

## 간섭형 광섬유센서의 신호처리 기법

에 운 해

경희대학교 전자공학과

(1995년 7월 31일 받음)

위상변조기나 3×3 광결합기와 같은 특수 광부품을 사용하지 않고도 간섭형 센서의 고감도를 유지할 수 있고, 주변환경의 변화에도 영향을 받지 않는 간섭형 광섬유 센서를 위한 신호처리 기술을 소개하였다. 이 기법은 간섭형 센서의 넓은 다이내믹 레인지와 고감도를 유지한 신호처리를 위해 레이저 다이오드의 주파수 처핑을 이용하며, 주변환경의 변화에 의한 측정예러를 보상하기 위해 별도의 간섭계를 기준 간섭계로 사용하였다. 새로운 신호처리 기법을 거울 내장형 Fabry-Perot(FP) 간섭계 온도센서에 적용한 결과 1 cm 광섬유 FP 간섭계 센서소자로부터  $4 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  (광위상 4.5 mrad)의 분해능을 얻었으며, 광위상 변화량의 크기가  $\pi$  이내로 제한되지 않으므로 다이내믹 레인지가 넓은 온도센서의 구현이 가능하였다.

### I. 서 론

광섬유를 이용하여 물리량 또는 화학량을 측정하기 위해 다양한 종류의 광섬유 센서의 구조와 신호처리 기술이 연구되었다.<sup>[1]</sup> 이들은 크게 세기변조형과 간섭형(위상변조형)으로 분류할 수 있다. 세기형의 경우 다중 모드 광섬유와 LED를 기본 구성으로 하여 센서소자로 다중모드 광섬유 자체 또는 거울, 렌즈 등과 같은 광학 소자와의 결합을 센서소자로 사용하며, 센서소자는 피 측정량의 변화에 따라 광신호의 세기를 변화시킨다.

간섭형 센서는 간섭계를 이루는 두 경로중 어느 한 경로(감지 광섬유)에 가해진 피 측정량에 의해 이 경로를 지나는 광신호의 위상이 변하도록 센서소자를 구성하고, 광신호의 위상변화를 간섭계를 이용하여 광의 세기변화로 바꾸어 신호처리를 행하며, 이를 위해 단일모드 광섬유와 레이저 다이오드(LED)와 같은 가간섭성이 높은(coherent) 광원을 사용한다. 간섭형 센서의 경우 일반적으로 감도는 높으나 위상변화량을  $\pi$  radians, 즉 동일 줄무늬(fringe) 이내로 제한할 경우 측정범위가 상당히 제한되며, 감지 광섬유 주위환경의 변화(온도, 압력, 진동 등)에 민감한 단점이 있다. 따라서 위상변화량의 크기에 대한 제한을 없애는 줄무늬세기(fringe counting) 기술의 이용과 정현파(sinusoidal) 형태의 간섭계 응답에 의한 센서의 감도약화, 주변환경변화에 의한 신호약화 및 이들에 의한 측정예러를 피하기 위해 많은 종류의 신호처리 기법이 연구발표되었다.

이들 신호처리방식은 크게 호모다인 방식과 헤테로다

인 방식으로 분류될 수 있다. 헤테로다인 방식은 위상 변조기 또는 주파수 천이기(frequency shifter) 등과 같이 부피 및 전력소모가 크고, 가격 및 복잡성등 많은 문제가 있는 부품의 사용을 필요로 하며, 동시에 간섭계의 구조에 따라 적용이 아예 불가능한 경우도 있다. 호모다인 방식의 경우에도 광섬유 위상변조기(PM), 편광유지 광섬유 부품 또는 3×3 coupler 등과 같은 특수 광부품의 사용을 필요로 한다. 현재까지 발표된 신호처리기법 중 특수 광부품의 사용을 필요로 하지 않는 호모다인 신호처리 기법에 대한 연구는 피 측정량의 변화에 의한 위상편이량을 크게한 후 줄무늬 수를 세거나<sup>[2]</sup> 이와 반대로 위상편이량을  $\pi$  이내로 제한한 상태에서 이를 세 분함으로써 간섭형 센서 자체의 고감도 측정능력을 제대로 활용하지 못하고 있다.

본 논문에서는 레이저 다이오드의 광주파수 처핑(chirping)을 이용하여 피 측정량에 대한 응답특성이 서로 90° 차이가 있는 세 출력을 얻음으로써 피 측정량에 의한 위상변화량의 크기에 대한 제한이 없이 간섭형 센서의 고감도 특성을 이용할 수 있는 신호처리 기법을 수행한 결과를 기술하고자 한다. 주위 환경 변화에 의한 측정예러를 피하기 위해 별도의 기준 간섭계를 두어 광원의 주파수 편이와 주위환경 변화량에 의한 위상변화량의 크기를 피 측정량의 크기로 환산하는데 사용하고 측정량의 크기를 감지간섭계의 측정량으로부터 기준 간섭계의 측정량, 즉 광학시스템 및 주변환경에 의한 예러의 크기와의 차이로 계산함으로써 위상기준설정(phase referencing)이 가능하도록 하였고, 광원의 세기변화 및 주

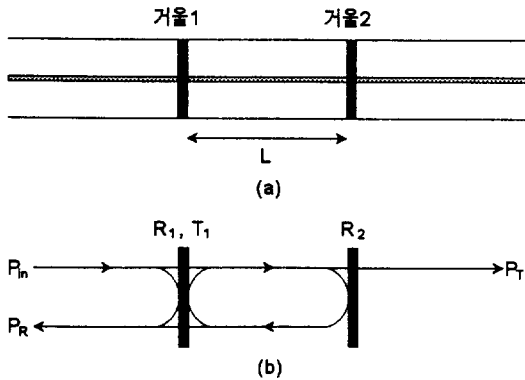


그림 1. (a) 거울내장형 FP간섭계의 구성과 (b) FP간섭계의 동작원리도.

