

## OFDR을 이용한 PZT형 파장가변 필터의 이력 측정

박도현 · 예윤해<sup>†</sup>

경희대학교 전자정보대학 / 레이저공학연구소  
☎ 449-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1

(2007년 10월 11일 받음, 2007년 12월 3일 수정본 받음)

PZT형 파장가변 필터를 이용하여 파장스weep(wavelength-swept) 광원을 구성할 때 발진파장의 변화율을 일정하게 하려면 필터의 이력(hysteresis)특성을 알아야 한다. 이력특성을 무시하고 필터를 구동할 경우 파장스weep 광원을 사용하는 optical frequency domain reflectometry(OFDR) 시스템의 분해능이 떨어진다. 광스펙트럼 분석기(OSA)를 이용하여 필터의 이력특성을 측정할 수도 있지만 측정시간이 너무 길고 실제 구동조건에서의 이력특성은 측정할 수 없다는 문제가 있어 실제 구동조건에서 필터의 이력특성을 고속으로 측정할 수 있는 OFDR의 원리에 기초한 이력 측정법을 제시하였다. 파장스weep 광원과 간섭계, 신호처리 장치, 그리고 PC 프로그램으로 구성된 고속 이력 측정장치를 구현하고, 이를 사용하여 필터 구동조건에서의 이력특성을 측정하였다. 마지막으로 측정된 이력특성을 파장스weep광원의 구동에 적용하여 선형적 파장변화를 얻음으로써 새로운 이력 측정법의 유효성을 검증하였다.

주제어 : Optical frequency domain reflectometry, Wavelength-swept source, PZT, Tunable filter, Hysteresis measurement

### I. 서 론

다양한 종류의 파장가변 필터(wavelength tunable filter: TF) 중에서 PZT형 광섬유 TF<sup>[1-3]</sup>는 분해능이 높은 고속 파장선택 필터로서 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing: WDM) 광통신<sup>[4]</sup>과 광섬유 센서의 구현<sup>[5]</sup> 등에 널리 사용되고 있다. 뛰어난 분해능과 고속 동작능력 때문에 이들 필터는 OFDR을 이용하는 주파수 영역 optical coherence tomography (OCT)용 광원에서의 핵심 소자이며,<sup>[6-10]</sup> fiber Bragg grating (FBG) 센서의 출력으로부터 물리량 정보를 해석하는 데에도 유용하게 사용되고 있다.<sup>[5]</sup> 이들 TF에서 통과파장을 가변하기 위해 사용되는 소자인 PZT 소자는 이력(hysteresis)특성을 가지므로 필터의 통과파장과 인가전압 간의 관계에 비선형성이 존재한다. 따라서 TF의 비선형성 때문에 TF를 사용한 파장 스weep광원(wavelength-swept source)에서 TF를 삼각파 또는 톱니파로 구동하여도 광출력 파장의 변화율은 일정하지 않다. 파장스weep 광원의 파장변화율의 변화는 OCT 또는 FBG 센서 시스템의 구성을 복잡하게 하거나 출력신호의 해석을 복잡하게 하며, 경우에 따라 분해능을 떨어뜨리기도 한다.<sup>[11-14]</sup>

이들 응용에서는 시간에 따른 통과파장의 변화가 선형성을 갖도록 구동할 필요가 있으며, 이를 위해 실제 구동조건에서 TF의 이력특성을 정확히 알아야 한다. TF의 이력특성을 직접적인 방법으로 측정하려면 전압에 따른 PZT의 길이변화를 1 pm 정도의 정밀도로 측정할 수 있는 도구가 있어야 하지만 현실적으로 불가능하다. TF의 이력특성을 간접적으로 측정할 수 있는 범용 계측기로는 광 스펙트럼 분석기(optical

spectrum analyzer: OSA)가 유일하다. 고가의 계측장비인 OSA를 사용하여 TF의 정확한 이력특성을 측정하기 위해서는 전압에 따른 통과파장을 측정하여야 하는데 매 측정마다 OSA가 TF의 가변파장범위 전체(free spectral range: FSR)를 스캔하여야 하므로 측정에 많은 시간이 소요된다. 그리고 측정시간 동안 PZT에 인가된 전력의 가열효과와 주변온도의 변화 때문에 드리프트가 발생하여 이력 측정값에 비교적 큰 오차가 포함될 수도 있다. TF의 구동주파수와 구동전압은 TF의 응용에 따라 바뀌는데 반해 OSA를 이용한 이력특성의 측정에는 최소 10분 이상 소요되는 점을 고려할 때 실제 구동조건에서 TF의 이력 특성을 OSA로 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 여기서 필터의 실제구동조건이란 인가전압의 범위와 구동주파수를 말한다.

