

## 광섬유 위상지연기를 이용한 광파장 측정

이현우 · 김용평<sup>†</sup>

경희대학교 전자·정보학부

Ⓣ 449-701 경기 용인시 기흥읍 서천리 1번지

(2000년 9월 1일 받음, 2000년 12월 12일 수정본 받음)

위상지연기에서 편광 사이의 위상차가 파장의 함수임을 이용하여 파장측정기를 구현하였다. 특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 위상지연기를 통과하면 파장에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행방향에 수직인 두 축 성분으로 분리하여 그 출력을 비교하면 입력광의 파장을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 위상지연기로 복굴절률  $3 \times 10^{-4}$ 인 길이 100 mm의 편광유지 광섬유를 이용하여 파장측정기를 제작하였다. 실험 결과, 1554.38 nm~1557.19 nm의 파장영역에서 이론 값과 잘 일치하는 측정결과를 얻을 수 있었으며 분해능은 0.08 nm이었다. 또한 온도가 동작특성에 미치는 영향을 이론 및 실험적으로 분석하였다.

Keywords : SM.030, SM.020.

### I. 서 론

광통신기술은 초고속 대용량 정보전송이 가능하여 차세대 정보통신 산업의 핵심 기술분야로 첨단 과학기술의 대표적 분야 중 하나이다. 통신분야에 있어서 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 광전송기술은 기존의 시간분할다중화(Time Division Multiplexing: TDM) 광전송기술에 비하여 하나의 전송선로에 다수의 채널 전송이 가능하여 초고속, 대용량의 정보전송에 유리하다. 파장분할다중화 전송방식은 각 채널마다 전송되는 광파장이 다르기 때문에 통신망의 성능평가, 유지 및 보수를 위해서는 각 채널의 광출력 및 파장의 특성을 정밀측정 할 수 있고 현장에서 사용 가능한 휴대용 장비가 필요하다.

지금까지 광파장 측정기로는 회절격자를 이용한 스펙트럼분석기,<sup>[1]</sup> 간섭계형 스펙트럼분석기,<sup>[2]</sup> 푸리에변환(Fourier Transform) 스펙트럼분석기<sup>[3]</sup>등이 개발되어 왔다. 이러한 측정기기들은 분해능이 뛰어나고 동작특성이 안정적이나 시스템의 부피가 크고 복잡하며 광학적 정렬에 어려움이 있다. 또한 파장분할다중화 전송방식에 사용되는 파장영역인 1550 nm 부근에서 회절격자를 이용한 스펙트럼분석기는 고가의 광검출기를 사용하여야 한다. 따라서 최근에는 기존의 광학적 정렬이나 기계적인 구동이 없이도 측정 가능한 방법에 대한 연구가 활발하다. Woschonic 등<sup>[4]</sup>은 광학 차단 필터의 파장 의존 투과계수를 측정하여 파장을 결정하였고 미국 국방성의 Dimmick 등<sup>[5]</sup>은 용융 광섬유결합기의 결합계수를 이용하여 파장을 측정하였다. 이러한 방법들은 제작주문형의 광섬유 결합기나 특정한 광검출기를 필요로 한다.

광학적 위상지연기(Optical Retarder)에서 편광 사이의 위상차가 파장의 함수임을 이용하면 파장측정기를 구현할 수 있다.

즉, 특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 위상지연기를 통과하면 파장에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행방향에 수직인 두 축 성분으로 각각 분리하여 그 세기를 측정, 로그비율 증폭기를 이용하여 파장의 함수로 비교함으로써 파장을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 모든 광학계를 광섬유 부품만으로 구성하여 파장 측정기를 구현하였다.

### II. 파장측정이론 및 해석

파장측정원리는 위상지연기에서 발생된 위상차가 파장의 함수인 것을 이용해 이 위상차에 의한 서로 다른 편광성분의 출력 차이를 측정함으로써 파장을 결정하는 것이다.

