

# 자원의 동적 능력 향상을 위한 경제적인 WDM-PON 구조

준희원 김 효 원\*, 정희원 황 준 호\*\*, 종신회원 유 명 식\*\*\*

## A Cost-Effective WDM-PON Architecture for Dynamic Resource Provision

Hyowon Kim\* *Associate Member*, Junho Hwang\*\* *Regular Member*,  
Myungsik Yoo\*\*\* *Lifelong Member*

요 약

현재 WDM-PON 기술은 FTTH 구축을 위해 가장 핵심적인 가입자망 기술로 인식되고 있다. 하지만 시스템 비용의 많은 부분을 차지하는 광 송수신기 및 RN과 밀접한 관계가 있는 WDM-PON 시스템 자원의 고정적인 관리 방법은 비용 대비 시스템 자원 효율성에 한계점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 자원의 동적 관리가 가능하면서 이를 위한 시스템의 구축비용 최소화할 수 있는 WDM-PON 구조를 제안한다. 이를 위해 ONU의 논리그룹화 및 논리그룹 간 파장 공유를 위한 OLT, ONU 그리고 RN의 구조를 설계하고, 이를 기반으로 탄력적인 동적 자원 관리를 위한 동적 자원 할당 기법을 제안한다. 이와 같은 WDM-PON 구조의 성능 분석을 위해 모의실험을 수행하였고, 그 결과 논리그룹의 크기와 시스템 구축비용의 상관관계 및 논리그룹 크기와 동적 자원 할당 능력의 상관관계를 도출할 수 있었으며, 자원 관리 기법의 동적 자원 할당 능력과 공정성 유지 능력을 확인할 수 있었다.

**Key Words :** WDM-PON, 시스템 구축비용, 동적 자원, 논리그룹, 대역폭 보상

ABSTRACT

WDM-PON has been receiving much attention as a key technology to FTTH. As the cost of WDM-PON heavily depends on the number of transceivers implemented at ONU, one of its shortcomings comes from the fixed provision of wavelength resource, which is tightly coupled with costly transceivers. In this paper, we propose a cost-effective WDM-PON architecture for dynamic resource provision. The proposed architecture is based on hierarchical grouping of multiple ONUs into a logical group and hierarchical sharing the resource. For high utilization of dynamic resource, the dynamic resource allocation algorithm is also proposed. We analyze the system efficiency in term of dynamism of system resource and system cost. We also verify that the proposed resource allocation algorithm achieves a high dynamism on resource allocation, and at the same time maintains the fairness between ONUs.

### I. 서 론

최근 고품질의 디지털 융합형 서비스에 대한 수

요가 급증하면서 통신 대역폭은 수십 Mbps급 이상의 보장 속도를 요구하기에 이르렀다. 이러한 사용자의 요구 충족을 위해 각 가정까지 광케이블을 연

※ 본 연구는 정보통신부 정보통신연구진흥원에서 지원하고 있는 정보통신기초연구지원사업의 연구결과입니다(06-정책-121).

\* 송실대학교 정보통신전자공학부 석사과정, \*\*송실대학교 정보통신전자공학부 박사과정

\*\*\* 송실대학교 정보통신전자공학부 조교수 (myoo@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-04-185, 접수일자 : 2007년 4월 20일, 최종논문접수일자 : 2007년 6월 22일

결하여 가입자당 최소 100Mbps의 대역폭을 보장하는 FTTH(Fiber To The Home) 기술에 대한 시장의 수요가 점차 증가하고 있다. 이러한 FTTH 구축을 위해 가장 핵심적인 기술로 인식되고 있는 것이 PON(Passive Optical Network)이다. 특히 WDM(Wavelength Division Multiplexing)-PON은 안정적인 망운용이 가능하고, 가입자당 높은 대역폭을 제공할 수 있어 FTTH 구축을 위한 궁극적인 기술로 주목 받고 있다<sup>1)</sup>.

WDM-PON은 일반적으로 그림 1과 같이 하나의 OLT(Optical Line Terminal)와 RN(Remote Node), 그리고 다수의 ONU(Optical Network Unit)가 트리 형태의 구조를 가진다. 이러한 구조에서는 OLT와 ONU는 파장 단위로 독립된 송수신기 쌍을 통해 논리적으로 점대점의 관계로 연결된다. 이러한 WDM-PON은 대규모 가입자를 수용할 수 있으며 전용선 수준의 대역폭 및 보안성을 보장할 수 있다. 또한 높은 대역폭을 이용한 고품질의 다양한 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 이에 대한 QoS 보장이 가능하다<sup>2)</sup>.

이러한 고품질의 멀티미디어 서비스 및 QoS 지원을 위해서는 가입자망 내 제한적인 자원을 얼마나 효과적으로 사용하느냐가 매우 중요하다. 하지만 기존의 WDM-PON은 ONU별로 고정된 파장을 사용하였는데, 이는 사용자가 요구하는 대역폭의 급격한 증가나 제공 서비스의 최소 요구 대역폭의 변화가 발생할 경우 심각한 자원 비효율성 문제를 야기할 수 있다. 또한 자원의 비효율성 문제를 해결하기 위해서는 기존의 광 가입자망에 자원의 동적 능력을 부여할 경우 막대한 시스템 구축비용의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 WDM-PON기반의 광 가입자망 설계 시 동적 자원 관리 능력과 시스템 구축비용의 상관관계를 반드시 고려하여야 한다. 이에

본 논문에서는 동적 자원 관리가 가능하면서 동시에 시스템 구축비용을 최소화할 수 있는 WDM-PON 구조를 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 본 논문에서 다루고자 하는 문제를 제시하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조를 설명한다. IV장에서는 제안된 WDM-PON 구조에 적합한 자원관리기법을 설명한다. 이어 V장에서는 본 논문에서 제안하는 WDM-PON의 성능 분석을 위한 모의실험 환경과 모의실험을 통해 도출된 결과를 분석한다. 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 문제 제기

기존 WDM-PON 시스템 구조는 ONU별로 독립적이며 고정적으로 할당된 파장을 사용하였다. 대표적으로 CPON<sup>3)</sup>(Composite PON), LARNET<sup>4)</sup>(a Local Access Router Network), RITE-Net<sup>5)</sup>(Remote Interrogation of Terminal Network) 등이 있는데, 고정적인 파장을 사용할 경우 시스템 구성의 단순화와 이에 따른 구축비용의 절감 효과를 얻을 수 있다. 그러나 동적 자원 관리 능력이 없기 때문에 급격하게 변화하는 트래픽에 대처 능력이 현저히 떨어진다.

