

논문 2004-41SD-5-2

# FBG와 MZI를 이용한 DWDM용 OADM의 설계와 특성에 관한 연구

## (Design and Implementation of the OADM for DWDM Using FBG and MZI)

손 용 환\*, 정 진 호\*\*

(Yong-Hwan Son and Jin-Ho Jung)

### 요 약

WDM 광통신 시스템에서 중요한 소자는 여러 개의 광신호를 결합, 분리시켜주는 멀티플렉서, 디멀티플렉서 그리고 특정파장을 선택할 수 있는 필터이다. 그러나, 이러한 시스템의 형태는 집적소자의 형태가 아니기 때문에 손실이 비교적 크고 시스템을 소형화, 경량화 하는데 어려움이 있어 이를 보완하기 위한 집적형태의 소자가 필요하다. 본 논문에서는 WDM 광통신 시스템에서 사용할 수 있는 집적 소자 형태의 OADM의 설계를 위해 FBG와 MZI를 이용하여 구성하고, 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적의 설계값을 제시하였으며, 실험을 통하여, 제작된 OADM의 특성을 측정함으로써 시뮬레이션을 통해 얻어진 설계값과 비교, 분석하였다. 제안한 OADM은 선폭을 조절함으로써 선택할 수 있는 파장의 범위가 넓어져 DWDM 시스템에서도 적합함을 검증할 수 있었다.

### Abstract

Lightwave communication system for Wavelength division multiplexing(WDM) consists of multiplexer, demultiplexer and optical filter. But, the existing multiplexer, demultiplexer and optical filter is difficult to minimize system and reduce weight because they are not integrated device type. In this paper, thus, we propose the OADM based on a Mach-Zehnder interferometer(MZI) with FBG(fiber Bragg grating) in the interferometer arms. The OADM using FBG and MZI is able to minimize system and reduce weight. We analyze output characteristics of OADM and present the optimum design data through the computer simulation and experimentation. Also proposed OADM fits for DWDM(Dense WDM) system because of wide bandwidth by tuning narrow linewidth.

**Keywords :** OADM, FBG, MZI, optimum design data, analyze output characteristics

### I. 서 론

현재 초고속 인터넷 등과 같은 정보통신의 기술이 발전함에 따라, 이를 위한 시스템의 개발과 소자에 대한 연구가 급속도로 진행되고 있다. WDM 광통신 전송 기술은 이러한 초고속 정보통신망의 구성을 위해 필요한 기술 중의 하나로써, 서로 다른 파장의 광신호를 다중화하여 광 파이버를 통해 전송하고, 수신 측에서 전송된 광신호를 각 파장별 신호로 분리하여 원 신호를 복

원하는 전송방식이다. 따라서, 이러한 WDM 광통신 시스템의 구성은 여러 개의 광신호를 하나로 결합 시키는 멀티플렉서, 분리시켜주는 디멀티플렉서 그리고 특정파장을 선택할 수 있는 필터 등이 필수적으로 필요하다<sup>[1]</sup>. 그러나, 현재 사용되고 있는 시스템의 형태는 집적소자의 형태가 아니기 때문에 손실이 비교적 크고, 시스템을 소형화하고 경량화 하는데 어려움이 있다. 따라서 이를 보완하기 위한 집적형태의 소자가 필요하다. MZI를 이용하여 광다중화기를 구성하게 되면 광 파이버만으로 이러한 소자를 구성할 수 있기 때문에 시스템을 집적형태로 소형화 할 수 있다. 또한 FBG는 특정파장만을 반사시키는 특성을 가지고 있으므로 필터를 설계하기에 매우 유용하고, 광 파이버 내부에 내장할 수 있

\* 학생회원, 호서대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng. Hoseo Univ.)

\*\* 정회원, 호서대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng. Hoseo Univ.)

접수일자: 2002년5월1일, 수정완료일: 2004년2월14일

기 때문에 전체 소자의 크기를 소형화하는데 매우 유용하며, 전체적으로 저 손실의 WDM 소자를 구현할 수 있는 장점이 있다. 이에 본 논문은 소형, 경량의 WDM 광통신 시스템의 구현을 위한 집적소자 형태의 OADM 설계를 위해 FBG와 MZI를 이용하여 이를 제작하고, 제작된 OADM을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 특성을 분석하여 최적의 데이터를 제시하고자 한다. 또한 실험을 통하여, 제작한 OADM의 특성을 측정하여 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과와 비교, 분석하고자 한다.

