

아날로그 신호처리를 이용한 백색광 간섭 피크의 검출

예윤해[†] · 이종권

경희대학교 전자정보학부, 레이저 공학 연구소
Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리1

(2005년 6월 15일 받음, 2005년 7월 4일 수정본 받음)

고속으로 간섭피크의 위치를 찾기 위해 일련의 아날로그 신호처리를 수행하는 백색광간섭(WLI)센서용 신호처리 방식을 고안하고, 이를 WLI 온도센서 시스템에 적용하였다. 새로운 신호처리방식을 적용한 결과 잡음은 $0.019 \text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었으며, 선형성도 우수하였다. 그러나 보상용 간섭계에서의 온도변화가 센서출력의 드리프트로 나타났으며, 현재의 구성에서 드리프트의 온도 의존성은 $1.42 \text{ }^\circ\text{C}/\mu\text{m}$ 인 것으로 계산되었다. 또한 간섭피크간 간격이 광원의 가간섭길이에 비해 충분히 넓지 않은 경우 간섭무늬 피크의 간격과 신호처리가 측정된 피크 간격과의 관계가 비선형적으로 나타날 수 있음도 확인하였다.

주제어 : Fiberoptic sensor, White light interferometry, Fiber fabry-perot interferometer, Michelson interferometer, Absolute measurement, Drift.

I. 서 론

Fabry-Perot (FP) 간섭계를 이용하는 광섬유 센서는 구조가 간단하고, 감지구간이 명확하며, 다중화가 유리하다는 점 때문에 많은 관심을 끌었으나 절대값 측정에 문제가 있으며, 따라서 이를 해결하기 위해 다양한 방법이 시도되었다. 이들 방법 중 가간섭성이 낮은 광원을 사용하여 간섭무늬 피크의 이동을 측정함으로써 절대값 측정을 가능케 한 방식이 주목을 받았다.^[1-5] 이 방식에서는 간섭무늬 피크 근처에서 간섭계 출력신호의 크기변화가 작아 요구되는 측정감도를 얻기 위해서는 신호 대 잡음비가 큰 신호처리장치를 필요로 한다. 또한 신호처리 과정이 복잡하고, 다량의 계산을 필요로 하기 때문에 측정속도가 느리다는 문제가 있다.^[6]

본 논문에서는 비교적 간단한 회로구성으로 백색광 간섭무늬의 이동량을 고속으로 정밀하게 측정할 수 있는 신호처리 방식을 고안하고, 이를 백색광 간섭계 센서에 적용하여 시험한 결과를 제시하였다. 새로이 고안된 신호처리 방식을 적용하기 위한 광섬유 센서의 광학계는 광원으로 ELED (Edge-emitting LED), 광검출기, 경로정합(path-matching)용 Michelson(MI) 간섭계, 그리고 감지용 간섭계로 공극길이가 1 cm인 FP 간섭계 각각 1개로 구성하였으며, MI 간섭계의 광경로차는 FP간섭계의 광경로차와 비슷한 값으로 조정하였다. MI 간섭계를 이루는 두개의 거울 중 한 개를 PZT(piezoelectric transducer) 액츄에이터에 부착하여 주기적으로 진동시켜 주기적인 간섭 무늬를 얻었으며, 광검출기의 출력을 아날로그 상태에서 일련의 신호처리를 거쳐 간섭무늬의 피크(zero-order fringe)의 위치를 펄스 에지(pulse edge)로 변환하였다. 펄스 에지 사이 간격의 변화량인 간섭무늬의 이동량은

디지털 회로를 이용하여 측정하였다. 구현된 센서시스템을 온도센서로 설정하여 평가함으로써 신호처리방식의 한계와 센서시스템이 갖는 문제점을 분석하였으며, 이를 토대로 고안된 신호처리방식을 백색광 간섭형 센서에 적용하기 위해 광학계가 가져야 할 조건을 제시하였다.

II. 백색광 간섭형 센서의 구성

2.1. MI 간섭계

그림 1의 MI 간섭계는 빔 분리기(BS : beam splitter), 광섬유 부착형 콜리메이터, 길이가 72 mm인 PZT 액츄에이터 각각 1개, 그리고 100% 반사거울 2개를 사용하여 그림 3과 같이 구성한 후 이를 알루미늄판 위에 고정시켜 제작하였다.

ELED의 스펙트럼 분포는 가우시안 형태로 주어지며, 스펙트럼 폭은 대개 수십 nm에 이른다. 이러한 백색광이 그림 1의 MI 간섭계에 입력되면 BS를 통과하면서 두 경로로 나누어진 후 하나는 거울 1로 진행하고, 나머지는 거울 2로 진행한다. 간섭계에서 두 빛의 광경로차(OPD : optical pathlength difference) $2(d_2-d_1)$ 가 광원의 가간섭 길이 내외가 되도록 두 개의 거울 중 하나를 움직이면 그림 2와 같은 간섭 무늬를 얻을 수 있다.