이러한 고정 파장 사용의 문제점을 해결하기 위해 Shared-Wavelength WDM-PON<sup>6)</sup>이 연구되었다. Shared-Wavelength WDM-PON에서의 자원은 ONU 별 할당된 고정 자원과 ONU 간 공유가 가능한 유동 자원으로 나눌 수 있는데, 고정 자원을 위해서는 RN에서 고가의 AWG(Arrayed Wavelength Grating)를 필요로 하며, 유동 자원을 공유하기 위해서 각 ONU는 해당 파장에 대한 송수신기를 갖추어야 한다. 따라서 시스템의 동적 능력을 증대시키기 위해서는 모든 ONU에 공유 파장에 대한 송수신기가 설치되어야 할 뿐만 아니라 여러 파장을 다중화하여 OLT로 전송하기 위한 새로운 RN이 설계되어야 하기 때문에 직접적으로 시스템 구축비용의 증가를 야기한다. 이러한 시스템 구축비용과 자원의 동적 능력의 상관관계를 분석하기 위하여 다음과 같은 파라미터를 정의하였다.

- $W^T$  : WDM-PON 시스템에 사용되는 전체 파장 수
- $ONU^T$  : ONU의 수
- $ONU_{COST}$  : ONU에 설치되는 송수신기의 수
- $SYS_{COST}$  : 시스템 전체에 설치되는 송수신기의 수

이러한 정의를 이용하여 두 요소간 상관관계를

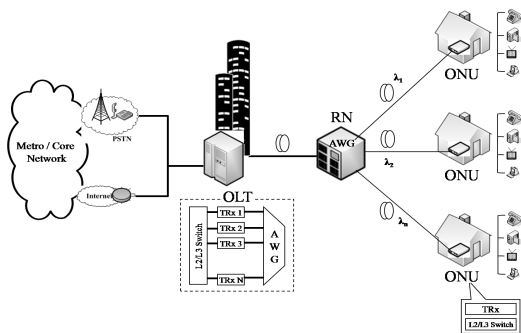


그림 1. 일반적인 WDM-PON 망 구성도

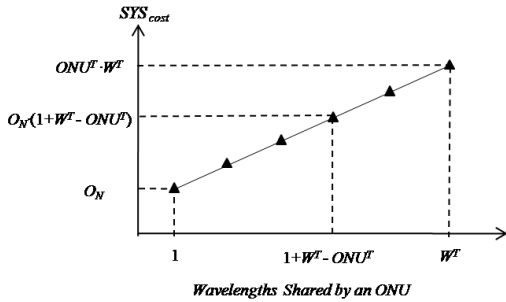


그림 2. 자원의 동적 능력과 시스템구축비용의 상관관계

보다 자세히 살펴보면, 만일 한 ONU가 하나의 파장만을 사용할 수 있는 경우  $ONU_{COST}=1$ 이 되고  $SYS_{COST}=1 \times ONU^T$ 이 되며, 자원의 동적 능력은 '1'이 된다. 이와 달리, 한 ONU가 모든 파장을 공유하여 사용할 수 있게 되면  $ONU_{COST}=W^T$ 이 되고,  $SYS_{COST}=W^T \times ONU^T$ 이 되며, 자원의 동적 능력은 ' $W^T$ '가 된다. 이러한 개념을 Shared WDM-PON에 적용할 경우,  $1 \times ONU^T$ 개의 고정 파장과  $W^T-ONU^T$ 개의 유동 파장이 존재하므로  $ONU_{COST}=1+(W^T-ONU^T)$ 이 되고  $SYS_{COST}=[1+(W^T-ONU^T)] \times ONU^T$ 이 된다. 위와 같은 자원의 동적 능력과 시스템 구축비용의 상관관계는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

이 때 자원의 동적 능력이 ' $W^T$ '가 되는 경우를 가정하고, 시스템을 구축한다면 최악의 경우 '1'의 자원 동적 능력을 갖는 시스템보다 매우 높은 구축비용이 요구되고, 상황에 따라 더욱 심각한 자원의 낭비 현상이 초래될 수 있다. 또한 ' $W^T$ '의 값이 커질 경우 RN 및 ONU 내부의 장치에서 발생하는 물리적인 문제점 역시 간과할 수 없다. 따라서 자원의 동적 능력을 갖는 동시에 시스템 구축비용을 절감할 수 있는 방법에 대한 연구가 절실히 요구된다. 이에 본 논문에서는 다수의 ONU들을 논리적으로 그룹화한 논리 그룹의 개념을 사용하여 자원에 대한 동적 관리 능력을 증대시키는 동시에 시스템 구축비용을 절감할 수 있는 WDM-PON 구조를 제안한다.

