

# 광섬유 브래그 격자 필터와 MZI를 이용한 전광 다중화기의 온도 특성

## Thermal Characteristics of an All Optical Add/Drop Multiplexer Using MZI and Fiber Bragg Gratings Filter

Yong-Hwan Son\*, Yong-Yuk Won\*, Jae-wook Kim\*\*, Jin-Ho Jung\*\*\*, Sang-Kook Han\*\*  
손 용 환\*, 원 용 욱\*, 김 재 욱\*\*, 정 진 호\*\*\*, 한 상 국\*\*

### Abstract

In this paper, the output and temperature characteristics for an optical signal of the fiber bragg grating have been considered. Also, output characteristics which depend on the temperature changes have been investigated for an all-optic add/drop multiplexer based on the fiber bragg grating and Mach-Zehnder interferometer. From the obtained results, they show that the center wavelength of output spectrum shifts approximately 0.01230 nm/°C within a temperature range -30°C ~ 90°C.

### 요 약

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 필터와 MZI로 구성된 전광 다중화기의 온도 특성에 대해 연구하였다. 전광 다중화기의 온도 특성을 분석하기 위해서, 전광 다중화기의 온도 변화에 대한 특성을 수치 해석하였으며, 실험을 통하여 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과로 부터 -30°C~90°C 범위 내에서 전광 다중화기의 출력 스펙트럼의 중심 파장은 약 0.01230 nm/°C로 변화함을 알 수 있었다.

*Key words* : optical add-drop multiplexer, MZI, FBG, center wavelength

### 1. 서론

정보통신기술의 급속한 발전, 그리고 디지털 방송 서비스 등 차세대 정보통신기술에 대한 연구와 보급으

\*연세대학교 전기전자공학부

(School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

\*\*남서울대학교 전자공학과

(Dept. of Electronic Engineering, Namseoul University)

\*\*\*호서대학교 전자공학과

(Dept. of Electronic Engineering, Hoseo University)

★ 교신저자 (Corresponding author)

接受日: 2008年 3月 5日, 修正完了日: 2008年 3月 20日

로 인해 정보의 용량은 폭발적으로 증대될 것이 확실하다[1]. 따라서 이와 같은 요구를 충족시키기 위하여 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술과 더욱 진보된 DWDM(Dense WDM) 기술 등을 적용하여 이러한 요구에 효과적으로 대응하여 왔다. WDM과 DWDM 광통신망의 구축을 위해서는 능동형 광소자 및 광의 결합 및 분기를 할 수 있는 광 다중화기 등이 필수적으로 필요하다. 그러나 현재 사용되고 있는 광소자는 대체로 벌크 형태의 물리적인 크기를 갖는 소자이므로, 손실이 비교적 크고 시스템을 소형화 및 경량화 하는 데 어려움이 있을 뿐만 아니라 안정화된 동작특성을 얻기 어려운 문제점이 있다[2]. 따라서 이를 보완하기 위해 광섬유 브래그 격자 필터(Fiber Bragg Grating)와 MZI(Mach-Zehnder Interferometer)를 이용하여 전광 다중화기(OADM: Optical Add/Drop

Multiplexer)를 구성하면, 광섬유만으로 이러한 소자를 구성할 수 있기 때문에 소형, 경량, 저손실의 소자를 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 안정된 동작특성을 구현할 수 있다[3]. 이러한 전광 다중화기는 시스템의 외부 또는 내부의 환경적 변화, 즉

온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지가 다중화기를 구성하는 광섬유 브래그 격자 필터에 가해질 경우, 격자의 유효굴절률과 격자주기가 변하게 되어 송수신 채널의 전송파장이 변화하게 되어 송수신 채널의 변경을 위한 브래그 반사파장을 쉽게 변화시킬 수 있으며, 또한 송수신 채널이 고정된 시스템에서는 이로 인한 시스템의 오류발생으로 안정된 동작특성을 구현하기가 어려워지는 단점을 가진다. 이에 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 필터와 MZI를 이용하여 전광 다중화기를 구성하고 온도제어기를 사용하여 온도 변화에 대한 전광 다중화기의 온도특성을 수치해석과 실험을 통하여 비교 고찰하고자 한다.

