

論文97-34D-6-8

# WDM을 위한 Fabry-Perot 필터의 로킹 시스템

## (The wavelength locking system of the Fabry-Perot filter for WDM)

宋俊容\*, 李鎬俊\*\*

(June Yong Sang and Ho joon Lee)

### 요 약

WDM 시스템에서 BER을 증가시키는 레이저 파장 변동을 보상하기 위하여 디더링 방법을 이용하였으며 광섬유 Fabry-Perot 필터의 파장 로킹 시스템을 이론적으로 분석하고 실험을 통하여 입증하였다. 파장 로킹 시스템은 레이저의 파장과 광 필터의 중심 파장 사이의 차이를 보상하며 항상 투과전력이 최대가 되도록 Fabry-Perot 필터의 PZT에 인가되는 전압을 조절한다. 실험에서는 80nm의 FSR과 1nm의 FWHM을 가지는 광섬유 Fabry-Perot 필터와 디더링 신호의 주파수는 2 kHz 이고, 전압은 20 mV 와 10 mV 이고 레이저의 중심 주파수가 1550nm일 때 20ms의 로킹 시간과 2nm의 로킹 범위를 가진다.

### Abstract

The wavelength locking system of the optical Fabry-Perot filter theoretically derived and experimentally realized by using the dithering method in order to compensate the laser wavelength drift increasing the BER of the WDM system. The deviation between the laser wavelength and the optical filter center wavelength is compensated by applying a suitable voltage to the PZT. Accordingly, the laser wavelength selected by the Fabry-Perot filter always maintains the condition of maximum transmission power. A wavelength locking system has been demonstrated using a fiber Fabry-Perot filter with a free spectral range of 80nm and an FWHM of 1nm. The voltages of the sine wave generated for dithering was 20mV and 10mV, the frequency was 2kHz and center wavelength of the tunable laser was 1550nm. In this paper, the locking system have 20ms of locking time and 2nm of locking range.

### I. 서 론

기술의 발달에 따라 점차 증가되어 가는 통신망 서비스에 대한 요구는 보다 높은 정보량 전송을 가지는 광통신 기술을 더욱 크게 필요로 하고 있다. 광섬유의 넓은 전송 대역폭을 이용한 조밀한 파장 분할 다중화(dense wavelength division multiplexing : dense

WDM)는 많은 정보를 전송할 수 있을 뿐 아니라 통신망 구현에도 유리하기 때문에 많은 관심이 모아지고 있다<sup>[1]</sup>.

레이저 다이오드(laser diode : LD)의 발전 중심 주파수는 온도 변화와 1/f 잡음등의 원인 때문에 변동하게 된다. 이러한 중심 주파수의 흔들림은 시스템의 BER(bit error rate)이 증가되는 원인이 된다. 시스템에서 원하는 채널을 선택하기 위하여 높은 finesse를 얻을 수 있고, 광섬유와 연결하여 사용할 수 있으며, 소형이며 빠른 동조 속도와 좋은 안정성을 갖는 Fabry-Perot형 가변 파장 필터가 반드시 필요하고, 신호광에 대한 주파수 안정을 위한 채널 주파수 간격

\* 正會員, 韓國 GlobalOne

(Global one Communication, Inc)

\*\* 正會員, 湖西大學校 情報通信工學部

(Dept. of Infor Communication Eng., Hoseo Univ.)

接受日字:1996年10月8日, 수정완료일:1997年6月2日

의 로킹 기술과 표류하는 광원의 파장을 추적하는 레이저 파장 로킹 시스템이 요구된다<sup>[2][13]</sup>.

본 논문에서는 Fabry-Perot형 가변 광 필터를 사용하여 PZT(piezomechanical transducer)에 전압을 인가하여 공진기 길이를 변화시킴으로 필터의 중심 파장을 선택하는 방법을 이용하여 로킹 시스템을 구성하였다<sup>[4]</sup>. 이러한 WDM을 위한 광 필터의 레이저 파장 로킹 시스템을 사물레이션을 통하여 해석하였으며, 입력되는 레이저 선의 크기, 로킹 시스템의 이득, 적분기의 시정수와 동기 검파기의 출력전압 등을 고려하여 시스템의 로킹 시간을 결정하였으며 실험을 통하여 입증하였다.

