

## 파장 스위핑 레이저의 평탄 스위핑 자동 유지

# Flat Sweeping Automatic Hold of Wavelength Swept Laser

이 덕 규\*, 엄 진 섭\*

Duk-Kyu Lee\*, Jinseob Eom\*

### Abstract

In this paper, a new method for flat sweeping automatic hold of wavelength swept laser has proposed. Through the performance test on the implemented laser, even 5 hours passed, the flat sweeping has held up well, and 56nm flat sweeping range, 1kHz sweeping frequency, and 8.8mW average optical power were obtained. This shows that the proposed can eliminate the necessity of hand-operated polarization control required for previous swept lasers in case of long time operation and also optical spectrum analyzer needed to monitor the sweeping spectrum status.

### 요 약

본 논문에서는 파장 스위핑 레이저의 평탄 스위핑을 자동 유지하기 위한 새로운 방식을 제안하였다. 이 방식이 적용된 레이저의 제작 및 실험을 통하여 5시간이 경과하여도 평탄 스위핑 특성이 잘 유지되고 있음을 관찰하였다. 그리고 56nm의 스위핑 범위, 1kHz의 스위핑 주파수, 그리고 8.8mW의 광 출력 파워도 확인하였다. 제안된 방식은 기존에 스위핑 레이저를 장시간 구동시킬 때 불가피하던 수동 편광 조절의 번거로움을 해소시키고 이 과정에서 요구되던 고가 광 스펙트럼 분석기의 사용을 배제시킨다.

*Key words : Wavelength swept laser, Flat sweeping, Automatic hold, Polarization control, Hand-operated*

### 1. 서론

광 결맞음 단층촬영(OCT : Optical Coherence Tomography)은 기존의 의료영상 획득 기술로서는 달성하기 힘든 수  $\mu\text{m}$  이하의 분해능을 가지며 주로 생체조직의 표피 단면 이미지를 얻는데 사용된다[1][2]. 이는 현재 안과에서 널리 사용되고 있으며, 앞으로 피부과, 내과, 심장내과, 그리고 치과 등에서도 진단용 영상을 얻기 위하여 사용될 예정이다. 최근에는 파장 스위핑 레이저(Wavelength Swept

Laser)를 광원으로 사용하는 SS(Swept Source)-OCT 기술이 널리 사용되고 있는데 이는 고속 고화질 영상 제공 등 제반 성능에서 우수하기 때문이다[3]. 또한 댐, 교량, 터널 등과 같은 대형 SOC 구조물의 갑작스런 붕괴를 사전 예방하기 위하여 사용되는 안전 모니터링 시스템에서도 기존의 기계식 센서보다는 파장 스위핑 레이저와 광섬유 격자 센서를 사용하는 광학 방식[4]이 품질의 우수성 및 유지보수의 편리성 때문에 최근에 각광받고 있다.

파장 스위핑 레이저를 광원으로 사용하는 SS-OCT

\* Dept. of Electronics Eng., Kangwon National University

★ Corresponding author

E-mail : jeom@kangwon.ac.kr, Tel : +82-33-250-6327

※ Acknowledgment

This research was supported by 2016 Research Grant from Kangwon National University(No. 520160176)

Manuscript received May. 22, 2019; revised Jun. 24, 2019; Accepted June. 26, 2019.

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.

시스템과 안전 모니터링 시스템에서 파장 스위핑 레이저의 스위핑 특성은 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 레이저의 주요 스위핑 특성으로는 광대역성, 고속성, 선형성, 그리고 평탄성 등이 고려된다. 광대역성과 고속성은 SS-OCT에서 분해능 및 영상 속도를 좌우하고[5][6], 안전 모니터링 시스템에서는 센서의 최대 설치 개수 및 모니터링 주기를 결정한다. 한편 선형성은 영상의 정확성 또는 구조물에 인가되고 있는 스트레인 값의 정확성에 영향을 미친다. 그리고 스위핑의 평탄성은 영상의 화질 및 정확성에 영향을 미치고, 안전 모니터링에서는 센서 신호 세기의 감소에 의한 모니터링 에러를 초래할 수 있다.

스위핑의 평탄성은 레이저를 구성하는 광섬유 링을 단방향으로 회전하는 광의 편광(Polarization) 변화에 의하여 큰 영향을 받는데, 이러한 편광 변화는 온도 등과 같은 주변 환경 변화에 의한 광섬유 링 구성요소들의 변동에 의하여 야기된다. 이는 주변 환경 변화에 의하여 광섬유 링 내에서 광의 편광 변화는 느리지만 계속 일어나고 있으며 이로 인하여 스위핑의 평탄성도 함께 변하고 있음을 의미한다. 본 실험실에서는 레이저 작동 초기에 자동으로 스위핑을 평탄하게 세팅하는 방법을 기존에 구현하였다[7]. 그러나 주변 환경의 영향으로 평탄성은 오래 지속되지 못하였고 시간이 지날수록 악화되었다. 따라서 파장 스위핑 레이저를 장시간 사용하는 응용에서는 레이저가 작동되는 동안에 주기적으로 평탄성을 자동 모니터링하고 또한 자동으로 편광을 조절하여 광대역 평탄성을 지속적으로 유지하는 기술이 필수적이다.

