J. of the Korean Sensors Society
Vol. 16, No. 5 (2007) pp. 342 – 348

변형 램프변조를 이용한 간섭 센서의 신호처리

강현숙 · 예윤해†

Signal processing of interferometric sensor using modified ramp modulation

Hyun-Sook Kang and Yun-Hae Yeh†

Abstract

A high-speed signal processor for Fabry-Perot interferometric sensors using modified ramp modulation is implemented. The main idea for the signal processing is to find a modulation waveform that could induce a linear frequency change in a laser diode to linearize the relationship between the optical phase shift and measurand. It is found that the waveform could be modeled as the addition of a linear term and an exponential term. A signal processor adopting modified ramp modulation technique is implemented and evaluated to find linearity, drift and random walk of $<\pm 1.5$ %, 0.4 °C, 5.28×10^{-4} °C/$\sqrt{Hz}$.

Key Words : Fiber optic sensor, Fabry-Perot interferometer, signal processing, modified ramp modulation, frequency chirping

1. 서 론

광섬유 센서는 뛰어난 성능 때문에 비싼 가격에도 불구하고, 군수, 고고학, 의료, 산업자동화를 포함한 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 그 응용 범위가 서서히 확대되고 있다[1-4]. 간섭형 광섬유 센서는 측정대상량이 변할 때 광섬유 내를 진행하는 빛의 위상변화를 이용하는 센서로서 이들 센서가 가진 뛰어난 감도와 넓은 동적범위 특성을 이용하기 위하여 오랜 기간 동안 다양한 종류의 신호처리 방법과 센서구조가 연구되어 왔다. 그럼에도 불구하고 빛의 세기를 이용하는 세기형 광섬유 센서에 비해 광학구성이 복잡하고 신호처리가 어려워 일반적인 용도에까지 적용이 가능할 정도로 경제성을 갖춘 간섭형 광섬유 센서를 찾기는 쉽지 않다.

간섭형 센서 중에서 Fabry-Perot(FP) 간섭계를 감지소자로 이용하는 경우 간단한 광학구성으로 특성이 우수한 광섬유 센서를 구현할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이를 위한 신호처리 기술도 소개되었다[5-7]. 이들 FP 간섭형 센서를 위한 신호처리 기술은 복잡하여 구현이 쉽지 않고 교정과정도 복잡하며, 안정성 문제도 있는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 FP간섭계를 센서소자로 사용하는 안정성이 우수한 광섬유 센서를 저가격으로 구현하기 위한 방법으로 광원으로 사용되는 레이저다이오드(LD) 출력 광 주파수의 시간적 변화를 선형화하는 것을 주된 내용으로 하는 신호처리기 구현 결과를 기술하였다. 종래와 동일한 광학 구성을 사용하면서[5] 피 측정량에 의한 위상변화량의 크기에 대한 제한 없이 고감도로 측정할 수 있도록 LD의 변조신호와 간섭계 출력의 비교출력을 입력신호로 하는 신호처리 방식을 hardware description language(HDL) 코드로 field programmable gate array (FPGA)에 구현하고, 이의 성능을 확인하였다. LD출력광의 주파수가 시간에 대해 선형적으로 변하는 경우 비교적 간단한 신호처리 방식의 고감도 신호처리기를 얻을 수 있다. LD출력광의 주파수가 시간에 대해 선형적으로 변하도록 하려면 LD 출력광의 주파수 변화를 정밀하게 측정한 다음 이를 이용하여 LD 출력광의 특성을 모델링하는 과정이 필요한데[6] 이 과정을 실제로 적용하기에는 현실적인 어려움이 있다. 본 연구에서는 출력광 주파수의 선형적 변화를 유도하기 위한 LD 공급전류파형을 시간에 비례하는 항과 지수함수적으로 증가하는 항의 합으로 표현된 변형 램프파형으로 가정하여 모델링하고, 이를 이용한 신호처리기를 제작하여

경희대학교 전자정보대학 레이저공학 연구소(Department of Electronics and Laser Engineering, and Institute for Laser Engineering, Kyung Hee University)

†Corresponding author: yhyh@khu.ac.kr
(Received : July 18, 2007, Accepted : August 16, 2007)

평가함으로써 시간에 비례하는 항과 지수함수적으로 증가하는 항의 2개항으로 구현된 변형램프 파형으로도 우수한 성능의 간섭형 광섬유 센서 신호처리기를 구현할 수 있음을 확인하고자 하였다. 변형 램프파형으로 광원을 구동할 때 FP간섭계에서의 반사 파형이 FP간섭계 주변의 환경 변화에 의해 이동되는 정도를 측정하도록 구현한 FP 간섭센서 신호처리기를 사용하여 FP 간섭형 광섬유 온도센서 시스템을 구성하고, 센서의 특성을 측정, 분석함으로써 신호처리 방식의 유용성과 변형 램프 파형에 대한 모델링의 유용성을 조사하였다.