### III. WDM-PON 시스템 구조

#### 3.1 ONU의 계층적 그룹화

본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조는 시스템에 연결되는 다수 ONU들이 동적으로 자원을 할당받기 위하여 논리 그룹 단위로 운용된다. 이때 논

리그룹은 인접한 지리적 위치에 존재하는 ONU들로 구성된다. 논리그룹을 구성하는 ONU의 수는 동일하지 않을 수도 있지만 본 논문에서는 논리그룹의 크기는 모두 동일하다고 가정하였다. 동일한 논리그룹에 속한 ONU들은 논리그룹에 할당된 파장들을 공유하여 사용한다. 또한 논리그룹의 계층적 그룹화를 통하여 논리그룹 간 일부의 파장을 공유하여 사용할 수 있다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조에서 ONU의 계층적 그룹화를 설명하고 있다.

본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조의 시스템 구축비용 분석을 위해 다음과 같은 정의를 한다. 이 때, 제안된 WDM-PON 시스템은 총  $H(=1, \dots, h)$ 의 논리그룹 계층을 갖는다고 가정하였다.

- $LGS^1$ : 계층 1의 논리그룹 크기
- $LGN^1$ : 계층 1의 논리그룹 수(= $ONU^T/LGS^1$ )
- $LGN^h$ : 계층 h의 논리그룹 수  
(= $LGN^{h-1}/2=ONU^T/[LGS^1 \times 2^{h-1}]$ )
- $H$ : 시스템의 총 계층수  
 $H=1+\log_2 LGN^1=1+\log_2(ONU^T/LGS^1)$
- $W_{SH}$ : 논리그룹 사이에 공유되는 파장 수(= $constant$ )
- $W^1$ : 계층 1의 총 파장 수  
(= $W_{SH} \times LGN^1=W_{SH} \times (ONU^T/LGS^1)$ )
- $W^h$ : 계층 h의 총 파장 수  
(= $W_{SH} \times LGN^h=W_{SH} \times (ONU^T/[LGS^1 \times 2^{h-1}])$ )
- $W^T$ :  $W^1+W^2+\dots+W^h=\sum_{i=1}^h W^i=\sum_{i=1}^h W_{SH} \times \frac{ONU^T}{LGS^1 \times 2^{i-1}}$
- $W_{ONU}$ : 한 ONU가 사용 가능한 파장 수(= $W_{SH} \times H$ )

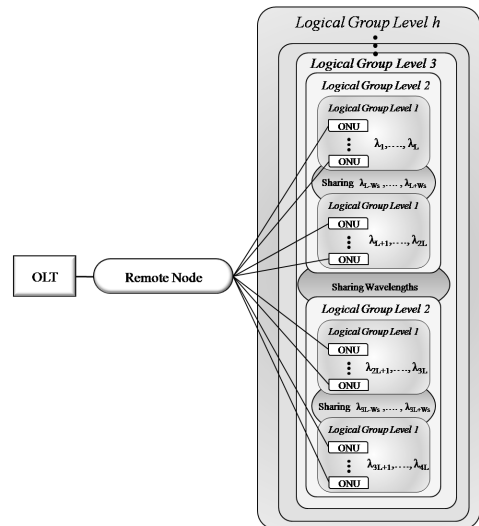


그림 3. 제안하는 WDM-PON 시스템 구조에서 ONU의 계층적 그룹화 개념도

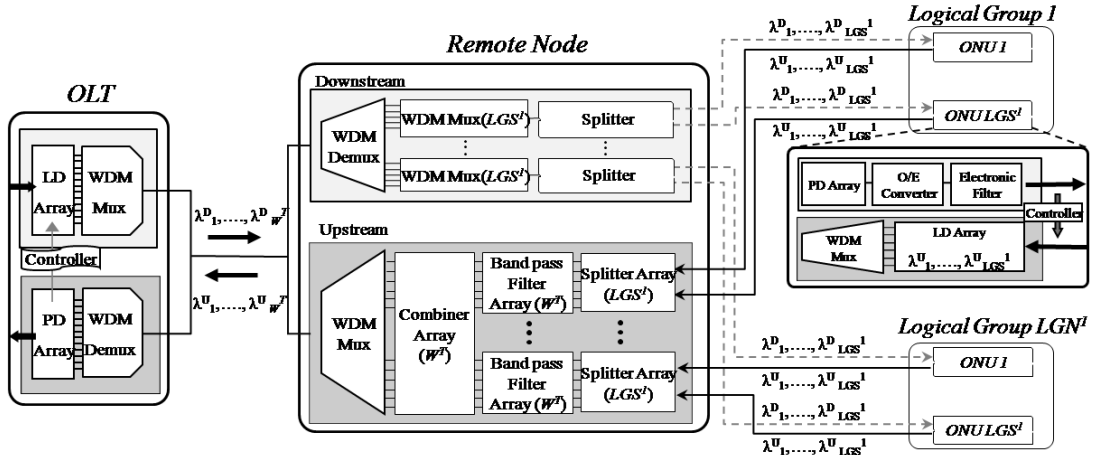


그림 4. 제안하는 WDM-PON 시스템에서 OLT, RN, ONU의 내부 구조 및 연결 관계

제안된 WDM-PON 시스템은 계층적 논리그룹화에 의해 논리그룹 계층  $H$ 와  $LGS^t$ 의 논리그룹 크기를 가지며,  $W_{SH}$ 의 파장을 각 논리그룹 계층 사이에 공유하는 시스템에서, 시스템 전체의 총 계층 수  $H$ 는 계층 1의 논리그룹 크기에 의해 결정된다. 이러한 논리그룹 계층화는 계층이 높아질수록 각 논리그룹 계층에서의 논리그룹의 수를 감소시킨다. 따라서 시스템 구축비용을 시스템 구축에 소요되는 송수신기라 가정한다면, 제안된 WDM-PON 시스템의 최대 구축비용과 자원의 동적 능력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 ONU_{COST} &= W_{ONU} = W_{SH} \times H \\
 &= W_{SH} \times [1 + \log_2(ONU^T / LGS^t)] \\
 SYS_{COST} &= W_{ONU} \times ONU^T
 \end{aligned}$$