간섭계의 출력은 간섭계에서의 OPD를 빛이 이동하는데 소요되는 시간 τ 의 함수로 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$I = I_0 [1 + |\gamma(\tau)| \cos(2\pi\nu_0\tau)]/2 \quad (1)$$

간섭무늬의 가시도(visibility) γ 는 다음 식으로 정의되며, 여기서 I_{\max} 와 I_{\min} 은 각각 그림 2의 광출력의 최대값과 최

[†] E-mail: yhyh@khu.ac.kr

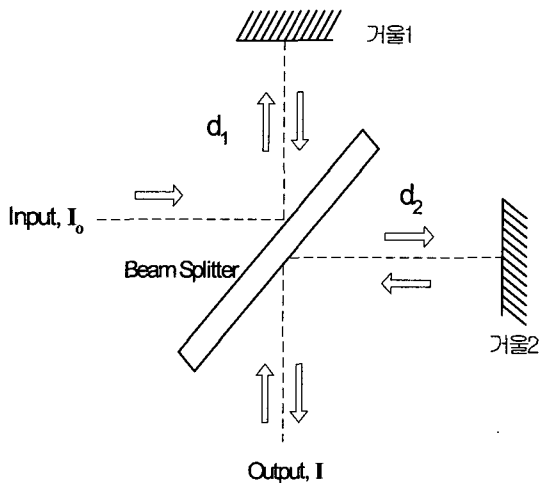


그림 1. Michelson 간섭계.

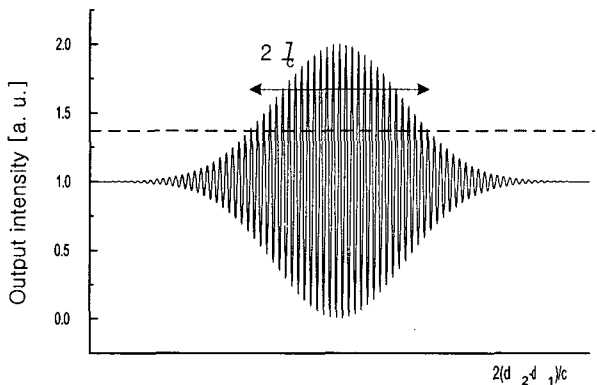


그림 2. 백색광 간섭계의 간섭패턴.

소값, I_0 는 입사광의 세기, 그리고 c 는 진공 중에서 빛의 속도를 의미한다.

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = e^{-(c \cdot z / l_c)^2} \quad (2)$$

따라서 간섭계 출력은 OPD가 0일 때 최대가 되고, OPD가 커질수록 간섭 무늬가 지수 함수적으로 감소하게 된다. 간섭계의 광경로차가 광원의 가간섭 길이 l_c 보다 짧은 영역에서만 간섭이 일어나기 때문에 그림 2에서 보는 바와 같이 광경로차가 $0 \sim l_c$ 인 부분에서만 간섭파형이 관측된다.

2.2. 센서시스템의 구성

실험에 사용된 백색광 간섭 센서는 그림 3에서와 같이 2개의 간섭계로 구성되었으며, 이 중 반사율이 약 7%인 유전체 박막코팅 거울을 1 cm 간격을 두고 배치한 거울 내장형 광섬유 FP 간섭계를 감지소자로 사용하였다. 경로정합용으로 사용된 MI 간섭계는 BS 1개와 두 개의 거울, 그리고 1개의 PZT 액츄에이터를 사용하여 구성하였으며, 광경로차는 광섬유 FP 간섭계의 광경로차와 광원의 가간섭 길이 범위 내에

서 일치하도록 조정하였다.

그림 3에서 간섭계 각각의 경로차는 l_c 보다 훨씬 크고, 두 간섭계 경로차의 차이는 l_c 범위내에서 일치하도록 구성되었다. 따라서 MI 간섭계에서 긴 경로를 만드는 거울에서 반사한 후 FP 간섭계의 앞 거울에서 반사된 빛과 MI 간섭계의 짧은 경로를 만드는 거울에서 반사한 후 FP 간섭계의 뒷 거울에서 다시 반사된 빛만 서로 간섭된다.

광원의 출력을 $E = A \exp(j\phi)$ 로 정의할 때 MI 간섭계에서 반사된 두 빛 E_1, E_2 는 MI 간섭계에서의 광경로차를 δ_{MI} 이라고 할 때 다음 식으로 주어지며,

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 \exp(j\phi) \\ E_2 &= A_2 \exp[j(\phi + k\delta_{MI})] \end{aligned} \quad (3)$$

이들 빛이 FP 간섭계(광경로차를 δ_{FP} 로 가정)의 두 거울에서 반사되어 광검출기에 도달하는 4개의 빛은 식(4)와 같이 표현된다. 식(4)에서 E_{ij} 는 MI간섭계의 i 번째 거울과 FP 간섭계의 j 번째 거울에서 반사되어 광검출기로 들어오는 빛, A_{ij} 는 E_{ij} 의 진폭을 나타낸 것이며, 이 식에서 ϕ 를 제외한 광원에서 광검출기까지의 공통 위상성분은 결과에 영향을 미치지 않으므로 표기하지 않았다.

