

WDM을 이용한 고속 광 가입자망을 위한 매체 접근 제어 프로토콜의 설계 및 성능 평가

정희원 소원호*, 노선식*, 은지숙**, 이호숙**, 김영천***

Design and Performance Evaluation of Medium Access Control Protocols for APON using WDM

Won-Ho So*, Sun-Sik Roh*, Jee-Sook Eun**, Ho-Sook Lee**, Young-Chon Kim***

Regular Members

요 약

APON기반 광 가입자망에 WDM 기법을 적용함으로써 통신 대역을 확장하고 다수의 가입자들을 수용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유럽의 ACTS-PLANET에서는 WDM 광 신호 분배기의 배치 방식에 따라 두 종류의 WDM-PON 구현 구조를 제시하고 있다. 구조-I은 광 분기 지점(ODN) 부분에서 파장 채널이 다중화되는 구조로 각 ONU 그룹이 하나의 파장을 공유하면서 상향 채널을 액세스한다. 구조-II는 ODN 에서 물리적 링크 분기만이 이루어지고 ONU 그룹은 TDMA 방식으로 링크를 공유하며, 그룹 내 각 ONU에서 고유의 파장으로 전송되는 신호가 하나의 슬롯에 커플링된다. 본 논문에서는 이 두 WDM-PON의 구조적 특징과 상향 채널 전송 방식을 분석하고, 각 구조별 특징을 고려한 매체 접근 제어 프로토콜을 제안하였다. 제안된 MAC 프로토콜은 요구-허락형 전송 방식을 사용하여 제시된 구조에서 최대한 동적으로 TDM 슬롯을 할당함으로써 파장 채널의 대역을 효율적으로 이용할 수 있도록 하였다. 수직적 방법과 시뮬레이션을 통해 구조-I과 구조-II에 대하여 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 평가한 결과, 각 파장 별로 독립적인 망을 형성하는 구조-I의 경우 MAC이 간단하고 슬롯을 동적으로 할당함으로써 대역 이용률이 좋아져 전송 지연과 CDV측면에서 더 좋은 성능을 보였다.

ABSTRACT

The potential bandwidth by dense WDM supports not only wide range and high split ratio of SuperPON specification but also enough capacity to gratify increasing demand of users. Two possible approaches to use WDM in SuperPON are proposed by ACTS-PLANET consortium. Architecture-1 places the wavelength multiplexer at an amplified splitter of ODN while architecture-2 does not use any WDM devices so as to keep passive ODN. Instead, distribution section contains 1:16 WDMs by which not amplified 64 ONU signals are relayed to ODN. Same wavelengths and same ONUs are supported in both cases, but architecture-2 requires burst mode SOAs to eliminate the noise funneling effect. In this paper, we design MAC protocols for two different SuperPON upgrading architectures, which are considered as future broadband access network. Both protocols are based on the dynamic slot allocation in order to maximize the multiplexing gain of upstream bandwidth. Two different WDM-PON architectures are compared in a view of MAC performance. According to numeric analysis and simulation, we can know that architecture-1 utilizes upstream bandwidth more flexible than architecture-2 because it shows stable distribution of transfer delay and less CDV regardless of offered load.

* 전북대학교 컴퓨터공학과 차세대통신망 연구실 (whso@networks.chonbuk.ac.kr)

** 한국전자통신연구원 (jseum, hosook@etri.re.kr), *** 전북대학교 영상정보통신기술연구소 (yckim@moak.chonbuk.ac.kr)

논문번호: 00443-1128, 접수일자: 2000년 11월 28일

* 본 연구는 한국학술진흥재단 연구과제(krf-2000-041-E00270) 지원으로 수행되었습니다.

I. 서론

APON(ATM over Passive Optical Network)은 고속 기간망과 통신 요구량이 그리 많지 않은 사용자 사이에서 정보 전달의 역할을 수행하는 가입자망 형태로, 하나의 OLT(Optical Line Termination)에 여러 개의 ONU(Optical Network Unit)를 수동 분배기를 사용하여 연결함으로써 트리 모양의 분산 구조를 가진다. 따라서 電光(electro-optic) 신호의 변환 없이 여러 가입자간 신호를 결합·다중화하여 기간망에 전달할 수 있어 FTTC(Fibre to the Curb)나 FITH(Fibre to the home)에 적합한 구현 방식으로 제시되고 있다. 현재의 APON 구조는 ITU-T의 G.983에서 권고하는 바와 같이 가입자에서 기간망까지의 155.520 Mbit/s 또는 622.080 Mbit/s 상향 채널, 기간망에서 가입자까지의 622.080 Mbit/s 하향 채널을 기준으로 20 Km 반경 이내의 가입자를 수용하고 있다^[1,2].

그러나 광 분기율 1:32로 수십~수백 가입자를 수용할 수 있는 현 APON 구조는 기간망 접속시 많은 교환 노드를 요구하게 되어 망 구성 비용을 증가시키게 된다. 따라서 교환 노드의 수를 줄이고 노드를 합병하는 방안이 제안되면서 APON은 점차로 ACTS(Advanced Communication Technologies and Services)-PLANET (Photonic Local Access Network)의 SuperPON 같이 광 분기율을 1:1,024 까지 높이고 원거리(100Km 이내)에 떨어져 있는 가입자까지 수용할 수 있는 대규모 광 가입자망으로 확장되고 있다^[3,4].

또한 최근 들어 폭주하고 있는 통신 이용량 증가 추세를 감안하면 SuperPON 상향 데이터 채널로는 가입자들의 통신 대역 수요를 만족시킬 수 없다. 즉, 기존 PON 시스템은 1,330nm/1,550nm 파장 영역을 분리하여 하나의 물리적 링크에 상/하향 채널을 동시에 수용하였으나, 대역폭 증대를 위해서는 보다 다중화된 고속 상/하향 채널의 제공이 요구된다. 따라서 2,000 이상의 ONU를 수용하는 SuperPON 구조를 근간으로 파장 분할 다중화(WDM; Wavelength Division Multiplexing) 기법을 이용해 대역을 확장한 WDM-PON 구조가 RACE II, ACTS-PLANET에서 제시되고 있다. 즉 APON에 WDM 기법을 적용하여 파장 채널을 다중화하고, 다수의 ONU 그룹이 공유한 파장 채널을 액세스함으로써 상/하향 대역을 증대시킨다^[5].