2. 광섬유 Fabry-Perot 간섭계(FPI)와 LD의 주파수 처핑

FPI는 단일모드 광섬유 내에 일정간격을 두고 거울 2개를 나란히 배치하여 만들어지며[7], 공극길이로 불리는 두 거울 사이의 간격, L은 광원의 가간섭성 길이보다 짧게 유지한다. 센서소자로서의 FPI는 측정구간이 두 거울 사이의 구간으로 명확히 구분되며, 공극길이가 짧은 경우 편광에 의한 신호소멸이 발생할 가능성이 낮다[1]. 그림 1은 FPI 센서의 광학계의 구성을 보인 것으로 LD에서 발생된 빛이 방향성 결합기(DC)를 거쳐 FPI로 들어가고, FPI에서의 반사광이 다시 DC를 거쳐 광검출기(detector)에 도달하여 전기신호로 변환된다. 주로 유전체 박막 코팅을 거울로 이용하며, 사용되는 거울의 반사율은 대부분 수 % 이내이다.

광섬유와 방향성 결합기, 그리고 간섭계를 이루는 두 거울의 광손실이 각각 0, 두 거울의 반사율 R_0가 1보다 훨씬 작으면서 서로 같으며, 공극 길이가 광원의 가간섭길이(coherence length)에 비해 훨씬 짧은 경우 간섭계의 반사율, R을 다음과 같이 근사할 수 있다[5].

$$R \cong 2R_0(1+\cos\phi) \tag{1}$$

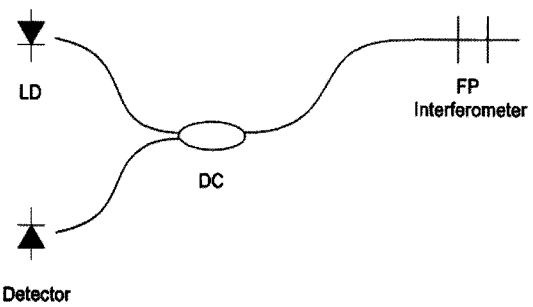

그림 1. 광섬유 FP 간섭형 센서시스템의 광학계 구성
Fig. 1. Optical setup for fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor system.

$$\phi = \frac{4\pi nL\nu}{c} = \frac{4\pi nL}{\lambda} \tag{2}$$

여기서 ϕ는 간섭계에서의 왕복 광위상차, n은 광섬유 코어의 굴절률, L은 공극길이, ν는 광주파수, c는 진공 중에서 빛의 속도, 그리고 λ는 빛의 파장이다. 식(1)로부터 광검출기의 출력은 광 위상차 ϕ의 주기함수이며, 간섭계 주변 환경의 변화(온도, 압력, 스트레인 등)는 열광학 효과, 광탄성 효과, 스트레인 광학효과 등을 통하여 n과 L을 변화시키므로 광섬유 FPI는 n과 L을 변화시키는 모든 량을 감지할 수 있는 센서로 동작할 수 있다. 그러나 피측정량을 고감도로 추출하기 위해서는 LD의 출력광의 세기변화, 신호 약화 현상(signal fading), 그리고 LD에서 FPI를 거쳐 광검출기에 이르기까지의 광연결선인 광섬유에서의 광손실 변화 등의 영향을 배제할 수 있는 복잡한 신호처리 과정을 거쳐야만 한다. 예를 들어 기존의 3점 샘플링 방식에서는 LD를 펄스 변조 하였으며, 이때 광검출기의 출력은 출력파형이 시작하는 시점에서 급격한 변화를 가진다. 이러한 출력파형을 왜곡없이 증폭하려면 아날로그 회로의 대역폭이 충분히 넓어야 하고, 또 샘플링 시점 간의 위상차를 90 °로 정확히 유지하기 위해 샘플링 시점을 정확하게 설정하고 유지하여야 한다[5]. 광 주파수 변화가 급격한 초기펄스 영역에서 샘플링 시점의 편차에서 발생하는 오차를 줄이고, 샘플링 시점에 대한 정확도 요구와 아날로그 회로의 광대역성에 대한 요구를 최소화하기 위한 방법으로 LD가 광출력을 발생하는 동안 광주파수의 변화를 직선화하는 방법이 있다[6]. 그러나 직선화를 위해서는 펄스구동 때의 LD의 주파수 처핑에 대한 정확한 측정 데이터와 복잡한 계산과정이 있어야 하는데 펄스구동 초기의 주파수 처핑량을 정확히 측정하는 것이 사실상 어려우므로 적용이 쉽지 않다[8]. 아래에서는 LD의 광주파수 변화와 시간의 관계를 직선화할 수 있는 변조파형을 모델링하기 위해 LD를 직접변조할 때 구동전류에 따른 광 주파수의 변화, 즉 주파수 처핑(frequency chirping)에 대해 조사하였다.