## II. Fiber Bragg Grating

FBG는 광 파이버 코어 내의 영구적인 굴절률을 변화시킴으로써 조건에 따라 특정 파장을 반사시키는 특성을 갖는 소자이다. 따라서, 필터를 설계하기에 매우 유용하며, 광 파이버 내부에 소자를 내장할 수 있기 때문에 시스템을 소형화하고 경량화 할 수 있는 장점이 있다<sup>[1]</sup>. FBG의 반사특성은 광섬유 내의 진행파와 반사파 사이에서 광의 결합 현상으로 볼 수 있는데, 이 결합 관계는 결합모드 이론과 파동방정식을 이용하여 그 해를 구함으로 설명된다<sup>[2]</sup>. 이러한 FBG의 경우, 진행방향으로 진행되는 파와 격자에서 반사되어 돌아오는 파가 포함되므로 광 필드는 아래 식의 형태로 표현된다.<sup>[3]</sup>

$$E(z) = A(z)\exp(j\beta z) + B(z)\exp(-j\beta z) \quad (1)$$

여기서, A, B는 진폭이며  $\beta$ 는 전파상수,  $z$ 는 파의 진행방향을 나타낸다.

파동방정식은 광 파이버 내에서 빛의 전파를 설명하는 것으로, 다음 식과 같이 간단한 형태로 표현된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E + \frac{\omega^2}{c^2} n^2(z)E = 0 \quad (2)$$

이 파동방정식과 결합모드이론을 이용하면, 다음과 같은 결합 파동방정식을 얻을 수 있으며, 이를 통해 각 진행파와 반사파가 격자를  $z$  방향으로  $L$  만큼 진행했을 때의 파와 격자의 입력단에서의 파와의 관계를 알 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\frac{dA}{dz} = j\delta A + jkB \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\delta B - jk^* A \quad (4)$$

여기서  $\delta$  는 동조이탈계수이며,  $k$  는 결합계수 이

다. 결합 파동방정식과 매트릭스 해석법을 이용하여 FBG의 전달 특성을 구하면 다음 식으로 된다<sup>[4]</sup>.

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $S_{mn}$  는 FBG의 전달 매트릭스이며,  $S$  의 각 성분은,

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

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

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

이며  $h$  는 격자 길이,  $r$  는 유효반사계수를 나타낸다.

이때, 광 파이버 격자를 투과하는 파와 반사되는 파의 투과율과 반사율의 세기는 경계조건에 의해 ( $B_{out} = 0$ ) 다음과 같이 주어진다<sup>[1, 2]</sup>.

$$T = \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 = \left| S_{11} - \frac{S_{12} S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (6)$$

$$R = \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (7)$$

여기서  $T$  는 투과율,  $R$  은 반사율이다.

## III. OADM의 이론적 고찰

OADM은 WDM 채널에서, 하나의 채널을 추가하거나, 제거할 수 있는 장치이다. 본 논문에서 제시한 OADM은 두 개의 3dB 방향성 결합기를 이용하여 MZI를 구성하고 MZI의 양쪽 경로에 동일한 반사파장을 갖는 FBG를 형성시켜 구성하였다.

### 1. MZI의 동작원리

그림 1에 나타낸 MZI의 구조는 두 파장  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$  가  $E_{in1}$ 에 입력되면, 두 파이버로 분리되어 진행하고  $E_{out1}$  에는  $\lambda_1$ ,  $E_{out2}$  에는  $\lambda_2$  가 위상차를 가지고 출력된다. 이 때의 각 단의 입력률 특성은 각각의 3dB 커플러와 위상천이부의 곱으로써 다음 식의 형태로 표현될 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = M_{3dB} M_{shift} M_{3dB} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} = M_{MZI} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

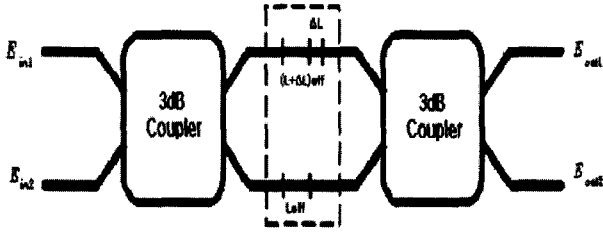


그림 1. MZI의 구조  
Fig. 1. Structure of Mach-Zehnder interferometer.

