

# 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조 설계 및 성능평가

정회원 한 경 은\*, 이승현\*\*, 종신회원 김 영 천\*

## Design and Performance Evaluation of Hybrid Two-Stage AWG based WDM-PON Architecture

Kyeong-Eun Han\*, Seung-Hyun Lee\*\* *Regular Members*, Young-Chon Kim\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 기존 PON 구조와 단일 AWG 기반의 WDM-PON 구조의 문제점을 해결하고, 새로운 서비스 및 망의 증가 추세를 반영할 수 있는 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 제안한다. 제안한 구조는 하향 전송을 위하여 2단 AWG를 사용하고, 상향 전송을 위하여 단일 AWG와 결합기를 사용함으로써 RN을 구성한다. 이러한 구조적 특징으로 인하여 제안한 구조는 확장성이 좋고, 낮은 비용과 높은 대역을 제공할 수 있다. 제안한 구조에서 하향 전송의 경우 트래픽이 별도의 하향 채널을 통하여 각 ONU에게 전송되므로 하향 트래픽에 대한 투명성 및 보안능력을 제공할 수 있다. 반면 상향 전송은 통신의 비대칭적인 특성을 고려하여 다수의 ONU가 WDM/TDMA 기법을 사용함으로써 하나의 채널을 공유하는 형태이다. 본 논문에서는 제안한 구조의 성능 평가를 위하여 구성에 따른 망 구성의 전체 비용, 망 용량, 각 ONU에게 할당 가능한 평균 상·하향 전송 대역 관점에서 비교 분석한다.

**Key Words** : WDM-PON, architecture, cost, AWG, access networks

### ABSTRACT

In this paper, we propose a hybrid two-stage AWG-based WDM-PON architecture in order to overcome the limitations of the existing PONs and single AWG-based WDM-PONs as well as to accommodate the new services and the expandability of network. The proposed architecture employs two-stage AWG for downstream transmission and single AWG and combiners for upstream one at RN. It also employs the separated fiber with multi-wavelength for both direction. It leads to high scalability, low cost, and high capacity for transmission. In downstream transmission, the transparency can be guaranteed since the traffic is transmitted to ONU through each channel. However, several ONUs share the channel for upstream one by using WDM/TDMA scheme because the asymmetrical feature of networks is considered. The performance of the proposed one is evaluated and compared with other architectures in terms of cost, network capacity and up/downstream bandwidth.

### I. 서론

인터넷 사용자의 증가로 인한 인터넷 트래픽 및 새로운 광대역 멀티미디어 서비스에 대한 요구가

급격히 증가함에 따라, 이를 수용하기 위한 현실성 있는 구현 방안으로 수동형 광가입자망(Passive Optical Network: PON)이 크게 주목 받아 왔다. APON(ATM over PON)과 EPON(Ethernet over

\* 본 연구는 KOTEF, OIRC, 그리고 IITA의 지원으로 수행되고 있습니다.

\* 전북대학교 컴퓨터공학과 ({kehan, yckim}@chonbuk.ac.kr), \*\* 전북대학교 정보통신학과 (langly@chonbuk.ac.kr) (° : 교신저자)  
논문번호 : KICS2006-02-080, 접수일자 : 2006년 2월 14일, 최종논문접수일자 : 2006년 7월 19일

PON)은 대표적인 PON 기반의 광가입자망 기술로 각각 ITU-T G.983과 IEEE 802.3ah EFM(Ethernet in the First Mile)에 의해 표준화 되었다<sup>[1,2]</sup>. PON은 하나의 OLT(Optical Line Terminator)에 여러 개의 ONU(Optical Network Unit)를 수동 분배기를 사용하여 연결함으로써 트리 구조의 분산 토폴로지를 형성하는 가입자망 구조이다. 그러나 수동분배기를 사용하는 이러한 PON은 많은 장점을 가짐에도 불구하고 여전히 확장성, 채널 용량, 그리고 보안의 취약성 관점에서 다음과 같은 제한을 받는다. 먼저, 수동분배기의 감쇄 현상으로 인해 수용할 수 있는 사용자 수의 제한을 받는다. 둘째, 상·하향 단일 파장 사용으로 인하여 가입자가 증가함에 따라 ONU들은 한정된 대역을 공유해야 한다. 이는 각 ONU에게 할당 되는 전송 대역을 고려할 때, 수용할 수 있는 사용자 수를 제한한다. 셋째, HDTV(High Definition TV), 대화형 게임, 화상 회의 등의 새로운 어플리케이션 및 서비스의 출현을 고려할 때 현재 제공되는 것보다 더 많은 대역폭이 요구된다. 또한 고밀도 파장분할다중방식(Dense Wavelength-Division Multiplexing: DWDM) 기술의 사용으로 단일 파이버 당 1Tbps 이상의 용량을 제공하는 기간망과 비교하여, 가입자망 역시 이러한 변화를 수용할 수 있는 형태로 발전해야 한다. 넷째, OLT와 ONU가 점대다점(point-to-multipoint)으로 연결된 구조에서 하향 전송이 방송(broadcast)을 통해 이루어지므로 보안에 취약하다.

최근 기존 PON이 가지고 있는 이러한 제한들을 극복할 수 있는 새로운 기술로 AWG(Arrayed-Waveguide Gratings) 기반의 WDM-PON이 크게 주목 받고 있다<sup>[3, 5-8]</sup>. AWG는 파장-선택(wavelength-selective) 라우팅 수동 소자로 광신호의 감쇄가 없고 비용이 저렴하며, 파장의 재사용이 가능하다는 특징을 갖는다. AWG를 사용함으로써 각 ONU는 별도의 파장을 통하여 송·수신이 가능하므로 하향 전송의 보안 취약성을 해결할 수 있다. 따라서 AWG 기반의 WDM-PON은 WDM을 사용함으로써 망의 용량을 크게 증가시키고 기존 PON이 가지고 있던 감쇄에 의한 확장성 제한을 해결할 수 있다. 또한 동일한 파장의 재사용으로 인하여 적은 수의 파장으로 많은 ONU에게 서비스 할 수 있으므로 좋은 품질의 서비스를 경제적으로 제공할 수 있다.

가장 잘 알려진 WDM-PON 구조로 LARNET(Local Access Router Network)과 RITE-Net(Remote Interrogation of Terminal Equipment Network)이 있다<sup>[3, 4]</sup>.

