

## 구조물 안전 모니터링용 파장 스위핑 레이저를 위한 스위핑 자동 선형화

이덕규 · 엄진섭<sup>†</sup>

### Sweeping Automatic Linearization for Wavelength Swept Laser Used in Structure Safety Monitoring

Duk-Kyu Lee and Jinseob Eom<sup>†</sup>

#### Abstract

In this study, a novel method for sweeping automatic linearization of wavelength swept laser is proposed. Through the test performed on the implemented laser, the linear sweeping is held up well with a 97% decrease in nonlinearity, and 60 nm sweeping range, 1 kHz sweeping frequency, and 8.8 mW average optical power were obtained. The proposed method uses fiber Bragg grating array, optical-electronic conversion circuit, FPGA embedded module, and a LabVIEW program to generate new compensated wave patterns which were applied to the fiber Fabry-Perot tunable filter. Linear sweeping can reduce the cumbersome and time-consuming recalibration process required for nonlinear sweeping. Additionally, the proposed method provides more accurate measurement results for the structure safety monitoring system.

**Keywords:** Structure safety monitoring, Wavelength swept laser, Linear sweeping, Nonlinear sweeping, FFP-TF

#### 1. 서 론

교량, 댐, 터널 등과 같은 대형 SOC 구조물의 붕괴 위험성을 항상 모니터링 하기 위하여 사용되는 구조물 안전 모니터링 시스템은 전자기계식 센서를 사용하는 전자 시스템 보다 파장 스위핑 레이저(Wavelength Swept Laser) 및 센서로서 광섬유 격자(FBG : Fiber Bragg Grating)를 사용하는 광학 시스템[1-3]이 품질의 우수성 및 유지보수의 편리성 때문에 전자 시스템을 대체하는 최첨단 기술로서 각광받고 있다.

광학 시스템을 기반으로 하는 구조물 안전 모니터링 시스템에서 이의 성능을 결정하는 중요한 요소 중의 하나는 파장 스위핑 레이저의 스위핑 특성이다. 요구되는 스위핑 특성으로는 광대역성, 고속성, 평탄성, 그리고 선형성 등이 있다. 고속 광대역 특성은 설치 가능한 센서의 개수 및 모니터링 빈도를 증가시킨다. 평탄성은 스위핑 전 구간에 걸쳐 광 파워가 일정한 것

으로 그렇지 못한 경우 측정 에러를 야기시킬 수 있다. 한편 더욱 정확하게 구조물에 미치는 응력을 측정하기 위해서는 파장 스위핑 레이저의 발진 파장이 시간에 대해 직선으로 증가 또는 감소하는 스위핑의 선형성이 요구된다.

광섬유 페브리 페롯 파장 가변 필터(FFP-TF : Fiber Fabry-Perot Tunable Filter)는 파장 스위핑 링 레이저 구성에 필수적인 광 필터로서 페브리-페롯 간섭계 구조를 위하여 미러(mirror)가 양쪽의 광섬유 단면에 각각 설치되어 있으며 간섭계 간격 조절을 위하여 한쪽 미러에 압전소자(PZT : Piezoelectric Transducer)가 부착된다. 이때 압전소자에 정현파 전압을 인가하면 세팅 값을 중심으로 간섭계의 미러 간격이 주기적으로 증감하게 되어 광 필터 통과 파장 역시 세팅된 중앙 파장을 중심으로 같은 주기로 가변된다. 이로 인하여 파장 스위핑 링 레이저의 발진 파장도 동일한 중앙 파장을 중심으로 스위핑된다.

일반적으로 압전소자는 온도 및 사용 연한에 따라 동작 특성이 다소 변화하는 경향을 보인다. 이 때문에 동일한 전압 파형을 인가하여도 압전소자의 동작 특성이 항상 일정하게 유지되는 것이 아니라 계절별 온도 및 사용 연한에 따라 변화된다. 따라서 레이저의 비선형 스위핑 특성 역시 계절별 온도 및 사용 연한에 따라 변하게 된다. 이는 항상 일정한 스위핑 특성이 요구되는 파장 스위핑 레이저에서 해결되어야 할 문제로 남는다. 따라서 일반적으로 파장 스위핑 레이저를 이용한 구조물 안전 모니터링 시에는 레이저 가동 때마다 초기의 스위핑 특성에 대한 정보를 획득하고 저장하는 것이 필수적이며, 구조물에 미치

강원대학교 IT대학 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, The School of Information Technology, Kangwon National University)  
1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Kangwon-do 24341, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author: jeom@kangwon.ac.kr

(Received : Jan. 13, 2020, Accepted : Jan. 16, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 응력 계산 시에 이 정보를 이용하여야 한다. 그러나 레이저의 사용이 장시간 지속되는 경우에는 스위핑 특성이 사용 초기와 달라질 가능성도 존재한다. 따라서 이러한 스위핑 특성 변동 문제에 대한 최선의 해결책은 파장 스위핑 레이저가 언제 어디서나 선형 스위핑을 유지하도록 자동 제어하는 것이다. 항상 선형 스위핑이 유지되면 스위핑 특성에 대한 정보를 저장하여 다시 사용하여야 할 필요성이 없어진다. 그리고 모니터링 측정 값을 바탕으로 현재 구조물에 가해지고 있는 응력을 계산하는 과정이 간단하여지고 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 현재 대부분의 파장 스위핑 레이저는 발진 파장 대 시간의 선형성을 충분하게 제공하지 못하고 있다. 이를 해결하기 위하여 획득된 측정 값에 대한 후 보정을 수행하여 발진 파장의 비선형성을 보상[4]해주거나 또는 인가 파형으로 삼각파를 사용하여 선형에 다소 근접한 스위핑을 제공하고 있다.

