

GPON에서 동적 대역할당 방안의 지연성능 분석

정회원 박 철 근*, 종신회원 정 해**, 정회원 김 진 희***

Delay Performance Analysis of a Dynamic Bandwidth Allocation Scheme in a GPON

Chul Geun Park* *Regular Member*, Hae Chung** *Lifelong Member*

Jin Hee Kim*** *Regular Member*

요 약

최근 인터넷을 기반으로 하는 응용프로그램과 인터넷 사용자들의 급격한 증가에 부응해 가입자 루프의 고속화 방안으로 여러 가지 PON 방식이 도입되고 있다. GPON은 이러한 PON 방식중 대표적인 접속망 기술로 상향 트래픽의 효율적인 전송을 위해 DBA 방안을 채택하고 있다. 본 논문에서는 GPON에서 동적대역 할당방안의 지연 성능을 분석하기 위해 2단계 버퍼를 갖는 개찰 폴링 시스템을 도입한다. 평균 사이클 타임을 유도하고 패킷의 평균 지연 시간을 구하기 위해 연속시간 큐잉 모델을 사용한다. 수치해석 결과를 이용하여 대칭형 폴링 시스템에 대한 지연 성능을 조사한다.

Key Words : GPON, DBA, 큐잉모델, 성능분석, 패킷지연

ABSTRACT

In recent year, several types of PON(Passive Optical Networks) have been adopted into the subscriber loops for the high speed subscriber lines to meet the needs of some applications based on the Internet and the rapid increase of the Internet users. GPON(Gigabit PON) is a typical access network technology of these PONs which adopt the DBA(Dynamic bandwidth Allocation) scheme in order to transmit upstream traffic efficiently. In this paper, we introduce the gated polling system with a two-stage queue in order to analyze the delay performance of the DBA scheme in a GPON. We use a continuous time queueing model for deriving the mean cycle time and for obtaining the mean packet delay. We give some numerical results to investigate the delay performance for the symmetric polling system with statistically identical stations.

I. 서 론

가입자망은 역사가 오래된 음성 서비스에서 시작하여 PC 통신을 통한 최초의 데이터 서비스 그리고 xDSL 기술의 도입으로 고속 인터넷 서비스가 시작되었다. 최근 인터넷을 기반으로 하는 고속 응용프로그램의 증가와 인터넷 사용 가입자들의 급격한 증가로 인해 요구되는 서비스 품질과 요청되는 대

역폭을 제공하기 위해 FTTH(Fiber To The Home)가 논의되면서 PON(Passive Optical Network) 방식이 도입되었다. 이러한 PON 방식을 채택한 가입자망 기술에는 EPON (Ethernet PON), APON (ATM PON), WPON (WDM PON) 및 GPON (Gigabit PON) 등이 있다. PON 시스템은 광 분배 망에서 광 스플리터(splitter)라는 수동 광소자를 사용하여 전체적인 광선로를 줄이고, 신뢰성이 높고 저렴한

※ 본 연구는 (주) KT 인프라연구소의 학술용역과제(2007년)의 지원으로 수행되었습니다.

* 선문대학교 정보통신공학부 (cgpark@sunmoon.ac.kr), ** 금오공과대학교 전자공학부, *** KT 인프라 연구소
논문번호 : KICS2008-04-160, 접수일자 : 2008년 4월 10일, 최종논문접수일자 : 2008년 8월 22일

가입자 접속망을 구축할 수 있다^[1].

PON 기술의 2가지 기본 형태는 APON과 EPON이다. APON은 FSAN(full-service access network) 연구그룹의 작업으로 1990년대 중반에 개발되었는데 당시 프로토콜과 물리적 설비의 2가지 선택사항은 ATM과 PON이었다^[2]. EPON의 개발은 APON이 비디오 전달 능력이 없으며 불충분한 대역으로 인해 가입자 루프에서는 부적절하다고 생각하여 2000년 후반 EFM(Ethernet in the First Mile) 연구그룹에서 시작되었다. 이 연구그룹은 액세스 장비에 입증되고 널리 사용되는 이더넷 망연동 프로토콜을 채택하는 표준을 개발하는데 목적을 두었다. 이러한 EFM에 자극을 받은 FSAN은 2001년 1.2G 이상 속도와 다중 서비스 전송을 지원하면서 운용과 유지보수 기능이 강화된 새로운 가입자망 접속 프로토콜인 GPON의 표준화를 시작했다^[3].

GPON에서는 다른 PON과 마찬가지로 상향 대역폭을 보다 효율적으로 사용하기 위해 동적대역 할당(DBA:Dynamic Bandwidth Allocation) 방안을 사용하며 크게 2가지 방안을 권고하고 있다. 첫째는 ONU(Optical Network Unit)들이 자신의 상태정보를 제공하지 않고 OLT(Optical Line Terminal)가 ONU의 전송량을 감시하여 할당 대역을 조절한다. 둘째는 ONU들이 상태정보를 보고하는데 PLOu(Physical Layer Overhead upstream)의 지시필드를 사용하거나 피기백 방식으로 DBRu(Dynamic Bandwidth Report upstream)를 사용하여 T-CONT(Transmission Container)에 정보를 보내거나 상향 데이터 유류부하에 T-CONT 정보를 실어보내는 방법 등이 있다^[4].

본 논문에서는 GPON에서 DBA 방안의 성능분석을 위해 2단계 버퍼 구조를 갖는 대칭적 폴링 시스템의 해석적 분석을 통해 이더넷 패킷의 지연성능을 분석한다. 제 II절 시스템 모델에서는 GPON의 DBA 방안을 논하고 제 III절에서는 DBA 방안의 해석적 성능분석 방안을 논한다. 제 IV절에서는 지연성능 분석의 결과를 시각적으로 이해하기 위해 수치계산 결과를 보여준다. 끝으로 제 V절에서는 추후 연구내용과 결론을 언급하기로 한다.