그러나 단일 AWG로 구성된 이러한 구조들은 파장의 수와 AWG 크기의 제한으로 인하여 확장성에 제한을 받는다. 이러한 확장성 문제를 해결하기 위하여 다단의 AWG를 사용하는 구조가 제안되었다<sup>[5]</sup>. 다단 AWG 구조는 단의 수, 각 단에서의 AWG 수, AWG 크기, 그리고 저밀도성(coarseness)에 따라 다양한 구조의 설계가 가능하다. 논문 [5]에서는 하향구조의 관점에서 다단 AWG를 이용한 구조를 분석하고 2단 또는 3단으로 구성하는 것이 비용과 성능 면에서 가장 바람직한 절충점(trade-off)을 제공함을 입증하였다.

본 논문에서는 상·하향 전송을 고려한 새로운 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 제안한다. 제안한 구조는 상·하향을 위한 대역을 비대칭적으로 제공하면서도 각 전송을 위하여 충분한 대역폭을 제공한다. 하향 구조의 경우, 논문 [5]에서 입증된 두 단 AWG 구조를 사용하여 구현한 반면 상향 구조는 단일의 AWG와 결합기들을 사용하여 구현한다. 제안한 구조에서 상향 전송의 경우 단일의 AWG를 통과한 광신호는 결합기를 통해 결합되므로 동일한 파장에 대하여 충돌이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 WDM과 시분할다중방식(time-division multiplexing: TDMA)을 결합한 기법이 사용된다. 제안한 구조는 상·하향 전송을 위하여 높은 대역폭, 낮은 비용, 확장의 용이성을 제공할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 기존의 AWG 기반의 WDM-PON 구조 및 구조의 특징을 설명한다. 3장에서는 제안한 두 단계 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 기술한다. 4장에서는 제안한 구조와 기존 구조를 비용, 제공 대역, 확장성 관점에서 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. AWG기반의 WDM-PON

### 2.1 AWG 라우팅 기능 및 특징

WDM-PON 시스템에서는 많은 수의 채널의 다중화/역다중화(multiplexing/demultiplexing)를 위하여 적절한 구성 요소가 요구된다. AWG는 다중화, 역다중화, 파장-선택 광 라우팅 기능을 수행하며, 주어진 파장과 사용되는 입력 포트에 따라 출력 포트가 결정되는 수동 소자이다. 따라서 AWG에서는 다른 입력 포트를 통해 동일한 파장을 동시에 전송할 수 있다. 이는 입력 포트의 수만큼 같은 파장을 재사용할 수 있음을 의미한다.

AWG는 고정된 너비의 파장 주기를 갖는 주기적 필터(periodic filter)처럼 동작한다. 이때, 고정된 파장 간격은 FSR(Free Spectral Range)로 정의된다. FSR은  $FSR = MC\Delta\lambda$ 로 구할 수 있으며, 이는 파장  $\lambda_i$ 와  $\lambda_i + FSR$ 이 같은 라우팅 기능을 가지고 동작함을 의미한다. 여기서,  $\Delta\lambda$ 는 두 개의 인접한 파장사이의 공간을 나타낸다. AWG에서 입출력 포트와 파장, 저밀도성의 관계는 아래 식 (1)과 같이 정의될 수 있다. 이때  $i, j$ 는 각각 입력과 출력 포트이며,  $M$ 은 AWG의 크기,  $f$ 는 파장을 나타낸다.  $C$ 는 저밀도성을 나타내며 이는 하나의 FSR내에 같은 라우팅 기능을 갖는  $C$ 개의 파장이 존재함을 의미한다.

$$j = 1 + (i - 1 + \lfloor \frac{f-1}{C} \rfloor) \bmod M \quad (1)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 + c\Delta\lambda + MC\Delta\lambda - (i-j)C\Delta\lambda, & i \geq j \\ \lambda_0 + c\Delta\lambda - (i-j)C\Delta\lambda, & i < j \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)는 AWG의 다중화 기능을 보여주는 수식이다. 이때,  $c$ 는  $0 \leq c \leq C-1$ 의 조건을 만족한다. 주어진 출력 포트  $j$ 에 대하여 입력 포트  $i$ 는 1과  $M$  사이에 존재하여야 한다. AWG는 또한 역다중화 기능을 수행하는데 이를 위한 식은 식 (2)로부터 쉽게 계산할 수 있다. 역다중화 기능 수식의 경우, 주어진 입력 포트  $i$ 에 대하여 출력 포트  $j$ 는 1과  $M$  사이에 존재한다.

그림 1은 주어진 파장이 4개로 동일할 때, AWG의 크기와 파장에 따른 AWG 라우팅 기능과 그때의 FSR을 나타낸다. 그림 1-(a)에서 알 수 있듯이 입력 포트 1번을 통해 전송된 파장  $\lambda_1^1 \sim \lambda_4^1$ 는 AWG를 거쳐 출력 포트 1→2→3→4로 출력된다. 또한 입력 포트 2번을 통해 전송된 파장  $\lambda_1^2 \sim \lambda_4^2$ 는 AWG를 거쳐 출력 포트 2→3→4→1로 출력된다. 마찬가지로 입력 포트 3번과 4번을 통해 입력된 파장은 각각 3→4→1→2, 4→1→2→3로 출력된다. 또한 입력 포트 수가 4이고 파장 수가 4로 동일하므로 전체 FSR=1이고 각 FSR마다 하나의 파장이 존재하므로  $C=1$ 이다. 그림 1-(b)도 동일한 라우팅 기능을 보여준다. 그러나 그림 1-(b)에서는 입력 포트의 수가 2이고 파장 수가 4이므로 전체 FSR=2이며 하나의 FSR마다 두 개의 파장이 존재하므로  $C=2$ 이다. 따라서 입력 포트 1에서 출력 포트 1로 전송하기 위해서는  $\lambda_1$  또는  $\lambda_3$ 을 통해 데이터를 전송해야 한다. 또한 FSR=2이므로  $\lambda_i + 2$  값을 갖는 파장이 동일한 라우팅 기능을 가지고 동작한다. 즉,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_3$ ,

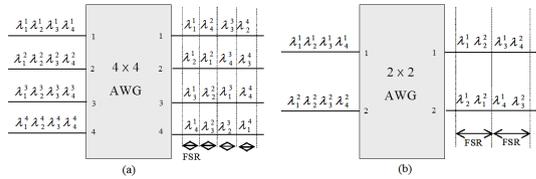


그림 1. AWG 라우팅: (a) FSR=4, C=1 (b) FSR=2, C=2  
Figure 1. Routing of AWG:(a) FSR=4,C=1 (b) FSR=2,C=2

$\lambda_2$ 과  $\lambda_4$ 가 동일한 라우팅 기능을 가지므로 같은 포트를 통해 출력된다.

