

다중 FBG를 이용한 OADM의 특성 및 향상에 관한 연구

정희원 장우순*, 정진호*
 호서대학교 대학원 전자공학과
 e-mail : jws@hoseo.or.kr

Improvement of OADM Characteristics Using MZI with Cascade FBG

Woo-Soon Jang^o, Jin-Ho Jung^{*} Regular Members
 Dept. of Electronic Engineering, Hoseo University

Abstract

WDM(Wavelength division multiplexing) light wave communication system requires MUX/DeMUX and optical filter. OADM can be used to extract and add the specific wavelength channel from the transmission line. In this paper, we propose the OADM based on MZI and cascade FBG. It is able to minimize system and reduce sidelobe. So, we have considered MZI structure and 3dB coupler Using the coupled mode theory. We also analyze out characteristics of OADM and experiment. From results obtained by experiment and computer Simulation, the proposed OADM with cascade FBG works well. we hope that the obtained result in this paper can be used as the data to design the OADM with cascade FBG.

Key words : WDM, OADM, MZI, FBG

I. 서론

21세기는 정보의 가치가 그 중요성을 더해감에 따라 모바일 통신 및 초고속정보통신망인 인터넷 사용자의 폭발적인 증가로 인한 텍스트를 기본으로 한 음성 및 영상전송과 같은 대량의 정보들이 요구되고 있는 현실에서 초고속통신의 기술에 대한 연구가 불가피하다 할 수 있다. 이로 인하여 정보전송의 모든 분야에 있어서 통신의 수요가 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이를 대처하기 위한 통신망의 광 대역화가 시급히 해결되어야 할 문제점으로 대두되고 있다¹⁾.

따라서, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 광을 매개로 한 광 대역 초고속 광통신이 연구되어 광 통신망의 보급이 빠르게 진행되고 있으며, 이를 지원하기 위한 기술이 바로 파장 분할 다중화기 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)를 이용한 광통신 기술이다²⁾³⁾. 이에 본 논문에서는 최상의 광통신 시스템 구현을 위해 다중 FBG와 MZI를 이용하여 OADM(Optical Add/Drop Multiplexer)의 특성 및 성능 향상에 대해 연구하였다.

II. 광파이버 및 커플러의 이론적 고찰

II-1. 광파이버내에서의 광도파 해석

광파이버는 그림 2-1 에서 보여주는 바와 같이 원통형 3차원 광도파로로 전자계는 원통좌표계(r,θ,z)를 이용하여 나타낼 수 있다.

광파이버내를 전파하는 전자파 모드는 각주파수 ω이고, 전파상수 β로 z방향으로 전파한다고 가정하면, 각각의 전자계 성분은 다음 식과 같이 표현된다.

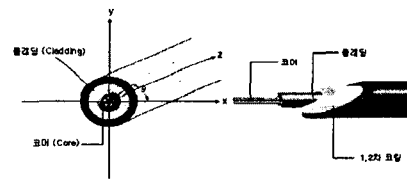


그림 2-1. 광파이버 해석을 위한 좌표계

$$E(r, \theta, z, t) = E_0(r, \theta) \exp j(\omega t - \beta z) \quad (2-1)$$

$$H(r, \theta, z, t) = H_0(r, \theta) \exp j(\omega t - \beta z) \quad (2-2)$$

여기서, E 와 H 성분을 각각 $E=(E_r, E_\theta, E_z)$, $H=(H_r, H_\theta, H_z)$ 의 스칼라 량으로 표시하고, 이를 맥스웰방정식 (Maxwell equation)인 $\nabla \times E = -j\omega\mu H$, $\nabla \times H = j\omega\epsilon (\mathbf{r})E$ 식에 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (\nabla \times E)_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \frac{\partial E_\theta}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - (-j\beta)E_\theta \\ &= -j\omega\mu (H)_r = -j\omega\mu H_r \end{aligned} \quad (2-3)$$

식 (2-3)으로부터 전자계의 횡 방향성분($E_r, E_\theta, H_r, H_\theta$)은 다음과 같이 종 방향성분(E_z, H_z)으로 표현된다.

$$E_r = -\frac{j}{\omega^2\epsilon\mu - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} \right) \quad (2-4)$$

$$E_\theta = -\frac{j}{\omega^2\epsilon\mu - \beta^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \quad (2-5)$$

$$H_r = -\frac{j}{\omega^2\epsilon\mu - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \right) \quad (2-6)$$

$$H_\theta = -\frac{j}{\omega^2\epsilon\mu - \beta^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} + \omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \quad (2-7)$$