본 논문에서는 1550 nm 대역의 반도체 광 증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier), FFP-TF, 그리고 편광 조절기(PC : Polarization Controller)를 이용하여 파장 스위핑 링 레이저를 제작하였다. 이는 1 kHz의 왕복 스위핑 속도와 8.8 mW의 평균 출력 광 파워, 그리고 약 60 nm의 파장 스위핑 범위를 나타내었다. 그리고 인가 파형 보정을 통하여 비선형 스위핑 특성을 선형 스위핑 특성으로 자동 변환해주는 새로운 방법을 제안하였고, 실험을 통하여 우수한 선형 스위핑 특성이 얻어짐을 확인하였다.

## 2. 스위핑 선형화 자동 구현

### 2.1 파장 스위핑 레이저 구성 및 동작원리

본 논문에서 구현된 파장 스위핑 레이저의 구성도는 Fig. 1과 같다[5]. 이는 1550 nm를 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 중심파장으로 가지는 SOA, 이의 양쪽에 위치한 광 아이솔레이터(Optical Isolator), 레이저 광 출력을 위한 1x2 광 커플러(Optical Coupler), 스위핑을 위한 FFP-TF, 스위핑 평탄성 제어를 위한 편광조절기 등이 차례로 연결된 광섬유 링 공진기 구조를 가진다.

레이저의 동작원리는 다음과 같다[5,6]. SOA로부터 출력된 ASE 광은 2개의 광 아이솔레이터 때문에 링 공진기를 시계방향으로 회전한다. 광이 광섬유 링 공진기를 1회전하는데 필요한 시간은 스위핑을 위하여 FFP-TF에 인가되는 신호 전압의 변동 시간에 비하여 매우 짧다. 이는 임의의 시점에 FFP-TF의 투과대역을 통과한 ASE 광의 일부가 링 공진기를 1회전 주행한 후 다시 FFP-TF에 도착하여도 FFP-TF의 투과대역은 여전히 이전과 같음을 의미한다. 따라서 FFP-TF의 투과대역이 다음 값으로 변경되기 전에 ASE 광의 일부는 링 공진기를 여러 번 회전할 수 있고 매번 SOA를 통과할 때마다 증폭된다. 이의 결과로 레이저는 FFP-TF의 투과대역과 동일한 파장으로 순간 발진하

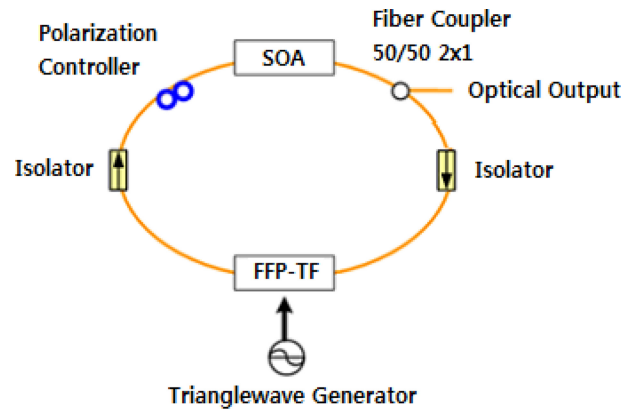


Fig. 1. Schematic diagram of realized wavelength swept laser.

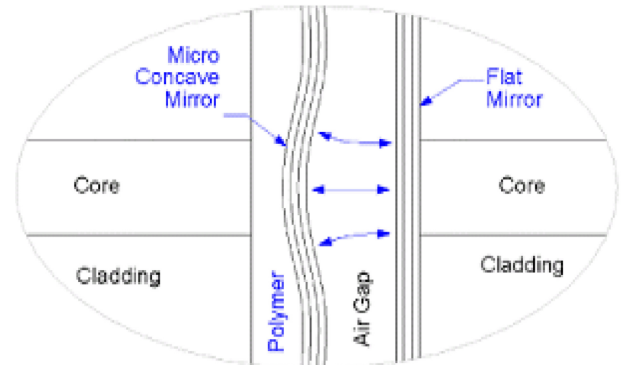


Fig. 2. Cavity structure of FFP-TF.

게 된다. 이제 FFP-TF의 투과대역이 다음 값으로 변경되면 위와 동일한 과정을 거쳐 레이저는 변경된 투과대역의 파장으로 순간 발진하게 된다. 이제 FFP-TF에 인가되는 신호 전압의 크기를 연속적으로 변동시켜 투과대역을 연속적으로 변동시키면 레이저의 파장 스위핑이 얻어진다. SOA의 ASE 전체 대역을 모두 활용할 수 있는 한도 내에서 신호 전압의 크기를 증가시키면 광대역에 걸친 파장 스위핑을 얻을 수 있다.

위의 레이저 구성에 사용된 FFP-TF는 페브리-페롯 간섭계 구조[7]를 가지며, Fig. 2에 이의 구조를 나타내었다.

FFP-TF는 간섭계의 한쪽 미러에 부착된 압전소자에 주기적인 전압 파형을 인가하여 미러 간 공진 간격을 변화시킴으로써 투과대역을 주기적으로 변동시킨다. 본 논문에서는 스위핑 중심 파장으로서의 이동을 위한 직류 전압과 스위핑을 위한 1 kHz 삼각파 전압을 합하여 FFP-TF에 인가하였다. 이 경우에 삼각파 1주기 동안에 파장 증가 스위핑과 파장 감소 스위핑 즉 한번의 왕복 스위핑이 얻어진다. 사용된 FFP-TF는 FSR(Free Spectral Range) 120 nm, Finesse 600, 삽입손실 2.5 dB, -20~50 V의 인가 전압 범위를 가진다.

위의 레이저 구성에서 편광조절기로서는 General Photonics사의 PSM-003을 사용하였다. 이는 광섬유 둘레에 45° 간격으로

3개의 광섬유 압착기(Squeezer)가 설치되어 있으며 각각에 제어 전압을 인가함으로써 광섬유에 인가되는 압착력을 다양하게 변동시킬 수 있다. 광섬유에 압착이 가해지면 광섬유의 복굴절(Birefringence)이 변동되고 이는 광섬유를 통과하는 광의 편광 상태(SOP : State of Polarization)를 변형시킨다. 따라서 각 압착기에 인가되는 전압을 적절히 조정하면 원하는 편광상태를 얻을 수 있다.