### 2.2 기존의 WDM-PON 구조

PON은 하나의 OLT에 다수의 ONU를 수동 분배기를 사용하여 연결함으로써 트리 구조의 분산 토폴

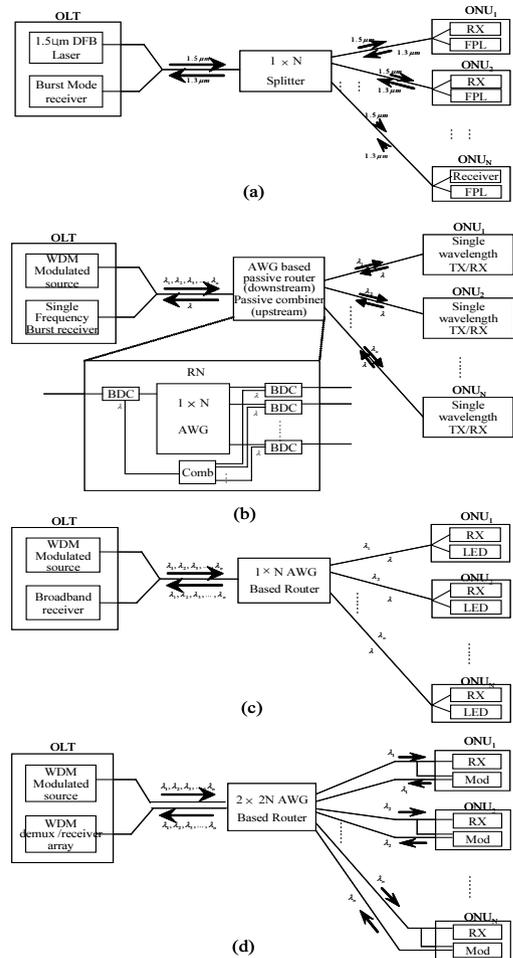


그림 2. 기존 WDM-PON 구조: (a) CWDM (b) CPON (c) LARNET (d) RITE-Net  
Figure 2. Existing WDM-PON: (a) CWDM (b) CPON (c) LARNET (d) RITE-Net

로지를 형성하는 가입자망 구조이다. WDM-PON은 이러한 PON 구조에 WDM 기술을 접목함으로써 새로운 어플리케이션 및 서비스 요구에 부응하는 높은 대역폭을 제공할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 WDM-PON 구현을 위하여 많은 다중화 및 역다중화를 위한 장치가 요구된다. 특히, 수동 분배기 대신 AWG로 RN(Remote Node)을 구성함으로써 광신호 분배에 따른 감쇄, 경제성, 보안 취약성의 문제를 해결할 수 있다. 이 때문에 최근 AWG 기반의 WDM-PON 구조에 관한 연구가 크게 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 WDM-PON의 가장 대표적인 몇 가지 구조를 살펴본다. 그림 2는 대표적인 WDM-PON 구조를 나타낸다.

그림 2-(a)는 CWDM(Coarse WDM) 구조로 일반적인 PON 구조와 동일하다. 따라서 RN은 1XN 분배기와 결합기로 구성되며, 상·하향 전송을 위하여 1300nm와 1550nm의 별도 대역이 사용된다. (여기서,  $N$ 은 ONU의 수를 의미한다.) 또한 모든 ONU는 상·하향 전송을 위하여 TDMA 방식을 통해 각 전송 채널을 공유한다. OLT와 ONU는 송수신을 위하여 단일 파장을 갖는 DFB(Distributed Feedback Laser) 레이저와 단일 파장 버스트 수신기로 구성된다. 채널 당 용량을  $R$ 이라 할 때, 이 구조의 상·하향 용량은  $R$ 이고, 각 ONU에게 할당되는 평균 용량은  $R/N$ 이다.

그림 2-(b)는 CPON(Composite PON) 구조로, CWDM과 같이 상·하향 전송을 위하여 별도의 대역을 사용한다<sup>4)</sup>. CPON 구조에서 상향 전송은 모든 ONU가 단일 채널을 TDMA 방식으로 공유하는 형태인 반면, 하향 전송의 경우 다수개의 채널을 제공하는 DWDM 방식을 사용한다. 따라서 RN은 상·하향 채널에 대한 대역을 구분해 줄 수 있는 별도의 장치가 요구된다. RN은 1XN AWG와 하나의 결합기 그리고  $N$ 개의 BDC(Backup Domain Controller)로 구성된다. 이때, AWG는 하향 전송을 위하여 결합기는 상향 전송을 위해 사용된다. BDC는 대역 제어기로서 AWG의 앞·뒷단에 위치하여 1550nm 대역은 AWG로, 1300nm 대역은 결합기로 분리하는 역할을 수행한다. CPON에서 OLT는  $W$ 개의 파장을 생성하기 위한 다수개의 DFB 레이저와 단일 파장 버스트 수신기로 구성되며, ONU는 단일의 파브리-페로(Fabry-perot) 레이저와 단일 파장 버스트 수신기로 구성된다. 또한 이 구조에서 제공하는 전체 용량은  $R$ , 각 ONU에게 할당되는 평균 대역은 상향의 경우  $R/N$ , 하향의 경우  $R$ 이다.

그림 2-(c)는 LARNET 구조를 나타내며, 앞서 기술한 구조들과 같이 상·하향 전송을 위하여 별도의 분리된 대역을 사용한다<sup>4)</sup>. 이 구조에서 하향 전송은 DWDM을 이용하여, 각 ONU에게 단일 파장을 통해 이루어진다. 반면, 상향 전송은 LED(Light Emitting Diode)를 사용하여 모든 ONU가 하나의 채널을 공유하는 형태이다. 따라서 상향 전송을 위하여 TDMA 기법이 요구된다. RN은 단일의 1XN AWG로 구성되며 별도의 장치는 요구되지 않는다. LARNET에서 OLT는 분리된 다수개의 DFB 레이저와 LED 신호를 수신하기 위한 광대역 수신기로 구성되며, ONU는 단일의 LED와 단일 파장 버스트 수신기로 구성된다. 이 구조는 ONU에서 가격이 매우 저렴한 LED를 사용함으로써 전체적인 망 구성 및 유지 비용을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이 구조를 통해 제공되는 전체 전송 용량 및 각 ONU에게 할당되는 평균 대역은 각각 상향의 경우  $R$ 과  $R/N$ 이고, 하향의 경우  $NXR$ 과  $R$ 이다.

