 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜을 Ethernet PON에 적용하여 시뮬레이션 모델을 설계하고 단대단 Ethernet 지연, 큐잉 지연, 처리량과 사용률 분석을 통해서 MAC 프로토콜의 성능을 검증하고, 하나의 OLT가 수용할 수 있는 최적의 ONU 개수를 산정하며, 적절한 ONU 버퍼의 크기를 제안하여 Ethernet PON의 망 효율을 극대화하는 방안을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 Ethernet PON의 연구동향에 대해 설명하고, 3장에서는 고정 할당 방식과 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜을 Ethernet PON에 적용한다. 4장에서는 OPNET을 이용해서 구현된 Ethernet PON 시뮬레이션 모델을 기술하고, 5장에서는 4장에서 구현된 모델을 이용해서 시뮬레이션을 실시하고, 시뮬레이션 결과를 기반으로 성능을 분석한다. 마지막으로 6장에서는 결론을 내리고 향후 연구과제를 기술한다.

II. Ethernet PON

본 장에서는 Ethernet PON과 ATM PON과의 차이점에 대해서 기술하고, 다음으로 Ethernet PON의 동작원리와 데이터 전달 방식의 연구동향을 설명한다. <그림 1>에서 보이는 것처럼, OLT와 ONU는 광분배(Optical

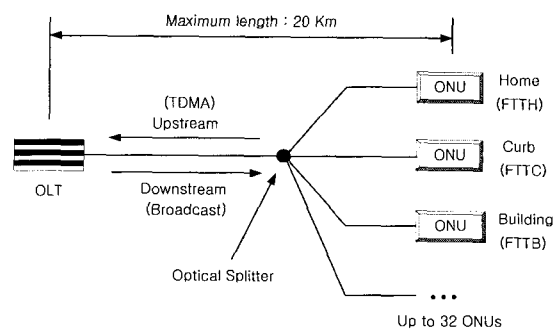


그림 1. Ethernet PON의 구성
Fig. 1. Structure of Ethernet PON.

Splitter)의 양단(End Point)에 위치하고 각각은 광섬유로 연결되어 있다.

PON은 광신호의 전달방향에 따라 광분배기에 의해 여러 개의 동일한 광신호로 분배되거나 하나의 신호로 합쳐지게 된다. 광분배기는 별도의 전력공급이 필요 없는 수동 소자이기 때문에 PON을 구성할 때 설치 및 유지보수 비용이 적게 드는 장점이 있다. 또한, OLT와 ONU들은 점 대 다점 형태로 연결되어 있기 때문에 점 대 점 형태보다 광케이블을 설치하는 비용이 저렴하다.

Ethernet PON과 ATM PON을 비교했을 때, 가장 두드러진 차이점은 전달되는 데이터의 형태이다. Ethernet PON은 최대 1518bytes의 가변 길이 패킷을 전송할 수 있는 프레임 형태의 전송 방식이고 ATM PON은 53bytes의 고정된 셀을 전달하는 방식이다^[13]. 또한, 전송속도 면에서도 Ethernet PON은 1Gbps에서 10Gbps로 확장될 수 있는 반면에 ATM PON은 최대 622Mbps로 제한된다.

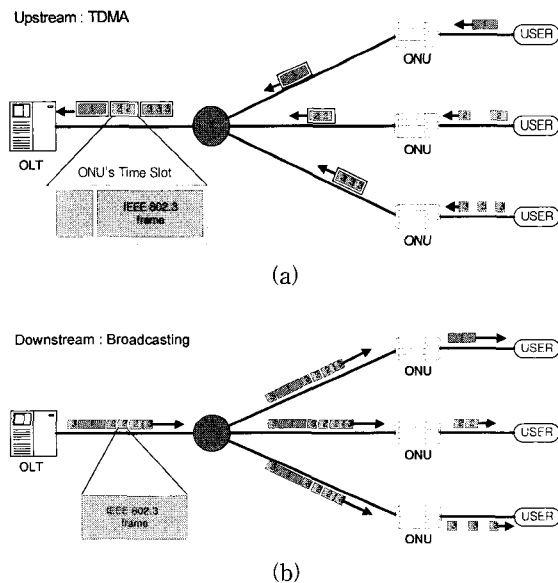


그림 2. Ethernet PON의 트래픽 흐름: (a) 상향스트림, (b) 하향스트림
Fig. 2. Streams of Ethernet PON: (a) upstream, (b) downstream.

Ethernet PON의 트래픽 흐름은 <그림 2>와 같이, 하향스트림은 점 대 다점으로 방송되고, 상향스트림은 다점 대 점으로 접근하기 위한 다중 접속 프로토콜이 필요하게 된다. 상향스트림은 <그림 2(a)>에서 보이는 것

처럼 ONU들이 다른 ONU들의 데이터와 전송 충돌을 피하기 위해, 각 ONU에게 주어진 타임슬롯에 가변 길이의 IEEE 802.3 프레임을 전달하는 TDMA 방식을 사용한다. 하향스트림은 <그림 2(b)>와 같이 OLT는 ONU에게 IEEE 802.3 프레임을 방송하고 ONU는 자신에게 해당되는 프레임만 수용하고 아니면 파기시킨다.

III. MAC 프로토콜

Ethernet PON의 TDMA MAC 프로토콜은 전용회선과 같이 약정한 대역폭을 보장해야 하는 QoS 보장형 서비스에 적합한 고정 할당 방식과 LAN/MAN에 적합한 동적 할당 방식으로 분류할 수 있다. 전용회선 가입자를 위한 고정 할당 방식은 프로비저닝에 의하여 배정 대역폭의 사용여부에 관계없이 약정한 대역폭에 상응하는 타임슬롯을 할당한다. 이 방식은 배정한 대역폭을 충분히 효율적으로 활용하지 못하는 단점이 있다. LAN/MAN과 같이 최선형 방식의 서비스에 적합한 동적 할당 방식은 ONU의 buffer에 도착한 프레임은 송신하기 위하여 OLT로 상응하는 타임슬롯을 요구하게 되고 OLT는 요구한 타임슬롯을 스케줄링을 통하여 허가하게 된다.