본 연구에서는 TF의 비선형성이 OFDR의 출력에 미치는 영향을 이용하여 OSA를 이용하지 않고도 TF의 이력특성을 고속으로 측정할 수 있는 장치에 대한 연구 결과를 기술하였다. 이를 위해 OFDR을 위한 광학계와 신호처리를 결합하여 이력특성 평가장치를 실제로 구현하고, 이를 이용하여 TF의 비선형성을 측정하였다. 마지막으로 측정된 결과로부터 선형적 동작을 위한 구동파형을 구하였으며, 이를 이용하여 TF를 구동할 때의 OFDR 출력을 관측함으로써 비선형성 평가 방법과 장치의 유효성을 입증하였다.

### II. 이 론

그림 1은 PZT형 광섬유 TF의 구성 예를 보인 것으로 반사율이 높은 유전체 거울 2개를 일정간격으로 배치한 Fabry-Perot 간섭계이며, 두 거울 사이에 삽입된 도파관(waveguide)은 회절에 의해 단일모드 광섬유(single-mode fiber: SMF)에서 출력된 출력 빔의 크기가 증가하여 발생할 수 있는 결합손실을

<sup>†</sup>E-mail: yhyh@khu.ac.kr

피하기 위한 것이다.<sup>[1-3]</sup> 통과파장을 바꾸고자 할 때에는 PZT 소자의 인가전압을 변화시켜야 하며, PZT형 광섬유 파장가변 필터의 동작속도는 다른 종류의 필터에 비해 월등히 빠르므로 이들 필터를 사용하여 구성된 그림 2의 파장스위핑 광원이 고속 OCT의 광원으로 주로 사용된다.<sup>[10]</sup> 그림 2는 파장스위핑 광원의 광학구성을 보인 것으로 그림에서 ISO와 PC는 각각 광 아이솔레이터(optical isolator)와 편광제어기(polarization controller)이다.

그림 2의 파장스위핑 광원을 그림 3의 Michelson 간섭계의 광원인 Tunable source로 사용하였을 때 수신기(Receiver)에서의 출력광,  $P_R$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_R = \langle |E_1 + E_2|^2 \rangle = |E_{o1}|^2 + |E_{o2}|^2 + 2 E_{o1} E_{o2} \cos 2\pi[\nu(t) - \nu(t - \tau_o)]t \quad (1)$$

식 (1)에서  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각각 거울  $M_1$ 과  $M_2$ 에서 반사되어 수신기로 입력되는 레이저 파로서 각각 다음과 같이 가정하였다.

$$E_1 = E_{o1} \cos [2\pi\nu(t)t]$$

$$E_2 = E_{o2} \cos [2\pi\nu(t - \tau_o)t] \quad (2)$$

식 (2)에서  $\tau_o$ 는 거울  $M_1$ 과  $M_2$ 에 의한 반사광 간의 시간차로서 광로차가  $L$ 인 경우  $\tau_o = L/c$ ( $c$ 는 빛의 속도)이다. 그림 2

에서 파장스위핑 광원의 광주파수가  $\nu(t) = \nu_o + \gamma t$ 인 경우  $\nu(t) - \nu(t - \tau_o) = \gamma\tau_o$ 이므로 그림 3의 Michelson 간섭계 출력광의 주파수는  $\gamma\tau_o$ 로서  $L$ 에 비례하며,  $\gamma$ 가 시간의 함수인 경우 출력광의 주파수 또한 매 순간 변한다. 이렇게 시간에 비례하여 광주파수가 변하는 광원을 간섭계에 인가하여 광로차에 비례하는 주파수의 광출력을 발생시키는 것을 OFDR이라고 한다.

OFDR에서는 일반적으로 간섭계의 출력을 스펙트럼 분석하여 광로차를 측정한다. 따라서 파장스위핑 광원의 광주파수가  $\nu(t) = \nu_o + \gamma t$ 로 표현되고  $\gamma$ 가 상수인 경우 OFDR 출력광의 주파수는  $\gamma\tau_o$ 로서  $L$ 에 비례하며, 스펙트럼의 폭은 이론적으로 0이다.  $\gamma$ 가 상수가 아니라  $\nu_o$ 를 중심으로 변화폭  $\Delta\nu$ 를 가지는 경우 출력광의 주파수 스펙트럼은 중심주파수  $\nu_o\tau_o$ 를 중심으로 폭  $\tau_o\Delta\nu$ 를 가지며, 그 결과 중심주파수와 스펙트럼 폭 모두 간섭계의 광로차에 비례한다. 따라서  $L$ 이 큰 경우, 즉 측정 깊이가 증가할 때 스펙트럼의 폭은 증가하고, 광출력의 세기는 약해지므로 주파수 측정의 분해능이 급격히 떨어질 수 있다. OFDR을 이용하여 2차원 단면의 내부를 이미징하는 OCT에서는 광원에서 광주파수 변화의 비선형성이 이미지의 질을 떨어뜨리는 요인이 된다.