그림 2-(d)는 RITE-Net 구조로, 상·하향 전송을 위하여 1550nm 대역을 사용한다<sup>5)</sup>. RITE-Net 구조에서 하향 전송은 하향 트래픽 뿐만 아니라 상향 트래픽 전송을 위한 광원을 함께 전송한다. 즉, OLT는 상·하향 전송을 위하여 다수개의 DFB 레이저를 통해  $W$ 개의 파장을 생성한다. OLT의 수신측은 단일 파장 버스트 수신기로 구성된다. ONU는 별도의 광원이 요구되지 않으며 단지 변조기(modulator)와 단일 파장 버스트 수신기로 구성된다. ONU는 자신의 상향 데이터를 전송하기 위하여 OLT로부터 수신한 상향 광원을 변조하여 사용한다. 또한 RN은 2X2N AWG로 구성된다. 이 구조에서 ONU는 별도의 광원을 사용하지 않으므로써 이에 대한 비용을 절감할 수 있다. 그러나 망 구성을 위한 파이버의 수와 AWG의 크기가 크게 증가하므로 설치 및 유지를 위한 비용은 증가한다. RITE-Net은 상·하향 전송을 위하여  $NXR$ , 각 ONU를 위해 평균  $R$ 의 용량을 갖지만, 구조적인 특징으로 인하여 실제 각 ONU가 사용 가능한 대역은  $R/2$ 로 제한을 받는다.

단일 AWG를 사용하는 구조의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 제한된 AWG의 크기에 의해 확장성이 매우 낮다. 이러한 구조에서 증가하는 사용자 수용하기 위하여, 관리자는 AWG의 크기를 증가시키거나 별도의 망을 구성해야 한다. 현재 상업적으로 가능한 AWG의 크기는 128X128로 알려져 있다. 따라서 이를 이용한다 하더라도 128X128 AWG가 수용할 수 있는 ONU의 수는 극히 제한을 받는다.

표 1. 기존 WDM-PON 구조의 특성 비교  
Table 1. Comparison of existing WDM-PON architectures

	CWDM	CPON	LARNET	RITENET
Fiber	1	1	1	2
AWG	없음	D: 1×N	1×N	2×2N
S/C	1(s)	1(c), N+1 BDC	없음	없음
전송 대역 윈도우	D:1550nm U:1300nm	CWDM와 동일	CWDM와 동일	D: 1550nm U: 1300nm
하향 전송	단일 파장	WDM	WDM	WDM
상향 전송	단일 파장 (TDMA)	단일 파장 (TDMA)	스펙트럼 슬라이스 (TDMA, SCMA)	WDM
OLT 송신기	DFB	MVL MFL TL	MVL MFL TL	MVL MFL TL
OLT 수신기	단일 주파수 버스트 수신기	단일 주파수 버스트 수신기	광대역 수신기	역다중화기, 수신기 배열
ONU 송신기	단일 파장 송신기 및 Fabry-perot 레이저	단일 파장 송신기 및 Fabry-perot 레이저	광대역-스펙트럼 소스 (LED & VCSEL)	변조기
ONU 수신기	단일 파장 수신기	단일 파장 수신기	단일 파장 수신기	단일 파장 수신기
상향 전송 용량	N/W: R ONU: R/N	N/W: R ONU: R/N	N/W: R ONU: R/N	N/W: N×R ONU: R
하향 전송 용량	N/W: R ONU: R/N	N/W: N×R ONU: R	N/W: N×R ONU: R	N/W: N×R ONU: R
Ca	100%	100%	100%	50%(D/U)

\* S: 분배기, C: 결합기, D: 하향, U:상향, N/W:망, Ca: 사용가능한 링크용량(이용률)

별도의 망을 재구성 하는 문제 역시 복잡도 뿐만 아니라 비용이 크게 증가한다. 또한 이러한 구조는 망을 효율적으로 유연성 있게 증가시키기 어렵다. 예를 들어, 망이 128개의 ONU를 수용할 수 있다고 가정하자. 만약 129부터 256까지의 ONU에게 서비스를 제공하기 위해 확장한다고 할 때, 구조적인 특징에 의하여 129개의 ONU인 경우와 256개의 ONU인 경우에 대하여 구성하는 망은 256개의 ONU를 수용할 수 있는 구조로 동일하게 확장될 것이다. 즉, 최악의 경우 실제 망은 50.39%만이 사용된다. 따라서 확장이 용이하고, 낮은 비용과 높은 대역폭을 제공할 수 있는 다단계 AWG를 이용한 새로운 구조가 요구된다. 표 1은 기술한 기존 WDM-PON 구조의 특징을 나타낸다.

### Ⅲ. 제안한 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조

본 장에서는 단일 AWG 기반 구조의 확장성 문제를 해결하고 망 구조 설계를 위한 요구 사항을 만족시키는 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 제안한다. WDM-PON 구조 설계를 위한 요구 사항은 다음과 같다.

- 공간 재사용을 통한 파장 자원의 효율적인 사용이 가능해야 한다.
- 업그레이드가 용이하고 노드 수는 파장 수에 독립적으로 확장이 가능해야 한다.
- 다양한 패킷 포맷, 트래픽의 변화량, IP 패킷과 같은 가변길이 패킷을 지원해야 한다.
- 각 ONU에게 Interactive 어플리케이션 등과 같은 새로운 서비스들을 제공할 수 있도록 높은 대역폭을 지원할 수 있어야 한다.

제안한 구조는 상·하향 전송을 위하여 1550nm 대역을 사용하며, 상·하향 트래픽은 별도의 파이버를 통해 전송된다. OLT에서 ONU까지의 거리는 20Km로 고려하였다. 각 파이버는 32개의 채널을 가지며, 각 채널의 용량은 1Gbps이다. 또한 128개의 ONU가 고려되었다. 제안한 구조에서 RN은 3개의 AWG와 5개의 결합기로 구성된다. 표 2는 제안한 구조 설계를 위한 파라미터들을 나타낸다.