ACTS는 상/하향으로 1,330nm/1,550nm 파장 영역을 16개의 파장 채널, 64개의 ONU로 이루어진 채널 액세스 그룹을 기본 구조로하여 SuperPON의 2,048 ONU 분기율을 제공하기 위한 두가지 WDM-PON 실현 구조를 제시하고 있다^[5]. 구조 I은 광 분기 지점(ODN; Optical Distribution Network) 부분에서 파장 채널을 다중화함으로써 각 ONU 그룹이 하나의 파장을 공유하면서 상향 채널을 액세스 하는 구조이다. 반면 구조 II는 ODN에서 물리적 링크 분기만이 이루어지고 각 ONU 그룹은 TDMA 방식으로 링크를 공유하며 각 ONU에서 공유의 파장으로 전송되는 신호를 커플링한다. 구조 II는 구조 I에 비해 각 파장별로 신호 증폭을 위한 증폭 소자가 필요하지 않다는 장점이 있으나 상향 데이터 흐름의 다중화를 위한 매체 접근 제어 프로토콜이 복잡하고 융통성이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 두 종류의 WDM-PON 구조에 대하여 특징 및 상향 채널 전송 방식 등을 분석하고, 이 결과를 기반으로 각 구조에 적합한 매체 접근 제어(MAC; Medium Access Control) 프로토콜을 제안하였다. 제안된 MAC 프로토콜은 요구-허락 방식에 기반을 두고, 제시된 각 구조에서 최대한 동적으로 TDM 슬롯을 할당하여 파장 채널의 대역을 효율적으로 이용할 수 있도록 한다. 제안된 MAC 프로토콜의 성능을 수치적 방법을 통해 전송 지연 측면에서, 그리고 실험적 방법을 통해 전송 지연 및 CDV 측면에서 평가하였다. 또한, 구조 I과 구조 II에 대한 성능을 매체 접근 제어 관점에서 비교함으로써 각 구조의 효율을 분석하고 적합성을 검토하였다.

본 논문은 5장으로 구성되었다. 2장에서는 SuperPON의 구조와 SuperPON에 WDM을 적용한 WDM-PON에 대해서 설명하였다. 3장에서 WDM-PON의 구조적 분석을 기반으로 한 매체 접근 제어 프로토콜과 프레임 구조를 제안하고, 4장에서 수치적 분석과 실험적 분석을 실시하여 제안한 프로토콜의 성능을 분석하고, 5장에서 결론을 맺었다.

II. WDM을 이용한 고속 광 가입자망 구조

2.1 SuperPON 구조

SuperPON은 원거리·다수의 가입자를 수용하기 위해 APON의 구조를 개선한 가입자망 구조로 광 증폭기를 사용하여 분기율을 높이고 수십 km 이상의 넓은 지역에 걸쳐 망을 구성한다. 따라서 광 증

폭 소자의 종류, ODN의 분기형태 등에 따라 여러 가지 구현 방식이 제시되고 있으나^[4], ACTS-PLANET에서 지정하고 있는 SuperPON의 규격은 그림 1과 같다^[5]. PLANET은 90km의 공급부(Feeder section)와 10km의 분배부(Distribution section)로 구성된다. 공급부는 OLT가 포함된 AN(Access Node)과 AS(Amplified Splitter;ODN기능)를 연결하고, 분배부는 AS와 ONU를 연결한다. SuperPON이 기존의 APON과 구별되는 가장 중요한 차이는 광 증폭소자를 사용한다는 점으로 공급부에서는 원거리 전송을 위해 그리고 분배부에서는 고 분기율을 얻기 위해 증폭소자를 사용한다. 증폭소자로는 하향 채널은 증폭 성능이 좋은 EDFA(Erbium-Doped Fibre Amplifiers), 상향 채널은 버스트 모드 운영을 목적으로 교환 SOA(Switchable Semiconductor Optical Amplifier)를 이용한다. 그리고, 공급부의 원거리 전송에 있어 전송로의 유효성을 보장하기 위해 공급부는 이중 경로 배정을, 분배부는 전송로의 비용 증가와 단거리인 점을 고려하여 단일 경로 배정을 한다.

SuperPON은 AS에서 2:16분기와 분배부에서 1:128분기의 다단계 분기를 통해 1:2,048의 분기율을 갖고, 상/하향으로 1,330nm/1,550nm의 파장 영역을 분리하여 311Mbps/2.5Gbps의 용량을 제공하며 동적 채널 할당을 통해 15,000이상의 가입자를 수용할 수 있다.

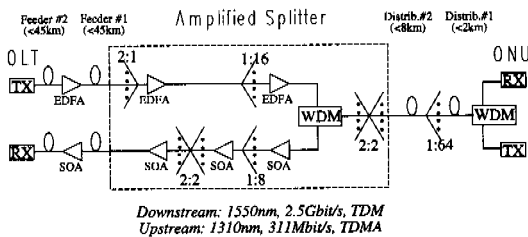


그림 1. SuperPON 구조

2.2 WDM-PON 구조

ACTS에서 SuperPON의 용량을 증대시키기위해 SuperPON에 WDM을 이용하는 실현 구조로 제시한 WDM-PON은 SuperPON의 1,310nm/1,550nm 상/하향 파장 채널을 16개의 독립적인 채널로 분리하고, 2,048개의 ONU를 그룹화하여 액세스를 제공하는 구조이다. WDM 광 신호 분배기를 사용하여 커플링된 파장 신호를 각 물리적 링크에 분배하고 WDM 다중화기를 통하여 상/하향 채널의 다중화가

이루어진다. 각 파장 채널에서의 데이터 전송은 ATM 셀에 액세스망 오버헤드가 추가된 TDM 슬롯 단위로 이루어진다.

WDM-PON 구조는 파장 채널의 분배를 위한 WDM 광 신호 분배기의 배치 형태에 따라 구조-I과 구조-II로 나뉜다^[5]. 구조-I은 그림 2와 같이 AS에 WDM 광 신호 분배기를 배치하여 채널을 파장별로 분배해서 ONU 그룹에 전달한다. 그룹 액세스를 제공하는 WDM-PON은 2개의 ONU 그룹이 하나의 파장 채널을 공유하게 되며, 각 ONU 그룹은 64개의 ONU로 구성된다. 따라서 각 파장이 128 ONU를 수용하는 방식으로 전체 2,048 ONU를 연결한다. 각 그룹내의 ONU들은 동일한 파장 내의 TDM 슬롯을 액세스하게 되므로 각 파장에 대해 독립적인 PON 시스템이 구성되는 형태가 된다. 이 구조는 한 타임 슬롯 동안 각 파장 채널을 통해 들어오는 데이터 정보에 대해 AS의 WDM 광 신호 분배기에서 파장 신호를 커플링하여 완전한 타임 슬롯 정보를 구성한다. AS의 증폭기는 감쇠된 신호를 각 파장별로 증폭하기 위해 사용된다. 이때, AS에서 병렬로 배치된 SOA들에 대해 버스트 모드 운영을 하면 한순간에 하나의 파장만이 AS를 지나가게 되어 기존의 SuperPON과 용량이 같아지게 되고, 버스트 모드 운영을 하지 않으면 신호대 잡음비의 저하를 피할 수 없게 된다. 따라서, 구조-I에서는 각 파장의 스펙트럼 영역이 다르다는 사실을 이용하여 AS에 광 필터를 배치하여 특정 파장만을 필터링해 전송함으로써 신호대 잡음비의 저하를 막는다.

