

파장 스위핑 레이저의 스위핑 선형화

Sweeping Linearization of Wavelength Swept Laser

엄진섭*

Jinseob Eom^{*★}

Abstract

In this paper, a new method for linear sweeping of wavelength swept laser has proposed, and the linear sweeping of $1kHz$ speed and $80nm$ range has realized by using this method. The proposed requires only one-shot calibration in the early stage on a wave pattern applied to FFP-TF. This makes the problem with nonlinear swept lasers like a cumbersome and time-consuming signal processing brought on by every recalibration to be resolved.

요약

본 논문에서는 선형으로 스위핑하는 파장 스위핑 레이저를 구현하기 위한 새로운 방식을 제안하였으며, 레이저 제작 및 실험을 통하여 $1kHz$ 속도, $80nm$ 구간의 선형 스위핑 특성을 확인하였다. 제안된 방식은 FFP-TF 인가 파형에 대한 초기 한번의 선 보정만을 필요로 한다. 따라서 기존의 비선형 스위핑 레이저에서 불가피한 후 보정 과정의 번거로움 및 시간 소모 문제를 해결해 준다.

Key words : Wavelength swept laser, Linear sweeping, Nonlinear sweeping, Recalibration, Comb filter

1. 서론

수 μm 이하의 분해능을 가지는 광 결맞음 단층 촬영(OCT : Optical Coherence Tomography) 기술은 기존의 의료영상 촬영 기술로는 접근하기 힘든 인체 피하조직 및 혈관조직 등에 대한 실시간 고분해능 의료 영상획득을 가능케 한다[1]. 현재까지 발표된 OCT 기술은 생체의 이미지 정보를 획득하는 원리에 따라 크게 Time-Domain OCT(TD-OCT) 방식과 Frequency-Domain OCT(FD-OCT) 방식으로 나뉜다. 최근에는 FD-OCT 방식에 속하면서 광대역 파장 스위핑 레이저를 사용하는 SS-OCT(Swept

Source-OCT) 기술이 제반 성능 면에서 우수하기 때문에 각광을 받고 있다.

한편 교량, 댐 등과 같은 대형 SOC 구조물의 붕괴 위험성을 항시 모니터링하기 위하여 사용되는 안전 진단 모니터링 시스템에서도 기계식 센서를 사용하는 전자 시스템 보다는 파장 스위핑 레이저를 기반으로 하는 광학 시스템이 품질의 우수성 및 편리성 때문에 최근에 급격하게 전자 시스템을 대체하고 있다.

고화질 및 고속영상 획득을 강점으로 가지는 SS-OCT 시스템이나 측정의 정확성을 요구하는 안전 진단 모니터링 시스템에서 이들의 성능을 결정하는 중요

* Dept. of Electronics Engineering, Kangwon National University
E-mail : jeom@kangwon.ac.kr, Tel : +82-33-250-6327

※ Acknowledgment

This research was supported by Korea Technology and Information Promotion Agency for SMEs(TIPA) funded by Ministry of SMEs and Startups.(No. C0564061)

Manuscript received Aug. 27, 2018; revised Aug. 28, 2018; Accepted Sep. 13, 2018

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.

한 요소 중의 하나는 파장 스위핑 레이저(wavelength swept laser)의 스위핑 특성이다. 요구되는 스위핑 특성으로는 고속성, 광대역성, 그리고 선형성 등이 있다. 고속 광대역 파장 스위핑 특성은 SS-OCT에서 화질 및 영상 속도를 좌우하고[2][3], 안전 진단 모니터링 시스템에서는 설치 센서의 개수 및 모니터링 빈도를 증가시킨다. 그러나 실물과 일치하는 정확한 영상 또는 더욱 정확한 모니터링을 얻기 위해서는 시간에 대한 스위핑의 선형성이 요구된다. 즉 파장 스위핑 레이저의 발진 주파수(또는 파수, wave number)가 시간에 대해 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 요구된다. 그러나 현재 대부분의 파장 스위핑 레이저는 발진 주파수 대 시간의 선형성을 제공하지 못하고 있으며, 이를 해결하기 위하여 SS-OCT 시스템과 안전 진단 모니터링 시스템에서는 획득된 측정 신호에 대한 후 보정 과정을 수행하여 발진 주파수의 비선형성을 보상해 주고 있다.

본 논문에서는 레이저의 선형 스위핑을 구현하기 위한 새로운 방법을 제안하였으며, 이를 적용한 파장 스위핑 링 레이저를 제작하였다. 실험을 통하여 $1kHz$ 의 왕복 스위핑 속도와 $9mW$ 의 평균 출력 광 파워, 그리고 $80nm$ 스위핑 전체 구간에서의 선형 스위핑을 확인하였다.