그림 1은 파장측정기의 전체 개략도를 보여준다. 측정하고자 하는 광은 먼저 편광기(Polarizer)에 입사된다. 편광기는 임의의 입사광에 대해 x축으로 선형 편광된 성분만을 45°로 기울어진 위상지연기의 fast축과, 이에 수직인 slow축으로 동일 위상 및 동일진폭의 입력광을 입사시킨다. 일정한 길이와 복굴절률(Birefringence)을 갖는 위상지연기를 통과한 입력광의 위상지연은 다음 식으로 표현된다.

$$\Gamma = 2\pi \frac{\Delta n L}{\lambda} \quad (1)$$

여기서,  $L$ 은 위상지연기의 길이,  $\lambda$ 는 입사광의 파장,  $\Delta n$ 은  $n_s - n_f$ 로 slow축과 fast축으로 편광된 입사광에 대한 굴절률차, 즉 복굴절률이다.

위상지연기를 통과한 광은 입력 파장에 따라 fast축과 slow축에 각각 특정한 형태의 편광을 갖고 편광분할기(Polarizing Beam Splitter)를 통과한다. 이때 편광분할기는 위상지연기에 의한 위상차로 인해 변화된 편광을 x축 편광성분과 y축 편광성분 각각의 세기로 나누어주며, 각각의 광검출기(Photodiode)에 수광된 광 세기의 차이를 로그비율증폭기(log-ratio amplifier)

<sup>†</sup>E-mail: ypkim@khu.ac.kr

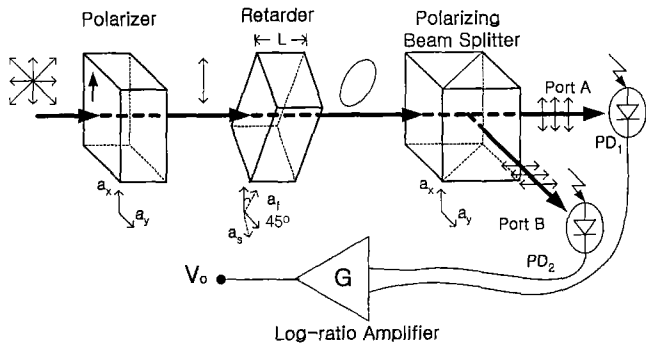


그림 1. 파장 측정기의 개념도. PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub>: 광검출기.

로 증폭한 전압값을 측정함으로써 이에 대응하는 파장값을 얻는다.

그림 1에서 광검출기 PD<sub>1</sub> 및 PD<sub>2</sub>에서 얻어지는 각각의 광출력을 P<sub>A</sub> 및 P<sub>B</sub>라 하고, 로그비율 증폭기에 입력하면 그 출력값을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_o = G \log_{10} \left( \frac{R_1 P_A}{R_2 P_B} \right) \quad (2)$$

여기서, R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>는 광검출기 각각의 응답도(Responsivity)이며, G는 로그비율 증폭기의 이득이다. 입력광은 각각 x 및 y 전계성분의 복소진폭을 가지므로, 편광기, 45° 회전한 위상지연기, 편광분할기를 통과한 광파의 복소진폭은 Jones 행렬<sup>[6]</sup>에 의해서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{ox} \\ A_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-j\Gamma) + 1/2 & \exp(-j\Gamma) - 1/2 \\ \exp(-j\Gamma) - 1/2 & \exp(-j\Gamma) + 1/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서, 편광 광분할기를 통과한 광출력은 복소진폭의 제곱에 비례하는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_A \propto A_{ox} A_{ox}^* \quad (4)$$

$$P_B \propto A_{oy} A_{oy}^* \quad (5)$$

식 (3), (4) (5)를 식 (2)에 대입하면, 위상차의 함수로 표현되는 출력전압을 구할 수 있다.

$$V_o = G \log_{10} \left[ \frac{R_1 (1 + \cos \Gamma)}{R_2 (1 - \cos \Gamma)} \right] \quad (6)$$

그림 2는 입력 파장에 따른 로그비율 증폭기의 출력전압 특성곡선, 즉 식 (6)의 계산값을 보여준다. 여기서  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ , L = 100 mm, G = 1, R<sub>1</sub> = R<sub>2</sub> = 0.95로 하였는데, 이들은 본 연구에서 실제로 실험에 사용한 광섬유, 광검출기, 로그비율 증폭기의 특성 값들이다. 그림에서 화살표영역으로 표시한  $\Delta\lambda_m$ 는 측정 대역폭을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 식 (6)은 다음 파장에서 불연속점을 갖는다.