결과적으로 시스템 구축비용과 자원의 동적 능력은 공유 파장  $W_{SH}$ 와 논리그룹의 계층수  $H$ 의 영향을 받는다. 논리그룹 크기  $LGS^t$ 의 계층적 논리그룹을 가질 경우와 계층이 없이 논리그룹의 크기가  $2 \times LGS^t$ 이 되는 경우의 시스템 구축비용 대비 자원의 동적 능력을 비교해보면, 논리그룹의 계층수가 증가할수록 시스템 구축비용을 감소시키고 자원의 동적 능력을 증가시켜 자원에 대한 효율성을 높일 수 있다. 이와 더불어 논리그룹간 공유되는 파장 수의 조절을 통해 자원의 동적 능력을 극대화시킬 수 있다.

### 3.2 WDM-PON의 설계와 상하향 전송 방법

본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조의 데이터 전송 기법은 하향 전송과 상향 전송으로 나누어진

다. 그림 4는 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조의 구성요소 및 연결 관계를 도시하고 있다.

먼저, OLT에서 ONU로 데이터를 전송하는 하향 전송의 경우 브로드캐스트(Broadcast)기법을 사용한다. 이를 위해 OLT는 ONU로 보낼 데이터를  $W^T$ 개의 독립된 파장으로 나누어 변조하고, 하나의 광섬유를 통해 다중화된 신호로 RN으로 전송한다. OLT로부터 전송된 신호가 RN에 도착하게 되면  $W^T$ 개의 파장은 역다중화기를 통해 각 논리그룹으로 전송될 파장별로 분리되어 다시 다중화된다. 이렇게 나뉜 파장들은 수동형 광 전력 분배기를 통하여 각 ONU로 브로드캐스트 된다. 끝으로 ONU에 전달된 광 신호는 파장별 수신기 및 광전 변환기를 통과한 후 전기적 신호로 변환되고, 각 ONU의 ID에 해당되는 데이터만이 선별되어 최종 사용자에게 전달된다.

상향 전송에 있어서 각 ONU는 Request/Grant 메시지를 주고받아 OLT로부터 할당 받은 파장을 통해 유니캐스트(Unicast)기법으로 이루어진다. 각 ONU에서 전송된 파장 신호는 RN에서 같은 파장 단위로 TDM 슬롯이 결합되어야 한다. 이를 위해 RN에서는 논리그룹마다  $LGS^t$ 개의 수동형 광 전력 분배기를 통하여 ONU로부터 입력되는 파장 다중화된 신호를 분리하고, 각 파장별 필터를 통과한 후, 수동형 광 전력 결합기를 통해 TDM 슬롯을 결합하는 과정으로 이어진다. TDM 슬롯 결합이 완료된 파장별 신호는 다중화기를 통과하여 다시 한 번 다중화되고, 최종적으로 하나의 광섬유를 통해 OLT로 전송된다. 제안된 구조에서의 RN은 상향 전송 및 하향 전송에 있어서 많은 분기 수 및 광 신호의 장

치 삽입으로 인해 신호 세기 감쇄가 발생할 수 있는데, 이는 RN 앞단에 광 증폭기(OA : Optical Amplifier)를 설치함으로써 신호 세기 감쇄 문제를 해결할 수 있다.

#### IV. 자원 관리 기법

본 논문에서 제안하는 자원 관리 기법은 WDM-PON 구조에서 시스템이 가지고 있는 자원의 효율성을 높이는데 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 계층적 논리그룹 단위로 고정된 자원을 그룹내 ONU들에게 동적으로 할당함으로써 유동 자원에 대한 효율성을 극대화 시킬 수 있다. 본 논문에서 제안하는 동적 대역 할당 기법은 각 ONU에서 OLT로 전송되는 REPORT 메시지 내에 각 ONU의 큐 길이에 대한 정보를 포함하고 있다. OLT는 이 정보를 근거로 동적 대역 할당 기법을 통해 각 ONU에게 전송되는 GATE 메시지에 파장 및 TDM 슬롯 할당 정보를 저장하여 전송한다. 그림 5는 본 논문에서 제안하는 자원 관리 기법을 위한 MPCP(Multi-point Control Protocol)를 나타내고 있다.

본 논문에서 제안된 동적 파장 및 대역 할당 기법은 기존 Limited 기법<sup>[7]</sup>을 기초로 한다. 제안된 대역 할당 기법은 대역폭 보상 알고리즘에 의한 동적 최대 할당 대역폭  $W_{Amaz}^{[n][s]}$  을 사용하여 각 ONU의 요청 대역폭을 최대한 수용함과 동시에 ONU간에 대역폭 할당의 공정성을 유지하고 이를 통해 특정 ONU의 대역폭 독점을 방지한다. 본 논문에서 제안하는 대역 할당 기법 설명을 위해 먼저 다음과 같이 파라미터들을 정의한다.