## II. 광섬유 브래그 격자 필터

광섬유 브래그 격자 필터는 광섬유의 코어에 자외선 영역의 엑시머 레이저(Kr 또는 ArF excimer Laser)를 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 영구적으로 새김으로써 브래그 조건에 따라 특정 파장을 반사시키는 특성을 갖는 소자이다[2]. 따라서 이러한 조건이 변화함으로써 반사되는 특정파장이 변경될 수 있다. 격자 필터를 전파하는 두 모드가 동일하고 격자가 일반적으로 1차 회절에 의해 지배된다고 가정하면, 브래그 반사파장과 격자주기와의 관계는 에너지 및 모멘트 보존 법칙에 의해 다음 식을 만족한다[3].

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

위 식에서  $\lambda_B$  는 브래그 반사파장이며, 유효굴절률  $n_{eff} = n_1 \sin\theta$  이고,  $\Lambda$  는 격자주기,  $n_1$  은 코어의 굴절률이다. 따라서 격자에 물리적 에너지가 인가되면, 그로 인해 격자의 주기와 유효굴절률이 변하게 되어 브래그 반사파장이 변경될 수 있다[4]. 따라서 식 (1) 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta\Lambda)n_{eff} + 2\Lambda(\Delta n_{eff}) \quad (2)$$

만약 격자에 인가되는 온도가 변한다면, 식 (2)는 다

음 식과 같이 온도에 관계된 항으로 나타낼 수 있다 [4].

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= 2\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}n_{eff} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Lambda\right)\Delta T_{FBG} \\ &= \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda)\Delta T_{FBG} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\Delta T_{FBG}$ 는 전광 다중화기의 광섬유 브래그 격자 필터에 인가되는 온도의 변화이다. 또한  $\alpha_n$ 은 열에 의한 굴절률변화를 나타내는 열 광학 계수(thermo-optic coefficient)로서, 게르마늄이 도핑된 실리콘 광섬유에서 보통  $8.6 \times 10^{-6}$  이며,  $\alpha_\Lambda$ 은 열에 의한 주기변화를 나타내는 열 확장 계수(thermo expansion coefficient)로서  $0.55 \times 10^{-6}$  값을 갖는다. 식 (3)을 이용하여 광섬유 브래그 격자 필터의 온도 민감도(temperature sensitivity)  $ST_{FBG}$ 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$ST_{FBG} \equiv \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T_{FBG}} = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda) \quad (4)$$

결국 격자에 가해진 온도가 변화했을 때, 온도에 따라 변화된 브래그 반사파장  $\lambda_{B(shift)}$ 는 다음 식으로 된다.

$$\lambda_{B(shift)} = \lambda_B + ST_{FBG} \cdot \Delta T_{FBG} \quad (5)$$

광섬유 브래그 격자 필터에서 특정 파장의 빛이 반사되는 것을 수식적으로 고려하면 광섬유 내의 진행파와 반사파 사이에서 광의 결합이 일어남으로 인해 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 이러한 광의 결합 관계는 결합 파동방정식의 해를 구함으로 설명된다. 광섬유 브래그 격자의 경우, 진행방향으로 진행하는 파와 격자에서 반사되어 되돌아오는 파의 광 필드는 아래 식의 형태로 표현된다[5].

$$E(z) = A(z) \exp(jqz) + B(z) \exp(-jqz) \quad (6)$$

여기서,  $A$ 와  $B$ 는 각각 진행하는 파와 격자에 의해 반사되는 파의 진폭을 나타내고,  $q$ 는 전파상수,  $z$ 는 진행방향을 나타낸다. 광섬유에서 광의 전파를 설명하는 파동방정식에 식 (6)을 대입하면 다음 식과 같은 결합 파동방정식을 얻을 수 있다[5].

$$\frac{dA}{dz} = j\delta A + jkB \quad (7)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\delta B - jk^* A \quad (8)$$

여기서,  $\delta$ 는 브래그 파장에서 모드의 동조이탈계수이고,  $k$ 는 결합계수이다.