그림 4는 이력이 큰 특정 PZT형 광섬유 TF의 구동전압과 통과파장과와의 관계를 측정한 것으로 TF에 약 4 주기의 삼각파(주파수 1 mHz 이하)를 인가하면서 통과파장의 변화를 측정한 것이다. 처녀상태(virgin state)에서부터 시작하여 통과

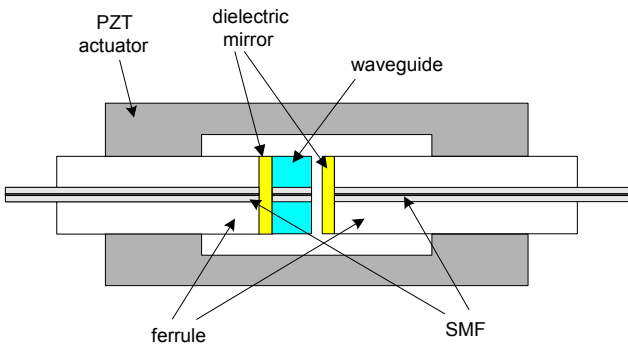


그림 1. PZT형 파장가변 필터의 구성례.

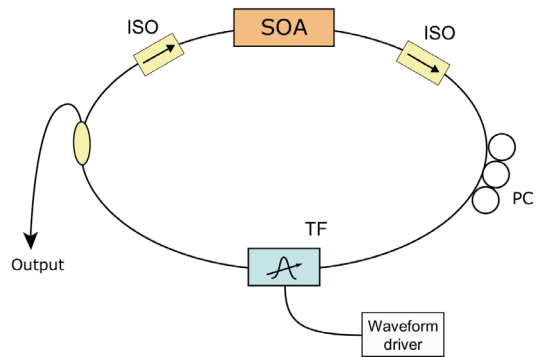


그림 2. 파장스위핑 광원의 구성: SOA; 반도체 광증폭기, ISO; 광 아이솔레이터, TF; 파장가변 필터, PC: 편광조절기.

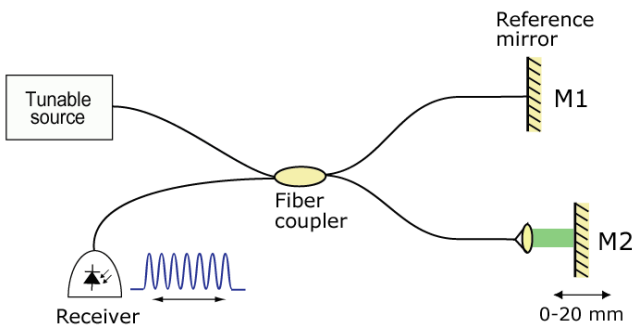


그림 3. OFDR용 광학계로 구성된 광섬유 Michelson 간섭계.

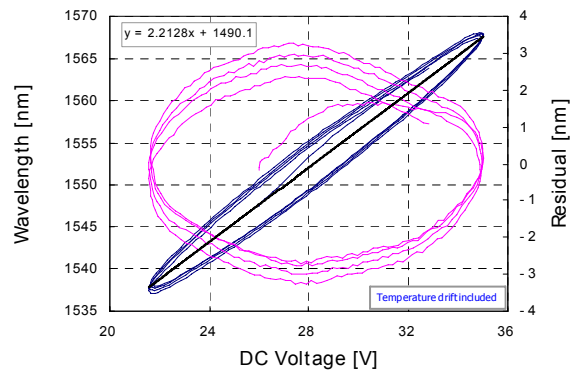


그림 4. 파장가변 필터의 이력특성 측정례 1.

파장의 변화와 함께 약 10% 정도의 상당히 큰 이력 특성이 보이며, 필터의 온도변화에 의한 것으로 추정되는 드리프트 성분(시간에 따라 통과파장이 증가하고 있음)도 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 구동전압과 통과파장과의 비선형성은 간섭계의 경로차가 일정하고, 필터의 구동파형으로 시간에 따른 전압의 변화율이 일정한 삼각파 또는 톱니파를 사용하는 경우에도 출력광의 주파수가 일정하지 않다는 것을 의미하며, 역으로 간섭계의 광로차를 고정한 상태에서 필터의 구동파형을 삼각파 또는 톱니파로 하였을 때 간섭계의 출력주파수를 측정하면 필터, 즉 PZT의 이력특성을 측정할 수 있다는 것을 의미한다.