$$\begin{aligned} E_{11} &= A_{11} \exp(j\phi) \\ E_{12} &= A_{12} \exp[j(\phi + k\delta_{MI})] \\ E_{21} &= A_{21} \exp[j(\phi + k\delta_{FP})] \\ E_{22} &= A_{22} \exp[j(\phi + k(\delta_{MI} + \delta_{FP}))] \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 광검출기에서 빛의 세기, I 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} I &= \langle (E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22})(E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22})^* \rangle \\ &= (A_{11}A_{11} + A_{12}A_{12} + A_{21}A_{21} + A_{22}A_{22}) \\ &\quad + 2(A_{12}A_{11} + A_{22}A_{21}) \gamma(\delta_{MI}/c) \cos(k\delta_{MI}) \\ &\quad + 2(A_{21}A_{11} + A_{22}A_{12}) \gamma(\delta_{FP}/c) \cos(k\delta_{FP}) \\ &\quad + 2(A_{11}A_{22}) \gamma(\delta_{MI}/c + \delta_{FP}/c) \cos(k(\delta_{MI} + \delta_{FP})) \\ &\quad + 2(A_{12}A_{21}) \gamma(\delta_{MI}/c - \delta_{FP}/c) \cos(k(\delta_{FP} - \delta_{MI})) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 두 간섭계의 광경로차가 광원의 가간섭 길이보다 훨씬 크므로 두 번째부터 네 번째 항은 소멸된다. 그림 3에서 방향성 결합기(DC : directional coupler)와 BS의 분리비가 50:50, 삽입손실은 0 dB, 광섬유 콜리메이터(collimator)에서의 결합손실 0 dB, 그리고 MI간섭계에 사용된 거울의 반사율이 100%, FP간섭계를 이루는 거울의 반사율(R_m)이 1보다 충분히 작으면서 서로 같다고 가정할 때 $A_{11}^2 = A_{12}^2 = A_{21}^2 = A_{22}^2 = P_{in}/2, P_{in} = R_m |A|^2 / 32$ 이다. 따라서 백색광 간섭계 센서의 출력은 식(6)으로 표현될 수 있다. 또, PZT 액츄에이터에 삼각파를 인가하여 MI간섭계에서의 경로차에 삼각

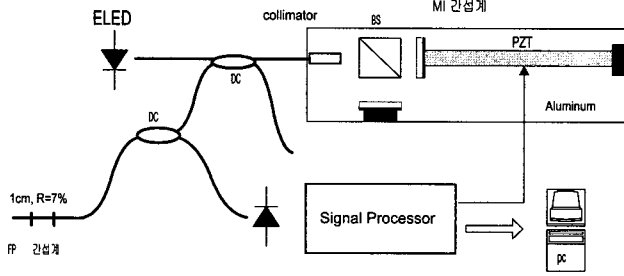


그림 3. 전체시스템의 구성 (BS : 빔 분리기, PZT : PZT 액츄에이터, DC : 방향성결합기, ELED : Edge-emitting LED).

파 형태의 $\delta(t)$ 를 추가하면(이때 MI간섭계의 광경로차는 $\delta_{MI}(t) = \delta_{MI} + \delta(t)$ 가 된다) 그림 4의 중간파형과 같은 출력을 얻을 수 있으며, 출력식은 다음과 같다.

$$I(t) = P_{in} [2 + \gamma((\delta_{MI} + \delta(t) - \delta_{FP})/c) \cos(k(\delta_{MI} + \delta(t) - \delta_{FP}))]$$

$$= P_{in} [2 + \exp(-(\delta_{MI} + \delta(t) - \delta_{FP})^2/l_s^2) \cos(k(\delta_{MI} + \delta(t) - \delta_{FP}))]$$

(6)

두 간섭계에서의 광경로차가 서로 같을 때 간섭계의 출력과 가시도는 최대가 되며, 경로차가 증가할 때 가시도와 출력변화의 폭은 감소한다. MI간섭계의 온도가 일정할 때 FP간섭계의 온도가 상승하면 δ_{FP} 는 길어지게 되며, 따라서 간섭계 출력의 가시도가 최대가 되기 위해서는 $\delta(t)$ 가 커져야 한다.

그림 4의 맨 아래파형은 FP간섭계의 온도 (T_s^i)가 그림 4의 중간파형으로 나타날 때의 FP간섭계 온도 (T_s^o)에 비해 높을 때 ($T_s^i > T_s^o$)의 파형을 보인 것으로 PZT전압을 낮추어 MI간섭계의 경로차를 키워야 FP간섭계의 경로차와 일치되어 최대 피크가 발생한다는 것을 보이고 있다. FP간섭계에서 물리량 변화의 크기 ($T_s^i - T_s^o$)는 그림 4에 보인 간섭파의 피크간

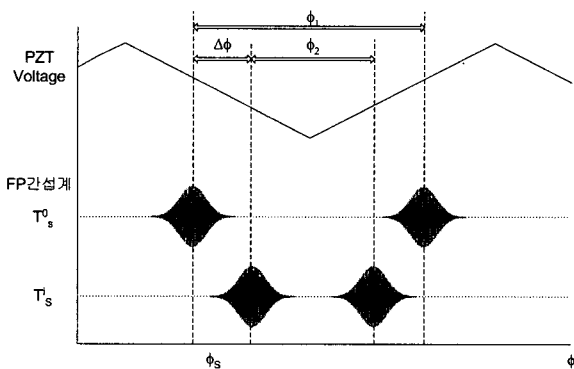


그림 4. PZT의 전압을 기준으로 표현한 간섭무늬의 위치 이동 ($T_s^i > T_s^o$).