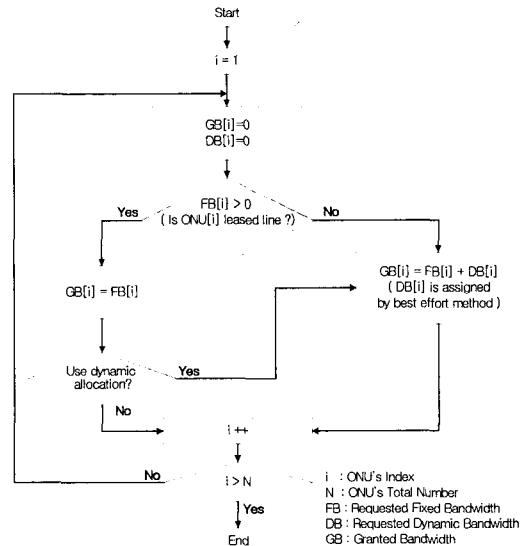


그림 3. ONU의 서비스 형태에 따른 스케줄링
Fig. 3. Scheduling according to ONU's service type.

Metro Ethernet 기술이 확산되면서 하나의 OLT에 대하여 두 가지 대역폭 할당 서비스를 동시에 제공해야

하는 경우가 발생하는데 이런 경우 서비스를 제공하는 입장에서는 ONU로부터 대역폭 요구정보가 OLT에 도착했을때 <그림 3>과 같은 ONU의 서비스 형태에 따라 적절하게 대역폭 할당하는 스케줄링이 필요하다. 이 장에서는 여러가지 서비스를 동시에 수용하기 위한 서비스 모델을 구성하는 고정 할당 방식과 동적 할당 방식에 대해서 기술한다.

1. 고정 할당 방식

고정 할당 방식은 상향스트림을 위해 ONU가 고정된 수의 타임슬롯을 차지하는 것으로 각각의 ONU에게 할당되는 대역폭은 동일하다. 그러나, 일부 ONU가 데이터 전송을 하지 않을 때는 그 만큼의 타임슬롯을 비운 상태로 두기 때문에 비효율적이다.

이러한 고정 할당 방식의 MAC 프로토콜은 고정 대역폭을 사용하여 상향스트림을 보내기 때문에 대역폭

할당을 위한 스케줄링은 필요 없고, 각 ONU가 상향스트림을 보내기 위한 시간 동기화 정보만이 필요하다. 본 논문에서는 고정 할당 방식의 MAC 프로토콜은 등록(registering)과 배치(ranging)를 포함하는 초기화(initialization)과정인 부팅 과정이 완료되었다는 가정 하에서, <그림 4>와 같은 메시지 전달 절차를 반복하도록 설계한다. <표 1>은 고정 할당 방식 MAC 프로토콜의 송·수신되는 메시지를 나타낸다.

2. 동적 할당 방식

가입자 망 트래픽의 특성상 고정 할당 방식으로 각 ONU에게 슬롯을 할당하게 되면 링크의 효율이 급격히 떨어지게 되는 반면에 동적 할당 방식은 이러한 단점을 보완한다. 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜은 상향스트림을 위해 ONU가 고정된 타임슬롯을 차지하고 있는 것이 아니라, OLT의 스케줄링에 따라 ONU가 요구하는 대역폭을 동적으로 할당한다.

<그림 5>는 동적 할당 방식의 스케줄링 알고리즘을 나타낸다. <그림 5>에서 N은 하나의 OLT에 연결되는 ONU의 개수를 의미하고, TUTS는 상향스트림으로 정해져 있는 타임슬롯의 총 개수를 의미한다. TATS는 각각의 ONU에게 할당된 타임슬롯 개수의 총합을 의미하며, REQ와 GRANT는 ONU가 요구하는 타임슬롯의 수와 OLT가 승인하는 타임슬롯의 개수이다. ONU들은 자신의 데이터를 전송하기 위해 필요한 타임스롯 정보(REQ)를 제어 패킷(MPCP:Multi-Point Control Protocol Packet)에 실어서 OLT에게 보내고 OLT는 이러한 타임슬롯 요구정보를 모든 ONU에게 받았을 때, <그림 5>와 같은 동적 할당 방식의 스케줄링으로 할당된 타임슬롯 정보(GRANT)를 제어패킷에 실어서 각각의 ONU에게 보낸다.

<그림 5>와 같은 동적 할당 방식에서 OLT는 적정의 타임슬롯을 ONU에게 할당하기 위해, ONU들이 요구하는 타임슬롯의 총합(SumOfREQ)이 상향스트림으로 정해진 타임슬롯의 총 개수(TUTS) 보다 클 경우와 작거나 같은 두 가지의 경우로 나누어 스케줄링 한다. ONU들이 요구하는 타임슬롯의 총합이 상향스트림으로 정해진 타임슬롯의 총 개수 보다 작거나 같은 경우에 OLT는 ONU에게 요구하는 타임슬롯을 모두 할당할 수 있다. 그러나, 반대의 경우에 OLT는 ONU에게 ONU의 요구 타임슬롯을 모두 할당할 수 없으므로 공평한 할당을 위한 스케줄링이 필요하다. 이에 본 논문에서는 공평

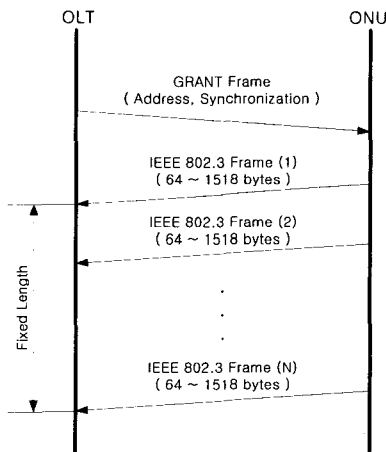


그림 4. 고정 할당 방식에서 OLT와 ONU간의 메시지 송·수신 절차

Fig. 4. Procedure for sending & receiving messages with fixed length timeslot assignment.

표 1. 고정 할당 방식에서 OLT와 ONU간의 송·수신 메시지

Table 1. Sending & receiving messages with fixed length timeslot assignment.

프레임	방향	설명
GRANT	OLT→ONU	ONU가 데이터를 전송하기 위한 시간적 동기화 정보.
IEEE 802.3 Frame	OLT←ONU	ONU에게 할당된 고정 길이의 타임슬롯을 사용하여 전송되는 데이터.