따라서 파장가변 필터의 이력특성을 측정하기 위해서는 그림 3의 간섭계를 구성한 다음 Michelson 간섭계의 경로차를 적절한 값으로 고정한 상태에서 삼각파 또는 톱니파로 TF를 구동하는 동안 구동 전압에 따른 간섭계 출력광의 주파수를 측정하면 된다. 그림 5는 이력특성 측정의 원리를 보이기 위한 것으로 파형 (a)는 필터의 PZT에 인가된 톱니파이며, 이때 수신기 출력은 식(1)에 따라 그림 5의 파형 (b)와 같다. 파형 (c)는 PZT의 구동전압이 특정 값일 때의 주파수를 측정하기 위해 사용한 FFT(fast Fourier transform) window로서 window의 폭은 수신기 출력파형이 최소 1주기 이상 포함되도록 하여야 한다. 파형 (d)와 (e)는 각각 window를 거친 수신기 출력과 window를 거친 출력파형을 FFT하여 계산된 주파수 스펙트럼으로 실제의 경우 사각(rectangular) window 대신 주파수 스펙트럼의 선택성을 개선하기 위해 적절한 window를 사용할 필요가 있으나 이력특성을 측정할 때에는 사각 window만 사용하였다.

### III. 이력특성 평가장치 시스템의 구성

그림 6은 이력특성을 측정하기 위한 신호처리 장치의 블록 구성을 보인 것으로 광신호 입력과 전기신호 입력 각각을 위한 2개의 아날로그 채널과 TF 구동파형 채널, 그리고 측정신

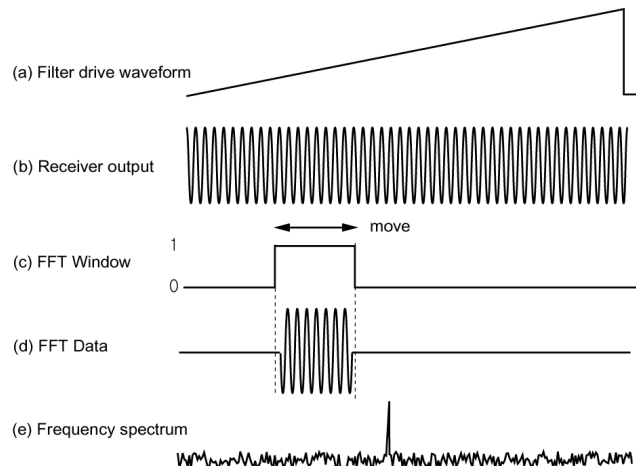


그림 5. OFDR을 이용한 이력측정의 원리.

호에 대한 FFT windowing과 FFT 등 신호분석을 PC에서 수행하기 위한 USB 연결 등으로 구성되어 있다.

PIN/Preamp Receiver로 표기된 광입력 채널에서는 수신기의 출력을 증폭한 다음 고속으로 AD 변환하여 FPGA(field-programmable gate array)로 입력한다. 전기신호 입력채널은 PZT 구동신호를 측정하기 위한 것으로 구동파형 채널의 파형이 아니라 TF의 PZT에 인가된 실제 신호를 관측하여 PC 상에 구현된 오실로스코프의 트리거 입력으로 사용하기 위한 것으로 구성은 광입력 채널과 동일하다. TF 구동파형 채널은 필터 구동파형을 발생시켜 직접 구동하는 회로로서 direct digital synthesis(DDS) 방식으로 주파수, 파형, 그리고 진폭 조절이 가능하도록 FPGA 내부에 구현된 임의파형 발생장치, TF의 구동조건으로 조정된 출력을 아날로그 신호로 변환하는 DA 변환기, 그리고 일종의 전력증폭기에 해당하는 Waveform driver로 구성되어 있다. PC 프로그램은 오실로스코프 기능과 스펙트럼 분석 기능을 갖추었으며, 주파수 분석과정에서 다양한 종류의 FFT window를 선택할 수 있도록 하였다. 그리고 기타 시스템의 동작에 필요한 제어와 타이밍 발생장치는 모두 FPGA에 구현되었다.

그림 7은 제작된 측정장치의 사진을 보인 것으로 좌측 중간에 놓여있는 상자 안에는 그림 6에서 실선 내부의 구성을

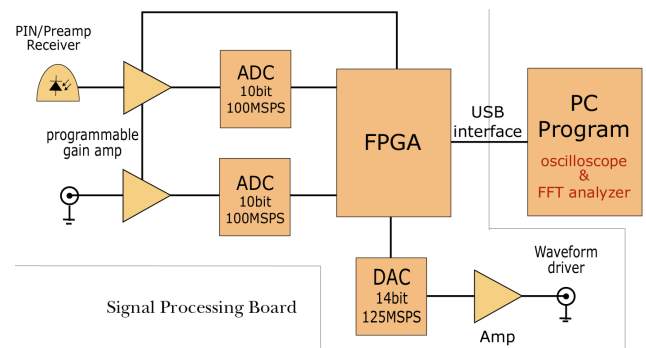


그림 6. 이력측정 장치의 아날로그 신호처리부의 블록구성.

