

## 광 위상지연기를 이용한 온도측정

전상민 · 김용평<sup>†</sup>

경희대학교 전자 정보학부/레이저공학연구소

Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

(2002년 1월 30일 받음, 2002년 5월 8일 수정본 받음)

광 위상지연기에서 두 편광축 사이의 위상차가 온도의 함수라는 현상을 이용하여 새로운 온도측정기를 제안하였다. 특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 광 위상지연기를 통과하면 온도에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행 방향에 수직한 두 축 성분으로 분리하여 그 출력을 비교하면 광 위상지연기의 온도를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 광 위상지연기로 길이 100 mm의 편광유지 광섬유를 이용하여 온도측정기를 구현하였다. 온도에 대한 위상차 변화율은  $0.236^{\circ}\text{C}^{-1}$  이었고,  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ 에서  $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$ 의 측정오차를 보였다.

주제어 : temperature sensor, polarization interferometry, optical retarder, polarization maintaining optical fiber.

### I. 머리말

광섬유 온도센서는 주변 환경의 극심한 변화에도 출력의 떨림이 적으며 전자기적인 간섭에 영향을 받지 않는다. 또한 높은 감도와 광섬유의 구성에 따라 측정의 다중화가 가능하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 결과 희토류 산화물이 첨가된 물질의 온도의존 형광특성을 이용하는 형광측정법<sup>[1]</sup>과 광의 세기를 측정하는 광강도 측정법<sup>[2,3]</sup>의 온도측정 방법이 제시되었으며, 간섭계<sup>[4,5]</sup>나 광섬유 Bragg 회절격자<sup>[6]</sup>를 이용한 광섬유 온도측정 방법 또한 활발히 연구되어 왔다. 그러나 이러한 방법을 이용한 광섬유 온도센서는 광원의 진폭 및 위상 잡음, 전송 및 접속 손실에 의해 감도에 제한을 가져오게 되며 이로 인한 측정오차가 발생하게 된다.<sup>[7]</sup> 또는 광원을 변조하거나 광원의 온도에 대한 특성변화를 측정하기 위해 복잡한 회로구성을 필요로 한다.

따라서 본 연구에서는 광 위상지연기에서의 편광간섭현상을 이용하여 장치가 간단하고 복잡한 회로구성을 필요로 하지 않는 온도측정기를 제안하였다. 특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 위상지연기를 통과하면 온도에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행방향에 수직한 두 축 성분으로 분리하고 그 세기를 측정하여 온도의 함수로 비교함으로써 온도를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 위상지연기로 길이 100 mm의 편광유지 광섬유를 이용하여 온도측정기를 구현하였다. 온도에 대한 위상차 변화율은  $0.236^{\circ}\text{C}^{-1}$ 이었고,  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ 에서  $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$ 의 측정오차를 보였다.

### II. 광 위상지연기를 이용한 온도측정 원리

광 위상지연기에서 편광간섭 현상을 이용한 온도측정기의 기본적인 구성은 그림 1과 같이 편광기, 편광 광분할기, 위상지

연기, 광검출기, 로그비를 증폭기로 이루어진다. 복굴절률을 가지는 위상지연기는 편광기의 편광방향 x축에 대해 두 개의 굴절률축 s축과 f축이  $45^{\circ}$  기울어지도록 하며 편광 광분할기는 편광기와 동일한 축으로 정렬한다.

그림 1에서 광원은 편광기에 의해 x축 방향으로 선형편광되어 위상지연기로 입사된다. 이 때 위상지연기가  $45^{\circ}$  기울어 있으므로 입사되는 광의 s축과 f축 방향에 대한 편광성분은 동일한 진폭과 동일한 위상을 갖는다. 위상지연기를 통과할 때 두 굴절률 축 방향에 대한 편광성분은 서로 다른 굴절률로 인하여 서로 다른 속도로 진행하게 된다. 따라서 위상지연기를 통과한 후에는 두 굴절률 축 방향에 대한 편광성분간에 위상차가 발생하여 편광상태가 바뀌게 된다. 이 위상차는 광원의 파장이 일정할 경우 위상지연기의 굴절률차와 길이에 의해 결정되며 위상지연기의 굴절률차와 길이는 온도에 따라 달라진다. 위상지연기를 통과한 광을 편광 광분할기를 이용하여 x축 및 y축 방향 편광성분으로 분리하고 그 세기를 비교함으로써 위상지연기에 의해 달라진 편광상태를 알 수 있다. 이 편광상태로부터 위상지연기에 의한 두 굴절률 축 방향에 대한 편