격을 통하여 측정할 수 있다.

III. 신호처리기 제작 및 성능 측정

3.1. 신호처리 알고리즘

센서 신호처리기의 성능은 간섭피크의 위치를 정확히 찾아낼 수 있는 능력에 의해 결정된다. 그림 2에 보인 간섭출력은 피크부근에서 신호크기의 변화가 완만하기 때문에 피크의 위치를 정밀하게 찾기가 쉽지 않다. 이 문제에 대한 해결 방안으로 간섭파형의 자기상관성(autocorrelation)을 계산하는 등의 복잡한 연산 알고리즘을 사용하는 신호처리방식이 발표되었으나 구현에 필요한 계산량이 커 실시간 측정이 어렵고 가격도 비싸다는 문제가 있다.^[6] 본 연구팀은 아날로그 회로를 이용하여 실시간으로 간섭무늬의 중심피크의 위치를 정밀하게 찾아낼 수 있는 방법을 고안하였다. 그림 5는 고안된 방법으로 중심피크의 위치를 찾아내는 과정을 도식적으로 보인 것이다. 수신된 신호로부터 직류 성분을 제거한 다음 증폭, 제곱 (x^2), low pass filtering(LPF1), 미분, low pass filtering(LPF2) 과정을 통하여 중심피크 위치에서 출력신호의 기울기가 최대가 되게 함으로써 피크의 위치 측정 감도를 높은 상태에서 마지막으로 슈미트 트리거 회로를 채용한 비교기를 통과시킴으로써 잡음과 지터(jitter)가 제거된 펄스로 변환한다.

간섭피크의 위치는 비교기 출력의 하강에지(negative-going edge)로 변환되며, 하강에지의 위치는 그림 5의 회로를 거치는 동안 회로의 시정수만큼 지연되지만 그림 4에서 보는 바와 같이 두 피크 사이의 간격은 회로 주변환경의 변화에 의해 회로의 시정수가 변하는 경우에도 일정하게 유지된다. 따라서 그림 4의 두 피크간 간격을 측정하는 알고리즘을 백색광 간섭계형 센서에 적용할 때 회로에 의한 드리프트 문제는 발생하지 않을 것이다.

센서의 신호처리기는 간섭파형의 피크의 위치를 검출하여 펄스의 하강에지로 변환하는 그림 5의 아날로그 회로부와 센서시스템의 동작에 필요한 각종 신호를 발생시키고 PZT 액츄에이터에 인가되는 삼각파의 1주기 동안 발생된 간섭출력의 피크간 간격을 측정하는 디지털 회로로 구성된다. 측

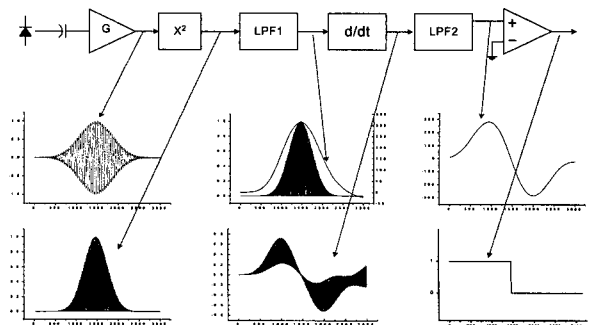


그림 5. 신호처리 개념도.

정된 데이터는 병렬 포트를 이용하여 컴퓨터로 보내어 데이터 분석에 사용될 수 있도록 구성하였다.

3.2. 센서시스템의 제작

그림 3의 구성에 사용된 ELED는 단일모드 광섬유가 부착된 OKI사의 OE3202G-010로서 주입전류가 100 mA일 때 중심파장, 스펙트럼폭, 그리고 광출력은 각각 1300 nm, 55 nm (가간섭길이 32 μm), 100 μW 이며, ELED의 온도는 내장된 열전냉각기 (thermoelectric cooler)를 이용하여 일정하게 유지하였다.

실험에 사용한 PZT 액츄에이터(PiezoJena사 제품, 모델명: N80/8)는 길이 75 mm, 약 0.66 $\mu\text{m}/\text{V}$ 의 특성을 가지며, 57 Vp-p의 삼각파 전압을 인가할 때 진폭 38 μm 의 선형 왕복운동을 한다. 그 결과 MI간섭계에서는 76 μm 의 광경로차를 발생하므로 감지용 FP 간섭계의 광경로차가 76 μm 이내에서 변하는 경우 중심피크의 위치를 추적할 수 있다. 길이가 1 cm인 광섬유 FP간섭계의 온도가 350 $^{\circ}\text{C}$ 변할 때 광경로의 변화가 약 76 μm 이므로 이 센서의 온도측정 범위는 350 $^{\circ}\text{C}$ 에 해당하며, 온도측정 범위를 확대하기 위해서는 PZT 액츄에이터 인가전압을 증가시켜야 한다.