위환경변화 등에 의한 세기변화를 보상하기 위한 광세기 기준설정(intensity referencing) 방법으로 기준거울의 사용과 소프트웨어에 의한 기준설정법을 제시하고 소프트웨어방식에 의한 결과를 기술하였다.

본 논문의 목적을 위해 제시된 신호처리 기법은 광섬유 온도센서에 적용되어 표준온도계에 교정된 후 0~200°C 범위에서 시험되었다. 온도측정시스템의 분해능은 물의 삼중점에서 측정값의 표준편차로 계산되었으며, 이를 이론에 의한 예측치와 비교하였다.

II. 실험구성

본 논문에서 센서소자로 사용된 광섬유 FP간섭계는 Lee 등에 의해 처음으로 발표되었으며,<sup>[3]</sup> 그림 1에서 보는 바와 같이 광섬유 내에 일정한 간격을 두고 거울 2개를 일렬로 배치하여 제작된다. 각 거울은 단일모드 광섬유 단면에 유전체를 코팅한 것과 코팅하지 않은 광섬유를 용융 접합하여 만들어진다.<sup>[4]</sup> 거울의 제작에 사용한 유전체 물질은 TiO<sub>2</sub>로서 거울의 제작에 사용된 코팅막은 반사율이 5~14% 사이의 값을 가지도록 제작되었으며, 간섭계의 제작시 각 거울의 반사율이 2.5%가 되도록 조절하였다.

그림 2는 본 신호처리기법을 시험하기 위해 사용된 광학구성으로 파장 1.3 μm의 광섬유부착형 레이저 다이오드와 광검출기(PINFET receiver), 광섬유 방향성 결합기(DC)를 한개씩 사용하고 있으며, 기준간섭계와 감지간섭계로 표시된 2개의 광섬유 FP간섭계를 사용하였다. 그림 2상의 기준거울은 본 실험에서는 사용되지 않았으나 신호처리상의 대안을 제시하기 위해 삽입되었으며, 광학계의 구성에서 사용된 광섬유는 모두 Corning사의

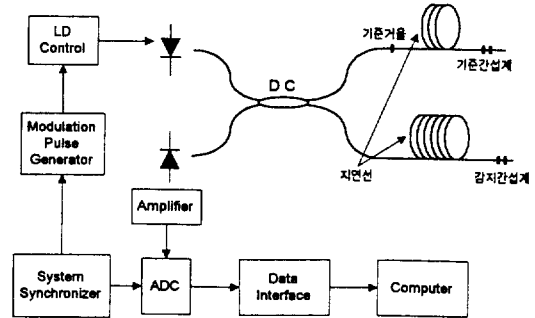


그림 2. 실험에 사용된 센서시스템의 블록 구성도.

단일모드 광섬유로서 두개의 간섭계 전단에 사용된 약 3~5 m 길이의 "payout" 광섬유를 제외하고는 Ge이 도핑된 8 μm의 코어직경을 가진 125 μm 실리카 광섬유를 사용하였다. Corning사의 "payout" 광섬유는 미사일과 같은 군사적응용에 사용될 목적으로 개발된 단일모드 광섬유로서 개구율이 0.21 정도로 일반 단일모드 광섬유 (Corning SMF-28의 경우 개구율은 0.13)에 비해 아주 큰 값을 가지며, 따라서 구부림에 대한 내성이 아주 우수하다. 본 실험에서는 센서시스템과 센서소자의 연결선의 일부로서 실제로 외부에 노출되어 구부림 또는 뒤틀림등 심한 환경의 변화를 겪게될 연결선으로 "payout" 광섬유를 사용함으로써 시스템의 안정된 동작특성을 얻고자 하였다. 그림2에서 사용하고 있지 않은 광섬유 단면은 광섬유를 깨뜨림으로써 단면에서의 반사광을 무시가능한 수준으로 낮추었다. 기준거울과 두 센서소자로부터의 반사신호를 시간적으로 분리하여 다중화하기 위해 감지간섭계쪽의 지연선의 길이가 기준간섭계쪽보다 약 170 m 더 길게 구성되었으며, 기준거울을 사용할 경우 기준거울과 기준 간섭계 또한 동일 길이의 간격을 두고 배치되어야 한다. 레이저 다이오드로부터의 빛은 50:50의 결합비를 갖는 방향성 결합기(DC)에서 나뉘어지고, 나뉜 두 빛은 각각 기준거울, 기준간섭계, 그리고 감지간섭계에서 각소자의 반사율에 비례한 크기로 반사된다. 레이저 다이오드는 주입전류로 직류바이어스 전류와 함께 전류펄스를 동시에 인가함으로써 펄스변조되며, 직류바이어스 전류의 크기를 레이저의 문턱전류보다 조금 작게 유지함으로써 저잡음 동작이 가능케하였다. 또한 변조펄스의 폭을 기준거울과 기준간섭계, 그리고 기준간섭계와 감지간섭계 사이의 구간을 빛이 왕복하는데 소요되는 시간보다 짧게하여 이들 세 소자로부터의 반사광이 서로 간섭하지않고 3개의 독립적인 펄스로 나타나게 구성하며, 이때 이들 반사광펄스는 각 소자의

상태와 입력광의 상태에 의해서 결정된다.