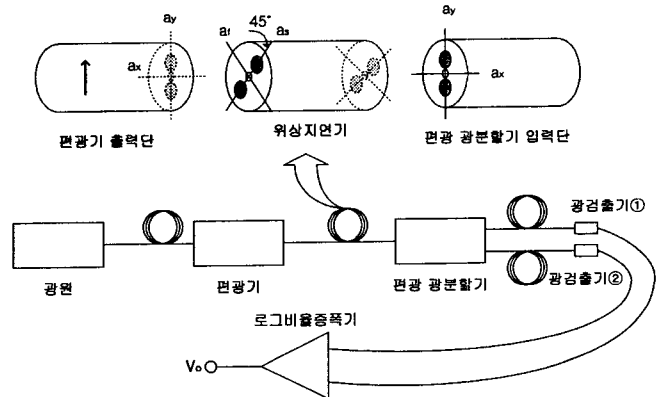


그림 1. 광 위상지연기를 이용한 온도측정 개념도.

<sup>†</sup>E-mail: ypkim@khu.ac.kr

광성분 간의 위상차를 구할 수 있으며 측정된 위상차를 이용하여 온도를 측정할 수 있다. 즉, 위상지연기를 온도센서로 하여 편광 광분할기에 의해 분할된 광간의 세기를 비교함으로써 온도를 측정할 수 있다.

위상지연기에 의한 편광상태 변화량은 두 굴절률 축 방향에 대한 편광성분간의 위상차  $\Gamma$ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

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

여기서  $\lambda$ 는 광원의 파장이며  $\Delta n$ 은 복굴절 매질인 위상지연기가 가지는 두 굴절률 축 방향에 대한 굴절률 차이이다. 즉,  $\Delta n = n_s - n_f$ 이다.  $n_s$ 는 s축 방향에 대한 굴절률이며  $n_f$ 는 f축 방향에 대한 굴절률이다.  $L$ 은 위상지연기의 길이를 나타낸다. 광원의 파장 가 일정할 경우 이 위상차는 온도에 따라 다음과 같은 변화율을 갖는다.

$$\frac{d\Gamma}{dT} = \frac{2\pi d(\Delta n L)}{\lambda dT} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \left[ \frac{d(\Delta n)}{\Delta n dT} + \alpha \right] \quad (2)$$

여기서  $\alpha = \frac{dL}{LdT}$ 이며 매질의 열팽창계수를 나타낸다. 그림 1에서 입사광이 편광기를 지나고 위상지연기를 통과한 후의 x축 및 y축 편광성분을 Jones 벡터로 표시하면 다음과 같다.

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

$A_{ox}$ 와  $A_{oy}$  성분은 편광 광분할기에 의해 분할되며, 그 각각의 세기  $P$ 는  $P = AA^*$ 에 의해 얻을 수 있다. 그림 1에서 편광 광분할기에 의해 분할된 광의 세기를 광 검출기로 검출하고 로그비율증폭기로 두 세기의 로그비율을 측정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = G \left[ \log \left( \frac{1 + \cos \Gamma}{1 - \cos \Gamma} \right) + \log \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \quad (4)$$

여기서  $V_o$ 는 로그비율 증폭기의 출력을 나타낸다.  $G$ 는 로그비율 증폭기의 이득이며,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 광검출기 ①과 ②의 반응도이다.

