

## 디지털 호모다인 검출방식을 이용한 간섭형 광섬유센서의 신호처리\*

예 운 해

경희대학교 전자공학과

(1994년 11월 3일 받음)

레이저 다이오드 구동 전류펄스기간의 발진주파수 변조와 간섭계 출력신호의 시간지연 샘플링을 이용하여 3x3 coupler 등과 같은 특수 광부품을 사용하지 않고도 1개씩의 광원과 광검출기를 이용하여 측정신호의 변화방향과 함께 half fringe의 수를 count할 수 있으며, 광연결선 주변환경의 변화에 의한 세기변화 에러도 피할 수 있는 간섭형 센서를 위한 새로운 신호처리방식을 제안하고, 이 방식을 거울내장형 FP간섭계를 이용한 온도센서에 적용하였다. 온도센서소자로 cavity length가 1cm인 FP간섭계를 이용하여 실온에서 360°C에 걸쳐 분해능 2.7°C로 측정하였으며, 이때 최대측정속도는 1.378×10<sup>3</sup>°C/sec로 계산되었다. 이 방식에서 분해능과 최대측정속도는 반비례 관계를 가지며, 감지 광섬유의 길이에 비례하여 분해능을 높일 수 있다. 또한 6개까지의 센서소자를 한개의 광원과 광검출기로 모니터링하는 다중화 센싱 또한 가능한 신호처리 방식으로써 불평형 간섭계를 이용한 모든 종류의 센서에 대해 적용이 가능하다.

### I. 서 론

광섬유로 구성된 간섭계를 이용하여 다양한 종류의 물리/화학량을 측정하는 간섭형 광섬유센서에 대한 연구개발이 오랫동안 진행되어 왔으며,<sup>[1]</sup> 일부의 경우 실용화 단계에 이르고 있다. 이들 간섭형 광섬유 센서는 피측정량을 광섬유의 길이 변화 또는 굴절율의 변화로 바꾼후 이에 의한 광로의 변화를 간섭계로 감지해내는 원리를 응용한 센서로서 간섭계의 형태로는 Mach-Zehnder(MZ) 또는 Sagnac 형이 주로 사용된다. Sagnac형은 거의 회전을 측정에 국한되고, MZ형은 그 이외의 피측정량의 센싱에 널리 사용되고 있으며, 이러한 간섭형 광섬유 센서는 기본적으로 파동의 간섭현상을 이용하여 광로차(OPD-Optical pathlength difference)에 의한 위상 편이량을 ~1 μrad 정도의 분해능으로 측정할 수 있다는 고감도 특성과 광을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점-특히 저손실, 다중화 능력, 전자파 간섭및 부식에 대한 내성 등을 이용한다.<sup>[2]</sup>

그림 1(a)에 보인 MZ형 간섭계를 이용한 센서의 경우 신호 광섬유를 피측정 대상에 노출시켜 피측정량의 변

화에 의한 광섬유의 굴절율 변화 또는 길이의 팽창/수축을 유도한다. 따라서 광분리기(DC1)로부터 광결합기(DC2) 사이의 전 구간이 센싱구간으로 작용하며, 기준 광섬유를 피측정량의 영향으로부터 격리하기 위해서 계측시스템과 센서소자는 2가닥의 광섬유를 사용하여 연결하는 것이 필요하다. 이 경우 센싱부를 측정대상 구역으로 인도해 주기위한 리이드 부분과 센싱구간의 경계가 명확하지 못한 점이 문제가 된다. 이에 비해 그림 1(b)의 Fabry-Perot(FP)간섭계를 이용하는 경우 센싱구간이 거울사이의 구간으로 명확히 구분되며, 반사모드로 사용될 경우 계측시스템과 센서소자의 연결이 1가닥의 광섬유로 연결될 수 있다. 또한 값비싼 광부품의 최소수 사용, 간단하면서 작게 구성될 수 있고, 특히 광위상과 편광에 대한 리이드선의 영향<sup>[3]</sup>을 받지 않는 장점이 있다.

피측정량에 의해 유도된 광의 위상 편이에 대한 간섭계의 응답은 sinusoidal형태로 주어지며, 센싱감도 역시 sinusoidal형태의 주기성을 가진다(그림 1(c)참조). 간섭형 센서를 이용하여 고감도와 넓은 다이내믹 레인지를 갖고 측정하기 위해서는 우선 센서소자의 감도를 일정하게 유지하여 신호약화현상에 의한 측정에러를 피해야하며, 이를 위해 다양한 종류의 신호처리방식이 시도되었다.<sup>[1]</sup>