- $[n]$  : 논리그룹 (1, ...,  $L_N$ )
- $[s]$  : ONU (1, ...,  $L_S$ )
- $avg\_QL^{[n][s]}[t]$  : 사이클  $[t]$ 에서 ONU <sup>$[n][s]$</sup> 의 가중치 평균에 의한 큐 길이

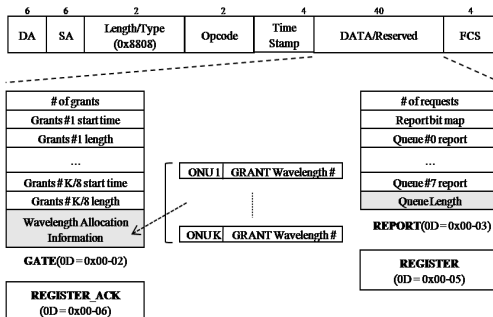


그림 5. MPCP 메시지 형식

- $QL^{[n][s]}[t]$  : 사이클  $[t]$ 에서 ONU <sup>$[n][s]$</sup> 의 큐 길이
- $CL$ (Compensation Level) : 대역폭 보상이 요구되는 ONU의 우선 순위를 나타내며,  $CL2 > CL1 > CL0$ 로 우선순위가 정해짐
- $Init_{BW}$  :  $Capacity \times (Cycle\ Time - \sum Guard\ Time)$
- $Extra\_BW[t]$  : 사이클  $[t]$ 에서 남아 있는 대역폭  
 $(= Init_{BW} - \sum W_{Amaz}^{CL1\ CL2[n][s]}[t+1])$

사이클  $[t]$ 에서, OLT는 ONU <sup>$[n][s]$</sup> 로부터 REPORT 메시지를 수신하게 되면 그림 6과 같은 과정을 통해 GATE 메시지를 송신한다. 그림 6에서 OLT가 ONU로부터 REPORT 메시지를 수신하게 될 때 가중치 평균에 의한 각 ONU별 평균 큐 길이는 다음과 같이 계산된다.

$$avg\_QL^{[n][s]}[t] = (1 - \alpha) \times avg\_QL^{[n][s]}[t-1] + \alpha \times QL^{[n][s]}[t] \quad (1)$$

다음 사이클  $[t+1]$ 에서 각 ONU의 대역폭을 할당하기 위해 사용되는  $W_{Amaz}^{[n][s]}[t+1]$ 은 논리그룹에 속한 마지막 ONU의 REPORT 메시지를 수신하게 될 때, 대역폭 보상 알고리즘에 의해 계산된다. 대역폭 보상 알고리즘은 임의의 세 사이클 시간동안 ONU가 할당 받는 평균 대역폭이  $L_{MAX}$ 가 되도록 사이클  $[t+1]$ 에서의 동적 최대 할당 대역폭을 결정한다.

대역폭 보상 알고리즘은 대역폭 보상에 있어 ONU들 사이에 우선순위를 부여한다. 이러한 방법은 대역폭 보상이 필요한 ONU들에 대해서 우선적으로 동적 최대 할당 대역폭을 설정함으로써 특정 ONU의 대역폭 독점을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 다른 ONU들과의 대역폭 할당에 있어서의 공정성을 제공할 수 있다. 대역폭 보상 알고리즘을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

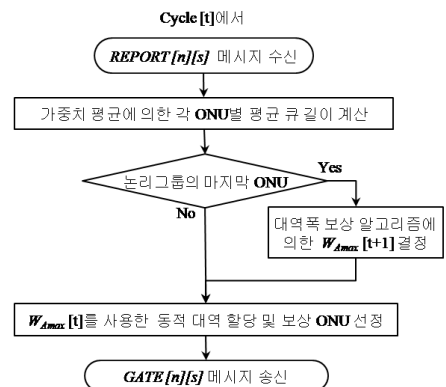


그림 6. OLT 대역 할당 흐름도



- ONU의 보상 우선순위에 따른  $W_{Amax}^{[n][s]}$  계산
    - $ONU_{CL2}$ 의 동적 최대 할당 대역폭 계산  
 If ( $Extra\_BW[t] \geq 2L_{MAX}$ )  
 $- W_{Amax}^{CL2[n][s]}[t+1] = 2L_{MAX} - grant\ size^{[n][s]}[t]$   
 - 'CL2' → 'CLO'
    - else  
 $- W_{Amax}^{CL2[n][s]}[t+1] = Extra\_BW[t]$   
 - 'CL2' → 'CLI'
  - $ONU_{CLI}$ 의 동적 최대 할당 대역폭 계산  
 $W_{Amax}^{CL1[n][s]}[t+1] = L_{MAX}$
  - $ONU_{CLO}$ 의 동적 최대 할당 대역폭 계산  
 $W_{Amax}^{CLO[n][s]}[t+1] = \frac{avg\_QL^{CLO[n][s]}[t]}{\sum avg\_QL^{CLO[n][s]}[t]} \times Extra\_BW[t]$
- \*'CLI'과 'CLO'인 ONU의 보상 우선순위는 대역할당 시 결정함

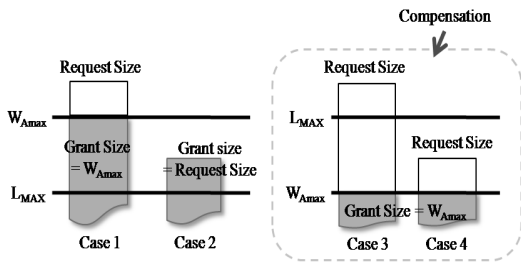


그림 7. 대역폭 보상 예

그림 7은 대역폭 보상이 요구되는 ONU를 선정하는 기준을 나타내고 있다. 대역폭 보상이 필요한 ONU는 해당 ONU가  $L_{MAX} > W_{Amax}$  일 때, ONU의 대역폭 요청량이  $W_{Amax}$ 보다 큰 ONU이다. 그림 7에서 Case 3,4가 대역폭 보상이 필요한 ONU를 나타낸다. 대역폭 보상이 요구되는 ONU는 대역 할당 시에 보상 우선순위가 한 단계씩 상향 조정(CLO → CLI 또는 CLI → CL2)되며, 대역폭 보상 알고리즘에 의해 대역폭을 보상 받을 수 있다. 이 때  $L_{MAX}$ 는 Limited 기법에서의 고정된 최대 할당 대역폭을 의미하고, 이것은 각 ONU들이 한 사이클 시간에 평균적으로 보장 받을 수 있는 상향 전송 대역폭의 크기로 재해석될 수 있다.