그림 2는 식 (2)의 위상차 온도 변화율  $d\Gamma/dT$ 가 일정하다는 가정 하에 식 (4)를 이용하여 모의실험한 결과이다. 그림 2와 같이 로그비율증폭기의 출력은 온도에 대해 주기적인 출력특성을 갖는다. 따라서 측정 가능한 온도의 대역폭  $\Delta T$ 는 인접한 두 불연속점 사이의 온도영역으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta T = T_{m+1} - T_m = \frac{\pi}{d\Gamma/dT} \quad (5)$$

이 때 출력곡선의 기울기에 해당하는 측정분해능은 식 (4)를 온도에 대해 미분하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_o}{dT} = \frac{2}{\sqrt{1 - \cos^2 \Gamma}} \frac{d\Gamma}{dT} \log e \quad (6)$$

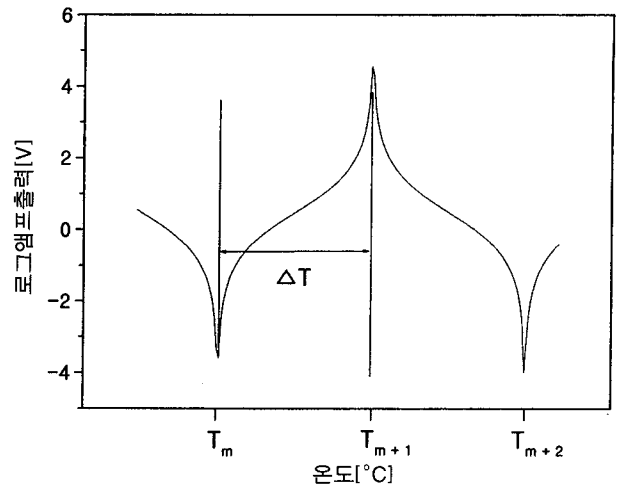


그림 2. 온도변화에 따른 로그비율증폭기의 이론적 특성곡선.

식 (2)와 (5)의 관계를 비교하면 위상지연기의 길이  $L$ 에 의하여 측정 가능한 대역폭이 정해진다. 이때의 분해능은 식 (6)에 의해 결정된다. 즉, 길이  $L$ 을 조절하여 원하는 측정 대역이나 분해능을 얻을 수 있다.

### III. 실험 및 결과

실험을 위한 장치는 그림 3과 같이 광원과 이를 선형편광 시키기 위한 편광기, 편광유지광섬유를 절단하고 45° 틀어지게 용융접착하여 온도센서 역할을 하게 하는 위상지연기, 위상지연기에 의해 변화된 편광상태의 축방향 편광성분을 분할하기 위한 편광 광분할기, 분할된 각각의 편광성분의 세기를 측정하기 위한 광검출기, 측정된 세기를 로그비율로 비교하기 위한 로그비율증폭기로 구성하였다. 온도센서 부분인 위상지연기를 항온장치에 고정하고 장치 내부의 온도는 열전소자를 이용하여 제어하도록 하였다. 항온장치 내부의 온도는 반도체 온도센서를 이용하여 측정하였으며 이 측정값과 로그비율증폭기의 출력을 오실로스코프로 비교할 수 있도록 구성하였다.

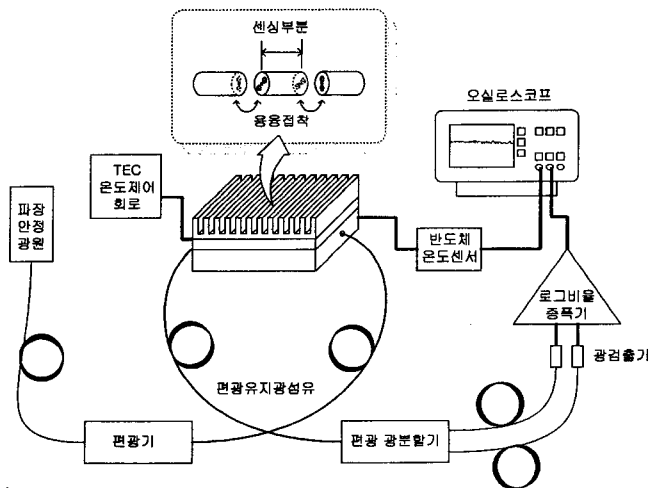


그림 3. 편광유지광섬유를 이용한 실험장치의 구성.