그림 3은 제안한 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 나타낸다. OLT로부터 전송된 하향 트래픽은 Stage-1과 Stage-2 두 단계의 AWG를 거쳐 전송된다. Stage-1은 하나의 AWG로 구성되며, Stage-2는 두 개의 AWG로 구성된다<sup>[5]</sup>. OLT에서 생성된 각 32개의 파장은 Stage-1 AWG의 4개의 입력 포트에 전송되며 AWG를 거쳐 8개의 출력 포트에 역다중화 된다. AWG의 특성에 의해 Stage-1의 각 출력 포트는 같은 입력 포트로부터 4개의 파장을 받는다. 따라서 4개의 입력 포트를 고려할 때,

표 2. 제안한 구조의 설계 파라미터  
Table 2 Design parameters of proposed architecture

파라미터	기술	값	
		Stage-1	Stage-2
N	AWG의 크기	8	64
K	AWG의 수	1	2
C	저밀도성	1	2
I	입력포트의 수	4	4
U	ONU의 수	128	128
W	파장 수	32	32

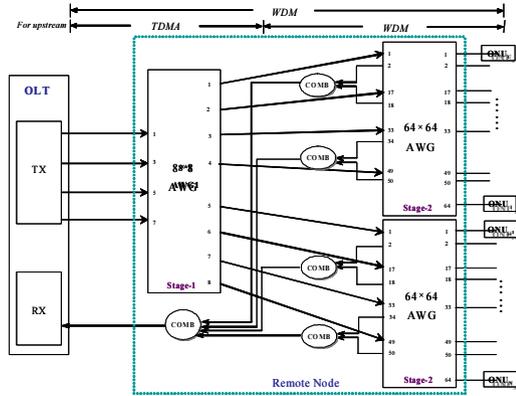


그림 3. 혼합형 2-단계 AWG 기반의 WDM-PON 구조  
Figure 3. Hybrid two-stage AWG-based WDM-PON architecture

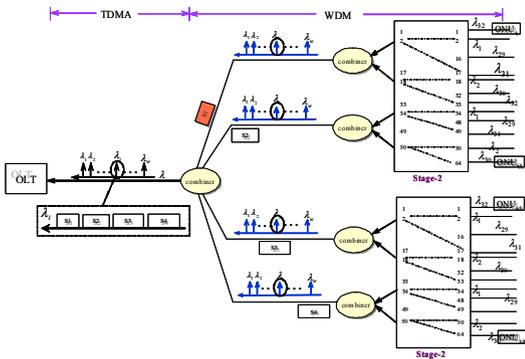


그림 4. 제안한 상향 전송 구조 및 파장 할당  
Figure 4. Upstream transmission and wavelength assignment of proposed architecture

출수 또는 짝수 번을 갖는 16개의 파장이 각 출력 포트를 통해 전송된다. Stage-1 AWG의 출력 포트는 Stage-2에 위치한 두 개의 AWG 입력 포트와 연결되며, 입력 포트  $i$  ( $i=1, 17, 33, 49$ )로 전송된 모든 파장은 모든 출력 포트  $j$  ( $i=j+15$ )로 역다중화 된다. 반면, ONU에 의해 전송된 상향 트래픽들은 Stage-2 AWG와 두 단계의 결합기를 통해 OLT에게 전송된다. Stage-2 AWG를 통해 전송된 WDM 신호들은 결합기를 통해 결합되므로 32개 채널을 동시에 사용하는 네 개의 그룹이 생성된다. 따라서 동일한 파장 사이의 충돌을 피하기 위하여 OLT와 RN 사이에서 TDMA 방식이 사용된다.

그림 4는 제안한 구조에서 상향 전송 구조 및 파장 할당을 보여준다. 제안한 구조에서 상향 트래픽 전송을 위하여 각 ONU는 고정된 파장을 사용한다. Stage-2 AWG에는 각 64개의 ONU가 연결되며, 사용되는 파장 수는 32개이다. 이는 각 AWG에 연결

된 2개의 ONU가 동일한 파장을 사용하여 데이터를 전송함을 의미한다. 따라서 Stage-2 AWG를 통과한 파장이 Stage-2 앞 단에서 결합될 때, 파장의 충돌이 일어나지 않고 4개의 결합기를 통해 각각 32개의 독립된 파장이 결합되도록 결정해야 한다. 제안한 구조에서는 이를 위하여,  $n$ 번째 ONU가 ( $n-1$ )번째 ONU의 수신 파장과 동일한 파장을 사용하도록 구성하였다. 예를 들어, Stage-2 AWG 포트 1에 연결된 ONU<sub>1</sub>과 포트 2에 연결된 ONU<sub>2</sub>가 각각 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_{29}$ 를 통해 하향 데이터를 수신하였다면, ONU<sub>2</sub>와 ONU<sub>3</sub>는 각각 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_{29}$ 을 자신의 상향 전송 파장으로 사용한다. 따라서 AWG의 특성에 의해 Stage-2의 각 AWG에서 출수번의 모든 파장은 포트 2와 34로 다중화 되며, 짝수번의 모든 파장은 포트 18과 50으로 다중화된다. 즉, Stage-2의 첫 번째 AWG에서 ONU<sub>2</sub>~ONU<sub>17</sub>은 포트 2, ONU<sub>18</sub>~ONU<sub>33</sub>은 포트 18, ONU<sub>34</sub>~ONU<sub>49</sub>는 포트 34 그리고 ONU<sub>50</sub>~ONU<sub>64</sub>, ONU<sub>1</sub>은 포트 50으로 다중화된다. Stage-2의 두 번째 AWG도 동일한 방법으로 동작한다. 결국, 포트 2와 18, 포트 34와 50을 각각 하나의 결합기를 통해 연결함으로써 독립적인 32개의 파장을 갖는 네 개의 그룹을 생성할 수 있다. 이처럼 결합된 각 그룹의 32개의 파장이 Stage-1의 결합기를 통해 전송되므로 상향 채널들은 네 개의 그룹에 의하여 공유된다. 따라서 상향 전송을 위하여 하나의 채널을 공유하는 ONU 수는 4이다. 따라서 상향 전송을 위하여 적절한 MAC 프로토콜이 요구된다. OLT는 그룹 또는 채널을 기반으로 타임 슬롯을 할당할 수 있으며 할당된 타임 슬롯 동안 32개의 ONU는 동시에 데이터를 전송한다. 이때, AWG를 다중화기와 역다중화기로 동시에 사용하는 경우 누화(crosstalk) 현상이 발생할 수 있으므로 ONU에 대역통과 필터(bandpass filter)가 요구된다. 반면에 OLT는 이러한 영향을 거의 받지 않는다. 제안한 구조의 상향 전송 용량은  $WXR$ , 각 ONU의 평균 할당 대역은  $R/n$ 이다. 여기서  $n$ 은 각 채널을 공유하는 ONU 수이다.