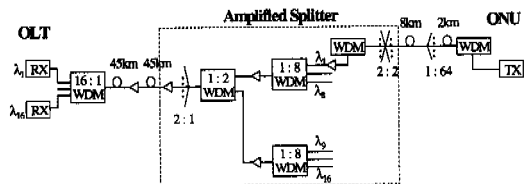


그림 2. WDM-PON 구조-I

구조-II는 그림 3과 같이 32개의 WDM 광 신호 분배기를 분배부에 배치한 구조로써, AS에서는 커플링된 광 신호의 물리적 분배 기능만을 수행한다. 구조-II는 4개의 ONU로 이루어진 서브그룹이 하나의 파장을 공유한다. 따라서 64개의 ONU로 이루어진 그룹은 한 타임 슬롯 동안 16 파장을 동시에 액세스할 수 있으며, AS에서 1:16으로 분기된 물리적

링크당 2개의 ONU 그룹을 수용함으로써 2,048 ONU를 수용한다. 구조-II는 AS에 데이터 슬롯이 들어오기 전에 이미 전체 파장 채널을 이용한 완전한 타임 슬롯이 각 그룹별로 구성되므로 분기점에서는 커플링된 신호를 증폭기를 거쳐 OLT로 전송하기만 하면 된다. 따라서, 구조-II는 AS에서 병렬로 배치된 SOA들을 버스트 모드로 운영하여, 한 순간에 하나의 SOA만을 작동시킴으로써 신호대 잡음비의 저하를 막을 수 있다.

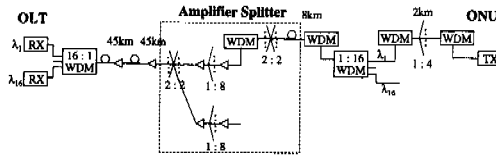


그림 3. WDM-PON 구조 II

표 1은 구조 I과 구조-II에 요구되는 광 소자수를 비교한 것이다. 구조-II는 512개의 최하위 그룹이 1:4 분배기를 사용하므로 분배기의 수가 증가되고 분배부에서 WDM 광 신호 분배를 함으로써 1:16 WDM 분배기 수도 증가하게 된다. 그러나 구조-II에서 사용하는 SOA는 한 타임 슬롯을 증폭시키는데 사용되는데 반해 구조-I에서 SOA는 각 파장을 증폭시키는데 사용되고 있다. 따라서 PON의 특성을 감안한다면 AS부에서 능동소자를 사용하지 않는 구조-II가 더 PON에 가깝다고 할 수 있다.

표 1. WDM PON 구조-I과 구조-II의 요구 소자 수

	WDM Splitter			SOA	Splitter				
	1:2	1:8	1:16		1:2	2:2	1:4	1:8	1:64
구조-I	1	2	1	22	1	16	-	-	32
구조-II	-	-	33	22	-	17	512	2	-

III. WDM-PON을 위한 매체 접근 제어 프로토콜

가입자망인 PON은 하향 데이터 전송은 방송되는 형태이므로 MAC 프로토콜이 요구되진 않지만 상향 데이터 전송은 다수의 ONU가 동시에 기간망으로 데이터 전송을 원하므로 이를 중재하여 전송하기 위한 MAC 프로토콜이 요구된다. WDM-PON

구조-I과 구조-II는 WDM 광 신호 분배기의 배치 방식에 따라 서로 상이한 전송 구조를 갖게 된다. 따라서 각 파장 내에서 전송을 위해 타임 슬롯에 할당되는 ONU 그룹 및 동적 액세스 방식이 달라지게 되므로 두 구조는 구조별 특성을 감안한 MAC 프로토콜을 요구하게 된다.

본 절에서는 WDM-PON 시스템의 특성을 고려한 MAC 프로토콜을 제안하였다. PON은 다수의 ONU가 트리 구조로 분산되어 구성되므로 MAC 프로토콜은 상향 TDM 슬롯의 동적 할당을 위해서 예약 방식에 기반한 요구-허락형 전송 방식을 사용한다^[6]. 따라서, WDM-PON을 위해 제안한 MAC 프로토콜은 ONU 그룹 내에서 파장 채널 내의 TDM 슬롯을 동적으로 할당하기 위해 요구-허락형 전송 방식을 사용한다.

3.1 WDM-PON을 위한 프레임 구조

WDM-PON에서 상/하향 채널을 통해 트래픽을 전송하기 위해 제안한 프레임 구조는 그림 4, 5와 같다. 제안한 프레임 구조는 상/하향 448bits의 전송 슬롯을 사용한다. 상향 데이터 전송을 위한 프레임은 ATM 셀의 전송을 위한 ATM 정보 슬롯과 전송 허락을 요구하기 위한 RAU(Request Access Unit) 슬롯으로 구성된다. 각 ONU는 주기적으로 전송되는 RAU 슬롯을 통해 자신의 요구 정보를 OLT에 알리고, OLT는 이를 기반으로 round-robin 방식으로 하향 채널을 통해 해당 ONU에 허락 정보를 전송한다. 각 슬롯 시간마다 허락 정보를 수신한 ONU는 허락된 정보 슬롯을 통해 ATM 셀을 전송한다. 상향 채널은 분산된 여러 ONU들로부터 정보가 집중되므로 물리적 전송 동기를 위해 ATM 셀에 17bits의 프리앰블을 추가하여 ATM 정보 슬롯을 구성한다.

RAU 슬롯은 12개의 ONU에 대한 요구 정보를 통합한 형태이며, 같은 길이를 갖는 12개의 요구 필드 Req로 구성된다. 각 ONU는 37bits의 Req 필드를 통해 요구 정보를 전송하게 되는데, 하나의 Req 필드는 17bits의 물리 계층 프리앰블과 7bits의 요구 정보, 5bits의 오류 검출 코드로 구성된다. QL(Queue Length)은 로컬 대기큐를 운영하고 있는 각 ONU가 자신의 큐 정보를 전송하기 위해 사용하는 필드로 7bits로 구성된다. RAU 슬롯 주기를 18로 잡았을 때 하나의 파장을 공유하는 ONU의 수는 128이고, 하나의 RAU 슬롯은 12개 ONU의 요구 정보를 전송한다. 따라서 각 ONU가 RAU 슬롯을

할당 받을 수 있는 주기는 $198(18 \times \lfloor 128/12 \rfloor)$; $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크거나 같은 최소 자연수) 슬롯이므로 한 프레임의 주기는 $153\mu s$ 이다. Req 필드의 7bits는 각 ONU에서 발생한 최대 128개의 셀 정보를 전송할 수 있는데, 이는 $54272 \text{ bits}(128 \times 53 \times 8)$ 에 해당하며, 한 프레임의 주기 $153\mu s$ 에 대해 ONU의 최대 전송 속도는 다음과 같다.

$$54272 \text{ bits} / 153\mu s = 354.718 \text{ Mbps}$$

그러므로, WDM-PON에서 인터페이스의 전송 속도를 311Mbps로 기준하였을 때, 7bits의 요구 정보는 인터페이스 부분에서 각 트래픽의 최대 전송 속도를 수용할 수 있다. 그리고, 트래픽의 변화에 빠르게 적응하기 위해 ATM 정보 슬롯에도 7bits의 QL 필드를 두고 있다.