## 2.2 스위핑 자동 선형화 장치 및 동작 원리

대형 SOC 구조물 안전 모니터링[8]에 사용되는 파장 스위핑 레이저는 보통 1 kHz의 주파수로 스위핑 된다. 이때 시간에 따른 스위핑의 특성은 일반적으로 비선형성을 보인다. 그러나 스위핑을 선형화시키면 구조물에 설치된 FBG 센서의 반사 파장을 계산하는 것이 간단해지고 정확해진다. 이를 위해서는 자동으로 레이저의 파장 가변 필터에 인가될 전압 파형을 보정하여 새로운 파형을 제공함으로써 궁극적으로 레이저가 선형으로 스위핑 되도록 하여야 한다. 그러나 레이저를 장시간 사용하면 파장 가변 필터의 동작 특성 변동으로 인하여 레이저가 다시 비선형으로 동작할 가능성이 있다. 따라서 레이저의 선형 스위핑이 계속 유지되기 위해서는 인가 파형 보정 작업이 주기적으로 그리고 자동으로 수행되어야 한다. 본 논문에서는 이를 수행하기 위한 방법을 제안하고 장치를 구현하였다.

### 2.2.1 장치 구성도

Fig. 3은 본 논문에서 구현된 스위핑 자동 선형화 장치의 구성도를 보여준다. FPGA 임베디드 모듈(본 실험에서는 NI cRIO-9063을 사용)로부터 생성된 삼각파가 파장 스위핑 레이저를 구성하는 FFP-TF에 인가되면 파장 스위핑 레이저로부터는 스위핑된 광 출력을 얻을 수 있다. 1×2 광섬유 커플러를 통하여 외부로 분기되는 광 출력은 광 서큘레이터를 통하여 특별 제작된 광섬유 격자 열(FBG array)에 입사된다. 이 FBG array는 반사 파장 값이 점점 커지는 순서로 FBG를 직렬 연결(cascaded connection)하여 구성되며, 이때 이웃한 두 FBG 간의 반사 파장 값 차이는  $\delta\lambda$ 로서 FBG array 전체에 걸쳐 동일하다. FBG는 광섬유 코어에 길이 방향으로 주기적인 굴절률 변화를 주어 제작되며 변화주기가  $\Lambda$ 인 경우  $\lambda = 2n\Lambda$ 에 해당하는 파장을 반사시킨다[9]. 여기서  $n$ 은 코어의 굴절률이다. 실험에서는 90개의 FBG를 사용하여 FBG array를 구성하였으며  $\delta\lambda = 1nm$ 를 사용하였다. 레이저의 스위핑 상태에서 FBG array의 각 FBG로부터 반사된 광은 시간상으로 광 펄스 열 형태를 취한다. 각 광 펄스는 다시 광 서큘레이터를 거쳐 순차적으로 광전 변환회로의 포토다이오드에 입사되며 여기에서 광 펄스 세기에 비례하는 전류 펄스로 바뀐다. 전류 펄스는 전류-전압 변환부에서 전압 펄스로 변환된다. 레이저의 스위핑이 선형적일 경우에는 변환회로에서 일정한 시간 간격의 전압 펄스 열이 출력되지만, 스

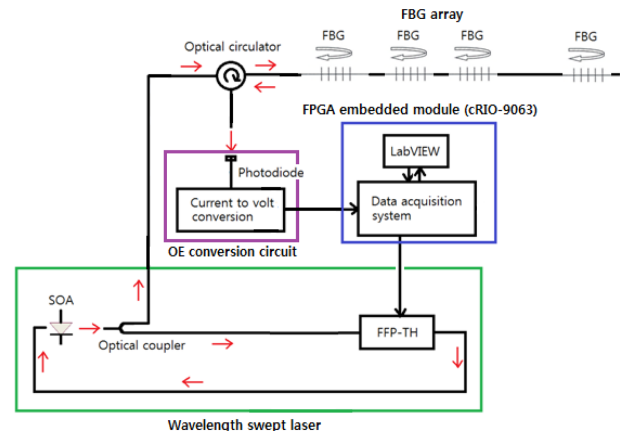


Fig. 3. Block diagram of sweeping automatic linearization equipment.

스위핑이 비선형일 경우에는 간격이 서로 다른 전압 펄스 열이 출력된다. 이 전압 펄스들은 데이터 획득(DAQ : Data Acquisition) 모듈에서 샘플링 되어 cRIO-9063으로 전송된다. cRIO-9063에서는 각 전압 펄스의 중앙 지점 정보를 확보하고 제안된 알고리즘에 따라 처리하여 선형 스위핑을 위한 새로운 보정 파형을 생성한다. 이 보정 파형은 DAQ 모듈을 통하여 다시 FFP-TF에 인가되어 선형 스위핑이 자동으로 이루어진다. 그리고 위의 과정이 반복되면서 선형 스위핑이 장시간 자동 유지된다.

FFP-TF에 삼각파 또는 새로운 보정 파형을 인가하기 위한 DAQ 모듈로서 NI사의 NI-9262를 사용하였다. NI-9262는 아날로그 출력(AO : Analog Output)을 위한 모듈로서 cRIO-9063에 장착되어 사용된다. 이는 cRIO-9063에서 보내온 16bit 디지털 데이터를 아날로그 신호로 변환(DAC) 하며 출력 전압 범위는  $\pm 10V$ 이다. 실험에서 사용된 출력 속도는 500 kS/s이다. 출력된 아날로그 신호는 자체 제작된 드라이버 회로에서 증폭 및 반전된 후에 FFP-TF를 구동시킨다. 원활한 구동을 위하여 드라이버 회로의 끝단에 위치한 구동 연산증폭기(Op-amp)는 매우 적은 출력임피던스 및 큰 구동전류를 제공하여야 한다.