$$\lambda_m = 2 \Delta n L / m \quad (7)$$

여기서, m은 정수이다. 따라서 그림에서 화살표영역으로 표시

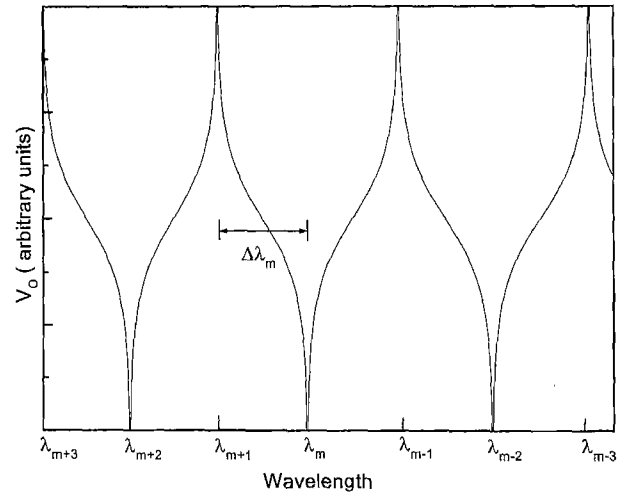


그림 2. 파장에 따른 로그비율증폭기의 이론적 특성곡선.  $\Delta\lambda_m$ : 측정 대역폭.

한 측정대역폭  $\Delta\lambda_m$ 는 인접한 불연속점과 불연속점 사이의 파장영역으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{2\Delta n L}{m(m+1)} \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 대역폭은 불연속점 내에서 위상지연기의 길이와 복굴절률의 곱에 의해서 결정된다.  $\Delta\lambda_m$ 가 파장  $\lambda$ 보다 아주 작다면 식 (7)과 (8)을 조합하여 정수 m을 소거해 다음과 같이 간소화할 수 있다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L\Delta n} \quad (9)$$

파장측정기의 분해능은 출력전압 곡선의 기울기에 의해 결정된다. 최소 기울기, 즉 분해능은 측정 대역폭의 중심  $\Gamma = (m + 1/2)\pi$ 에서 나타나며 식 (6)을 파장에 대해 미분하여 얻을 수 있다.

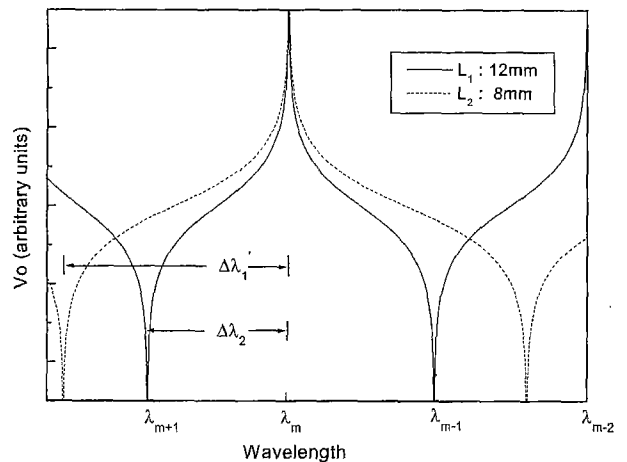


그림 3. 위상지연기의 길이에 따른 대역폭과 분해능과의 관계. L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>: 위상지연기의 길이,  $\Delta\lambda_1$ : L<sub>1</sub>에 의한 측정대역폭,  $\Delta\lambda_2$ : L<sub>2</sub>에 의한 측정대역폭.

$$\left| \frac{dV_o}{d\lambda} \right|_{min} = G \frac{4\pi \log_{10}(e) \Delta n L}{\lambda^2} \quad (10)$$

여기서  $e$ 는 지수값이다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 위상지연기의 길이가 길면 길수록, 측정파장이 짧으면 짧을수록 분해능은 높아진다.

그림 3은 측정대역폭과 위상지연기 길이와의 상관관계를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 파장측정기의 분해능은 위상지연기의 복굴절률과 길이의 곱인  $\Delta nL$ 의 값을 크게 하여 출력특성곡선의 기울기를 크게 함으로써 높일 수 있다. 그러나 식 (9)에서 알 수 있듯이  $\Delta nL$ 의 증가는 측정 대역폭  $\Delta\lambda$ 의 감소를 초래한다.