### III. 이 론

#### 1. 광섬유 FP간섭계

광섬유 FP간섭계의 주변환경이 변할 때 광섬유가 가진 다양한 종류의 광학효과는 광섬유의 굴절율과 길이의 변화를 유도하여 FP간섭계의 두 거울에 의한 반사파간의 광로차를 변화시킨다. 광검출기단에서 반사광의 세기는 간섭계에서의 광로차에 따라 변하므로 간섭계를 이루는 두 거울의 반사율이 각각  $R_1, R_2$ 이고, 첫번째 거울의 투과율이  $T_1$ 일 때 입사광에 대한 반사광의 세기의 비, 즉 간섭계의 반사율  $R$ 은 거울사이의 간격, 즉 공극거리 (cavity length)가  $L$ 일 때

$$R = \frac{R_1 + R_2(T_1 - R_1)^2 - 2\sqrt{R_1 R_2}(T_1 - R_1)\cos\phi}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2}\cos\phi} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{4\pi n L \nu}{c} \quad (2)$$

로 주어진다.

식 (2)에 표시된 간섭계의 광위상차  $\phi$ 를 상수항  $\phi_0$ , 측정하고자하는 물리량  $M$ 의 변화에 의한 량  $\Delta\phi_M$ , 원치 않는 그의 모든 물리량  $N$ 의 변화에 의한 위상 잡음  $\Delta\phi_N$ , 그리고 광원의 광주파수  $\nu$ 의 변화에 의한 량  $\Delta\phi_\nu$ 의 합으로 나누어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_M + \Delta\phi_N + \Delta\phi_\nu \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_M &= \frac{4\pi\nu}{c} \left( L \frac{dn}{dM} + n \frac{dL}{dM} \right) \Delta M \\ &\equiv S_{sen} * \Delta M \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\Delta\phi_N = \frac{4\pi\nu}{c} \left( L \frac{dn}{dN} + n \frac{dL}{dN} \right) \Delta N \quad (3c)$$

$$\Delta\phi_\nu = \frac{4\pi L}{c} \Delta\nu \quad (3d)$$

$\phi_0$ 는  $M=M_0$  및  $\nu=\nu_0$ 일 때의 위상차,  $\Delta M=M-M_0$ ,  $\Delta\nu=\nu-\nu_0=\nu_r+\nu_d$ , 그리고  $M_0$ 와  $\nu_0$ 는 측정신호 및 광주파수의 기준값으로  $\nu_0$ 는 전류펄스가 가해진 후 임의의 시간  $t_0$ 만큼 지연된 시점에서 광주파수의 표준량  $\nu_r$ 를 뺀 광주파수,  $\nu_d$ 는  $t_0$ 와 임의시점 구간에서 처핑주파수의 변화량이다.

전류펄스가 가해지는 동안 레이저는 출력광세기의 변

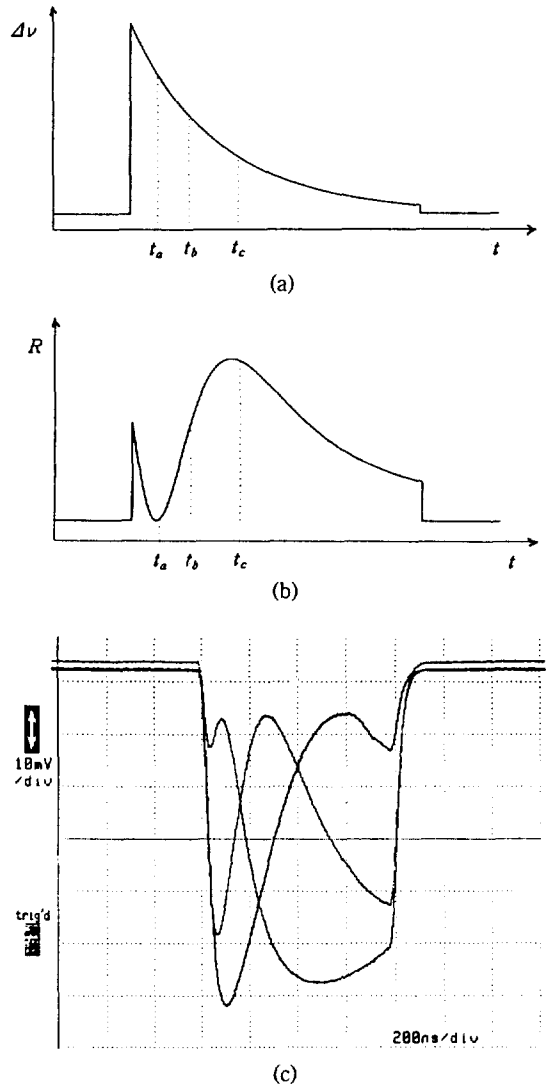


그림 3. 레이저 다이오드의 변조펄스 시작후 시간에 따른 레이저 주파수 변화(a)와 이에 따른 간섭계의 반사율의 변화(b), 그리고 간섭계 출력의 오실로스코프 파형(c).

조와 동시에 처핑에 의해 광주파수 또한 변조되며, 레이저 변조펄스 기간동안 광주파수의 변화는 그림 3(a)와 같이 시간에 대해 지수함수 형태로 주어진다.<sup>[5]</sup> 레이저의 처핑에 의해 FP간섭계의 반사율은 간섭계를 이루는 거울의 반사율이 1에 비해 아주 작을 때 그림 3(b)와 같이 시간의 함수형태로 나타난다. 그림 3(b)는 변조펄스의 폭이 1.5  $\mu$ s, 광주파수의 변화폭 12 GHz, 처핑의 시간상수 470 ns, 그리고 FP 간섭계의 공극거리가 1 cm일 때의

변조펄스 기간동안 간섭계의 반사율의 변화를 계산한 것이며, 그림 3(c)는 측정량  $M$ 이 각기 다른 세가지 경우에 대해 간섭계의 출력파형을 오실로스코프로 측정한 것이다(신호처리회로의 대역폭제한에 의한 효과를 고려할 것).