II. 시스템 모델

본 절에서는 OLT와 N 개의 T-CONT들로 구성된 GPON 접속망을 고려한다. 기간망에서 하향 채널을

통해 가입자 측에 전송되는 하향 프레임은 모든 ONU로 방송되는 형태이므로 정교한 매체 접근제어는 요구되지 않는다. 그러나 사용자측의 정보를 전송하기 위한 상향 채널은 다수의 가입자로부터의 데이터가 하나의 OLT로 충돌 없이 다중화 되어야 하므로 상향 채널의 안정적 액세스를 위한 MAC 프로토콜이 요구된다^[5].

각 ONU의 전송대역을 정하는 방식에는 정적으로 정하는 방식과 상향대역을 보다 효율적으로 사용하기 위해 동적으로 DBA를 이용하여 정하는 방식이 있을 수 있다. DBA 방식은 다양한 특성을 갖는 트래픽 클래스들을 수용하기 위해, T-CONT 별로 큐(queue)를 만들 수 있고, 각 큐는 구분할 수 있도록 Alloc-ID를 갖는다. 그리고 각 T-CONT는 여러 가지 구별되는 트래픽 클래스 별 우선순위 큐들을 둘 수 있다.

DBA는 단일 GPON 시스템의 성능에 큰 영향을 주므로, 다양하고 적절한 요소들이 설계에 반영되어야 한다. 시스템의 효율성과 제어 복잡도 사이에서 협상점(trade-off) 등을 고려하여 구현해야 한다. 또한 상향 채널에서 다중화되는 트래픽의 전송지연 및 지연변이를 최소화하고, 다양한 서비스 품질이 요구되는 다중 서비스 접속을 지원하기 위해 각 T-CONT 별로 요구되는 특성에 따른 품질을 보장할 수 있도록 설계되어야 한다. 대역을 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 가능하다면 OLT 제어 하에서 OLT 스케줄링(inter-TCONT scheduling)과 ONU 제어 하에서 각 T-CONT 내부의 트래픽 클래스 별 우선순위제어(intra-TCONT scheduling)가 고려되어야 할 것이다^[6].

각 T-CONT는 우선순위 클래스 1개(제 1형, 2형 및 4형 T-CONT일 경우)와 2개(제 3형 T-CONT일 경우) 또는 4개(제 5형 T-CONT일 경우)를 지원하는 각각 1개 및 2개 또는 4개의 우선순위 큐를 갖는데 트래픽 클래스 P1(고정율 서비스)은 가장 높은 우선순위를, 클래스 P4(best effort)는 가장 낮은 우선순위를 나타낸다고 하자. 패킷이 한 사용자로부터 수신되면, T-CONT는 그것의 유형을 구분하여 대응되는 큐에 위치시킨다. 각 T-CONT에 있는 큐들은 공통메모리를 공유한다. T-CONT는 타임슬롯 도중에 사용자로부터 도착하는 모든 패킷을 해당 큐에 저장한다. 전송 타임슬롯이 도착하면 T-CONT는 낮은 순위 큐를 서비스 하기 전에 높은 순위 큐가 빌 때까지 먼저 서비스한다.

본 논문에서는 제한 서비스 방식을 사용하는데, OLT는 T-CONT가 이전 보고(report) 메시지를 통해 요구한 것과 동일한 크기의 전송슬롯을 할당한다. 그리고 미리 정해진 최대 슬롯크기 $W_{MAX}^{(k)}$ 를 넘지 않게 최대크기를 한정하여 T-CONT가 대역을 독점하는 것을 피하게 한다. 이 방식은 T-CONT들 간에 공평성을 유지하면서 대역을 효율적으로 공유하는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

DBA 보고 메시지는 Alloc-ID의 대응 T-CONT 버퍼에 전송대기 중인 데이터양을 보고하기 위해 1, 2 또는 4바이트를 사용하여 3가지 모드로 운용된다. 첫째, 모드 0 기반은 단일 필드로 개별 클래스의 T-CONT 버퍼에 있는 데이터 총량을 보고한다. 둘째, 모드 1 기반은 제 3유형과 5유형의 T-CONT에 적합하며 2개의 필드를 사용한다. 셋째, 모드 2 기반은 제 5유형의 T-CONT에 적합하며 4개의 필드를 사용한다. 본 논문에서는 모드 0 기반 T-CONT 갖는 GPON의 DBA를 다루기로 한다⁴⁾.

분석의 편의를 위해 각 T-CONT가 해당 클래스 트래픽을 저장하기 위한 물리적 큐(physical queue)와 패킷들을 전송하기 위한 논리적 버퍼(logical buffer)를 갖는 것으로 가정한다(그림 1). 물리적 큐와 논리적 전송버퍼는 둘 다 선입선출(FIFO) 체제이다. OLT로부터 승인(grant)이 도착하면 논리적인 전송버퍼에서 패킷이 OLT로 전송되고 버퍼가 비워진다. T-CONT는 논리적 전송버퍼의 끝에서 OLT에게 보고 메시지를 통하여 논리적 전송버퍼의 점유량(다음 사이클에서 대응해서 할당되는 허용대역을 얻기 위해)을 보고한다. 논리적 전송버퍼의 크기는 정확하게 바이트로 만들 수 있어 T-CONT는 결코 $W_{MAX}^{(k)}$ 보다 큰 슬롯을 요구할 수 없다.