광전 변환회로에서 출력되는 디지털 전압 펄스를 샘플링 하기 위한 DAQ 모듈로서 NI사의 NI-9401을 사용하였다. NI-9401은 디지털 입출력(DIO : Digital Input/Output)을 수행하며 cRIO-9063에 장착되어 사용된다. 이는 40MHz 클럭을 사용하여 입력 디지털 신호를 샘플링하며 이 값을 cRIO-9063으로 전송한다. cRIO-9063은 프로세서로서 667MHz의 ARM Cortex-A9를 듀얼로 사용하며, FPGA로는 Zynq-7000을 사용한다.

### 2.2.2 동작 원리

Fig. 4의 하단 그래프에서 보여준 파란색 전압 파형은 스위핑을 야기시키기 위하여 FFP-TF에 인가될 삼각파의 1 주기를 나타낸다. 삼각파의 주파수는 1 kHz이며 삼각파의 1 주기를 구성

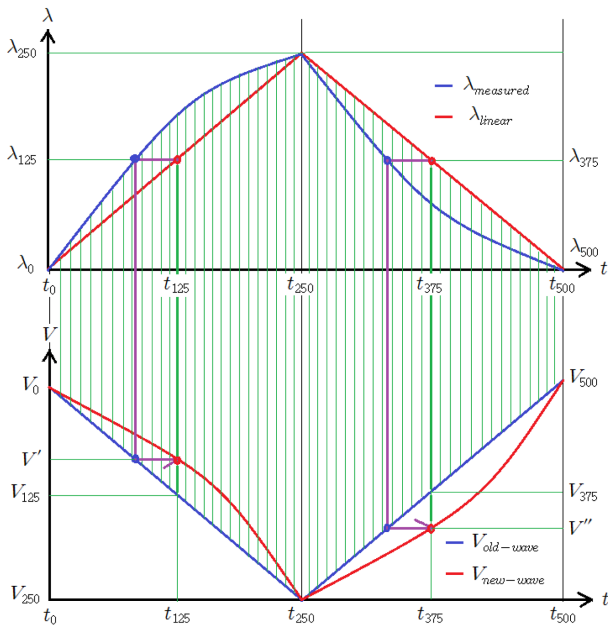


Fig. 4. Compensated waveform generation process for sweeping linearization.

하는 샘플 데이터의 개수는  $N = 500$  이다. 이는 삼각파를 생성하는 아날로그 출력 DAQ 모듈의 샘플 데이터 출력 속도가 500 kS/s이기 때문이다. 이제 삼각파의 1주기를  $t_{500}$  ( $=1$  ms)이라 하고 이를 500개로 균등 시분할한 각 시점을  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )이라 한다. 삼각파는 각 시점  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 499$ )에 대응하는 500개의 샘플 값  $V_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 499$ )으로 구성된다. 삼각파의 1주기는 동일한 시간 폭  $t_{250}$ 을 가지는 두 개의 반주기로 구성된다. 삼각파가 FFP-TF에 인가되면 이로 인하여 파장 스위핑 레이저는 왕복 스위핑을 수행한다. 예를 들어 삼각파의 왼쪽 반 주기에서는 출력 광이 파장  $\lambda_0$ 에서 시작하여 점점 커지면서 반환점 파장  $\lambda_{250}$ 에 도달하는 스위핑을 수행한다. 그리고 삼각파의 오른쪽 반 주기에서는 반환점 파장  $\lambda_{250}$ 에서 점점 감소하여 다시 원래의 시작 파장  $\lambda_{500}$  ( $=\lambda_0$ )으로 복귀하는 스위핑을 수행한다. 따라서 왕복 스위핑에 소요되는 시간은 삼각파의 1주기인  $t_{500}$ 과 동일하다.

Fig. 4의 상단 그래프에서 파란색 곡선은 삼각파를 인가하여 측정된 레이저의 스위핑 특성을 보여주며, 비선형적으로 스위핑되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4의 상단에서 빨간색 직선은 선형 스위핑을 가정했을 때의 그래프를 보여 준다. 우리의 목표는 파란색 비선형 스위핑을 자동으로 빨간색 선형 스위핑으로 변환하는 것이다.

이제 보정 파형 생성 원리를 설명하고자 한다. Fig. 4의 상단 그래프 빨간색 직선(선형 스위핑)에서 각 시점  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )에 해당하는 파장 값들을  $\lambda_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )이라 한다. 선형 스위핑을 얻기 위해서는 빨간색 직선 그래프에서 보여진 것처럼 주어진 각 시점  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )에서  $\lambda_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )이

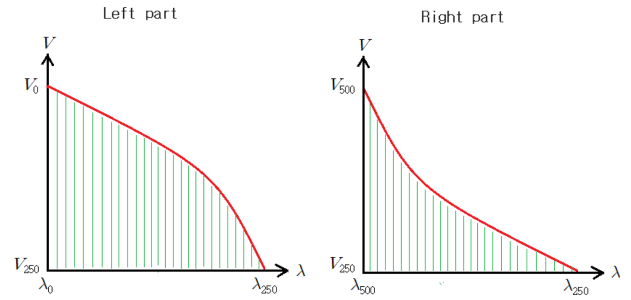


Fig. 5.  $V$  vs  $\lambda$  for each sweeping part.

출력되어야 한다. 한편 측정된 파란색 비선형 스위핑 그래프와 삼각파를 함께 살펴 보면  $\lambda_n$ 의 출력에 사용된 삼각파 전압  $V$ 를 찾을 수 있다. 선형 스위핑을 얻기 위해서는 이  $V$ 전압의 발생 시점을 이제는  $t_n$ 으로 옮겨야 한다. 예를 들면,  $t_{125}$  시점에서 선형 스위핑에 해당하는 파장 값은  $\lambda_{125}$ 이다. 그런데 비선형 스위핑에서  $\lambda_{125}$ 를 출력시킬 때 사용된 삼각파 전압은  $V'$ 이다. 따라서 선형 스위핑을 위해서는 인가 파형으로서  $t_{125}$  시점에  $V_{125}$ 가 아니라  $V'$ 가 제공되어야 한다. 동일한 방법으로 선형 스위핑을 위해서는  $t_{375}$  시점에  $V_{375}$ 가 아니라  $V''$ 가 제공되어야 한다.

