

## WDM 결합기를 이용한 광파장 측정

이현우 · 김용평†

경희대학교 전자 정보학부/레이저공학연구소

Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

(2001년 7월 23일 받음, 2001년 9월 17일 수정본 받음)

WDM 결합기의 결합계수가 파장의 함수라는 현상을 이용하여 광파장 측정기를 구현하였다. 1500 nm/1600 nm 및 1510 nm/1550 nm의 WDM 결합기로 파장측정기를 구성하여 실험한 결과, 측정대역폭 61 nm (1515 nm~1576 nm)에서 ±0.27 nm의 분해능을, 23 nm (1520 nm~1543 nm)에서 ±0.103 nm의 분해능을 각각 얻을 수 있었다. 한편 신호광의 세기에 따른 출력특성의 변화는 미미하였으나 온도에 따라서는 0.06 nm/°C의 특성변화가 발생함을 알 수 있었다.

분류코드 : FO.010, SM.020, SM.030.

### I. 머리말

광통신 분야에 있어서 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 전송방식은 기존의 시간분할다중화(Time Division Multiplexing: TDM) 전송방식에 비해 하나의 전송선로에 다수의 채널 전송이 가능하여 초고속, 대용량의 정보전송에 유리하다. 그러나 WDM 전송방식은 각 채널마다 전송되는 신호의 파장이 다르기 때문에 통신망의 성능평가, 유지 및 보수를 위해서는 각 채널 신호의 파워와 파장의 특성을 정밀 측정 할 수 있을 뿐만 아니라 현장에서도 사용 가능한 휴대용 측정장비가 필요하다.

지금까지 광신호의 파장 측정기로는 회절격자를 이용한 분광기(Grating-Based Spectrometer),<sup>[1]</sup> 간섭계형 분광기(Interferometric Spectrometer),<sup>[2]</sup> 푸리에 변환 분광기(Fourier Transform Spectrometer)<sup>[3]</sup> 등이 개발되어 왔다. 이러한 측정기들의 분해능은 ~10<sup>-12</sup> m 정도로 정밀하지만 그 구조가 복잡하고 부피가 커서 휴대가 불편하고 가격이 상당히 고가인 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 기존의 광학적 정렬이나 기계적 구동을 필요로 하지 않는 새로운 광파장 측정기술에 관한 요구가 집중하고 있다.

최근에 연구되고 있는 측정 방법으로는 신호광의 파장에 따라 응답도(Responsivity)가 서로 다른 두개의 광검출기(Photodiode)를 이용하는 방법,<sup>[4]</sup> 편광유지광섬유(Polarization Maintaining Fiber)를 위상지연기로 사용하는 편광간섭계형 방법,<sup>[5]</sup> WDM 결합기의 파장의존 결합계수를 이용하는 방법 등이 있다. 응답도가 서로 다른 두 개의 광검출기를 사용하여 광파장을 결정하는 방법은 신호광의 파장을 광검출기로부터 얻어지는 두개의 전류신호의 차이 값을 측정하여 결정하는 방법으로, 간단한 구조이기는 하나 서로 다른 광검출기를 사용함으로써 신호광의 세기와 온도에 민감한 단점을 가지고 있다.

한편 편광유지광섬유를 이용한 편광간섭계형 측정방법은 파장에 따라 편광유지광섬유의 복굴절률(Birefringence)이 변화하는 현상을 이용한 측정방법으로, 편광유지광섬유를 통과한 신호광의 편광을 두 축 성분으로 분리하여 그 차이 값으로 파장을 읽어내는 방법이다. 그러나 광섬유를 용착 접속하여 제작하므로 광학적 정렬이 필요 없어 그 구조가 간단하긴 하지만 편광유지광섬유의 특성상 온도에 매우 민감하다는 단점이 있다.

한편, 1×2 WDM 결합기의 결합계수(Coupling Coefficient)가 파장의 함수임을 이용하면 파장 측정기를 구현할 수 있다.<sup>[6]</sup> 즉, 특정 파장의 신호광이 WDM 결합기에 입력되면 파장에 따라 그 결합계수의 변화가 일어난다. 따라서 결합기의 두 개의 출력 값을 비교하면 신호광의 파장을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 1500 nm/1600 nm, 1510 nm/1550 nm 두 종류의 WDM 결합기를 이용하여 파장측정기를 구성, 측정대역폭과 측정 분해능과의 관계 및 신호광의 세기와 온도의존 특성을 측정하여 분석하였다.