이들 신호처리방식은 크게 호모다인 방식과 헤테로다

\*본 연구는 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

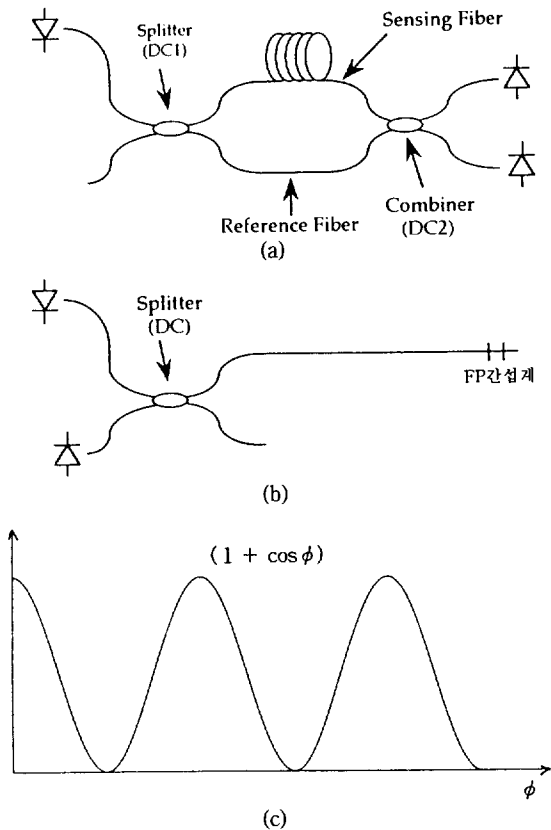


그림 1. 간섭계를 이용한 센서시스템의 광학적 구성과 특성. (a) MZ형 간섭계 센서시스템, (b) 거울내장형 FP간섭계 센서시스템, (c) 위상변화에 대한 간섭계의 응답특성.

인 방식으로 분류될 수 있다. 헤테로다인 방식은 부피 및 전력소모가 크고, 광학부품의 정렬문제, 광손실, 가격 및 복잡성등 많은 문제를 유발시키는 광대역 위상변조기 또는 주파수 천이기(frequency shifter)를 필요로 하며, 동시에 구조 자체가 갖는 많은 장점에도 불구하고 센서소자로의 사용이 기피되어온 FP간섭계 센서의 경우에는 cavity length가 충분히 길지 않으면 이 방식의 적용 자체가 곤란하다.

호모다인 방식의 경우에도 광섬유 위상변조기(PZC), 편광유지 광섬유 부품 또는 3×3 coupler 등과 같은 특수 광부품의 사용을 필요로 한다. 현재까지 발표된 호모다인 방식의 적용례를(PZC를 사용하지 않는 경우만) 보면 피측정량에 의한 위상편이량이 2π보다 적거나 2π보다 아주 큰 경우로 제한되어 사용되고 있으며, 따라서 센싱구간을 길게한 MZ형 간섭계 또는 cavity length가 긴

FP형 간섭계를 센서소자로 채택함으로써 피측정량의 변화에 의한 위상편이량을 크게한 후 fringe수를 세거나 (fringe counting)<sup>[4]</sup> point sensor의 경우와 같이 cavity length가 mm 이내여서 피측정량에 의한 위상편이량이 작은 경우에는 위상편이량을 2π 이내로 제한한 상태에서 이를 세분함으로써 어느 정도의 분해능을 확보하고 있다.<sup>[5]</sup> 그러나 이 두 경우 모두 간섭형 센서 자체가 가질 수 있는 고감도특성을 충분히 활용하지 못하고 있는 셈이되며, 경우에 따라 피측정량의 변화방향(증가 또는 감소)에 대한 정보를 제공받을수 없는 단점도 있다.<sup>[6]</sup> Fringe counting방식의 문제점을 해결하기 위해 LED 등과 같은 broadband광원을 사용하거나 서로 파장이 다른 2개의 광원을 사용한 신호처리방식<sup>[7]</sup>이 보고되기도 하였으나 대부분의 호모다인 신호처리방식의 경우 센서 감도 및 다이내믹 레인지의 제한 또는 많은 수의 값비싼 광부품의 사용으로 인한 가격등의 문제를 안고 있다.

본 논문에서는 레이저 다이오드의 발진주파수 변조와 센서소자로부터 간섭신호를 샘플링한 데이터를 이용하여 센서신호의 변화방향판정과 함께 신호약화 현상을 피할 수 있으며, 일반 불평형(Unbalanced) 타입의 간섭형 광섬유센서 뿐만아니라 기존의 간섭형센서 신호처리방식으로는 신호처리가 용이하지 않은 cavity length가 수 mm에서 수 meters의 FP형 광섬유센서에서도 특수 광부품을 사용함이 없이 이용가능한 새로운 신호처리방식을 제안하고, 이 방식을 적용한 거울내장형 FP간섭계 광섬유 온도 센서의 결과의 기술 및 타종류 간섭계에의 적용가능성을 논한다.

## II. 이 론

### 1. 거울내장형 광섬유 FP간섭계

거울내장형 광섬유 FP간섭계는 단모드 광섬유 단면에 유전체(주로 TiO<sub>2</sub>이용)를 코팅한 것과 코팅하지 않은 광섬유를 용융집합(Fusion Splicing)하여 제작된 거울 2개를 거리 L을 두고 연속적으로 배치함으로써 제작되며, 그림 2(a)와 같은 구조로 되어있다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서 사용된 FP간섭계는 간섭계를 이루는 두 거울의 반사율이 1보다 충분히 작은 low-finesse 간섭계로서 두 거울의 반사율이 각각 R<sub>m</sub>일 때 간섭계의 반사율 R은