위의 방법을 모든  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )에 대하여 반복 적용하면 Fig. 4의 하단에서 보여진 빨간색 곡선과 같은 새로운 보정 파형을 얻을 수 있다. 삼각파 대신에 이 보정 파형을 사용하면 상단 빨간색 직선 그래프와 같은 선형 스위핑을 얻을 수 있다.

위에서 제안된 방법은 더 간단히 구현될 수 있다. Fig. 4의 상단과 하단 그림을 함께 살펴 보면 각 시점  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )마다 삼각파 샘플 값, 비선형 스위핑 파장 값, 그리고 선형 스위핑 파장 값 등을 3개의 원소로 가지는 집합을 생각할 수 있다. 이로부터 각 시점  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )에 대응하는 좌표 점  $(x, y)$  즉 (비선형 스위핑 파장 값, 삼각파 샘플 값)을 얻을 수 있으며, 이 500개의 좌표 점을 사용하여  $V$  대  $\lambda$  그래프를 그릴 수 있다. 이 그래프는 Fig. 4의 하단에서 보여진 빨간색 곡선 즉 새 보정 파형과 일치한다. 이때 그래프의 복잡성을 피하기 위하여 왕복 스위핑을 파장 증가 스위핑 구간과 파장 감소 스위핑 구간으로 나누고, 구간 별로  $V$  대  $\lambda$  그래프를 그린다. Fig. 5의 빨간색 곡선은 이렇게 얻어진 구간 별  $V$  대  $\lambda$  그래프를 보여 준다. 구간 별  $V$  대  $\lambda$  그래프에 보간법을 적용하여 500개의 선형 스위핑 파장 값  $\lambda_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, 500$ )에 대응하는 500개의  $V$ 값을 계산할 수 있다. 이렇게 얻어진 500개의  $V$ 값은 새로운 보정 파형을 구성하는 값들이다. 이를 FFP-TF에 인가하면 선형 스위핑이 얻어진다.

### 2.2.3 제안된 보정 파형 생성 알고리즘

레이저 ON시에 FFP-TF에는 삼각파가 인가된다. 삼각파의

1주기는  $T$ 이며 이를  $N$ (짝수) 개로 균등 시분할한 각 시점을  $t_n(n=0,1,2,\dots,N)$  이라 한다. 따라서 삼각파 1주기는 각 시점  $t_n(n=0,1,2,\dots,N-1)$  에 대응하는  $N$ 개의 샘플 값  $V_n(n=0,1,2,\dots,N-1)$  으로 구성된다. 삼각파는 동일한 시간 폭  $T/2$  를 가지는 두 개의 반주기로 구성되며, 각 반주기는 동일하게  $M(=N/2)$  개의 샘플로 이루어진다. 삼각파가 FFP-TF에 인가되면 이로 인하여 파장 스위핑 레이저는 왕복 스위핑을 수행한다. 스위핑을 선형화하기 위하여 자동으로 보정 파형을 생성하는 과정은 다음과 같은 순서로 이루어 진다.

① 파장 스위핑 레이저로부터 출력된 광이 광 서큘레이터를 거쳐 FBG array에 입사된다.

② FBG array의 각 FBG에서 반사된 광 펄스가 순차적으로 포토다이오드에 입사된다.

③ 전류-전압 변환회로에서 출력되는 각 전압 펄스의 상승 에지와 하강 에지 시점을 측정하고 이들의 평균 값을 취하여 전압 펄스의 도착 시점으로 저장한다. 시간 측정 시에 스위핑 시작 시점을  $T=0$  으로 하고, 스위핑 반환 시점  $t_{half}=T/2$ , 스위핑 복귀 시점  $t_r=T$  등을 기준 시점으로 활용한다.

④ 저장된 도착 시점들을  $x$ 축으로 하고 해당 반사 파장을  $y$  축으로 하는 그래프를 그린다.

⑤ 얻어진 그래프를 파장 증가 스위핑 구간과 파장 감소 스위핑 구간으로 분리한다. 각 스위핑 구간에서 스위핑의 시작과 끝에 해당하는 파장을 외삽(extrapolation) 방식을 사용하여 구한다. 이 과정을 통하여 각 스위핑 구간에 대한  $\lambda_{nonlinear}$  대  $t$ 의 그래프가 얻어진다.

⑥ 각 스위핑 구간의 시작점과 끝점 파장을 연결하는  $\lambda_{linear}$  대  $t$ 의 직선 그래프 방정식을 구한다. 파장 증가 구간의 직선 기울기는 양수이고 파장 감소 구간의 직선 기울기는 음수이다.

⑦ 구간 별로  $\lambda_{nonlinear}$  대  $t$ 의 그래프와  $\lambda_{linear}$  대  $t$ 의 그래프로부터 각  $t_n(n=0,1,2,\dots,N)$  시점에 대응하는  $\lambda_{nonlinear,n}$  과  $\lambda_{linear,n}$  값을 계산하고 구간별로 따로 저장한다. 각  $t_n(n=0,1,2,\dots,N)$  시점에서의  $\lambda_{nonlinear,n}$  값을 계산할 때 해당 구간의  $\lambda_{nonlinear}$  대  $t$ 의 그래프에 보간(interpolation)법을 적용한다.

⑧ 구간 별로  $\lambda_{nonlinear,n}$  값을  $x$ 값으로 하고 이에 대응하는 삼각파 구성 샘플 값  $V_n$ 을  $y$  값으로 하는  $M$ 개의 좌표 점을 얻는다.이로부터 각 구간에 해당하는  $V$  대  $\lambda$ 의 그래프를 각각 얻는다.