여기서  $M_{3dB}$  와  $M_{shift}$  는 각각, 3dB 커플러의 전달함수와 위상차 함수를 나타낸다.

MZI의 전달함수는 3dB 방향성 결합기의 전달함수와 위상차 함수를 이용하여 오일러 공식에 의해 정리하면, 다음 식과 같이 된다.

$$M_{MZI} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2j \cdot \sin(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) & 2j \cdot \cos(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \\ 2j \cdot \cos(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) & -2j \cdot \sin(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \sin(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) & \cos(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \\ \cos(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) & -\sin(k \frac{\Delta L_{eff}}{2}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

만약, 입력되는 두 광신호를  $E_{in1}$ ,  $E_{in2}$  라 하면 MZI의 출력단에서 출력되는 광신호의 세기는 다음 식으로 된다<sup>[2]</sup>.

$$P_{out1} = \sin^2(k_1 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) P_{in1}(\lambda_1) + \sin^2(k_2 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) P_{in1}(\lambda_2)$$

$$P_{out2} = \cos^2(k_1 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) P_{in1}(\lambda_1) + \cos^2(k_2 \frac{\Delta L_{eff}}{2}) P_{in1}(\lambda_2) \quad (10)$$

즉, MZI로 입력된 두 파장사이에는 경로차에 의해 위상차가 발생하여, 각 단에는 보강과 상쇄간섭에 의해 하나의 파장만 출력되게 된다.

## 2. OADM의 동작원리

그림 2에서처럼 OADM의 입력 단으로 여러 파장의 신호가 입력되면, 그 신호는 양쪽 경로로 나누어 MZI의 특성에 의해  $\pi/2$  만큼의 위상차를 가지고 진행하고, 이들 신호 중 반사파장 신호  $\lambda_4$  는 FBG에 의해 반사되어 drop 단자로 분리되고, 나머지 신호는 격자를 통과하여 output 단자로 출력되며, add 단자로 입력된 신호

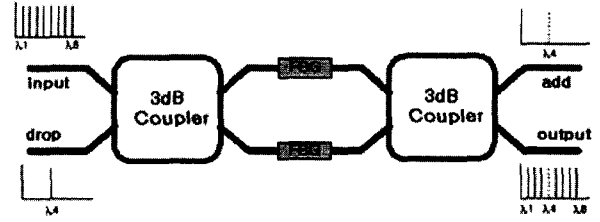


그림 2. OADM의 구성도  
Fig. 2. Schematic of OADM device.

는 격자에 반사되어 다시 output 단자로 출력되어, 초기 입력신호와 더해지는 기능을 하게 된다.

FBG와 MZI의 특성에 의해, 각 단에서 정규화 한 광 출력 크기의 비를 수식적으로 나타내면 다음 식으로 된다<sup>[1, 5]</sup>.

$$Output = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} + e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (11)$$

$$Add = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} - e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (12)$$

$$Drop = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \times (e^{j\phi_A} + e^{j\phi_B}) \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (13)$$

여기서,  $\phi_A$ ,  $\phi_B$ ,  $\phi_C$ ,  $\phi_D$  는 각각 FBG의 전단과 후단에서 양쪽 경로에 의해 생긴 위상변화 이다. 이들 식에서 MZI의 양쪽 경로가 동일한 경우, 위상변화 항을 고려하지 않아도 되지만, 경로가 동일하지 않은 경우에는  $\phi_A$ ,  $\phi_B$ ,  $\phi_C$ ,  $\phi_D$  의 크기가 변하게 되어  $\pi/2$ ,  $\pi$  가 되지 않기 때문에 상쇄간섭으로 출력이 나오지 않던 add 단자에서도 약간의 출력이 나오게 되고 다른 단자의 출력 특성도 다르게 나타나게 된다.