### III. 장치의 구성

입력광원은 FUJITSU사의 모델 FLD5F6CX-E26인 반도체 레이저를 사용하였으며 그 스펙트럼은 그림 4와 같다. 그림에서와 같이 스펙트럼 선폭(FWHM)은 0.05 nm 이하이며 온도를 1°C 가변함에 따라 출력파장은 0.1 nm씩 가변되는 특성을 갖고 있다.

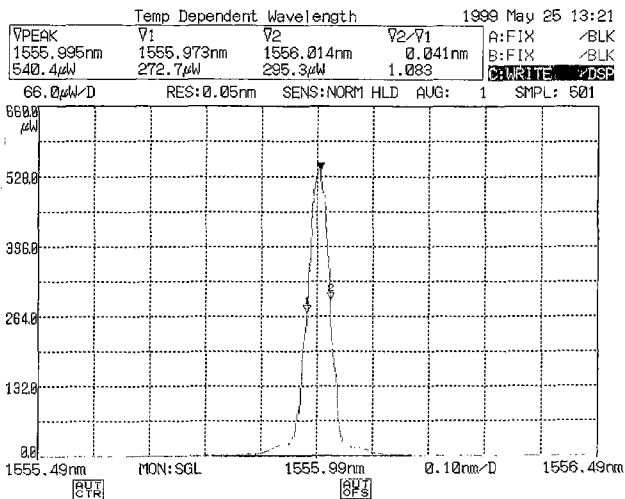


그림 4. 입력광으로 사용한 레이저 다이오드의 스펙트럼.

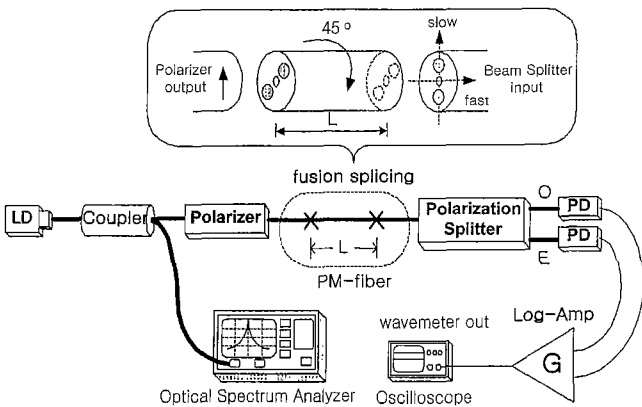


그림 5. 파장측정기의 실험장치도.

실험장치의 전체적인 구성은 그림 5와 같다. 광학계 부분을 구성하는 편광기와 편광 광분할기는 JDS Fitel사의 모델 PL100-2U-15-NC와 PB100-2U-Z37로 모두 광섬유소자로 구성하였다. 편광기의 입력단과 편광 광분할기의 출력단은 단일 모드광섬유로 구성하였고, 각각의 출력단과 입력단은 편광유지 광섬유로 구성하였다. 위상지연기는 편광유지 광섬유를 일정한 길이로 절단해 사용하였다. 실험에 사용된 모든 편광유지 광섬유는 광섬유내의 굴절률의 형태가 PANDA형이고  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ 의 복굴절률을 갖는 Corning사 제품을 사용하였다.

편광기의 출력단과 편광 광분할기의 입력단 사이의 편광유지 광섬유 용착접속 방법은 다음과 같다. 먼저 용착 접속기의 고정단(chuck)양쪽에 각각 편광기의 출력단과 편광 광분할기의 입력단을 정밀히 절단한 후 고정하여 정렬한다. 여기에 입력파장으로 중심파장이 1555 nm인 광원을 인가하고 편광 광분할기의 두 출력이 같은 값을 나타낼 때까지(로그비율증폭기의 출력이 0이 되는 값이다) 편광 광분할기의 입력단을 회전시킨다. 로그비율증폭기의 출력이 0이 되는 지점에서 용착접속을 하고, 접속 지점으로부터 편광 광분할기의 입력단 방향으로 일정 길이로 절단을 한 후, 새로운 두 종단을 용착 접속기의 양쪽 고정단에 정렬한다. 두 광섬유 종단의 굴절률 단면을 확인하면서 서로 45° 차이가 나도록 회전하여 다시 용착 접속한다. 결국 편광기와 편광 광분할기의 한 축을 기준으로 편광유지광섬유를 45° 회전시킨 형태가 된다. 용착접속기는 Vytran사의 편광유지 광섬유 전용 용착접속기인 FFS1000을 사용하였으며, 회전각도 오차는  $10^{-2}$  이하이다.