⑨ 이제 구간 별  $V$  대  $\lambda$  그래프에 대한 보간(interpolation) 작업을 통하여  $\lambda_{linear,n}(n=0,1,2,\dots,N)$  값에 해당하는  $V_{linear,n}(n=0,1,2,\dots,N)$  값을 계산하고 구간 별로 따로 저장한다. 이제 저장된 구간별 값을 순서 정리하여 연결하면 삼각파를 대신할 1 주기의 새로운 보정 파형이 얻어지며, 이로부터 선형 스위핑을 얻을 수 있다. FFP-TF 통과 파장의 초기 위치가 어느 영역에

⑩ 일정한 주기로 ①~⑨의 과정을 반복 수행하면 레이저의 선형 스위핑을 자동으로 유지할 수 있다.

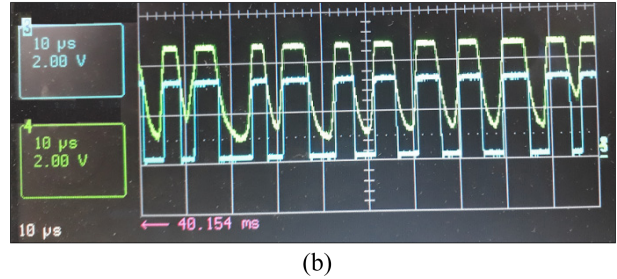
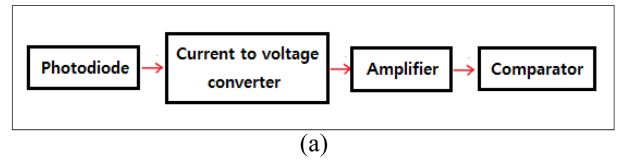


Fig. 6. Optic to electric conversion circuit ; (a) block diagram, (b) measured digital pulse train.

### 2.2.4 광전 변환회로

비록 스위핑의 평탄성이 확보되어도 여전히 약간의 리플(ripple)이 존재하므로 광 펄스의 크기에 차이가 있고 또한 스위핑의 방향이 바뀌는 시점 부근에서의 광 펄스의 크기에는 적지 않은 차이가 있다. 하지만 정확한 선형 스위핑을 달성하기 위해서는 이러한 광 펄스 크기의 변동에도 불구하고 안정적인 디지털 펄스의 생성이 필수적이다. Fig. 6(a)는 이러한 목표를 잘 달성하도록 개발된 고품질의 광전 변환회로를 보여 준다. 광전 변환회로는 두 개의 부분으로 구성된다. MAX4477 연산증폭기를 사용하여 포토다이오드에서 출력되는 전류를 전압으로 변환한 후에 이를 증폭하는 부분과 AD8611비교기를 사용하여 증폭기 출력을 디지털 펄스로 변환하는 부분으로 구성된다. 회로에서 연산증폭기의 전압이득을 크게 하여 포화구간을 이용하였으며 광 펄스와 디지털 전압 펄스 사이의 시간 지연을 최소화하기 위하여 고속 비교기인 AD8611을 사용하였다. Fig. 6(b)에서 보여진 것처럼 개발된 광전 변환회로는 디지털 펄스를 안정적으로 생성하였으며 최소화된 시간 지연을 통하여 광 펄스 최고 점에 대한 정확한 시점 파악이 가능하다. 그림에서 상단의 노란색 파형은 연산 증폭기의 포화된 출력을 보여주며 하단의 파란색 파형은 시간 지연이 최소화된 상태에서 생성된 디지털 펄스 열을 보여준다.

### 3. 실험 결과 및 검토

실험 셋업을 Fig. 7에 보였다. 플라스틱 상자의 내부는 2개의 층으로 구성된다. 하층에는 파장 스위핑 레이저의 광학부 및 일부 드라이버 회로가 설치되어 있고, 상층에는 cRIO-9063과 DAQ 모듈, FBG array, 그리고 광전 변환회로 등이 놓여 있다. 그림은 하층만을 보이고 있으며 상층은 하층과 전선으로 연결된다.

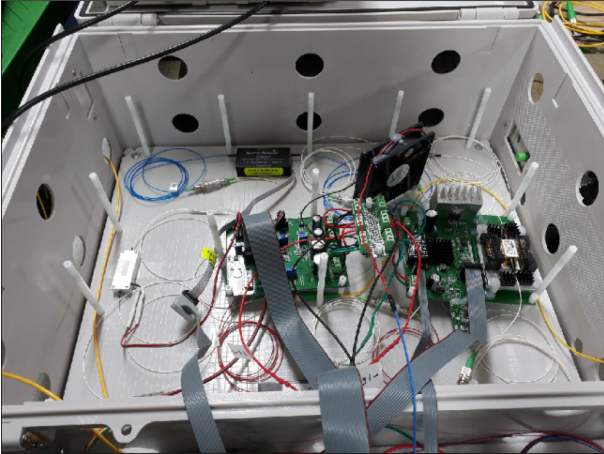


Fig. 7. Experimental set-up for sweeping automatic linearization.

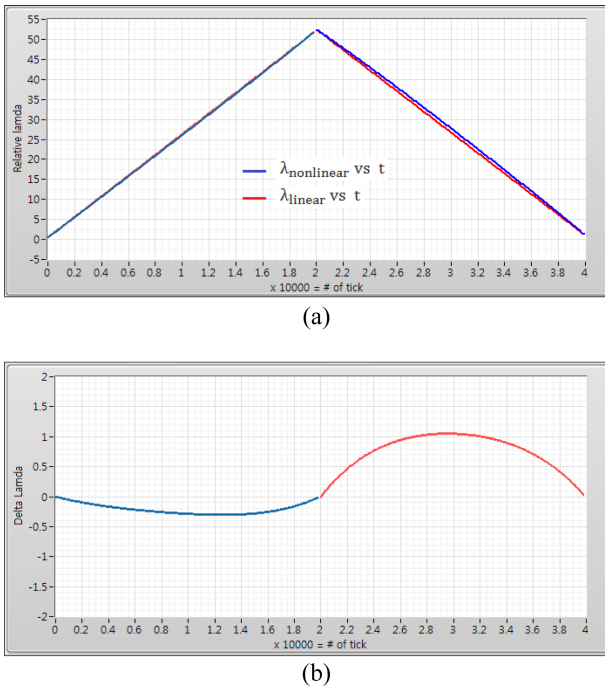


Fig. 8. Measurement with triangle wave ; (a)  $\lambda$  vs  $t$ , (b)  $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{nonlinear},n}-\lambda_{\text{linear},n})$  vs  $t$ .