$z$  방향으로 격자를  $L$  만큼 진행했을 때, 결합 파동방정식을 통해 격자의 입력 단에서 진행파와 반사파의 관계를 알 수 있다. 따라서 결합 파동방정식을 풀고 행렬해석법을 이용하여, 그 해를 행렬식으로 정리하면 다음 식으로 된다[6].

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $S$  행렬은 광섬유 브래그 격자 필터의 특성을 나타내는 전달 행렬이고, 결합모드 이론을 이용하면  $S$  행렬의 각 원소는 아래 식들과 같이 표현된다[5, 7].

$$S_{11} = (1-r^2)^{-1} [\exp(jqL) - r^2 \exp(-jqL)] \quad (10)$$

$$S_{22} = (1-r^2)^{-1} [\exp(-jqL) - r^2 \exp(jqL)] \quad (11)$$

$$S_{21} = -S_{12} = (1-r^2)^{-1} r [\exp(jqL) - \exp(-jqL)] \quad (12)$$

여기서,  $L$ 은 광섬유 브래그 격자 필터의 길이,  $q = \pm[\delta^2 - \kappa^2]^{1/2}$  는 진행파와 반사파의 전파상수이고, 유효반사계수  $r = (q - \delta) / \kappa$ ,  $\delta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ 는 주기  $\Lambda$  와 관련된 브래그 파장  $\lambda_B$  에서의 동조이탈계수,  $\kappa = \pi \Delta n / \lambda_B$  는 격자의 결합계수,  $\Delta n$ 는 격자의 굴절률 차이이다. 만약, 광섬유 브래그 격자 필터의 온도가 변화하게 되면 브래그 조건이 변화하여 브래그 반사파장이 변화하므로, 결국 격자의 결합계수  $\kappa$ , 동조이탈계수  $\delta$ , 유효반사계수  $r$ , 전파상수  $q$  는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = \pi \Delta n / \lambda_{B(shift)} \quad (13)$$

$$\delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_{\beta(shift)}) \quad (14)$$

$$r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = [q(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} - \delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}] / \kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} \quad (15)$$

$$q(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = \pm[\delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2 - \kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2]^{1/2} \quad (16)$$

따라서 온도영향에 의한  $S$  행렬의 원소들은 다음 식

으로 표현된다.

$$S(\lambda, T)_{11\Delta T_{FBG}} = (1-r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} [e^{(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)} - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2 e^{(-jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)}] \quad (17)$$

$$S(\lambda, T)_{22\Delta T_{FBG}} = (1-r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} [e^{(-jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)} - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2 e^{(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)}] \quad (18)$$

$$S(\lambda, T)_{21\Delta T_{FBG}} = -S(\lambda, T)_{12\Delta T_{FBG}} = (1-r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} [e^{(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)} - e^{(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)}] \quad (19)$$

### III. 전광 다중화기의 온도 특성

전광 다중화기는 WDM 채널에서 입력신호 중 특정 파장의 신호를 분기하고, 또한 입력신호에 특정파장의 신호를 결합하는 역할을 한다[3]. 본 논문에서 구성한 MZI형태의 전광 다중화기는 그림 1과 같이 두 개의 3dB 방향성 결합기를 이용하여 MZI를 구성하고 MZI의 양쪽 경로에 동일한 특성의 광섬유 브래그 격자 필터를 형성시켜 원하는 신호의 채널을 선택하여 결합, 분기가 가능하도록 구성하였다.