LD를 직접변조 할 때 능동영역내의 반송자 밀도가 변하여 LD 능동영역의 굴절률 변화를 초래하며, 따라서 LD 출력광의 주파수는 구동전류에 선형적으로 감소한다. 또한 LD에 공급되는 전류의 변화에 의해 LD의 능동영역은 가열 또는 냉각을 반복하게 되며, 이에 의한 온도변화의 크기와 특성은 LD의 패키징 방법에 따라 차이가 있으나 1개 이상의 시정수가 다른 지수함수항의 합의 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다[9]. 패키지가 완료된 LD 칩의 온도변화와 관련된 시정수

로는 LD칩에 대한 시정수, 토대(submount)에 대한 시정수, 그리고 방열판(heatsink)에 대한 시정수의 3개를 들 수 있으나 통상적인 LD 패키지에서 방열판에 대한 시정수는 나머지 2개의 시정수에 비해 지나치게 크므로 선형함수로 근사화 될 수 있다. 따라서 펄스구동시 LD 출력광 주파수의 변화량은 전류 펄스가 인가된 시점을 기준으로 시간에 비례하여 감소하는 항과 전류펄스에 의해 LD칩의 온도가 지수함수 적으로 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 2개의 항으로 구성되어 있는 것으로 결론지을 수 있다.

따라서 온도효과만을 고려할 경우 LD 출력광 주파수의 변화량을 시간에 비례하여 감소하게 하려면 구동전류의 파형은 시간에 대해 선형적인 항과 지수적으로 증가하는 항이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 요구되는 LD의 구동 전류파형은 램프에 가까우며, 따라서 구동파형이 램프파형일 때의 주파수 처핑을 고려하기 위하여 시간에 비례하는 전류의존 항을 추가하여야 하지만 온도효과를 고려할 때 이미 시간에 비례하는 항을 포함시켰으므로 이를 특별히 고려할 필요는 없다.

3. 신호 처리의 원리와 시스템 구성

FP 간섭계 주변의 온도 등 환경이 변할 경우 FP 공극의 광 경로 변화에 의해 간섭 무늬가 좌우로 이동하게 되는데 FP 간섭 센서의 신호처리 장치는 간섭 무늬의 이동량을 정밀하고 정확하게 측정하여야 한다.

그림 2(a)는 LD의 구동 전류를 램프 파형으로 하고, LD 출력 광 주파수 변화의 크기가 전류 크기에 비례한다고 가정하였을 때의 각종 파형을 보인 것이다. 게이팅 신호는 LD의 광출력이 일정값 이상인 영역을 선택하기 위한 신호로서 이 신호가 high인 기간 동안 FP간섭계 출력과 LD 구동전류를 비교한 비교기 출력을 신호처리에 이용하며, 피측정량이 온도일 때 온도의 증감방향에 따른 비교기 출력의 변화는 그림 2(b)와 같다. 간섭무늬 이동량은 게이팅 신호가 high일 때의 비교기 출력에서 첫번째 하강 또는 상승 에지(edge)를 기준하여 좌우로 이동한 크기를 말한다.