II. 레이저 및 선형화 시스템 구성

파장 스위핑 레이저 및 이의 선형 스위핑을 구현하기 위한 전체 시스템 구성을 그림 1에 보였다. 이를 기능별로 구분하여 보면, 광섬유 링 공진기 구조를 가지는 파장 스위핑 레이저, 레이저 출력의 스위핑 상태 정보를 비트 주파수 신호로 제공하는 빗살무늬 광 필터(comb filter) 모듈, 비트 주파수 신호 획득 및 보정 신호 계산을 위한 신호처리부, 그리고 FFP-TF에 보정된 신호를 인가하는 FFP-TF 드라이버부로 구분된다.

각 구성부를 좀 더 살펴보면 다음과 같다. 파장 스위핑 레이저는 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 중심파장 $1310nm$ 의 SOA(semiconductor optical amplifier), 광 아이솔레이터, 1×2 광 커플러, 광섬유 페브리-페롯 파장 가변 필터(FFP-TF : fiber Fabry Perot-tunable filter), 편광조절기(PC : Polarization Controller), 광 아이솔레이터 등이 링 형태로 연결된 구조를 가진다.

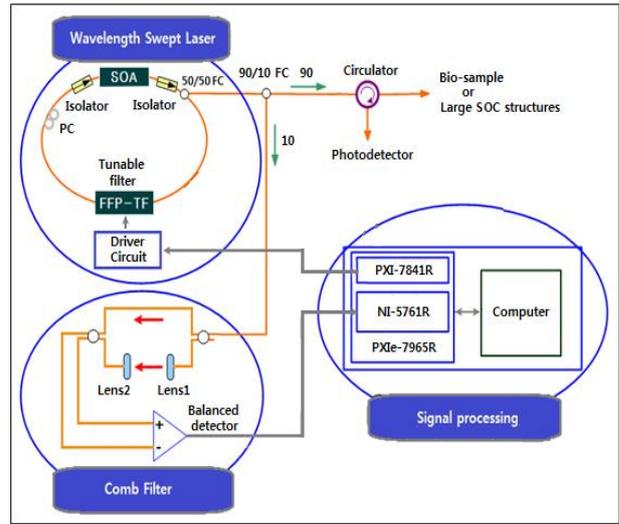


Fig. 1. Schematic diagram of wavelength swept laser with linear sweeping.

그림 1. 선형 스위핑 레이저의 구성도

빗살무늬 광 필터 모듈은 2개의 2×2 광 커플러, 2개의 광 컬리메이터(collimator), 그리고 균형 광 검출기로 구성된다.

신호처리부는 고속 DAQ(data acquisition) 모듈과 컴퓨터로 구성된다. 컴퓨터는 FFT(fast fourier transform) 연산 결과를 바탕으로 제안된 방식에 따라 보정 값을 계산한다.

FFP-TF 드라이버부는 보정된 신호를 출력하는 아날로그 출력 DAQ 모듈 및 드라이버 전자회로로 이루어진다.

III. 기능블록별 동작과정

1. 파장 스위핑 레이저

레이저 구현에 사용된 FFP-TF는 페브리-페롯 간섭계 구조를 가진다. 이는 간섭계의 한쪽에 부착된 압전소자(PZT : piezoelectric transducer)에 정현파와 같은 신호 전압을 인가하여 내부 공진 간격을 주기적으로 변화시킴으로써 투과대역을 주기적으로 스위핑시킨다. 이때 신호 전압 1 주기당 왕복 스위핑 즉 2번의 스위핑을 얻을 수 있다. 본 논문에서 사용된 FFP-TF는 FSR(free spectral range) $160nm$, Finesse 600, 삽입손실 $2.5dB$, $-20 \sim 50V$ 의 인가 전압 범위를 가진다.

레이저의 동작원리는 다음과 같다[4]. SOA로부터 출력된 ASE 빛은 링 공진기내의 광 아이솔레이터 때문에 링 공진기를 단방향(실험에서는 시계방

향)으로 진행한다. 빛이 광섬유 링 공진기를 1회전 하는데 소요되는 시간은 FFP-TF의 구동 속도에 비하여 매우 충분히 짧다. 따라서 어느 시점에 FFP-TF의 주어진 투과대역을 통과한 ASE 빛은 링 공진기를 시계방향으로 1회전 진행한 후 다시 FFP-TF에 도달하여도 FFP-TF의 투과대역은 여전히 이전과 동일하다고 생각할 수 있다. 따라서 ASE 빛은 FFP-TF의 투과대역이 변경되기 전에 링 공진기를 수차례 회전하며 SOA를 통과할 때마다 증폭되어 FFP-TF의 투과대역과 동일한 파장으로 발진하게 된다. 이제 FFP-TF의 투과대역이 조금 변경되면 위와 같은 과정을 거쳐서 변경된 투과대역과 동일한 파장으로 발진하게 된다. 한편 SOA의 전체 이득범위를 충분히 활용할 수 있도록 FFP-TF에 인가되는 신호 전압의 크기를 증가시키면 광대역에 걸친 파장 스위핑이 가능하다.