본 논문에서는 평탄 스위핑 자동 유지를 위한 새로운 방법을 제안하였고 이를 통하여 56nm 범위의 평탄 스위핑(스위핑 대역폭이 비교적 좁은 이유는 실험에 사용된 파장 가변 필터의 FSR(Free Spectral Range)이 120nm이기 때문이며 만일 160nm이 사용될 경우 80nm 이상의 스위핑이 가능함)이 장시간 유지되는 파장 스위핑 레이저를 성공적으로 구현하였다.

## II. 평탄 스위핑 자동 유지 구현

### 1. 파장 스위핑 레이저의 구성 및 동작 원리

그림 1에 구현된 파장 스위핑 레이저의 구성도를

보였다. 이는 1550nm를 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 중심파장으로 가지는 SOA(Semiconductor Optical Amplifier), 이의 양쪽에 위치한 광 아이솔레이터(Optical Isolator), 레이저 광 출력을 위한 1x2 광 커플러(Optical Coupler), 스위핑을 위한 파장 가변 필터(FFP-TF, Fiber Fabry Perot-Tunable Filter), 스위핑 평탄성 제어를 위한 편광조절기(PC : Polarization Controller)등이 차례로 연결된 광섬유 링 공진기 구조를 가진다.

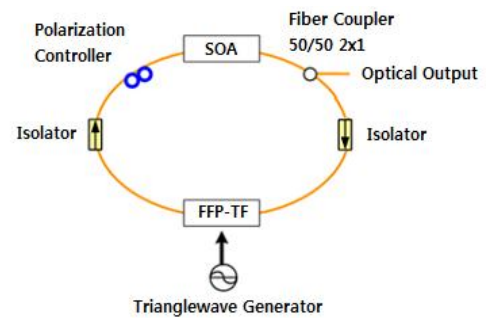


Fig. 1. Schematic diagram of realized wavelength swept laser. 그림 1. 구현된 파장 스위핑 레이저의 구성도

레이저의 동작원리는 다음과 같다[8][9]. SOA로부터 출력된 ASE 광은 2개의 광 아이솔레이터 때문에 링 공진기를 시계방향으로 회전한다. 광이 광섬유 링 공진기를 1회전하는데 소요되는 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 주행을 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 발진하게 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 한도내에서 신호 전압의 크기를 증가시키면 광대역에 걸친 파장 스위핑을 얻을 수 있다.

실험에서는 페브리-페롯 간섭계 구조를 가지는 FFP-TF를 사용하였다. 이는 간섭계의 한쪽 미러에 부착된 압전소자(PZT : Piezoelectric Transducer)에 주기적인 파형 전압을 인가하여 미러간 공진 간격을 변화시킴으로써 투과대역을 주기적으로 변동시킨다. 본 논문에서는 주기적인 파장 스위핑을 위하여  $1kHz$  삼각파를 인가하였다. 이 경우에 삼각파 1주기 동안에 2번의 스위핑 즉 한번의 왕복 스위핑이 얻어진다. 이 FFP-TF의 제원은 FSR  $120nm$ , Finesse 600, 삽입손실  $2.5dB$ , 그리고 인가전압 범위  $-20 \sim 50V$  등이다.

위의 레이저 구성에서 편광조절기로서 수동식 편광조절기 대신에 General Photonics사의 PSM-003을 사용하였다. 이는 광섬유 둘레에  $45^\circ$  간격으로 3개의 광섬유 압착기(Squeezer)가 설치되어 있으며 각각에 제어 전압을 인가하므로써 광섬유에 인가되는 압착력을 다양하게 변동시킬 수 있다. 광섬유에 압착이 가해지면 광섬유의 복굴절(Birefringence)이 변동되고 이는 광섬유를 통과하는 광의 편광상태(SOP : State of Polarization)를 변형시킨다. 따라서 각 압착기에 인가되는 전압을 적절히 조정하면 원하는 편광상태를 얻을 수 있다. 압착기는 광섬유에 장착된 압전소자로 구성되어 있으며,  $0 \sim 5V$ ,  $DC \sim 10Hz$  전압 파형이 인가될 수 있다.