위의 원리를 채택한 광섬유 센서 시스템의 구성을 그림 3에 보였다. 시스템은 광학계, 아날로그 회로부, 그리고 디지털 회로부로 구성된다. 광학계는 파장이 1550 nm인 LD(Nortel, model LC155W4056), DC (3 dB coupler), 공극 길이(cavity length)가 1.52 cm이고 반사율이 각각 약 4 %인 거울 내장형 FP 간섭계, 그리고 sensor PD로 구성되어 있다. 신호처리기는 광 시스템을 구동하기 위한 아날로그 회로부와 FPGA에 구현

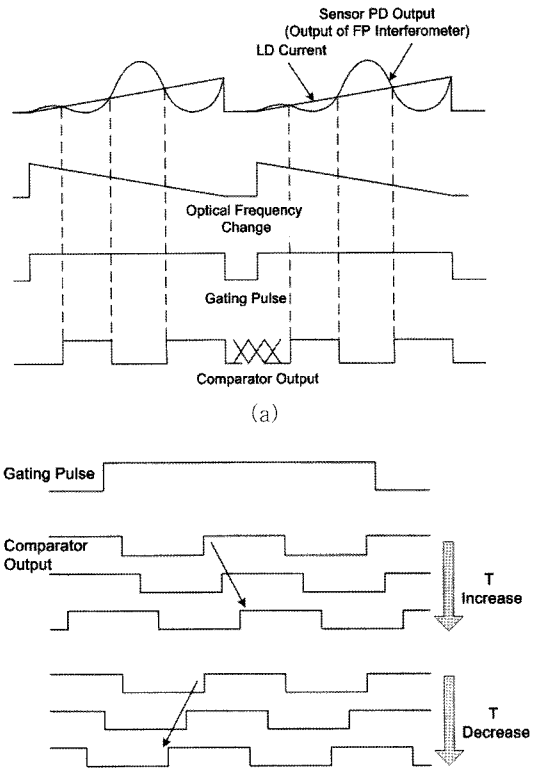

그림 2. 램프변조를 이용한 신호처리기에서의 신호 파형 (a) 과 피측정 신호의 변화에 따른 신호의 거동(b)
Fig. 2. Waveforms in the signal processor adopting the ramp modulation technique (a) and signal behavior with change in measurand (b).

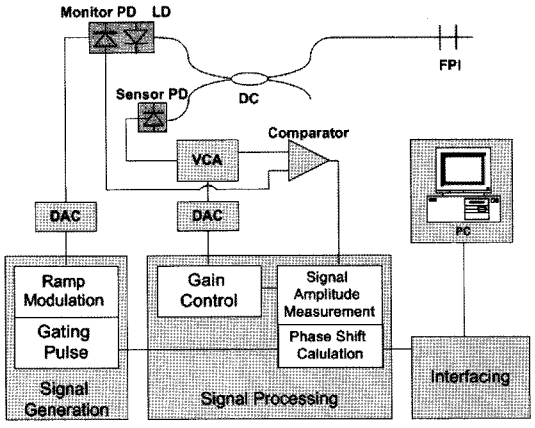

그림 3. 전체 센서 시스템 구성도
Fig. 3. Block diagram for the whole sensor system.

된 디지털 신호처리부로 구성되었으며, 디지털 신호처리부에는 LD 변조신호의 발생, 간섭무늬 이동량의 측

정, 그리고 측정된 결과를 PC로 전송하기 위한 인터페이스 기능 등이 포함되어 있다.

신호처리부의 동작원리는 다음과 같다. 디지털 신호처리부 내의 신호생성부에서 만든 램프 신호에 의해 LD가 구동되며, 구동전류는 LD 모듈 내 monitor PD (MPD)에 의해 확인된다. FP 간섭계 주위의 온도가 변할 때의 간섭무늬의 이동은 sensor PD(SPD)의 출력을 통해 확인한다. SPD 출력과 MPD 출력을 서로 비교 가능할 정도로 증폭하고 필터링 한 후 비교기에서 비교하며, 비교기 출력의 변화를 디지털 신호처리부에서 위상이동의 크기로 변환하고, 그 결과를 PC에서 확인하도록 구성하였다. 간섭무늬 이동에 대한 측정 속도는 초당 20,000회로 설정하였다.