만일 링 공진기가 모두 광섬유로 구성되어 있다는 가정 하에 링 길이가 12m인 파장 스위핑 레이저를 구성한다면 SOA로부터 방출된 빛이 링 레이저를 1회전하는데 소요되는 시간은 $\frac{12 \times 1.46}{3 \times 10^8} = 56.4ns$ 이다. 1kHz의 왕복 스위핑 속도를 고려하면 왕복 스위핑 주기는 1ms이다. 따라서 레이저가 단방향 스위핑 하는 동안에 빛은 링 레이저를 $\frac{0.5ms}{56.4ns} = 8865$ 회만큼 회전하게 된다. 레이저의 발진 선폭을 0.08nm 이하라면 80nm의 단방향 스위핑 대역은 $\frac{80nm}{0.08nm} = 1000$ 개의 구간으로 나눌 수 있다. 따라서 각 구간당 약 9회의 회전이 가능하다. 이는 위의 레이저 작동 원리를 충분히 설명해준다.

이외에 SOA의 이득 특성은 통과하는 빛의 편광에 민감하므로 이를 제어하기 위하여 SOA의 좌측에 편광조절기를 설치하였다.

2. 빗살무늬 광 필터 모듈

그림 1에서 보인 것처럼 90:10 광 커플러를 통하여 링 레이저 출력의 10% 정도가 빗살무늬 광 필터 모듈로 입사된다. 모듈은 마하젠더 간섭계 구조이며, 이의 주파수 특성은 동일한 간격을 가지는 빗살무늬(comb like) 형태를 보인다. 빗살무늬간격 투과대역간 주파수 간격 Δf_{comb} (또는 FSR)와 두 팔간의 거리 차 ΔL 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다[5]. Δk 는 투과대역간의 파수 간격이다.

$$\Delta f_{comb} = \frac{c}{\Delta L} \quad \text{또는} \quad \Delta k = \frac{2\pi}{\Delta L} \quad (1)$$

이를 투과대역간 파장차로 다시 표시하면,

$$\Delta \lambda_{comb} = \frac{\lambda^2}{\Delta L} \quad (2)$$

으로 주어진다. 여기서 c 는 빛의 속도이고, λ 는 빛의 파장이다. $\Delta f_{comb} = 100GHz$ 가 되기 위한 마하젠더 간섭계의 두 팔간의 공기 중 거리 차 ΔL 은 식 (1)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta L = \frac{c}{\Delta f_{comb}} = \frac{3 \times 10^8}{100 \times 10^9} = 3mm$$

따라서 식 (2)로부터 투과대역간 파장차를 계산하면

$$\Delta \lambda_{comb} = \frac{\lambda^2}{\Delta L} = \frac{(1310nm)^2}{3mm} = 0.572nm$$

이 얻어진다.

빗살무늬 광 필터 모듈은 레이저 출력의 스위핑 특성을 나타내는 비트 주파수 신호를 생성한다. 레이저의 발진 주파수가 비선형으로 스위핑할 때에 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호는 주파수가 시간에 따라 다소 변하는 처핑(chirping)된 정현파(빗살무늬) 형태를 보인다.

만일 실험에서 파장 스위핑 레이저가 1kHz의 속도로 $\Delta \lambda_{sweeping} = 80nm$ 에 걸쳐 왕복 선형 스위핑을 수행한다면, 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력에서 얻어지는 빗살무늬 신호의 평균 주파수 $f_{comb,avg}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{comb,avg} = \frac{80nm}{0.572nm} \times 2 \times 1kHz \approx 280kHz$$

실험에 사용된 고속 DAQ 보드는 최대 250MS/s를 제공하므로 이러한 주파수 신호를 충분히 샘플링할 수 있다.

모듈내의 광 검출단으로서 균형 광 검출기[6]을 사용하는 이유는 간섭계의 두 팔간의 거리 차 정보를 담고 있는 비트 주파수 신호를 제외한 DC 성분, 자기상관성 간섭신호, 그리고 증폭 잡음들을 제거하여 높은 SNR을 얻기 위함이다. 일반적으로 비트 주파수 신호를 생성하는 빛은 세기가 매우 약하기 때문에 검출과정에서 발생하는 잡음 등에 의하여 신호 왜곡이 발생할 수 있다.