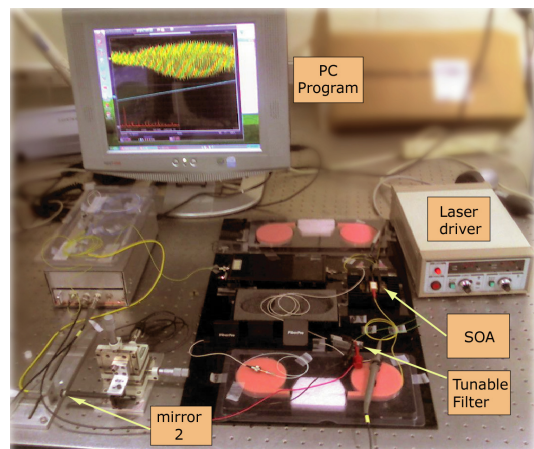


그림 7. 제작된 이력측정 장치의 사진.

가진 신호처리가 있으며, 아래쪽 검은 판위의 것은 그림 2와 그림 3이 결합된 광학계, 그림 6에서 실선 바깥의 블록은 모니터 상에 보이고 있다.

#### IV. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 이력특성의 평가에 사용된 TF는 본 연구실이 보유중인 다수의 LambdaQuest사 TF 중에서 이력특성이 우수한 필터를 선택한 것으로 이 필터의 이력특성은 그림 8과 같다. 그림 8의 데이터를 얻기 위해 사용된 OSA는 Agilent사의 86142A로서 PZT전압을 8V에서 시작하여 매 14초 마다 0.5V 단위로 18V까지 증가시켰다가 감소시키는 과정을 반복하여 측정된 것으로 PZT에 인가된 전압을 삼각파로 보았을 때 주기는 약 563초이고, 측정횟수는 총 1260회에 측정에 소요된 시간은 4.8 시간이었다. 매 측정당 소요시간은 14초로서 OSA를 PC와 연결하여 0.04 nm의 분해능으로 자동 측정할 때의 최소 소요시간이었으며, PZT 전압은 통과파장을 1533 nm부터 1568 nm의 범위로 설정하기 위하여 선택되었다. 4.8시간동안 총 30 사이클의 삼각파를 반복적으로 인가하면서 측정된 것은 처녀상태에서 출발하여 정상상태에 이르기까지의 과도상태 동안의 데이터를 제거함과 동시에, 온도에 의한 드리프트까지 제거한 순수한 이력특성을 얻기 위해서였다. 그림 8은 온도 드리프트와 과도상태에 해당하는 처음 몇 주기동안의 데이터를 제거한 측정결과로서 구동파형이 삼각파이고 구동전압의 변화량이 10 V일 때 통과파장의 이동량은 약 35 nm, 이력의 크기는 약 0.8 nm(파장 이동량의  $\pm 2.3\%$ ) 내외로서 그림 4의 경우에 비해 1/4 ~ 1/5의 크기를 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 OSA를 이용하여 이력특성을 측정하려면 수 시간이상의 측정시간이 필요한데 PZT 마다(모델명이 동일한 경우에도) 구동조건 마다 이력특성에 차이가 있다는 점을 고려하면 OSA를 이용한 이력특성의 측정은 현실적으로 불가하다고 할 수 있다.

그림 9는 TF에 주파수가 100 Hz이고, 전압범위가 -6~10 V

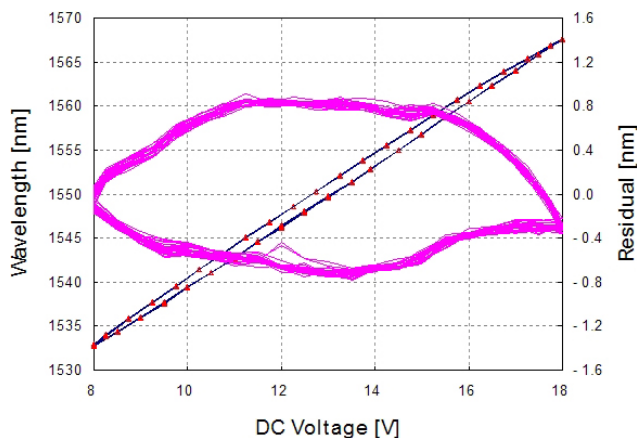


그림 8. 파장가변 필터의 이력특성 측정례 2. 약 5시간 동안 측정하여 드리프트를 제거하였다.