표 3은 제안한 구조의 특성을 개략적으로 보여준다. 또한, 제안한 구조는 Stage-2 AWG 종단에 수동분배기를 연결함으로써 확장이 매우 용이하다. 이를 통해 서비스의 형태와 그룹에 따라 각기 다른 용량의 대역을 제공할 수 있으며 ONU 수에 따른 점증적인 확장이 가능하다. 그림 5는 제안한 구조에서 Stage-2 AWG 종단에 수동분배기를 연결한 확장된 형태를 보여준다.

표 3. 제안한 WDM-PON 구조의 특징  
Table 3. Characteristics of proposed WDM-PON architecture

Fiber	2 (상·하향)
AWG	3 (2단계)
결합기	5
전송 대역 윈도우	both: 1550nm
하향 전송	WDM
상향 전송	WDM/TDMA
OLT 송신기	MVL MFL TL
OLT 수신기	역다중화기, 수신기 배열
ONU 송신기	단일 파장 송신기 및 Fabry-perot 레이저
ONU 수신기	단일 파장 수신기
상향 전송 용량	N/W: WXR, ONU: R/n
하향 전송 용량	N/W: NXR, ONU: R
사용 가능한 링크 용량(이용률)	100%

표 4. 장치의 상대적인 비용  
Table 4 Normalized cost of devices

AWG-4	AWG-8	AWG-16	AWG-32	AWG-64	AWG-128
0.49399	0.65015	1.00000	1.56457	2.40240	3.74775
Fiber+ 설치비용	수동 분배기 (포트당)	레이저 (파장당)	LED	변조기	증폭기
1.27628	0.00038	0.01502	0.00113	0.00188	0.00751

산출하였으며, 이때 설치 비용이 광파이버 자체의 가격보다 훨씬 높은 것으로 가정하였다<sup>[5]</sup>. 상대적으로 산출된 광파이버 자체의 가격은 0.15015, 설치 비용은 1.12613이며 전체 비용은 이 두 가격을 합한 것으로 정의하였다. 또한 이 가격은 OLT와 RN 사이의 파이버 수만 고려되었으며, RN과 ONU 사이의 파이버는 고려하지 않는다. 표 4는 16X16 AWG를 기반으로 산출된 상대적인 소자 가격을 나타낸다.

그림 6과 7은 ONU수에 따른 각 WDM-PON 구조에 대한 상대적인 전체 비용이다. 그림 6은 파장 수와 AWG의 포트 수( $N \leq 128$ )에 제한을 두지 않고, 가장 낮은 비용을 산출하는 파장 및 포트 수를 선택하여 구성한 결과를 나타낸다. ONU의 수가 증가함에 따라 망을 구성하기 위한 소자 및 파이버의 수가 증가하므로 망 전체 비용은 증가한다. CWDM의 경우, ONU 수가 증가하더라도 파이버의 개수는 동일하다. 단지 128개의 ONU부터는 증폭기가 추가적으로 설치되므로 수동소자의 크기와 증폭기의 개수가 전체 비용의 증가분을 결정한다. 수동 소자의 가격은 매우 저렴하므로 ONU가 증가함에 따라 가격이 서서히 증가함을 확인할 수 있다. 반면, RITE-Net은 구조적인 특성 상 ONU의 수가 증가함에 따라 광파이버 및 AWG 수가 급격히 증가한다. 따라서 다른 구조에 비해 망 전체 비용이 크게 증가함을 확인할 수 있다. 제안한 구조는 ONU의 수가 증가함에 따라 망 전체 비용은 서서히 증가한다. 이는 제안한 구조에서 ONU가 증가함에 따라 수동소자와 ONU측의 광원 증가에만 영향을 받기 때문이다. 그림 7은 파장 수가 각각 32, 64일 때 ONU수 증가에 따른 각 구조의 전체 비용을 나타낸다. 전체 비용은 파장에 관계없이 ONU의 수가 증가함에 따라 증가하는 추세이다. 서비스 되는 파장의 개수는 AWG의 포트 수에 영향을 주기 때문에 각 구조적 특징에 따라 단일의 AWG에 의해 수용되는 ONU 수가 달라진다. 파장의 수가 클수록, 망의 전체 비용은 더 낮은 경향을 나타낸다. 이는 제공되는 파장

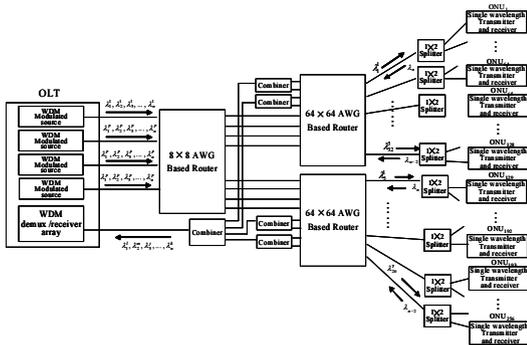


그림 5. ONU=256일때, 제안한 구조의 확장 형태  
Figure 5. Proposed scalable architecture with 256 ONUs

#### IV. 성능 평가 및 분석

본 장에서는 제안한 구조 및 기존 구조에 대하여 전체 비용, 망 용량, 각 ONU에게 할당 가능한 평균 상·하향 전송 대역 관점에서 성능 평가를 수행한다. 이를 위하여 망 구성을 위한 소자 가격을 정의 하고, 16X16 AWG를 기반으로 상대적인(normalized) 비용을 산출하였다<sup>[5,9]</sup>. 망 구성 소자들은 앞서 기술한 네 가지 구조를 기반으로 하였다. 이때, 증폭기는 CWDM을 구성하기 위하여 사용된다. CWDM의 경우 수동분배기의 분배 비율(ratio)이 증가 할수록 잡음 및 감쇄가 증가하므로 1:128의 분배 비율부터는 증폭기를 망 구성에 추가하는 것으로 가정한다.