$$R = \frac{2R_m(1 - \cos\phi)}{1 + R_m^2 - 2R_m \cos\phi} \quad (1)$$

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

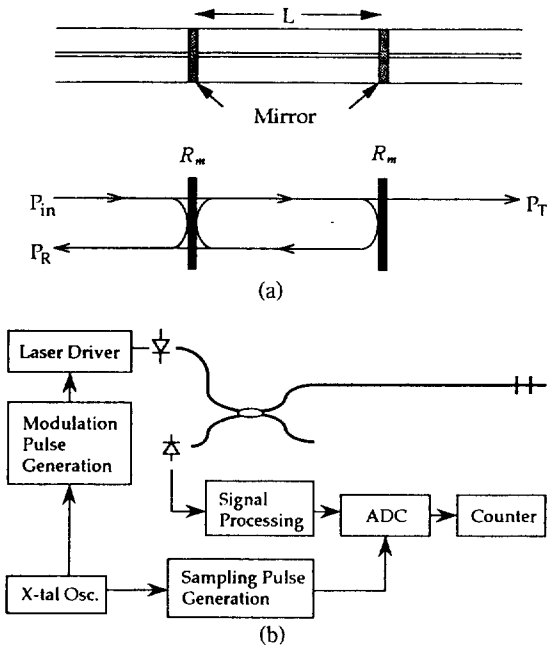


그림 2. (a) 거울내장형 FP간섭계의 구성과 (b) FP간섭계를 채용한 센서시스템의 블록구성도.

로 주어진다.

거울내장형 FP간섭계를 이용한 광섬유 온도센서는 각 1개씩의 FP간섭계, 레이저 다이오드, 광검출기, 방향성 결합기와 이들 광부품을 그림 1(b)와 같이 연결하는 단 모드 광섬유로 구성되어 있다. 또한 광원의 구동과 신호처리를 위한 레이저 구동회로와 신호처리회로가 추가되며, 그림 2(b)에 개략적인 블록도를 나타내었다.

그림 2(b)에서 레이저는 주입전류로 직류 바이어스전류와 함께 펄스를 가함으로써 펄스변조되며, 변조된 광출력은 유도 광섬유를 통하여 간섭계로 도달한 후 식 (1)의 R만큼 반사되어 광검출기로 되돌아온다. 전류펄스가 가해지는 동안 레이저는 출력광세기의 변조와 동시에 frequency chirping에 의해 광주파수 또한 변조되며, 레이저 변조펄스 기간동안의 광주파수의 변화는 그림 3(a)와 같이 시간의 지수함수 형태로 주어진다.<sup>[9]</sup>

측정하고자 하는 물리량 M과 레이저 주파수 v의 R에 대한 영향을 밝히기 위해 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_M + \Delta\phi_v \quad (3)$$

식 (3)에서  $\phi_0$ 는  $M=M_0$  및  $v=v_0$ 일 때의 위상차이며,

$$\Delta\phi_M = \frac{4\pi v}{c} \left( L \frac{dn}{dM} + n \frac{dL}{dM} \right) \Delta M = S_{scm} * \Delta M \quad (4)$$

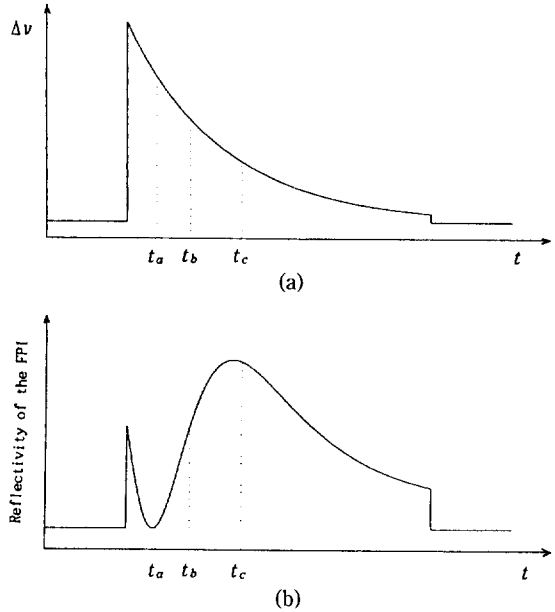


그림 3. 레이저 다이오드의 변조펄스 시작후 시간에 따른 레이저 주파수 변화(a)와 이에 따른 간섭계의 반사율의 변화(b).

$$\Delta\phi_v = \frac{4\pi L}{c} \left( 1 + v \frac{dn}{dv} \right) \Delta v \quad (5)$$

로 주어지고, 여기서  $\Delta M = M - M_0$ ,  $\Delta v = v - v_0$  그리고  $M_0$ 와  $v_0$ 는 측정신호 및 광주파수의 기준값(또는 초기값)으로  $v_0$ 는 전류펄스가 가해진 후 임의의 시간  $t_0$ 만큼 지연된 시점에서의 광주파수이다.

일반적으로 레이저를 광원으로 하는 광섬유 광학시스템에서 식 (5)의 두번째항은 1보다 훨씬 작은 값으로 주어지며, 따라서 광섬유의 분산효과는 0으로 무시 가능하다. 이때 식 (5)는

$$\Delta\phi_v = \frac{4\pi L}{c} \Delta v \quad (6)$$

으로 주어진다. 식 (1)~(6)을 이용하여 레이저 변조펄스 기간동안 chirping에 의해 그림 3(a)형태의 광주파수 변화(변화폭 12 GHz, chirping의 시간상수 470 ns-실측치를 근거로 가정)를 가진 레이저 출력력이 cavity length가 1 cm인 FP간섭계(간섭계 주변환경의 변화, 즉 측정하고자 하는 물리량 M의 변화가 없을 때)에 가해졌을 때 변조펄스 기간 동안 간섭계의 반사율의 변화를 그림 3(b)에 나타내었다.