광원으로는 Alcatel사의 모델 1905LMI DFB 레이저 다이오드를 사용하였다. 편광기와 편광 광분할기는 JDS Fitel사의 PL100-2U-15-NC와 PB100-2U-Z37을 사용하였는데 편광기의 입력단과 편광 광분할기의 두 출력단은 편광상태를 고려하지 않아도 되므로 일반 단일모드 광섬유를 부착하였다. 편광기의 출력단과 편광 광분할기의 입력단은 x축과 y축 방향 편광성분의 크기가 유지되어야 하므로 편광유지광섬유를 부착하였다. 편광유지광섬유는 Corning사의 PANDA형을 사용하였으며 복굴절률차  $\Delta n$ 은  $3 \times 10^{-4}$ 이다. 광검출기는 Lightron사의 LP10을 사용하였다. 절단된 편광유지광섬유는 Fujikura사의 편광유지 광섬유 용융접착기 FSM-20PM II를 사용하여 용융접착하였다.

ATC(Automatic Temperature Control) 회로를 이용하여 열전소자를 제어함으로써 센서부인 위상지연기의 온도를 제어하였다. 온도의 제어범위는  $-6.1^{\circ}\text{C} \sim 65.9^{\circ}\text{C}$ 이다. 열전소자를 이용한 온도제어 및 위상지연기의 온도를 측정하기 위한 반도체 온도센서는 National Semiconductor사의 LM35를 사용하였다. 반도체 온도센서의 정확도는  $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ 이며 측정범위는  $-55^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 이다. 위상지연기와 반도체 온도센서는 구리판 위에 밀착하여 위치시킴으로써 위상지연기와 반도체 온도센서의 온도 차이가 최소화되도록 하였다. 반도체 온도센서는 Yokogawa사의 디지털 온도계 2455를 사용하여 보정하였다.

광원의 특성을 측정하기 위해 Ando사의 광스펙트럼분석기 모델 AQ6315B를 이용하여 발진 스펙트럼을 측정하였다. 그림 4는 그 결과를 나타낸다. 측정결과 광원은 0.05 nm 이하의 스펙트럼폭을 갖으며 1537.4 nm의 중심파장에서  $\pm 0.01$  nm 이하의 변동폭을 보였다. 중심파장의 변동폭이 출력에 미치는 영향은 식 (1)을 파장  $\lambda$ 로 미분한 다음의 식 (7)에 의해 얻을 수 있다.

$$\frac{d\Gamma}{d\lambda} = -2\pi \frac{\Delta n L}{\lambda^2} \quad (7)$$

그림 5는 반도체 온도센서의 출력을 디지털 온도계를 이용

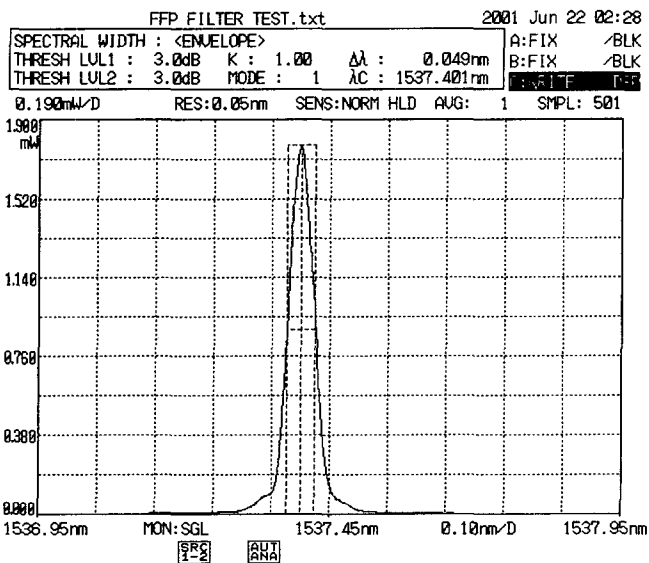


그림 4. 광원으로 사용한 레이저 다이오드의 스펙트럼 특성.

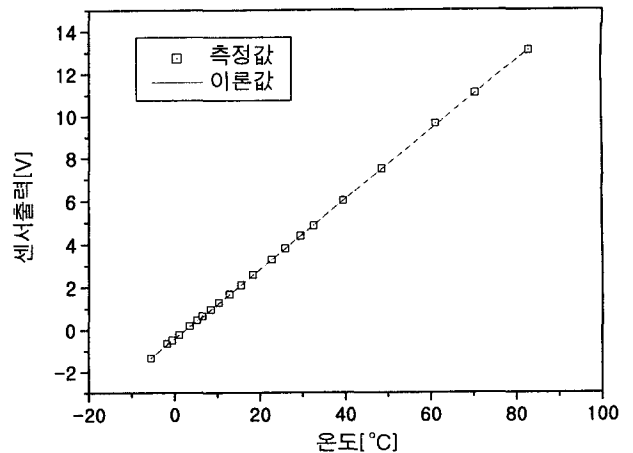


그림 5. 반도체 온도센서의 보정곡선.