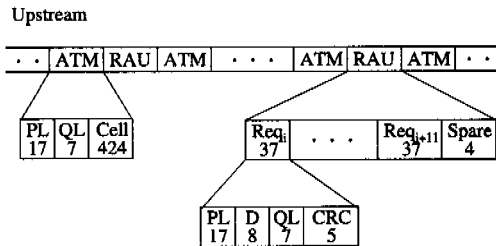


그림 4. 상향 전송 프레임 구조

하향 프레임은 정보 슬롯에 1bit의 PT(Permit Type) 필드, 9bits의 ONU-address 필드, 4bits의 오류 검출 코드 필드, 10bits의 여분 필드를 붙여 448bits로 구성된다. 하향 프레임은 전체 ONU에게 방송되는 정보이므로 물리적 오버헤드는 요구하지 않는다. 따라서 하향 프레임에는 ATM 셀에 MAC 오버헤드만을 추가한다. MAC 오버헤드인 PT 필드는 허락된 셀의 종류를 표현하는 필드로 RAU(PT=0)와 Permit(PT=1)을 구별해주고, ONU-address 필드는 128개의 ONU를 식별하기 위해 필요한 7bits와 멀티캐스트나 방송을 위한 주소로 사용하기 위한 2bits를 추가하여 구성하고 이들의 오류 검출을 위해 CRC 필드를 두었다.

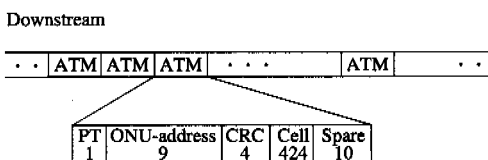


그림 5. 하향 전송 프레임 구조

3.2 구조-I을 위한 매체 접근 제어 프로토콜 설계

구조-I은 WDM 광 신호 분배기를 AS 부에 배치하여 각 파장별로 독립적인 그룹 액세스를 제공하는 구조이다. 그림 6은 구조-I을 위한 MAC 에서의 파장 및 슬롯 할당 방식을 도시한 것이다. 시스템은 전체 ONU를 128, 전체 파장은 4라고 가정하였다. 구조-I은 각 파장별로 독립적인 ONU 그룹이 생성되어 MAC 역시 그룹별로 독립적으로 처리되므로 32개의 ONU가 하나의 그룹을 이루어 한 파장을 공유하는 형태가 된다. 예를 들어, λ_1 은 ONU1~ONU32로 이루어진 그룹1이 이용하게 된다.

Dynamic allocation for 32 ONUs

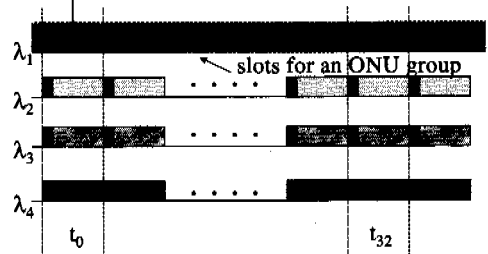
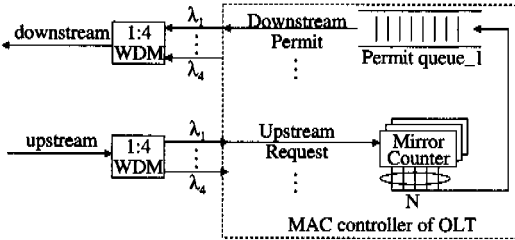


그림 6. WDM-PON 구조-I을 위한 파장 및 슬롯 할당

각 파장의 타임 슬롯을 할당하기 위해서는 정적인 방법과 동적인 방법이 사용될 수 있다. 먼저, 정적인 방법을 사용하는 경우 한 그룹내의 ONU들은 λ_1 내의 타임 슬롯을 순차적으로 할당받는다. 이 경우 슬롯 할당 주기는 32가 되므로 t_0 에서 슬롯을 할당받은 ONU가 다시 슬롯을 할당받으려면 t_{32} 까지 대기하여야한다. 이는 타임 슬롯 할당에 있어 각 ONU에게 전송 동기 지연을 발생시키고, 전송할 데이터가 없는 ONU에게 슬롯이 할당됨으로써 대역을 낭비하는 결과를 초래하게 된다. 하지만, 한 그룹내의 ONU가 λ_1 내의 타임 슬롯을 동적으로 할당받을 수 있는 동적 슬롯 할당 방식을 사용한다면, 슬롯 할당 주기가 1~32의 동적인 값을 갖게 되어 전송 동기 지연을 줄이고, 대역을 효율적으로 사용할 수 있게 된다. 따라서 구조-I에서는 각 ONU가 각 파장내의 타임 슬롯을 동적으로 할당 받을 수 있도록 하는 요구-허락형 MAC 프로토콜을 제안한다.

제안한 MAC 프로토콜에서 이용하는 요구-허락형 전송 구조는 먼저, 전송을 원하는 ONU가 주기적으로 전송되는 요구 슬롯(RAU 슬롯)을 통해 OLT에

계 요구 정보를 전송하면, ONU로부터 요구 정보를 받은 OLT의 MAC 제어기는 각 ONU의 요구 정보를 round-robin 방식으로 처리하여 허락 정보를 생성하고, 해당 ONU에게 허락 정보를 전송하는 방식이다.



N : the number of ONU of one group

그림 7. 구조-I을 위한 OLT에서의 MAC 모델

그림 7은 구조-I을 위해 제안한 OLT의 MAC 제어기에서 MAC 모델을 도식한 것이다. 요구 정보를 포함하고 있는 상향 데이터 스트림은 WDM 광 신호 분배기를 통해 각 파장별로 분리되어 OLT로 전송된다. OLT의 MAC 제어기는 각 파장 별로 독립된 MAC을 운영하므로 요구 정보를 받고 허락 정보를 발생시키기 위해 각 파장별로 허락큐를 운영한다. 그림 7에서는 OLT의 MAC 제어기에서 파장 λ_1 에 대한 허락큐인 Permit queue_1에 대한 운영 모습만을 도식한 것이다.

상향 채널을 통해 RAU 슬롯이나 ATM 셀과 함께 OLT에 도착한 요구정보는 미러 카운터(Mirror Counter)를 통해 각 ONU에 새로 도착한 셀의 개수를 계산한다^[6]. 계산된 셀 수만큼 허락을 발생시켜 허락큐에 저장한 후 하향 채널을 통해 매 타임 슬롯마다 ATM 셀과 함께 허락 정보 저장 큐의 허락 정보를 해당 ONU로 전송한다. 이와 같이 OLT의 MAC 제어기는 각 파장내의 그룹별로 슬롯 할당을 위한 동적 처리를 하게 되므로 구조-I에서 허락 정보를 전송하기 위해 운영되는 큐의 수는 파장수와 동일하다.

3.3 구조-II를 위한 매체 접근 제어 프로토콜 설계

구조-II는 WDM 광 신호 분배기를 분배부에 배치함으로써 분배부에서 전체 파장을 사용하여 완전한 타임 슬롯을 구성한 후 AS부에서는 물리적 링크 분기만을 제공하는 구조이다. 따라서 구조-II는 타임 슬롯 별로 독립적인 그룹 액세스를 제공한다.