광원의 발진주파수는 변조펄스에 의한 채핑 뿐만 아니라 광원 주변환경의 변화에 의해서도 변한다. 따라서 간섭계의 반사율은 간섭계에 가해지는 물리량의 변화와 광원 주변환경의 변화 및 광원 구동조건에 따라 표동(drift)하게 된다. 또한 간섭계로부터의 반사광이 광연결선을 통과하여 광검출기에 도착하는 동안 광연결선상의 환경변화에 의해 유도광의 위상, 편광상태, 그리고 손실율등이 변조된다. FP간섭계의 경우 간섭계의 거울을 편광에 대한 의존성이 없도록 제작할 경우 광연결선상의 환경변화에 의한 반사광의 위상과 편광상태의 변화는 두 간섭파에 공통으로 인가되므로 무시할 수 있다.<sup>[6]</sup> 따라서 FP간섭계 센서에서 광시스템 주변환경의 변화는 간섭계로부터 광검출기 사이 구간의 광손실 인자  $\alpha$ , 광주파수의 표동 효과  $\nu_d$  및  $\Delta\phi_M$ 로 요약될 수 있다. 그림 3(b) 형태의 간섭계 광출력을 식 (4)을 만족하는 시점  $t_a, t_b$ , 및  $t_c$ 에서 ( $t_a, t_b, t_c$ 에서의 광주파수는 각각  $\nu_a + \nu_d, \nu_b + (\nu_c)_b + \nu_d, \nu_b + (\nu_c)_c + \nu_d$ 이며,  $(\nu_c)_b$ 와  $(\nu_c)_c$ 는  $t_a \sim t_b, t_a \sim t_c$  구간에서 채핑주파수의 변화량) 샘플링한 값  $R_a, R_b, R_c$ 는  $\phi = \pi, R_1 = R_2 \ll 1, T_1 = 1$ 인 경우 식 (5)과 같이 쓸 수 있으며, 식 (5)에서  $\Delta\phi_b$ 는 측정하고자 하는 물리량을 제외한 모든 광시스템 주변 환경의 변화요인들에 의한 간섭계 광위상차에 대한 영향으로서 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{4\pi mL}{c} (\nu_c)_b = -\frac{\pi}{2}, \quad \frac{4\pi mL}{c} (\nu_c)_c = -\pi \quad (4)$$

$$R_a \approx 2\alpha R_1 (1 + \cos(\Delta\phi_M + \Delta\phi_a)) \quad (5a)$$

$$R_b \approx 2\alpha R_1 (1 + \sin(\Delta\phi_M + \Delta\phi_a)) \quad (5b)$$

$$R_c \approx 2\alpha R_1 (1 - \cos(\Delta\phi_M + \Delta\phi_a)) \quad (5c)$$

$$\Delta\phi_a = \frac{4\pi mL}{c} \nu_d + \Delta\phi_M \quad (6)$$

그림 4는 식 (5)에서  $2\alpha R_1$ 이고,  $\Delta\phi_a = 0$ 일 때  $\Delta\phi_M$ 에 대한  $R_a \sim R_c$ 의 관계를 나타낸 것으로 이 그림을 통하여 피측정량  $M$ 의 변화량을 계산하는 방법을 찾을 수 있다. 신호처리의 관점에서 볼 때 샘플링 펄스의 타이밍 jitter의 크기가 같을 경우  $R_a \sim R_c$  중에서  $R_c$ 에서 샘플링한 데이터가 가장 큰 오차를 갖게되므로 위상변화량을 계

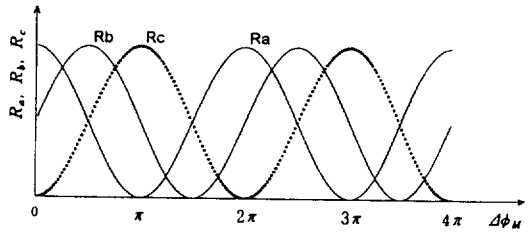


그림 4. 센서신호를 샘플링한 출력의 특성그래프.  $R_a, R_b, R_c$ 는 각각 시점  $t_a, t_b, t_c$ 에서 샘플링한 센서신호의 데이터.

표 1. 위상변화량의 크기 및 방향판정을 위한 논리표. 변화량의 크기는  $\Delta\phi_b$  또는  $\Delta\phi_c$ 의 변화량으로부터 계산됨.

$\Delta\phi_M$	$\Delta R_b$	$\Delta R_c$	변화방향
$0 \sim \pi/4, 7\pi/4 \sim 2\pi$	+	×	+
	-	×	-
$\pi/4 \sim 3\pi/4$	×	+	+
	×	-	-
$3\pi/4 \sim 5\pi/4$	+	×	-
	-	×	+
$5\pi/4 \sim 7\pi/4$	×	+	-
	×	-	+

산할 때  $R_a$ 보다  $R_b$ 나  $R_c$ 를 이용하는 것이 유리하다. 또한  $\Delta\phi_M$ 에 대한  $R_c$ 의 기울기가  $R_b$ 의 기울기보다 더 크므로 신호처리의 분해능 측면에서  $\Delta\phi_M = \pi/4 \sim 3\pi/4, 5\pi/4 \sim 7\pi/4$  구간에서는  $R_c$ , 그 외의 경우  $R_b$ 를 이용하는 것이 효율적이며,  $R_a$ 는 보조 데이터로 사용할 수 있다. 이 논의를 토대로  $\Delta M$ 에 의한 위상변화의 방향 계산방법을 표 1에 요약하였으며, 표 1에서 “ $\Delta R_b$ ”와 “ $\Delta R_c$ ”는 각각  $k+1$ 번째의 간섭파형을  $t_b$ 와  $t_c$  시점에서 샘플링한 값을  $(R_b)_{k+1}$ 와  $(R_c)_{k+1}$ 라고 하고,  $k$ 번째 간섭파형을  $t_b$ 와  $t_c$  시점에서 샘플링한 값을  $(R_b)_k$ 와  $(R_c)_k$ 라고 할 때 각각 “ $(R_b)_{k+1} - (R_b)_k$ ”와 “ $(R_c)_{k+1} - (R_c)_k$ ”의 값을 말하며, “+”는 “증가”, “-”는 “감소 또는 변화없음”, 그리고 “×”는 “무관함(don't care)”을 의미한다. 위상의 변화량은  $\Delta R_b$  또는  $\Delta R_c$ 에 해당하는 위상의 변화량을 표 1의 변화방향에 따라 누적하여 더하거나 빼줌으로써 추적이 가능하며,  $\Delta\phi_M$ 의 변화량을 빠른 시간안에 정확히 계산해내기 위하여 식 (1)을 도표화한 보기표(lookup table)를 필요로 한다. 또한  $\Delta\phi_M$ 의 변화량으로부터  $\Delta M$ 의 계산은 측정물리량과 위상변화량과의 관계식(제 2의 보기표를 이용)을 이용함으로써 가능해진다.

