

---

# TWDM PON을 위한 새로운 MAC 프로토콜 및 동적대역할당 방법

한만수\* · 나철훈\*\* · 강성준\*\*

New MAC Protocol and Dynamic Bandwidth Allocation Method for TWDM PON

Man-Soo Han\* · Cheol-Hun Na\*\* · Seong-Jun Kang\*\*

## 요 약

PONs (passive optical networks)은 운용비용이 저렴하고 높은 대역폭을 제공하기 때문에 가입자망에서 각광을 받고 있다. 최근에는 WDM (wavelength-division multiplexing)과 TDM (time-division multiplexing)을 결합한 TWDM PON이 가입자망에서의 새로운 해답으로 여겨지고 있다. 본 논문에서는 TWDM PON에 대한 새로운 MAC (media access control) protocol을 제안한다. 또한 TWDM PON에 대한 새로운 동적대역 할당 방법을 제안하고 성능을 평가한다.

## ABSTRACT

Passive optical networks (PONs) are the emerging solution for access networks since PONs provide high bandwidth and the low operation cost. In recent, the new solution in access networks is TWDM PON which is a mixture of WDM (wavelength-division multiplexing) and TDM (time-division multiplexing). This paper proposes a new MAC (media access control) protocol for TWDM PON. In addition, this paper proposes and evaluates a new dynamic bandwidth allocation method for TWDM PON.

## 키워드

TWDM, PON, MAC, 동적대역 할당

## Key word

TWDM, PON, MAC, Dynamic bandwidth allocation

---

\* 종신회원 : 국립목포대학교(교신저자, mshan@mokpo.ac.kr)  
\*\* 정회원 : 국립목포대학교

접수일자 : 2013. 05. 01  
심사완료일자 : 2013. 05. 24

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.6.1419>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

PONs (passive optical networks)은 운용 비용이 저렴하고 높은 대역폭을 제공하기 때문에 가입자망에서 각광을 받고 있다. 최근 TDM (time-division multiplexing) PON이 많이 설치되고 있으나 단일 채널을 사용하기 때문에 UHD (ultra high-definition) IP TV, VOD (video on demand) 등과 같은 새로운 유형의 서비스에 대해서 충분한 대역폭을 제공하지 못하고 있다. WDM (wavelength-division multiplexing)과 TDM을 결합한 TWDM PON이 가입자망에서 새로운 대안으로 떠오르고 있으며 현재의 가입자망에서 차세대 대용량 가입자망으로의 전환에 대한 해답으로 여겨지고 있다. TDM PON의 대표적인 표준으로는 EPON (Ethernet PON)과 XGPON (10Gbps-capable PON)이 있다 [1-4].

TWDM PON에 대해 많은 연구 결과들이 있었지만 대부분의 연구는 EPON을 확장하여 TWDM PON에 적용한 연구들이 대부분이었다 [5-12]. EPON에 기반한 TWDM PON은 XGPON의 표준과 일치하지 않는 문제점이 있다. EPON 기술은 XGPON 기술과 여러면에서 차이점이 있다. 첫 번째 중요한 차이점은 EPON은 비동기식으로 동작하지만 XGPON은 모든 동작이 동기화되어 있다. XGPON은 기본 단위 시간이 125 μs이며 프레임의 전송 시간도 이 기본 단위 시간이 기준으로 되어 있다. 두 번째 중요한 차이점은 프레임 fragmentation이다. 즉 EPON에서는 하나의 패킷이 한번에 전송되어야만 하지만 XGPON에서는 하나의 패킷이 여러번에 걸쳐서 전송이 가능하다. 따라서 EPON에 기반한 TWDM PON 기술은 XGPON에 기반한 TWDM PON 기술에 그대로 사용할 수 없다. 현재까지 알려진 바로는 XGPON에 기반한 TWDM PON의 MAC (media access control) 프로토콜 및 동적 대역 할당 (DBA: dynamic bandwidth allocation)에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 XGPON 시스템을 기반으로 TWDM PON 시스템을 구성하며 XGPON의 MAC 및 프레임 구조를 확장하여 TWDM PON의 MAC 및 프레임 구조를 제안한다. 또한 제안한 TWDM PON의 MAC 프로토콜을 사용하는 새로운 동적 대역 할당 방법을 제안한다. 그리

고 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 제안한 동적 대역 할당 방법의 성능을 검증한다.