하층 우측의 검은색 부분은 SOA 및 이의 드라이버 회로이며, 상단의 소형 검은색 박스는 편광조절기이고, 좌측의 소형 흰색 박스는 FFP-TF이다. 중앙에 FFP-TF와 편광조절기의 드라이버 회로가 놓여있다.

FFP-TF에 삼각파를 인가하여 측정된  $\lambda_{\text{nonlinear}}$  대  $t$ 의 그래프와 이로부터 얻어진  $\lambda_{\text{linear}}$  대  $t$ 의 그래프를 Fig. 8(a)에 보였다. x축에 표시된 틱(tick)은 NI-9401의 디지털 입출력 클럭 주기이며  $1\text{tick} = 25\text{ns}$ 이다. 따라서  $40000\text{tick} = 1\text{ms}$ 이다. y축에 표시된 숫자는 상대적인 파장값을 나타낸다. 파란색 곡선은  $\lambda_{\text{nonlinear}}$  대  $t$ 의 그래프이며 빨간색 직선은  $\lambda_{\text{linear}}$  대  $t$

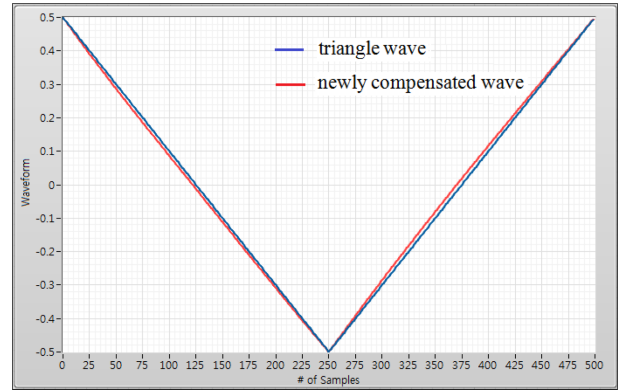


Fig. 9. Applied triangle wave and newly compensated wave.

의 그래프를 나타낸다. Fig. 8(b)에는 이들 간의 차이인  $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{nonlinear},n}-\lambda_{\text{linear},n})$  대  $t$ 의 그래프를 나타내었다. 삼각파 조건하에서 파장 스위핑이 비선형으로 진행되므로 선형 스위핑과 차이가 있음을 보여준다. 그래프에서 보여진 최대 차이 값은  $\Delta\lambda_{\text{max,nonlinear}} = 1.05$  이었다.

이제 FFP-TF에 인가된 삼각파와 제안된 알고리즘에 따라 새로이 생성된 보정 파형을 Fig. 9에 보였다. 그림에서 파란색 직선은 레이저 ON 직후에 FFP-TF에 인가된 삼각파의 1 주기를 보여주며 500개의 데이터로 구성된다. 그림에서 보여진  $1\text{V}_{\text{p-p}}$ 의 삼각파 전압 파형이 NI-9262로부터 출력되면 이 신호는 자체 제작된 드라이버 회로를 거쳐 증폭 및 반전된 후에 FFP-TF를 구동시킨다. 삼각파의 감소부분은 단파장에서 장파장으로 스위핑 되는 구간에 해당되고, 증가부분은 다시 반대로 스위핑 하는 구간에 해당된다. Fig. 9에서 빨간색 곡선은 선형 스위핑을 위하여 새로이 생성된 보정 파형을 나타낸다.

새로이 얻어진 보정 파형을 FFP-TF에 인가하였을 때 측정된  $\lambda_{\text{nonlinear}}$  대  $t$ 의 그래프와 이로부터 얻어진  $\lambda_{\text{linear}}$  대  $t$ 의 그래프를 Fig. 10(a)에 나타내었다. y축에 표시된 숫자는 상대적인 파장 값을 나타낸다. 파란색은  $\lambda_{\text{nonlinear}}$  대  $t$ 의 그래프이며 빨간색은  $\lambda_{\text{linear}}$  대  $t$ 의 그래프를 나타낸다. Fig. 10(b)에는 이들 간의 차이인  $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{nonlinear},n}-\lambda_{\text{linear},n})$  대  $t$ 를 나타내었다. 이제 스위핑이 선형으로 진행되고 있으므로  $\Delta\lambda \approx 0$  임을 보여준다. 그래프에서 보여진 최대 차이 값은  $\Delta\lambda_{\text{max,linear}} = 0.03$  이었다. 이로부터 비선형성이 97% 만큼 감소되었음을 알 수 있다.

실험에서 파장 스위핑 레이저를 구성하는 SOA에는 600 mA의 전류가 공급되고 있으며 온도는 섭씨  $25^{\circ}\text{C}$ 로 유지되고 있다. Fig. 11의 상단의 노란색 파형은 선형 스위핑을 위하여 FFP-TF에 인가된 보정 파형을 나타낸다. 중간단의 녹색 펄스는 측정 신호 획득 시에 사용되는 트리거 신호를 보여준다. 다음의 파란색 디지털 펄스들은 구조물에 설치된 FBG 센서들로부터 반사된 광 신호를 광전 변환한 결과이다. 하단의 빨간색 파형은 스위핑 평탄화가 지속되고 있을 때의 스위핑 패턴을 전압 파형으로 나타낸 것이다.