2. 디지털 샘플링 및 Fringe counting

간섭계로부터의 광의 세기정보를 이용하여 광위상 변화량을 측정하기 위해 본 논문에서는 레이저 다이오드의 변조 전류펄스 기간 동안의 frequency chirping을 이용한다. 이를 위해 신호처리부에서는 레이저 변조펄스가 가해진 후  $t_a, t_b$ 의 두지점 또는  $t_a, t_b, t_c$ 의 세지점(그림 3(b)참조)에서 샘플링을 행하고, 이중 두 데이터를 이용하여 센서 출력신호 위상의 증감방향 결정, 광세기 기준값 설정(intensity referencing)과 half fringe수의 세기(fringe counting)등을 행하게 된다.

새로운 신호처리 방식이 간섭계 센서에 적용되는 방식을 설명하기 위해 식 (1)에서  $R_m \ll 1$ 인 경우를 가정하면 FP간섭계의 반사율은

$$R \approx 2R_m(1 - \cos\phi) \tag{7}$$

로 주어진다. 식 (7)의 반사율에 비례하는 간섭계로부터의 센서신호는 광연결선을 통과하여 광검출기에 이르게 되며, 이때 광연결선상에 가해지는 주변환경요인의 변화는 광위상 변화, 편광상태의 변화, 그리고 광손실의 변화를 유발한다. FP간섭계형 센서의 경우 광위상과 편광상태의 변화는 두 간섭파에 공통으로 인가되므로 무시할 수 있으며,<sup>[3]</sup> 따라서 FP간섭계형 센서에서 광연결선 주변환경의 변화는 간섭계로부터 광검출기 사이 구간의 광손실 인자  $\alpha$ 만으로 고려될 수 있다. 샘플링 시점  $t_a$ 와  $t_c$ 를( $t_b, t_c$ 에서의 광주파수는 각각  $\nu_0 + \Delta\nu_b, \nu_0 + \Delta\nu_c$ )

$$(\Delta\phi)_b = \frac{4\pi mL}{c} \Delta\nu_b = -\frac{\pi}{2} \tag{8a}$$

$$(\Delta\phi)_c = \frac{4\pi mL}{c} \Delta\nu_c = -\pi \tag{8b}$$

이 되도록 선정하고,  $\phi_0 = \pi$ 로 가정하면  $t_a$ 에서의 샘플링 데이터  $R_a$ ,  $t_b$ 에서의 샘플링 데이터  $R_b$ , 그리고  $t_c$ 에서의 샘플링 데이터  $R_c$ 는

$$R_a \approx 2\alpha R_m(1 + \cos \Delta\phi_M) \tag{9a}$$

$$R_b \approx 2\alpha R_m(1 + \sin \Delta\phi_M) \tag{9b}$$

$$R_c \approx 2\alpha R_m(1 - \cos \Delta\phi_M) \tag{9c}$$

로 주어진다. 식 (9a)~(9c)로부터  $2\alpha R_m$ 을 이용하여

$$R_a' \approx \cos \Delta\phi_M \tag{10a}$$

$$R_b' \approx \sin \Delta\phi_M \tag{10b}$$

$$R_c' \approx -\cos \Delta\phi_M \tag{10c}$$

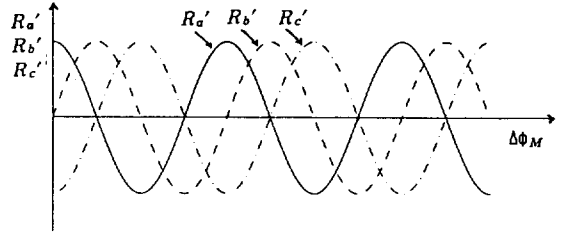


그림 4. 규준화된 센서신호의 샘플출력의 특성그래프.  $R_a', R_b', R_c'$ 는 각각 시점  $t_a, t_b, t_c$ 에서 샘플링한 센서신호의 데이터.

표 1. Half fringe counting을 위한 논리표:

(a)  $R_a'$ 와  $R_b'$ 을 이용한 경우

| $(R_a')_k$ | $(R_a')_{k+1}$ | Sign of $R_b'$ | Count |
|------------|----------------|----------------|-------|
| -          | +              | +              | -1    |
| +          | -              | +              | +1    |
| -          | +              | -              | +1    |
| +          | -              | -              | -1    |

(b)  $R_b'$ 와  $R_c'$ 을 이용한 경우

| $(R_b')_k$ | $(R_b')_{k+1}$ | Sign of $R_c'$ | Count |
|------------|----------------|----------------|-------|
| -          | +              | +              | -1    |
| +          | -              | +              | +1    |
| -          | +              | -              | +1    |
| +          | -              | -              | -1    |

를 유도할 수 있으며,  $\Delta\phi_M$ 에 대한 식 (10a)~(10c)의 관계를 그림 4에 나타내었다.