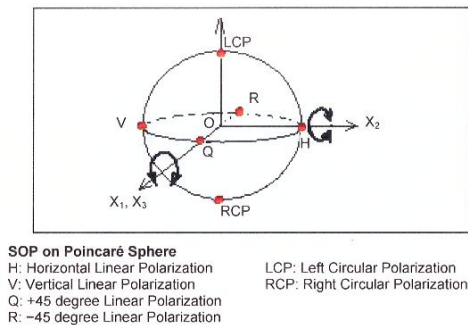


Fig. 2. Poincaré Sphere SOP representation and illustration of effects of fiber squeezers.  
그림 2. Poincaré 구 SOP 표시 및 광섬유 압착기의 압착 효과 설명

단색광(Monochromatic Light)의 SOP는 그림 2에서 보여진 Poincaré 구 상에서 한 점으로 표시된다. 만일 광섬유 압착기( $X_1$  또는  $X_3$ )에 인가되는 전압이 증가되면 압력이 증가되어 OQ축을 중심으로 해당 점이 시계방향으로 회전한다. 반대로 전압이 감소되면 압력이 감소되어 해당 점은 반시계 방향으로 회전한다. 마찬가지로 위의 압착기에 대해  $45^\circ$  간격으로 설치된 다른 압착기( $X_2$ )에 인가되는 전압이 증가(감소)되면 OQ축과 수직인 OH축을 중심으로 해당 점이 시계(반시계) 방향으로 회전한다.

2. 평탄 스위핑 자동 유지 구성부

평탄 스위핑 자동 유지 기능을 구현하기 위하여 본 논문에서 제안한 구성도를 그림 3에 보였다. 이는 주기적으로 파장 스위핑의 평탄 정도를 파악하며 이 결과에 따라 편광조절기에 인가될 제어 전압을 결정하고 이를 편광조절기에 인가한다. 먼저 스위핑의 평탄 정도를 파악하기 위하여 레이저의 광출력 일부에 대한 광전 변환을 수행하고 이에 대한 대역 통과 필터링을 통하여 스위핑 스펙트럼의 교류 성분만을 출력하는 광 검출 회로를 설계·제작하였다. 그리고 편광조절기에 인가될 제어 전압을 결정하고 이를 출력하기 위하여 NI사의 cRIO-9063 임베디드 모듈 및 여기에 삽입되는 아날로그 입력용 NI-9205 모듈과 아날로그 출력용 NI-9262 모듈을 사용하였으며, 관련된 LabVIEW 프로그래밍을 수행하였다. cRIO-9063의 규격은 다음과 같다. MCU로서는 ARM Cortex-A9 core 2개, FPGA로서는 Xilinx Zynq-7000을 사용하며, 속도는  $667MHz$ , 그리고 slot 수는 4개이다. NI-9262의 경우 출력 채널 수는 6채널, 출력 전압 범위는  $\pm 10V$ , 샘플링 속도는  $1MS/s$ , 분해능은  $16bits$ 이다. NI-9205의 경우 입력 채널 수는 16채널, 입력 전압 범위는  $\pm 10V$ , 샘플링 속도는  $250kS/s$ , 분해능은  $16bits$ 이다.

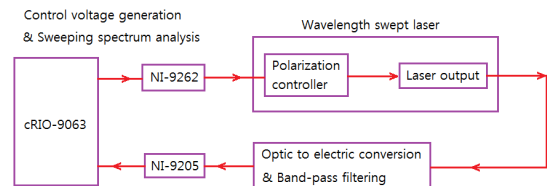


Fig. 3. Block diagram of flat sweeping automatic hold equipment.  
그림 3. 평탄 스위핑 자동 유지 장치의 구성도

편광조절기를 제어할 때 3개의 압착기 중에서 2개의 압착기만을 사용하여도 좋은 결과가 얻어지므로 본 논문에서는 두개의 압착기( $X_2$ 와  $X_3$ )만을 사용하였다.

이제 평탄 스위핑 자동 유지를 위한 각 구성부의 수행 내용에 대하여 자세히 살펴본다.