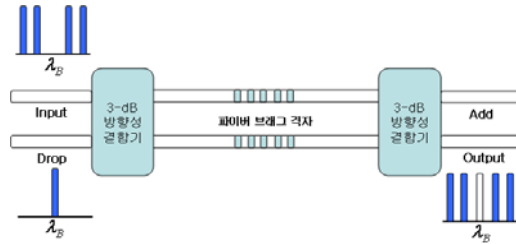


그림 1. MZI 와 광섬유 브래그 격자 필터를 이용한 전광 다중화기

Fig. 1 Optical add-drop multiplexer using fiber Bragg gratings filter and MZI

그림 1에서처럼 전광 다중화기의 입력 단으로 여러 파장의 신호가 입력되면 이들 입력 신호 중 브래그 반사파장의 신호가  $\lambda_B$ 라 하면 그 파장의 신호는 광섬유 브래그 격자 필터에 의해 반사되어 분기 단자로 분리되고, 나머지 신호는 광섬유 브래그 격자 필터를 통과하여 출력 단자로 출력되며, 결합 단자로 입력된 신호는 격자에 반사되어 다시 출력 단자로 출력되어, 초기 입력신호와 더해지는 기능을 하게 된다[8].

MZI 각 단의 입출력 특성은 다음 식과 같이 3dB 커플러와 위상천이부의 곱으로 표현될 수 있다[8].

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = M_{3dB} M_{shift} M_{3dB} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} = M_{MZI} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서  $M_{3dB}$  와  $M_{shift}$  는 각각, 3dB 커플러의 전달함수와 위상차 함수를 나타내며, MZI의 전달함수는 다음 식과 같이 된다.[8]

$$M_{MZI} = j \begin{bmatrix} \sin(k\frac{\Delta L_{eff}}{2}) & \cos(k\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \\ \cos(k\frac{\Delta L_{eff}}{2}) & \sin(k\Delta L_{eff}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

만약, 입력되는 두 광신호를  $E_{in1}$ ,  $E_{in2}$  라 하면 MZI의 출력단에서 출력되는 광신호의 세기는 다음 식으로 된다[9].

$$P_{out1} = (E_{out1})^2 = \sin^2(k_1\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in1} + \cos^2(k_2\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in2} \quad (22)$$

$$P_{out2} = (E_{out2})^2 = \cos^2(k_1\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in1} + \sin^2(k_2\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in2} \quad (23)$$

결국, 광섬유 브래그 격자 필터와 MZI의 특성에 의해, 온도 변화에 대한 OADM 각 단의 출력특성을 수식적으로 나타내면 다음 식으로 된다[10].

$$\text{Output}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{e^{j(\psi_A + \psi_C)} + e^{j(\psi_B + \psi_D)}}{S(\lambda, T)_{22\Delta T_{FBG}}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (24)$$

$$\text{Add}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{e^{j(\psi_A + \psi_C)} + e^{j(\psi_B + \psi_D)}}{S(\lambda, T)_{22\Delta T_{FBG}}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (25)$$

$$\text{Drop}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{S(\lambda, T)_{21\Delta T_{FBG}} \times (e^{j2\psi_A} + e^{j2\psi_B}) \times \frac{1}{2}}{S(\lambda, T)_{22\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \quad (26)$$

#### IV. 수치 해석

본 논문에서 제안한 전광 다중화기의 온도변화에 따른 출력 단에서의 출력특성을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 그림 2는 식 (24-26)을 이용하여 온도 변화에 따른 전광 다중화기의 출력 스펙트럼을 수치 해석하여

나타낸 것이다.