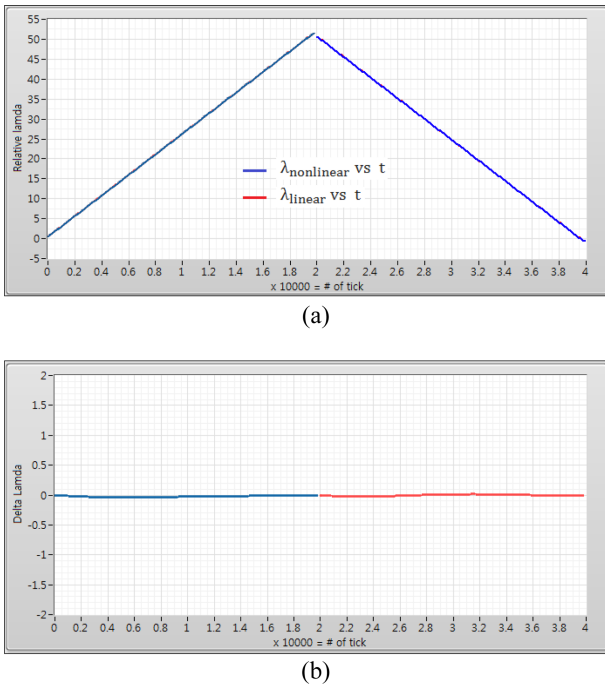


Fig. 10. Measurement with compensated wave ; (a)  $\lambda$  vs t, (b)  $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{nonlinear},n}-\lambda_{\text{linear},n})$  vs t.

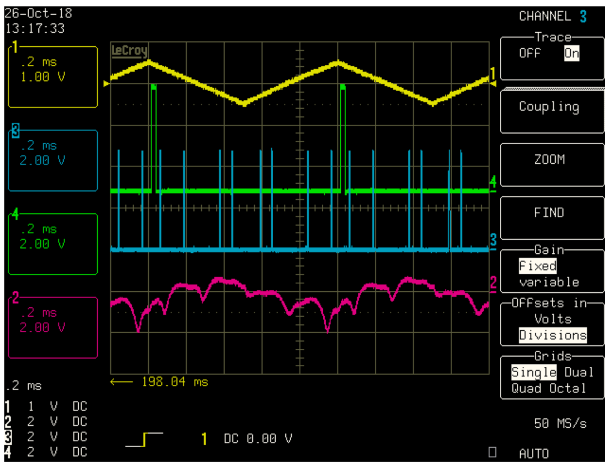


Fig. 11. Measured data ; (a) Waveform applied to FFP-TF, (b) Trigger signal, (c) Digital pulse from OE conversion circuit, (d) Sweeping pattern signal of realized laser.

Fig. 12는 측정된 스위핑 스펙트럼을 보여준다. 그림으로부터 스위핑 범위가 약 60 nm 임을 알 수 있다. 파장 가변 필터를 FSR = 160인 모델로 교체할 경우 80 nm 이상의 스위핑 범위를 확보할 수 있다. 측정된 레이저의 평균 광 출력은 8.8 mW 이었다.

고속 광대역 평탄 선형 스위핑 특성을 지닌 파장 스위핑 레이저 기술은 앞으로 기존의 분광학 장치의 광원으로도 적용될 수 있을 것이다[10].

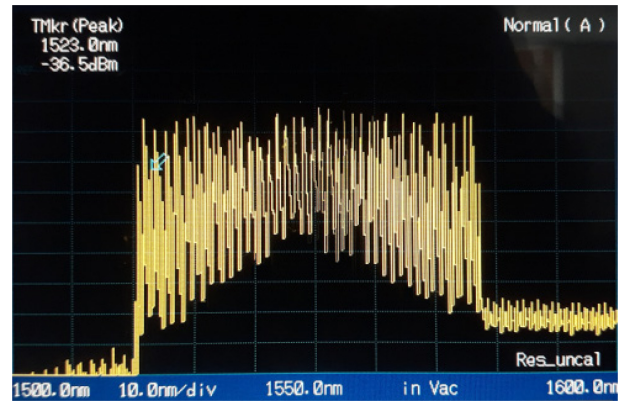


Fig. 12. Measured sweeping spectrum.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 파장 스위핑 레이저의 선형 스위핑 특성을 자동으로 구현하는 새로운 방식을 제안하였다. 장치 제작 및 실험을 통하여 1 kHz의 속도, 약 60 nm의 범위에 걸쳐 선형 스위핑 특성이 잘 얻어짐을 확인하였으며, 이때 비선형성이 97% 만큼 감소되었다. 이 장치는 FBG array, 광전 변환회로, DAQ 모듈, cRIO-9063, 그리고 LabVIEW 프로그램 등으로 구성된다. 선형 스위핑을 위한 FFP-TF 인가 파형 보정이 자동으로 이루어지므로 기존의 비선형 스위핑 레이저에서 요구되는 후 보정의 복잡성 및 시간 소요 문제를 해결해 줄 수 있다. 그리고 구조물 안전 모니터링 시스템에서 선형 스위핑 레이저를 이용하면 더욱 정확하게 구조물 변형 정보를 얻을 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부가 지원하는 이공분야 기초연구사업(기초연구)으로 수행된 연구 결과입니다.(과제 번호 : 2019R1F1A1058038)

#### REFERENCES

- [1] K. O. Hill, and G. Meltz, "Fiber bragg grating fundamentals and overview", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [2] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [3] J. C. Suarez, B. Remartinez, J. M. Menéndez, A. Güemes, and F. Molleda, "Optical fibre sensors for monitoring of welding residual stresses", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 143, pp. 316-320, 2003.

- [4] 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, pp. 3225-3237, 2006.
- [5] J. S. Eom, "Realization of swept source-optical coherence tomography system using wavelength swept source based on FDML method", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 1, pp.46-52, 2011.
- [6] R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira, J. G. Fujimoto, and K. Hsu, "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging : design and scaling principles", *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 3513-3528, 2005.
- [7] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, NY, 1987.
- [8] Y. Lig, Y. Wang, and C. Wen, "Temperature and strain sensing properties of the zinc coated", *OPTIK* , Vol. 127, No. 16, pp. 6463-6469, 2016.
- [9] J. C. Palais, *Fiber Optic Communications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [10] U. J. You, J. Y. Heo, D. H. Cho, K. W. Chang, J. G. Seo, B. S. Lee, Y. H. Cho, J. H. Moon, and B. K. Park, "A Spectroscopic research for development of optical fiber pH sensor", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 5, pp.365-371, 2009.