가. 초기 자동 스위프 평탄화 과정

레이저를 구동시키면 처음에 스위핑 스펙트럼에 대한 자동 평탄화 작업을 통하여 최적의 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍이 결정된다[7]. 여기서  $V_2$ 는 압착기  $X_2$ 에, 그리고  $V_3$ 는 압착기  $X_3$ 에 인가되는 전압이다. 이는 다음과 같은 과정을 거쳐 수행된다.  $V_3$ 가 0V일 때  $V_2$ 가 0 ~ 2V 범위내에서 0.1V 씩 증가하도록 한다.  $V_3$ 가 0 ~ 2V 범위내에서 0.1V 씩 증가할 때마다 위의 과정을 반복하여 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍들의 배열을 미리 준비한다. 이제 cRIO-9063은 이 배열의 각 원소 전압 쌍을 차례로 일정한 시간 간격마다 NI-9262로 내보낸다. NI-9262는 내부의 DAC(Digital to Analog Conversion)를 통하여 해당 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 편광조절기의  $X_2$ 와  $X_3$ 에 인가한다. 이처럼 배열의 각 전압 쌍에 대하여 측정된 스위핑 스펙트럼의 교류 성분 변동 폭을 서로 비교하여 변동 폭이 가장 적은 즉 최고의 평탄 스위핑을 제공하는 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 확보한다. 스위핑 스펙트럼의 교류 성분 변동 폭 측정은 광 검출 회로의 출력전압을 아날로그 입력용 NI-9205 모듈로 충분히 샘플링하여 얻어진 값들의 최대와 최소의 차로서 얻어진다. 다음으로 더욱 미세한 전압 조정을 통하여 더욱 평탄한 스위핑을 얻고자 한다. 이를 위하여 위에서 확보된 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 중심으로 하며 상하 좌우 각각 0.2V 범위 내에서 5mV 간격의 미세 증분 조정을 통하여 가장 평탄한 스위핑을 제공하는 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 최종적으로 확보한다. 그리고 최종 확보된 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 편광조절기의  $X_2$ 와  $X_3$ 에 인가하므로써 초기 자동 평탄화 작업이 완료된다.

위의 과정을 통하여 일단 레이저 동작 초기에 자동으로 최적의 스위핑 평탄화가 얻어지지만 이는 주변 환경의 영향으로 오래 지속되지 못한다. 따라서 레이저를 작동시키는 동안에 계속하여 주기적

으로 스위핑 스펙트럼을 모니터링하면서 이에 맞추어 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 계속 변화시켜 항상 최적의 스위핑 평탄화가 유지되도록 하여야 한다.

나. 평탄 스위핑 자동 유지 알고리즘

그림 4에 평탄 스위핑 자동 유지를 위하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 흐름도를 보였다. 이는 cRIO-9063에서 수행되는 LabVIEW 프로그램이다. 초기에 최고의 평탄 스위핑을 제공하는 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍이 일단 확보된 후에  $V_2$  값은  $\Delta V$ (실험에서는 0.1V) 만큼 증가되고  $V_3$  값은 이전 값이 그대로 사용된 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 편광조절기에 인가시킨다. 일정 시간 경과(실험에서는 100ms) 후에 삼각파의 200주기에 해당하는 시간동안 광 검출 회로에서 출력되는 스위핑 스펙트럼 교류 성분을 200kS/s의 속도로 샘플링하고 이 값들로부터 교류 성분의 피크-피크값( $(V_{p-p})_{\neq w}$ )을 계산하여 바로 이전의 피크-피크값( $(V_{p-p})_{old}$ )과 비교한다. 만일  $(V_{p-p})_{\neq w}$ 이  $(V_{p-p})_{old}$ 와 같다면 바로 이전에 인가하였던 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍을 그대로 편광조절기에 인가한다. 그러나  $(V_{p-p})_{\neq w}$ 이  $(V_{p-p})_{old}$  보다 크

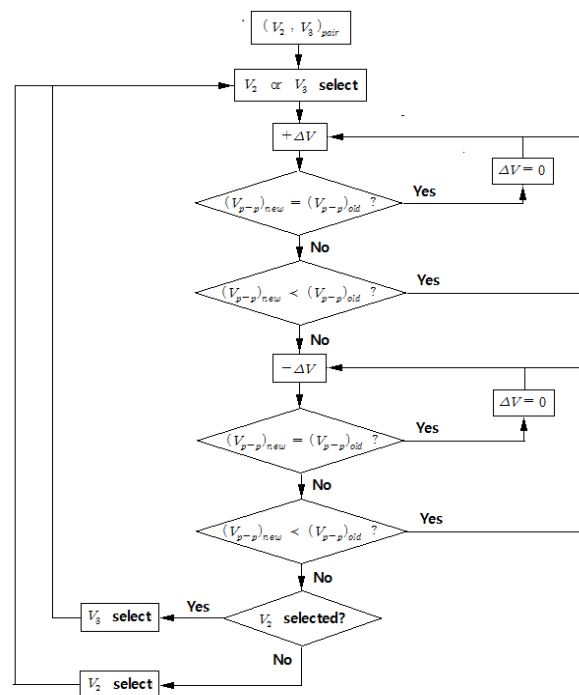


Fig. 4. The flow chart of the algorithm proposed for flat sweeping automatic hold.