신호 생성부에서는 레이저 다이오드를 구동하기 위한 램프변조 신호와 게이팅 신호를 생성한다. LD를 램프파형으로 변조하면, 펄스구동의 경우에 비해 주파수 처핑 특성이 직선에 가깝게 된다. 광 주파수 변화가 선형성을 갖도록 LD를 구동하는 경우 비교기 출력신호에서 각 구간은 그림 2에서와 같이 등간격이 된다. 따라서 램프파형으로 LD를 변조할 때 MPD 출력과 SPD 출력의 비교 출력은 펄스 구동 때에 비해 등간격에 가깝게 보일 것이다(그림 2의 간섭계 출력참조). 이는 비교기 출력 에지의 위치와 피측정 대상량의 관계가 선형성을 가짐을 의미하며, 따라서 비교적 간단한 방법으로 간섭무늬 이동량을 측정할 수 있게 된다. 그러나 2절에서 언급한 바와 같이 완전한 선형성을 보장하기 위해서는 시간에 대해 선형적인 램프파형과는 약간 다른 변형 램프파형이 필요하며, 이를 구하는 방법이 소개되기도 하였다[6]. 선형적인 광 주파수 변화를 유도하는 정확한 구동파형을 구하려면 LD의 동작온도에 대한 임펄스 응답함수를 구하여야 하며, 이를 위해서는 LD를 펄스구동하면서 광주파수 변화를 정확히 측정하여야 한다. 그러나 LD 출력의 광 주파수에 관련된 시간 상수가 아주 짧아 정확한 측정은 현실적으로 불가능하다. 2절에서의 논의에 따르면 선형적 광 주파수 변화를 얻기 위한 변조파형은 시간에 비례하는 항, 즉 램프파형에 1~2개의 지수적으로 증가하는 항을 포함하여야 한다. 그러나 일반적인 경우 LD칩에 대한 시정수와 토대에 대한 시정수의 차이가 상당할 것으로 예상되고 2개의 지수항을 가질 경우 변조파형을 모델링할 때의 난이도가 급격히 증가한다는 점을 고려하여 선형적 광 주파수 변화를 얻기 위한 변조파형은 식 (3)의 형태를 가져야 하는 것으로 가정하였으며, 실험을 통하여 다음의 최적 변조파형을 구하였다.

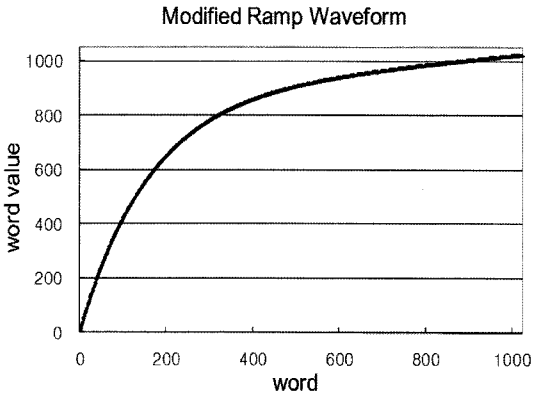

그림 4. 변형 램프변조 신호
Fig. 4. Sketch of the modified modulation waveform.

$$I(t) = \beta t + \gamma(1 - e^{-t/\tau}) \tag{3}$$

여기서 $\beta = 3.67 \times 10^{13}$, $\gamma = 5.2 \times 10^{9}$, $\tau = 4 \times 10^{-6}$로서 그림 4에 식 (3)의 변형 램프파형을 보였다.

변형 램프변조는 word length가 9 bits인 1024개 word의 파형 데이터를 FPGA 내부의 EAB(Embedded Array Blocks)에 저장한 Look-up table(LUT)을 순서대로 읽어 구현하였으며, 1024개의 word를 읽는데 51.2 μs, 즉 램프신호의 주기를 51.2 μs(주파수 약 20 kHz)로 설정하였다.

외부 물리량의 변화에 의해 FP 간섭계의 간섭무늬가 이동하여 SPD의 출력 신호가 이동하므로 MPD의 출력 신호와 비교한 비교기 출력신호도 함께 이동한다. FPGA의 신호처리부에 입력된 비교기 출력신호는 위상 이동량을 계산하는데 사용되며, FP 간섭계의 위상 이동량 계산을 위한 신호처리 순서도를 그림 5에 보였다. 신호생성부에서 생성된 램프변조 읽기용 카운트 신

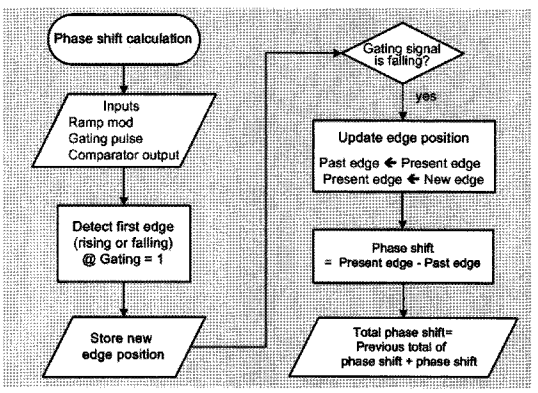

그림 5. 광위상 이동량 계산 순서도
Fig. 5. Flowchart for the calculation of the optical phase shift.