AWG와 수동분배기, 결합기는 포트 수에 따라 그 비용이 증가하며, 레이저는 제공하는 파장에 따라 비용이 증가한다. AWG는 현재 128X128 크기가 상용화된 최대 크기이다. 따라서 이를 고려하여 각 구조를 구성하고 평가하였다. 또한 광가입자망의 20Km 거리를 고려하여 광파이버 및 설치 비용을

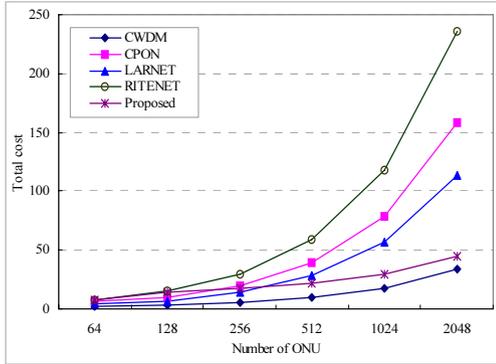


그림 6. ONU 수에 따른 전체 비용  
Figure 6. Total cost vs. number of ONU

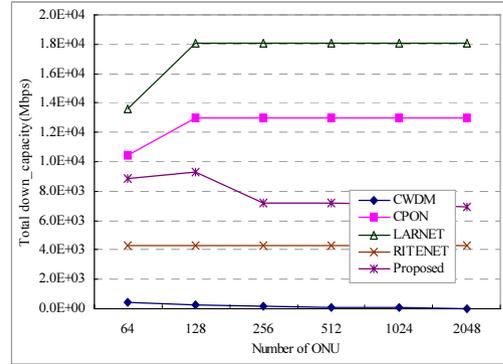


그림 8. 하향 전송을 위한 전체 망 용량  
Figure 8. Total capacity for downstream

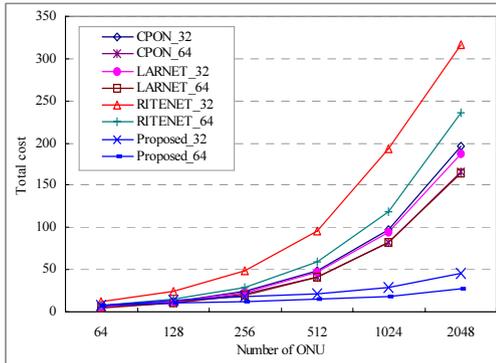


그림 7. 파장 변환에 따른 전체 비용  
Figure 7. Total cost for wavelength

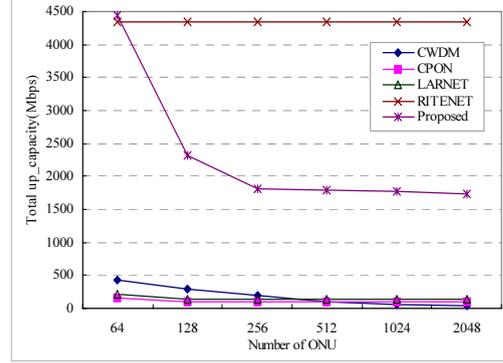


그림 9. 그림 12 상향 전송을 위한 전체 망 용량  
Figure 9. Total capacity for upstream

수가 증가함에 따라 다수의 ONU를 수용하기 위한 파이버 수의 감소를 가져온다. 따라서 파이버 및 설치비용 그리고 사용되는 AWG의 개수를 감소시킬 수 있다. 그림 6, 7을 통하여 제안한 구조의 비용이 가장 낮음을 확인할 수 있었다.

그림 8과 9는 ONU수 증가에 따라 각 구조들에 의해 제공되는 망 전체의 단위 비용 당 용량(capacity per unit cost)을 나타낸다. 그림 8은 하향 전송을 위한 전체 단위 비용 당 망 용량을 나타낸다. 그림에서 CWDM의 경우 상·하향 전송을 위하여 단일 파이버를 통해 단일의 채널을 제공하기 때문에 ONU의 수가 증가함에 따라 비용에 따른 제공 용량은 크게 감소한다. 반면 하향 전송을 위하여 DWDM을 사용하는 다른 구조들은 ONU의 증가함에 따라 거의 동일한 용량의 전송 대역을 제공함을 알 수 있다. 그림 9는 상향 전송을 위한 단위 비용 당 망 용량을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 구조적인 특징에 의해 제공되는 상향 전송은 큰 차

이를 보인다. RITE-Net의 경우, 상향 전송 역시 하향 전송과 마찬가지로 별도의 파이버를 통해 DWDM 기술을 사용하므로 ONU 수의 증가에 관계없이 동일한 대역을 제공한다. 반면, CWDM과 CPON의 경우 상향 전송을 위하여 단일 파장을 공유하는 형태이므로 ONU 수가 증가함에 따라 제공되는 망의 용량은 감소한다. 마찬가지로 LARNET은 상향 전송을 위하여 LED를 사용하므로 각 ONU가 시간에 따라 대역을 공유하므로 ONU수의 증가에 따라 망의 용량이 감소하는 경향을 나타낸다. 제안한 구조 역시 ONU수 증가에 따라 제공하는 대역은 감소하는 추세를 보이나 다른 구조에 비해 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. RITE-Net의 경우 상향을 위해 제공되는 대역은 월등히 높으나, 구조적 특징에 의해 실제 상향 전송에 사용되는 망의 용량은 제안한 구조와 동일하다.

그림 10과 11은 ONU 수 증가에 따른 단위 비용 당 ONU의 평균 전송 대역을 나타낸다. ONU의

### V. 결론

본 논문에서는 기존 PON구조 및 단일 AWG 기반의 WDM-PON 구조의 문제점을 해결하고, 새로운 서비스의 출현 및 망의 증가 추세를 반영할 수 있는 혼합형 2단 AWG 기반의 WDM-PON 구조를 제안하였다. 제안한 구조는 하향 전송을 위하여 2단 AWG를 사용하고, 상향 전송을 위하여 단일의 AWG와 결합기를 사용함으로써 RN을 구성하였다. 또한 상·하향 전송을 위하여 별도의 파이버를 사용하였으며, 각 파이버 당 32개의 파장을 갖는 것으로 가정하였다. 하향 전송의 경우 각 ONU에게 별도의 파장을 통해 하향 데이터를 전송하므로 하향 트래픽에 대한 투명성 및 보안능력을 제공한다. 반면 상향 전송은 통신의 비대칭적인 특성을 고려하여 다수의 ONU가 하나의 채널을 공유하는 형태이다. 따라서 상향 전송에서 단일의 AWG를 통과한 광신호가 결합기에 도달할 때 발생할 수 있는 충돌을 피하기 위하여 WDM과 TDMA를 결합한 기법을 사용하였다. 또한 상·하향 전송을 위하여 공유하는 Stage-2 AWG에서의 상·하향 간 파장 충돌 회피를 위하여 각 ONU의 전송 파장을 정의하였다.