그림 4. 제안된 평탄 스위핑 자동 유지 알고리즘의 흐름도

다면 즉 이전 보다 평탄화가 더 악화되었으면  $V_2$  값은  $\Delta V$  만큼 감소시키고  $V_3$  값은 그대로 사용하여 편광조절기에 다시 인가한다. 그리고  $100ms$  후에 다시  $(V_{p-p})_{\neq w}$  를 측정하여  $(V_{p-p})_{old}$  와 비교한다. 만일  $(V_{p-p})_{\neq w}$  이  $(V_{p-p})_{old}$  와 같다면 바로 이전에 인가하였던  $(V_2, V_3)$  전압 쌍을 그대로 인가한다.  $(V_{p-p})_{\neq w}$  이  $(V_{p-p})_{old}$  보다 작다면 계속하여  $V_2$  값은  $\Delta V$  만큼 감소시키고  $V_3$  값은 그대로 사용하여 편광조절기에 인가한다. 만일  $(V_{p-p})_{\neq w}$  이  $(V_{p-p})_{old}$  보다 크다면 이번에는  $V_2$  값은 그대로 사용하고  $V_3$  값은  $\Delta V$  만큼 증가시켜서 편광조절기에 인가한다. 즉 이제 부터는  $V_2$  값은 유지시키면서  $V_3$  값을 변동시켜 링 레이저내의 편광을 조절한다. 위의 전체 과정을 주기적(실험에서는  $1sec$ )으로 반복하면 평탄 스위핑을 최적 상태로 자동 유지시킬 수 있다.

#### 다. 스위핑 스펙트럼의 광전 변환 및 필터링

본 논문에서는  $-9V \sim 9V$ 의 DC 전압과  $7V_{p-p}$ 의 삼각파가 합해진 전압을 FFP-TF에 인가하였다. 이때 DC 전압은 스위핑의 중심 파장을 결정하고 삼각파는 스위핑 범위와 속도를 결정한다. 레이저의 광섬유 링 공진기에서 주변 환경 변화는 광섬유를 통과하는 광의 편광을 변동시키고 이는 링 공진기를 구성하는 다른 광소자의 특성에 영향을 주어 궁극적으로 레이저의 스위핑 스펙트럼이 변동된다. 이때 편광조절기에 인가되는  $(V_2, V_3)$  전압 쌍을 적절하게 조정하면 링 공진기를 회전하는 광의 편광이 변화되어 다시 스위핑 스펙트럼을 평탄하게 만들 수 있다. 위의 과정에서 평탄 스위핑을 계속 유지하기 위해서는 현재의 스위핑 스펙트럼 상태를 계속 모니터링하는 것이 요구된다. 광 검출 회로는 레이저 출력광의 일부로부터 스위핑 스펙트럼과 동일한 형태의 교류 성분 파형을 얻기 위하여 사용된다. 광전 변환을 위하여 고속 포토다이오드를 사용하였으며  $1kHz \sim 40kHz$  대역의 대역 통과 필터 및 증폭기를 구성하기 위하여 TI사의 LMH6609 op-amp를 사용하였다.

#### 라. 광 검출 회로의 출력 전압 샘플링

광 검출 회로의 출력 전압 파형은 스위핑 스펙트

럼의 교류 성분과 동일한 형태를 가진다. 삼각파 200주기 동안에 해당하는 출력 파형을 샘플링하기 위하여 cRIO-9063에 대한 LabVIEW 프로그래밍과 NI-9205를 사용하였다. cRIO-9063에서의 프로그래밍을 통하여 삼각파 1주기당 1회의 트리거 펄스를 발생시키고 이 펄스의 상승에지를 기점으로 샘플링을 시작하였다. NI-9205는  $200kS/s$  속도로 광 검출 회로의 출력 전압파형을 ADC(Analog to Digital Conversion)하고 이 값을 cRIO-9063으로 전송한다.

#### 마. 스위핑 스펙트럼 분석

편광조절기에  $(V_2, V_3)$  전압 쌍이 인가되면  $100ms$  후에 NI-9205는 200회의 왕복 스위핑 구간에 해당하는 광 검출 회로 출력 파형을  $200kS/s$ 의 속도로 샘플링한다. 이 샘플 값들은 cRIO-9063의 LabVIEW 프로그램에 의하여 분석되어 최대와 최소의 차 즉 피크-피크값( $(V_{p-p})_{\neq w}$ )이 계산되고 이 값은 이전 피크-피크값( $(V_{p-p})_{old}$ )과 비교된다. 이 결과에 따라 cRIO-9063은 그림 4의 알고리즘에서 보여진 새로운  $(V_2, V_3)$  전압 쌍을 발생시켜 NI-9262로 내보낸다. NI-9262는 해당 전압 쌍을 편광조절기에 인가한다. 이러한 과정은 주기적으로 반복되며 이를 통하여 최적 상태의 평탄 스위핑이 자동 유지된다.