### II. WDM 광섬유 결합기를 이용한 파장 측정 이론

파장 측정이론 설명을 위한 구조도를 그림 1에 보인다. WDM 결합기는 파장 λ<sub>1</sub>인 신호광을 A포트로 분기하고 파장 λ<sub>2</sub>인 신호광을 B포트로 분기한다. 분기된 WDM 결합기 내의 두 출력은 다시 각각의 광검출기 D<sub>A</sub>와 D<sub>B</sub>로 감지되어 광전류(Photocurrent) I<sub>A</sub>와 I<sub>B</sub>를 생성한다. 생성된 광전류를 로그비율 증폭기(Log-ratio amplifier)의 두 입력으로 하면 그 출력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_{out} = K \log_{10} \left( \frac{I_A}{I_B} \right) \quad (1)$$

여기서 K는 로그비율 증폭기의 이득이다. λ<sub>1</sub>과 λ<sub>2</sub>의 중간영역에서 측정하고자 하는 신호광의 파장 λ가 λ<sub>2</sub> - λ<sub>1</sub> << λ인 조건을 만족하면 WDM 결합기의 한쪽 출력에 해당하는 결합계

†E-mail: ypkim@khu.ac.kr

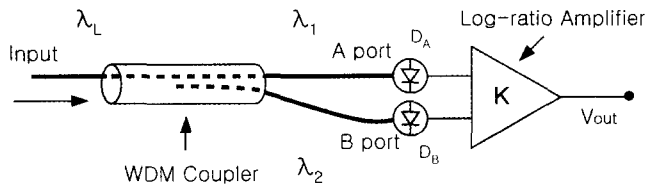


그림 1. WDM 결합기, 광검출기  $D_A$ ,  $D_B$ , 로그비율 증폭기로 구성된 파장측정기의 개념도.

수는 다음과 같이 파장의 함수로 근사할 수 있다.<sup>17)</sup>

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{\pi(\lambda - \lambda_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \quad (2)$$

식 (2)로부터 WDM 결합기의 결합계수가 입력되는 주기적인 파장의 함수임을 알 수 있다. WDM 결합기에 대한 신호광의 파워 스펙트럼 밀도(Optical Power Spectral Density)를  $\phi(\lambda)$  라 하면 결합기의 두 출력에 해당하는 A 포트와 B 포트의 광전류는 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$I_A = \int_{\Delta\lambda} R_A \phi(\lambda) \sin^2 \left[ \frac{\pi(\lambda - \lambda_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] d\lambda \quad (3)$$

$$I_B = \int_{\Delta\lambda} R_B \phi(\lambda) \cos^2 \left[ \frac{\pi(\lambda - \lambda_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] d\lambda \quad (4)$$

여기서  $\Delta\lambda$ 는 신호광의 선폰을 나타내며  $R_A$ 와  $R_B$ 는 WDM 결합기의 두 출력의 측정에 사용하는 광검출기  $D_A$ 와  $D_B$ 의 각각의 응답도 이다. 식 (1)과 식 (3) 및 식 (4)로부터 임의의 신호광 파장  $\lambda_L$ 에 의한 로그비율 증폭기의 출력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_{out} = K \log_{10} \left\{ \frac{R_A}{R_B} \tan^2 \left[ \frac{\pi(\lambda_L - \lambda_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \right\} \quad (5)$$

따라서 입력되는 신호광의 파장이  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$  사이의 값일 경우 그 파장 값은 대응하는 로그비율 증폭기의 출력전압  $V_{out}$ 을 측정함으로써 결정할 수 있다.

그림 2는 식 (5)를 이용하여 모의 실험한 로그비율 증폭기의 출력특성 곡선이다. 식 (2)에서 로그비율 증폭기의 이득  $K$ 는 1로 하였고, 광검출기의 응답도  $R_A$ 와  $R_B$ 도 측정하고자 하는 파장영역에서 동일한 응답특성을 갖는 것으로 가정하여 각각 1로 하였다. 그림 2에서 점선으로 표시한 곡선은  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 가 각각 1500 nm와 1600 nm인 WDM 결합기를, 실선은 각각 1510 nm 및 1550 nm인 WDM 결합기를 이용할 경우의 파장측정기의 출력특성이다. 두 곡선에서 각각 극점에 해당하는 영역을 제외한 중간영역은 파장 대 전압비가 거의 선형으로 대비되는 것을 볼 수 있으며, 이 부분을 이용함으로써 임의의 신호광 파장에 대해 해당하는 전압 값을 결정할 수 있다. 그림 2에서 WDM 결합기의 파장간격이 크면 클수록 더 넓은 범위에서 파장을 측정할 수 있으나 파장 대 전압곡선의 기울기가 작아 분해능이 떨어짐을 알 수 있고, 반대로 파장간격이 작을수록 측정 가능한 파장범위가 줄어들지만 기울기가 커짐