모드 0 기반으로 한 전달 제어 구조에서는 하나의 ONU가 세 유형의 T-CONTs를 구성하며, 트래픽 클래스 별로 독립적인 T-CONT를 갖는다. 그리

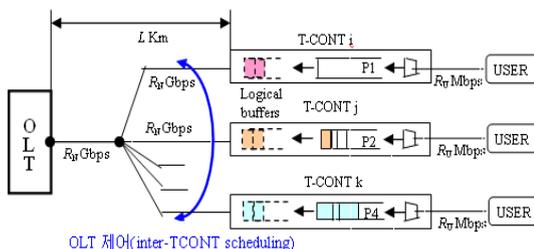


그림 1. 모드 0 기반 DBA의 전달제어 구조

고 여기서 클래스 P3(비보장 서비스) 트래픽에 대응하는 T-CONT는 없는 것으로 가정한다. 이 같은 경우 트래픽 클래스들의 우선순위 제어는 OLT 제어 하의 T-CONT간(inter-T-CONT) 스케줄링을 따를 것이다. OLT는 클래스 P1(고정률 서비스) 트래픽에 대응하는 T-CONT_i로부터 할당을 요청 받은 대역폭과 클래스 P2(보장 서비스) 트래픽에 대응하는 T-CONT_j로부터 할당을 요청 받은 대역폭은 반드시 허용해야 한다. 그러므로 P1과 P2 트래의 지연은 최대 한 사이클 타임을 넘지 않는다.

이제부터 클래스 P4 트래픽의 지연에 주목하자. 클래스 P4 트래픽에 대응하는 T-CONT_k의 허용 최소대역은 간단히 $W_{MIN}^{(k)}=0$ 으로 둘 수도 있으며, C를 한 사이클 타임이라고 할 때, $W_{MAX}^{(k)}$ 는 식 $C=N(G+\sum W_{MAX}^{(k)}/R_N)\leq C_{MAX}$ 을 만족하도록 결정되어야 한다. 여기서 C_{MAX} 는 최대 사이클 시간, R_N 은 GPON의 회선속도, G는 G_B+P_B+24 바이트 시간을 나타내며, 인접 T-CONT간 보호대역 G_B 와 한 프레임 내 선행자의 길이 P_B 는 모든 T-CONT에 대해 동일한 값을 갖는다고 가정한다.

III. 해석적 성능 분석

3.1 최대 사이클 타임의 유도

그림 2는 사이클 타임을 결정하기 위해 요청, 승인, 데이터 전송 절차를 보여준다. T_{eqd} 를 등화왕복 지연, T_d 를 등화지연, T_{pd} 를 전파지연이라 두자. 그림에서 등화왕복지연이란 OLT가 승인을 보낸 직후부터 승인을 수신한 ONU가 보낸 데이터가 OLT에 도착하는 데까지 걸리는 시간을 의미한다. OLT와 각각의 ONU들 간의 거리가 다르다 할지라도 거리 보정(ranging) 절차를 통해 멀리 있는 ONU의 등화지연은 작은 값을 갖게 하고 가까이 있는 ONU의 등화지연은 큰 값을 제공함으로써 등화왕복지연을 일정하게 할 수 있다.

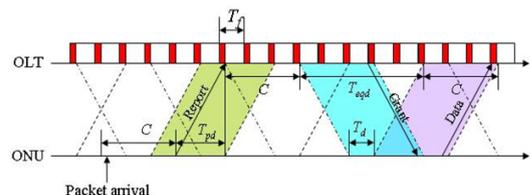


그림 2. 사이클 시간과 메시지 전송절차

최대 사이클 타임을 유도하기 위하여 어떤 ONU에 실시간 데이터가 도착하였다고 하자. 실시간 데이터는 반드시 요청된 주기에서 스케줄링을 제공한다고 가정한다. 데이터가 큐에 도착하기 직전에 정보 보고 메시지가 출발하였기 때문에 한 사이클 타임에 해당하는 시간을 기다려야 한다. 다음 사이클 타임에서 큐의 정보가 실려 가고 전파지연을 겪은 후에 OLT에 도착하게 된다. OLT에 도착하였으나 최악의 경우 자신이 스케줄링 되기까지 다시 한 사이클 타임을 기다려야 한다. 왜냐하면 OLT는 다른 ONU가 보내는 보고 메시지와 한꺼번에 모아서 스케줄링 하고 스케줄링을 하는데 필요한 처리시간이 있기 때문이다.

스케줄링을 완료한 OLT는 상향흐름 대역 맵(US BW map)을 통해 승인하게 되면 승인을 제공받은 직후 데이터가 도착하는데 등화왕복지연이라는 시간이 경과하게 된다. 만약 OLT가 승인을 제공하는데 있어서 해당 ONU를 맨 마지막 데이터를 보내도록 스케줄링 하였다면 또 한 번의 사이클 타임을 겪게 된다. 결국 최악의 경우 겪을 수 있는 지연은 다음과 같다.

$$T_{\max} = 3C + T_{pd} + T_{eqd} \quad (1)$$

음성과 같은 실시간 데이터는 한 노드에서 왕복지연이 20ms 이상이 소요되면 에코제거기를 필요로 하며 이를 방지하기 위해서 한 노드에서는 2ms 이하의 지연이 요구된다. 따라서 $T_{\max} \leq 2\text{ms}(16T_f)$ 로 제한하는 것이 타당하다. 그러므로 사이클 타임 C 는 다음 식으로 제한된다.

