한국산학기술학회논문지
Vol. 7, No. 6, pp. 1390-1395, 2006

FBG를 이용한 DWDM용 OADM의 온도 특성에 관한 연구

손용환[1], 정진호[1*]

Thermal Characteristics of an OADM Using FBG for a DWDM

Yonh-Hwan Son[1] and Jin-Ho Jung[1*]

요 약 본 논문에서는 FBG 필터로 구성된 DWDM용 OADM을 제안하고 그 온도 특성에 대해 연구하였다. 제안된 OADM의 온도 특성을 분석하기 위해서, OADM의 온도 응답을 구하고 수치 해석하였으며, OADM을 제작하여 그 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과로 부터 -30℃~90℃ 범위 내에서 제안된 OADM의 출력 스펙트럼 중심 파장이 약 0.01230 nm/℃로 변화함을 알 수 있었다.

Abstract In this paper, we propose an optical add-drop multiplexer(OADM) for dense-WDM (DWDM) which consists of the fiber Bragg grating(FBG) filter and investigate the temperature characteristics of it. To resolve the characteristics, we find and analyze numerically its temperature response, and fabricate an OADM and measure its output spectrum. From the obtained results, we khow that the center wavelength of output spectrum shifts approximately 0.01230 nm/℃ within a temperature range -30℃ ~ 90℃.

Key words : OADM, FBG, 온도특성, DWDM

I. 서 론

인터넷과 이동통신, 그리고 다양한 멀티미디어 서비스 등을 제공하는 정보통신기술의 급속한 발전, 그리고 IMT-2000 서비스와 디지털 방송서비스 등 차세대 정보통신기술에 대한 연구와 보급으로 인해 정보의 용량은 폭발적으로 증대될 것이 확실하다[1]. 따라서 이와 같은 요구를 충족시키기 위하여 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술[1]과 더욱 진보된 DWDM(Dense WDM) 기술[1] 등을 적용하여 이러한 요구에 효과적으로 대응하여 왔다. WDM과 DWDM 광통신망의 구축을 위해서는 능동형 광소자와 광의 경로 등의 제어를 위한 광 커넥터, 광 아이솔레이터, 광 써큘레이터, 그리고 광의 결합 및 분기를 할 수 있는 광 다중화기 등이 필수적으로 필요하다. 그러나 광의 결합과 분기를 위해 현재 사용되고 있는 광소자는 대체로 벌크 형태의 물리적인 크기를 갖는 소자이므로, 손실이 비교적 크고 시스템을 소형화 및 경량화 하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 안정화된 동작특성을 얻기 어려운 문제점이 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 파이버 브래그 격자(Fiber Bragg Grating: FBG)[2]를 이용하여 OADM(Optical Add/Drop Multiplexer)[3]을 구성하면, 광 파이버만으로 이러한 소자를 구성할 수 있기 때문에 소형, 경량, 저손실의 소자를 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 안정된 동작특성을 구현할 수 있다. 그러나 이러한 OADM도 시스템의 외부 또는 내부의 환경적 변화, 즉 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지가 OADM을 구성하는 FBG에 가해질 경우, 격자의 유효굴절률과 격자주기가 변하게 되어 송수신 채널의 전송파장이 변화하게 되고, 이로 인한 시스템의 오류발생으로 안정된 동작특성을 구현하기가 어려워진다. 이에 본 논문에서는 광 커플러와 FBG로 OADM을 구성하고, 온도를 가변시키고 일정 온도로 유지시킬 수 있는 온도제어기를 사용하여 동작 오류의 중요 요인 중 하나인 온도 변화에 대한 OADM 온도특성을 컴퓨터 수치해석과 실험을 통하여 비교 고찰하고자 한다.