## IV. 수치해석 및 고찰

본 장에서는 OADM의 출력 특성 및 MZI의 양쪽 경로 길이가 동일하지 않은 경우에 따른 특성을 컴퓨터시뮬레이션을 이용하여 고찰하고, 최적 설계 데이터를 제시한다.

### 1. FBG의 특성

FBG의 반사특성 및 최적 설계값을 구하기 위해 식 (6),(7),(8)을 이용하여 중심파장이 1548nm일 때의 굴절률차와 격자의 길이의 조절에 따른 선평과 사이드로브의 변화를 시뮬레이션 하였다.

그림 3, 4의 결과로부터 굴절률차를  $2 \times 10^{-4}$ , 격자의 길이를 10mm로 할 경우, 선평이 좁아지고 사이드로브

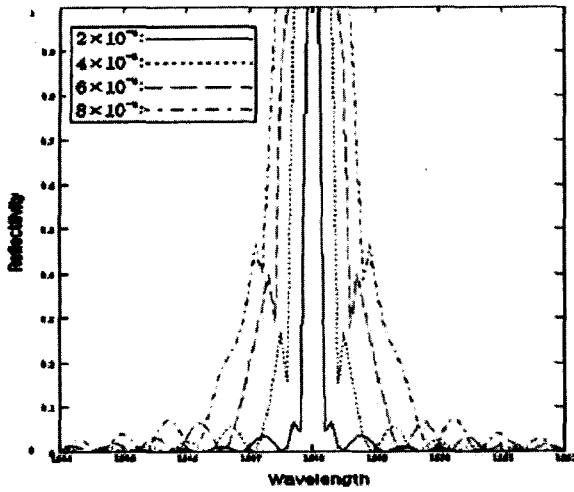


그림 3. 굴절률차에 따른 반사 스펙트럼  
 Fig. 3. Reflection spectra in various refractive index.

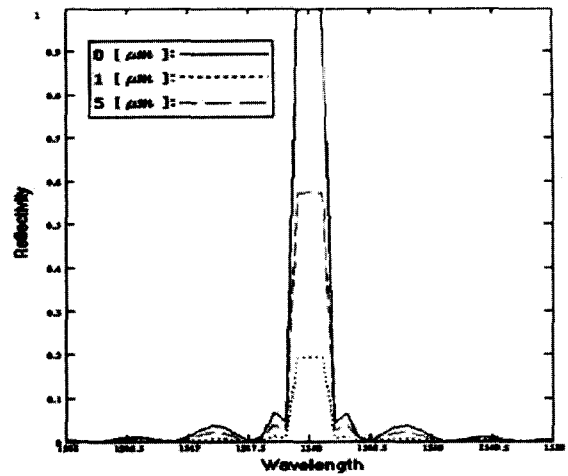


그림 6. drop 단자의 반사 스펙트럼  
 Fig. 6. Reflection spectrum in drop port.

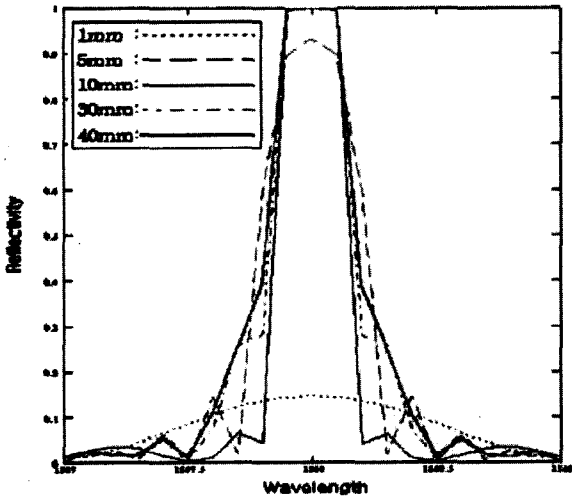


그림 4. 격자길이에 따른 반사 스펙트럼  
 Fig. 4. Reflection spectra in various grating length.