하여 실제 온도로 보정하기 위해 측정한 결과이다. 항온장치 내에 반도체 온도센서와 디지털 온도계의 센서부분을 근접 및 고정시킨 후 온도를 가변하면서 두 출력을 측정하였다. 항온장치의 내부온도가 설정된 온도에 도달하는 시간은 가변폭과 주위온도와의 차이에 따라 달라진다. 항온장치의 온도는 반도체 온도센서를 이용하여 제어하였으므로 반도체 온도센서의 출력이 안정되는 시간을 측정하였다. 상온부근에서  $10^{\circ}\text{C}$  가변하였을 때 항온장치의 온도가 안정되는 시간은 2분이었으며,  $60^{\circ}\text{C}$  부근에서  $10^{\circ}\text{C}$  가변하였을 때 안정되는 시간은 20분이었다. 반도체 온도센서와 디지털 온도계의 반응시간은 수초 이내였다. 따라서, 온도 가변후 반도체 온도센서가 일정한 값을 30초 이상 유지하여 측정값을 얻었다. 반도체 온도센서의 출력은 회로의 구성방법에 따라 다르지만 실험에서 구성한 회로는 측정결과  $0.16 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ 이며 선형적인 출력특성을 나타내었다. 이 결과를 이용함으로써 반도체 온도센서의 출력을 실제 온도로 환산하여 위상지연기의 온도에 대한 로그비율증폭기의 출력특성을 측정하였다.

위상지연기는 실험장치 및 계산의 편의성을 고려해 100 mm

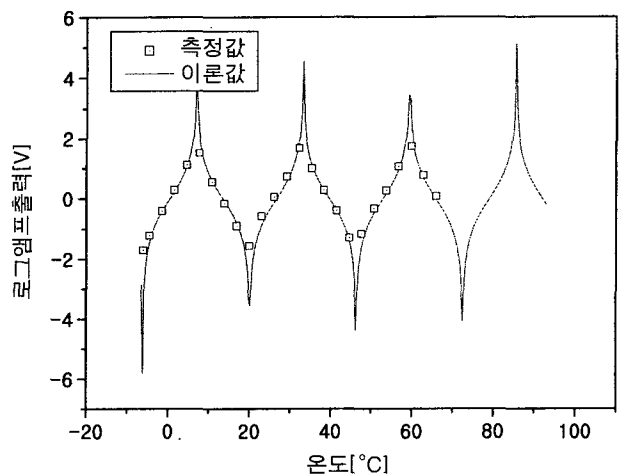


그림 6.  $-6^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 에서 온도변화에 따른 로그비율증폭기의 출력 특성.

로 하였다. 그림 6은 항온장치의 온도가변이 가능한 전체범위에서 로그비율 증폭기의 출력특성을 측정된 결과이다.