## II. Fabry-Perot 필터와 파장 로킹 시스템의 이론

Fabry-Perot 필터의 투과율은 식(1)에 나타내었으며, 그림 1과 같이 에어리(airy) 함수의 형태를 갖는다. 여기서  $A$ 는 필터의 손실,  $R$ 은 미러의 반사율,  $f$ 는 주파수,  $r$ 는 미러의 거리에 따른 지연을 의미한다. 보통 양쪽 거울의 반사율은 같고, 거울의 손실이  $A=1-1-R-T$ 일때  $T$ 는 거울의 투과율이며, 공동 내부의 손실은 무시된다.

$$T = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \cdot \sin \frac{4\pi f r}{2}\right)^2\right]^{-1} \quad (1)$$

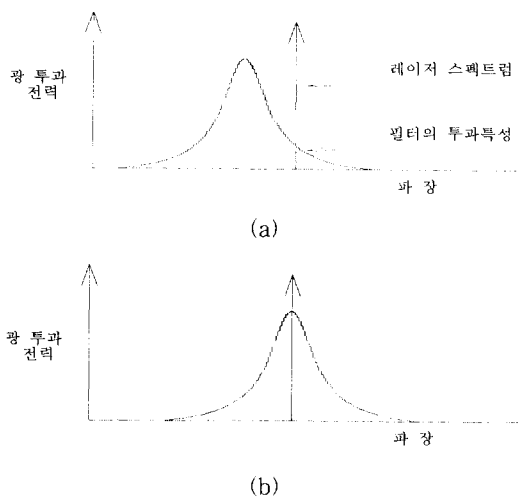


그림 1. 레이저의 파장에 필터의 중심 주파수가 로킹 되는 모습  
Fig. 1. Locking when laser line shifted.

필터로 보내지는 레이저의 파장에는 작은 변동이 포함된다. 이는 온도 변화 및 구동전류 변화에서 비롯되며 중요한 잡음원으로 고려되어진다. 이러한 레이저의 파장 변화를 보상하기 위하여 레이저 파장과 필터 중심파장 사이의 상대적 위치를 검출하여 PZT에 적당한 전압을 인가하여 보상한다. 이에 따라 필터에 의해 선택된 레이저의 파장이 항상 최대 투과 전력이 나오는 상태를 유지하도록 로킹 시스템이 동작하게 된다.

그림 1에는 레이저파장의 변동과 이를 보상하기 위하여 추적하는 필터의 동작을 표시하였다. 그림 1(a)에서 보듯이 레이저의 선이 필터의 파장과 편차를 가질 때 그림 1(b)에서 처럼 로킹 시스템에 의하여 필터의 중심 파장이 변동하는 레이저의 선 쪽으로 움직이게 하여 로킹 상태를 유지하도록 동작한다.

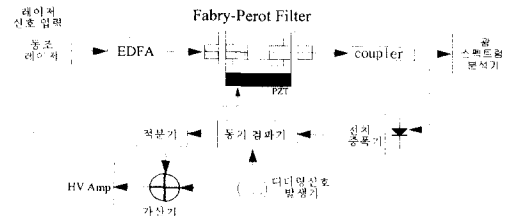


그림 2. 파장 로킹 시스템 구성도  
Fig. 2. Block diagram of the wavelength locking system.

본 연구의 실험 구성도는 그림 2와 같다. 필터의 중심 파장을 레이저 스펙트럼 선 위에 로킹하기 위해서 로킹 시스템은 광원의 선 스펙트럼과 광 필터가 현재 선택된 파장편차를 결정해야만 한다. 이것은 광 필터가 선택된 파장에서 작은 양의 디더링(dithering)을 하였을 때 수신된 신호의 강도에 어떠한 변화가 발생하는지 측정함으로써 알 수 있다. 로킹 시스템은 광원의 선 스펙트럼과 광 필터의 선택 파장 사이의 파장 편차를 줄이도록 필터에 부착되어 있는 PZT에 전압을 인가한다.

필터의 중심 파장과 레이저의 선이 일치할때 최대출력이 되고 편차가 증가함에 따라 출력이 감소하게 된다. 필터는 로킹 시스템에서 발생한 10~20mV의 미소한 정현파 신호에 따라 중심 주파수가 변하는 동작을 한다. 필터를 통과한 광은 광 검파에 입력되고 이 정현파에 의해 동기 검파된다.