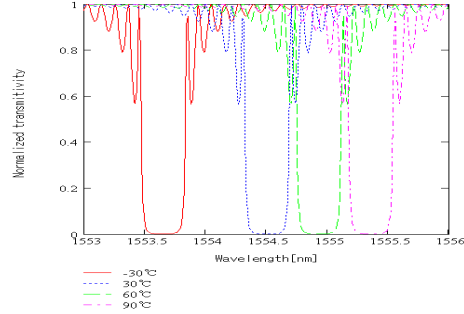


그림 2. 온도변화에 따른 전광 다중화기의 출력 스펙트럼

Fig. 2 Transmission spectra of OADM at output port

그림의 결과로 부터 전광 다중화기에 가해지는 온도에 따라 출력 스펙트럼의 중심파장이 이동하므로 채널의 동작파장을 변경 시킬 수 있으며, 또한 출력되는 광신호의 중심파장 변화로 인한 시스템 오류가 발생할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 전광 다중화기의 출력단에서 중심파장의 이동을 수치 해석하여 그림 3에 나타내었다.

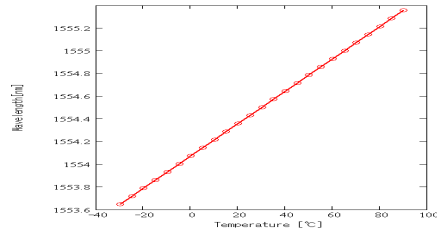


그림 3. 온도변화에 따른 전광 다중화기의 중심파장의 이동

Fig. 3 Wavelength shift along temperature of OADM

-30°C에서 전광 다중화기의 중심파장은 1553.649nm, 30°C에서 1554.502nm이며, 60°C에서는 1554.9287nm로, 90°C에서는 1555.3554nm로 이동하여 온도가 1°C 상승할 때 중심파장은 약 0.0142nm 이동하였다. 따라서

전광 다중화기의 광섬유 브래그 격자 필터에 가해지는 온도변화에 따라 중심파장이 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다.

V. 실험

본 논문에서는 그림 4에 나타난 것처럼 동일한 특성을 갖는 광섬유 브래그 격자 필터와 MZI를 이용하여 전광 다중화기를 구성하고, BBS-1550+1FP 광대역 광원과 온도제어기와 제어프로그램 및 Anritsu 사의 MS9710C 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 온도 변화에 따른 전광 다중화기의 출력특성을 측정하였다.

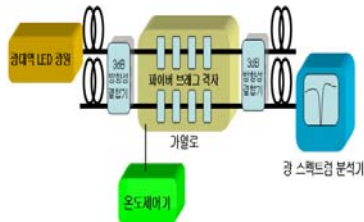


그림 4. 전광다중화기의 특성실험을 위한 구성도  
Fig. 4 The experimental setup of OADM

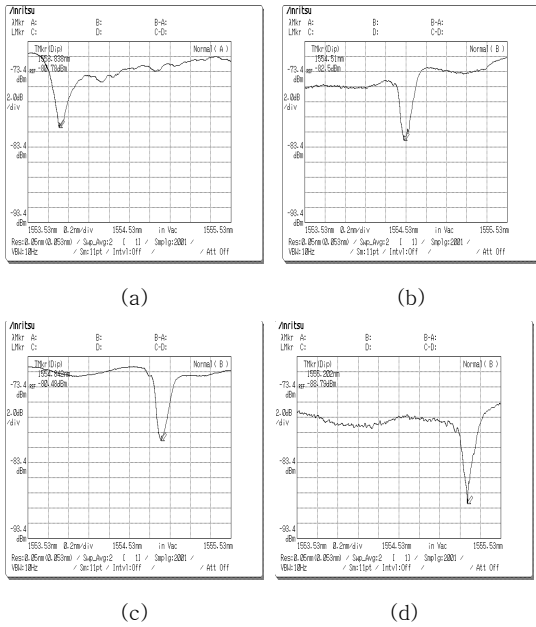


그림 5. 온도 변화에 따른 전광 다중화기의 출력단 스펙트럼

Fig. 5 Output spectrum of OADM in various temperature

그림 5는 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 전광 다중화기의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로, (a)는 -30°C, (b)는 30°C, (c)는 60°C 그리고 (d)는 90°C일 때 출력 스펙트럼이며, 수치해석의 결과처럼 온도에 따라 중심파장이 이동함을 알 수 있다.