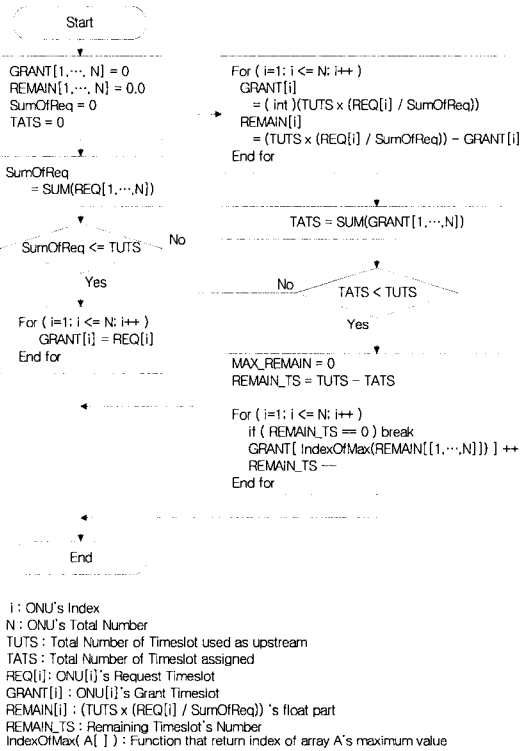


그림 5. 동적 할당 스케줄링
 Fig. 5. Dynamic bandwidth allocation scheduling.

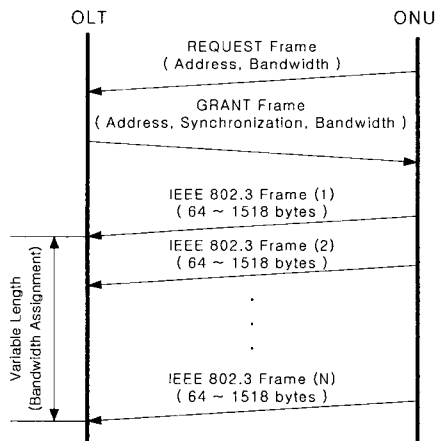


그림 6. 동적 할당 방식에서 OLT와 ONU간의 메시지 송·수신 절차
 Fig. 6. Procedure for sending & receiving messages with variable length timeslot assignment.

한 할당을 위해서 <그림 5>에서 보듯이 ONU가 요구하는 타임슬롯을 ONU들이 요구하는 타임슬롯의 총합에 대한 비율로 각각의 ONU들에게 할당한다.
 이러한 스케줄링 방식은 ONU가 데이터 전송을 하지

않을 때는 그 만큼의 타임슬롯을 할당하지 않기 때문에 고정 할당 방식의 MAC 프로토콜보다 우수한 망 효율을 가질 수 있다. 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜은 <그림 6>과 같은 메시지 전달 절차를 반복하도록 설계되며, 3.1절의 고정 할당 방식과 마찬가지로 등록과 배치의 초기화 부팅 과정은 완료되었다고 가정한다. <표 2>는 동적 할당 방식 MAC 프로토콜의 송·수신되는 메시지를 나타낸다.

표 2. 동적 할당 방식에서 OLT와 ONU간의 송·수신 메시지

Table 2. Sending and receiving messages with variable length timeslot assignment.

프레임	방 향	설 명
GRANT	OLT→ONU	데이터 전송을 위한 타임슬롯 정보와 시간적 동기화 정보
IEEE 802.3 Frame	OLT←ONU	할당된 가변 길이의 타임슬롯을 사용하여 전송되는 데이터.
REQUEST	OLT←ONU	데이터를 전송하기 위해 필요한 타임슬롯을 OLT에게 요구.

IV. 시뮬레이션 모델

본 장에서는 MAC 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 OPNET 시뮬레이션 도구를 사용하여 구현한 Ethernet PON 모델들을 기술하고, 각각의 세부적인 모델들에 대해서 상세히 설명한다. 현재 Ethernet PON은 표준화가 진행되고 있는 망 구조로 시험 망이 부족하다. 따라서 실제 장치를 대신하여 망 성능을 분석 할 수 있는 도구가 필요하다.

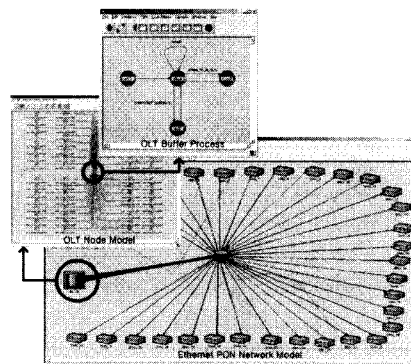


그림 7. OPNET Ethernet PON 모델
 Fig. 7. OPNET Ethernet PON model.

OPNET은 여러 가지 통신 장비에 대한 모델을 제공하며, 이러한 모델들을 시뮬레이션하여 그 결과를 실제 망에 적용할 수 있도록 한다. OPNET으로 시뮬레이션하기 위한 모델은 프로젝트 모델, 노드 모델, 프로세스 모델로 구성되며, <그림 7>은 OPNET으로 구현한 Ethernet PON의 프로젝트 모델, 노드 모델, 프로세스 모델들 중에서 일부분을 보여주고 있다. 3장에서 기술된 고정 할당 방식과 동적 할당 방식의 구현에 있어 동적 할당 방식은 고정 할당 방식을 포함한다. 따라서, 이 장에서는 동적 할당 방식으로 구현된 Ethernet PON 모델에 대해서 기술한다.

1. OLT 모델

이 절에서는 OPNET을 사용하여 구현한 Ethernet PON의 OLT 모델을 기술하고, 각각의 세부적인 모델들에 대해서 설명한다. <그림 8>은 동적 할당 방식 MAC 프로토콜로 구현된 OLT의 노드 모델을 보여주며 OLT의 역할과 광분배기의 역할을 동시에 수용할 수 있는 노드 모델을 보여주고 있다. <표 3>은 개발된 OLT 노드 모델의 구성과 역할을 간략히 설명한다.

<표 3>에서 볼 수 있듯이 실제 3장에서 기술한 MAC 프로토콜은 Buffer 노드 모델로 구현된다. 또한, 물리적인 PON의 광분배기를 소프트웨어적으로 모델링하기 위하여 광분배기에서 발생하는 프레임의 복사에 대한 문제를 OLT의 노드 모델에 ONU 수 만큼의 송수신기가 처리함으로써 OLT, ONU, PON 광분배기의 링크 모델을 단순화한다.