레이저와 필터의 중심 주파수의 위치에 따라 동기 검파기의 출력 파형을 그림 3에 보였다. 그림 3(a)는 레이저의 선이 필터의 중심 주파수 보다 작을 때 나타

나는 파형이고, 그림 3 (b)는 로킹되었을때의 파형이며 그림 3(c)는 반대로 레이저의 선이 필터의 중심 주파수 보다 클 때의 출력 파형을 나타낸다. 디더링에 의해 야기된 강도 변조의 결과는 선 스펙트럼의 한 측면에서 디더신호와 동위상이고 다른 측면에서 디더신호와 역 위상이다.

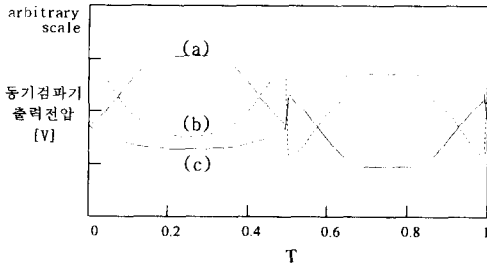


그림 3. 레이저의 중심 파장 부근에서 디더신호의 위상 변화.(a) 레이저의 선 < 필터의 중심 파장 (b) 레이저의 선 = 필터의 중심 파장 (c) 레이저의 선 > 필터의 중심 파장

Fig. 3. Phase transformation of dither signal around the laser center wavelength.  
(a) laser line < filter center wavelength  
(b) laser line = filter center wavelength  
(c) laser line > filter center wavelength.

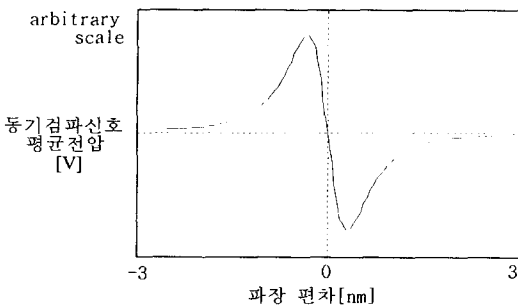


그림 4. 저역 통과 필터 출력 전압 대 파장 편이  
Fig. 4. Low pass filter output voltage vs. wavelength deviation.

로킹 시스템에서 레이저의 선과 필터 중심 파장 사이의 파장 편차에 대한 동기검파 신호의 평균전압의 곡선을 그림 4에서 보였으며 로킹 시스템에서는 이 전압이 영으로 유지하도록 동작한다. 로킹 시스템의 로킹 시간은 필터에서 출력되는 레이저 선의 높이, 시스템의 이득과 적분기의 시정수 등에 따라 변하게 된다. 필터를 통과하는 광 전력이 최대가 되는 상태로 필터 중심

주파수를 유지하면서 레이저의 표류에 로킹하게된다.

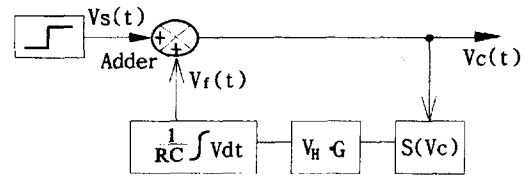


그림 5. 로킹 시간 측정을 위한 블럭도  
Fig. 5. Block diagram for locking time measurement.

### III. 로킹 시간의 시뮬레이션

로킹 시간을 측정하기 위하여 구성된 시스템 구성도를 그림 5에 나타내었다.  $V_C(t)$ 는 로킹 시스템에 의해 필터에 가해지는 전압이고  $V_S(t)$ 는 파장 편차를 발생시키는 신호전압을 의미한다. 레이저의 선과 필터의 중심 파장이 일치하지 않는 점에서 로킹이 되는 점까지의 시간을 로킹 시간이라 한다. 로킹 시간의 측정은 로킹 시스템에서 나오는  $V_C(t)$ 에 의해 조절되는 필터의 중심파장이  $V_S(t)$ 에 의해 파장 로킹이 흐트러진 후 부터 다시 로킹 되는데까지 걸리는 시간을 측정하였다. 필터가  $V_C(t)$ 에 의해 동작하고 있는 상태에서 Fabry-Perot 필터에 계단함수 형태의 전압  $V_C(t)$ 를 인가시키면 시스템은  $V_C(t)$ 와 같은 모양으로 로킹에 도달하게 된다. Fabry-Perot 필터에 걸리는 전압  $V_C(t)$ 의 관계를식(2)에 나타내었다.