그림 4로부터 피측정량이 변할 때 간섭파간의 위상차의 변화,  $\Delta\phi_M$ 에 의한 half fringe의 수를 세는 방법을 찾을 수 있으며, 표 1에 그 결과가 요약되어 있다. 표 1에서  $(R_a')_k$ 와  $(R_b')_k$ 는 k번째 레이저 변조펄스가 가해졌을 때  $t_a$ 와  $t_b$ 시점에서 간섭계의 응답, 즉 센서신호의 샘플링 데이터를 의미한다. 마찬가지로  $(R_c')_{k+1}$ 과  $(R_b')_{k+1}$ 은  $k+1$ 번째 레이저 변조펄스에 의한 센서신호의 샘플링 데이터를 의미하며, 각 데이터의 “+”는 각각 “0보다 크거나 같음”에 해당한다. 또한 “Sign of  $R_b'$ ”항의 “+”는 “k번째 와 k+1번째 레이저 변조펄스가 가해지는 기간 동안  $R_b'$ 의 값이 ‘0보다 크거나 같음’의 상태가 변함없이 유지됨(최대측정속도에 대한 조건이 됨)”을 의미한다. 그리고 표 1에서 “-”는 각 경우에 대해 “0보다 작음” 또는 “0보다 작은 상태가 유지됨”을 의미한다.

피측정량 변화량,  $\Delta\phi_M$ 을 측정하기 위해서는 표 1에

요약된 각 경우에 따라 count를 증가 또는 감소시키면 된다. 일반적으로 Fringe counting에서 잡음에 의해 count에 오차가 발생할 가능성을 전혀 배제할 수는 없으나 잡음의 불규칙성(Randomness)을 고려할 때 잡음에 의한 count의 누적가능성은 희박하다. 또한 레이저 변조 펄스주파수를 수 kHz이상으로 하고 광신호의 레벨이 충분한 경우 8-bits ADC(Analog-to-Digital Converter)의 사용만으로도 잡음에 의한 count오차 발생 가능성을 없앨 수 있다. 그러나 잡음에 의한 count오차를 완전히 피하기 위해 잡음신호의 크기보다 큰 잡음 마진을 설정하거나 Bits수가 작은 ADC를 사용하여 잡음이 샘플 데이터에 유입되는 것을 차단시키는 것을 고려할 수도 있다.

$R_a'$ 가 "+"(또는 "-") 동안  $R_a'$ 의 부호변화를 올바르게 검출하기 위해서는 두 레이저 변조펄스기간의 광위상변화량,  $\Delta\phi_M$ 이  $\pi/2$ 보다 작아야만 한다. 따라서 레이저 변조주파수(변조펄스의 반부울)가  $f_{mod}$ 일 경우 측정 물리량의 변화에 의한 광위상 변화속도는

$$\frac{\Delta\phi_M}{\Delta t} < \frac{\pi}{2} f_{mod} \quad (11)$$

로 제한되어야 한다. 따라서 최대측정속도 ( $d \Delta M/dt$ )<sub>max</sub>는 식 (4)와 (11)로부터

$$(d \Delta M/dt)_{max} = \frac{\pi f_{mod}}{2 S_{sen}} \quad (12)$$

로 주어지며, 샘플링 주파수에 비례하고 센서소자의 감도  $S_{sen}$ 에 반비례함을 알 수 있다.

### 3. 광세기 기준값 설정 (Intensity referencing)

광섬유센서의 대표적인 장점으로 논의되고 있는 전자파 간섭에 대한 내성을 구비하기 위해서는 레이저 다이오드 및 광검출기를 포함한 신호처리부를 센서소자와 상당한 거리를 두고 격리시키는 것이 필요하다. 이 경우 센서소자와 신호처리부 사이를 연결하는 광연결선에 가해지는 주변환경의 변화에 의한 편광상태의 변화 또는 위상편이와 광출력의 세기변화를 초래하게되며, 이 모두가 센싱에러를 유발하는 요인이 된다.

FP간섭계를 센서소자로 하는 경우 광연결선이 위치한 주변환경변화의 편광과 광위상에 대한 영향은 두 간섭파에 동일하게 가해지므로 무시 가능하다. 그러나 광연결선상에 가해지는 시간에 따라 변하는 비틀림이나 휨 등에 의한 광손실의 변화는 무시할 수 없는 양으로 식 (9)에서  $\alpha$ 의 시간에 대한 의존성으로 나타난다.  $\alpha$ 의 변

화폭이 10% 이내로 작은 경우 최대측정속도(sensing speed)에 약간의 손실을 감수하고  $\alpha$ 를 상수로 취급하여 신호처리 하는 것이 가능하다. 그러나  $\alpha$ 의 변화폭이 큰 일반적인 경우에 대하여 식 (9)로부터 식 (10)을 얻기 위해서는 다음의 두가지 방법을 생각할 수 있으며, 상황에 따라 적절한 방법을 선택 사용할 수 있다.

첫째로 주어진 레이저 전류 펄스당 2회 샘플링을 요하는 2점 샘플링법은 그림 3(a)의  $t_a, t_b$  두 점에서 샘플링한 데이터의 최대, 최소치를 매 fringe마다 추적하여 이 값( $4\alpha R_m$ )을 이용하여 식 (10)을 얻는 방법으로 시간에 따른 센서신호의 변화가 크고 광연결선상의 주변환경의 변화가 저속인 경우 사용가능한 방법이다. 이에 반해 변조 전류펄스당 3회의 샘플링을 요하는 3점 샘플링법은 그림 3의  $t_a, t_b, t_c$ 의 3점에서 샘플링하여 식 (9a)~(9c)의 출력을 얻고, 식 (9a)와 식 (9c)를 이용하여 세기 기준 신호

$$R_{ref} = R_a + R_c \approx 4\alpha R_m \quad (13)$$

를 얻은 후  $R_{ref}$ 를 이용하여 식 (10)을 유도하는 방법이다. 식 (10)으로부터는  $R_a'$ 와  $R_b'$  또는  $R_b'$ 와  $R_c'$  데이터와 표 1을 이용하여 측정량 변화방향과 함께 fringe counting이 가능하다.