그림 4에서 위상지연기로 사용한 편광유지광섬유의 길이(L)는 측정 가능한 파장 대역폭과 분해능을 결정하는 중요한 요소이다. 여기서는 식 (11)에  $\lambda = 1555 \text{ nm}$ ,  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$  값을 대입하여 계산한 결과에 의해 길이를 100 mm로 고정해 용착 접속함으로써 측정 가능한 파장 대역폭을 50 nm로 정하였다.

$$L = \frac{\lambda^2}{2\Delta n \Delta\lambda} \quad (11)$$

광검출기는 Fermionics사의 모델 FD100을 사용하였으며, 응답도는 1550 nm영역에서 0.95이다. 로그비율증폭기는 Burr-Brown사의 모델 LOG100을 사용하였으며 출력 이득(G)은 1로 하였다.

### IV. 실험 및 결과

입력광의 파장은 9:1의 광섬유결합기로 분기해 광스펙트럼 분석기를 사용하여 측정값과 동시에 관찰하였으며, 로그비율증폭기의 출력전압은 오실로스코프를 사용하여 측정하였다. 입력으로 사용한 광의 파장범위는 1554.38 nm~1557.19 nm이며, 반도체 레이저 드라이버의 온도를 가변하여 입력파장을 0.05 nm씩 가변 하면서 측정하였다.

그림 6은 온도변화에 따른 출력특성의 측정값을 나타낸 것이다. 온도측정은 Yokogawa사의 디지털 열전대 온도계(Model 2455)를 사용하였으며 측정오차는  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 이다. 그림에서 점선은 측정값과 비교하기 위해  $\Delta nL$  값을 변화시켜 대응시킨

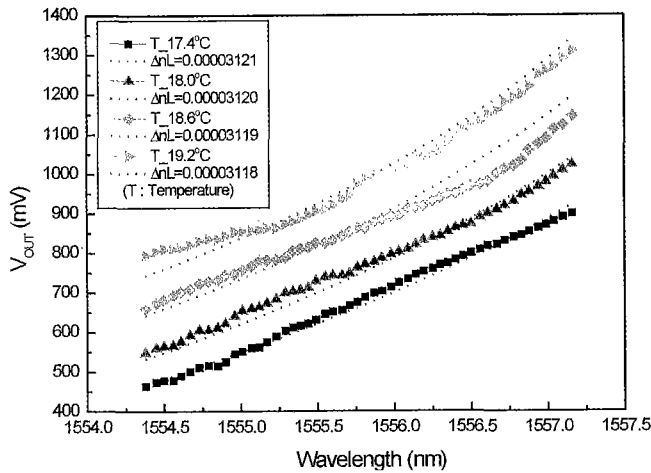


그림 6. 온도변화에 따른 출력특성.

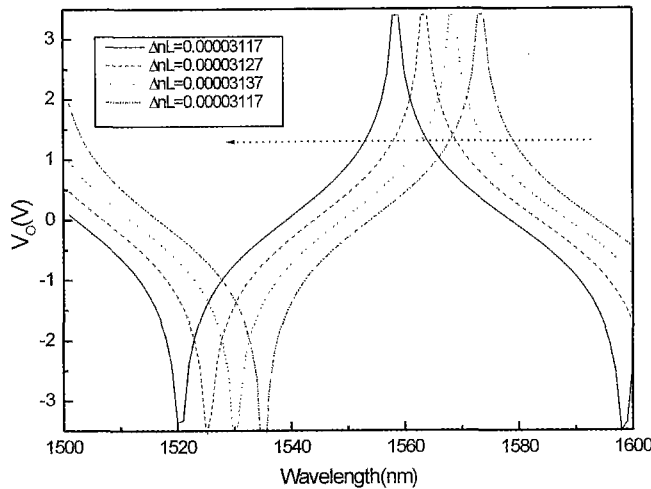


그림 7. ΔnL에 따른 출력특성.