### V. 성능 분석 및 모의실험

본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조의 성능

평가를 위하여 논리그룹의 크기에 따른 시스템의 상대적 구축비용과 동적 자원 할당 능력의 관계를 분석하고, 제안된 동적자원 할당 기법의 성능 평가를 위해 C++기반의 모의실험 환경을 구축하여 자원의 동적 능력과 공평성 유지 능력을 평가하였다.

표 1은 시스템 구축비용 산출을 위한 RN 및 ONU에서 사용되는 장치들의 상대적인 소자 가격을 나타낸다. 각 장치의 상대적인 비용은 16×16 크기의 AWG를 기준으로 산출된 것이며<sup>[8][9]</sup>, 현재 상용화된 기술로는 AWG를 최대 128×128 크기까지 확장할 수 있다. 이때, 광섬유 설치비용  $Fiber_C$ 는 CWDM(Coarse WDM) 시스템을 기준으로 하나의 광섬유에 8개의 파장을 다중화하는데 소요되는 비용이다.

표 1. 장치의 상대적인 비용

AWG[8]	AWG[16]	AWG[32]	AWG[64]	AWG[128]
0.65015	1.0	1.56457	2.40240	3.74775
광섬유 설치비용 ( $Fiber_C$ )	송수신기( $TR_C$ )	수동결합기 ( $PS_C$ , 포트당)	증폭기 ( $OA$ )	
1.27628	0.01502	0.00038	0.00751	

위와 같은 장치의 상대적 비용에 의해 RN과 ONU의 구축비용으로 분리하여 시스템 구축비용을 산출할 수 있다. 또한 각 시스템에서 자원의 동적 능력은 한 ONU가 사용할 수 있는 파장의 수로 정의할 수 있으며, 시스템의 종합적인 성능 분석 지표인 자원의 비용 효율성( $Cost-to-Dynamics Ratio$ )은 다음과 같이 정의된다. 이 때,  $RN_{COST}^{nor}$ 와  $ONU_{COST}^{nor}$ 는 모든 파장을 ONU 당 균일하게 분할하여 고정적으로 사용하는 WDM-PON 구조에서의 RN 및 ONU 구축비용을 '1'로 가정하여 정규화된 (Normalized) 값을 의미한다.

$$- \text{자원의 비용 효율성 } CDR = \frac{W_{ONU}}{RN_{COST}^{nor} + ONU_{COST}^{nor}}$$

본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조의 성능 비교를 위해 Shared WDM-PON을 사용하였다. 그림 8과 같이 Shared WDM-PON의 전체 파장 수와 ONU의 수는 본 논문에서 제안하는 구조와 동일하게 하였으며, Shared WDM-PON은 전체 파장 중 ONU당 하나의 고정된 파장을 사용하며 나머지 파장들은 모든 ONU가 공유하여 사용한다고 가정하였다. Shared WDM-PON에서의 파장에 대한 파라미터들은 다음과 같이 정의할 수 있다.

- $W_{SPON-Fixed}$  : Shared WDM-PON 구조에서 한 ONU의 고정 파장 수(=1)
- $W_{SPON-Shared}$  : Shared WDM-PON 구조에서 공유되는 파장 수
- $W^T_{SPON}$  : Shared WDM-PON 구조에서 전체 파장 수 ( $=W_{SPON-Fixed} \times ONU^T + W_{SPON-Shared}$ )

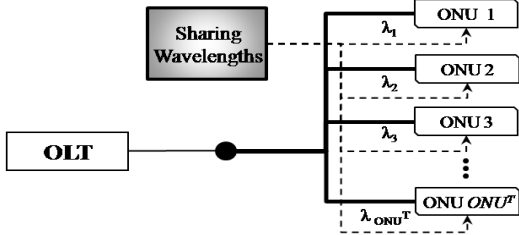


그림 8. 성능 분석에서의 Shared-PON 구조

그림 8의 Shared WDM-PON의 경우 한 ONU가 사용 가능한 파장 수는  $W_{SPON-Fixed} + W_{SPON-Shared} = 1 + W_{SPON-Shared}$ 가 되고, RN에서는 ONU당 고정된 파장을 위한  $ONU^T$  크기의 AWG 및  $W_{SPON-Shared}$  크기의 수동 분배기를 필요로 한다. 따라서 Shared WDM-PON 시스템 구축비용은 다음과 같다.

Shared WDM-PON  $SYS_{COST}$

$$= RN \text{ 구축비용} + ONU \text{ 구축비용}$$

$$= [AWG(ONU^T) + \{W_{SPON-Shared} \times ONU^T \times PS_C\}]$$

$$+ [(TR_C + Fiber_C/8) \times (W_{SPON-Fixed} + W_{SPON-Shared}) \times ONU^T]$$