### III. 실험결과

간섭형 광섬유센서를 위해 개발된 새로운 신호처리 방식의 유용성을 증명하기 위해 광섬유 FP간섭계, 광섬유 부착형 레이저 다이오드와 광검출기, 광섬유 결합기(DC), 그리고 단모드 광섬유를 이용하여 그림 1(b)의 거울내장형 FP간섭계 광섬유 센서를 구성하였다. 이 실험에서 사용한 레이저 다이오드는 광 isolator를 내장하고 있지 않으며, 이 경우 간섭계 및 광섬유 단면에서의 반사광이 레이저 다이오드에 케환되어 레이저의 동작을 불안정하게 할 수 있다. 이를 피하기 위해 본 실험의 광학구성에서는 레이저와 간섭계 사이에 길이 200 m 이상의 광섬유 지연선로를 사용하는 것이 바람직하나 본 실험에서는 레이저 다이오드의 동작조건을 적절히 조절함으로써 단기간의 불안정한 동작을 피하였다. 또한 그림 1(b)에서 사용하고 있지 않은 광섬유 단면은 광섬유를 깨뜨림으로써 단면에서의 원치않는 반사광을 무시 가능한 수준으로 낮추었다.

거울내장형 FP간섭계는 TiO<sub>2</sub>를 코팅한 광섬유를 TiO<sub>2</sub>를 코팅하지 않은 광섬유와 용융접속(Fusion Splicing)하여 만든 반사율이 2.5%의( $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ ) 거울 2개를 1

cm 간격으로 배치하여 제작되었다.<sup>[10]</sup> 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-TEC)를 이용하여  $22^\circ\text{C}$  (오차범위  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )로 고정하였다.

레이저 다이오드로부터의 광펄스는 광섬유 pigtail에 결합된 후 DC를 거쳐 광섬유 FP간섭계에서 반사되며, 이 반사광의 세기는 FP간섭계의 온도에 의존한다. 온도 정보를 포함한 반사광은 다시 DC를 거쳐 광검출기에서 전기신호로 바뀐 뒤 신호처리부에서 처리된다.

신호처리부에서는 PIN 수신기 모듈(PCO모델 RTZ-565-395)에서 전기신호로 바뀐 입력신호를 증폭한 후 2점 또는 3점 샘플링법에 의한 half fringe counting을 위해 그림 3의 시간간격으로 샘플링하였으며, 식 (8)의 관계를 만족하는 시간간격  $t_a \sim t_b$ 와  $t_b \sim t_c$ 를 얻기위해 그림 2(b)의 발진기(osc)로 발진주파수가 50 MHz인 수정발진자를 사용하여 샘플링 펄스의 위치를 20 ns 단위로 조절하였다. 그림 5에서 맨위 출력은 ADC입력단에서의 광신호파형으로 그림 1(b)의 광회로에 나타난 FP간섭계의 후단 170 m 지점에 제2의 FP간섭계를 추가로 연결했을 때 얻은 파형이다. 여기서 제2의 간섭계는 이 간섭계의 온도를 일정하게 유지시킨 후 레이저 다이오드의 동작온도 변화에 의한 광주파수의 변화량을 count함으로써 레이저 동작온도변화에 의한 센싱오차를 보정할 목적으로 시도 되었으나 이에 의한 센싱에러가 1 fringe이내로서 무시 가능하여 이 실험에서는 더 이상 사용하지 않았다(그러나 본 신호처리 방식이 다중화센서의 경우에도 적용가능함을 보이기 위해 그대로 두었다). 그림 5의 중간 출력은 센서신호를 샘플링하기 위한 샘플링 펄스열로서 이 펄스열의 첫번째 펄스는 PIN수신기모듈로부터의 출력을 커패시터 결합하여 취했을 때 간섭파형의 변화에 의한 출력신호의 baseline drift를 보정하기 위해 추가된 baseline모니터용 샘플펄스이다. 이 후의 세개의 펄스는 첫번째 간섭계에 대한  $R_a, R_b, R_c$ 를 얻기위한 샘플링 펄스열(좌측으로부터  $t_a, t_b, t_c$ 시점)이고, 나머지 3개는 두번째 간섭계에 대한 것으로 이 데이터는 본 실험에서 사용하지 않았다. 그리고 그림5의 맨 아래 신호는 ADC의 동작상태를 모니터링할 목적으로 ADC의 MSB(most significant bit)출력의 변화를 보여주며, baseline,  $t_a, t_b, t_c$ 에서의 샘플링한 신호의 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.