Dynamic allocation for 4 ONU's

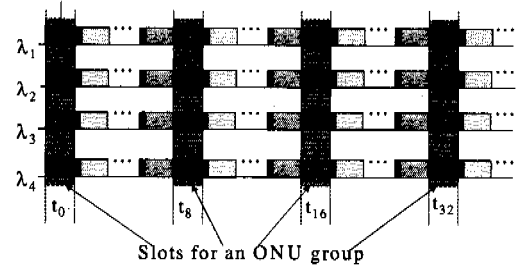


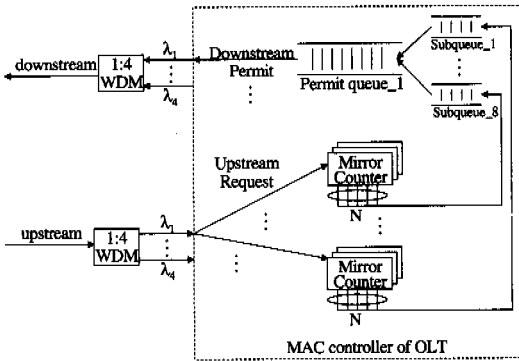
그림 8. WDM-PON 구조-II를 위한 파장 및 슬롯 할당

그림 8은 구조-II를 위한 MAC에서의 파장 및 슬롯 할당 방식을 도식한 것이다. 시스템은 구조-I과 동일하게 전체 ONU는 128, 전체 파장은 4라고 가정하였다. 구조-II에서는 그룹 액세스를 제공하기 위해 전체 ONU는 파장수로 나뉘어 4개의 그룹이 구성된다. 그러나 구조-II에서는 하나의 파장을 공유하기 위해 4개의 ONU로 구성된 서브그룹이 그룹내에 생성되므로 한 순간에 동일 그룹내의 ONU가 전체 파장을 이용하여 상향 채널을 액세스한다. 결국 구조-II에서 그룹에게 주어지는 슬롯 할당 주기는 파장수와 분기수로 나뉘어 8 슬롯 주기가 된다.

이와 같이, 구조-II는 각 그룹이 액세스 할 수 있는 슬롯의 주기가 고정되므로 각 파장내의 타임 슬롯은 그룹 액세스에 있어서는 정적 슬롯 할당 방식을 따르게 된다. 그러나 하나의 서브그룹 관점에서는 정적인 슬롯 할당 방법과 동적인 슬롯 할당 방법을 사용할 수 있다. 즉, 그룹 액세스 측면에서 슬롯 할당 주기는 정적인 특성을 유지하게 되므로 서브그룹 또한 슬롯 할당 주기는 8의 배수를 유지해야 하지만, 서브그룹내의 슬롯 할당 주기는 MAC에 의해 다소 감소 될 수 있다.

먼저, 정적인 슬롯 할당 방법을 사용할 경우 슬롯 할당 주기는 구조-I과 동일한 32가 된다. 이는 전송 동기 지연을 발생시키고 대역을 낭비하는 효과를 초래하므로 서브그룹내의 ONU들간에는 서브그룹에 할당된 슬롯을 동적으로 액세스할 수 있도록 한다. 따라서, 구조-II를 위해 제안된 MAC 프로토콜에서도 요구-허락형 전송 구조를 사용하여, 각 슬롯은 그룹간에는 정적으로, 서브그룹내의 ONU간에는 동적으로 액세스되도록 한다.

그림 9는 구조-II를 위해 제안한 OLT의 MAC 제어기에서의 MAC 모델을 도식한 것이다. 상향 데이터 스트림은 WDM 광 신호 분배기를 통해 각 파장별로 분리되어 OLT로 전송 된다.



N : the number of ONU of subgroup of one group

그림 9. 구조-II을 위한 OLT에서의 MAC 모델

OLT의 MAC 제어기는 각 서브그룹내의 ONU에 게 동적으로 슬롯을 할당하기 위해 각 서브그룹별로 서브큐를 운영하고, 요구 정보에 대한 허락 정보를 발생시키기 위해 각 파장별로 허락큐를 운영한다. 그림 9에서는 OLT의 MAC 제어기에서 파장 λ_1 에 대한 허락큐인 Permit queue_1에 대한 운영 모습만을 도시한 것이다.

상향 채널을 통해 OLT에 도착한 요구 정보는 미러 카운터를 통해 각 ONU에 새로 도착한 셀의 개수를 계산하여 그 수만큼 허락 정보를 서브큐로 전송한다. 8개의 서브 큐는 순차적으로 허락 정보를 허락 큐로 전송하고 허락 큐는 하향 채널을 통해 허락 정보를 해당 ONU로 전송한다. 이와 같이, OLT의 MAC 제어기는 각 서브그룹당 큐를 운영하여 동적인 슬롯 할당을 하게 되므로 구조-II에서 서브큐의 수는 서브그룹의 수와 일치하게 되고, 각 파장별로도 허락 큐를 운영하므로 전체적으로 구조-I 보다 많은 수의 큐를 운영하게 된다.

IV. 성능 평가

WDM-PON 구조-I과 구조-II를 위해 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 M/D/1 모델을 이용한 수치적인 방법과 시뮬레이션을 통한 실험적인 방법을 사용하였다.

APON은 전달망이므로 각 ONU에서 발생한 셀들은 가능하면 발생된 트래픽 패턴을 유지하면서 일정한 전송 지연 시간을 가지고 기간망에 전달되어야 한다. 이를 위해 APON MAC 프로토콜은 상향 채널에서 다중화된 ATM 셀들의 전송 지연 변이(CDV; Cell delay variation)를 최소화 할 수 있어

야 한다. 따라서 제안된 WDM-PON 매체 접근 제어 프로토콜의 성능 평가 기준으로 수치적 방법에서는 전송 지연을, 실험적 방법에서는 전송 지연과 OLT의 인터페이스 부분에서 측정된 1-point CDV의 분포를 상보분포(Complementary distribution; $Pr(X > x)$)를 통해 나타내었다.

4.1 M/G/1 모델에 의한 수치적 분석

본산되어 있는 각 사용자 측에서 발생하는 ATM 셀의 분포는 트래픽 특성에 따라 다르며 하나의 ONU는 동시에 다수 개의 연결을 수용하므로 셀 발생률에 관해 수식적으로 정형화할 수 없는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 실제의 발생률을 수식적으로 표현하는 대신 일반화된 Poisson 분포와 주기적 발생을 갖는 Constant 분포를 갖는 트래픽 소스를 가정하여 수치적으로 분석함으로써 일반적 상황에 대한 성능 기준으로 사용하였다.

제안된 MAC 프로토콜은 요구-허락형 프로토콜이므로 전송을 위한 데이터의 흐름을 그림 10과 같이 표시할 수 있다. 먼저 OLT와 ONU간의 전파 지연 시간을 τ , ONU에 셀이 발생하여 요구 정보를 전송할 때까지의 대기 시간을 T_1 , OLT에서 요구 정보를 수신하여 전송 허락을 위한 처리 후 하향 채널을 통해 허락 정보가 전송되기까지의 큐잉 지연 시간을 T_2 라고 하면, ONU에 발생한 정보 슬롯이 OLT에 도달하기까지의 전체 전송 지연 시간은 다음과 같다.