* 정희원 : 호서전산전문학교 정보통신과 교수

** 호서대학교 전기정보통신공학부 교수

II-2. 광파이버 격자의 필드 해석

격자가 새겨진 코어 내를 지나는 광 신호는 격자를 지나면서 반사되거나 클래딩층으로 회절해 들어가 광 신호의 변화를 일으킨다. 즉, 특정한 파장의 빛은 격자로부터 반사되어 진행방향의 반대로 진행하며, 선택되지 않은 파장은 계속 진행한다. 이러한 현상을 조절하고 이용한 파장 선택 필터가 각종 소자로 널리 응용되고 있다.

결합 파동방정식을 통해 각 진행파와 반사파가 격자를 z 방향으로 L 만큼 진행했을 때의 파와 격자의 입력 단에서의 파와의 관계를 알 수 있다. 이 결합 파동방정식을 풀고 매트릭스 해석법을 이용하여, 그 해를 매트릭스 형태로 정리하면 다음 식으로 된다^[4].

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

여기서, S 매트릭스는 광파이버 Bragg 격자의 특성을 나타내는 전달 매트릭스이고, 결합모드 이론을 이용하면 각각의 S 매트릭스의 성분은 아래 식들의 형태로 된다^[4].

$$S_{11} = (1 - r^2)^{-1} [\exp(iqh) - r^2 \exp(-iqh)] \quad (2-9a)$$

$$S_{22} = (1 - r^2)^{-1} [\exp(-iqh) - r^2 \exp(iqh)] \quad (2-9b)$$

$$S_{21} = -S_{12} = (1 - r^2)^{-1} r [\exp(iqh) - \exp(-iqh)] \quad (2-9c)$$

여기서, h 는 격자의 길이이다.

진행파와 반사파의 전파상수 $q = \pm [(\delta\beta)^2 - k^2]^{\frac{1}{2}}$ 이고, 격자의 유효반사계수 $r = (q - \delta\beta)/k$ 이다. 또한, $k = \pi\delta n/\lambda_B$ 는 격자의 결합계수(δn : 격자의 굴절률차), $\delta\beta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ 는 격자 주기 Λ 와 관련된 Bragg 파장 λ_B 에서의 동조이탈계수이다.

이때, 광파이버 Bragg 격자를 투과하는 파와 반사되어 나오는 파의 세기는 경계조건 $B_{out} = 0$ 에 의해 다음과 같이 주어진다^[6].

$$T = \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 = \left| S_{11} - \frac{S_{12} S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (2-10)$$

$$R = \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (2-11)$$

여기서 T 는 투과율, R 은 반사율을 나타낸다.

III. Mach-Zehnder 간섭계

III-1. MZI의 기본구조

두 개의 3 dB 커플러와 그 사이의 Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 MZI 커플러는 다음 그림 3-1과 같다. 여기서 커플러들은 기존의 Mach-Zehnder 간섭계의 입력 신호세기 분할기로서의 역할을 한다. 이러한 구조의 전달행렬은 다음과 같이 각각의 3dB 커플러와 위상천이 부의 곱으로 표현할 수 있다.

$$k_1 - k_2 = 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{c} \right) = 2\pi \frac{\Delta f}{c} \quad (3-1)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta L_{eff}}{n} = \frac{c}{2n\Delta f} \quad (3-2)$$

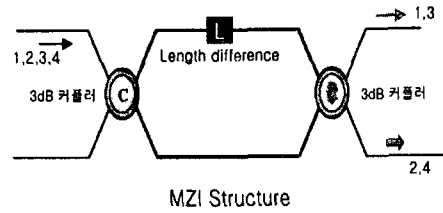


그림 3-1. 경로차를 갖는 Mach-Zehnder 간섭계

결과적으로 식 (3-1)과 식 (3-2)에 의해서 원하는 채널 간격을 얻고자 할 때 조절해야 하는 전파상수 차와 경로차를 정량적으로 구할 수 있다.

IV. 다중 FBG를 이용한 OADM의 구성

광 Add-Drop Mux/Demux는 4단자 광 수동소자로써 본 논문에서는 그림 4-1과 같이 3dB 커플러와 다단 FBG로 구성된 광 Add-Drop Mux/Demux에 대해 고찰하고자 한다.