OLT의 각 노드 모델 내부에는 프로세스 모델이 존재한다. OPNET에서 프로세스 모델은 유한 상태 기계 접근(FSM: Finite State Machine) 방식을 사용해서 각 상태와 천이를 정의한다. 각 상태는 조건 상태와 무조건 상태로 구분되며, 조건상태는 시뮬레이션 중에 발생하는

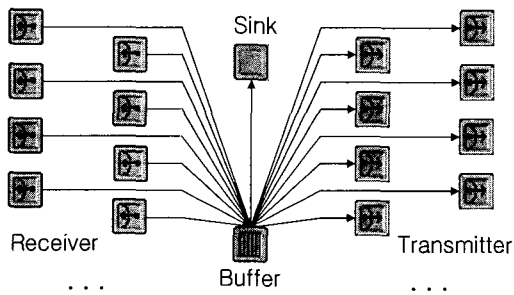


그림 8. OPNET OLT 노드 모델
Fig. 8. OPNET OLT node model.

표 3. OLT 노드 모델의 구성과 역할
Table 3. Construction and role of OLT nodes.

노드 모델	역할
Buffer 노드	MAC 프로토콜 포함(대역폭 할당). - 제어 패킷 생성/관리/송·수신 제어/큐 관리. 패킷을 Transmitter로 전달. Receiver로부터 받은 패킷을 Sink로 전달.
Sink 노드	Buffer 노드로부터 패킷 수신. 수신 패킷 분석.
Transmitter 노드	Buffer 노드로부터 받은 패킷을 Link 모델로 전달.
Receiver 노드	Link 모델로부터 전송된 패킷을 Buffer 노드로 전달.

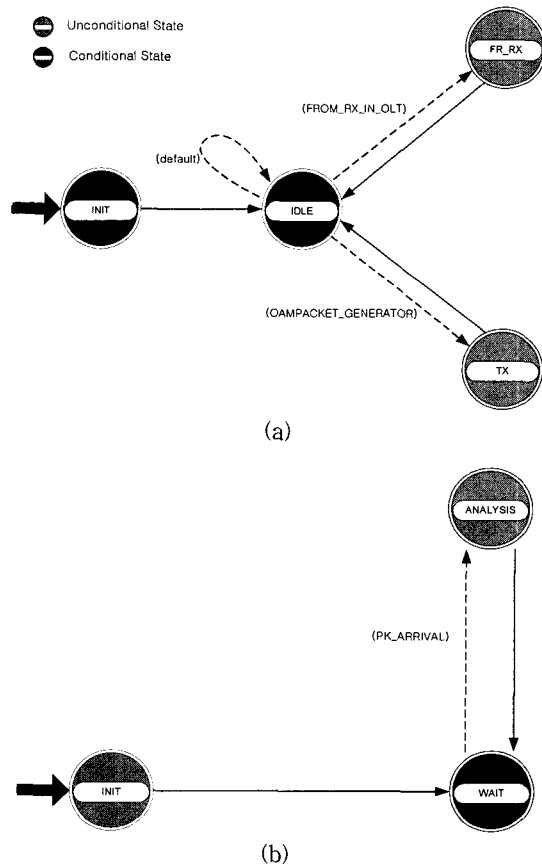


그림 9. OLT의 process 모델: (a) buffer노드에 대한 프로세스 모델, (b) Sink 노드에 대한 프로세스 모델
Fig. 9. Process models for OLT: (a) process model for buffer node, (b) process model for sink node.

이벤트에 의해서만 다른 상태로 천이 할 수 있는 상태를 말하며, 무조건 상태는 아무런 이벤트 없이 가리키는 다음 상태로 천이하는 상태를 말한다. 각 상태 사이의 천이는 조건 천이(점선)와 무조건 천이(실선)로 나누어지며, 조건 천이는 OPNET에서 제공되는 이벤트 함수를 개발자가 모델의 설계를 위해서 발생시키거나, 또는 OPNET이 시뮬레이션 중에 발생시킨다.

<그림 9>는 OLT를 구성하는 프로세스 모델들을 보여주고 있다. <그림 9(a)>는 Buffer 노드에 대한 프로세스 모델을 보여주며, 2개의 무조건 상태와 2개의 조건 상태로 구성된다. <그림 9(b)>는 2개의 무조건 상태와 1개의 조건 상태로 구성된 Sink 노드에 대한 프로세스 모델이다.

OLT의 Buffer 노드에 대한 프로세스 모델은 모든 ONU에서 보낸 타임슬롯 요구 REQUEST 메시지를 수신한 후에 스케줄링을 통하여 각각의 ONU가 자신에게 할당된 타임슬롯을 알 수 있도록 GRANT 메시지를 통하여 알린다. 즉, 대역폭 할당에 관련된 제어 패킷을 생성하고 관리한다. 이러한 내용을 기반으로 구현된 Buffer 노드에 대한 프로세스 모델의 동작과정은 <그림 9(a)>와 같이 시뮬레이션 시작시 INIT 상태에서 시뮬레이션을 위한 변수들이 초기화되고 이벤트 없이 IDLE 상태로 천이해 또 다른 이벤트를 기다리게 된다. IDLE 상태에서는 OLT의 Receiver 노드에 패킷이 도착하면 패킷 도착 이벤트가 발생하여 FR_RX 상태로 천이된다.

FR_RX 상태는 수신된 패킷을 열어 보고 수신된 패킷이 대역폭을 요구하는 REQUEST 패킷인지 아니면 일반 데이터 패킷 인지를 구분하고 다시 IDLE 상태로 이벤트 없이 천이된다. IDLE 상태로의 천이와 동시에 두 가지 이벤트가 일어날 수 있는데 하나는 수신한 패킷이 ONU의 REQUEST일 때 TX 상태로 천이하기 위한 OAMPACKET_GENERATOR 이벤트이며, 다른 하나는 데이터 패킷을 Sink 노드로 전달하기 위한 이벤트이다. TX 상태에서는 ONU의 타임슬롯 요청에 대해 스케줄링을 통한 GRANT 메시지가 포함된 제어 패킷을 Transmitter 노드에 전달하고 다시 IDLE 상태로 이벤트 없이 천이되어 다음 패킷 도착 이벤트를 기다리게 된다. 이와 같은 방식으로 Buffer 노드의 프로세스 모델은 동작한다.