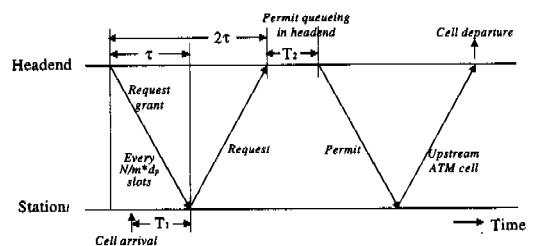


그림 10. 요구허락 과정을 위한 전송 지연 시간

$$Total\ delay = T_1 + T_2 + 3\tau$$

이 중 전파 지연 시간인 τ 는 일정한 상수이므로 T_1 과 T_2 에 대한 큐잉 모델을 설정하여 전송 지연 시간을 구할 수 있다. 이를 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 주기적 RAU 슬롯의 발생 빈도, 즉 매 d_s 슬롯마다 RAU 슬롯이 발생한다고 할 때, 망 내에 N 개의 ONU가 존재하고 하나의 RAU 슬

롯에 m 개의 요구 정보를 전송할 수 있다면 ONU가 자신의 요구 정보를 전송할 수 있는 주기 d_{ps} 는 식 1과 같다.

$$d_{ps} = N/m \times d_p \quad (1)$$

전체 시스템에 발생하는 셀의 도착률을 λ 라 하면 한 ONU에 연결된 트래픽 소스의 수를 b , 트래픽 소스 내의 셀 도착률을 λ_0 라 할 때 셀 도착률은 식 2와 같이 표시된다.

$$\lambda = N \cdot b \cdot \lambda_0 \quad (2)$$

각 트래픽 소스의 셀 도착률이 Poisson 분포라고 하고 한 슬롯의 전송 시간을 t_c 라고 한다면 같은 RAU 슬롯을 통해 요구 정보를 전송하는 m 개의 ONU들에 대해 자신의 전송 요구를 위한 RAU 슬롯 주기 d_{ps} 동안 발생하는 평균 셀의 수는 식 3과 같다.

$$mb\lambda_0 \cdot \frac{N}{m} d_{ps} t_c = Nb\lambda_0 d_{ps} t_c = \lambda d_{ps} t_c \quad (3)$$

따라서 한 요구 주기 동안 시스템에 도착하여 전송을 요구하는 셀의 수, R 에 대한 확률은 다음과 같다.

$$P(R=r) = \frac{(\lambda d_{ps} t_c)^r}{r!} e^{-\lambda d_{ps} t_c} \quad (4)$$

먼저 ONU에 셀이 발생하여 요구 정보를 전송하기까지의 대기 시간 T_1 에 대해 기술해보자. RAU 슬롯을 구성하는 ONU의 요구 정보는 모든 ONU에 대해 round-robin 방식으로 이루어지므로 요구 정보 전송을 위한 대기 시간 T_1 은 요구 주기 d_{ps} 시간 내에서 전송 단위인 슬롯 타임 t_c 에 비례하여 식 5과 같이 일정하게 분포된다.

$$P(T_1 = t) = \begin{cases} \frac{1}{d_{ps}} & \text{for } t = t_c, 2t_c, \dots, d_{ps}t_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

다음은 도착한 요구 정보를 기반으로 MAC 제어기를 통해 발생한 허락 정보가 하향 채널을 통해 전송되기까지 OLT의 허락 정보큐에서의 큐잉 지연 시간 T_2 를 고려해 보자. OLT에서 허락큐의 동작을 살펴보면 서버는 $d_p - 1$ 타임 슬롯 동안 허락 정보를 서비스하고, 새로운 요구 정보가 입력되는 한 타임 슬롯 동안 휴지기(vacation)를 갖는다. 새로운 요구 슬롯 RAU에서 입력되는 요구의 수는 앞서 기술한 바와 같이 Poisson 분포에 따르는 확률 변수 R 로 표시된다. 여기서 Embedded Markov Chain[7]에 의한 접근법에 주기적으로 발생하는 휴지기를 적용하기 위하여 새로운 확률 변수 X 와 Y 를 정의한다.

X 는 RAU 슬롯으로 인한 휴지기에 들어가기 직전 OLT의 허락큐에 남아있는 허락 정보의 수이고 Y 는 서버의 휴지기 동안 RAU 슬롯에 의해 새로 요구된 정보들에 대한 처리 후 허락큐에 존재하는 허락 정보의 수라고 가정해보자. 또한 s 를 허락큐에 의해 처리할 수 있는 시스템 용량이라고 가정한다.

OLT가 휴지기 동안 RAU 슬롯을 처리한 후 큐에 Y 개의 허락 정보가 큐잉되었다면 허락큐의 서버는 다음 휴지기까지 최대 $d_p - 1$ 개의 슬롯을 처리할 수 있다. 따라서 평형 상태에 도달한 큐에서 X 의 분포는 X 와 Y 의 상호 재귀적 표현에 의해 다음과 같은 식 6과 7로 표시할 수 있다.

$$P(X=x) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{d_p-1} P(Y=k) & \text{for } x=0 \\ P(Y=x+d_p-1) & \text{for } x=1, 2, \dots, s+1-d_p \\ 0 & \text{for } x > s+1-d_p \end{cases} \quad (6)$$

$$P(Y=y) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{d_p-1} P(X=k)P(R=y-k) & \text{for } y=0, 1, \dots, s-1 \\ \sum_{k=0}^{s+1-d_p} P(X=k) \cdot \sum_{r=s-k}^{\infty} P(R=r) & \text{for } y=s \\ 0 & \text{for } y > s \end{cases} \quad (7)$$

Y 에 관한 식 7을 식 6에 대입하여 정리하면 X 의 분포에 대한 확률식을 다음과 같은 식 8로 구할 수 있다.

$$P(X=x) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{d_p-1} \sum_{j=0}^k P(X=j)P(R=k-j) & \text{for } x=0 \\ \sum_{k=0}^{x+d_p-1} P(X=k)P(R=x+d_p-1-k) & \text{for } x=1, 2, \dots, s-d_p \\ \sum_{k=0}^{s-d_p+1} P(X=k) \sum_{j=s-k}^{\infty} P(R=j) & \text{for } x=s-d_p+1 \\ 0 & \text{for } x > s-d_p+1 \end{cases} \quad (8)$$

허락큐에 입력된 허락 정보가 하향 채널을 통해 전송되기까지의 T_2 시간을 구하기 위해, 입력된 허락 정보가 허락큐 안에서 존재할 수 있는 위치 E 에 대해 살펴보자. 허락 정보는 round-robin방식으로 저

장되었다고 가정할 때 허락큐 안의 위치 E 는 맨처음 사용 가능한 공간인 $X+1$ 로부터 요구된 정보의 마지막인 $X+R$ 사이에서 순차적으로 분포될 것이다. 시스템에 들어오는 요구 정보의 수, $R=r$ 일 확률은 $\frac{r}{E[R]} \cdot P\{R=r\}$ 이므로 E 의 분포는 휴지기 이전에 큐에 X 개의 허락 정보가 있을 때의 확률인 식 8을 이용하여 식 9와 같이 표시할 수 있다.