$$V_C(t) = V_S(t) + V_f(t) \tag{2}$$

$V_f(t)$ 는 식(3)과 같다.

$$V_f(t) = \frac{V_H \cdot G}{R \cdot C} \cdot \int S[V_C(t)] dt \tag{3}$$

$V_H$ 는 선의 높이(line height)이고,  $G$ 는 시스템의 전체이득,  $R \cdot C$ 는 적분기의 시정수를 의미한다.  $S(V_C)$ 는 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며 레이저 파장과 필터의 중심파장 편이가 상당히 작을때( $\ll$  filter bandwidth / 2) 직선으로 가정할 수 있다. 이때 식(2)에 식(3)을 대입하여 라플라스 변환하여 풀면  $V_C(t)$ 는 식(4)와 같다.

$$V_C(t) = V_S \cdot \exp[-V_H \cdot G / R \cdot C] t \tag{4}$$

$V_C(t)$ 는 PZT를 조절하기 위하여 Fabry-Perot 필터에 인가되는 전압이다. 여기에서 각 파라미터를 식(5)와 같이  $g$ 함수로 표현하여 시스템의 특성을 정의하였다.  $g$ 값에 따라 시스템의 로킹 시간을 비롯한 시스템의 다른 특성이 바뀌게 된다.

$$g = \frac{V_H \cdot G}{R \cdot C} \tag{5}$$

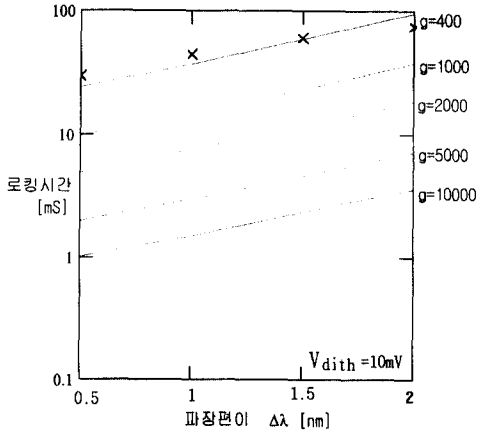


그림 6. 실험 결과값과 시뮬레이션 결과 I의 비교 ( $V_{th}=10mV$ ,  $\lambda_c=1550nm$ , X=실험치)  
 Fig. 6. Experiment and Simulation result I ( $V_{th}=10mV$ ,  $\lambda_c=1550nm$ , X=experiment result)

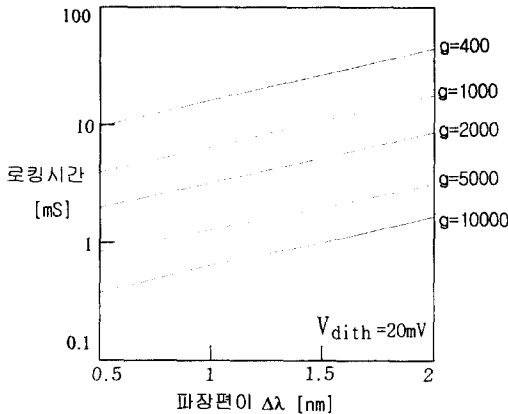


그림 7. 시뮬레이션 결과 II : 로킹 시간 대 파장 편이 ( $V_{th}=20mV$ ,  $\lambda_c=1550nm$ )  
 Fig. 7. Simulation result II : locking time vs. wavelength deviation. ( $V_{th}=20mV$ ,  $\lambda_c=1550nm$ )

레이저 파장과 필터의 중심파장 편이가 클때(>filter

bandwidth /2)는  $S(V_C)$ 의 그래프를 직선으로 볼 수 없으며 이때는 그림 4를 이용해 식(2)와 식(3)을 시뮬레이션을 통해 얻어야 한다. 그림 6의 그래프는 디더링 전압이 10mV일때 로킹 시간과 파장 편이 사이의 관계를 시뮬레이션을 통하여 구한 것이고, 그림 7는 디더링 전압이 20mV일때의 관계를 구한 그래프이다. 파장 편차는 로킹 상태에서 발생한 레이저의 선과 필터의 중심 파장 사이의 차이를 의미한다.  $g$ 값이 각각 400, 1000, 2000, 5000, 10000인 경우를 시뮬레이션하여 표시하였다. 제작한 시스템의 로킹 속도가 시스템의 시정수에 반비례하게 됨을 알 수 있다.