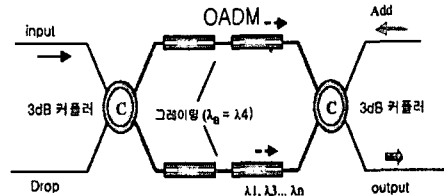


그림 4-1. 다중FBG를 이용한 OADM

이를 위해 DWDM용 OADM의 최적 설계를 위한 파라미터는 표 4-1과 같다.

표 4-1. 수치해석을 위한 설계 변수

설계 변수	설계 값
중심 파장	1548 [nm]
굴절율 차 (λ_B)	3×10^{-4}
격자 길이 (d)	10 [mm]
선 폭 ($\Delta\lambda$)	0.6 [nm]
유효 굴절율 (n_{eff})	1.44

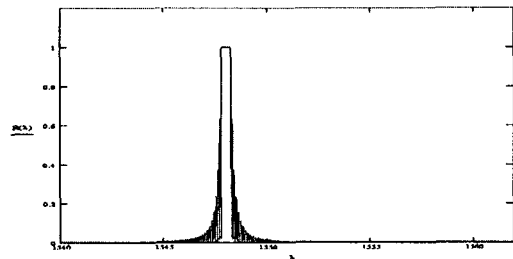


그림 4-2(a). MZI의 Drop단의 출력 스펙트럼

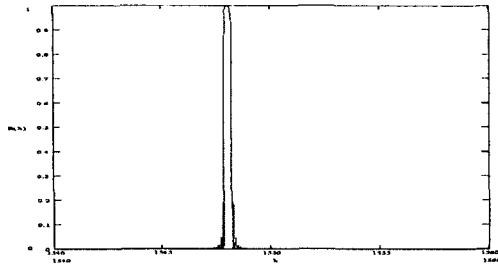


그림 4-2(b). 다중 FBG의 경우 MZI의 Drop단의 출력 스펙트럼

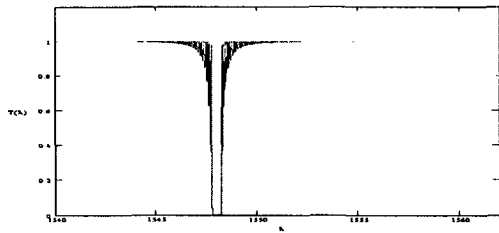


그림 4-3(a) MZI의 Add에 입력이 없을 때 Output의 출력 스펙트럼

DWDM을 위해 1534.25[nm] - 1558.98[nm] 범위의 광파장을 갖는 광파를 그림 4-1의 입력단에 입사시키면, FBG의 특성에 의해 일정 파장의 파는 반사되어 Drop 단으로 출력되며, 그 출력 파형은 그림 4-2(a)에 나타

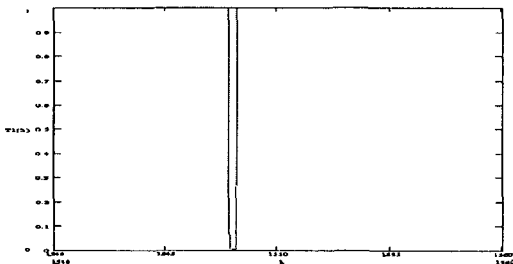


그림 4-3(b) 다중 FBG의 경우 MZI의 Add에 입력이 없을 때 Output의 출력 스펙트럼

나 있다.

본 논문에서 수치해석을 위해 설계된 FBG의 특성으로 인해 그림 4-2(a)에서처럼 중심파장 1548[nm]에서 광파의 반사가 발생되어 Drop단자로 출력이 됨을 알 수 있다. 또한 광파를 그림 4-1의 입력단에 입사시키면, 다중 FBG의 특성에 의해 일정 파장의 파는 반사되어 Drop단으로 출력되며, 그 출력 파형은 그림 4-2(b)와 같이 향상되어 나타남을 볼 수 있다. 한편, FBG를 통해 투과된 파는 Output단으로 출력되며, 그 출력 파형은 그림 4-3(a)과 같다. FBG가 1548nm 파장의 광파를 반사시켜 Drop시킴으로써 Output단자의 스펙트럼은 그림 4-3(a)과 그림 4-3(b) 같이 1548nm의 파장을 갖는 신호가 Drop되고, 나머지 파장의 신호들의 모두 출력을 알 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 실험 고찰