## II. TWDM PON 구조

제안된 TWDM PON은 XGPON 시스템을 4개 사용하여 구성된다. XGPON 시스템은 1개의 OLT (optical line termination)와 다수의 ONU (optical network unit)로 구성된다. XGPON의 현재 표준에서 상향 2.5Gbps, 하향 10Gbps의 속도를 지원하므로 제안된 TWDM PON은 상향 10Gbps, 하향 40Gbps의 속도를 제공한다 [1-4]. TWDM PON은 XGPON 시스템 4개를 단순히 합친 시스템이 아니며 각 ONU는 4개의 하향 wavelength, λ1, λ2, λ3, λ4 중에서 1개의 wavelength를 임의로 사용 가능하며 4개의 상향 wavelength λ5, λ6, λ7, λ8 중에서 1개를 임의로 사용 가능하다. ONU의 상향 및 하향 wavelength 선택은 네트워크 부하 상황과 DBA 결과에 따라 결정된다.

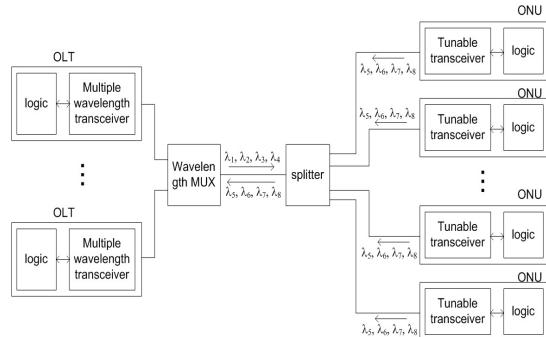


그림 1. TWDM PON 구조  
Fig. 1 TWDM PON architecture

OLT들은 wavelength transceiver를 사용하여 다수의 상향 wavelength 및 다수의 하향 wavelength를 이용하여 ONU와 패킷을 주고받을 수 있다. 각각의 OLT는 상향 및 하향별로 고정된 wavelength를 사용한다. 예를 들면 OLT 1은 하향 λ1, 상향 λ5를 사용한다. 하향 방향으로의 통신에서는 OLT는 각 ONU에 배정된 wavelength를 사용하여 splitter를 통하여 각 ONU에 패킷을 broadcasting한

다. ONU는 전송된 패킷의 port-ID를 확인하여 자신에게 속한 port-ID인 경우에만 해당 패킷을 수용하고 그 외의 경우에는 패킷을 폐기한다.

각 ONU는 OLT로 패킷을 보낼 때 4개의 상향 wavelength  $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8$  중 1개를 사용할 수 있다. 각 ONU는 tunable transceiver를 가지고 있으며 OLT가 정한 하향 wavelength 및 상향 wavelength에 따라 동적으로 wavelength를 사용할 수 있다. 또한 각 ONU는 서비스 클래스별로 3개의 queue를 가지고 있으며 매 단위시간마다 OLT들에게 request를 보낸다. 여기서 request는 하나의 queue의 길이이다. 매 단위시간마다 OLT들은 각 ONU로부터 전송된 request를 바탕으로 DBA를 수행하여 ONU의 queue별로 전송허가량, 전송시간 그리고 전송시 사용할 상향 wavelength를 결정한다.