#### IV. 실험 및 고찰

광 동조 필터의 파장 로킹 시스템 블록도를 그림 2에 나타내었다. 넓은 대역폭에서 로킹 범위(locking range)를 측정하기 위하여 1520~1570nm 범위에서 중심 파장을 가지도록 동조 레이저를 조절하여 사용하였고, 이때 사용된 필터의 FSR은 80nm가량 되고, FWHM(full width half maximum)은 1nm이었다. 50 : 50의 분리비와 3dB 손실을 가지는 1×2 결합기(coupler)를 사용하여 레이저와 필터의 스펙트럼을 측정하였다. 실험에서 사용한 Fabry-Perot 필터는 Micron optic 社의 제품을 이용하여 시스템을 구성하였으며, 동조 레이저는 Santec 社의 TSL-300을 사용하였고, 광 스펙트럼 분석기는 Ando社의 AQ-6315B를 사용하여 측정하였다.

광 필터는 디더링 신호에 따라 중심 파장을 변화시킴으로써 동작되고 이 주파수에서 동기적으로 광 검출기 출력을 복조함으로써 동작한다. 디더링에 의해 야기된 강도 변조의 결과는 선 스펙트럼의 한 측면의 위상과 동위상이고 다른 쪽과 위상이 반대로 나타나는데, 광 필터의 중심 파장은 동기 검파기의 출력이 0인 곳으로 이동하게 된다. 이 신호는 적분기로 보내지고 신호처리하여 고전압 OP Amp. 로 보내진다. 여기서 나오는 고전압은 PZT를 동작시켜 필터의 중심 파장은 전송 레이저와 일치하게 된다.

표 1에 실험과 시뮬레이션에서 사용한 파라미터 값을 보였다. 그림 6에  $g=400$ 인 경우의 실험결과 값과 시뮬레이션 값을 비교하여 보였다. 여기에서 논문에서 분석한 로킹 시스템과 제작한 시스템의 값이 유사함을 알 수 있다.

표 1. 실험과 시뮬레이션에서 사용한 파라미터 값

Table 1. Parameter of calculation & experiment used.

Laser 파장	1550 nm
line height	1
필터의 FSR	80 nm
필터의 Finesse	80
Dither 전압	10mV, 20 mV
적분기 시정수	10 mS
g	400

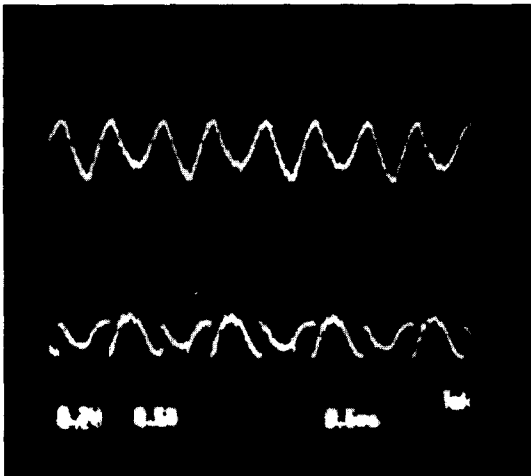


그림 8. 동기 검파기의 출력 신호 파형  
(상 : 디더 신호 20mV, 하 : 동기 검파기의 출력신호 =10mV ; 주기 =1ms)

Fig. 8. Output signal waveform of the synchronous detector.  
(High : dither signal =20mV, bottom : output signal of the synchronous detector =10mV)

그림 8은 파장 로킹 시스템이 로킹 상태로 동작하고 있을 때 (상)디더링을 위해 발생시킨 20mV의 정현파와 (하)동기 검파기의 출력신호를 나타낸 것이다. 오실로스코프의 세로축은 10mV/div이고 가로축은 0.5ms/div으로 측정된 값이다. 로킹 상태에서는 레이저의 선과 필터의 중심파장이 일치되어 Fabry-Perot 필터에서 최대 투과전력이 나오는 상태를 유지하고 있으므로 디더링 신호의 정현파에 비하여 두 배의 주파수를 보이는 파형이 동기 검파기에서 출력됨을 알 수 있다.