계산값이다. 그래프에서 나타나듯이 온도변화에 따라 전체 출력특성이 계산값의 ΔnL 값이 변화할 때의 그래프 형태와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. ΔnL과 온도와의 관계를 좀 더 검토하기 위해 그림 7에 ΔnL 값의 변화에 따른 특성곡선의 변화를 보인다. 그림 7은 ΔnL 값을 0.1×10<sup>-6</sup>씩 변화시키며 계산한 출력특성으로, 그림에 나타낸 바와 같이 ΔnL이 감소함에 따라 곡선이 화살표방향으로 이동함을 볼 수 있다. 따라서, 그림 6과 그림 7에서 온도에 따른 출력특성의 변화는 편광유지 광섬유의 ΔnL 값이 온도에 따라 변화하기 때문이라 여겨진다. 그림 6에서 온도가 0.6°C 증가함에 따라 나타나는 전체 출력특성은 ΔnL 값이 0.1×10<sup>-7</sup>씩 감소하는 계산값의 그래프와 거의 일치함을 볼 수 있는데, 온도 1°C 증가함에 따라 ΔnL이 1.6×10<sup>-6</sup>씩 감소함을 알 수 있다.

ΔnL의 온도에 따른 변화에 있어서 주된 요인은 복굴절을 Δn이다. 이는 다음과 같은 간단한 계산으로 추정할 수 있다. ΔnL을 온도 T에 대해 미분하면,

$$\frac{d\Delta nL}{dT} = L \left( \frac{d\Delta n}{dT} + \alpha \Delta n \right) \quad (12)$$

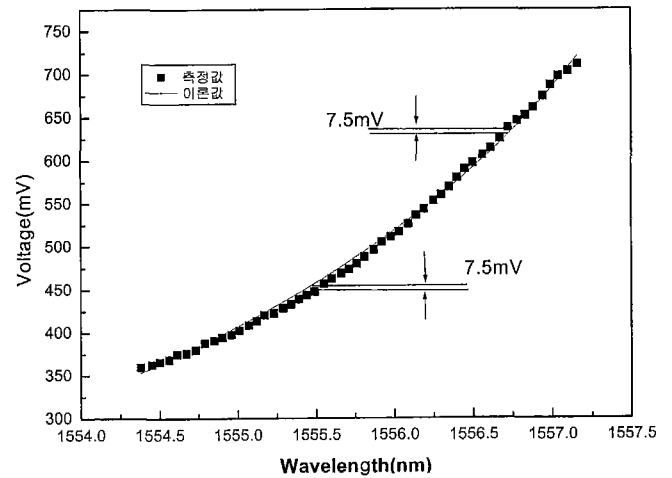


그림 8. 항온(16.7±0.05°C)에서의 출력특성.

와 같이 주어진다. 여기서 α는 열팽창계수로  $\alpha = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dT} \right)$ 이다. 본 연구에서 위상지연기로 사용한 편광유지광섬유는 실리카(Silica) 재질로서 길이 100 mm, 복굴절을  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ , 열팽창계수  $5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 이다. 이를 실험에서 얻어진 ΔnL의 온도에 따른 변화량  $1.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 과 함께 식 (12)에 대입하여 계산해 보면 위상지연기의 온도에 따른 복굴절을 변화량  $\frac{d\Delta n}{dT}$ 은 대략  $1.6 \times 10^{-9} / ^\circ\text{C}$ 이고, 길이의 변화에 따른 변화량 αΔn는  $1.65 \times 10^{-9} / ^\circ\text{C}$ 으로 10<sup>-4</sup> 정도의 차이가 있다. 즉 αΔn 값의 변화는 상대적으로  $\frac{d\Delta n}{dT}$  값의 변화에 비해 볼 때 무시할 수 있다. 따라서 ΔnL 값이 온도에 따라 변화하는데 있어서 편광유지 광섬유의 온도에 따른 복굴절을 변화량이 가장 큰 영향을 줄 수 있다.

실험에서 밝혀진 바와 같이 위상지연기로 편광유지광섬유를 사용한 광과장 측정장치는 기존의 광과장 측정장치보다 비교적 간단한 소자로 구현은 가능하나 온도변화에 크게 민감하다. 따라서 실제 현장에서 계측기로 사용하기 위해서는 광섬유의 온도 의존성, 특히 편광유지 광섬유를 융착접속하는 부분의 항온조건이 필요하다.