$$C \leq T_{\max} \leq \frac{1}{3}(16T_f - T_{pd} - T_{eqd}) \quad (2)$$

이 결과를 갖고 사이클 타임의 범위를 결정하기로 한다. 어떠한 상황에서도 한 사이클 타임이 T_f 이하가 되는 것은 의미가 없다. 왜냐하면 하향 프레임의 구조에서 살펴보았듯이 승인은 상향흐름 대역 맵을 통해서 이루어지며 사이클 타임은 모든 ONU에게 최소한 한번 씩 승인을 제공해 줄 수 있는 기간을 의미하므로 이것은 한 프레임 이하로 구현할 수 없다. 만약 모든 ONU들이 20Km 이내에 있다면 최대 전파지연은 $100\mu\text{s}(0.8T_f)$ 이고 등화왕복지연은 $250\mu\text{s}(2T_f)$ 가 된다. ONU들의 거리가 60Km 이내에 있다면, 최대 전파지연은 $300\mu\text{s}(2.4T_f)$ 이고 등화왕복지연은 $650\mu\text{s}(5.2T_f)$ 가 된다. 이러한 사실에 입각하여 사이클 타임의 범위는 아래와 같다.

$$T_f \leq C \leq aT_f, \quad (3)$$

여기서 상수 a 는 20Km 범위에 대응하여 $a=4.4$ 이고 60Km 범위에 대응하여 $a=2.8$ 을 얻는다.

3.2 모드 0 기반 DBA를 위한 큐잉 모델

그림 1의 모드 0기반 GPON의 동적 대역 할당 제어 구조를 고려하며 해석적으로 성능을 분석하기 위해 간단한 큐잉 모델을 생각하자. 모드 0기반 GPON DBA 방안의 성능을 분석하기 위해 개찰 폴링 시스템(gated polling system)에 대한 연속시간 큐잉 모델을 이용하기로 한다. 분석의 편의를 위해 다음 몇 가지 사항을 가정한다.

- 1) 클래스 P1과 클래스 P2 트래픽은 OLT 제어(T-CONT 간 스케줄링)와 사용자 대역요청에 의해 우선순위에 따라 할당되어야 할 대역폭을 가지며 OLT가 사전에 인지하고 있음을 가정한다.
- 2) OLT 제어하의 연결수락제어(CAC)나 사용자 서비스 수준협상(SLA)에 의해 모든 T-CONTs의 클래스 P1과 P2는 하나의 최대 사이클 시간 C_{MAX} 동안 대역할당이 보장된다.
- 3) 모드 0기반 전달 제어 구조에서는 클래스 P3 트래픽은 P2나 P4에 속하는 트래픽으로 가정한다.
- 4) 폴링 시스템의 적용 시 유효 사이클 시간(C)은 식 $T_f \leq C \leq C_{MAX}$ 을 만족한다.
- 5) 같은 트래픽 클래스에 속하는 대응 T-CONT에 입력율은 동일하다.

이상으로부터 우리가 고려하는 GPON의 DBA는 제한된 개찰(limited and gated) 폴링 시스템에 해당한다. $C_k, k=1,2,4$ 를 한 유효 사이클 동안 트래픽 클래스 P_k 를 서비스하는 시간이라 하자. 클래스 P1과 P2에 해당하는 트래픽은 C_{MAX} 내에서 우선순위에 따라 먼저 해당 T-CONTs에 요청대역폭을 할당한다. 여분의 대역 $C_{MAX} - (C_1 + C_2)$ 한도에서 클래스 P4에 할당하게 되고 이 사이클 내 대응시간은 C_4 가 된다. 이렇게 하여 우리가 고려하는 폴링 시스템은 P4 클래스에 해당하는 T-CONTs만으로 구성되어 있다고 생각해도 무방하다.

개찰 서비스에서는 OLT로부터 승인 명령이 해당 T-CONT에 도착할 때 T-CONT의 물리적 대기큐에 있는 문이 닫히고, 논리적 전송 버퍼에 있는 패킷들

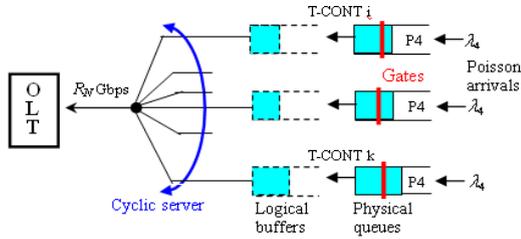


그림 3. 모드 0기반 DBA를 위한 개찰폴링모델

만을 전송한다. 이와 동시에 물리적 대기큐의 개찰 이전 패킷들은 다음 사이클의 전송을 위해 논리적 전송 버퍼에 채워진다. 그림 3은 클래스 P4에 대응하는 T-CONTs로 구성된 동적 대역할당 방안의 해석적 성능 분석을 위한 2단계 버퍼를 갖는 개찰 폴링 시스템의 큐잉 모델을 나타낸다.

큐잉 모델의 분석을 위해 패킷은 각 T-CONT_{*i*} (*i*=1,2,...,*N*₄)에 도착을 λ₄를 갖고 포아송 과정에 따라 도착한다고 하자. 여기서 *N*₄는 한 OLT에 연결된 트래픽 클래스 P4에 대응하는 T-CONTs의 수를 나타낸다. T-CONT_{*i*}에 도착하는 패킷들의 길이는 일반분포(*general distribution*)를 따르고 각각은 독립이고 같은 분포를 갖는다고 한다. 이렇게 하여 고려하는 개찰 폴링 시스템은 대칭형(*symmetric*)이다. 인접 T-CONT간 전환 시간(*switchover time*)도 독립이고 같은 분포를 따른다고 하자. 시스템의 안정화 조건을 위해 위에 정의된 기호들을 사용하여 ρ=ρ₁+ρ₂+ρ₄<1을 가정한다. 여기서 ρ_{*k*} (*k*=1, 2, 4)는 GPON 시스템에 부과되는 클래스별 트래픽 강도이고 ρ_{*k*}=*N*_{*k*}λ_{*k*}*b*_{*k*}인데, 클래스 *P*_{*k*}에 대응하여 *N*_{*k*}는 T-CONTs의 수, λ_{*k*}는 입력률, *b*_{*k*}는 패킷의 평균길이를 나타낸다.