수신기로는 트랜스 임피던스(transimpedance)가 67 k Ω 인 PCO사의 RTZ-090-065를 사용하였으며, PZT 액츄에이터에 인가된 삼각파의 주파수는 33 Hz이었다. 그리고 저역통과필터인 LPF1과 LPF2는 차단주파수가 각각 200 Hz와 100 Hz인 2차 Butterworth 필터로 구성하였다.

디지털 회로는 FPGA 1개(Altera, EPM7160SLC84-7)를 사용하여 구현하였으며, 주파수가 33 Hz인 PZT 액츄에이터 구동용 전압파형을 발생시키고 간섭무늬의 중심피크사이의 간격을 측정할 다음 이를 컴퓨터(PC)로 출력하도록 설계되었다.

3.3. 성능평가

백색광 간섭계 센서시스템의 성능을 평가하기 위하여 FP 간섭계를 온도센서로 설정하여 센서의 선형성, 드리프트, 그리고 잡음을 측정할 결과를 그림 6, 그림7, 그리고 그림 8에 보였다.

200 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 범위에서 선형성을 측정할 결과 선형성 오차는 최대 7.67 $^{\circ}\text{C}$ 로 확인되었으나(그림 6) 이는 광섬유의 온도특성의 비선형성에 의한 것으로 조건표(lookup table)를 이용하여 수정이 가능한 것으로 판단된다. 또한 측정데이터를 분석한 결과 센서시스템의 잡음(random walk)은 0.019 $^{\circ}\text{C}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 계산되었으며(그림 7), FP간섭계의 공진기 길이의 늘리는 등의 방법을 사용하여 측정의 분해능을 더 크게 하는 것도 가능하다.

그림 8은 광섬유 FP간섭계 센서를 약 0 $^{\circ}\text{C}$ 의 얼음물 속에 넣어둔 상태에서 약 1시간 동안 측정된 온도 값을 보인 것으로 33회 측정의 평균값을 취하는 과정을 거쳐 매초 1회의 속

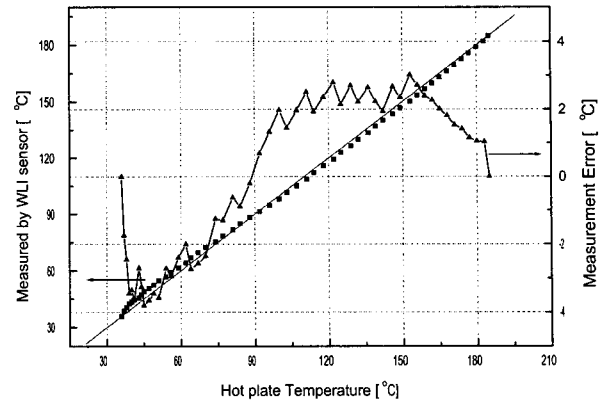


그림 6. 선형성 측정 결과.

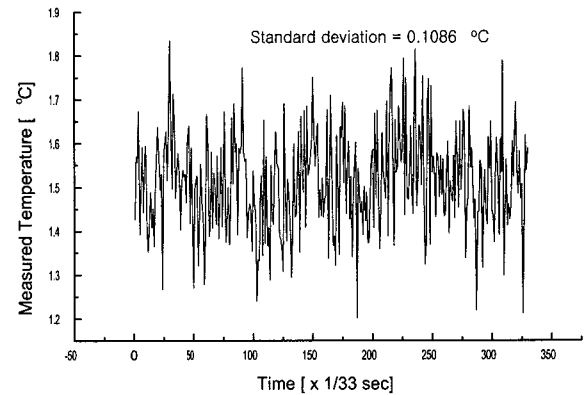


그림 7. 얼음물 속(1.5 $^{\circ}\text{C}$)에 두었을 때 센서시스템의 측정온도.

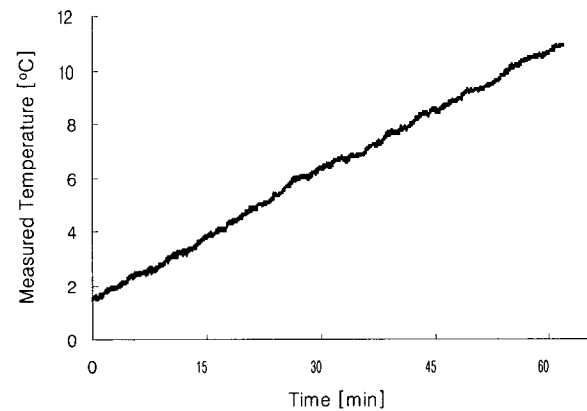


그림 8. 0 $^{\circ}\text{C}$ 의 얼음물 속에서 1시간 동안 측정값.

도로 측정할 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 FP간섭계의 온도가 일정하더라도 신호처리의 출력값이 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 실험실의 환경에 따라 변화하였으며, 출력값 변화의 크기와 방향 또한 실험실 환경에 따라 변화하였다. 센서가 실제로 사용되는 환경의 변화가 실험실 환경의 변화보다 훨씬 심한 점을 고려할 때 위에서 측정된

센서의 드리프트는 센서의 유용성을 언급할 수 없을 정도로 크다는 것을 알 수 있다.