그림 6에서 이론값은 식 (4)를 이용하여 식 (2)가 일정한 값을 가지는 것으로 가정하고 실험에 사용된 조건을 사용한 모의실험 결과이다. 가로축의 온도는 온도센서부분인 위상지연기의 온도를 나타낸다. 온도 가변범위는  $-6.1^{\circ}\text{C}\sim 65.9^{\circ}\text{C}$ 이며, 가변폭은  $3^{\circ}\text{C}$ 씩 가변되도록 하였다. 항온장치의 온도가 안정되는 시간은  $60^{\circ}\text{C}$  부근에서 10분이었으며, 이 때 로그비율 증폭기의 출력 역시 안정되었다. 따라서, 위상지연기의 온도에 대한 반응시간은 항온장치의 안정되는 시간보다 짧은 것으로 간주하고 항온장치의 온도가 충분히 안정되었다고 생각되는 15분 후에 측정을 시작하였다. 그림 3에서 예상했던 것과 같이 주기적인 출력특성을 나타내고 있다. 측정결과 길이가 100 mm인 편광유지광섬유의 온도에 대한 위상차 변화율  $d\Gamma/dT$ 는 식 (6)에 의해 얻을 수 있으며  $0.236^{\circ}\text{C}^{-1}$ 이다. 한편  $\Delta T$ 는 식 (5)에 의해 계산하면  $13.3^{\circ}\text{C}$ 이다. 광원의 중심파장이 변동할 때 일어나는 영향, 즉 파장에 대한 위상차 변화율  $d\Gamma/d\lambda$ 은 식 (7)에서  $\Delta n=0.0003$ ,  $L=100$  mm,  $\lambda=1537.4$  nm인 경우  $0.0008$   $\text{nm}^{-1}$ 이다. 이는 온도에 대한 위상차 변화율  $d\Gamma/dT(0.236^{\circ}\text{C}^{-1})$ 에 비하여 매우 작은 값이므로 무시할 수 있다.

보다 자세한 출력특성을 파악하기 위하여 측정대역 중에서  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$  사이를  $0.05^{\circ}\text{C}$ 씩 가변하면서 측정하였다. 측정 시 반도체 온도센서 및 위상지연기는 단열체를 이용하여 단열하였으나 주위 온도와 센서부분의 온도 차이가 많이 날수록 반도체 온도센서보다 위상지연기가 주위의 온도에 보다 민감하게 반응하기 때문에 측정시간동안 주위온도를 디지털온도계로 측정하여  $24.8^{\circ}\text{C}\sim 24.9^{\circ}\text{C}$ 가 유지되도록 하였다. 온도를 가변하고 항온장치 즉 반도체 온도센서의 출력이 안정되는 시간은 가변폭이 작으므로 30초였다. 이 때 로그비율증폭기의 출력 또한 안정된 출력을 나타내었다. 열전소자의 가열과 냉각의 반복으로 인한 약간의 떨림은 있었으나 10분 후에도 일정한 값을 나타내었으므로 안정된 것으로 간주하였다. 따라서, 온도 가변후 30초 뒤에 측정을 시작하였다. 그림 7은 측정결과를 나타낸 것이다.

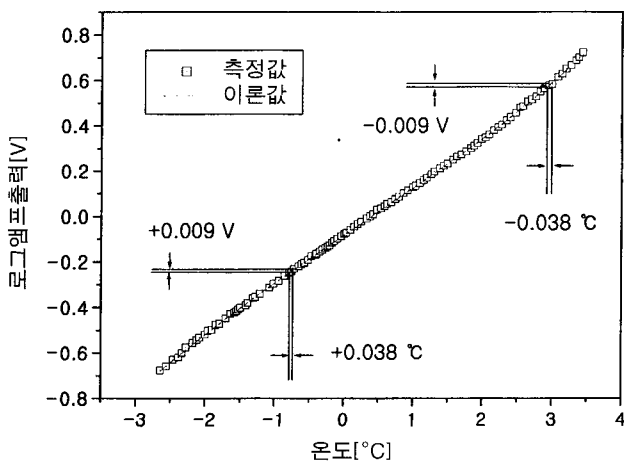


그림 7.  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ 에서 온도변화에 따른 로그비율증폭기의 출력특성.

여기서 이론값은 앞에서와 같이 식 (2)가 일정한 값을 가지는 것을 가정하여 모의실험한 결과이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 측정값은 약간의 떨림이 있으나 이론값과 유사한 특성을 나타내고 있다. 이론값과 측정값의 차이는  $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$ 이었다. 이와 같은 오차에는 여러 원인이 있을 수 있다. 먼저 ATC회로를 이용하여 열전소자를 제어할 때 온도가 진동하는 특성을 들 수 있다. 반도체 온도센서와 위상지연기의 온도에 대한 반응속도는 서로 다르며 진동하는 온도변화에 대하여 서로 다른 온도를 나타낼 수 있다. 다른 원인으로는 열전소자의 가열과 냉각주기가 서로 다른 현상을 들 수 있다. 항온장치 내부의 온도와 주위온도의 차이에 따라 열전소자의 가열과 냉각주기가 다르게 되는데 이는 측정오차의 한 원인이 된다. 또 다른 원인으로는 편광유지광섬유의 물리적인 특성 때문에 온도에 따른 복굴절률의 변화에 열적 이력현상(Thermal Hysteresis)이 발생하는 현상을 들 수 있다.<sup>[1]</sup> 즉, 동일한 온도에서 서로 다른 측정값을 나타낼 수 있다.