Sink 노드에 대한 프로세스 모델은 ONU로부터 수신된 데이터 패킷을 분석하고, 시뮬레이션 시스템의 메모리 관리를 위해 분석된 데이터 패킷을 파기하는 역할을

담당한다. 이러한 역할을 하는 Sink 노드에 대한 프로세스 모델의 동작과정은 <그림 9(b)>와 같이 시뮬레이션 시작시 INIT 상태에서 시뮬레이션을 위한 변수들이 초기화되고 WAIT 상태로 이벤트 없이 천이한다.

WAIT 상태에서는 Buffer 노드로부터 Sink 노드에 데이터 패킷이 도착했다는 PK_ARRIVAL 이벤트가 발생했을 때, ANALYSIS 상태로 천이된다. ANALYSIS 상태에서는 시뮬레이션 분석을 위해 도착된 데이터 패킷의 정보(패킷 생성시간, 패킷 크기)를 조사 후에 패킷을 파기하고 다음 패킷도착을 기다리는 WAIT 상태로 무조건 천이해서 다시 PK_ARRIVAL 이벤트를 기다린다. Buffer 노드와 Sink 노드에 대한 프로세스 모델은 위와 같은 과정들을 시뮬레이션이 종료할 때 까지 계속적으로 반복한다.

2. ONU 모델

ONU의 노드 모델은 <그림 10>과 같이 Buffer 노드, Source 노드, Sink 노드, Transmitter 노드, Receiver 노드로 구성된다. <그림 10>은 구현된 ONU의 노드 모델을 보여주고, <표 4>는 구현된 ONU의 노드 모델의 구성과 역할을 설명한다.

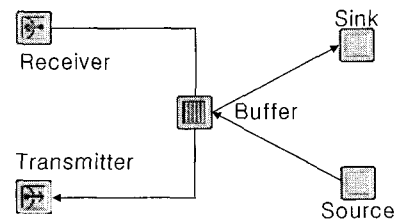


그림 10. ONU 노드 모델
Fig. 10. ONU node model.

ONU의 각 노드 모델 내부에도 OLT와 마찬가지로 프로세스 모델이 존재한다. <그림 11>은 ONU를 구성하는 프로세스 모델들을 보여주고 있다. <그림 11(a)>는 Buffer 노드에 대한 프로세스 모델을 보여주며, 4개의 무조건 상태와 2개의 조건 상태로 구성된다. Buffer 노드에 대한 프로세스 모델은 MAC에 관련된 제어 패킷을 생성하고 관리한다. 또한, Source 노드로부터 받은 패킷을 Transmitter 노드로 전달하고, Receiver 노드로부터 받은 패킷을 Sink 노드로 전달한다. 구현된 Buffer 노드 프로세스 모델의 동작과정은 INIT 상태에서 시뮬레이션을 위한 변수들이 초기화되고 이벤트 없이 IDLE 상태로 천이된다. IDLE 상태는 ONU의 Receiver 노드

표 4. ONU 노드 모델의 구성과 역할
Table 4. Construction and role of ONU nodes.

노드 모델	역 할
Buffer 노드	MAC 프로토콜 포함(대역폭 요구). - 제어 패킷 생성/관리/송·수신 제어/ 큐 관리. 패킷을 Transmitter로 전달. Receiver로부터 받은 패킷을 Sink로 전달.
Source 노드	패킷 생성/큐에 삽입.
Sink 노드	Buffer로부터 패킷 수신. 수신 패킷 분석.
Transmitter 노드	Buffer 노드로부터 받은 패킷을 Link 모델로 전달.
Receiver 노드	Link 모델로 부터 전송된 패킷을 Buffer 노드로 전달.

에 패킷 도착 이벤트가 발생하면 FR_RX 상태로 천이되고 Source 노드에서 발생된 패킷이 Buffer 노드에 전달 되면 FR_SRC 상태로 천이된다. FR_RX 상태에서는 수신된 패킷을 분석하고 다시 IDLE 상태로 이벤트 없이 천이된다. FR_RX 상태에서는 세 가지 이벤트를 발생시킨다. 하나는 수신한 패킷을 파기하기 위해 Sink 노드로 패킷을 전달하는 이벤트와 나머지는 수신한 패킷이 스케줄링 제어 정보일 때, IDLE 상태에서 DATA_TX 상태와 CP_TX 상태로 천이하기 위한 이벤트이다.

DATA_TX 상태는 OLT로부터 할당받은 타임슬롯에 Buffer 노드의 FIFO 방식의 큐에 있는 데이터 패킷을 Transmitter 노드에 전달하고 다시 IDLE 상태로 이벤트 없이 천이된다. CP_TX 상태는 자신의 큐에 있는 패킷의 양에 대한 정보를 제어 패킷으로 만들어서 Transmitter 노드에 전달하고 IDLE 상태로 천이된다. FR_SRC 상태는 전달된 패킷을 Buffer 노드의 큐에 삽입하고 IDLE 상태로 천이된다.

Source 노드에 대한 프로세스 모델은 <그림 11(b)>와 같이 3개의 조건 상태로 구성된다. 구현된 프로세스 모델의 동작과정은 시뮬레이션 시작시 INIT 상태에서 시뮬레이션을 위한 변수들이 초기화되고 START 이벤트의 발생에 의해서 GENERATE 상태로 천이된다. GENERATE 상태에서는 INIT 상태에서 시뮬레이션 사용자가 지정한 트래픽 생성 모델에 따라 패킷을 지속적으로 생성하고 시뮬레이션이 끝날 때 시스템에서 STOP 이벤트가 발생하여 STOP 상태로 천이된다.