IV. 센서시스템의 문제점 분석

4.1. 선형성 문제

실험에 사용된 PZT 액추에이터에는 최대 150 V의 전압을 인가할 수 있으나 회로의 제약과 구동전력의 한계 때문에 57 Vp-p의 삼각파를 인가하여 76 μm의 광로차 변화를 얻고 있다. 광원의 스펙트럼폭은 55 nm로 가간섭길이는 32 μm로 계산되었다. PZT 액추에이터에 의한 길이변화가 광원의 가간섭길이 정도에 그치기 때문에 광학계의 간섭출력은 그림 4에서와 같이 간섭피크가 완전히 분리되는 대신 그림 9에서와 같이 어느 정도 중첩되어 나타난다. 그림 9는 간섭피크사이의 간격이 가간섭길이의 1.2배가 되도록 조정된 상태에서의 출력을 보인 것이다.

그림 10은 그림 3의 광학구성에 그림 5의 신호처리 장치를 연결한 센서시스템에서 LPF1과 LPF2의 차단주파수가 각각 200 Hz, 100 Hz일 때 간섭무늬의 피크 간격과 비교기에서 검출된 피크간격과의 관계를 계산하여 그린 것으로 간섭무

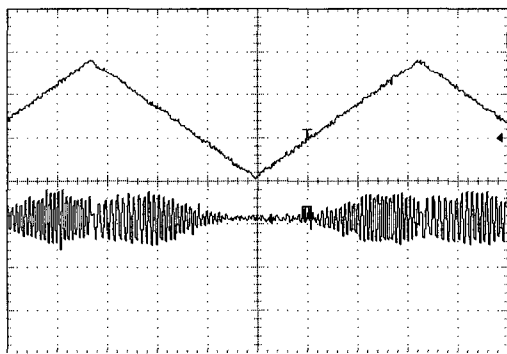


그림 9. PZT 액추에이터 구동전압파형(위)과 간섭 출력(아래).

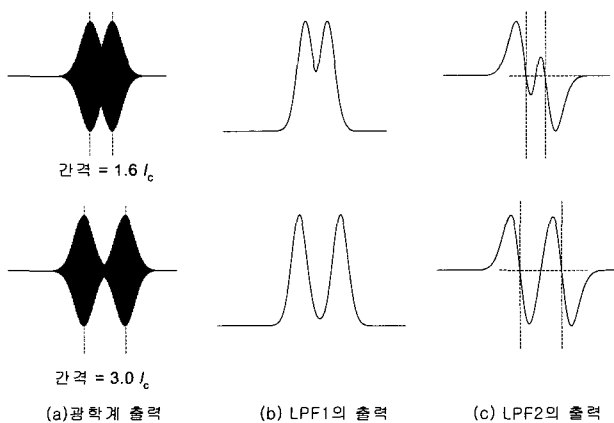


그림 10. 간섭무늬의 피크간격과 비교기에서 검출된 피크간격.

늬 피크 간격이 상대적으로 좁을 때에는 비교기 출력에서 검출된 피크간격이 실제보다 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 11은 광검출기에서의 간섭피크 간격과 비교기 출력에서 관측되는 측정피크 간격의 비율을 계산하여 그린 것으로 간섭피크의 간격이 2λc보다 작아지면 그림 5의 방식에 의해 측정되는 측정피크 간격은 실제보다 급속히 작아짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 신호처리 알고리즘을 적용하기 위해서는 간섭피크간 간격을 광원의 가간섭길이의 2배 이상으로 유지하여야 한다.

4.2. 드리프트

백색광 간섭계 센서시스템의 드리프트 요인으로는 신호처리 회로 요인, MI 간섭계의 구성에 사용된 알루미늄 판의 온도특성, PZT 액추에온도(T₀)에이터의 온도특성 등으로 나누어 볼 수 있으며, 아래에 각 요인의 영향을 조사 분석하였다.

4.2.1. 신호처리 회로 요인

간섭피크의 위치는 그림 5의 비교기 출력의 하강에지로 나타나며, 이 위치는 그림 5의 회로를 거치는 동안 회로의 시정수만큼 지연되는 대신 두 피크 사이의 간격은 회로의 주변 환경 요인에 의해 회로의 시정수가 변하더라도 일정하게 유지되므로 신호처리 회로에 의한 드리프트는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4.2.2. 알루미늄 판

알루미늄의 단위 온도당 길이 변화, α_{Al}는 23.5×10⁻⁶/°C이며, 그림 1의 MI 간섭계에서 두 암의 길이차이는 약 110 mm이다. 따라서 단위온도 당 알루미늄 판에서의 길이변화량은 다음과 같다.^[7]

$$\Delta l_{Al}/\Delta T = \alpha_{Al} l_{Al} = +2.59[\mu m/^\circ C]$$

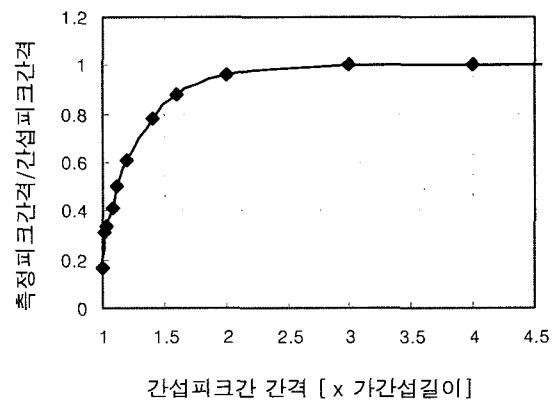


그림 11. 간섭피크간격에 따라 비교기 출력에서 관측되는 측정피크 간격의 비율.