### III. 실험 결과 및 검토

위에서 제안된 평탄 스위핑 자동 유지 기능을 수행하는 파장 스위핑 레이저를 제작하였으며 이를

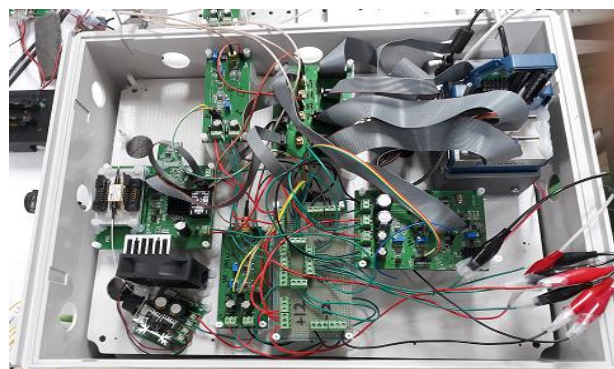


Fig. 5. Wavelength swept laser realized with the function of flat sweeping automatic hold.

그림 5. 평탄 스위핑 자동 유지 기능을 포함하여 제작된 파장 스위핑 레이저

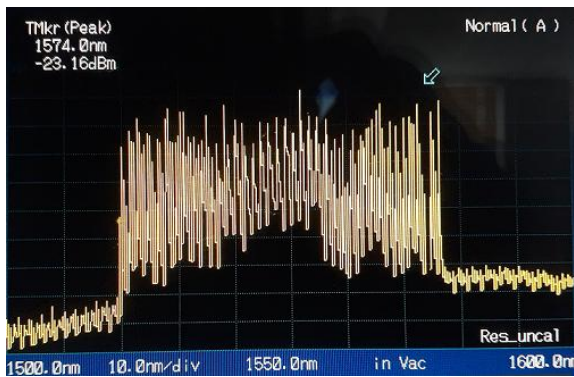
그림 5에 보였다. 그림의 우측 상단부에 cRIO-9063 임베디드 모듈, NI-9262, 그리고 NI-9205 등이 보이고 그림의 중앙 하단부에 광 검출 회로, 그리고 좌측 중앙에 SOA가 보인다. 광섬유 링 공진기를 구성하는 나머지 광소자들은 그림의 하층부에 별도로 설치하였으며 따라서 편광조절기는 그림에 보이지 않는다.

레이저의 구동 초기에 일단 최적의 평탄 상태로 스위핑이 세팅되지만 이는 주변 환경의 영향으로 오래 지속되지 못한다. 따라서 과장 스위핑 레이저에 평탄 스위핑 자동 유지 기능이 장착되지 않은 경우에는 시간이 지날 수록 스위핑 평탄성이 악화된다. 그림 6은 초기의 스위핑 평탄화 세팅 후 5시간이 경과한 시점에서 Anritsu사의 9710B 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정된 스위핑 스펙트럼

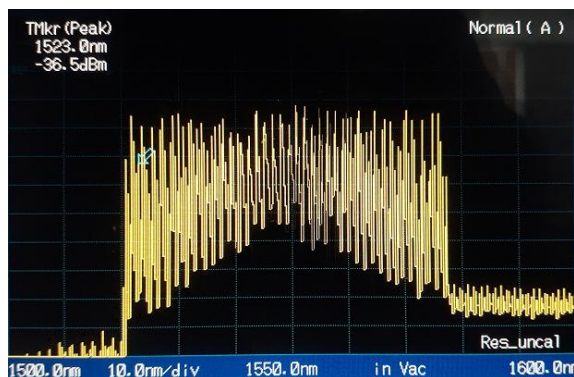
을 보여준다. 그림 6(a)는 평탄 스위핑 자동 유지 기능이 없는 경우이며, 그림 6(b)는 자동 유지 기능을 사용한 경우이다. 그림 6(a)에서 보이는 것처럼 스위핑 스펙트럼에 많은 골극들이 나타났으며 골 깊이는 약 5dB에 해당한다. 만약 이 상태의 스위핑을 그대로 사용한다면 SS-OCT에서는 영상의 화질 및 정확성에 나쁜 영향을 미치고, 안전 진단 모니터링에서는 해당 부분에 대한 센서 신호 세기의 감소로 인하여 모니터링 에러를 야기시킬 수 있다. 그러나 그림 6(b)에서는 스위핑이 전체 대역에 걸쳐서 비교적 평탄하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

한편 그림에서 과장 스위핑 범위가 비교적 좁은 약 56nm임을 알 수 있다. 이는 사용된 FFP-TF의 FSR(= 120nm)이 SOA의 ASE 대역보다 좁아 레이저가 2개의 과장으로 발진할 가능성이 존재하는데 이를 배제하기 위하여 FFP-TF에 인가되는 삼각파의 진폭을 제한하였기 때문이다. FFP-TF의 FSR이 160nm인 경우에는 80nm 이상의 스위핑이 가능하다. 한편 광 파워미터를 사용하여 약 8.8mW의 평균 출력 광 파워가 측정되었다.