인 톱니파를 인가하였을 때의 각종 파형을 PC 프로그램을 사용하여 PC window상에 보인 것으로 맨 위 파형은 Michelson 간섭계의 광출력이고, 가운데 것은 TF에 인가된 파형이며, 맨 아래파형은 맨 위 파형을 FFT한 주파수 스펙트럼이다. 그림 10은 그림 3의 간섭계에서 광로차  $L$ 을 2 mm 단위로 증가시킬 때의 광출력을 주파수 측정의 분해능이 우수한 Hanning 윈도우를 거쳐 FFT한 출력을 중첩하여 보인 것으로 II절에서 예상한 대로 스펙트럼의 중심주파수와 스펙트럼의 폭 둘 다 광로차  $L$ 에 비례하는 것으로 보아 이력특성 때문에 TF의 통과파장이 구동전압(시간 축)에 비선형적임을 확인할 수 있다. 이 그림에서는 가로축이 광로차  $L$ 로 표현되었는데 이를 주파수로 바꾸려면 2 mm를 3300 Hz로 환산하면 된다. 또한 그림 8과 같이 이력이 특별히 작은 TF를 사용하는 경우에도 TF의 비선형성이 OFDR의 출력(즉, OCT의 성능)에 미치는 영향이 확인하라는 점과, TF의 이력의 크기가 그림 4의 경우에서와 같이 파장이동량의 10%에 달하는 경우도 있다는 점을 고려하면 파장스윙 광원의 구현에 사용될 TF의 이력특성은 반드시 측정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

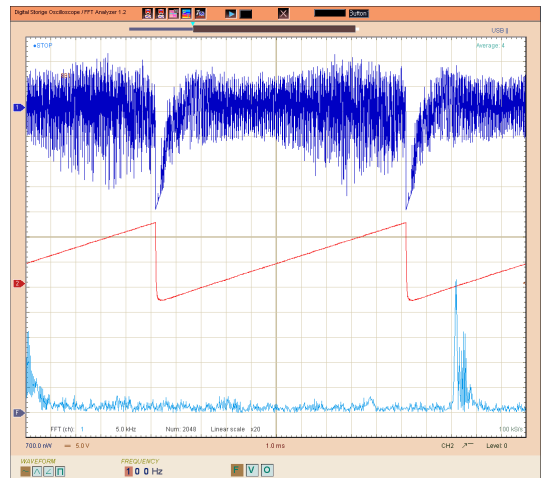


그림 9. 제작된 측정 장치에서의 신호 파형: (위) 광출력, (중간) PZT 구동 톱니파, (아래) 광출력의 FFT 결과.

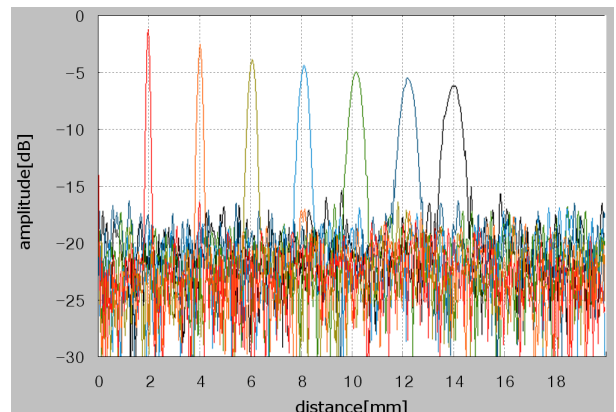


그림 10. 필터의 이력특성을 고려하지 않았을 때의 OFDR 출력 례.



그림 11은 이력특성의 측정과정을 보인 것으로 TF의 인가 전압에 따른 파장스weep 광원의 주파수 변화율을 측정하기 위하여 1 V 전압범위에 해당하는 사각 window를 이동해가면서 선택한 간섭신호를 Hanning windowing하고, 이를 FFT하여 간섭출력의 주파수를 측정하였다. 이 과정을 위해 TF 구동파형인 톱니파 1주기 동안의 광출력을 PC로 전송하여 저장하였으며, 저장된 데이터에서 사각 window로 선택한 데이터가 그림 11의 맨 위 파형이다. 따라서 그림 11에서 맨 위 파형은 1V 전압범위에 해당하는 광출력 파형이고 맨 아래 파형은 Hanning windowing후 FFT한 결과로서 스펙트럼 피크의 위치가 간섭계 출력의 주파수이다. PC 프로그램은 저장된 구동신호 1주기 동안의 데이터를 사용하여 간섭계 출력광의 주파수를 자동으로 계산하도록 설계되었으며, 이 결과로부터 파장변화율을 계산하였다. 측정된 주파수는 그림 3의 Tunable source의 파장변화율에 비례하므로 측정결과로부터 광원의 파장변화율을 계산할 수 있다. 또, 계산에 사용된 광출력은 구동신호 한 주기 동안의 출력이므로 수집된 데이터를 기준으로 측정시간을 1/100 초로 생각할 수 있으며, 이

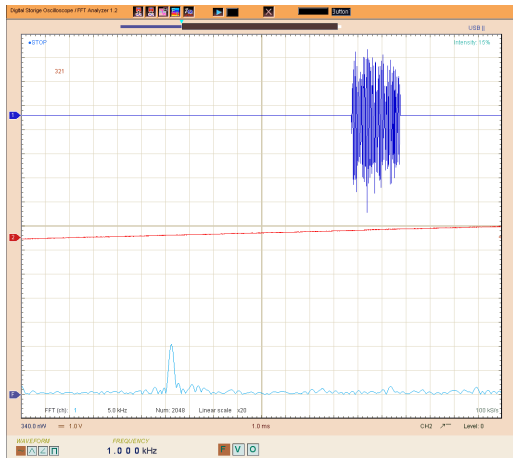


그림 11. 이력 측정 과정에서의 신호파형: (위) 사각파 window를 거친 광출력, (중간) PZT 구동 톱니파, (아래) 사각파 window를 거친 광출력의 FFT 결과.