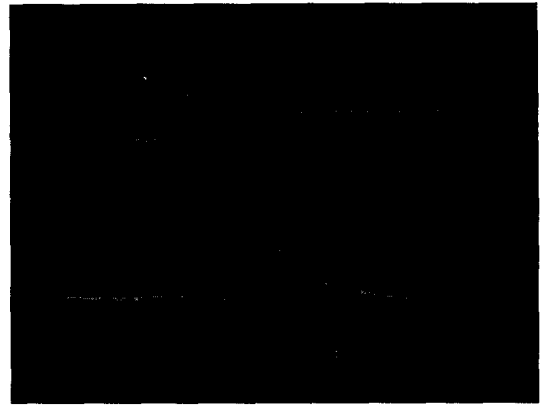


그림 9. 로킹 시간 측정 I. (상 : 파장편차  $V_s=100\text{mV}$ , 하 : 전치 증폭기의 출력)

Fig. 9. Locking time measurement I.  
(High : Wavelength deviation  $V_s=100\text{mV}$ , bottom : output signal of pre-Amp.)

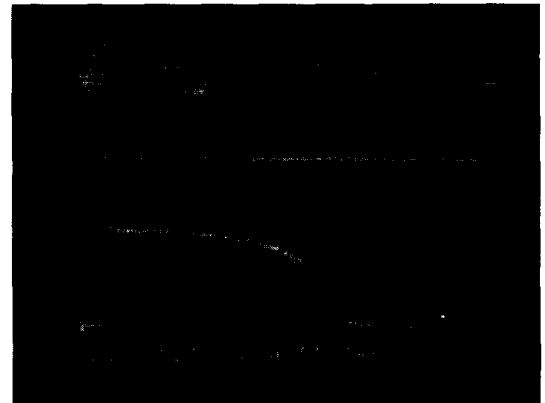
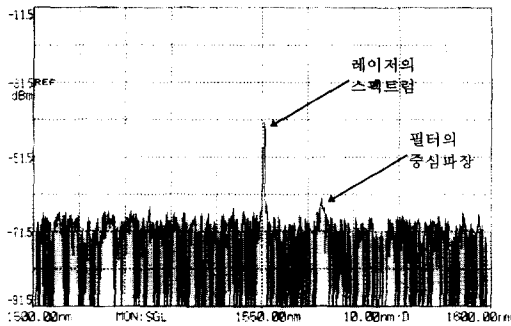


그림 10. 로킹 시간 측정 II. (상 : 파장편차  $V_s=200\text{mV}$ , 하 : 전치 증폭기의 출력)

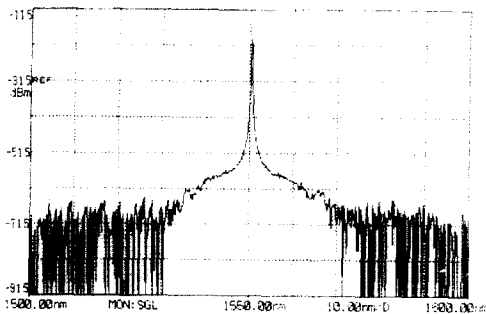
Fig. 10. Locking time measurement II.  
(High : Wavelength deviation  $V_s=200\text{mV}$ , bottom : output signal of pre-Amp.)

그림 9와 그림 10의 사진은 그림 5에 나타난 블럭도에 따라 시스템을 구성하여 로킹 시간을 측정하는 것이다. (상)파장 편차를 발생시키기 위하여 필터에 가하는 구형파와  $V_s$ 와 (하)전치증폭기의 출력을 나타낸다. 그림 9에서 오실로스코프의 세로축은 100mV/div이고 가로축은 5ms/div이다. 여기서  $V_s$ 가 100mV인 경우 로킹되는데 걸리는 시간이 20ms임을 보인다. 그림 10에서 오실로스코프의 세로축은 100mV/div, 200mV/div

이고 가로축은 5ms/div이다.  $V_s$ 가 200mV인 경우 로킹되는데 걸리는 시간이 30ms임을 알 수 있다. 로킹 시간은 파장 편이가 발생한 후 부터 시작하여  $V_C$ 가 디더링 전압의 피크치인 10mV이하로 될 때 까지로 정하였다. 로킹 시간은 사용한 g 값에 따라 변화한다. 디더링을 위해 발생시킨 정현파는 잡음원으로 고려 될 수 있는데 이에 따르는 오차는 0.1nm이하이다.