XGPON 시스템에서 OLT는 매 단위시간 125  $\mu$ s마다 DBA 동작을 수행한다. DBA를 수행한 결과에 따라 각 ONU별로 전송시작시간, 전송량이 결정된다. 제안된 TWDM PON 시스템에서도 OLT들은 매 단위시간 125  $\mu$ s마다 DBA 동작을 수행하고 그 결과를 각 ONU에게 전달한다. 그러나 wavelength가 다수이므로 DBA를 수행할 때는 각 ONU별로 전송시작시간, 전송량, 사용할 wavelength 까지 결정하여야 한다. XGPON 시스템의 경우 DBA 결과를 BWmap (bandwidth map)을 구성하여 ONU에게 전달한다. 제안된 TWDM PON 시스템의 경우에도 BWmap을 구성하여 DBA 결과를 각 ONU에게 전달한다.

### III. MAC 프로토콜 및 DBA

그림 2는 XGPON의 BWmap에서 각 ONU에게 할당된 대역폭을 알려주는 allocation structure를 나타낸다. Allocation structure는 전체가 8 bytes이다 [3]. Start time은 ONU의 전송시작시간을 나타내며 grant size는 ONU의 전송 데이터량을 나타낸다. XGPON에서 데이터는 1 word (4 bytes)를 단위로 전송되고 상향 전송의 경우 125  $\mu$ s에 최대 9720 words (38,880 bytes)를 전송할 수 있다. 따라서 start time과 grant size를 나타내려면 13비트이면 충분하며 각각 3비트씩 낭비되고 있음을 알 수 있다.

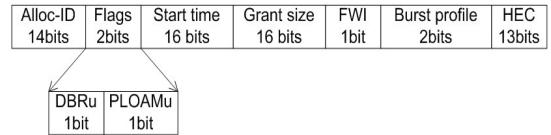


그림 2. XGPON의 allocation structure  
Fig. 2 Allocation structure of XGPON

TWDM PON에서는 XGPON과는 달리 각 ONU가 상향 및 하향 전송에서 사용해야 할 wavelength도 지정되어야 하며 이 정보가 allocation structure 안에 포함되어야 한다. 본 논문에서는 allocation structure의 전체 크기를 8 bytes로 유지하면서 상향 및 하향 wavelength 정보를 포함하는 새로운 TWDM PON의 allocation structure를 그림 3과 같이 제안한다.

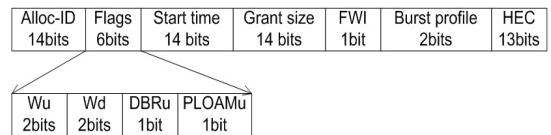


그림 3. 제안된 TWDM PON의 allocation structure  
Fig. 3 Proposed allocation structure of TWDM PON

Start time 및 grant size 필드는 3비트씩이 낭비되고 있으므로 각각 14비트로 줄이고 상향 및 하향 wavelength를 나타내는 Wu 및 Wd 필드에 각각 2비트씩을 사용한다.

이제부터는 TWDM PON의 새로운 DBA 방법에 대하여 설명한다. DBA를 위해 ONU  $j$ 는 두 개의 서비스 변수  $SI(j)$ 와  $AB(j)$ 를 갖는다. 여기서  $SI(j)$ 는 ONU  $j$ 의 서비스 시간간격이며 이때의 단위는 단위시간인 125  $\mu$ s이다. 예를 들면,  $SI(j)=1$ 이면 서비스 간격은 125  $\mu$ s이다.  $AB(j)$ 는 ONU  $j$ 가  $SI(j)$ 동안 최대로 서비스를 받을 수 있는 양이며 단위는 byte이다. 또한 ONU  $j$ 는 두 개의 카운터  $T(j)$ 와  $VB(j)$ 를 갖는다. 카운터  $T(j)$ 는 매 단위시간마다 1씩 감소하며  $T(j)$ 가 만기되면  $SI(j)$ 로 재설정된다. 카운터  $VB(j)$ 는 ONU  $j$ 가  $SI(j)$ 의 시간 동안 서비스를 받을 수 있는 가용 서비스 양을 나타낸다.  $T(j)$ 가 만기되면  $VB(j)$ 는 재설정 과정을 거친다. 본 논문에서는  $VB(j)$ 는 음수 값을 가질 수도 있다.  $VB(j)$ 가 음수이면 ONU  $j$ 가 허용된 서비스 양인  $AB(j)$ 보다 많은 양을  $SI(j)$ 동안 서비스 받았음을 의미한다.  $grant(j)$ 와  $request(j)$ 를 각각 ONU  $j$ 의 grant