이제 의사 보존(*pseudo conservation*) 법칙을 이용하여 버퍼의 길이에 대한 확률생성함수(*PGF: probability generation function*)를 구하기로 하자. 큐잉 모델의 관례적인 분석방법에 따라, T-CONT_{*i*}에 승인 명령이 도착한 직전을 관측점(*embedded point*)으로 한다. T-CONT_{*i*}는 패킷을 전송하기 전에 전환 시간을 갖는다. 전환시간이 끝나는 시점 직후에 물리적 대기 큐의 문은 닫히고 논리적 전송버퍼에 있는 모든 패킷은 전송된다. 이 전송버퍼가 완전히 비워지면 물리적 큐에 있는 문안의 모든 패킷들은 다음 사이클의 전송을 위해 논리적 전송버퍼로 나아가고 동시에 다음 사이클의 대역폭 요청을 위해서 보고 메시지를 전송 끝에 덧붙여 OLT로 보낸다.

분석으로 돌아와서, 평형상태(*steady state*)에서 평균 *E*[*C*₄]는 다음 식으로 쉽게 얻을 수 있다.

$$E[C_4] = \frac{N_4 r}{1 - \rho_4} - E[C_1] - E[C_2], \quad (4)$$

여기서 *r*은 전환시간의 확률변수 *R*의 평균이고 *R*은 한 사이클 동안 두 인접 T-CONT간 보호대역(*G*)들의 합과 한 사이클 동안 도착한 클래스 P1 트래픽과 P2 트래픽을 서비스하는 시간을 포함한다. 그리고 *E*[*W*₄]를 클래스 P4 트래픽의 서비스(패킷 전송) 시간을 제외한 임의의 패킷의 평균지연이라고 하자. 의사 보존법칙에 의해 다음 식을 얻는다.

$$\rho_4 E[W_4] + \frac{\rho_4 b_4^{(2)}}{2b_4} = \frac{\rho_4 b_4^{(2)}}{2b_4(1 - \rho_4)} + E[US], \quad (5)$$

여기서 *E*[*US*]는 임의의 시점에 전환 도중 평균 미완 작업량(*unfinished work*)을 의미하고 *b*₄와 *b*₄⁽²⁾는 패킷길이의 평균과 2차 모멘트이다. *E*[*US*]을 구하면 최종적으로 패킷의 평균지연 *E*[*W*₄]를 얻을 수 있다. 한편 참고문헌 [7]에서와 같은 방법으로 의사 보존법칙으로부터 다음 식을 얻는다.

$$E[US] = b_4 \left[\frac{\lambda_4 r N_4 (3N_4 + 2\rho_4 - 1)}{2(1 - \rho_4)} + \frac{N_4 \lambda_4 r^{(2)}}{2r} \right] \quad (6)$$

식 (6)을 (5)에 대입하면 구하려는 클래스 P4 패킷의 평균 지연은 다음 식으로 주어진다.

$$E[W_4] = \frac{\rho_4}{1 - \rho_4} \frac{b_4^{(2)}}{2b_4} + \frac{r(3N_4 + 2\rho_4 - 1)}{2(1 - \rho_4)} + \frac{r^{(2)}}{2r} \quad (7)$$

끝으로 Little의 공식으로부터 임의 순간 논리적 전송버퍼와 물리적 대기 큐에 있는 클래스 P4 패킷의 평균수 *E*[*L*₄]는 다음과 같다.

$$E[L_4] = \lambda_4 (E[W_4] + b_4) \quad (8)$$

3.3 전환 시간(*switchover time*)의 계산

앞에서 언급했듯이 클래스 P1 트래픽과 P2 트래픽은 대역할당이 보장되어야 하므로 이들 두 클래스 트래픽의 지연은 기껏해야 한 사이클 타임을 넘지 않는다. 그러므로 클래스 P4 트래픽의 지연을 구체적으로 구하는 문제로 압축된다. 전환시간의 확률변수 *R*을 구하면, P4 트래픽의 대기 지연은 식 (7)을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

본 논문에서는 계산을 간단하게 하기 위해 ONU에서 OLT로 상향링크의 전송속도는 1.244Gbps를 가정한다. 클래스 P1트래픽은 가입자의 E1 또는 T1

한 포트로부터 한 프레임 타임($T_f=125\mu s$) 동안 패킷 길이 64바이트씩 고정적으로 해당 T-CONT에 도착한다고 가정한다. 클래스 P2트래픽과 P4트래픽은 둘 다 5종류의 패킷 크기를 갖고 포아송 과정으로 해당 T-CONT에 도착한다고 가정하자^[7]. 각각의 포아송 입력과정의 도착률은 앞서 정의되었듯이 λ_2 와 λ_4 를 갖는다.

한편 상업용 가입자 그룹은 크기에 따라 E1/T1 포트를 1, 2 또는 4개까지 시설해 있다고 가정하고 주거용 가입자는 E1/T1 포트와 관계없는 것으로 하자. 상업용 가입자에 대한 주거용 가입자의 비율 β_0 라 하고 주거용 가입자에 대한 상업용 가입자의 비율 β_0 라 하자. 그리고 β_0 내에서 E1/T1 포트가 i 개일 상대적 비율을 $\beta_i, (i=1,2,3,4)$ 라 두자.