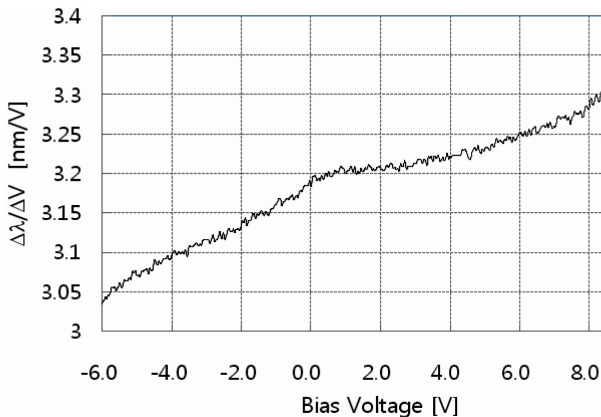


그림 12. 제작된 측정 장치를 사용하여 측정한 TF의 파장변화율.

과정을 통하여 구한 TF의 이력특성은 그림 12와 같다.

그림 12의 측정결과를 보면 PZT 전압에 따른 필터의 통과 파장 변화율이 약 3.2 nm/V를 중심으로 약±5% 범위 내에서 변하는 것을 알 수 있다. 또한 필터 통과파장의 변화율을 일정하게 하려면 파장변화율이 평균값보다 작은 경우에는 TF 인가전압의 변화율을 키우고, 그 반대인 경우에는 TF 구동파형의 변화율을 줄여야 한다는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 따라서 PZT 전압에 대한 필터의 통과파장 변화율이 3.05 nm/V 인 시점에서는 통과파장 변화율을 0.16 nm/V 만큼 키워야 평균값인 3.2 nm/V가 되므로 그림 9의 TF에 인가하였던 톱니파형의 기울기에 비해 5% 크게 하여야한다. 동일한 원리에 기초하여 그림 12의 파장변화율, 즉 TF의 이력특성 측정값으로부터 필터의 통과파장 변화율을 일정하게 하는 TF 구동파형을 구할 수 있으며, 그 결과를 그림 13에 보였다. 그림 13은 파장변화율을 일정하게 유지하기 위한 전압파형을 보인 것으로 톱니파형과의 차이를 보기가 쉽지 않다. 따라서 직선과의 편차를 얇은 색의 선으로 그려 파장변화율을 일정하게 하기 위한 보상전압의 크기를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 그림 13의 파형으로 TF를 구동하면서 그림 10의 실험을 반복한 결과를 그림 14에 보였다. 스펙트럼 폭이 광로

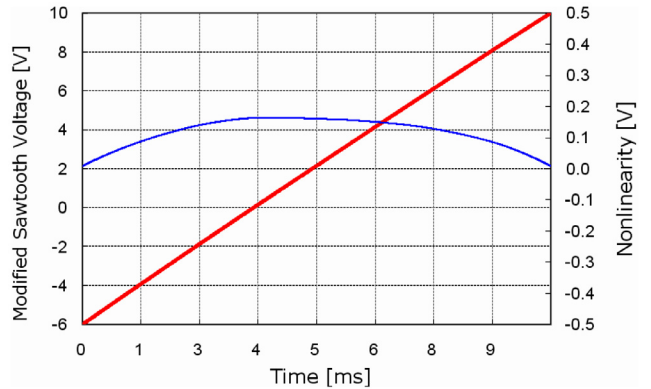


그림 13. 이력특성을 고려하여 만든 파장변화율을 일정하게 하는 구동파형.

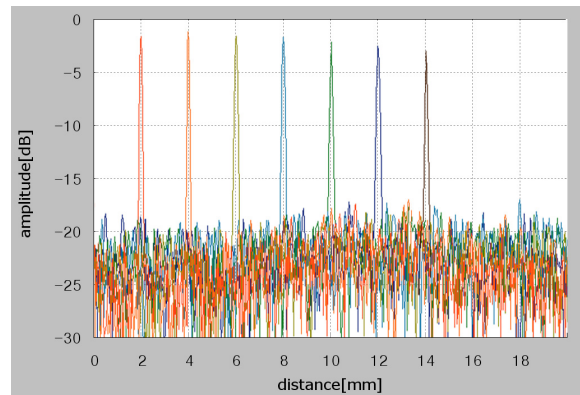


그림 14. 필터의 이력특성이 고려되어 파장변화율이 일정한 광원을 사용하였을 때의 OFDR 출력 레.