크기와 request 크기라고 하자.

DBA 방법의 설명의 편의를 위해 OLT의 개수가 2개라고 가정한다. OLT가 4개인 경우로의 확장은 자명하므로 간략성을 위해 생략하기로 한다. 변수  $k$ 를 상향 wavelength를 나타낸다고 하자. 즉,  $k=1$ 이면  $\lambda_5$ 이고  $k=2$ 이면  $\lambda_6$ 이다. 그리고 상향 wavelength의 동적 할당을 위해 두개의 카운터  $W(1)$ 과  $W(2)$ 를 각각의 상향 wavelength  $k=1, 2$  별로 둔다. DBA의 시작 초기에  $W(k)$ 는 상향 wavelength  $k$ 의 최대 서비스 바이트 값으로 초기화 된다. 예를 들어 상향 wavelength  $k$ 의 대역폭이 2.5 Gbps이면 최대 서비스 바이트 값은 38,880 바이트이다. DBA 과정에서 ONU  $j$ 에 wavelength  $k$ 가 할당되었다면 카운터  $W(k)$ 는  $grant(j)$  만큼 감소된다.

상향 wavelength의 동적 할당은 ONU  $j$ 의 grant 값을 결정하기 전에  $W(k)$  값을 비교하여  $W(1) \geq W(2)$ 이면  $k=1$ 이 할당된다. 그 외의 경우는  $k=2$ 가 할당된다.  $VB(j) \geq 0$ 이면 ONU  $j$ 의 grant 값은  $request(j), AB(j), W(k)$  중의 최소값이 된다. 즉,  $grant(j) = \min(request(j), AB(j), W(k))$ . 그리고 각각의 카운터  $VB(j)$ 와  $W(k)$  그리고  $request(j)$  값은  $grant(j)$  만큼 감소한다. grant 크기 결정에 대한 pseudo code는 다음과 같다.

```

if ( $VB(j) \geq 0$ ){
     $grant(j) = \min(request(j), AB(j), W(k));$ 
     $VB(j) = VB(j) - grant(j);$ 
     $request(j) = request(j) - grant(j);$ 
     $W(k) = W(k) - grant(j);$ 
}

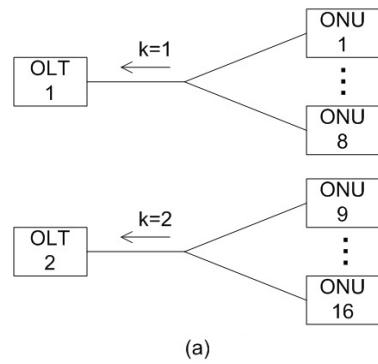
```

카운터  $VB(j)$ 의 생성과정은 XGPON의 DBA 방법인 efficient bandwidth utilization (EBU) [13]의  $VB(j)$  생성과정을 사용한다. 또한 간략성을 위해 EBU 방법의 colorless grant scheme은 적용하지 않는다. EBU 방법의 colorless grant scheme은 DBA 수행 후 남은 잔여 대역폭을 각 ONU에게 균등하게 배분하는 방법이다.