2. 광세기 및 위상 기준설정(referencing)

식 (5)에서와 같이 간섭계의 반사율은 피측정량의 변화  $\Delta M$ 과 광주파수 처핑 뿐만아니라 광연결선상의 광손실인자  $\alpha$ , 광주파수의 표동(drift)  $\nu_d$  및  $\Delta\phi_0$ 에 의해서도 변한다. 측정물리량의 변화량  $\Delta M$ 을 정확히 계산해내기 위해서는 간섭계의 반사율에 영향을 미치는 이들 요소 뿐만 아니라 앞에서 별도로 언급된 바 없는 레이저의 광출력의 변화 및 신호처리회로의 이득 변화 또한 고려되어야 하며, 이들 모두가 센싱오차를 유발하는 요인이 된다.

오차유발요인들을 크게 광세기 요인과 광위상 요인으로 분류할 때 광연결선상의 광손실인자, 레이저의 광출력변화 및 신호처리회로의 이득변화 등은 광세기요인으로, 그외는 광위상요인으로 나눌 수 있다.

이들 요인들에 의한 오차를 제거하기 위해서 모든 신호처리기법은 적절한 기준설정이 가능해야 하며, 본 연구에서 적용할 수 있는 기준설정방법을 아래에서 세 기기준설정과 위상기준설정으로 나누어 원리를 기술하였다.

본 신호처리방식에서 이용가능한 세기기준설정으로는 두가지 방법이 가능하다. 첫째, 그림 2의 기준거울에서 반사된 반사광 펄스를 기준으로 하여 간섭계의 출력을 규준화(normalization)하는 방법이다. 단, 이 경우 레이저 펄스기간 동안 광주파수의 변화와 더불어 미소한 량이지만 광세기의 변화도 수반되므로 고분해능의 신호처리를 위해서는  $R_o \sim R_c$ 의 진폭의 비를 정확히 측정하는 다음 이 값을 이용하여 규준화하는 과정을 추가하여야 한다. 두번째 방법으로는 식 (5)로 나타낸  $R_o \sim R_c$ 의 최대값과 최소값을 추적하여 각 신호의 변화폭을 계산한 후  $R_o \sim R_c$ 를 규준화하는 방법이다. 이들중 첫번째 방법은 상당한 길이의 광섬유 지연선로를 요하는 단점을 들 수 있으나 시스템의 성능면에서는 두번째 방법보다 우수하다. 두번째 방법은 피측정량의 변화속도가 느린 경우에 적용가능한 방법으로 광학 및 신호처리가 단순하며, 따라서 신호처리기법의 증명을 목적으로 하는 본 연구에서는 두번째 방법을 적용하였다.

위상기준설정을 위해서는 그림 2의 기준간섭계를 사용하였으며, 기준간섭계가 위상기준을 제대로 설정할 수 있도록 기준간섭계는 측정대상량  $M$  이외의 주변환경을 감지간섭계와 동일하게 유지하였으며, 광시스템의 구성을 그림 2와 같이함으로써 두 간섭계로부터의 반사신호를 시간적으로 분리하여 동일광원으로 두 간섭계를 동시에 모니터링할 수 있도록 하였다. 또한 기준간섭계의 신호를 감지간섭계와 동일한 방법으로 처리함으로써

$\Delta\phi_0$ 를 계산하고,  $\Delta\phi_0$ 의 크기에 상응하는  $\Delta M_r$ 을 계산한 후 이값을 감지간섭계가 계산한  $\Delta M_s$ 에서 빼줌으로써 측정물리량의 크기를 정확히 추출해 낼 수 있다.

3. 성능예측

이론적으로 달성가능한 성능의 한계를 가늠하기 위하여 그림 1의 센서시스템을 온도센서로 사용했을 때의 최대감도를 계산하였다.

이상적인 상황에서 센서의 감도를 광자의 산탄잡음(shot noise)만에 의해 제한을 받는다고 가정하고, 동시에 시스템의 분해능을 높이기 위해  $n_s$ 개의 샘플링한 데이터에 대한 평균값을  $R_o \sim R_c$ 로 하여 신호처리한다고 가정할 때

$$\delta(\Delta T) \approx \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{n_s}} \frac{\lambda_0}{4\pi L \left( \frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right)} \frac{1}{\sqrt{n_{ph} \eta_0 \tau}} \quad (7)$$

로 주어진다.