이 논문은 2005년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임

[1]호서대학교 전자공학과
*교신저자: 정진호(jhjung@office.hoseo.ac.kr)

II. FBG(Fiber Bragg Grating)의 특성

FBG 소자는 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. FBG는 간단히 광학 회절격자로 볼 수 있으며, 각 θ_1 으로 격자에 입사한 광은 아래의 격자방정식을 만족한다[3].

$$n\ \sin\theta_2 = n\ \sin\theta_1 + m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{1}$$

여기서, θ_2 는 회절된 파의 회절각이며, Λ 는 격자의 주기, 정수 m 은 회절차수를 나타낸다. 모드의 전파상수는 $\beta = (2\pi/\lambda)n_{eff}$ 이므로, 식 (1)로 전파된 모드는 다음 식으로 된다[3].

$$\beta_2 = \beta_1 + m\frac{2\pi}{\Lambda} \tag{2}$$

여기서, 두 모드가 동일하고 FBG가 일반적으로 1차 회절에 의해 지배된다고 가정하면, 브래그 반사파장과 격자주기와의 관계는 에너지 및 모멘트 보존 법칙에 의해 다음 식을 만족한다[4].

$$\lambda_B = 2\,n_{eff}\,\Lambda \tag{3}$$

위 식에서 λ_B 는 브래그 반사파장이며, Λ는 FBG의 격자주기, 유효굴절률 $n_{eff} = n_1 \sin\theta$ 이며, n_1 은 코어의 굴절률이다. 따라서 FBG에 온도, 스트레인, 압력 등의 환경변화에 의한 물리적 에너지가 인가되면, 그로 인해 FBG의 주기와 유효굴절률이 변하게 되어 브래그 반사파장이 변경될 수 있다[5]. 따라서 식 (3)은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta\Lambda)n_{eff} + 2\Lambda(\Delta n_{eff}) \tag{4}$$

만약 FBG에 인가되는 온도가 변한다면, 식 (4)는 다음 식과 같이 온도에 관계된 항으로 나타낼 수 있다[4].

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}n_{eff} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Lambda\right)\Delta T_{FBG} = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda)\Delta T_{FBG} \tag{5}$$

여기에서 ΔT_{FBG}는 OADM의 FBG에 인가되는 온도의 변화이다. 또한 α_n은 열에 의한 굴절률변화를 나타내는 열 광학 계수(thermo-optic coefficient)로서, 게르마늄이 도핑 된 실리카 파이버에서 보통 8.6×10^{-6} 이며, α_Λ은 열에 의한 주기변화를 나타내는 열 확장 계수(thermo expansion coefficient)로서 0.55×10^{-6} 값을 갖는다. 식 (5)를 이용하여 FBG의 온도 민감도(temperature sensitivity) ST_{FBG} 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$ST_{FBG} \equiv \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T_{FBG}} = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda) \tag{6}$$

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

$$\lambda_{B(shift)} = \lambda_B + ST_{FBG} \bullet \Delta T_{FBG} \tag{7}$$

FBG에서 특정 파장의 빛이 반사되는 것을 수식적으로 고려하면 광섬유 내의 진행파와 반사파 사이에서 광의 결합이 일어남으로 인해 발생되는 현상으로 볼 수 있다. 이러한 광의 결합 관계는 결합 파동방정식의 해를 구함으로 설명된다. FBG의 경우, 진행방향으로 진행하는 파와 격자에서 반사되어 되돌아오는 파가 포함되므로 광 필드는 아래 식의 형태로 표현된다[6].

$$E(z) = A(z)\exp(jqz) + B(z)\exp(-jqz) \tag{8}$$

여기서, A와 B는 각각 진행하는 파와 FBG에 의해 반사되는 파의 진폭을 나타내고, q 는 전파상수, z 는 진행방향을 나타낸다. 광파이버에서 광의 전파를 설명하는 파동방정식에 식 (8)을 대입하면 다음 식과 같은 결합파동방정식을 얻을 수 있다[6].

$$\frac{dA}{dz} = j\delta A + jkB \tag{9}$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\delta B - jk^* A \tag{10}$$

여기서, δ 는 브래그 파장에서 모드의 동조이탈계수이고, k 는 결합계수이다.

z 방향으로 FBG를 L 만큼 진행했을 때, 결합 파동방정식을 통해 FBG 입력 단에서 진행파와 반사파의 관계를 알 수 있다. 따라서 결합 파동방정식을 풀고 행렬해석법을 이용하여, 그 해를 행렬식으로 정리하면 다음 식으로 된다[7].