4.2.3. PZT 액츄에이터

MI 간섭계를 구성하고 있는 거울 중 하나는 알루미늄 홀더에 장착된 후 스테인레스 하우징이 없는 Piezo Jena사의 N80/8 PZT 액츄에이터에 부착되었다. 액츄에이터는 PZT 스택 양단에 약 3 mm 두께의 세라믹장착부가 부착된 총 길이 75 mm의 막대 형태이며, 각 PZT층 사이에는 전극물질과 에폭시로 채워져 있다. PZT 액츄에이터의 온도계수 α_{piezo} 는 스택의 구성에 따라 $-6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim +10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며,^[8] 단위온도 당 PZT 액츄에이터의 길이변화량은 다음 식으로부터 계산된다.

$$\Delta l_{\text{PZT}}/\Delta T = \alpha_{\text{piezo}} l_{\text{piezo}}$$

그림 12는 공극길이가 2.1 cm인 FP간섭계의 온도를 일정하게 유지시킨 상태에서 백색광 간섭계 센서시스템이 측정 한 온도를 MI 간섭계 주변의 온도와 함께 보인 것이다. 백색광 간섭형 온도센서시스템의 드리프트가 MI 간섭계의 온도 변화의 경향을 따르는 것을 눈으로 쉽게 확인할 수 있으며, 이로부터 신호처리 회로에 의한 드리프트는 상대적으로 아주 작거나 무시할 수 있을 정도로 결론지을 수 있다. 그림 12에서 MI 간섭계에서의 1.2 °C 온도변화는 공극길이가 2.1 cm인 FP간섭계를 채용한 백색광 간섭계 온도센서에서 약 7.5 °C의 온도 드리프트로 나타났다. 따라서 MI 간섭계에서의 1 °C 온도변화는 공극길이가 2.1 cm인 FP간섭계 온도센서에서 6.25 °C 만큼 온도가 변한 것으로 환산되며, 이로부터 계산된 MI간섭계 광로의 온도의존성은 +1.42 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 이다. 이 값으로부터 계산한 PZT 액츄에이터의 온도계수는 $+15.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로서 세라믹 장착부를 계산에서 제외된 점을 고려하더라도 위에서 제시한 데이터와 다소 차이는 있는 것으로 나타났다. 그러나 그림 12에서와 같이 백색광 센서의 측정값의 드리프트가 MI간섭계의 온도변화의 경향을 근접하게 따르는 것을 볼 때 백색광 센서의 드리프트의 주된 요인은 MI간섭계의 온도변화인 것으로 결론지을 수 있다.

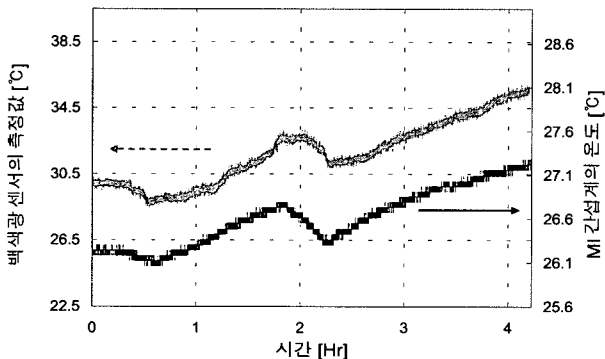


그림 12. MI간섭계의 온도 변화에 따른 백색광 간섭계 센서의 측정값 변화.

4.3. 결과 및 토론

본 논문에서 제시한 신호처리 방식은 간단한 아날로그 회로로 구성될 수 있으며, 드리프트없이 고속으로 백색광 간섭 피크의 위치를 고감도로 찾을 수 있다. 그러나 그림 5의 신호처리 방식을 그림 3의 광학계에 적용할 경우 MI간섭계에서의 광로차의 변화량이 광원의 가간섭길이와 비교하여 2배 이상 크지 않을 경우 간섭피크간격과 측정된 피크간격은 일치하지 않으며, 동시에 감지용 FP간섭계에서의 물리량 변화가 커서 두 간섭피크가 가까이 위치할 때 비선형성 또한 급격히 증가한다. 그림 5에 사용된 필터의 차단주파수를 높여 이러한 비선형성을 줄일 수는 있으나 근본적인 해결방안이 될 수는 없다. 또한 MI간섭계에서의 광로차의 온도의존성 때문에 그림 3의 백색광 센서는 드리프트하게 된다.

본 논문에서 제시된 신호처리 방식을 적용하여 고속의 드리프트없는 백색광 센서 시스템을 구현하기 위해서는 경로정합용 MI간섭계가 다음의 두가지 조건을 만족해야 한다.

1. 액츄에이터의 길이변화량을 광원의 가간섭길이에 비해 크게 하여 간섭피크간의 간격을 항상 광원의 가간섭길이의 2배이상으로 유지시킨다.
2. 경로정합용 MI간섭계를 온도의존성이 없도록 구성한다.