$\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ 의 광원과 공극길이  $L$ 인 FP간섭계를 사용한 센서시스템에서 단위시간당 광검출기에 도달하는 광자수가  $n_{ph} = 6.0 \times 10^{13}$ 개, 광검출기의 변환효율  $\eta_0 = 0.88$  A/W,  $\tau = 2.5 \times 10^{-8}$  sec,  $\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} = 1.07 \times 10^{-5}$  일때<sup>[7]</sup> 최대감도는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta(\Delta T) = \frac{4.7 \times 10^{-5}}{L\sqrt{n_s}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8)$$

따라서 1024개 데이터의 평균값을 이용하여 신호처리를 행할 경우 공극길이가 1cm인 FP간섭계를 이용하여 얻을 수 있는 이론적인 분해능은  $0.15 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 으로 계산되었다.

IV. 실험결과

간섭형 센서를 위한 신호처리기법을 증명하기 위해 그림 2의 FP간섭계 광섬유 센서시스템이 사용되었다. 본 실험에서 사용한 레이저 다이오드는 광 isolator를 내장하고 있지 않으며, 이 경우 간섭계 및 광섬유 단면에서의 반사광이 레이저 다이오드에 케환되어 레이저의 동작을 불안정하게 하는 것을 피하기 위해 본 실험의 광학구성에서는 레이저와 기준간섭계(기준거울을 사용하는 경우 레이저와 기준거울) 사이에 길이 170 m 이상의 광섬유 지연선로를 사용하는 것이 바람직하나 본 실험에서는

레이저 다이오드의 동작조건을 적절히 조절하여 단기간의 불안정한 동작만을 피하였다. 또한 그림 1(b)에서 사용하고 있지 않은 광섬유 단면은 광섬유를 깨뜨림으로써 단면에서의 원치않는 반사광을 무시 가능한 수준으로 낮추고자 하였다.

두 FP간섭계의 공극길이는 1 cm이며, 파장  $1.3 \mu\text{m}$ 이고 문턱전류가 10 mA인 레이저 다이오드는 바이어스 전류 5 mA에 duty cycle 15%인 폭  $1.56 \mu\text{s}$ 의 15 mA 전류펄스로 구동하였으며, 레이저 다이오드의 동작온도는 열전냉각기(Thermoelectric cooler)를 이용하여  $22^\circ\text{C}$ (오차 범위  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )로 고정하였다.

간섭계로부터의 반사광은 방향성결합기를 거치면서 그림 5와 같이 중복됨이 없이 PIN 수신기 모듈(PCO모델 RTZ-565-395)에 도달하여 전기신호로 바뀌고 증폭된다. 증폭된 신호를 식 (4)의 조건을 만족하는  $t_a, t_b, t_c$ 에서 샘플링하기 위한 샘플링 시점선정은 센서시스템을 제작하는 과정에서 수행되며, 이 과정은 측정량  $M$ 을 서서히 변화시키기는 동안 처핑에 의해 발생한 그림 3(b)와 같은 간섭파의 신호파형의 변화를 오실로스코프로 관측하면서 레이저 변조펄스의 인가시점과의 시간간격으로  $t_a$ 에 해당하는 기준점을 먼저 정한 후 간섭정도가  $t_c$ 시점에서의 간섭정도와 비교하여 처핑에 의한 위상차가 근사적으로  $\pi/2$ 와  $\pi$ 에 해당하는 시점을  $t_b, t_a$ 로 정하고 이를 ROM에 기록함으로써 수행된다. ROM데이터로부터 식 (4)의 조건을 최대한 만족하는 그림 5의 중간출력에 나타난 샘플링 펄스열을 얻기 위해 그림 2의 시스템동기부(System Synchronizer) 내에 발진주파수가 50 MHz인 수정발진자를 사용하였으며, 따라서 ROM의 데이터를 조절함으로써 샘플링 펄스의 위치는 20 ns단위로 조절이 가능하도록 하였다. 그림 5에서 맨위 출력은 ADC입력단에서의 센서신호파형으로 첫째 것은 기준간섭계의 반사파형이며, 두번째 것은 감지간섭계로부터의 반사파이다. 그림 5의 중간 파형은 샘플링 펄스열로서 이 펄스열의 첫번째 펄스는 PIN수신기모듈로부터의 출력을 커패시터 결합하여 취했을 때 간섭파형의 변화에 의한 출력신호의 기준선 표동(baseline drift)을 보정하기 위해 추가된 기준선 모니터링 샘플펄스이다. 이후의 세개의 펄스는 기준 간섭계에 대한  $R_a, R_b, R_c$ 를 얻기 위한 샘플링 펄스열(좌측으로부터  $t_a, t_b, t_c$ 시점)이고, 나머지 3개는 감지간섭계에 대한 것이다. 그리고 그림 5의 맨 아래 신호는 ADC의 동작상태를 모니터링할 목적으로 ADC의 MSB (most significant bit)출력의 변화를 보여주며, ADC는 그림 5의 중간 출력 신호의 falling edge에서 신호를 샘플링하고 있다. 기준선,  $t_a, t_b, t_c$ 에서의 샘플링한 신호의

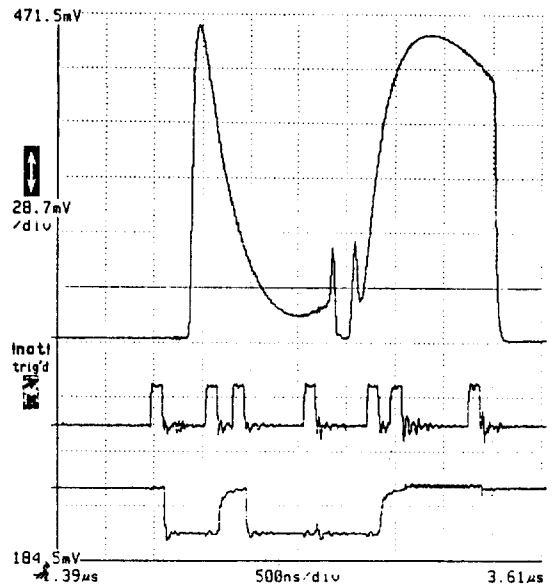


그림 5. 신호의 오실로스코프 출력; 맨위 출력-ADC입력단에서 센서신호의 파형으로 첫째 것은 기준간섭계의 반사파이고, 두번째 것은 감지간섭계로부터의 반사신호임; 중간출력-샘플링 펄스열; 아래출력-ADC의 데이터 라인중 MSB 라인에서의 샘플 데이터.