$$= [AWG(ONU^T) + \{W_{SPON-Shared} \times ONU^T \times PS_C\}]$$

$$+ [(TR_C + Fiber_C/8) \times (1 + W_{SPON-Shared}) \times ONU^T]$$

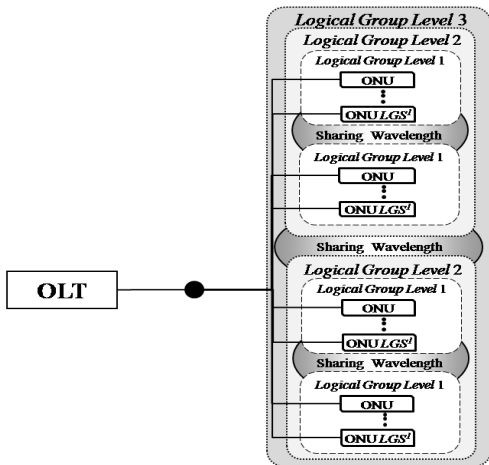


그림 9. 성능분석에서의 제안된 WDM-PON 구조

다음으로 제안된 WDM-PON 구조는 그림 9와 같이  $H=3$ 의 논리그룹 계층을 가지며, ONU가  $ONU^T$ 개로 구성된 시스템이다. 이 때, 전체 파장 수는 Shared WDM-PON과 동일하게 하였다. 제안된 WDM-PON 구조의 논리그룹의 크기  $LGS^l = [ONU^T / (2^{3-l})] = ONU^T / 4$ 이며, 한 ONU가 최대한 할당 받을 수 있는 파장 수  $W_{ONU} = H \times W_{SH}$ 이 된다. 따라서 RN에서는  $W_{ONU}$  크기의 수동 분배기 및 결합기를  $LGN^l$ 개만큼 필요로 한다. 제안된 WDM-PON 구조에서 시스템 구축비용은 다음과 같다.

Proposed WDM-PON  $SYS_{COST}$

$$= \text{광 증폭기} + RN \text{ 구축비용} + ONU \text{ 구축비용}$$

$$= OA + [LGN^l \times (\text{수동분배기}[LGS^l] + \text{수동결합기}[LGS^l]) \times PS_C] + [(W_{ONU} \times (TR_C + Fiber_C/8) \times ONU^T)]$$

$$= OA + [2 \times ONU^T \times PS_C] + [H \times W_{SH} \times (TR_C + Fiber_C/8) \times ONU^T]$$

제안된 WDM-PON 구조의 시스템 구축비용은 논리그룹 계층 수  $H$ 의 영향을 받는다. 이 때,  $H$ 는 논리그룹의 크기  $LGS^l$ 에 의해 변화하게 되므로, 시스템의 구축비용 및 자원의 동적 능력은 논리그룹의 크기와 직접적으로 관련됨을 알 수 있다.

표 2는  $W^T=2^7$ ,  $LGS^l=2^4$ 인 WDM-PON 구조를 가정하고, 시스템의 ONU 수가 증가할 때, 제안된 구조에서 계층 수  $H$  증가에 따른 시스템 구축비용 산출의 한 예를 나타내고 있다. 특히, 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조에서 지원할 수 있는 최대 ONU의 수는 현재 WDM-PON 구성 요소들의 상용화된 기술을 고려하여 128로 설정하였다. Shared WDM-PON의 경우 ONU의 고정된 파장을 위한 고가의 AWG가 필요하기 때문에 매우 높은 RN 구축비용이 요구되지만, 제안된 구조의 RN은 가격이 저렴한 수동 소자들로 구성되기 때문에 매우 작은 RN 구축비용을 갖는 것을 알 수 있다. 이 때, ONU 구축비용에서의 차이는 ONU당 사용할 수 있는 파장의 수에 의존한다.

표 2. 논리그룹 계층 수 H 따른 시스템 구축비용의 예

계층수(H)	Shared			Proposed		
	$SYS_{COST}^{nor}$	$W_{ONU}$	CDR	$SYS_{COST}^{nor}$	$W_{ONU}$	CDR
$H=2$ ( $ONU^T=2^5$ )	17.66	33	1.92	21.0	42	1.99
$H=3$ ( $ONU^T=2^6$ )	33.91	65	1.95	27.01	54	1.99
$H=4$ ( $ONU^T=2^7$ )	66.64	129	1.96	32.01	68	2.12

이와 같이 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조는 비교 대상인 Shared WDM-PON에 비해 높은 비용 효율성을 갖는다. 이는 ONU의 수가 많은 큰 규모의 WDM-PON 시스템에서도 제안된 구조에서의 논리그룹 계층수  $H$ 를 통해 구축비용과 연관된 송수신기의 수를 로그 분포로 증가시키기 때문에 적은 구축비용의 증가량 대비 높은 자원의 동적 능력 향상을 얻을 수 있기 때문이다. 그러므로 계층적 논리그룹을 형성할 경우, 자원의 비용 효율성을 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

이와 더불어 본 논문에서 제안한 동적 자원 할당 알고리즘의 성능 분석을 위해 동적 할당 능력과 공평성 유지 능력의 측면에서 살펴보았다. 이를 위해 C++ 기반의 시뮬레이터를 구현하였으며, 사용자로부터 발생하는 이더넷 패킷의 트래픽 발생은 Pareto 분포 기반의 ON/OFF 트래픽 모델링을 사용하였다. 이때, 트래픽 부하는 0.7로 설정하였으며, 트래픽 부하가 1일 경우 ONU당 최대 전송 속도를 1Gbps 라 가정하였다. 또한, 동적 할당 능력은 시스템의 최대 유동 자원량 대비 알고리즘의 할당 능력으로 정의하였으며, 공평성 유지 능력 (Fairness Index)은 앞서 정의했던 ' $L_{MAX}$ '보다 작거나 같은 ONU의 대역폭 요청량 대비 할당 대역폭의 양으로 정의하였다. 따라서 그 값이 '1'에 가까울수록 공평성이 유지된다.

그림 10은 본 논문에서 제안하는 대역폭 보상 기반의 동적 자원 할당 알고리즘의 동적 할당 능력을 나타내고 있다. 모의실험 환경은 각각 ONU 8개로 구성된 두 개의 논리그룹 사이에 2개의 파장을 각각 공유하며, 시스템에서의 총 계층수  $H=1$ 을 갖도록 구성하였다. 그림 10에서 볼 수 있듯이, 균형적인 트래픽 환경에서는 모든 ONU가 동일한 대역폭을 할당 받을 수 있으며, ONU 1번의 트래픽 발생이 시스템의 자원에 대한 최대 동적 능력과 근접하는 불균형적인 트래픽 환경에서도 제안된 동적 자원 할당 알고리즘은 ONU 1번에게 시스템에서 할당 가능한 최대한의 자원을 할당할 수 있다. 따라서 ONU 1번의 자원에 대한 동적 능력은 그룹 내에서 낭비되는 자원이 없는 최대 자원 량까지 증가하게 된다.