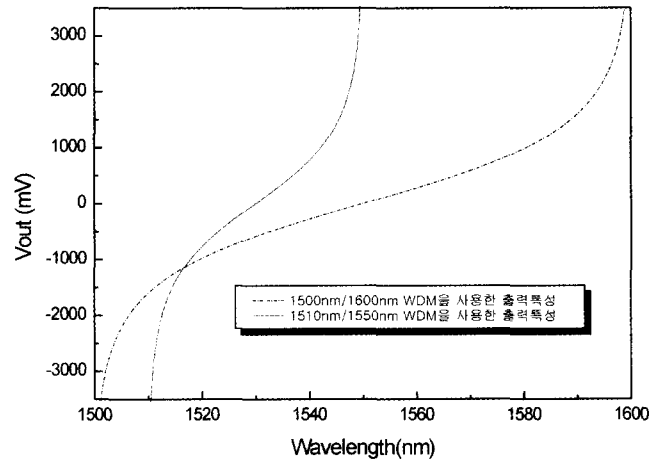


그림 2. 파장에 따른 로그비율 증폭기의 이론적 특성곡선.

으로서 분해능이 보다 정밀해 짐을 알 수 있다. 결국 대역폭과 분해능은 서로 반비례하며 이는 광섬유결합기의 두 출력의 파장간격과 관계가 있음을 알 수 있다.

### III. 실험장치의 구성 및 실험결과

실험을 위한 장치의 구성도를 그림 3에 보인다. WDM 결합기는  $\lambda_1/\lambda_2$ 가 1500 nm/1600 nm와 1510 nm/1550 nm인 두 가지를 사용하였는데, (주)두일전자통신에서 주문 제작하였다. 아이솔레이터는 JDS Fitel사의 제품으로 광학부품을 거쳐 발생하는 반사에 의한 레이저 출력과의 간섭에 의한 특성변화를 막기 위해 사용하였으며, 편광기는 광섬유 결합기의 결합계수가 편광의존성이 있기 때문에 모든 임의의 신호광에 대하여 동일조건을 유지하기 위해 이용하였다. 신호광 검출에 사용된 두 개의 광검출기는 측정하고자 하는 파장영역 내에서 동일한 응답특성을 가져야 함과 온도변화에 대한 광검출기의 미세한 특성도 일치해야 함을 고려하여 모두 Fermionics사의 모델 FD80 제품을 사용하였는데 중심파장 1550 nm에서 응답도 0.95를 갖는다. 두 신호광 출력을 비교 증폭하는데 사용된 로그비율증폭기는 BurrBrown사의 LOG 100을 사용하여 제작하였고 이득은 1로 고정하였다. 신호광원으로 사용한 광원은 New Focus사의 가변 반도체 레이저(모델 6328)를 사용하였다. 최대 파장가변 범위는 1510 nm~1580 nm이며 발진선폰(FWHM)은 0.05 nm 이하이다.

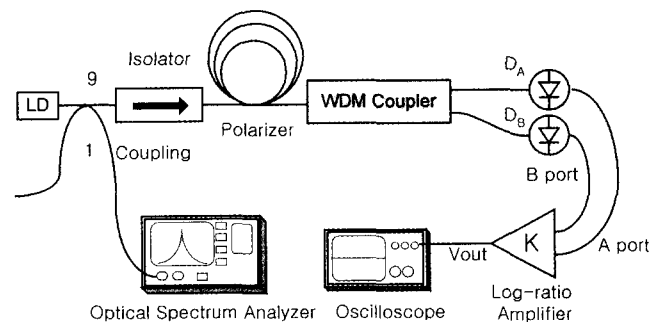


그림 3. WDM 결합기를 이용한 광파장 측정 실험장치도.