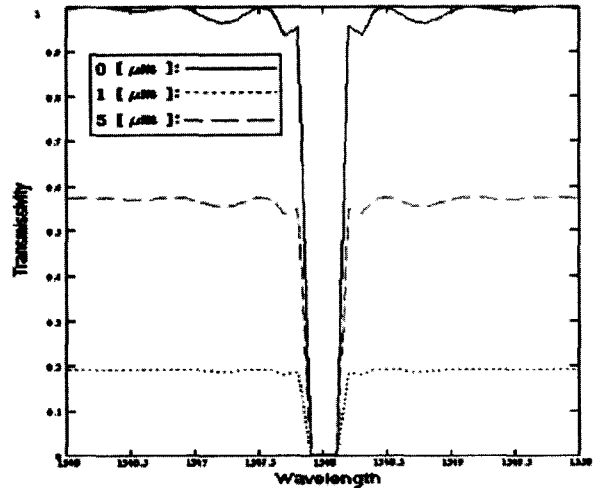


그림 7. output 단자의 전송 스펙트럼  
 Fig. 7. Transmission spectrum in output port.

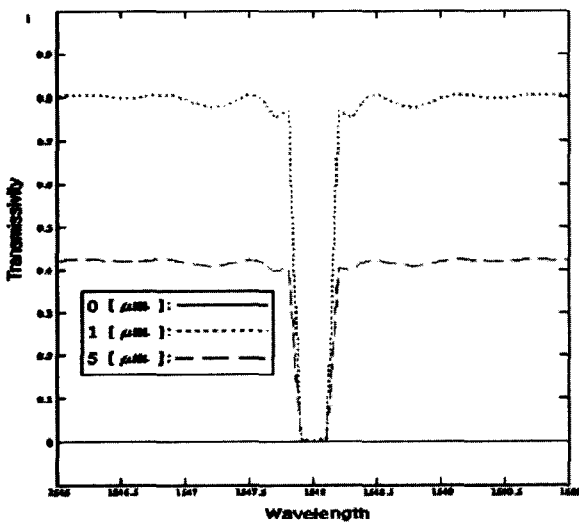


그림 5. add 단자의 전송 스펙트럼  
 Fig. 5. Transmission spectrum in add port.

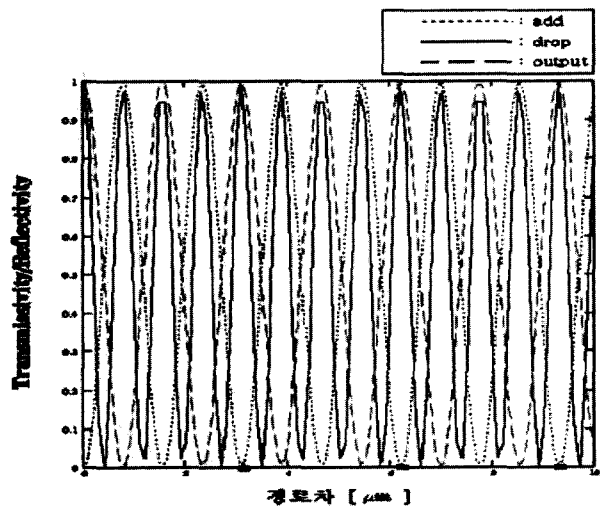


그림 8. 경로차에 따른 OADM 각 단자의 출력 특성  
 Fig. 8. Output characteristics in add, drop and output ports with path length difference occurred.

값도 작아 인접 채널간의 누화에 의한 잡음이 적어져 DWDM 시스템에서도 적합함을 알 수 있었다.

2. 경로차에 따른 OADM의 출력 특성

본 절에서는 제안한 OADM에서 MZI의 양쪽 경로 길이가 동일하지 않은 경우에 대한 특성에 대해 고찰한다.

그림 5에서, 경로길이가 동일한 경우 상쇄간섭으로 인해 출력이 나오지 않지만, 그렇지 않은 경우 완전 상쇄가 되지 않아 output 단자로 나가는 신호의 스펙트럼의 일부가 add 단자로 검출되는 것을 알 수 있다. 그림 6은 drop 단자의 출력결과로써, 경로가 동일한 경우 특정 파장이 완전 분리되는 것을 알 수 있지만 동일하지 않은 경우 분리가 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 그림 7은 output 단자로의 전송특성으로, 경로가 동일한 경우 전송도가 1인 반면, 그렇지 않은 경우 전송도가 떨어짐

을 알 수 있다.