<그림 11(c)>는 2개의 무조건 상태와 1개의 조건 상

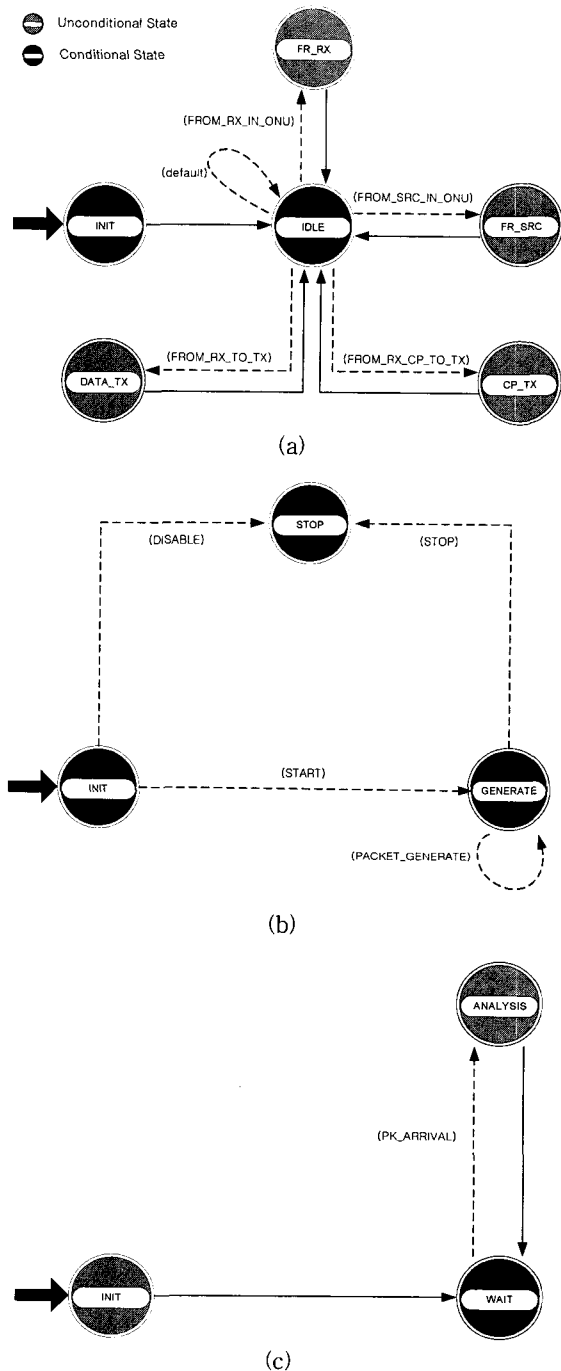


그림 11. ONU의 process 모델: (a) buffer노드에 대한 프로세스 모델, (b) source 노드에 대한 프로세스 모델, (c) sink 노드에 대한 프로세스 모델
Fig. 11. Process models for ONU: (a) process model for buffer node, (b) process model for source node, (c) process model for sink node.

태로 구성된 Sink 노드의 프로세스 모델이다. Sink 노드의 프로세스 모델은 수신된 패킷을 분석하고, 시뮬레이션 모델의 메모리 관리를 위해 분석된 패킷을 파기하는 역할을 담당한다. 프로세스 모델의 동작과정은 OLT의 Sink 노드 프로세스 모델과 같다. ONU의 Buffer 노드, Source 노드, Sink 노드에 대한 프로세스 모델은 이와 같은 과정을 시뮬레이션이 끝날 때 까지 반복한다.

V. 시뮬레이션 및 분석

본 장에서는 Ethernet PON에서 서비스 형태에 따라 적절한 대역폭을 할당해 줄 수 있는 서비스 제공 모델의 기본적인 구성 요소인 고정 할당 방식과 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜을 OPNET을 사용하여 시뮬레이션 한 결과를 기술하고 분석한다. Ethernet PON에서 MAC 프로토콜의 성능을 분석하기 위해서는 다점 대점 구조인 상향스트림에 대한 분석이 이루어져야 한다. 따라서, 5.1절에서는 고정 할당 방식과 동적 할당 방식에서 상향트래픽의 부하(load)변화에 대한 단대단 Ethernet 지연, ONU의 큐잉 지연, 처리량, 사용률을 시뮬레이션 및 결과를 비교 분석하고, 5.2절에서는 구현된 Ethernet PON 시뮬레이션 모델에서 ONU의 버퍼에 OPNET에서 지원하는 FIFO 방식의 무한 큐를 사용해 ONU의 적절한 버퍼 크기를 산출한다.

1. 고정 할당 방식과 동적 할당 방식 성능 분석

이 절에서는 동적 할당 방식과 고정 할당 방식의 시뮬레이션 결과를 비교 분석한다. <표 5>는 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타내고, 식 1은 G. Kramer가 기술한 내용으로 망에서 하나의 노드가 가질 수 있는 최대 부하를 나타낸다^[6]. N은 노드의 수를 나타내고, LinkRate는 망의 속도를 의미한다. 예를들어 <표 5>과 같이 하나의 OLT가 32개의 ONU와 1Gbps 속도의 광섬유로 EFM에서 고려중인 망구조로서 구성될 때, 식 1에 의해 하나의 ONU가 취할 수 있는 상향트래픽의 최대 부하는 31.25(1000Mbps / 32개의 ONU) Mbps가 된다. 상향트래픽으로 사용되는 패킷 발생모델은 인터넷 트래픽 모델의 한 종류로 A.K.Jena가 제시한 모델을 참조해서 패킷의 크기는 IEEE 802.3 프레임의 크기인 64~1518bytes에서 uniform하며, 패킷의 inter-arrival time은 exponential을 사용하였다^[11].

$$Load = \frac{LinkRate}{N} \tag{1}$$

표 5. 시뮬레이션 파라미터
Table 5. Simulation parameters.

파라미터	적용	
LinkRate(대역폭)	1Gbps	
트래픽	packet size	uniform(64, 1518)
	packet inter-arrival time	exponential
ONU 개수	32개	
OLT와 ONU 거리	20km	
타임슬롯	0.00025(sec)	

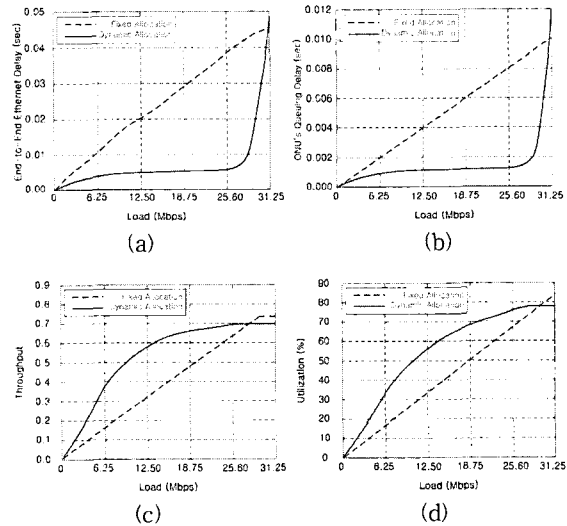


그림 12. 시뮬레이션 결과 : (a) 단대단 Ethernet 지연 분석 결과, (b) 큐잉 지연 분석 결과, (c) 처리량 분석 결과, (d) 사용률 분석 결과
Fig. 12. Simulation results according to load : (a) end-to-end Ethernet delay, (b) queuing delay, (c) throughput, (d) utilization.