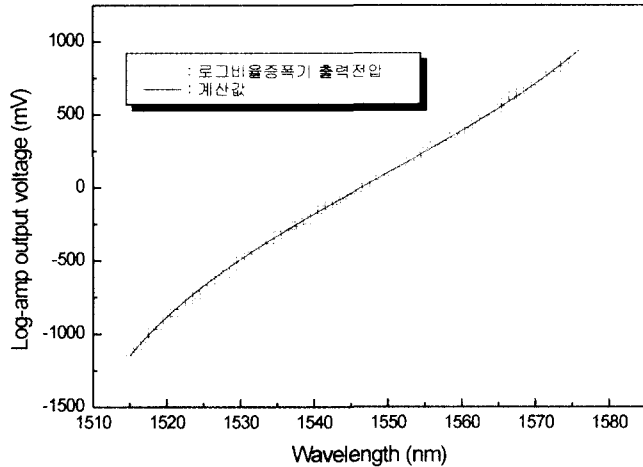


그림 4. 1500 nm/1600 nm WDM 결합기로 제작한 파장측정기의 출력특성(측정간격: 1 nm).

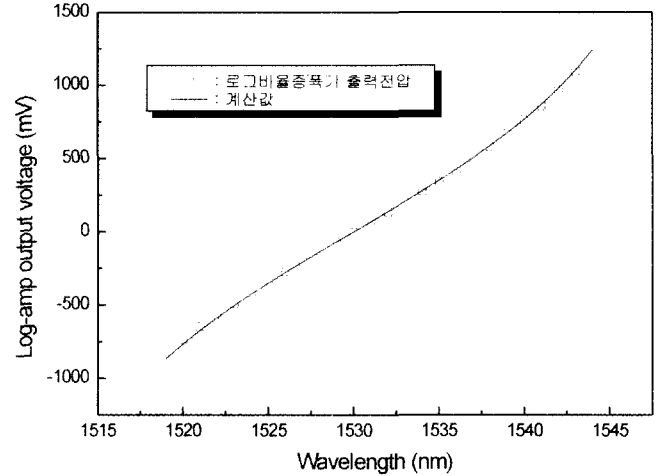


그림 6. 1510 nm/1550 nm WDM 결합기로 제작한 파장측정기의 출력특성(측정간격: 1 nm).

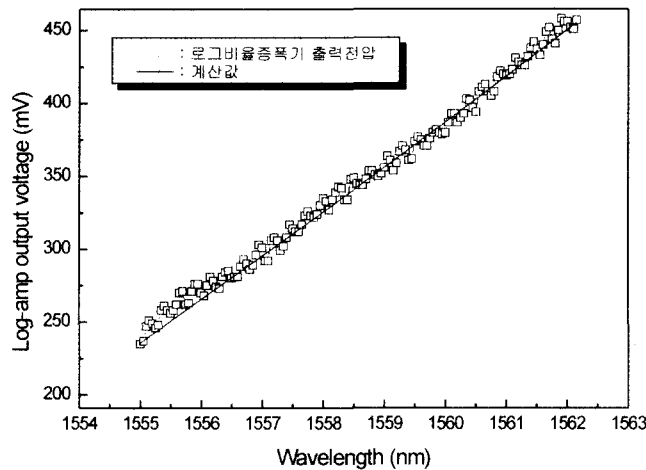


그림 5. 1500 nm/1600 nm WDM 결합기로 제작한 파장측정기의 출력특성(측정간격: 0.05 nm)

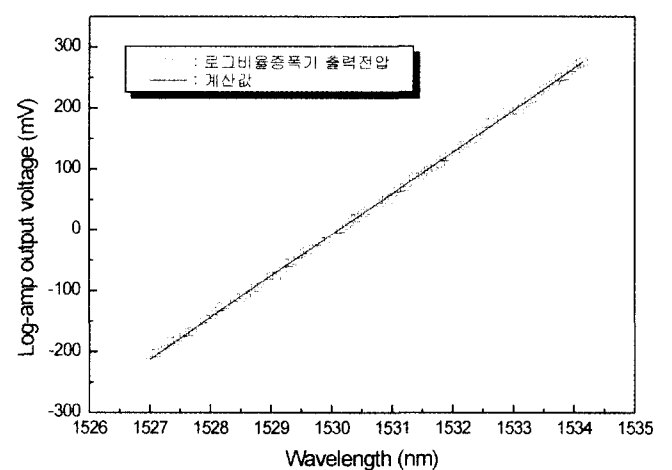


그림 7. 1510 nm/1550 nm WDM 결합기로 제작한 파장측정기의 출력특성(측정간격: 0.05 nm).