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, S 행렬은 FBG의 특성을 나타내는 전달 행렬이고, 결합모드 이론을 이용하면 S 행렬의 각 원소는 아래 식들과 같이 표현된다[6, 8].

$$S_{11} = (1-r^2)^{-1}[\exp(jqL) - r^2\exp(-jqL)] \quad (12)$$

$$S_{22} = (1-r^2)^{-1}[\exp(-jqL) - r^2\exp(jqL)] \quad (13)$$

$$S_{21} = -S_{12} = (1-r^2)^{-1}r[\exp(jqL) - \exp(-jqL)] \quad (14)$$

여기서, L 은 FBG의 길이, $q = \pm[\delta^2 - \kappa^2]^{1/2}$ 는 진행파와 반사파의 전파상수이고, 유효반사계수 $r = (q-\delta)/\kappa$이다. 또한, $\kappa = \pi\Delta n/\lambda_B$ 는 FBG의 결합계수(Δn: 격자의 굴절률 차), $\delta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ 는 주기 Λ 와 관련된 브래그 파장 λ_B 에서의 동조이탈계수이다. 만약, FBG의 온도가 변화하게 되면 브래그 조건이 변화하여 브래그 반사파장이 변화하므로, 결국 격자의 결합계수 κ, 동조이탈계수 δ, 유효반사계수 r, 전파상수 q 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\kappa_{\Delta T_{FBG}} = \pi\Delta n/\lambda_{B(shift)} \quad (15)$$

$$\delta_{\Delta T_{FBG}} = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_{\beta(shift)}) \quad (16)$$

$$r_{\Delta T_{FBG}} = (q_{\Delta T_{FBG}} - \delta_{\Delta T_{FBG}})/\kappa_{\Delta T_{FBG}} \quad (17)$$

$$q_{\Delta T_{FBG}} = \pm[(\delta_{\Delta T_{FBG}})^2 - (\kappa_{\Delta T_{FBG}})^2]^{1/2} \quad (18)$$

따라서 온도영향에 의한 S 행렬의 원소들은 다음 식으로 표현된다.

$$S_{11\Delta T_{FBG}} = (1 - r^2_{\Delta T_{FBG}})^{-1}[\exp(jq_{\Delta T_{FBG}}L) - r^2_{\Delta T_{FBG}}\exp(-jq_{\Delta T_{FBG}}L)] \quad (19)$$

$$S_{22\Delta T_{FBG}} = (1 - r^2_{\Delta T_{FBG}})^{-1}[\exp(-jq_{\Delta T_{FBG}}L) - r^2_{\Delta T_{FBG}}\exp(jq_{\Delta T_{FBG}}L)] \quad (20)$$

$$S_{21\Delta T_{FBG}} = -S_{12\Delta T_{FBG}} = (1 - r^2_{\Delta T_{FBG}})^{-1}\gamma_{\Delta T_{FBG}}[\exp(jq_{\Delta T_{FBG}}L) - \exp(jq_{\Delta T_{FBG}}L)] \quad (21)$$

Ⅲ. OADM의 온도에 대한 특성

전광 결합/분기 다중화기(Optical Add/Drop Multiplexer: OADM)[3]는 WDM 채널에서 입력신호 중 특정 파장의 신호를 분기하고, 또한 입력신호에 특정파장의 신호를 결합하는 역할을 한다. 본 논문에서 구성한 MZI(Mach-Zehnder Interferometer)형태의 OADM은 그림 1과 같이 위쪽 파이버와 아래쪽 파이버에 대해 ΔL 의 길이로 경로 차를 주어 발생하는 위상차의 원리를 이용하는 것이다. 두 개의 3dB 방향성 결합기를 이용하여 MZI(Mach-Zehnder Interferometer)를 구성하고 MZI의 양쪽 경로에 동일한 특성의 FBG를 형성시켜 원하는 신호의 채널을 선택하여 결합, 분기가 가능하도록 구성하였다. 그림 1에서처럼 OADM의 입력 단으로 여러 파장의 신호가 입력되면, 그 신호는 양쪽 경로로 나뉘어져 MZI의 특성에 의해 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 가지고 진행하고, 이들 신호 중 브래그 반사파장의 신호가 λ_B라 하면 그 파장의 신호는 FBG에 의해 반사되어 분기 단자로 분리되고, 나머지 신호는 FBG를 통과하여 출력 단자로 출력되며, 결합 단자로 입력된 신호는 격자에 반사되어 다시 출력 단자로 출력되어, 초기 입력신호와 더해지는 기능을 하게 된다[9].