그림 8은 단열재로 항온조건을 만들어 광학계 주위환경을 일정한 온도로 유지하여 실험한 결과이다. 실험시 온도는 16.7 ± 0.05°C를 유지하였으며 그림 6과 비교하여 볼 때 안정된 출력이 얻어짐을 알 수 있다. 측정 분해능은 그림에서 알 수 있는 것처럼 로그비율 증폭기의 출력전압이 계산값에 비해 ± 7.5 mV 벗어나 있으므로 이를 파장으로 환산하면 0.08 nm가 된다. 이러한 분해능은 광섬유 융착시의 불완전성과 광검출기 및 로그비율 증폭기회로의 잡음을 개선하면 보다 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

## V. 결 론

위상지연기에서 편광 사이의 위상차가 파장의 함수임을 이용하여 파장측정기를 구현하였다. 특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 위상지연기를 통과하면 파장에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행방향에 수직인 두 축

성분으로 각각 분리하여 그 세기를 측정, 로그비율 증폭기를 이용하여 파장의 함수로 비교함으로써 파장을 결정 할 수 있다. 본 연구에서는 위상지연기로 복굴절률이  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ 인 길이  $L = 100$  mm의 편광유지 광섬유로 대역폭 50 nm의 파장 측정기를 제작하여 실험한 결과, 1554.38 nm~1557.19 nm 파장영역에서의 계산값과 비교적 잘 일치하는 측정결과를 얻을 수 있었다. 이때 분해능은 0.08 nm이었다. 측정이 비록 레이저 다이오드의 파장가변 영역의 제한에 따라 약 3 nm의 파장범위에서 이루어졌으나 측정된 값과 계산된 값이 잘 일치하는 사실에 비추어 볼 때 본 연구에서 제작한 파장 측정기는 설계된 측정 대역폭 C 밴드(1530 nm~1570 nm) 전체의 파장영역에서 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 한편, 온도가 증가함에 따라 위상지연기로 사용한 편광유지 광섬유의 복굴절률과 길이의 곱이 변화하여 출력에 영향을 줄을 확인할 수 있었으며, 그 변화량은  $1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 씩 감소함을 알 수 있었다. 따라서 실제 현장에서 사용하기 위해서는 항온조건이 유지되어야 한다.

본 연구에서 시도한 측정방법은 기존의 광파장 측정방법과는 달리 광학소자의 기계적인 구동이 전혀 필요 없다. 더욱이 광섬유의 용착접속 만으로 광학계가 구성되기 때문에 광학적 정렬이 필요하지 않아 매우 안정적인 시스템을 구성할 수 있어 휴대용 파장측정기로 적합하다. 따라서 본 연구에서 개발된 측정기술은 향후 일반화 될 것으로 예상되는 파장분할다중화 광전송 시스템의 유지 및 보수에 필수 불가결한 광파장

측정에 있어서 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 시행 산업기반기술개발 사업의 일환으로 수행되었음.

### 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] T. Wosehnik and W. Behmenburg, "A wavemeter for controlled tuning of near i.r. diode lasers," *Spectrochim. Acta*, vol. B44, no. 9, pp. 949-955, 1989.
- [5] 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.
- [6] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1991), Chapter 6.
- [7] *The Practical Application of Light* (Melles Griot, Irvine, USA, 1995), Chapter 4.

## Measurements of optical wavelength using an optical fiber retarder

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 September 1, 2000 ; Revised manuscript received December 12, 2000)

A wavemeter was realized using the phenomena that the phase lag between principal polarization states in an optical retarder is a function of wavelength. The change in the polarization state of the optical beam as it passes through the optical retarder is dependent on wavelength. The wavelength of the optical beam is determined by comparing the power difference between principal polarization states. A prototype wavemeter was successfully implemented using a polarization maintaining fiber with birefringence  $3 \times 10^{-4}$  and length 100 mm as the optical retarder. The measurement resolution was 0.08 nm over a wavelength region of 1554.38 nm~1557.19 nm, which agreed well with theoretically calculated results. In addition, the dependence of operating characteristics on temperature was analyzed theoretically and experimentally.

Keywords : SM.030, SM.020.