실험에서 신호광의 파장가변 단위는 전체 대역폭을 관찰하기 위해 1 nm 간격으로 약 61 nm 범위의 정밀한 분해능을 관찰하기 위해 0.05 nm 간격으로 약 5 nm 범위를 가변하여 측정하였다. 신호광의 세기는 실제 레이저 출력 3 mW에 약 21 dB의 감쇠기를 연결하여 사용하였다. 따라서 실제 파장측정기로 입력되는 신호광의 세기는 약 3  $\mu$ W로 가능한 작은 신호를 이용하였다. 이는 실제 통신용으로 사용하는 신호의 크기를 고려한 것이다. 그림 4~그림 9의 실험결과는 실험시 온도 25.3°C~25.7°C의 상온에서 측정하였다.

그림 4는 1500 nm/1600 nm WDM 결합기를 사용하여 구성한 파장측정기에서 신호광의 파장을 1 nm 간격으로 1515 nm~1576 nm 범위에서 측정한 실험값과 식 (5)에 의한 계산값의 그래프를 나타낸다.

그림 5는 좀더 세밀한 영역에서의 동작특성을 관찰하기 위해 동일한 조건에서 파장가변 단위를 0.05 nm 간격으로 약 5 nm 범위에서 측정한 값과 동일한 조건에서의 계산값을 나타낸다. 이때 계산값과 측정값 사이의 오차는  $\pm 8.59$  mV이며 이

를 파장값으로 환산하면  $\pm 0.27$  nm가 된다.

그림 6과 그림 7은 동일한 실험조건에서 1510 nm/1550 nm WDM 결합기를 사용하여 각각 1 nm 간격과 0.05 nm 간격으로 측정한 결과이다. 마찬가지로 각 그래프에 표시된 실선은 식 (5)에 해당하는 값을 대입하여 계산한 값을 나타낸다. 그림 7에서 계산값과 측정값 사이의 오차는  $\pm 3.39$  mV이며, 이를 대응하는 파장값으로 환산하면  $\pm 0.103$  nm가 된다.

그림 8은 제작한 파장측정기의 대역폭과 분해능과의 관계를 관찰하기 위해 그림 4와 그림 6을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 WDM 결합기의 출력포트의 파장간격이 클수록 파장을 측정할 수 있는 대역폭이 그만큼 커짐을 알 수 있다. 하지만 그에 반비례하여 파장을 분별하는 분해능은 떨어짐을 알 수 있다.

파장측정기로 사용하기 위해서는 임의의 세기를 갖는 신호광에 대한 특성과 온도변화에 따른 출력특성의 변화를 고려해야 할 필요가 있다.

그림 9는 입력되는 신호광의 세기로 3 mW의 레이저 출력을

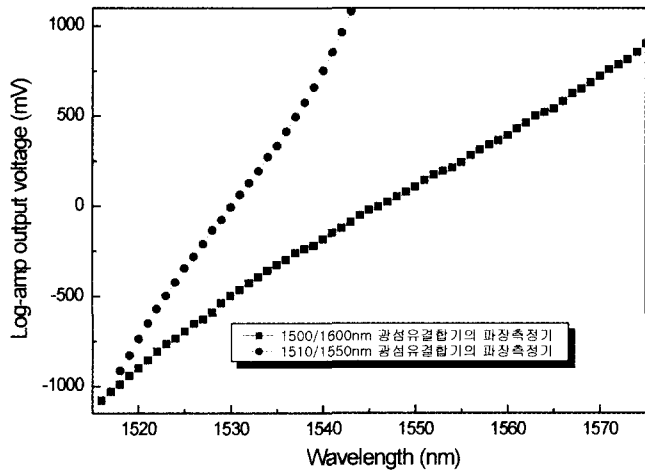


그림 8. 측정값으로 비교한 대역폭과 분해능의 관계.