이상과 같은 가정 하에서 클래스 P1 트래픽에 대한 입력 특성의 정량화를 위해 $\alpha_i, (i=0,1,2,3,4)$ 를 어떤 T-CONT에 수용되는 E1/T1 포트수가 i 개일 확률이라 하자. 그러면 이들 α_i 들은 β_i 들로부터 쉽게 얻을 수 있고, 이것으로부터 P1 트래픽의 입력률 λ_1 도 쉽게 구할 수 있다. 구체적이며 정량적인 예를 든 <표 1>로부터 우리가 정의한 기호들 $\alpha_i, (i=0,1,2,3,4)$ 를 $\beta_i, (i=1,2,3,4,5)$ 로 공식화 하면, $\beta_0=1$ 로 정규화해서 다음 확률 식들을 얻는다.

$$\alpha_0 = \frac{\beta_0}{1+\beta_0}, \alpha_i = \frac{\beta_i}{(1+\beta_0)(\beta_1+\beta_2+\beta_4)} \quad (9)$$

이제 각 클래스 트래픽의 서비스 시간을 구하기 위해 5종류의 패킷 크기에 대한 서비스 시간을 오름차순으로 $s_i, (i=1,2,3,4,5)$ 라 두자. 한 사이클 C 동안 한 T-CONT에 도착한 클래스 P1 트래픽의 서비스 시간에 대한 확률변수 R_1 의 평균과 2차 모멘트는 다음과 같다.

표 1. 확률 α_i 들의 구체적인 예

가입자 유형	주거 β_0	상용: $\beta_0(\beta_1:\beta_2:\beta_3:\beta_4)$				
		β_0	$(\beta_1:\beta_2:\beta_3:\beta_4)=(4:2:0:1)$ 에서 차례로 $\alpha_i, (i=0,1,2,4)$			
1형	10	1	70/77,	4/77,	2/77,	1/77
2형	5	1	35/42,	4/42,	2/42,	1/42
3형	1	1	7/14,	4/14,	2/14	1/14
4형	1	5	7/42,	20/42,	10/42,	5/42
5형	1	10	7/77,	40/77,	20/77,	10/77

[주] $\alpha_i, (i=0,1,2,4)$ 는 한 T-CONT에 수용되는 E1/T1 포트수가 i 개일 확률이고 $\beta_3=0$ 를 가정

$$r_1 = as_1 \sum_{i=1}^4 i\alpha_i, r_1^{(2)} = (as_1)^2 \sum_{i=1}^4 i^2 \alpha_i, \quad (10)$$

여기서 상수 a 는 식 $C=aT_f, 1 \leq a \leq 4.4$ 를 만족한다. 클래스 P2 트래픽은 포아송 과정으로 비율 λ_2 를 갖고 해당 T-CONT에 도착하는 것으로 가정했으므로 한 사이클 C 동안 도착한 패킷 수의 평균은 $\lambda_2 C$ 가 된다. 한편 클래스 P2와 P4 패킷의 서비스 시간을 일반화하기 위해 $\nu_i, (i=1,2,3,4,5)$ 를 5종류의 패킷 길이의 확률분포라 하자. $s_i, (i=1,2,3, 4,5)$ 의 정의와 클래스 P2 패킷의 평균 서비스 시간 b_2 로부터 한 사이클 C 동안 한 T-CONT에 도착한 클래스 P2 트래픽의 서비스 시간에 대한 확률변수 R_2 의 평균은 다음과 같다.

$$r_2 = \lambda_2 C b_2 = \lambda_2 C \sum_{i=1}^5 \nu_i s_i \quad (11)$$

이제 한 사이클 C 동안 한 T-CONT에 도착한 클래스 P2 트래픽의 서비스 시간의 2차 모멘트를 구하기 위해 $A_i, (i=1,2,3,4,5)$ 를 한 사이클 동안 도착한 패킷 유형들의 총 서비스 시간이라 하자. 그러면 $E[(\sum A_i)^2]$ 과 식 (11)을 이용하여 다음 식을 얻는다.

$$r_2^{(2)} = \lambda_2 C \left[(1+\lambda_2 C b_2) b_2^{(2)} + 2\lambda_2 C \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^5 s_i s_j \nu_i \nu_j \right] \quad (12)$$

마지막으로 전환시간의 평균과 2차 모멘트를 구하기 위해 두 인접 T-CONT간 보호대역 시간을 확률변수 G 라 하면, G 는 상수변수이다. 그리고 앞서 정의한 확률변수 R_1 과 R_2 를 이용하면 전환시간을 나타내는 확률변수 R 은 다음과 같다.

$$R = 3G + R_1 + R_2 \quad (13)$$

이렇게 하여 전환시간 R 의 평균은 식(12)를 이용하여 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$r = 3E[G] + \left(\frac{C}{T_f} \right) s_1 \sum_{i=1}^4 i\alpha_i + \lambda_2 C \sum_{i=1}^5 \nu_i s_i \quad (14)$$

이제 전환시간의 2차 모멘트를 구하자. 식 (13)의 양변을 제곱하고 평균을 취하면 다음 식을 얻는다.

$$E[R^2] = 9E[G^2] + r_1^{(2)} + r_2^{(2)} + 6E[G](r_1 + r_2) + 2r_1 r_2 \quad (15)$$

위식에 식 (10), (11) 및 (12)를 대입하여 전환시간 R 의 2차 모멘트 $r^{(2)}$ 는 쉽게 얻을 수 있다.

IV. 수치해석 결과

이절에서는 위 계산된 수식들로부터 수치계산 결과 그림을 이용하여 우리가 분석하고자 하는 GPON의 DBA에 대한 대칭적 폴링 모델의 성능을 분석하기로 한다. 우리가 가정한 5종류의 패킷 크기는 64바이트 (50%), 300바이트 (5%), 588바이트 (15%), 1300바이트 (5%) 및 1518바이트 (15%)로 구성된다 고 하자¹⁷⁾. 이로부터, 클래스 P2와 P4의 패킷 서비스 시간은 $s_1=0.4116$, $s_2=1.9293$, $s_3=3.7814$, $s_4=8.3601$ 및 $s_5=9.7621\mu s$ 이고, 패킷길이 분포는 $\nu_1=0.5$, $\nu_2=0.05$, $\nu_3=0.15$, $\nu_4=0.05$ 그리고 $\nu_5=0.25$ 가 된다. 그러므로 $b_2=b_4=3.7280$ 이 되고 $b_2^{(2)}=b_4^{(2)}=29.7346$ 이 된다.