V-1. 다중 FBG에서의 OADM의 출력특성

V-1-1. 입출력 단자의 출력특성

본 논문에서 제안한 다중 FBG를 이용한 Add-Drop

Mux/Demux의 각 단의 특성을 고찰한다.

$$T^2 = \left[\left| S_{11} - \frac{S_{12} S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \right]^2 \quad (5-1)$$

$$R^2 = \left[\left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \right]^2 \quad (5-2)$$

$$Output = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} + e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (5-3)$$

$$Add = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} + e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (5-4)$$

$$Drop = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \times (e^{j\phi_A} + e^{j\phi_B}) \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (5-5)$$

다중 FBG를 이용한 Add-Drop Mux/Demux의 동작 특성을 고찰하기 위해 식 (5-1)에서 (5-5)를 이용하여 output 단자의 출력 특성과 drop 단자의 출력특성을 그림 5-1 과 그림5-2 에 각각 나타내었다.

여기서 ϕ_A , ϕ_B , ϕ_C , ϕ_D 경로차에 의한 위상변화의 값을 나타낸다. 그림 5-1은 output 단자에서의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로서 drop 단자로 빠져나가지 않고 투과된 스펙트럼을 나타낸 것이다. 여기서 1550nm 파장의 스펙트럼이 없는 것을 볼 수 있는데, 이것은 격자에 의해 반사되어 drop 단자로 빠져나감을 알 수 있고, 1550nm 이외의 다른 파장들은 투과되어 output 단자에 나타났음을 알 수 있다.

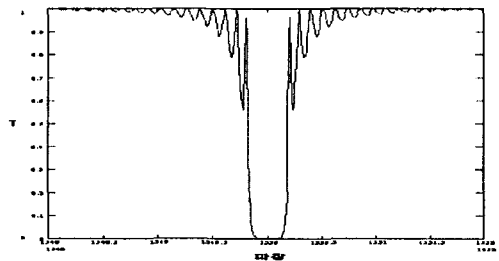


그림 5-1. 다중 FBG OADM의 output 단자의 전송스펙트럼

또한, 그림 5-2는 drop 단자의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로서 격자의 반사파장이 1550nm 이므로 이 격자에 의해 초기에 1550nm의 파장만 반사되어 나오고 그 이외의 다른 파장들은 output 단자 쪽으로 투과되었음을 알 수 있다.

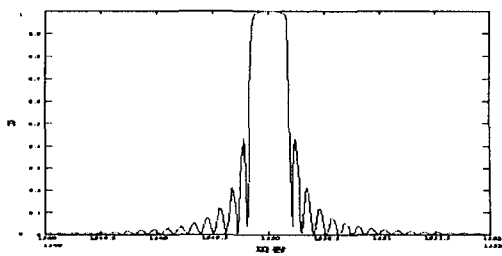


그림 5-2. 다중 FBG OADM의 drop 단자의 반사 스펙트럼

표 5-1. 각 다중 FBG를 이용한 OADM단에서 경로차에 따른 결과

출력단 경로차	add	drop	output
0	0%	100%	100%
1 μ m	80%	20%	20%
5 μ m	50%	5%	60%

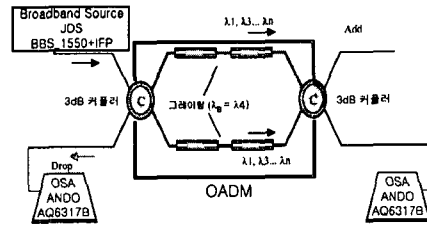


그림 5-5. 다중 FBG를 이용한 OADM 실험 전체 구성도

V-1-2. FBG 측정데이터

다중 FBG 특성을 측정하기 위한 실험 구성도는 그림 5-3과 같다. 그림 5-3과 같이 FBG 특성을 측정하기 위해 입력에는 광원으로 JDS사의 Broadband source(모델명 BBS-1550+1FP)를 사용하였고, 사용 파장 범위는 1530[nm]-1559[nm]이다. Output 단에서의 출력 측정은 광 스펙트럼 분석기(ANDO사 모델명 AQ6317B)로 측정하였다. 이상의 측정 결과가 그림 5-4에 나타나 있으며, 이로부터 본 논문에서 사용된 FBG의 특성은 중심 파장이 1548[nm] 이고, 약 26dB 까지 감쇠된 것을 볼 수 있다.