호(그림 4에서의 word)와 게이팅 신호 그리고 FPGA 외부의 비교기에서 비교 출력을 입력으로 받는다. 게이팅 신호가 High인 동안 비교기 출력의 첫 번째 에지를 검출하여 이 때 해당하는 카운트 값을 저장한다.

게이팅 신호가 Low로 바뀔 때 새로 입력된 간섭무늬의 정보와 직전 간섭무늬의 정보를 이용하여 위상 이동량을 계산할 수 있다. 외부 물리량의 변화에 의한 광섬유 FP 간섭계의 간섭 위상 변화량은 현재 에지의 위치 값과 이전 에지의 위치 값의 차이로부터 구해지며, 여기서 얻어진 위상 변화량은 피측정량에 일대일 대응한다. 매 측정 주기당 위상변화량의 크기에 따라 다양한 경우가 발생하지만 측정주기 동안의 위상이동량이 지나치게 크지 않은 경우 연속하는 두 측정주기 동안 에지 위치의 차이로서 위상 변화량을 구할 수 있으며, 측정값의 변화량을 누적함으로써 시스템 동작시점 이후의 총 변화량으로서 피 측정값을 측정할 수 있다. 측정 결과는 데이터 분석과 저장을 위해 PC로 전송된다.

4. 실험 및 결과

그림 6과 그림 7은 LD에 주기가 약 50 μs인 변조신호를 인가하였을 때 오실로스코프로 측정된 파형을 보인 것으로 그림에서 MPD의 출력, FP 간섭계의 간섭 파형을 보여주는 SPD의 출력, 두 신호의 비교 출력, 그리고 게이팅 신호를 함께 보였다. 그림 6은 LD가 램프변조 되었을 때 측정된 파형이며, 그림 7은 LD의 구동전류가 변형 램프일 때의 측정 파형이다. 실험에 사용된 LD의 문턱전류는 I_{th}=16 mA 로서 그림 6의 경우 바이어스 전류는 15 mA, 램프의 피크값은 50 mA이었으며, 그림 7에서는 바이어스 전류 0 mA, 변형 램프의 피크값 65 mA이었다.

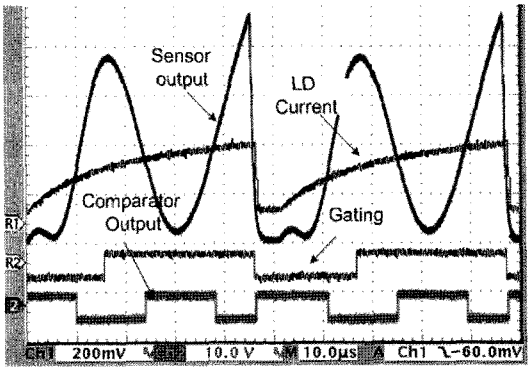

그림 7. 변형 램프신호로 구동시의 측정파형
Fig. 7. Oscilloscope traces of the signals with modified ramp modulation technique.

LD를 램프변조한 경우 주입 전류에 의한 광 주파수 변화가 비선형적이므로 간섭무늬의 간격이 일정하지 않으며, 따라서 그림 6에서와 같이 비교기 출력의 간격이 일정하지 않다. 선형적인 광 주파수 변화를 얻기 위해 그림 4의 변형 램프신호로 LD를 구동할 때의 측정 파형을 그림 7에 보였으며, 여기서 간섭무늬와 비교기 신호가 등간격임을 확인할 수 있다. FP간섭계 주위환경이 변하면 SPD에서 관측된 간섭 출력이 이동하게 되고, 비교기 출력도 이와 함께 이동하게 된다. 그림 7에서 게이팅 신호를 제외한 모든 파형은 간섭계 주변의 온도가 증가할 때 오른쪽으로 이동한다.