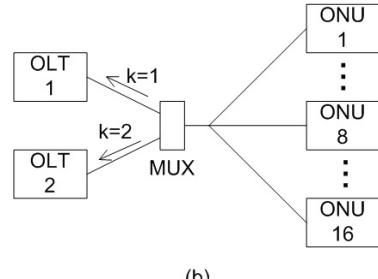
#### IV. 성능평가

이 절에서는 제안된 DBA 방법의 성능을 EBU 방법의 성능과 비교한다. EBU 방법은 XGPON 시스템에서

만 사용이 가능하므로 성능비교를 위해 그림 4의 두 개의 시스템을 사용한다. 그림 4에서 시스템 A는 두 개의 XGPON 시스템으로 구성되며 각 XGPON 시스템은 1개의 OLT와 8개의 ONU로 구성된다. 시스템 B는 TWDM PON이며 2개의 OLT와 16개의 ONU로 구성된다. 각 시스템에서 각각의 상향 wavelength의 대역폭은 2.5 Gbps이다.



(a)



(b)

그림 4. 시뮬레이션 시스템 (a) 시스템 A (b) 시스템 B  
Fig. 4 Simulation systems (a) systems A (b) systems B

OLT와 ONU간의 거리는 20 Km이며 각 ONU의 버퍼 크기는 1 Mbyte, 각 ONU의 입력 대역폭은 400 Mbps라고 가정한다. 각 ONU에 대해 동일한 상향 서비스 대역폭을 가정한다. 따라서  $2.5 \text{ Gbps}/8 = 312 \text{ Mbps}$ 므로  $AB(j) = 31248, SI(j) = 5$ 가 된다.

ONU의 입력 트래픽은 self-similar 트래픽 모델을 사용한다. 각 ONU는 다수의 Pareto 분포 on-off 프로세스들로부터 입력을 받는다. 이 때 on 및 off 간격에 대한 shape 변수는 각각 1.4 및 1.2로 설정되며 이 경우에 Hurst parameter 값은 0.8이 된다. 패킷의 크기는 tri-modal 분포를 따르며 패킷의 크기는 64, 500, 1500 byte이고 비율은

각각 0.6, 0.2, 0.2이다. 본 논문에서는 실제 트래픽에 가깝게 불균형 트래픽을 가정한다. ONU 1,...,8은 입력 rate가 0.6으로 고정되어 있으며 ONU 9,...,16은 동일한 입력 rate를 가지며 0.1에서 0.99까지 변화한다고 가정한다. 각각의 입력 rate 조합에 대해 ONU에서 OLT로 전송한 패킷의 개수가 109개가 될 때까지 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 5는 각 방법에 대한 평균 시지연을 보여준다. 제안된 DBA 방법은 상향 wavelength를 동적으로 할당할 수 있으므로 입력 rate가 높은 ONU들은 입력 rate가 낮은 ONU들이 사용되지 않는 서비스 대역폭을 사용할 수 있다. 그 결과 제안된 DBA 방법이 EBU 방법보다 우수함을 그림 5에서 알 수 있다.

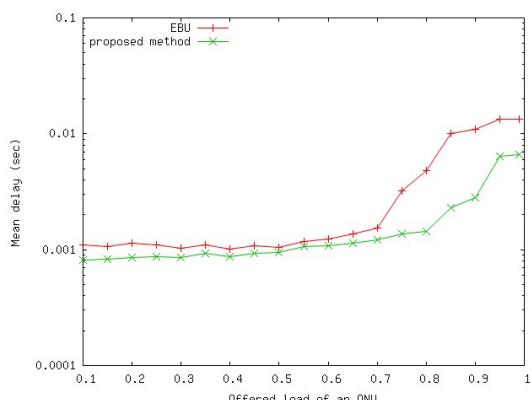


그림 5. 패킷의 평균시지연  
Fig. 5 Mean delay of packets

## V. 결 론

본 논문에서는 XGPON 기술을 기반으로 동작하는 TWDM PON 시스템의 새로운 MAC allocation structure를 제안하였다. 또한 TWDM PON의 새로운 동적대역 할당 방법을 제안하였다. 동적대역 할당을 수행하여 ONU별로 전송허가 시간, 전송량 및 전송에 사용할 wavelength를 결정하고 그 결과를 allocation structure를 사용하여 각 ONU에게 전달한다. 제안된 동적대역 할당 방법의 성능을 시뮬레이션으로 검증하였다.