모든 ONU가 각 클래스에 대응하는 T-CONT를 하나씩 갖는 것으로 가정하면, 하나의 GPON 시스템에서 트래픽 클래스별 대응 T-CONTs의 수는 $N_1=N_2=N_4$ 이고 총 T-CONTs 수는 $N=3N_4$ 가 되고 $N_4=42$ 로 둔다. 고려하는 GPON의 상향 회선속도는 $R_N=1.244Gbps$ 라 하자. 최대 사이클 시간은 20Km 이내 기준으로 $C_{max}=4.4T_f$ 라 둔다.

클래스 P1 트래픽의 T-CONT 당 도착률은 주거:상용 비율이 10:1일 때 $\lambda_1=0.0012$, 1:1일 때 $\lambda_1=0.0069$, 1:10일 때 $\lambda_1=0.0125$ 가 된다. 이에 대응하는 P1 트래픽의 한 GPON에 부과 트래픽 강도는 각각 $\rho_1=0.0216$, 0.1185 , 0.2155 가 된다. 클래스 P2 트래픽의 T-CONT 당 도착률 λ_2 는 0.002와 0.004의 2가지를 선택하기로 하자. 그러면 이에 대응하는 클래스 P2 트래픽의 GPON에 부과 트래픽 강도는 각각 $\rho_2=0.3131$ 과 0.6263 이 된다.

아래 그림들은 $\lambda_2=0.002$ 와 0.004 의 각각에 대한 주거:상용 비율, 10:1($\lambda_1=0.0012$), 1:1($\lambda_1=0.0069$), 1:10($\lambda_1=0.0125$)의 세 그래프를 하나의 그림에 표시하여 비교하도록 보여주고 있다. 그림 4와 5는 $\lambda_2=0.002$ 과 0.004 일 때 평균 지연에 대한 λ_1 의 3가지 그래프 통합 그림이다.

그림 4와 5에서 클래스 P4 트래픽의 평균지연은 ρ_4 가 증가함에 따라 이중 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 4와 5에서 P4 트래픽의 부하가 낮은 부분에서 3가지 그래프의 차가 커 보이는 것은 그래프의 세로축이 로그 스케일이기 때문이다. 그래프에서 점프가 있는 부분은 최대 사이클 주기와 대응된 점이다. 그림 4와 5 각각에서 주거 가입자에 대

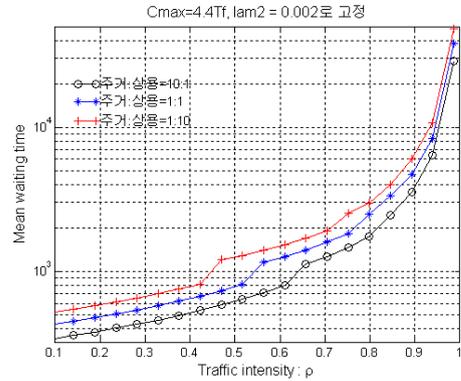


그림 4. ρ_4 대 평균지연 ($\lambda_2=0.002$)

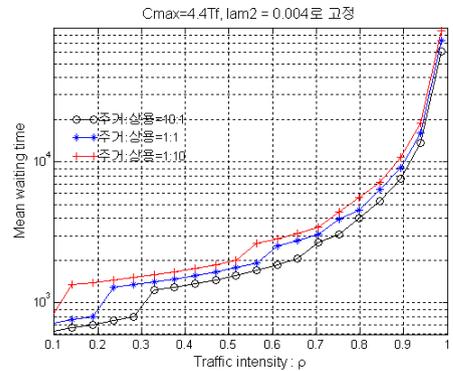


그림 5. ρ_4 대 평균지연 ($\lambda_2=0.004$)

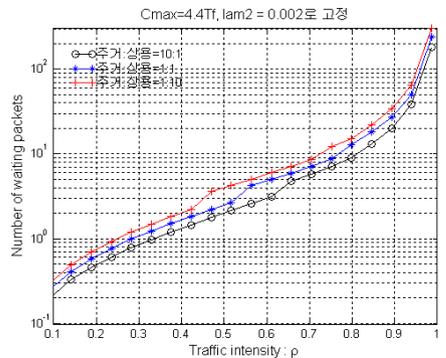


그림 6. ρ_4 대 대기 중인 패킷수($\lambda_2=0.002$)

한 상용가입자의 비율이 커짐에 따라, 즉, $\lambda_1(\rho_1)$ 이 커짐에 따라 평균지연도 증가함을 알 수 있다. 그리고 그림 4와 그림 5를 비교하면 $\lambda_2=0.002$ 에 비해서 $\lambda_2=0.004$ 일 때 평균 지연이 많이 크다는 것을 알 수 있다.