MSB는 각각 0, 1, 0, 0임을 나타내고 있으며, 동시에 두번째 간섭계에 대한  $t_a, t_b, t_c$ 에서의 센서신호의 MSB는 모두 1로 나타나 있어 신호처리회로가 정상적으로 동작하고 있음을 보여주고 있다.

센서시스템은 시동과 동시에 초기화과정을 거치며, 이 기간동안 레이저 다이오드의 동작온도를 변화시킴으로써 처핑효과를 유도하고, 이에 의한 간섭파형의 변화를 이용하여  $t_a, t_b, t_c$  세지점에서 샘플링한 데이터, 즉 식 (5)의  $R_a \sim R_c$ 의 최소값과 변화폭을 얻으며, 이들 데이터는 센싱동작시의 샘플링된 데이터들과 함께 본 논문에서 제시된 신호처리방식을 구현하기 위해 사용된다.

FP간섭계를 표준열전대와 비교함으로써 측정온도와 위상변화량과의 관계식을 얻은뒤 이를 이용하여 제2의 보기표를 만들어 컴퓨터에 기억시킴으로써 센서시스템을 온도센서로 변환하였다. 광섬유 온도센서의 특성을 확인하기 위한 첫단계로 온도계의 분해능을 측정하기 위해 기준간섭계와 감지간섭계를 교반기(stirrer) 위에 올려놓은 빙수속에 근접한 상태로 담겨둔 상태에서 광섬유 온도계가 지시한 값을 20초 간격으로 읽은 값을 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 데이터의 RMS값으로 계산된 시스템의 잡음은  $0.004^\circ\text{C}$ 로서 이상적인 경우의  $0.00015^\circ\text{C}$ 보다

25배정도로 크게 측정되었다. 이는 광궤환에 의한 레이저 다이오드의 안정성 결여를 포함한 비 이상적인(non-ideal) 광원의 동작, 전자신호처리부의 잡음, 전자신호처리부에서 도입된 간섭계 신호의 위상왜곡에 의한 식 (1) 과의 차이, 간섭계를 구성하는 두 거울의 부분적인 편광존성, 불완전한 센서교정등의 여러가지 요인들이 복합된 것으로 추정된다.

2단계로 광섬유 온도계의 성능을 평가하기 위해 그림 7의 시험장치를 구성한 후 기준간섭계를 22°C의 수조에 담가둔 상태에서 감지간섭계와 표준열전대를 수조 또는 오븐에 둔 상태에서 시험을 행하였다. 이 실험에서 감지간섭계와 표준열전대의 온도를 똑같이 유지하기 위해서 수조실험에서는 두 센서소자를 가능한한 가까이 근접시켰으며, 오븐실험에서는 두 센서소자를 근접시킨 상태에서 열그리스(thermal grease)를 이용하여 두 소자사이의 열접촉을 좋게한 후 알루미늄 블록에 깊은 구멍을 내어 그속에 삽입하고 이를 오븐속에 넣었다.

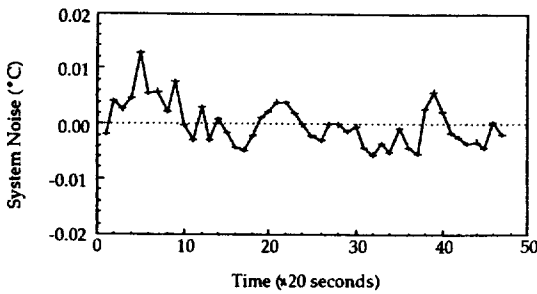


그림 6. FP간섭계 온도센서의 시스템 잡음 측정결과.

또한 수조는 시험과정 동안 교반기위에 올려놓았으며, 기준간섭계가 담긴 수조의 온도의 변화분은 감지간섭계의 측정치에서 감해줌으로써 보상하였다. 0~200°C 범위에서 2°C 간격으로 온도를 증가 또는 감소시키면서

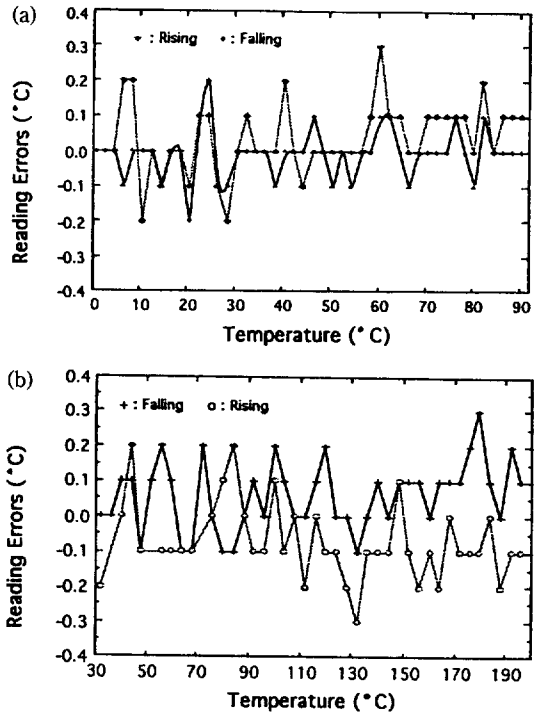


그림 8. FP간섭계 온도센서의 특성(온도 대 측정오차): (a) 수조 실험의 결과, (b) 오븐 시험의 결과.