<그림 12>은 <표 5>의 시뮬레이션 파라미터를 기반으로 고정 할당 방식과 동적 할당 방식 MAC 프로토콜의 성능분석을 위하여 부하 변화에 따라 단대단 Ethernet 지연, 큐잉 지연, 처리량, 사용률을 OPNET 시뮬레이션 도구를 사용하여 시뮬레이션한 결과이다. <그림 12>의 결과에서 볼 수 있듯이 부하 증가에 따른 고정 할당 방식과 동적 할당 방식의 단대단 Ethernet 지연, 평균 큐잉 지연, 평균 처리량 및 평균 사용률 변화는 최

대부하를 초과하지 않는 범위에서 동적 할당 방식이 우월함을 보였다.

이러한 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 고정 할당 방식에 비해 동적 할당 방식은 최대 부하인 31.25 Mbps를 초과하지 않는 범위에서 부하가 커질수록 시뮬레이션에 대해서 좋은 성능을 나타내었다. 그러나 최대 부하지점에 가까울수록 고정 할당 방식과 동적 할당 방식은 거의 동일한 성능을 보이며, 최대 부하지점에서는 오히려 고정할당이 더 좋은 결과를 나타내었다. 이러한 이유는 각각의 ONU가 최대 부하를 초과할 때는 고정 할당 방식이 고정 할당된 타임슬롯을 낭비하지 않는 반면에 대역폭 할당을 위한 제어 메시지 송·수신이 동적 할당 방식 보다 적게 일어나기 때문이다. 이로 인해 실제 장비업체들은 고정 할당 방식을 선호하고 하는 경우도 있다.

따라서, Ethernet PON 을 구성할 때, LinkRate에 대한 적절한 망의 노드수에 대한 선택이 중요하다. 본 논문에서 구현된 Ethernet PON시뮬레이션 모델은 시뮬레이션 파라미터만을 조작하여 하나의 OLT가 수용할 수 있는 최적의 ONU 개수를 산출 할 수 있으며, 망의 노드 수를 최적화함으로써 망의 효율을 극대화 할 수 있다.

2. 버퍼 크기에 따른 성능 분석

망장비 제작시 버퍼의 크기가 커지거나 버퍼의 수가 증가하면 수용할 수 있는 패킷이 많아져서 망 성능이 좋아지는 것은 당연하다. 그러나 버퍼의 크기가 커지거나 개수가 증가하게 되면 망장비의 가격은 기하적으로 올라간다. 그러므로 망장비 제작시에 적절한 버퍼 크기와 개수를 산정하는 것은 중요하며, 망 장비 설계시 적절한 버퍼크기를 산정함은 효율적인 망장비를 제작할 수 있게 한다. 따라서, 이 절에서는 구현된 Ethernet PON 시뮬레이션 모델에서 ONU의 버퍼에 OPNET에서 지원하는 FIFO 방식의 무한 큐를 사용해 버퍼의 평균 크기를 산정한다.

<표 6>은 ONU의 버퍼 크기를 분석하기 위한 시뮬레이션 파라미터들이다. 5.1절과 마찬가지로 ONU의 개수는 EFM에서 고려 범위인 32개로 하고, OLT와 ONU를 연결하는 광섬유의 전송 대역폭은 1Gbps로 한다. 각각의 ONU에서 발생하는 트래픽은 5.1절에서의 트래픽 모델을 기준으로 균일한 트래픽(31.25Mbps 고정:ONU가 32개일때 최대 트래픽)과 비균일한 트래픽(무작위 트래픽)에 대해 시뮬레이션 했다.

표 6. 시뮬레이션 파라미터
Table 6. Simulation parameters.

파라미터	적용
LinkRate(대역폭)	1Gbps
트래픽	표5 참조
	균일트래픽(최대부하를 계속 발생) 비균일트래픽(무작위 부하를 발생)
ONU 개수	32개
OLT와 ONU 거리	20km
타임슬롯	0.00025(sec)
버퍼 작동	FIFO 방식의 무한 크기의 큐

<그림 13>은 트래픽 변화에 따른 ONU의 평균 버퍼의 크기를 나타낸다. 그래프의 가로축은 시뮬레이션 시간을 나타내고 세로축은 평균 버퍼의 크기를 byte 단위로 표시한다. ONU 개수를 32로 설정한 상태에서 4장의 Source 프로세스 모델에서 생성되는 균일한 트래픽과 비균일 트래픽에 대한 평균 버퍼의 크기를 나타낸다.

<그림 13>의 결과에서 알 수 있듯이, 최대부하로 발생하는 균일한 트래픽에 대해서 평균 1250 bytes 이하의 버퍼 크기를 필요로 하고 패킷이 무작위로 발생하는 비균일 트래픽일 때는 평균 400 bytes 이하의 버퍼 크기를 필요로 하였다. 실제 망에서의 트래픽을 예상하기란 쉽지 않은 일이지만, 이 분석결과는 실제 Ethernet PON을 구성하는 ONU 장비의 버퍼 크기를 예측하여 효율적인 망장비를 설계하는데 참고가 될 수 있으리라 기대된다.

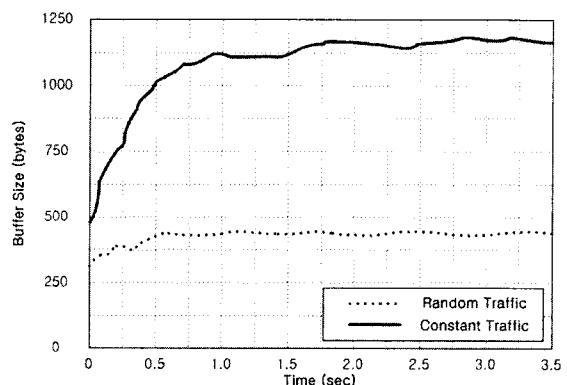


그림 13. 트래픽 따른 버퍼 크기 변화
Fig. 13. ONU buffer size according to type of traffic.