#### IV. 결 론

기존의 광섬유 온도센서는 광원의 진폭 및 위상 잡음, 전송 및 접속 손실에 의해 감도에 제한을 가져오게 되며 이로 인한 측정오차가 발생한다. 또한 광원을 변조하거나 광원의 온도에 대한 특성변화를 측정하기 위해 복잡한 회로구성을 필요로 한다. 따라서 광 위상지연기에서의 편광간섭현상을 이용하여 장치가 간단하고 복잡한 회로구성을 필요로 하지 않는 온도측정기를 제안하였다.

특정한 파장의 입력광이 일정한 길이의 위상지연기를 통과하면 온도에 따라 그 편광상태가 바뀌게 된다. 이때의 편광성분을 진행방향에 수직인 두 축 성분으로 분리하고 그 세기를 측정하여 온도의 함수로 비교함으로써 온도를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 위상지연기로 길이 100 mm의 편광유지 광섬유를 이용하여 온도측정기를 구현하였다. 온도에 따른 위상차 변화율은  $0.236^{\circ}\text{C}^{-1}$ 이었고  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서  $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$ 의 측정오차를 보여 정밀 온도측정 방법으로서의 가능성을 제시하였다. 위상지연기의 길이를 보다 짧게 하면 보다 넓은 범위에서 측정이 가능하고, 나아가 길이가 다른 위상지연기를 다수 사용함으로써 측정가능 대역폭 및 분해능이 보다 뛰어난 온도측정기의 구현이 가능할 것으로 예상된다. 그러나 광섬유는 온도에 대한 반응속도가 느리며 복굴절률 변화에 열적 이력현상이 나타나는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 측정방법의 실용화를 위해서는 이에 대한 보상방법에 관한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] K. T. V. Grattan and A. W. Palmer, "Infrared fluorescence "decay-time" temperature sensor," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 56, no. 9, pp. 1784-1787, 1985.
- [2] H. Berthou and C. K. Jorgensen, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited fluorescence," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 19, pp. 1100-1102, 1990.

- [3] G. S. Maciel, L. de S. Menezes, A. S. L. Gomes, C. B. de Araujo, Y. Messaddeq, A. Florez, and M. A. Aegerter, "Temperature sensor based on frequency upconversion in  $Er^{3+}$ -doped fluoroindate glass," *IEEE Pho. Tech. Lett.*, vol. 7, no. 12, pp. 1474-1476, 1995.
- [4] E. De la Rosa, L. A. Zenteno, A. N. Starodumov, and D. Monzon, "All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 481-483, 1997.
- [5] H. Singh and J. S. Sirkis, "Simultaneously measuring temperature and strain using optical fiber microcavities," *J. Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 4, pp. 647-653, 1997.
- [6] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [7] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 4, pp. 626-665, 1982.
- [8] T. Ito, "Thermal hysteresis of phase retardation in polarization maintaining optical fiber," *J. Lightwave Tech.*, vol. 12, no. 8, pp. 1343-1347, 1994.

### Temperature measurements using optical retarder

Sang-Min Jeon 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 January 30, 2002 ; revised manuscript received May 8, 2002)

We proposed a novel temperature sensor based on the phenomena that the phase difference between principal polarization states in an optical retarder is a function of temperature. The polarization state of an optical beam is changed as it passes through the optical retarder, with the change dependent on the temperature. The temperature of the optical retarder is determined by comparison of the power difference between principal polarization states. A temperature sensor was successfully implemented using a polarization maintaining fiber of length 100 mm as the optical retarder. The change rate of phase difference on temperature was  $0.236^{\circ}\text{C}^{-1}$  and the measurement error was  $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$  over the temperature region of  $-2.6^{\circ}\text{C}\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ .

*Classification codes* : DI.020, FO.030, LO.050, SM.020.