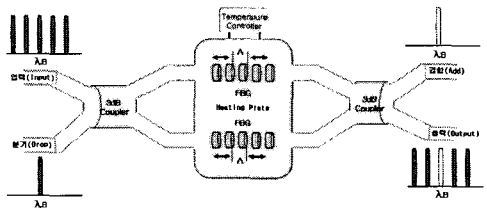


그림 1. MZI 와 FBG를 이용한 전광 결합/분기 다중화기

두 파장 λ_1 과 λ_2 신호가 E_{in1}에 입력되면, 두 파이버로 분리되어 진행하고 E_{out1} 에는λ_1 , E_{out2} 에는λ_2 가 위상차를 가지고 출력된다. 이때의 각 단의 입출력 특성은 다음 식과 같이 3dB 커플러와 위상천이부의 곱으로 표현될 수 있다[10].

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = M_{3dB}M_{shift}M_{3dB}\begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} = M_{MZI}\begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서 M_{3dB} 와 M_{shift}는 각각, 3dB 커플러의 전달함수와 위상차 함수를 나타내며, MZI의 전달함수는 다음 식과 같이 된다.[10]

$$M_{MZI} = j\begin{bmatrix} \sin(k\frac{\Delta L_{eff}}{2})\cos(k\frac{\Delta L_{eff}}{2}) \\ \cos(k\frac{\Delta L_{eff}}{2})\sin(k\Delta L_{eff}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

만약, 입력되는 두 광신호를 E_{in1} ,E_{in2} 라 하면 MZI의 출력단에서 출력되는 광신호의 세기는 다음 식으로 된다[10].

$$P_{out1} = (E_{out1})^2 = \sin^2(k_1 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in1} + \cos^2(k_2 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in2} \quad (24)$$

$$P_{out2} = (E_{out2})^2 = \cos^2(k_1 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in1} + \sin^2(k^2 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \cdot P_{in2} \quad (25)$$

즉, MZI로 입력된 두 신호 간에는 경로차에 의해 위상차가 발생하여, 각 단에는 보강과 상쇄간섭에 의해 하나의 파장만 출력되게 된다. 결국 FBG와 MZI의 특성에 의해, 각 단에서의 출력특성을 수식적으로 나타내면 다음 식으로 된다[11].

$$Output_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{e^{j(\psi_A + \psi_C)} + e^{j(\psi_B + \psi_D)}}{S_{22\Delta T_{FBG}}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (26)$$

$$Add_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{e^{j(\psi_A + \psi_C)} + e^{j(\psi_B + \psi_D)}}{S_{22\Delta T_{FBG}}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (27)$$

$$Drop_{\Delta T_{FBG}} = \left| \frac{S_{21\Delta T_{FBG}}}{S_{22\Delta T_{FBG}}} \times (e^{j2\psi_A} + e^{j2\psi_B}) \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (28)$$

따라서, 시스템의 내부 또는 외부의 환경적 변화에 의한 온도변화가 OADM에 가해질 경우, FBG의 변화에서처럼 그 특성이 변화하게 되어 송수신 채널의 동작파장이 변화하게 되고, 이로 인한 시스템의 오류발생으로 안정된 동작특성을 구현하기가 어려워진다.

IV. 수치해석

본 논문에서 제안한 OADM의 온도변화에 따른 OADM 출력 단에서의 출력특성을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 그림 2는 식 (26)을 이용하여 온도 변화에 따른 OADM의 출력 스펙트럼을 수치 해석하여 나타낸 것이다.