식 9에서 표시한 E 는 허락큐 내의 위치 정보이므로 슬롯 타임 t_c 를 적용하여 허락큐의 대기 시간 T_2 의 분포를 계산하면 식 10과 같다.

$$\begin{aligned}
 P\{E=e\} &= \sum_{x=0}^{\infty} \frac{P\{X=x\}}{E\{R|X=x\}} \cdot \sum_{r=e-x}^{\infty} P\{R=r\} \\
 &= \sum_{x=0}^{\infty} \frac{P\{X=x\}}{E\{R|X=x\}} \cdot P\{R>s-x\} \\
 E\{R|X=x\} &= \sum_{r=1}^{\infty} r \cdot P\{R=r\} + (s-x)P\{R>s-x\} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$P\{T_2 < kt_c\} = \begin{cases} 0 & \text{for } k \in \{0, d_p, 2d_p, 3d_p, \dots\} \\ P\{E = k - \lfloor \frac{k}{d_p} \rfloor\} & \text{for } k \neq d_p \cdot \lfloor \frac{k}{d_p} \rfloor \end{cases} \quad (10)$$

따라서 T_2 의 상보 분포는 식 11과 같다.

$$P\{T_2 > kt_c\} = 1 - \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{k}{d_p} \rfloor} P\{E=e\} \quad (11)$$

마지막으로 상수인 전파 지연 시간을 제외한 전체 큐잉 지연 시간, $T = T_1 + T_2$ 에 대한 상보 분포는 식 12와 같이 구해진다.

$$P\{T > kt_c\} = \begin{cases} 1 & \text{for } k \leq 0 \\ \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{d_{ps}} P\{T_2 > jt_c\} + \frac{d_{ps} - k}{d_{ps}} & \text{for } k = 1, 2, \dots, d_{ps} \\ \sum_{j=k-d_{ps}}^{k-1} \frac{1}{d_{ps}} P\{T_2 > jt_c\} & \text{for } k > d_{ps} \end{cases} \quad (12)$$

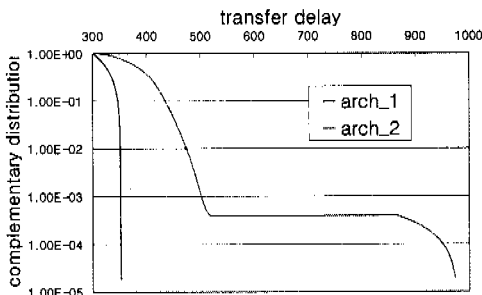


그림 11. 수치적 분석에 의한 전송 지연 분포

그림 11은 수치적 분석에 의한 구조-I과 구조-II에 대한 큐잉 전송 지연과 상수 전파 지연 시간을 포함한 전체 전송 지연 분포를 나타낸 것으로 구조-I이 구조-II보다 낮은 전송 지연 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 구조-I은 최대 전송 지연 약 380 μ s, 구조-II는 약 970 μ s의 값을 갖게 되는데, 이는 구조-II에서는 요구 정보가 허락큐에 저장된 후 처리 되기까지 높은 슬롯 전송 지연이 발생되는 슬롯 할당의 정적인 특성 때문이다. 또한 구조-II는 확률 10^{-3} 이하에서 전송 지연이 아주 커지는 모습도 확인할 수 있다.

4.2 시뮬레이션에 의한 실험적 분석

WDM-PON 구조-I과 구조-II를 위해 제안된 MAC 프로토콜의 성능 평가를 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 위한 가정은 다음과 같다.

- WDM-PON 구조 : 128개의 ONU와 4개의 파장 ($\lambda_1 \sim \lambda_4$)
- 각 파장별 상하향 채널 용량 : 622.080Mbps
- 각 ONU별 최대 전송 속도 : 155.520Mbps
- RAU(Request Access Unit) 주기 : 18슬롯
- 전파 지연 시간 : 100.204 μ s

시뮬레이션은 On-Off 트래픽 모델을 사용한 VBR 트래픽 소스를 이용하여 PBR (Peak Bit Rate) 50Mbps, MBR (Mean Bit Rate) 5Mbps로 설정하였다.

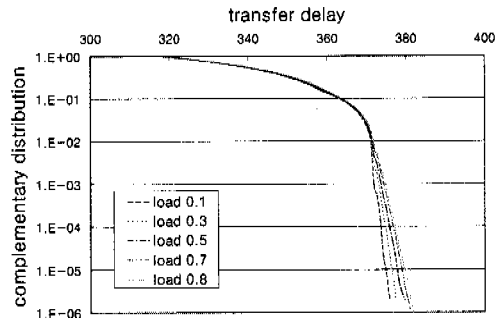


그림 12. 망 부하에 따른 구조-I의 전송 지연 특성

그림 12는 구조-I의 전송 지연 분포를 보인 것으로 망 부하에 관계없이 거의 일정한 전송 지연 분포를 보이고 있으며 전송 지연의 분산 역시 평균을 중심으로 밀집되어 있음을 볼 수 있다.

그림 13은 구조-I의 CDV분포를 보인 것으로

망 부하에 일정한 전송 지연의 영향으로 200 μ s 이하의 낮은 CDV값을 갖는다. 이는 구조-I에서 사용자 측의 정보 슬롯이 원래 발생한 트래픽 패턴을 유지하면서 기간망에 전달됨을 의미한다.

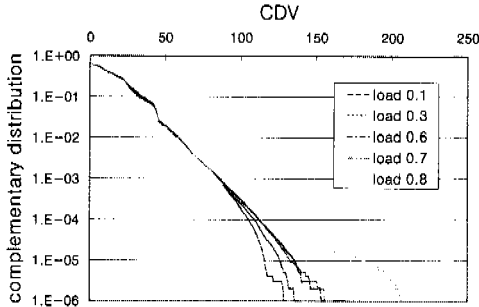


그림 13. 망 부하에 따른 구조-I의 CDV 성능

에 심한 변화를 가지고 데이터가 기간망에 전송됨을 의미하며 수신측에서는 CDV 보상을 위하여 고속, 고용량의 CDV 보상 버퍼를 요구하게 된다.