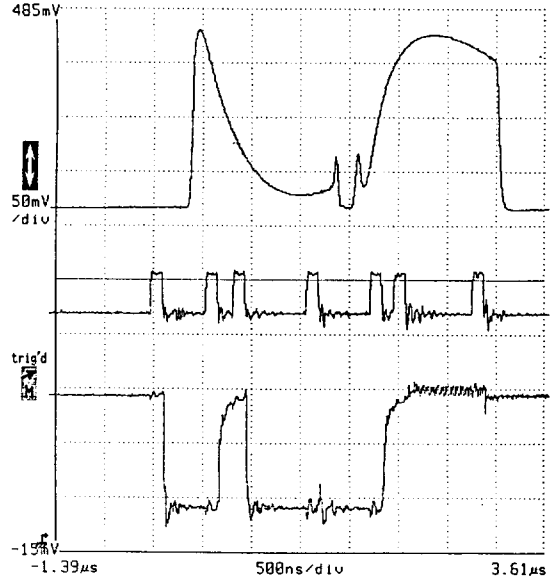


그림 5. 신호의 오실로스코프 출력; 맨위 출력-ADC입력단에서의 광신호로서 두개의 간섭계로부터 반사된 신호열을 나타냄; 중간출력-샘플링 펄스열; 아래출력-ADC의 데이터 라인 중 MSB 라인에서의 샘플 데이터.

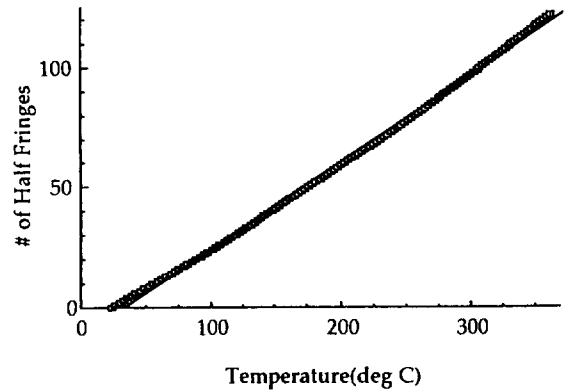


그림 6. 온도 대 half fringe의 수.

광섬유 온도센서의 특성을 확인하기 위해 광섬유 FP간섭계를 오븐에 넣고 서서히 온도를 증가시키면서 카운터의 데이터가 증가할 때마다 기준용으로 사용한 열전대의 온도를 읽음으로써 얻은 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 데이터로부터 cavity length가 1cm인 FP간섭계의 온도에 대한 센서감도  $S_{sm}$ 은  $1.14\ \text{rad/K}$ (측정온도범위  $23^\circ\text{C} \sim 360^\circ\text{C}$ 에서의 평균값)로 측정되었으며, 이

때 최대측정속도는

$$(d\Delta T/dt)_{max} = 1.378 \cdot 10^6 [^{\circ}\text{C}/\text{sec}] \quad (14)$$

로 계산되었다. 1.14 rad/K의 센서감도는 분해능 2.7°C에 해당하며, 이 값은 실용적인 온도센서의 감도로는 부족하다. 따라서 실용적인 온도센서를 위해서는 센서의 감도를 높혀서 분해능을 키울 필요가 있다. 온도측정의 분해능을 0.1°C로 하기 위해서 FP간섭계의 cavity length를 약 30 cm로 하여야 하며, 이때 최대측정속도는 식 (12)로부터 1 cm 경우의 1/30으로 계산된다. 본 연구에서는 제안된 방식의 유용성을 증명하는 것으로 국한시켰기 때문에 분해능이 0.1°C인 온도센서의 구현을 위한 실험은 수행하지 않았다.

온도센서의 분해능을 키우기 위한 방법으로는 앞에서 언급한 FP 간섭계의 경우 cavity length를 키우는 방법 이외에도 cavity length를 키우지 않고 FP간섭계를 알루미늄 같이 주어진 온도변화에 대해 선폭장계수가 큰 재료에 식재하거나,<sup>[11]</sup> 기준 광섬유와 신호 광섬유간의 길이오차가 광원의 가간섭성길이(coherence length,  $L_c$ )보다 짧게 구성한 불평형 MZ형 간섭계 자체 또는 신호광섬유를 알루미늄에 부착하는 방법<sup>[4]</sup>등을 사용할 수 있다. 또한 cavity length가 광원의  $L_c$ 보다 크게함과 동시에 보상 간섭계를 두는 형태로서 FP형 또는 MZ형 센서도 가능하다. 그러나 일반 FP형 레이저다이오드의 경우 cavity length가 수 10 cm인 경우에도 fringe의 관측이 가능하므로 fringe counting만으로도 0.1°C의 분해능을 갖는 광섬유 온도계의 구성은 가능하다.

본 논문에서 제안된 신호처리 방식은 다중화 광섬유 센서의 신호처리에도 유용하게 사용될 수 있다. 그림 1(b)의 FP간섭계 뒷부분에 일정길이의 광섬유 지연선로를 이용하여 간섭계만을 추가함으로써 2개 이상의(현 시스템 파라미터를 그대로 이용할 경우 최대 6개) FP형 센서가 레이저와 광검출기를 공유하는 다중화 센서시스템으로 전환될 수 있으며, 2개의 FP간섭계가 다중화된 경우에 대해 신호처리를 행한 레를 그림 5에서 보여주고 있다.

#### IV. 결 론

불평형 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 신호처리를 위해 새로운 호모다인 방식의 신호처리기술을 제안하고, 거울내장형 FP간섭계를 이용한 광섬유 온도계를 제작한 후 새로운 방식에 의한 신호처리를 행함으로써 유용성을 증명하였다.