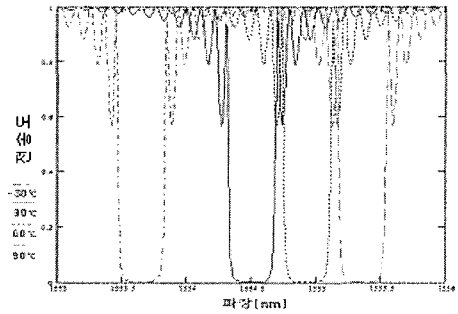


그림 2. 온도변화에 따른 OADM 출력 스펙트럼

그림의 결과로 부터 OADM에 가해지는 온도에 따라 출력 스펙트럼의 중심파장이 이동하므로 출력되는 광신호의 파장변화로 인한 시스템 오류가 발생할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 OADM의 출력단에서 중심파장의 이동을 수치 해석하여 그림 3에 나타내었다. -30℃에서 OADM의 중심파장은 1553.649nm, 30℃에서 1554.502nm이며, 60℃에서는 1554.9287nm로, 90℃ 에서는 1555.3554nm로 이동하여 온도가 1℃ 상승할 때 중심파장은 약 0.0142237nm 이동(ST_{FBG})하였다. 따라서 OADM의 FBG에 가해지는 온도변화에 따라 중심파장이 변화하고 있음을 알 수 있다.

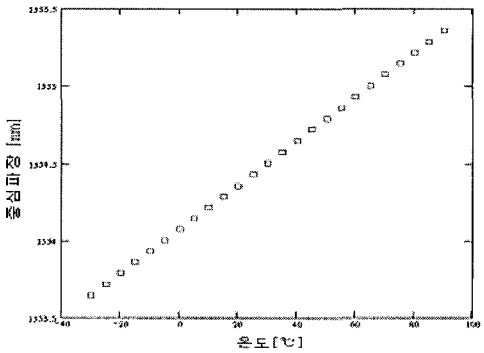


그림 3. 온도변화에 따른 OADM의 중심파장

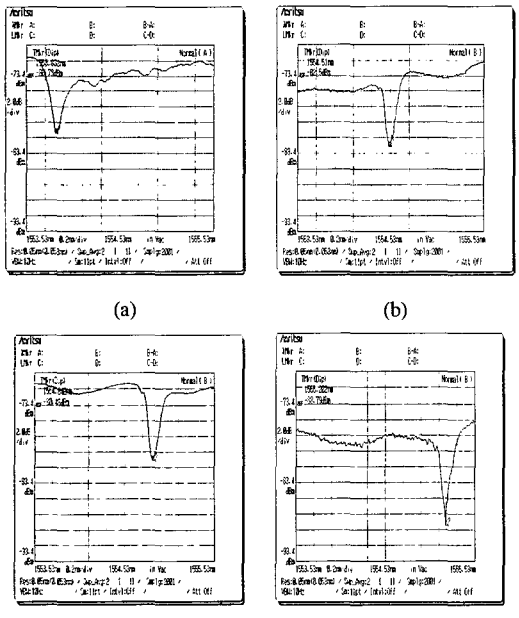
V. 실 험

본 논문에서는 그림 4에 나타낸 것처럼 동일한 특성을 갖는 2개의 FBG와 3dB 커플러를 이용하여 OADM을 제작하였고, 그 특성을 측정하기 위해 입력광원으로 BBS-1550+1FP 광대역 광원을 사용하였고, 온도제어기와 제어프로그램을 제작, 작성하여 온도제

어 및 유지가 가능하도록 하였으며, Anritsu 사의 MS9710C 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum analyzer: OSA)를 이용하여 온도 변화에 따른 OADM 출력특성을 측정하였다.

그림 4. OADM의 특성실험을 위한 구성도

그림 5는 OSA를 이용하여 측정한 OADM의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로, (a)는 -30℃, (b)는 30℃, (c)는 60℃ 그리고 (d)는 90℃일 때 출력 스펙트럼이며, 수치해석의 결과처럼 온도에 따라 중심파장이 이동함을 알 수 있다.



(a) (b)

(c) (d)

그림 5. 온도 변화에 따른 OADM 출력단의 반사스펙트럼

또한 그림 6과 7은 -30℃에서 90℃까지의 온도범위에 대해 OADM에 가해지는 온도를 상승 직후 및 10분간 유지 또는 하강 직후 및 10분간 유지시키면서 출력단의 파장의 변화와 출력의 크기를 각각 측정하여 나타낸 것이다. 그림 5와 그림 7로 부터 온도의 변화에 따른 출력스펙트럼의 크기과 선폭은 거의 변화가 없지만, 그림 6으로부터 OADM의 출력 중심파장은 온도에 따라 이동하며 이론치와 거의 일치함을 알 수 있었다.