제안한 구조의 성능 평가를 위하여 전체 비용, 망 용량, 각 ONU에게 할당 가능한 평균 상·하향 전송 대역 관점에서 성능 평가를 수행하였으며, 이를 위하여 구성 소자 가격을 기반으로 상대적인 비용을 산출하였다. 결과 그래프를 통해 제안한 구조는 낮은 비용을 제공하고 확장성이 좋으며, 상·하향 전송에서 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Glen Kramer and Biswanath Mukherjee, "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON(EPON)," *IEEE Communications Magazine*, Feburary 2002, pp 74-80.
- [2] IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force, <http://www.ieee802.3.org/3/efm>
- [3] Robert D. Feldman, "An Evaluation of Architectures Incorporating Wavelength Division Multiplexing for Broad-Band Fiber Access", *J. Lightwave Tech.*, Sept. 1998.
- [4] M.Zirngibl, C. H. Joyner, L. W. Stulz, C. Dragone, H.M.. Peresby and I. M. Kaminow,

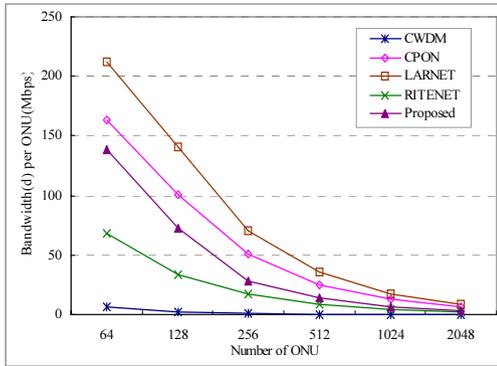


그림 10. ONU 평균 하향 전송 대역  
Figure 10. Average capacity for each ONU in downstream

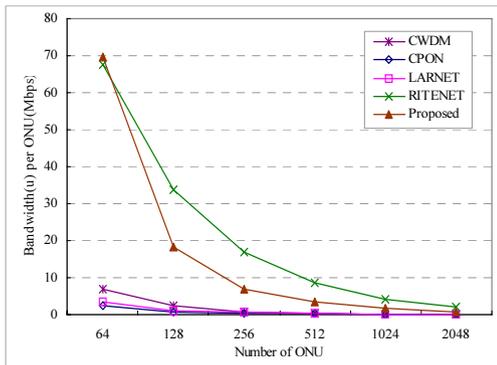


그림 11. ONU 평균 상향 전송 대역  
Figure 11. Average capacity for each ONU in upstream

표 5. 수용 가능한 ONU 수 및 가격  
Table 5. Cost and the number of acceptable ONU

62.5 Mbps의 상향 전송률			
	제공되는 ONU의 수	하향 전송 용량(Mbps)	가 격
CWDM	16	62.5	2.28
CPON	16	1000	5.09
LARNET	16	1000	3.00
RITE-Net	128	500	14.76
Proposed	512	250	17.80

수가 증가함에 따라 각 ONU에 할당되는 평균 대역은 감소한다. 하향 전송 용량의 경우 LATNET이, 상향 전송 용량의 경우 RITE-Net이 가장 높은 대역을 제공함을 알 수 있다. 그러나 결과에서 보듯이 이러한 구조는 상향과 하향에 있어 성능의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 반면에 제안한 구조의 경우, 상·하향 전송 관점에서 모두 좋은 성능을 나타낸다. 표 5는 상향 전송을 위하여 62.5Mbps의 전송률을 제공하는 일반적인 수동광가입자망을 기준으로 각 구조의 ONU 수용 능력, 제공 가능한 전송 용량 및 비용을 나타낸다.

“LARNET, a local access Router Network”, *IEEE Photonics Technologies Letters*, vol. 7, pp. 215-217, February 1995.

[5] G. Mayer, M. Martinelli, A. Pattavina and E. Salvadori, “Design and Cost Performance of the Multistage WDM-PON Access Networks”, *J. Lightwave Technology*, vol.18, pp.125-143, February 2000.

[6] F. J. Effenberger, “Economical WDM upgrades for PON systems”, exp, <http://exp.telecomitalia.com>, vol.2, pp.18-23, July 2002.

[7] F. T. An and K. S. Kim, “Evolution, Challenges and Enabling Technologies for Future WDM-Based Optical Access Networks”, *2nd Symposium On Photonics, Networking and Computing*, North Carolina, September 2003.

[8] Martin Maier, Michael Scheutzow, and Martin Reisslein, “The Arrayed-Waveguide Grating-Based Single-Hop WDM Network: An Architecture for Efficient Multicasting”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.21, pp.1414-1432, November 2003.

[9] Cormack G.D., Waschuk J.R., “1995 coherent broadband access systems [optical fiber networks]”, *Communications, Computers and Signal Processing*, 1989. *Conference Proceeding.*, IEEE Pacific Rim Conference on 1-2 June 1989 Page(s):431-434.

한 경 은 (Kyeong-Eun Han)

정회원



2001년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 졸업  
 2003년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 석사  
 2004년 3월~현재 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
 <관심분야> 광통신공학, WDM-PON, EPON, 매체접근제어프로토콜, 네트워크 프로토콜

이 승 현 (Seung-Hyun Lee)

정회원



2004년 2월 원광대학교 컴퓨터공학과 졸업  
 2006년 2월 전북대학교 컴퓨터공학과 석사  
 <관심분야> 광통신공학, WDM 네트워크, 보호 복구, SoC 설계

김 영 천 (Young-Chon Kim)

종신회원

한국통신학회 논문지 제19권 제2호 참조  
 현재 전북대학교 컴퓨터공학과 교수