본 신호처리방식은 광원의 변조펄스 기간동안 발생한 frequency chirping을 불평형 간섭계를 이용하여 광세기의 변화로 바꾼 후 이를 일정 시간간격을 두고 샘플링한 데이터를 이용하여 half fringe의 수를 세는 방식을 취했다. Cavity length 1 cm의 FP간섭계 센서소자와 파장 1.3 μm의 레이저광을 사용하는 광섬유 온도센서에 적용하여 실온에서 360°C 범위에 걸쳐 분해능 2.7°C로 측정함으로써 유용성을 증명하였으며, 증명에 사용된 온도센서시스템의 낮은 분해능은 cavity length를 키우는 등의 방법으로 원하는 분해능을 가진 온도센서로 쉽게 전환될 수 있음을 언급하였다. 또한 센서의 분해능과 최대측정속도는 반비례 관계를 가지며, 분해능이 2.7°C인 경우 1.378·10<sup>6</sup>°C/sec로 계산되었다.

본 신호처리방식은 불평형 간섭계를 이용한 모든 종류의 간섭형 광센서에 사용될 수 있으며, 센서소자와 센서시스템 사이의 광연결선 주위환경의 변화에 따른 편광변화 및 위상변화에 의한 신호약화(signal fading)에 의한 오차 뿐만 아니라 광연결선에 가해지는 휨, 뒤틀림 등에 의한 광세기변화에 대한 영향까지 처리 가능하다. 또한 적절한 신호처리방식의 부재로 그 구조에서 얻을 수 있는 많은 장점<sup>[12]</sup>-소형, 단순성, 식재가능성(embedding), 명확한 센싱영역의 구분, 한가닥의 광섬유에 의한 센서소자와 시스템의 연결, 광부품의 최소수 사용, 센서소자 이외에 추가 광부품의 사용을 배제하는 다중화의 실현등-에도 불구하고 사용이 기피되어온 cavity length가 비교적 짧은 FP간섭계를 이용한 광섬유센서의 실현 가능성을 한층 높여주고 있다.

마지막으로 본 논문의 신호처리방식에서는 펄스폭이 비교적 넓은 변조펄스를 사용하기 때문에 다중화기술로 모니터링할 수 있는 센서소자의 수는 상당히 제한된다(본 논문에서의 실제변수를 그대로 사용하는 경우 6개 이내). 이 문제를 해결하기 위해 현재 레이저다이오드의 주입전류의 변화에 따른 주파수변화를 이용하는 새로운 신호처리방식을 고안하고, 이의 실용성을 다중화 strain센서를 이용하여 증명하기 위한 실험이 진행중에 있다.

#### 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] D. A. Jackson, A. Dandridge, and S. K. Sheem, Opt. Lett., **5**, 139(1980).

- [3] J. L. Santos, A. P. Leite, and D. A. Jackson, *Appl. Opt.*, **31**, 7361 (1992).
- [4] C. Gahler, S. Friedrich, R. O. Miles, and H. Melchior, *Appl. Opt.*, **30**, 2938(1991).
- [5] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, and K. Koo, *Appl. Opt.*, **21**, 689(1982).
- [6] E. J. Friebele and A. D. Kersey, *Laser Focus World*, May, 165(1994).
- [7] O. B. Wright, *Opt. Lett.*, **16**, 56(1991).
- [8] C. E. Lee and H. F. Taylor, *Electron. Lett.*, **24**, 193(1988).
- [9] Y. Yeh, C. E. Lee, R. A. Atkins, W. N. Gibler, and H. F. Taylor, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 3247 (1990).
- [10] C. E. Lee, R. A. Atkins, and H. F. Taylor, *Opt. Lett.*, **13**, 1038(1988).
- [11] C. E. Lee, W. N. Gibler, R. A. Atkins, J. J. Alcoz, and H. F. Taylor, *Opt. Lett.*, **16**, 1990(1991).
- [12] C. E. Lee, J. J. Alcoz, Y. Yeh, W. N. Gibler, R. A. Atkins, and H. F. Taylor, *Smart Mater. Struct.* **1**, 123(1992)

### **Signal Processing of Interferometric Fiber-Optic Sensor Utilizing a Digital Homodyne Detection**

Yunhae Yeh

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

(Received: November 3, 1994)

A new homodyne signal processing scheme utilizing both lasing frequency modulation during an injection current pulse and time-delayed sampling of sense signal from the interferometer is proposed. It does not require any kind of special optical components such as 3×3 couplers. It simply uses a single set of laser diode and optical detector to count the number of half fringes with the information for the direction of the change of the quantity being measured. This new scheme, that is also capable of doing intensity referencing, was applied to an interferometric temperature sensor utilizing an internal-mirrored Fabry-Perot(FP) interferometer as a sensing element. The temperature sensor was tested from room temperature to 360°C with a measured resolution of 2.7°C and the calculated maximum measurement speed of  $1.378 \times 10^6$ °C/sec. The resolution of the temperature sensor can be enhanced by the use of longer sensing fiber at the sacrifice of sensing speed. The signal processing scheme could be useful for any kind of multiplexed (presently maximum of 6) or non-multiplexed interferometric sensor utilizing unbalanced interferometer.