그림 6의 스위핑 스펙트럼과 함께 측정된 다른 파형들을 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 평탄 스위핑 자동 유지 기능이 없는 경우, 그리고 그림 7(b)는 자동 유지 기능을 사용한 경우이다. 그림 7(a)와 그림 7(b)의 상단에 보여진 파형은 광섬유 링 공진기 내의 FFP-TF에 인가된 주파수 1kHz의 삼각파를 나타내며 이는 cRIO-9063과 NI-9262에 의하여 생성된다. 이 파형에 의하여 FFP-TF의 투과대역이 가변되면서 레이저의 스위핑이 얻어진다. 그림 7(a)와 그림 7(b)의 중간 파형은 삼각파 1주기 당 1회 발생하는 트리거 펄스를 보여주며 이는 광 검출 회로의 출력 파형(그림 7(a)와 그림 7(b)의 하단 파형)을 샘플링하기 위한 시작 신호로 사용된다. 그림 7(a)와 그림 7(b)의 하단 파형은 그림 6(a)와 그림 6(b)의 스위핑 스펙트럼을 가지는 레이저 출력 광의 일부가 광 검출 회로로 입력되었을 때의 출력 신호를 각각 보여준다. 평탄 스위핑 자동 유지 기능이 없는 경우에는 시간이 지날수록 스위핑 평탄성이 악화되어 그림 7(a)의 하단에서 보여진 것처럼 광 검출 회로의 출력 신호에 깊은 골들이 생성되기 시작한다. 골의 깊이는 약  $4V_{p-p}$ 에 해당함을 알 수 있다. 이는 그림 6(a)에서 보여진



(a)



(b)

Fig. 6. Sweeping spectrum of wavelength swept laser measured when 5 hours passed after flat sweeping setting.

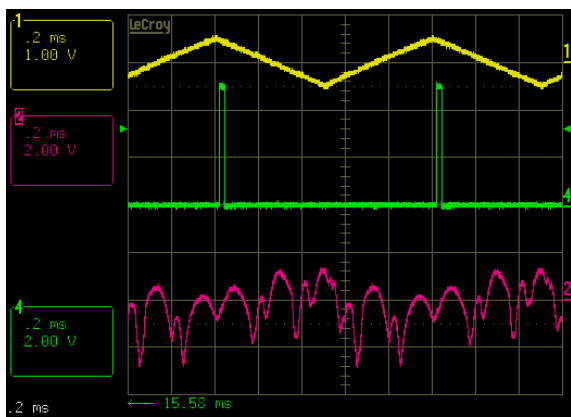
- (a) under no automatic hold function,
- (b) under automatic hold function.

그림 6. 스위핑 평탄화 세팅 후 5시간이 경과한 시점에 측정된 과장 스위핑 레이저의 스위핑 스펙트럼

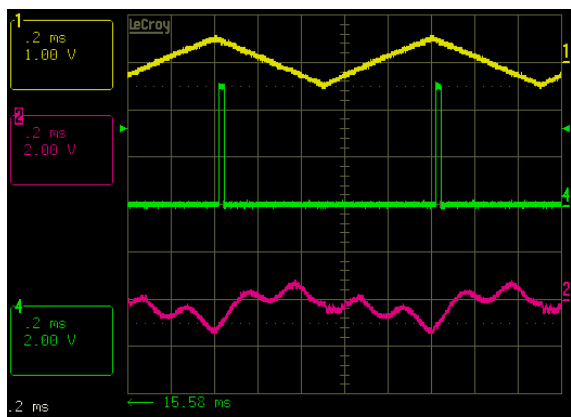
- (a) 자동 유지 기능 미사용, (b) 자동 유지 기능 사용

스위핑 스펙트럼이 평탄하지 못하고 많은 굴곡을 가지고 있기 때문이다. 그러나 평탄 스위핑 자동 유지 기능이 사용된 경우에는 그림 7(b)의 하단에서 보인 것처럼 골의 깊이가 약  $1.2V_{p-p}$ 이며 약 0.3배 감소되었음을 알 수 있다.

실험을 통하여 초기의 스위핑 평탄화 세팅 후 약 5시간이 경과하여도 평탄 스위핑이 잘 유지되고 있음을 확인하였다. 그리고 여러 번의 실험에서도 매우 평탄한 스위핑이 장시간 지속되었다. 이는 편광



(a)



(b)

Fig. 7. Waveforms measured together with Fig. 6.

(a) under no automatic hold function,

(b) under automatic hold function.