V. Conclusion

단대단 Ethernet은 근래에 연구중인 세계적인 기술 추세이며, Ethernet PON은 이를 위해 연구되고 있는 광 가입자망 기술 중에 하나이다. 본 논문에서는 차세대 가입자망인 Ethernet PON에서 상향트래픽을 제어하고 망의 효율을 높이기 위해, 고정 할당 방식과 동적 할당 방식의 MAC 프로토콜의 성능을 분석하였다.

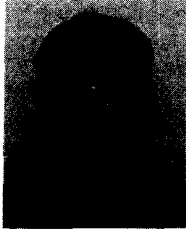
가입자망의 특성이 고려된 Ethernet PON MAC 프로토콜의 성능을 실제 망에 적용하기에 앞서 OPNET 시뮬레이션 도구를 이용하여 그 타당성과 적합성을 실험하였다. 망의 성능 분석을 위해 부하변화에 따른 단대단 Ethernet 지연, 큐잉 지연, 처리량과 사용률 분석을 통해서 OLT가 수용할 수 있는 최적의 ONU 개수를 산정하였다. 그리고 Ethernet PON에서의 트래픽 변화에 따른 ONU가 가져야 할 최적의 버퍼 크기를 OPNET을 이용하여 측정하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 ONU의 버퍼를 설계함에 있어 각종 트래픽과 사용자의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 효율적인 망장비를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구과제로는 ONU와 OLT의 거리가 서로 다르게 배치되어 있는 상태에서 패킷들을 전송하기 위한 배치 프로토콜에 대한 연구가 필요하고 대역폭이 10Gbps 이상일 때에 대한 Ethernet PON의 성능에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

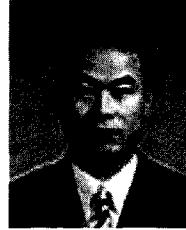
- [1] A. Cook and J. Stern, "Optical fiber access Perspectives toward the 21st century," IEEE Commun. Mag., pp. 78~86, Feb. 1994.
- [2] Y. Takigawa, S. Aoyagi, and E. Maekawa, "ATM based passive double star system offering B-ISDN, N-ISDN, and POTS," Proc. of GLOBECOM'93, pp. 14~18, Nov. 1993.
- [3] S. S. Kang, H. J. Kim, Y. Y. Chun, and M. S. Lee, "An Experimental Field Trial of PON Based Digital CATV Network," IEICE Trans. Commun., Vol. E79-B, No. 7, pp. 904~908, July 1996.
- [4] M. Miyabe, M. Kasa, K. Tajima, T. Shinomiya, and H. Yamahita, "A Study of Dynamic Bandwidth Allocation for ATMPON," IEICE Trans. Commun., Vol. E81-B, No. 12, pp. 2364~2370, Dec. 1998.
- [5] G. Pesavento and M. Kelsey, "PONs for the Broadband Local loop," Lightwave, Vol. 16, No. 10, pp. 68~74, Sep. 1999.
- [6] B. Lung, "PON Architecture Future proof FTTH," Lightwave, Vol. 16, No. 10, pp. 104~107, Sep. 1999.
- [7] G. Kramer and G. Pesavento, "Ethernet Passive Optical Network(EPON): Building a next-Generation Optical Access Network," IEEE Commun. Mag., pp. 66~73, Feb. 2002.
- [8] G. Kramer B. Mukherjee, and G. Pesavento, "Ethernet PON(EPON): Design and Analysis of an Optical Access Network," Photo. Net. Commun., Vol. 3, No. 3, pp. 307~319, July 2001.
- [9] S. W. Jung, Y. S. Chang, J. H. Eom, and S. H. Kim, "Design and Implementation of Dynamic TDMA MAC Protocol for Ethernet PON Using OPNET," OECC, pp. 208~209, July 2002.
- [10] S. W. Yoon, Y. S. Jang, J. H. Eom and S. H. Kim, "Study of ONU buffer Size for Ethernet PON Using OPNET Simulation Tool," OECC, pp. 210~211, July 2002.
- [11] M. Miyabe, M. Kasa, K. Tajima, T. Shinomiya, and H. Yamashita, "A Study of Dynamic Bandwidth Allocations for ATM-PON," IEICE Trans. Commun., Vol. E81-B, No. 12, pp. 2364~2370, Dec. 1998.
- [12] G. Kramer and B. Mukherjee, "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet Passive Optical Network (EPON)," IEEE Commun., Mag., pp. 74~80, Feb. 2002.
- [13] ITU-T Recommendation G.983.1, "Broadband Optical Access Systems Based on PON," Geneva, Oct. 1998.
- [14] A. K. Jena, A. Popescu, and P. Prothi, "Modeling and Analysis of HTTP Traffic", Proc. 13th ITC Specialist Seminar, 2000.

저 자 소 개



嚴鍾勛(正會員)

1986년 : 경북대학교 전자공학과(공학사). 1992년 : 경북대학교 컴퓨터공학과(공학석사). 1996년 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사과정 수료. 1993년 4월~1998년 2월 : KT 연구개발본부에서 “요금 시스템”, “과금 수집 시스템”, “ISDN 공중전화기” 개발, 1998년 2월~현재 : KT 기술연구소에서 “Optical Ethernet”, “Metro Ethernet”, “NGN 망구조” 연구. <주관심분야 : Metro Ethernet, Ethernet PON, WDM PON, NGN>



金昇浩(正會員)

1981년 : 경북대학교 전자공학과(공학사). 1983년 : 한국과학기술원 전산학과(공학석사). 1994년 : 한국과학기술원 전산학과(공학박사). 1985년~현재 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수. <주관심분야 : 알고리즘 설계, 멀티미디어 응용, 멀티미디어 통신>



張容碩(正會員)

1999년 : 부산외국어대학교 컴퓨터공학과(공학사). 2001년 : 경북대학교 컴퓨터공학과(공학석사). 2003년 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사과정 수료 <주관심분야 : Metro Ethernet, Ethernet PON, WDM PON >