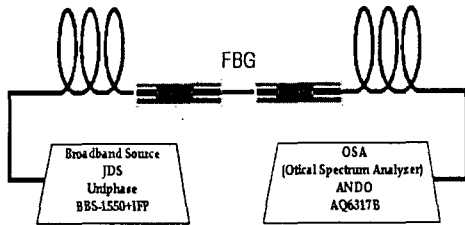


그림 5-3. 다중 FBG의 특성

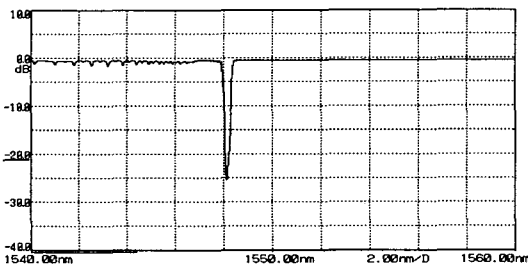


그림 5-4. FBG의 Output 스펙트럼

또한 그림 5-7은 다중 FBG를 이용한 OADM의 Drop 단의 반사 스펙트럼으로 단일 FBG를 사용했을 때보다 반사도가 향상되었고, 사이드로브 값이 감소하였음을 볼 수 있다. 그림 5-5의 구성도에서 Output 단자 출력 파형 측정하기 위해 광 스펙트럼 분석기를 Output 단자에 연결하고 측정한 결과가 그림 5-8에 나타나 있다.

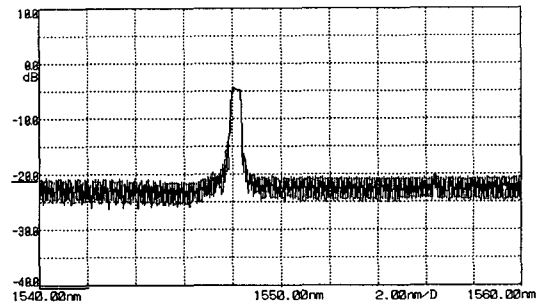


그림 5-6. OADM의 Drop단 스펙트럼

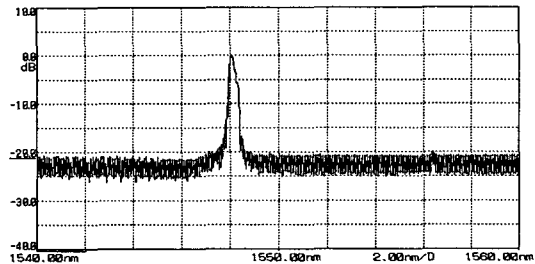


그림 5-7. 다중 FBG를 이용한 OADM의 Drop단 스펙트럼

V-1-3. 다중 FBG를 이용한 OADM 측정데이터

본 논문에서는 제시한 설계 변수들을 바탕으로 실제 Mach-Zehnder Interference를 제작하여 다중 FBG를 이용한 OADM의 각 단의 출력 스펙트럼을 측정함으로써 그 특성을 알아보았다. 다중 FBG를 이용한 OADM 특성을 측정하기 위한 실험 구성도는 그림 5-5와 같다.

그림 5-5 에서 입력단에 Optical Broadband Source을 연결하고 Drop단자의 출력 스펙트럼을 측정하기 위해 Drop단자에 Spectrum Analyzer를 연결하여 측정한 결과, Drop단에서 출력되는 스펙트럼 파형은 그림 5-6과 같이 측정되었다. 그림 5-6 로부터 Drop단 출력 파형의 중심 파장은 1548 nm 이고 중심파장을 제외한 나머지 파장대는 23 dB 정도 감쇠한 것을 볼 수 있다. 스펙트럼에서 생기는 오실레이션은 FBG의 특성으로 인한 것으로 사료된다.