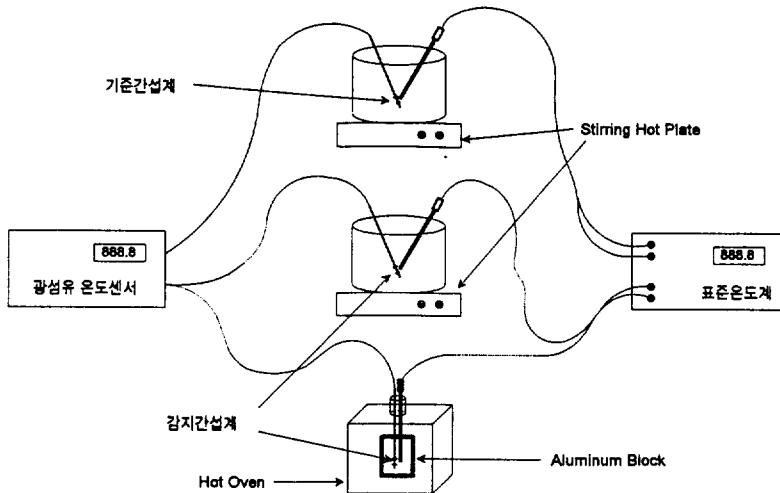


그림 7. 광섬유 온도계의 시험장치도.

표준열전대의 판독치와의 차이값을 측정한 결과를 그림 8에 보였다. 이 실험에서 히스테리시스는 관측되지 않았으며, 판독치의 80%가 0.1°C 이하의 차이를 보였고, 최대편이는 0.3°C이었다.

본 논문에서 제안된 신호처리 방식은 기본적으로 다중화 광섬유센서를 위한 신호처리방법으로 센서의 다중화를 위해서는 그림 1의 기준 또는 감지 FP간섭계 뒷부분에 일정길이의 광섬유 지연선로를 두고 필요한 수의 간섭계를 추가하면 된다. 그러나 현재의 구조와 신호처리방식에서 다중화 가능한 센서의 수와 다중화 FP간섭계를 이용한 센서시스템의 특성상 달성가능한 분해능에는 한계가 있으며, 다중화 가능한 센서의 수를 늘릴 수 있는 신호처리방식에 대한 연구가 진행중이다.

V. 결 론

광섬유 FP간섭계 2개를 각각 기준간섭계와 감지간섭계로 사용하여 특별한 소자의 추가사용 없이 광원의 주파수 처평만을 이용하여 세기기준설정과 위상기준설정이 가능한 신호처리방법을 제안하고 이를 시험한 결과를 제시하였다.

제안된 신호처리 기법은 피측정량이 가해지지 않았을 때 두 간섭과 사이의 위상차가 0이 아닌 모든 종류의 불평형 간섭계에 적용할 수 있는 신호처리방법으로서 피측정량에 의한 위상변화량의 크기에 대한 제한이 없으면서도 줄무늬세기방법을 이용하지 않기 때문에 간섭계 센서의 고감도 및 넓은 다이내믹 레인지의 장점을 동시에 취할 수 있는 기법이다. 공극의 길이가 1cm인 FP간섭계를 이용하여 구성된 광섬유 온도센서시스템에

적용하여  $4 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 의 분해능을 얻었으며, 0~200°C 범위의 온도측정에서 표준온도계와의 최대측정편이는 0.3°C 이었고, 측정치의 80%가 0.1°C 이하의 차이를 보였다.

이론적으로 계산된 시스템의 분해능은 측정된 값의 1/25로서 이론적인 분해능을 달성하기 위해서는 보다 개량된 전자회로의 개발, 간섭계의 편광의존성 제거 및 간섭계의 특성( $R_1, T_1, R_2$  및  $L$ )과 광원의 특성(가간섭성 길이)에 대한 정확한 데이터 수집이 필요하다. 또한 현재의 신호처리에서 수행된 소프트웨어에 의한 세기기준 설정은 피측정량의 변화속도가 빨라질 때 오차를 발생하며, 따라서 기준거울을 이용하는 방법으로 이 문제에 대한 해결이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] T.G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandridge, G.H. Siegel, Jr., J.H. Cole, S.C. Rashleigh, and R.G. Priest, IEEE J. Quantum Electron., **QE-18**, 626 (1982)
- [2] C. Gahler, S. Friedrich, R.O. Miles, and H. Melchior, Appl. Opt., **30**, 2938(1991)
- [3] C.E. Lee and H.F. Taylor, Electron. Lett., **24**, 193 (1988)
- [4] C.E. Lee, R.A. Atkins, and H.F. Taylor, Electron. Lett., **23**, 596(1987)
- [5] Y. Yeh, C.E. Lee, R.A. Atkins, W.N. Gibler, and H.F. Taylor, J. Vac. Sci. Technol., **A8**, 3247(1990)
- [6] J.L. Santos, A.P. Leite, and D.A. Jackson, Appl. Opt., **31**, 7361(1992).
- [7] G.B. Hocker, Appl. Opt., **18**, 1445(1979)

A Signal Processing Technique for Interferometric Fiber-Optic Sensors

Yunhae Yeh

Department of Electronics Engineering, Kyung Hee University, Kyung Ki 449-701, Korea

(Received: July 31, 1995)

A signal processing technique for interferometric fiber-optic sensors is proposed. It does not require any special optic components such as phase modulator, 3×3 couplers,.. to obtain the full sensitivity of the interferometer. Instead, it requires a reference interferometer for phase referencing and a reference mirror for intensity referencing, but intensity referencing can be done without using the reference mirror. The new technique utilizes the frequency chirping of the laser diode to process the sensor signal with both wide dynamic range and high sensitivity of the interferometer. It was applied to an internal-mirrored FP interferometric temperature sensor to obtain the system noise of  $4 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$  from 1cm FP Interferometer sensor device.