그림 8은 전체시스템의 사진을 보인 것으로 왼쪽 위의 디지털 오실로스코프 상에 파형이 관측되고 있으며, 오른쪽 아래의 핫 플레이트 위에 FPI 센서가 올려져 있다. 오른쪽 위의 것은 드리프트 측정실험에 사용된

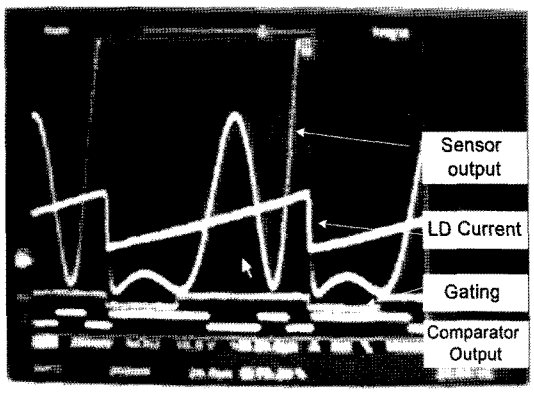

그림 6. 램프신호로 구동할 때의 측정파형
Fig. 6. Oscilloscope traces of the signals with ramp modulation technique.

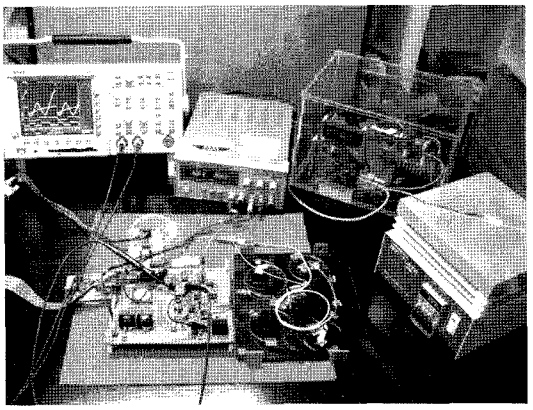

그림 8. 평가용 계측기를 포함한 전체 시스템의 사진
Fig. 8. Photo of the entire system with instruments for evaluation.

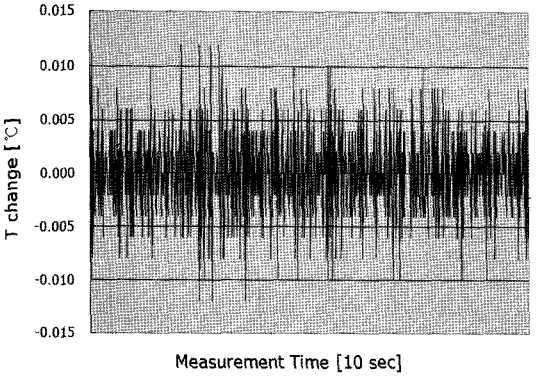

그림 9. 시스템 잡음 평가를 위한 측정결과
Fig. 9. Random walk measurement for system noise characterization.

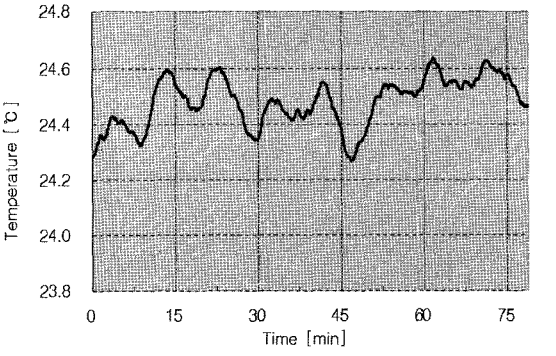

그림 11. 드리프트 측정결과
Fig. 11. Drift test for the implemented fiber-optic sensor.

온도챔버로서 드리프트는 0.2 °C 내외이고, 왼쪽 아래의 리본 케이블을 통하여 PC에 연결되었다. 센서시스템은 빨간색 판위의 왼쪽에 놓인 신호처리 회로부와 빨간색 판위의 오른쪽에 놓인 광학계, 그리고 핫 플레이트 위의 FPI 센서로 구성되어 있다.

완성된 FP 간섭계형 온도 센서 시스템의 성능을 확인하기 위하여 잡음, 드리프트, 선형성 등을 평가하였다. 그림 9는은 잡음 측정 결과를 보인 것으로 FP 간섭계 센서를 약 21 °C의 물속에서 10초 동안 측정한 것으로 random walk는 9.33×10^{-4} rad/$\sqrt{Hz}$ 즉, 5.28×10^{-4} °C/$\sqrt{Hz}$로 계산되었다. 그림 10은 선형성 측정 결과를 보인 것으로 핫 플레이트(hot plate)를 사용하여 약 50 °C(25 °C~75 °C) 범위로 온도를 변화시키면서 반도체 온도센서와의 측정값을 비교한 결과이다. 반도체 온도센서를 표준온도계로 가정할 경우 선형성 오차는 약 ±1.5 %로 계산되었으며, 이로부터 식 (4)의 변조파형이 선형적인 광 주파수 변화를 유도하는 것으로 결론 지을 수 있다. 그림 11은 FP 간섭계 센서를 온도챔버 안에 두고 장시간 측정한 결과로서 센서 시스템의 드리프트(drift)를 측정한 결과 이다. 온도챔버는 가열되거나 냉각되지 않은 상태에서 약 24.4 °C를 유지하고 있는 것으로 확인하였으며, 따라서 그림 10로부터 광섬유 온도센서 시스템의 온도 드리프트는 75분간 0.4 °C이내임을 알 수 있다.