그림 3의 광학계를 사용하면서 위에서 제시된 문제를 해결하기 위해서는

1. 액츄에이터의 길이변화를 키우거나 현재의 구성에서 사용된 광원보다 선포이 넓은 광원을 선택하여 간섭피크간 간격을 광원의 가간섭길이보다 최소한 2배 이상으로 넓힌다. 또한 이 경우에도 간섭피크가 구동파형의 중간 위치에 오도록 MI간섭계의 경로차를 조정하는 동시에 센서의 측정범위를 제한하거나 감지 FP간섭계의 길이를 줄여 측정과정 동안 간섭피크가 너무 가까이 접근하지 않도록 유지하여야 한다.
2. MI 간섭계를 온도의존성이 없도록 구현하여야 하며, 이를 위해서는 온도특성이 서로 다른 물질을 이용하여 온도특성을 보상하거나 PZT 액츄에이터가 없는 경로에도 유사한 길이의 PZT를 두어 온도의존성을 줄이는 방법 등을 고려해 볼 수 있다.

따라서 그림 3의 구성과 본 논문에서 제시한 신호처리 방식을 적용하여 실제 적용이 가능한 백색광 간섭형 센서를 구현하기 위해서는 PZT 액츄에이터를 사용하는 대신 bimorph를 사용하여 광로의 변화폭을 100 μm 이상으로 키우든가 파장폭이 가능한 한 큰 광원을 선택하여 그림 3의 광학계를 구성하여야 한다. MI간섭계에서의 광로차의 변화폭을 키우는 또 다른 방법으로 PZT 스택(stack) 액츄에이터 대신 PZT 실리콘더를 사용하거나 선형모터 등을 이용할 수도 있다. 그러나 이 경우 편광드리프트 또는 측정속도가 느려지는 문제가 예

상되며, 또한 온도의존성이 없도록 구성하여야 하는 문제도 있다.

V. 결 론

절대값을 고속으로 측정할 수 있는 아날로그 신호처리 방식을 고안하고 백색광 간섭형 센서시스템에 적용하여 성능과 문제점을 분석하였다. 현재의 구성에서는 MI간섭계의 온도의존성이 드리프트를 유발하며, PZT 액츄에이터의 길이변화가 광원의 가간섭길이와 유사하거나 이보다 작을 때 신호처리기의 출력과 간섭피크간의 관계가 비선형적임을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 센서시스템의 온도 드리프트를 광로차로 환산하면 $1.42 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 이며, 드리프트가 없는 고감도 절대값 백색광 간섭형 광섬유 센서를 구현하기 위해서는 보상간섭계를 온도의존성이 없도록 제작하는 것이 필수적이다. 또한, 센서의 선형성을 확보하고 감도를 높이기 위해서는 보상간섭계에서 PZT 액츄에이터에 의한 길이변화를 광원의 가간섭길이와 비교하여 2배 이상으로 유지하여야 한다.

참고문헌

[1] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Siegel,

Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. QE-18, pp. 626-665, 1982.
 [2] Th. Bosselmann and R. Ulrich, "High-accuracy position-sensing with fiber-coupled white-light interferometers," *OFS'84 : Proceedings of 2nd Optical Fiber Sensors conference*, pp. 361-364, 1984.
 [3] H. C. Lefevre, "White light interferometry in optical fiber sensors," *Proceeding of 7th Optical Fibre Sensors conference*, pp. 345-351, 1990.
 [4] K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt (ed.), "Optical fiber sensor technology (Chapman & Hall, London)," pp. 270-272, 1995.
 [5] C. E. Lee and H. F. Taylor, "Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensor using low-coherence light source," *J. Light-wave Technol.*, Vol 9(1), pp. 129-134, 1991.
 [6] H. Choi and H. F. Taylor. "High-performance fiber-optic temperature sensor using low-coherence interferometry," *Opt. Lett.*, vol. 22(23), pp. 1814-1816, 1997.
 [7] D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, Boston, U.S.A, 1990-1991), pp. 12-122.
 [8] http://www.piezojena.com/files.php4?dl_mg_id=229&file=dl_mg_1112701672.pdf

Detection of White Light Interference Peak Position utilizing Analog Signal Processing

Yun-Hae Yeh[†] and Jong-Kwon Lee

School of Electronics and Information and Institute for Laser Engineering, Kyung Hee University, YongIn, KyungKi, 449-701, Korea

[†]*E-mail: yhyh@khu.ac.kr*

(Received June 15, 2005, Revised manuscript July 4, 2006)

A signal processing method for white light interferometry (WLI), which performs a series of analog signal processing steps to locate the central interference fringe position at high speed, is developed and applied to a WLI temperature sensor system. We found that the new method has random walk of $0.019 \text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{\text{Hz}}$ with good linearity. However, the temperature change in the path-matching interferometer results in drift of the measured sensor output. The temperature dependence of drift in the WLI temperature sensor system, was calculated to be $1.42 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. It is also found that the relationship between the peak spacing in the interferogram and the spacing measured by the method can be nonlinear when the fringe spacing is comparable to the coherence length of the source.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2370, 060.2430, 120.2230.