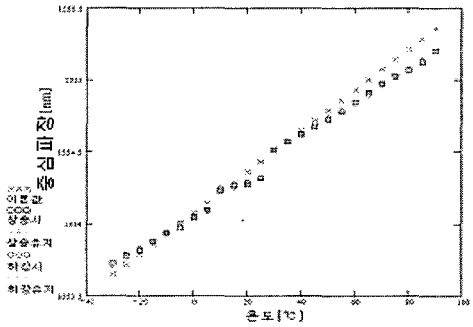


그림 6. 온도 변화에 따른 OADM 출력 중심 파장

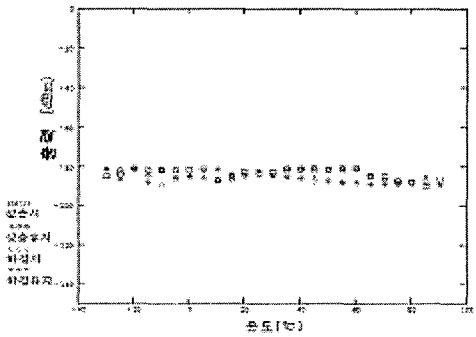


그림 7. 온도 변화에 따른 OADM 출력

VI. 결 론

본 논문에서는 광 커플러가 연결된 MZI의 양쪽 암(arm)에 FBG를 위치시켜, OADM을 구성한 후, 온도를 조절, 유지할 수 있는 온도제어기를 제작하여 온도 변화에 대한 OADM의 출력특성 변화를 컴퓨터 수치해석과 실험을 통하여 비교, 고찰하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과, 시스템의 온도가 변화하게 되면 그에 따라 OADM에서 출력되는 광신호의 크기와 선폭은 거의 변화가 없지만, 출력 파장은 약 0.01230[nm/℃] 변화하게 되어 수치해석으로부터 얻어진 약 0.01422[nm/℃]와 비교적 근사함을 알 수 있었다. 결국 시스템 온도의 변화는 OADM의 특성을 변화시켜 시스템의 오류를 발생시키므로 온도의 안정성확보가 매우 중요함을

알 수 있다. 따라서 본 논문의 결과 데이터들은 OADM을 이용한 광통신시스템의 운용 시, 온도변화에 따른 안정성과 오류의 정도를 예측할 수 있는 유용한 데이터로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 조성선, 광통신부품 기술 및 시장 동향, 주간 기술동향통권 1093호, 한국전자통신연구원, 2003.

[2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. johnson and B. S. Kawasaki, Appl. Phys. Lett., 62, 1035, 1993.

[3] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, New York, Pergamon, sec. 8.6.1, 1987.

[4] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Telecommunication and Sensing*, Artech House, 1999.

[5] M. Mahmoud, Z. Ghassemlooy, "Tunable Fiber Gratings Modeling and Simulation," Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium, 2003

[6] 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.

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

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

[9] 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.

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

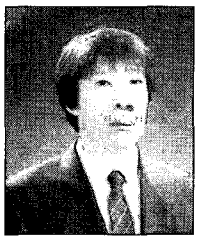
[11] 손용환, 정진호, "FBG와 MZI를 이용한 DWDM용 OADM의 설계와 특성에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제41권, SD편, 제5호, pp.419-424, 2004.

손 용 환(Yong-Hwan Son) **[정회원]**

- 1999년 2월 : 호서대학교 전자공학과(공학사)
- 2001년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 대학원 전자공학과 박사과정

<관심분야>
광 무선통신, WDM 광통신, 집적광학, 광센서공학

정 진 호(Jin-Ho Jung) **[정회원]**



- 1980년 2월 : 건국대학교 전자공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 건국대학교 전자공학과(공학석사)
- 1989년 2월 : 건국대학교 전자공학과(공학박사)
- 2003년 1월~2004년 1월 : 미 테네시주립대학교 방문교수
- 1987년 3월~현재 : 호서대학교 전자공학과 교수

<관심분야>
광무선통신, WDM 광통신, 광전자공학, 집적광학, 광센서공학