## 참고문헌

- [1] ITU-T Rec. G.987.1, “10 Gigabit-capable passive optical network (XG-PON): General requirements,” 2010.
- [2] ITU-T Rec. G.984.3, “Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification,” 2008.
- [3] ITU-T Rec. G.987.3 Rev.2, “10- Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) specifications,” 2010.
- [4] ITU-T Rec. G.989.2 Draft, “40- Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification,” 2012.
- [5] J. Zhang and N. Ansari, “Scheduling Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks With Nonzero Laser Tuning Time,” IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, vol. 19, no. 4, pp. 1014-1027, 2011.
- [6] A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, “Trade-off between End-to-End Reliable and Cost- Effective TDMA/WDM Passive Optical Networks,” ICUMT 2012, pp. 691-697, 2012.
- [7] A. Dixit, B. Lannoo, G. Das, D. Colle, M. Pickavet, and P.t Demeester, “Flexibility Evaluation of Hybrid WDM/TDM PONs,” IEEE ANTS 2011, pp. 1-6, 2011.
- [8] A. R. Dhaini, C. M. Assi, and A. Shami, “Quality of Service in TDM/WDM Ethernet Passive Optical Networks (EPONs),” ISCC 2006, pp. 616-621, 2006.
- [9] M. P. McGarry et. al., “Just-in-Time Scheduling for Multichannel EPONs,” Journal of Lightwave Technology, vol. 26, no. 10, pp. 1202-1215, 2008.
- [10] L. Meng et. al., “A Joint Transmission Grant Scheduling and Wavelength Assignment in Multichannel SG-EPON,” Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 21, pp. 4781-4792, 2009.
- [11] G. Das et.al., “A New Architecture and MAC Protocol for Fully Flexible Hybrid WDM/TDM PON,” ECOC 2009, pp. 20-24, 2009.

- [12] A. R. Dhaini et. al., "Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation in Hybrid TDM/WDM EPON Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 4781-4792, pp. 277-286, 2007.
- [13] M. S. Han, H. Yoo, and D. S. Lee, "Development of Efficient Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for XGPON," *ETRI Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 18-26. 2013.

### 저자소개



강성준(Seong-Jun Kang)

1978년 아주대학교 전자공학과  
(공학사)  
1981년 연세대학교 대학원  
전자공학과(공학석사)

1987년 (불)랑그독과학기술대 D.E.A.  
1990년 (불)랑그독과학기술대 Doctorat (Ph. D).  
1980년 ~ 1994년 한국전자통신연구원 책임연구원,  
과제책임자.  
1994년 ~ 현재 국립목포대학교 정보통신과 교수.  
※ 관심분야: 디지털 통신시스템. 적외선 영상기술,  
적외선 통신



한만수(Man-Soo Han)

1988년 KAIST 전기및전자공학과  
(공학사)  
1992년 KAIST 전기및전자공학과  
(공학석사)

1999년 KAIST 전기및전자공학과(공학박사)  
1999년 ~ 2003년 한국전자통신연구원 선임연구원  
2003년 ~ 현재 국립목포대학교 정보통신과 교수  
※ 관심분야: 광통신, 초고속네트워크, 스케줄링



나철훈(Cheol-Hun Na)

1985년 전남대학교 전기공학과  
(공학사)  
1987년 전남대학교 전기공학과  
(공학석사)

1994년 전남대학교 전기공학과(공학박사)  
1995년 ~ 현재 국립목포대학교 정보통신과 교수  
※ 관심분야: Medical Image Processing, 통신시스템,  
Digital Image Processing