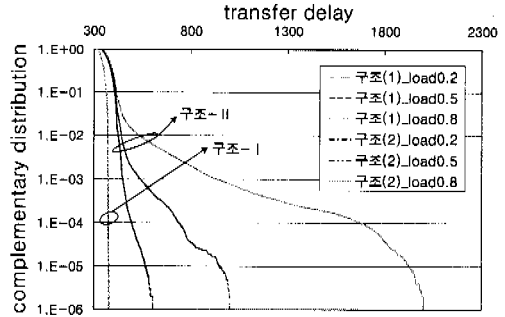


그림 16. 구조-I과 구조-II의 전송 지연 분포 비교

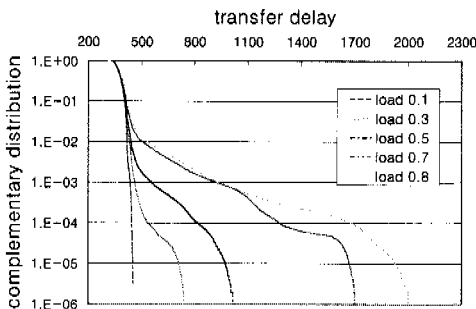


그림 14. 망 부하에 따른 구조-II의 전송 지연 특성

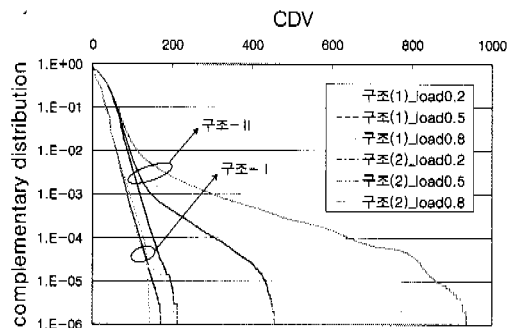


그림 17. 구조-I과 구조-II의 CDV 성능 비교

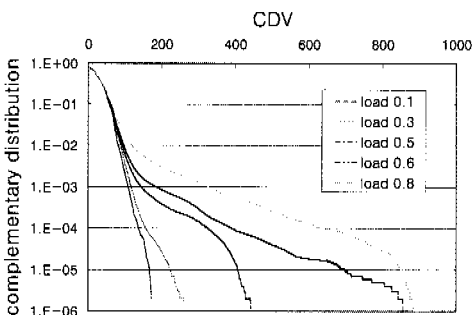


그림 15. 망 부하에 따른 구조-II의 CDV 성능

그림 16과 그림 17은 구조-I과 구조-II에서 망 부하에 따른 전송 지연과 CDV를 비교해서 보여주고 있다. 구조-II는 구조-I에 비해 평균 전송 지연 시간 및 CDV 성능이 크게 떨어짐을 알 수 있다. 이는 구조-II는 구조-I에 비해 동적 슬롯 할당이 제한되므로 전송 동기 지연을 위한 부가적인 오버헤드가 발생하여 MAC 제어가 복잡해지고 융통성이 떨어지기 때문이다.

그림 14는 구조-II의 전송 지연 분포를 보여 주는 것으로 지연이 망 부하에 따라 크게 변화하고 있다. 그림 15는 구조-II의 CDV 분포를 보여 주는 것으로 망 부하에 따라 전송 지연이 크게 변화하면서 CDV도 크게 변하고 900 μ s 정도의 큰 CDV값을 갖게 된다. 이는 구조-II에서는 발생한 트래픽 패턴

표 2는 구조-I과 구조-II에서 망 부하에 따른 평균 전송 지연 값을 비교하여 보여준 것이다. 평균 전송 지연 시간 측면에서도 구조-I이 구조-II에 비해 좋은 성능을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 APON 기반 광 가입자망에서 파장 분할 다중화 기법을 적용하여 대역을 확장한 두

표 2. 구조-I과 구조-II의 평균 전송 지연 시간 비교

입력부하	구조-I (μs)	구조-II (μs)
0.201139	342.745097	375.204093
0.363196	343.024619	377.946991
0.527120	343.274365	378.732389
0.691771	343.562964	383.561454
0.852892	343.810055	385.762079

종류의 WDM-PON 구조에 적합한 MAC 프로토콜을 설계하고 성능 평가를 실시하였다. 구조-I은 광 분기 지점(ODN) 부분에서 파장 채널을 다중화함으로써 각 ONU 그룹이 하나의 파장을 공유하면서 상향 채널을 액세스한다. 구조-II는 ODN에서 물리적 링크 분기만이 이루어지고 각 ONU 그룹은 TDMA 방식으로 링크를 공유하며, 그룹 내 각 ONU에서 고유의 파장으로 전송되는 신호가 하나의 슬롯에 커플링된다. 제안된 MAC 프로토콜은 요구-허락형 전송 방식을 사용하여 제시된 각 구조에서 최대한 동적으로 TDM 슬롯을 할당함으로써 파장 채널의 대역을 효율적으로 이용할 수 있도록 한다. 수치적 방법과 실험적 방법을 통해 구조-I과 구조-II에 대한 MAC 프로토콜 성능을 분석한 결과, 제안한 MAC은 각 구조에 대해 일정한 전송 지연과 CDV를 보장하고 따라서 원래의 트래픽 특성을 잘 유지시켜 줄 수 있다. 하지만 구조-II는 슬롯 할당을 위한 전송 동기 지연이 구조-I보다 크게 발생하고, 동적 채널 액세스 권한이 제한되어 매체 접근 제어 측면에서 융통성이 떨어진다. 결국, 각 파장 별로 독립적인 망을 형성하는 구조-I의 경우 MAC이 간단하고 슬롯을 동적으로 할당하므로 대역의 이용률이 좋아져 전송 지연과 CDV측면에서 더 좋은 성능을 보였다.

Acknowledgement :

This work was supported by Korea Research Foundation under Grant krf-2000-041-E00270.

참 고 문 헌

[1] ITU-T Recommendation G.PONB - Draft D, "ATM PON Specification," April, 1997
 [2] ITU-T Recommendation G.983, "High Speed

Optical Access Systems based on Passive Optical Network (PON) Techniques," 1998.
 [3] G. Van der Plas, I. Van de Voorde, "The evolution of the optical access network and the related technical issues," *SPIE's International Symposium*, Philadelphia, Pennsylvania, pp.22-26 October 1995.
 [4] M. O. Van Deventer et al, "Architectures for 100km 2048split bidirectional SuperPON from ACTS-PLANET", *Proc. SPIE, All-Optical Communication Systems: Architecture, Control, and Network Issues II*, Boston, November 1996.
 [5] J.M.Senior, A.J.Philips, M.S.Leeson, R.Johnson, "Upgrading SuperPON : Next Step for Future Broadband Access Networks," *Proceedings of SPIE Conference*, vol. 2919, pp.260-266, 1996.
 [6] U. Killat, editor. "Access to B-ISDN vis PONs; ATM Communication in Practices". John Wiley & Sons Ltd & B.G. Teubner, 1996.
 [7] F.Panken, "Performance Analysis of the GlobalFIFO MAC Protocol for APONs, Leading to Suggestions for Improvements", *IEEE ICCS/ISPACS'96*, pp.31-35, 1996.
 [8] I. Van de Voorde and C. M. Martin, J. Vandewege and X. Z. Qiu, "The SuperPON Demonstrator: An Exploration of Possible Evolution Paths for Optical Access Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp.74-81, 2000.

소 원 훈(Won-Ho So) 정회원
 한국통신학회 논문지 제 25권 제 1A호 참조
 현재: 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정 재학중

노 선 식(Sun-Sik Roh) 정회원
 한국통신학회 논문지 제 20권 제8호 참조
 현재: 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정 재학중

은 지 속(Jee-Sook Eun) 정회원
 한국통신학회 논문지 제 25권 제 1A호 참조
 현재: 한국전자통신연구원 연구원