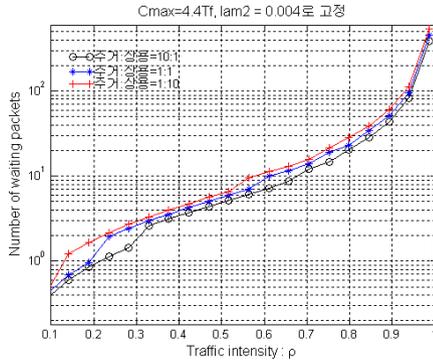


그림 7. ρ_4 대 대기중인 패킷수($\lambda_2 = 0.004$)

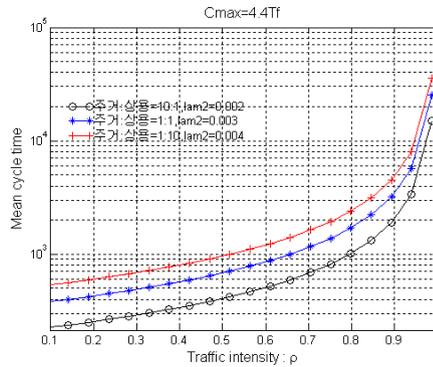


그림 8. ρ_4 대 평균 사이클 타임

그림 6과 7은 $\lambda_2 = 0.002$ 와 0.004 일 때 대기 중인 패킷의 평균수에 대한 λ_1 의 3가지 그래프 통합 그림이다. 그림 6과 7로부터 λ_1 또는 λ_2 및 λ_4 가 증가 할 때 대기 중인 패킷의 수는 증가하는데 λ_4 가 증가할 때 패킷수가 증가하는 경향은 일정함을 알 수 있다.

그림 8은 (주거:상용, λ_2)의 3쌍이 하나의 그림에 통합한 그래프를 보여준다. 대응되는 $\lambda_1 + \lambda_2$ (즉, $\rho_1 + \rho_2$)가 증가함에 따라 평균 사이클 타임도 2중 지수적으로 증가함을 보여주고 있다.

그림 8과 그림 5 및 7로부터 평균 사이클 시간은 평균 지연시간과 증가 추세가 같으나 대기 중인 패킷의 수와는 다른 양상을 보임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 GPON의 DBA가 효율적이기 위한 최대사이클 타임은 20Km 범위에서 $4.4T_f$ 가 적절할 것으로 유도하였다. 그림들에서 P4클래스 트레

픽의 입력부하가 변할 때 평균 사이클 타임, 평균 대기시간(패킷 전송시간 제외)과 해당 T-CONT에서 대기하는 패킷의 평균수에 대한 그래프를 제시했다.

클래스 P4 트래픽의 입력 부하와 P1 및 P2 트래픽이 GPON에 부과되는 총부하가 적정 수준을 능가하면 대응되는 사이클 타임은 최대 사이클 타임을 능가하게 되지만 이후 여러 개의 최대 사이클 동안 P1클래스와 P2 클래스 트래픽의 입력률이 크게 변하지 않는다면 P1 및 P2 클래스 트래픽으로 인한 전환시간을 고려하여 의미 있는 지연시간과 대기 패킷의 수를 계산할 수 있다. 사이클 타임에 대한 그림을 제외한 나머지 지연 시간과 대기 중인 패킷 수에 대한 그림들에서 약간의 점프가 있는 것은 이러한 점을 반영한 것이다.

본 논문에서는 GPON의 상향채널에 대해 지연성을 분석하였다. IPTV와 같은 멀티미디어 서비스가 대중화 된다면 하향채널에 대해 OLT에서의 지연 및 손실 등을 포함하는 시스템 성능을 조사해볼 필요가 있을 것이다. 그리고 역방향 채널에서 패킷의 손실 성능에 대한 구체적인 분석도 추후 연구로 두기로 한다.

참 고 문 헌

- [1] H. Frazier and G. Pesavento, "Ethernet Takes on the First Mile", IT Pro, Jul. /Aug. pp. 1-6, 2001.
- [2] Web ProForum Tutorials, "Ethernet Passive Optical Networks", <http://www.iec.org>, The International Engineering Consortium. 2002.
- [3] 김광옥, 최현균, 김승환, 권윤, 김봉태, "GPON 기술 표준 규격 및 개발 동향", <http://www.itfind.or.kr/WZIN/jugidong/>, 2006.
- [4] ITU-T Recommendation G.984.3, "Gigabit-cable PON: ITU-T Transmission convergence layer specification", 2004.
- [5] Chadi M. Assi, Yinghua Ye, Sudhir Dixit, Mohamed A. Ali, "Dynamic Bandwidth Allocation for Quality-of-service Over Ethernet PONs", *IEEE J. on Selected Areas in Comm.*, Vol.21., No.9, pp.1467-1477, Nov., 2003.
- [6] G. Cramer, and B. Mukherjee, "Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks", *Journal of Optical Networking.*, Vol.1, pp.280-298, 2002.

[7] C. G. Park, D. H. Han and K. W. Rim, "Packet Dealy Analysis of Symmetric Gated Polling System for DBA Sheme in an EPON", *Telecom. Systems*, Vol.30, No.1/2/3, pp.13-34, 2005.

김진희 (Jin Hee Kim)

정회원



1987년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사)
2002년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 (박사 수료)
1991년 3월~현재 (주) 케이티

인프라연구소(수석연구원)

<관심 분야> FTTH, 유무선 통합

박철근 (Chul Geun Park)

정회원



1983년 2월 부산대학교 수학과 졸업(이학사)
1986년 2월 한국과학기술원 응용수학과 졸업(이학석사)
1995년 8월 한국과학기술원 수학과 졸업(이학박사)
1986년 4월~1997년 2월 한국통신

통신망연구소(선임연구원)

1997년3월~현재 선문대학교 정보통신공학부 교수

<관심 분야> 트래픽공학, 통신망해석, 큐잉이론

정해 (Hae Chung)

종신회원



1987년 2월 한양대학교 전자통신공학과 (학사)
1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)
1995년~1998년 LG정보통신 선임연구원

1998년 8월~현재 금오공대 전자공학부 부교수

2004년 1월~2005년 1월 University of Texas at Dallas 방문교수

<관심분야> 가입자 액세스망, BcN, PON, Wibro