그림 11은 본 논문에서 제안하는 동적 자원 할당 기법의 공평성 유지 능력을 나타내고 있다. 본 논문에서 제안된 동적 자원 할당 기법은 트래픽 환경에 관계없이 ' $L_{MAX}$ '이하의 대역폭 요청에 대해서는 모두 수용할 수 있기 때문에 균형적인 트래픽 환경과

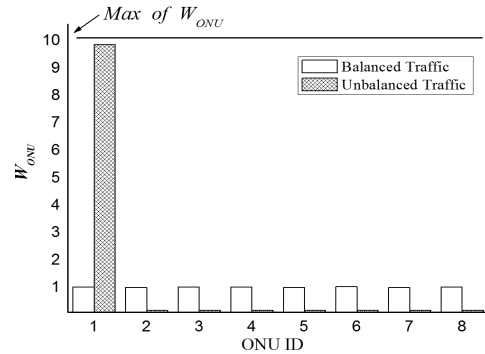


그림 10. 트래픽 환경에 대한 동적 할당 능력

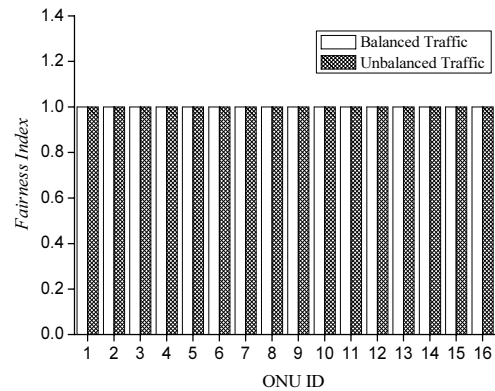


그림 11. 트래픽 환경에 대한 공평성 유지 능력

불균형적인 트래픽 환경에서 모든 ONU들의 공평성 유지능력은 매우 높게 나타난다.

## VI. 결론

WDM-PON은 동적 파장 및 대역 할당을 위해 매우 많은 구축비용이 요구된다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 효과적인 광 가입자망을 구축하기 위해서는 저비용의 효율적인 자원관리가 보장되는 WDM-PON이 필요하다. 이에 본 논문에서는 비용 효율적이며, 자원에 대한 동적 능력을 갖는 WDM-PON 구조를 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 WDM-PON 구조는 ONU의 계층적 논리그룹화를 통한 자원 관리 기법을 도입하였고, 이를 통하여 효율적인 비용으로 탄력적인 자원 할당이 가능하다.

제안된 WDM-PON 구조의 성능 평가를 위하여 모의실험을 수행하고, 그 결과 제안된 WDM-PON 구조의 구축비용과 논리그룹 크기에 대한 상관관계를 도출할 수 있었으며, 불균형적인 트래픽 환경에



서 제안된 WDM-PON 구조 및 자원 관리 기법이 우수한 자원에 대한 동적 능력과 공평성 제공 능력을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 적절한 논리그룹의 크기를 기반으로 시스템을 구축할 경우, 비용 효율적이며 우수한 자원에 대한 동적 능력을 갖는 WDM-PON 시스템 구축이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] FTTH 기술 및 시장 동향, ETRI 전자통신동향 분석, 2004년 12월호, <http://etrends.etri.re.kr>

[2] M. McGarry, M. Maier, and M. Reisslein, "An evolutionary WDM upgrade for EPONs," Arizona State University Technical Report, 2005.

[3] R. D. Feldman, E. E. Harstead, S. Jiang, T. H. Wood, and M. Zirngibl, "An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing broad-band fiber access," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 1546-1558, 1998.

[4] M. Zirngibl, C. H. Joyner, L.W. Stulz, C. Dragone, H. M. Presby, and I. P. Kaminow, "LARNET, a local access router network," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol 7, pp. 215-217, 1995.

[5] N. J. Frigo, P. D. Magill, T. E. Darcie, P. P. Iamone, M. M. Downs, B. N. Desai, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, and H. M. Presby, "RITENet: a passive optical network architecture based on the remote interrogation of terminal equipment," In proc. of Optical Fiber Communication conference (OFC), 1994.

[6] Huan Song, Mukherjee, B. Youngil Park, Sunhee Yang, "Shared-wavelength WDM-PON access network for supporting downstream traffic with QoS," In Proc. of Optical Fiber Communication Conference(OFC), pp. 5-10, 2006.

[7] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "IPACT: A dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON)," *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no 2, pp. 74-80, 2002.

[8] G. Mayer, M. Martinelli, A. Pattavina and E.Salvadori, "Design and Cost Performance of the Multistage WDM-PON Access Networks,"

*Journal of Lightwave Technology*, vol 18, pp. 125-143, 2000.

[9] 한경은, 이승현, 김영천, "혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조 설계 및 성능평가," *한국통신학회 논문지*, vol 31, no 7B, pp. 573-582, 2006.

김 호 원 (Hyowon Kim)

준회원



2006년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2006년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
<관심분야> Optical Access Network

황 준 호 (Junho Hwang)

정회원



2004년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2006년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사  
2006년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사과정  
<관심분야> Optical Network, OBS, Optical Access Network, Network QoS

유 명 식 (Myungsik Yoo)

종신회원



1989년 2월 고려대학교 전자전공학과 학사  
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사  
2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사  
2000년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 조교수

<관심분야> Optical Network, Optical Access Network, OBS, Wireless MAC protocol, Ad-hoc routing protocol