차에 비례하지 않고 비교적 일정한 것으로 보아 비선형성이 제거된 것으로 결론을 내릴 수 있다.

### V. 결 론

PZT 형 파장가변 필터를 사용한 파장스윙 광원은 필터의 이력특성 때문에 OFDR 출력 스펙트럼의 폭이 측정거리에 비례하여 증가하며, 따라서 OFDR 시스템의 분해능이 측정 깊이에 비례하여 떨어질 수 있음을 확인하였다. 또, 광 스펙트럼 분석기를 사용한 이력특성의 측정에 수 시간 이상의 시간이 소요됨을 실험으로 확인하고 OFDR을 이용하여 필터의 실제 구동조건에서 실시간으로 이력특성을 측정할 수 있음을 제안하였다. 제안된 방식을 적용한 이력측정 장치를 파장스윙 광원과 간섭계, 신호처리 장치, 그리고 PC 프로그램을 결합하여 제작하였다. 제작된 장치의 이력측정시간은 필터의 구동 신호의 주기와 같아서 구동주파수가 100 Hz일 때에는 실험 측정시간이 1/100초이었다. 측정된 결과를 필터구동 파형의 설계에 이용하여 파장변화율이 일정한 파장스윙 광원을 구현함으로써 제안된 측정방식의 유효성을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과임.

### 참고문헌

[1] J. Stone and D. Marcuse, "Ultrahigh finesse fiber fabry-perot interferometers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 382-385, 1986.

[2] J. Stone and L. W. Stulz, "Pigtailed high-finesse tunable fibre Fabry-Perot interferometers with large, medium and small free spectral ranges," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 15, pp. 781-783, 1987.

[3] 예운해, "파장가변 필터를 위한 Plane-Concave Fabry-Perot 공진기의 해석," *한국광학회지*, vol. 15, no. 6, pp. 495-502, 2004.

[4] C. M. Miller and F. J. Janniello, "Passively temperature-

compensated fibre Fabry-Perot filter and its application in wavelength division multiple access computer network," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 25, pp. 2122-2123, 1990.

[5] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Optics Lett.*, vol. 18, no. 16, pp. 1370-1372, 1993.

[6] Oleg V. Kazharsky, "Optical waveguides testing with diode lasers," *Optics and Photonics News*, pp. 52-54, Oct. 1996.

[7] M. S. Oh, H. S. Park, and B. Y. Kim, "Optical frequency-domain reflectometry based on wavelength-swept mode-locked fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 266-268, 2003.

[8] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science*, vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.

[9] R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira, J. Fujimoto, and K. Hsu, "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles," *Opt. Express*, vol. 13, no. 9, pp. 3513-3528, 2005.

[10] R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, "Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol. 14, no. 8, pp. 3225-3237, 2006.

[11] C. Miller, T. Li, J. Miller, F. Bao, and K. Hsu, "Multiplexed fiber gratings enhance mechanical sensing," *Laser Focus World*, pp. 119-123, Mar. 1998.

[12] 김종섭, 송민호, "시간지연 샘플링을 이용한 광섬유 격자 센서어레이의 선형 복조," *한국광학회지*, vol. 15, no. 1, pp. 34-38, 2004.

[13] 구현덕, 이상배, 최상삼, 송석호, 김필수, 조남소, 김남식, "파장 가변 협대역 투과 필터를 이용한 광섬유 격자 동적 센서 시스템," *한국광학회지*, vol. 12, no. 2, pp. 91-97, 2001.

[14] S. H. Yun, D. J. Richardson, and B. Y. Kim, "Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 843-845, 1998.

## Measurement of Hysteresis in PZT-Type Tunable Filters Utilizing OFDR

Do Hyun Park and Yunhae Yeh<sup>†</sup>

*School of Electronics and Information / Institute for Laser Engineering Kyung Hee University, YongIn, 449-701, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: yhyh@khu.ac.kr*

(Received October 11, 2007, Revised manuscript December 3, 2007)

Implementation of a wavelength-swept source with constant tuning rate adopting a PZT-type tunable filter, requires the knowledge of hysteresis of the filter used. The hysteresis must be considered to avoid any degradation in resolution of the optical frequency domain reflectometry (OFDR) system. An optical spectrum analyzer (OSA) could be used to do the hysteresis measurement, but its measurement time is too long for the high-speed driving conditions for the filter. We proposed a new hysteresis measurement method based on OFDR, which could measure the hysteresis in a real driving condition. A hysteresis measurement apparatus consisted of wavelength-swept source, interferometer, signal processing unit, and PC program is built and used to do the measurement. It is concluded that the new method is useful in the measurement of hysteresis at real driving conditions by successfully implementing a swept-wavelength source whose wavelength change is linear in time.

OCIS code : 120.0120, 120.2230, 120.2440, 110.4500.