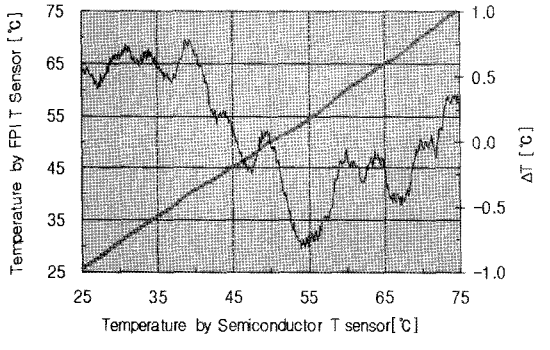

그림 10. 제작된 광섬유 온도센서의 선형성 시험결과
Fig. 10. Linearity test for the implemented fiber-optic sensor.

5. 결 론

변형 램프변조를 이용하는 Fabry-Perot간섭계형 광섬유 센서용 신호처리기를 구현하고 이의 특성을 분석하였다. 변형 램프변조는 LD가 광출력을 발생시키는 동안 선형적인 광 주파수 변화를 얻기 위한 것으로 LD의 구동전류가 시간에 비례하는 항과 지수함수적으로 증가하는 항의 2개항 만으로 선형화 오차가 1.5 % 이내인 센서를 구현할 수 있는 것을 확인하였다.

제작된 신호처리기는 초당 측정횟수가 약 20,000회이며, 공극길이가 1.52 cm인 FP간섭계를 온도센서로 사용하는 경우 잡음, 선형성 오차, 드리프트는 각각 5.28×10^{-4} °C/$\sqrt{Hz}$, ±1.5 % 이내, 0.4 °C 측정되었다. 변형 램프변조를 이용한 신호처리방식은 최소수의 광학부품을 필요로 하는 FP 간섭형 광섬유 센서시스템의 구현에 유용하게 사용되어 간섭형 광섬유 센서의 실용화에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, LD의 광주파수 변화를 측정하지 않고도 시간에 비례하는 항과 지수함수 항으로 LD의 광주파수 변화를 선형화 시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

"이 논문은 2007년도 경희대학교 지원에 의한 결과임"

참고 문헌

[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] D. A. Jackson, A. Dandridge, and S. K. Sheem, "Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer", *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 139-141, 1980.

[3] L. C. Gunderson, "Fiber optics sensors", *Optics News*, vol. 15, no. 11, pp. 20-27, 1989.

[4] S. W. Kim, G. W. Seo, J. K. Yoon, S. W. Jang, Y. S. Yu, S. H. Lee, and S. W. Kang, "Side polished fiber optic UV sensor using evanescent coupling of photo-functional polymer", *J. of the Korean Sensors socity*, vol. 11, no. 6, pp. 335-341, 2002.

[5] Y. Yeh, "A signal processing technique for interferometric fiber-optic sensors", *J. of HanKook Kwang-hak Hoeji*, vol. 6, no. 4, pp. 365-372, 1995.

[6] Y. I. Park and H. F. Taylor, "A frequency ramped modulation technique for measurement with fiber optic sensor", *The-6th Conference on Sensor Technology '95*, pp. 86-91, 1995.

[7] C. E. Lee and H. F. Taylor, "Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors", *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 193-194, 1988.

[8] J. G. Kim and Y. H. Yeh, "Measurement of optical frequency change in LD during pulse operation", *The Kyung Hee J. of Laser Eng.*, vol. 17, pp. 19-26, 2006.

[9] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, "Time dependent thermal effects in current modulated semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 7, pp. 497-499, 1981.

강현숙

예윤해

- 센서학회지 제6권 제2호 p.105 참조
- 현재 경희대학교 전자정보대학교수