3. OADM의 최적 설계데이터

본 절에서는 경로길이에 따른 각 단의 출력 특성을 분석하고, 이상적인 동작을 하기 위한 최적 경로차를 제시하였다.

그림 8은 각 단의 경로차에 따른 출력특성을 동시에 나타낸 것으로, 3.1 $\mu$ m, 6.2 $\mu$ m, 9.3 $\mu$ m의 경로차일 때 모든 단에서 이상적인 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 경로차가 발생하는 경우, 그 경로차를 3.1 $\mu$ m의 정수배로 설계하면 이상적인 동작특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다<sup>[1]</sup>.

V. 실험 및 결과 고찰

본 절에서는 제작한 OADM을 실험을 통하여 측정함으로써 출력특성을 고찰하고, 컴퓨터시뮬레이션의 결과와 비교, 분석한다.

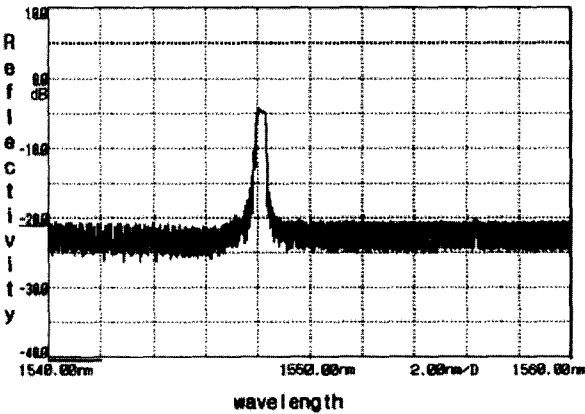


그림 9. MZI의 drop 단의 스펙트럼  
Fig. 9 Spectrum at the drop of MZI.

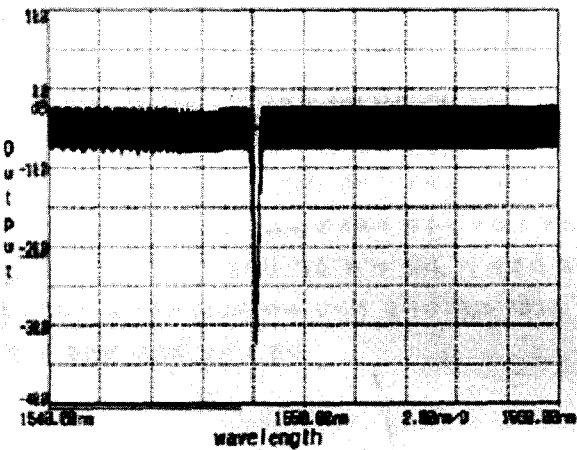


그림 10. MZI의 output단의 스펙트럼  
Fig. 10 Spectrum at the output of MZI.

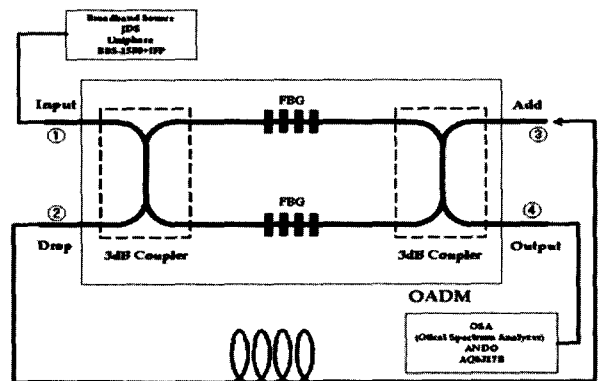


그림 11. add 단의 동작을 위한 실험구성  
Fig. 11 Experimental setup for the add operation.

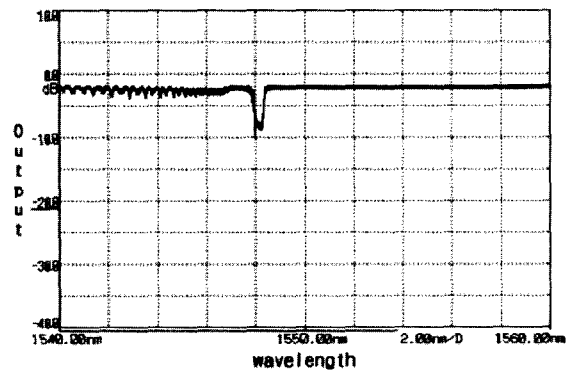


그림 12. MZI의 drop단의 출력을 add단의 입력으로 넣었을 때의 output단의 스펙트럼  
Fig. 12 Spectrum at the output when the drop connected to the add.