(top) triangle-wave applied to FFP-TF

(middle) trigger pulse for DAQ start

(bottom) signal from optical receiver circuit

그림 7. 그림 6과 함께 측정된 파형

(a) 자동 유지 기능 미사용

(b) 자동 유지 기능 사용

(상) FFP-TF에 인가된 삼각파형

(중) DAQ 시작을 위한 트리거 펄스

(하) 광 검출 회로의 출력 파형

조절기에 인가될 ( $V_2, V_3$ ) 전압 쌍이 그림 4의 알고리즘에 따라 결정될 때 평탄 스위핑이 장시간(이론적으로는 무한시간) 자동 유지될 수 있음을 의미한다. 따라서 제안된 알고리즘은 파장 스위핑 레이저를 장시간 구동시킬 때 스위핑 스펙트럼 상태 확인을 위하여 사람이 개입하여야 했던 기존의 불편함을 해소시킨다. 그리고 이 과정에서 요구되던 광 스펙트럼 분석기의 필요성이 배제되므로 유지 비용이 절감된다. 앞으로 평탄 스위핑 자동 유지 기능을 지닌 파장 스위핑 레이저는 분광학적 연구[10]에서 광원으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 SS-OCT와 대형 구조물 안전 모니터링 시스템의 광원으로 사용되는 파장 스위핑 레이저의 평탄 스위핑을 자동 유지하는 방안을 제안하였다. 그리고 LabVIEW 프로그래밍, cRIO-9063 임베디드 모듈, NI-9262, NI-9205, 광 검출 회로를 사용한 편광 조절기 제어를 통하여 이를 구현하였다. 실험을 통하여 5시간 경과 후에도 평탄 스위핑이 잘 유지되는 것을 확인하였으며, 약  $56nm$ 의 스위핑 범위,  $1kHz$ 의 스위핑 주파수, 그리고  $8.8mW$ 의 평균 광 출력을 측정하였다. 사용된 FFP-TF의 FSR 값이 작아서 스위핑 범위가 제한되었지만 FSR이  $160nm$ 인 경우에는  $80nm$  이상의 스위핑이 가능하다. 제안된 방식은 파장 스위핑 레이저를 장시간 구동시킬 때 스위핑 스펙트럼 상태 확인을 위하여 사람이 개입하여야 했던 기존의 불편함을 해소시킨다. 그리고 이 과정에서 필요하던 광 스펙트럼 분석기의 필요성을 배제하므로 유지 비용이 절감된다.

#### References

[1] Mark Brezinski, MD, PhD, "Optical Coherence Tomography, Principles and Applications," *OP Institute of Physics*, 2003.

DOI: 10.1088/0034-4885/66/2/204

[2] David Huang James G. Fujimoto, "Optical Coherence Tomography," *Science*, vol.254, pp. 1178-1181, 1991. DOI: 10.1126/science.1957169

[3] Y. Yasuno, V. D. Madjarova, S. Makita, "Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for in vivo investigation of human anterior eye segments," *Opt. Express*, vol.13, no.26, 2005.

DOI: 10.1364/OPEX.13.010652

[4] K. O. Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Fundamentals and Overview," *J. of Lightwave Technology*, vol.15, no.8, pp.1263-1276, 1997.

DOI: 10.1109/50.618320

[5] R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher, "Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol.11, pp.889-894, 2003.

DOI: 10.1364/OE.11.000889

[6] M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. Yang, J. Izatt, "Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol.11, pp.2183-2189, 2003.

DOI: 10.1364/OE.11.002183

[7] J. Eom, "Automatic sweep flattening for wavelength sweeping laser of SS-OCT," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol.26, no.1, pp.44-49, 2017. DOI: 10.5369/JSST.2017.26.1.44

[8] R. Huber, M. Wojtkowski, 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.

[9] J. Eom, "Realization of Swept Source-Optical Coherence Tomography using FDML Laser," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol.20, no.1, pp.46-52, 2011.

DOI: 10.5369/JSST.2011.20.1.46

[10] W. J. Yoo, J. Y. Heo, D. H. Cho, K. W. Jang, J. K. Seo, B. Lee, Y. Cho, J. H. Moon, B. G. Park, "Spectroscopic study on the development of fiber-optic pH sensor," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol.18, no.5, pp.365-371, 2009. DOI: 10.5369/JSST.2009.18.5.365

## BIOGRAPHY

### Duk-Kyu Lee (Member)



2017 : BS degree in Electronics Engineering, Kangwon National University.

2017~present : Combined Master's and Doctorate Program in Electronics Engineering, Kangwon National University.

### Jinseob Eom (Member)



1982 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1984 : MS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1990 : PhD degree in Electrical Engineering, Texas A&M University.

1992~present : Dept. of Electronics Engineering, Kangwon National University.