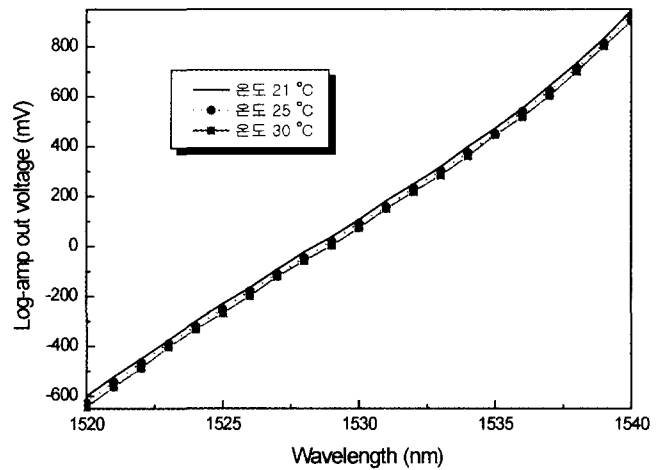


그림 10. 온도변화에 따른 출력특성.

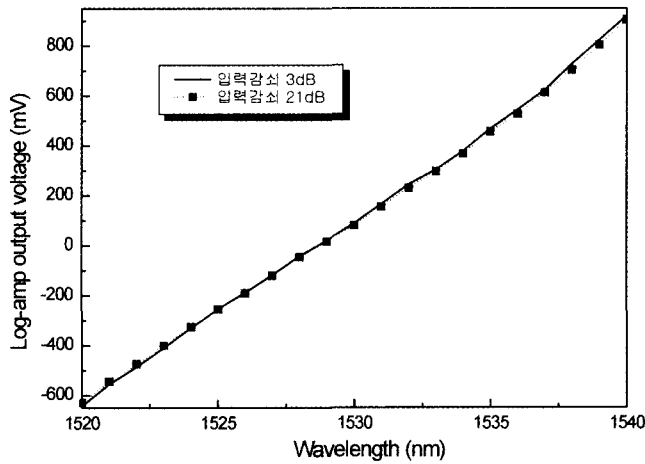


그림 9. 신호광의 세기 변화에 따른 출력 특성.

3 dB~21 dB까지 감쇠 시키며 출력특성을 비교한 것이다. 신호광의 세기가 약 1.5 mW~3 μW 변화함에 따라 파장측정기 전체 출력은 최대 6 mV의 차이가 생기며, 파장값으로 환산할 때 약 0.07 nm의 오차가 된다. 이는 전체 실험결과 나타난 파장측정기 오차 범위보다 작은 값이기 때문에 신호광의 세기에 따른 오차는 거의 무시할 수 있다고 할 수 있다. 결국 제작한 파장측정기는 측정하고자 하는 신호광의 세기에 따른 오차를 고려하지 않을 정도의 우수한 특성을 나타낼 수 있다.

그림 10은 온도변화에 따른 파장측정기의 출력 변화를 측정 한 것이다. 온도가 증가함에 따라 전체 출력이 변화함을 알 수 있다. 온도가 21°C~30°C 사이에서 변화함에 따라 파장측정기 전체 출력은 최대 40 mV의 차이가 생기며 이를 파장값으로 환산할 때 약 0.5 nm의 오차가 된다. 0.06 nm/°C의 오차는 실제 파장측정기로 사용하기 위해서는 너무 크므로 온도 보상을 위한 온도 안정화 회로 등이 고려되어야 할 것이다.

신호광의 파장을 0.05 nm의 간격으로 가변하며 측정된 결과 공통적으로 나타나는 특성으로 측정영역에서의 주기적인 진동을 볼 수 있다. 이는 신호광원으로 사용한 가변 반도체 레이저가 파장을 가변 함에 있어서 다소 불안정하였고, 또한 파장

가변범위가 스펙트럼분석기의 분해능 범위를 초과하였기 때문에 측정하고자하는 정확한 파장을 읽는데 있어서의 오차로 볼 수 있다. 이밖에 WDM 결합기 자체의 파장특성이 이상적이지 못한 것과 신호광의 광원이 포함하는 ASE(Amplified Spontaneous Emission)의 영향도 예상된다.<sup>6)</sup> 이는 측정하고자 하는 신호광의 입력 단에 대역통과 필터(Band-pass filter)를 연결하여 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 1500 nm/1600 nm, 1510 nm/1550 nm의 WDM 광섬유 결합기를 각각 이용하여 파장측정기를 구성하였다. 광섬유 결합기의 결합계수가 입력하는 파장에 따라 그 값이 변화하는 함수라는 특성을 이용하여 임의의 파장을 측정하는 이론과 실제 제작 및 측정된 값을 제시하였다. 실험결과 측정대역폭 61 nm(1515 nm~1576 nm)에서 ±0.27 nm의 분해능을, 23 nm(1520 nm~1543 nm)에서 ±0.103 nm의 분해능을 각각 얻을 수 있었다. 두 결과를 비교 하여볼 때 파장측정기로 사용한 WDM 결합기의 파장 간격이 측정 가능한 파장영역, 즉 대역폭을 결정하며 이 측정 가능한 대역폭이 클수록 분해능은 작아지며 대역폭이 작을수록 분해능은 커지는 반비례 관계임을 알 수 있었다.