또한 그림 6과 7은 -30°C에서 90°C까지의 온도범위에 대해 전광 다중화기에 가해지는 온도를 상승, 상승 후 일정시간 유지 그리고 하강, 하강 후 및 일정시간 유지시키면서 출력단의 파장의 변화와 출력의 크기를 각각 측정하여 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 광 다중화기의 출력 중심파장은 온도에 따라 선형적으로 이동함을 알 수 있으며 이들에 대한 수치해석의 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한 그림 7의 결과로부터 온도의 변화에 따른 출력스펙트럼의 중심 파장의 크기는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

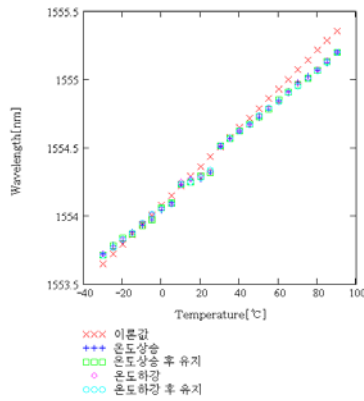


그림 6. 온도 변화에 따른 전광 다중화기에 대한 출력 중심 파장의 이동

Fig. 6 Wavelength shift of OADM in various temperature

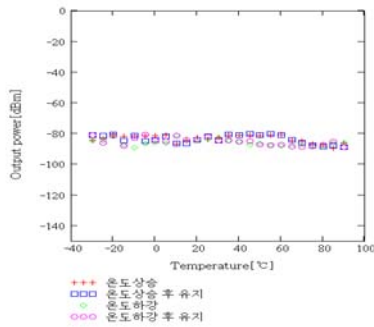
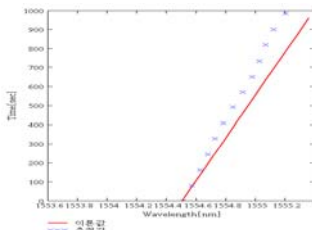


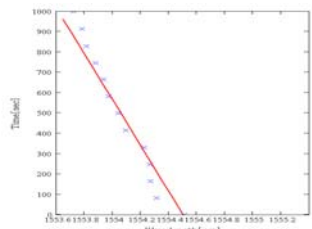
그림 7. 온도 변화에 따른 전광 다중화기에 대한 중심파장의 출력크기

Fig. 7 Output power of OADM in various temperature

그림 8은 전광 다중화기의 광섬유 브래그 격자 필터에 가해지는 온도의 가열, 냉각 시간에 따른 중심파장의 이동 정도를 나타낸 것으로 온도가 변화하는 시간에 따라 비교적 선형적으로 파장이 이동함을 알 수 있다.