그림 9의 결과로부터, 1548nm 파장은 drop 단자로 출력되어 나오고, 이를 제외한 나머지 파장은 23[dB]로 감쇠 되었으므로 결국 output 단으로 전송되었음을 알 수 있다. 이를 검증하기 위해 그림 10에 output 단의 스펙트럼을 측정하여 나타내었다. 그림의 결과에서 drop 단자에 나타나지 않은 파장들이 output 단으로 출력됨을 알 수 있고, 1548nm의 파장은 34[dB]로 감쇠 되었으므로 이는 drop 단자의 출력으로 나타난 것을 알 수 있다.

그림 11은 drop 단자로 출력되어 나온 파장을 add 단자로 넣었을 때, output 단자에 대한 출력 측정하기 위한 구성도이며, 그에 대한 출력 스펙트럼을 그림 12에 나타내었다. 그림으로부터 add 단자로 입력된 1548nm의 파장은 반사되어 output 단자로 진행하고, input 단으로 입력된 파장 중 drop 단으로 빠져나간 파장을 제외한 나머지 파장과 더해져 output 단으로 출력됨을 알 수 있다. 그러나 파이버의 양쪽 경로의 길이 및 커넥터 등의 손실로 인해 약간의 감쇠가 발생하여 실제의 시스템에 적용하기 위해서는 오류가 발생할 소지가 있으므로 MZI의 양쪽 길이를 같게 하거나, 경로차가 나는 경우, 시뮬레이션결과로써 3.1 $\mu$ m의 정수배로 설계하고 FBG를 정중앙에 위치시키면 이 부분의 감쇠를 최소화 할 수 있을 것이다.

## VI. 결론

본 논문에서는 FBG와 MZI를 이용한 OADM을 설계하고 구현하기 위해, FBG의 특성과 3dB 방향성 결합기를 이용하여 구성하는 MZI에 대해 고찰하였다.

제시한 OADM의 최적 설계값을 도출하기 위해 굴절률차와 격자의 길이, 경로차의 변화에 따른 각 단의 출력 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적의 설계값을

제시하였다. 시뮬레이션의 결과로부터 파장의 선평이 0.3nm 이므로 파장의 범위가 넓어져 DWDM 시스템에서도 적합함을 알 수 있었다. 또한 MZI에서 경로차가 나는 경우, 그 경로차를 3.1 $\mu$ m의 정수배로 설계하면 이상적인 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또한, 실험을 통해 컴퓨터시뮬레이션의 결과를 비교 분석하였다. 실험 측정결과, 접속 또는 경로차의 오차 등으로 인한 손실을 제외하면, 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과와 동일함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문의 결과 데이터들은 OADM의 설계와 구현에서 유용한 데이터로 이용될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] 손용환, 신희성, 허주옥, 장우순, 정진호, "FBG 를 이용한 DWDM용 광 Add-Drop 다중화기에 관한 연구", 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, 제24권, 제 1호, pp. 237-240, 2001.
- [2] 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. 2407-2414, 1988.
- [3] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Fundamentals of Photonics", Wiley interscience, pp. 264-269, 1994.
- [4] 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, 1987.
- [5] 박무윤, 박광노, 이경식, 원용협, 이상배, "광섬유 Bragg grating을 이용한 가변형 add/drop 필터에 관한 연구", 전자공학회논문지, 제34권, S편, 제5호, pp. 15-24, 1997.

## 저자 소개

손용환(학생회원)

1999년 호서대학교 전자공학과 졸업

2001년 호서대학교 대학원 전자공학과 석사졸업

2004년 현재 호서대학교 대학원 전자공학과 박사과정

<주관심분야: 광 무선통신, WDM 광통신, 집적광학>

정진호(정회원)

1987년~현재 호서대학교

전기정보통신공학부 교수

2003년 1월~2003년 12월

美 테네시대학 방문교수

<주관심분야: 광무선 통신, WDM 광통신, 집적광학>