(a)



(b)

그림 11. 로킹 시스템 동작 전(a)과 후(b)의 스펙트럼 출력

Fig. 11. Locking system output spectrum before (a) and after(b) working.

그림 11에 로킹 시스템 동작 전, 필터의 중심 파장과 레이저의 파장이 일치하지 않았을 때의 필터의 출력 스펙트럼을 보였고, 그림 12에 로킹 시스템의 동작 후, 필터의 중심 파장과 레이저의 파장에 일치할 때의 출력 스펙트럼을 비교하여 나타내었다.

설정된 파장 로킹 상태는 레이저의 선이 변동하더라도 계속 유지하게 된다. 동조 레이저를 파장 변동 시켰을 때 지속하여 파장 로킹을 유지하는 로킹 범위는 시뮬레이션에서와 같이 2nm 가량이 됨을 알 수 있었다.

## V. 결론

본 논문에서는 WDM 시스템에 필요한 광섬유 Fabry-Perot 필터의 로킹 시스템의 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 로킹 시스템을 설계 및 제작하여 결과를 이론적 분석과 비교한 결과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. WDM시스템의 BER을 증가시키는 레이저의 파장 변화를 보상하기 위하여 디더링하는 방법을 이용하여 Fabry-Perot 필터의 중심 파장을 조절하는 시스템을 구성하였다. 파장 로킹 시스템은 수신 파장을 추적하여 로킹하는데 사용된다.

레이저의 파장과 필터 중심 파장 사이의 상대적 위치를 검출하여 PZT에 적당한 전압을 인가하여 파장의 차이를 보상한다. 이에 따라 Fabry-Perot 필터에 의해 선택된 레이저의 파장은 항상 최대 투과 전력이나 오는 상태를 유지하도록 동작하게 된다.

실험에서 사용한 필터의 FSR은 80nm이고 FWHM은 1nm이었다. 로킹 시스템에서 디더링을 위해 발생시킨 정현파의 전압은 20mV와 10mV이고 주파수는 2KHz이었다. 동조 레이저의 중심 주파수가 1550nm인 경우 로킹 시간은 20 ms이고 로킹범위는 2nm정도로 시뮬레이션의 값과 근사함을 알 수 있다.

앞으로 다가올 ISDN시대의 전송과 교환에 폭넓게 사용될 로킹 시스템의 설계에 많이 사용되리라 본다.

## 참고 문헌

- [1] C. M. Miller and F. J. Janniello, "Passively temperature-compensated fibre fabry-perot filter and its application in wavelength division multiple access computer network", Electronics Lett., 26(25), pp. 2120-2123, 1990.
- [2] G. Y. Lyu and C. S. Park, "Four-channel frequency locking using back reflection dips of a fibre-fed Fabry-Perot filter", Electronics Lett., vol. 31, no. 2, 19th, Jan. 1995.
- [3] Y. C. Chung and C. B. Roxlo, "Frequency-locking of a 1.5m DFB laser to and atomic krypton lice using optogalvanic effect", Electron. Lett., vol. 24, pp. 1048-1049, 1988.

[4] N. Shimosaka, K. Kaede and S. Murata,  
"Frequency locking of FDM optical sources

using widely tunable DBR Lds", OFC'88,  
1988, New Orleans, Louisiana, Paper THG3.

---

— 저 자 소 개 —

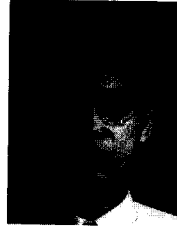
---



李鎬俊(正會員)

1955年 8月 21日生. 1978年 2月 성균관대학교 전자공학과(학사). 1980年 2月 성균관대학교 전자공학과(석사). 1987年 2月 성균관대학교 전자공학과(박사). 1982年 6月 ~ 1983年 6月 육군사관학교 전자공학과 전임강사.

1987年 3月 ~ 현재 호서대학교 정보통신공학부 교수.  
1991年 7月 ~ 1992年 6月 Stanford University 교환교수. 주관심 분야: 광통신 시스템, 광센서, 광신호처리



宋俊容(正會員)

1970年 6月 29日 서울 出生. 1994年 2月 호서대학교 정보통신공학과(학사). 1996年 2月 호서대학교 정보통신공학과(석사). 1997年 2月 ~ 현재 한국 GlobalOne (주) 근무