(a) 가열



(b) 냉각

그림 8. 가열과 냉각시간에 따른 중심 파장의 이동  
Fig. 8 wavelength shift in various heating time

## VI. 결 론

본 논문에서는 MZI와 광섬유 브래그 격자 필터를

이용하여 전광 다중화기를 구성한 후, 온도제어기를 통해 온도변화에 대한 전광 다중화기의 출력특성 변화를 수치해석과 실험을 통하여 비교, 고찰하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과, 시스템의 온도가 변화하게 되면 그에 따라 전광 다중화기에서 출력되는 광신호의 중심파장의 크기는 거의 변화가 없지만, 출력 파장은 장파장 쪽으로 약 0.01230[nm/°C] 변화하게 되어 수치해석으로부터 얻어진 약 0.01422[nm/°C]에 대해 비교적 근사함을 알 수 있었으며 오차의 범위는 0.00192[nm/°C] 이다. 또한 실험에 사용된 광섬유 브래그 격자의 열 광학 계수와 열 확장 계수의 합은 약  $7.94 \times 10^{-6}$ 로 이론값인  $9.15 \times 10^{-6}$ 와 비교할 때 약  $1.21 \times 10^{-6}$ 의 오차를 가지며, 이 값은 실험에 사용된 광섬유 브래그 격자의 온도에 따른 실제 열 광학 계수와 열 확장 계수의 합임을 알 수 있다. 결국 시스템 온도의 변화는 전광 다중화기의 특성을 변화시켜 신호 채널이 고정된 시스템에서 동작 오류를 발생시키므로 온도의 안정성 확보가 매우 중요함을 알 수 있으며, 또한 온도의 변화와 변화하는 시간에 따라 선형적으로 중심파장이 이동하므로 신호채널의 변경을 위한 파장 가변 시스템에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 상업용 목적을 위한 통신용 소자의 온도범위에서 보다 확장된 산업용 목적을 위한 통신용 소자의 동작 온도 범위인  $-25^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 에서 얻어진 결과 데이터들로 광 다중화기를 이용한 광통신시스템의 운용 시, 보다 넓은 온도범위에서 신호채널의 변경을 위한 파장의 가변, 온도변화에 따른 동작 파장의 안정성과 오류의 정도를 예측할 수 있는 유용한 데이터로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 조성선, 광통신부품 기술 및 시장 동향, 주간 기술 동향 통권 1093호, 한국전자통신연구원, 2003.
- [2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S.Kawasaki, Appl. Phys. Lett., 62, 1035, 1993.
- [3] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Telecommunication and Sensing*, Artech House, 1999.
- [4] M. Mahmoud, Z. Ghassemlooy, "Tunable Fiber Gratings Modeling and Simulation," Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium, 2003
- [5] Govind P. Agrawal, and Andrew H. Bobeck, "Modeling

of Distributed Feedback Semiconductor Lasers with Axially Varying Parameters," *J. of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2047-2414, 1988.

[6] M. Yamada and K. Sakuda, "Analysis of almost periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach," *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 3474-3478, 1978.

[7] Govind P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, New York, Van Nostrand Reinhold, chap. 7. 1993.

[8] F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert and K. O. Hill, "An All-Fiber Dense Wavelength Division Multiplexor/Demultiplexor Using Photoimprinted Bragg Gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 388-390, 1995.

[9] C. H. Huang, H. Luo, S. Xu and P. Chen, *Conference on Optical Fiber Communication*, pp. 79-81, 1999.

[10] 손용환, 정진호, "FBG와 MZI를 이용한 DWDM용 OADM의 설계와 특성에 관한 연구," 전자공학회논문지, 제41권, SD편, 제5호, pp.419-424, 2004.

저 자 소 개

손 용 환 (정회원)



1999년 : 호서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 2001년 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학석사)  
 2008년 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학박사)  
 2008년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 박사 후 연구원

<주관심분야> 광 무선통신, WDM 광통신, 집적광학

원 용 옥 (정회원)



1997년 : 연세대학교 전과공학과 졸업 (공학사)  
 1999년 : 연세대학교 대학원 전과공학과 (공학석사)  
 2008년 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)  
 2008년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 박사 후 연구원

<주관심분야> Optical communication device & system, Microwave Photonics, Optical access networks

김 재 옥 (정회원)



1993년 : 호서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1998년 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학석사)  
 2003년 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학박사)  
 2006년 3월~현재 : 남서울 대학교 전자공학과 전임강사

<주관심분야> 자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발

정 진 호 (정회원)



1987년~현재 : 호서대학교 전자공학과 교수  
 <주관심분야> 광 무선통신, WDM 광통신, 집적광학

**한 상 국** (정회원)

1986년 : 연세대학교 전자공학과  
졸업 (공학사)

1988년 : University of Florida  
(공학석사)

1994년 : University of Florida  
(공학박사)

1996년~현재 : 연세대학교 전기  
전자공학부 교수

<주관심분야>Optical communication device &  
system, Microwave Photonics, Optical access  
networks