파장측정기로 사용하기 위해서는 임의의 세기를 갖는 신호광에 대한 특성과 온도변화에 따른 출력특성의 변화를 고려해야 할 필요가 있는데 제작한 파장측정기는 신호광의 세기가 약 18 dB 변화하는 범위에서 출력특성의 변화는 거의 없었으나, 온도변화에 있어서는 0.06 nm/°C의 오차가 있음을 알 수 있었다. 따라서 실제 파장측정기로 사용하기 위해서는 온도보상을 위한 온도 안정화 회로 등이 고려되어야 할 것이다.

모든 실험결과에 있어서 공통적으로 나타나는 오차원인으로는 파장측정기 제작에 사용한 WDM 결합기 자체의 특성이 이상적이지 못함과 실험에 있어서 신호광원으로 사용한 가변 반도체 레이저 출력의 불안정이 있다. 또한 신호광에 포함될 수 있는 ASE의 영향도 어느 정도 기여할 것으로 생각되며, 이는

광섬유 결합기 입력 단에 측정하고자 하는 파장 영역에 해당하는 대역통과필터를 이용하여 어느 정도 제거가 가능할 것이다.

본 연구에서 시도한 측정방법은 기존의 광파장 측정방법과는 달리 광학소자의 기계적인 구동이 전혀 필요 없다. 더욱이 광섬유의 용착 접속만으로 광학계가 구성되기 때문에 광학적 정렬을 필요하지 않아 매우 안정적인 시스템을 구성할 수 있어 휴대용 파장측정기로 적합하다. 따라서 본 연구에서 개발한 측정기술은 향후 일반화 될 것으로 예상되는 파장분할다중화 광전송 시스템의 유지 및 보수에 필수 불가결한 광파장 측정에 있어서 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

**참고문헌**

[1] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergameon, Oxford, UK, 1985), Chapter 8.

[2] W. R. C. Rowley, "Laser wavelength measurements," *Radio Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 585-591, 1979.

[3] R. J. Bell, *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (Academic Press, New York, USA, 1972), Chapter 1.

[4] J. C. Braasch, W. Holzapfal, and S. Neuschaefer-Rube, "Wavelength determination of semi conductor lasers: precise but inexpensive," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 5, pp. 1417-1420, 1995.

[5] 이현우, 김용평, "광섬유 위상지연기를 이용한 광파장 측정," *한국광학회지*, 제12권 1호, pp. 5 -9, 2001.

[6] T. E. Dimmick and J. Weidner, "Simple, inexpensive wavemeter implemented with a fused fiber coupler," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 9, pp. 1898-1901, 1997.

[7] D. Marcuse, "The coupling of degenerate mode in two parallel dielectric waveguides," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 50, no. 6, pp. 1791-1816, 1971.

**Measurements of optical wavelength using WDM coupler**

Hyun-Woo Lee and Yong-Pyung Kim<sup>†</sup>

*School of Electronics and Information, Kyunghee University, Yongin 449-701, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: ypkim@khu.ac.kr*

(Received July 23, 2001 ; revised manuscript received September 17, 2001)

A wavemeter is realized using the fact that the coupling coefficient of a WDM coupler is a function of wavelength. Prototype devices with 1500 nm/1600 nm and 1510 nm/1550 nm WDM couplers are successfully fabricated and tested in the laboratory. The measurement resolutions are  $\pm 0.27$  nm over a wavelength range of 1515 nm~1576 nm for the device with 1500 nm/1600 nm WDM coupler and  $\pm 0.103$  nm over a wavelength range of 1520 nm~1543 nm for the device with 1510 nm/1550 nm WDM coupler. The dependence of operating characteristics on the input signal power is insignificant. However the temperature dependence is  $\sim 0.06$  nm/°C.

*Classification codes* : FO.010, SM.020, SM.030.