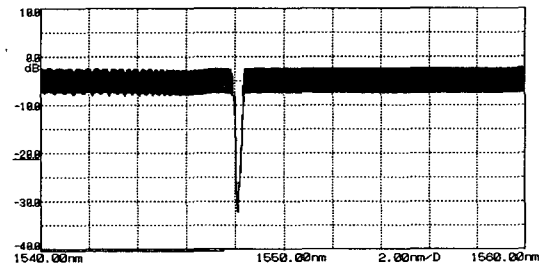


그림 5-8. OADM의 Add단에 입력이 없을 때 Output단의 스펙트럼

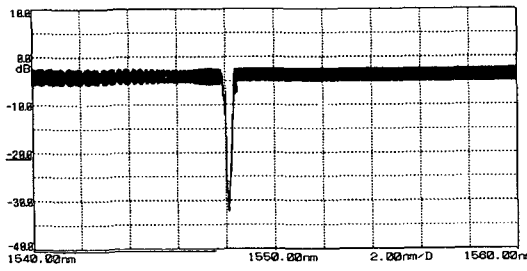


그림 5-9. 다중 FBG를 이용한 OADM의 Add단에 입력이 없을 때 Output단의 스펙트럼

그림 5-8은 OADM의 Add단에 입력이 없을 때 Output단의 출력 측정한 것으로 중심파장은 1548 nm 이고 중심파장에서는 34dB 정도 감쇠가 일어난 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 5-7과 그림 5-9는 다중 FBG를 이용한 OADM의 Drop단의 전송 스펙트럼으로 단일 FBG를 사용했을 때보다 전송도가 향상되었고, 사이드로브 값이 감소하였음을 볼 수 있다. 또한, Add 단자의 동작 특성을 알아보기 위한 실험 구성도는 그림 5-10과 같으며, 그림 5-10의 Drop 단자의 출력 스펙트럼을 Add단자에 입력으로 넣었을 때 Output 단자의 출력을 측정하였으며, 그 결과가 그림 5-11에 나타나 있다.

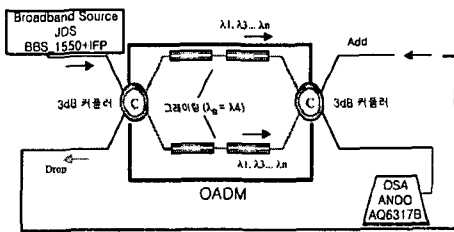


그림 5-10. 다중 FBG를 이용한 OADM의 Drop단의 출력을 Add로 입사시켰을 때의 Output 측정

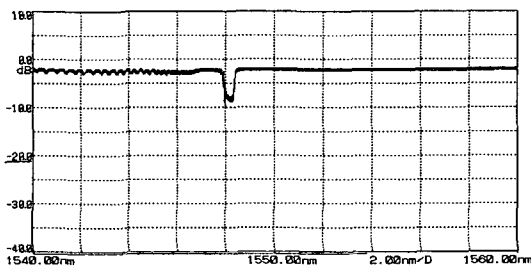


그림 5-11. OADM의 Drop단의 출력을 Add단으로 입사시켰을 때의 Output단의 스펙트럼

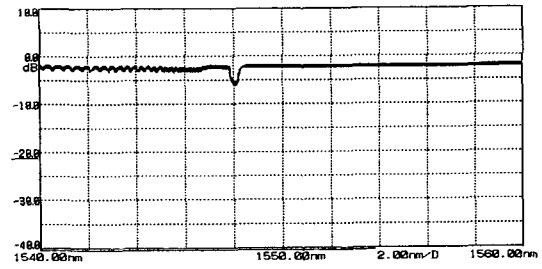


그림 5-12. 다중 FBG를 이용한 OADM의 Drop단의 출력을 Add단으로 입사시켰을 때의 Output단의 스펙트럼

그림 5-12는 다중 FBG의 OADM에서 Drop 단의 출력을 Add단으로 넣었을 때의 경우로 단일 FBG에서의 경우보다 전송도가 향상되었음을 나타내고 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 다중 FBG를 사용하였을 경우에는 OADM의 Output단에서 전송로가, Add단에서는 반사도가 향상된 것을 알 수 있으며, 또한 모든 단에서 사이드로브가 감소하여 전체적으로 성능이 향상된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그림 5-12는 다중 FBG를 사용한 경우로, 하나의 FBG를 사용했을 때보다 사이드로브가 적어져 인접채널간의 간섭을 최소화할 수 있어 정확한 채널의 전송이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 한원택, "광통신과 광섬유 기술", *Telecommunications Review*, SK Telecom, 제 10권 1호, pp. 82-91, 2000.
- [2] Jay N. Damask and Hermann A. Hause, "Wavelength Division Multiplexing using Channel Dropping Filters", *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, No. 3, pp. 424-428, 1993.
- [3] 장우순, 정진호, "고밀도 파장분할 다중화 전송방식(DWDM) 시스템을 위한 FBG 필터 설계에 관한 연구", 한국전자파학회, 제11권 제4호 pp534-543, 2000.
- [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] D. Marcuse, "Theory of dielectric optical waveguides 2nd edition", Academic press Inc, (1991)
- [6] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings", *J. Opt. Soc. Am.*, vol 72, pp. 1385-1392, 1982.