빛살무늬 광 필터 모듈의 출력은 신호처리부의 고속 DAQ 모듈을 통하여 샘플링 되어 제안된 방법에 따라 처리된 후에 FFP-TF의 인가 파형을 보정하는 데에 사용된다.

3. 신호처리부

SS-OCT에서는 생체의 표피 단면 영상정보를 얻기 위하여 레이저의 발진 주파수(또는 파수)를 x 축으로 하고 생체로부터의 간섭신호 세기를 y 축으로 하는 데이터 집합(A-scan)을 필요로 한다. 다음으로 이 데이터 집합을 FFT하여 이로부터 생체의 깊이 정보를 얻어낸다. 만일 스위핑 레이저의 발진 주파수(또는 파수)가 시간에 대해 선형적으로 증가 또는 감소한다면 DAQ 모듈의 내부클럭에 따라 간섭신호를 샘플링하고 이 샘플링된 데이터에 대해 FFT를 수행하는 것만으로 정확한 영상을 얻을 수 있다. 이 경우에 후 보정과정이 생략되어 신호처리 시간이 단축되므로 고속 영상을 얻을 수 있다.

한편 대형 SOC 안전 모니터링 시스템에서는 구조물 변형 정도에 대한 정확한 정보를 얻기 위하여 발진 주파수(또는 파수)를 x 축으로 하고 광섬유 격자로부터의 반사 광 펄스 유무를 y 축으로 하는 데이터 집합을 필요로 한다. 다음으로 이 데이터 집합으로부터 각 광 펄스 발생 시점의 해당 반사 파장을 계산하여 구조물의 변형 정도를 얻어낸다. 만일 스위핑 레이저의 발진 주파수(또는 파수)가 시간에 대해 선형적으로 증가 또는 감소한다면 DAQ 모듈의 내부클럭을 사용하여 각 광 펄스의 발생 시간을 카운트한 후에 시간과 발진주파수의 선형 관계로부터 쉽게 발진주파수 즉 반사 파장을 계산할 수 있다. 이때에도 후 보정과정이 생략되므로 신호처리 시간이 단축되어 모니터링 정보를 빠르게 얻을 수 있다.

그러나 기존 파장 스위핑 레이저[7]의 발진 주파수 대 시간의 그래프는 선형성을 확보하기가 어려운 것이 현실이다. 따라서 오늘날의 SS-OCT 시스템이나 안전 진단 모니터링 시스템에서는 비선형 스위핑 하에서 얻어진 측정 신호를 다시 선형 스위핑 하에서 얻어진 결과로 변형하는 보정 과정이 필수적이다. 이는 보통 S/W적으로 수행되며 이 과정에서 시간 지연 및 원치 않는 신호왜곡이 발생할 수 있고, 이는 다시 시스템의 속도 및 품질을 저하시킨다.

기존의 후 보정 과정[4]는 빛살무늬 광 필터 모듈로부터 출력되는 처핑된 정현파 신호의 연속된 두

피크점간의 시간 간격은 비록 변할지라도 주파수(또는 파수 k) 간격은 일정하다는 사실에 기반을 둔다. 이를 이용하여 빛살무늬 광 필터 모듈의 출력신호에 대한 분석을 통하여 k_{nonlin} 대 시간의 비선형 그래프를 얻는다. 그리고 이를 바탕으로 측정신호에 대한 보정을 매번 수행한다.

본 논문에서는 빛살무늬 광 필터 모듈로부터 출력되는 정현파 신호의 시간에 대한 주파수의 변화는 시간에 대한 dk/dt 의 변화에 비례한다는 사실적 고찰에 근거하여 새로운 선 보정 방식을 제안하였다. FFP-TF에 인가되는 파형에 대한 선 보정을 통하여 파장 스위핑 레이저의 발진 주파수 대 시간의 선형성을 확보하고 이를 사용하여 측정을 진행한다. 레이저가 스위핑하는 동안에 빛살무늬 광 필터 모듈의 출력신호는 큰 변동이 없이 매우 안정적이다. 따라서 파장 스위핑 레이저를 on 시킨 직후에 한번 얻어진 보정 신호는 레이저가 작동하는 동안 계속하여 FFP-TF의 인가 파형으로 사용될 수 있다.

가. 제안된 파형 보정 방법

제안된 선 보정 과정을 아래에 순서대로 정리하였다. 레이저 on시에 FFP-TF에는 주파수 $1kHz$ 의 삼각파가 인가된다. 삼각파의 1주기는 N 개의 데이터로 구성된다.

① FFP-TF에 삼각파가 인가되면 빛살무늬 광 필터 모듈로부터는 처핑된 정현파 신호가 출력된다. 이제 삼각파의 1주기 시작 시간에 동기를 맞추어 이 정현파 신호를 1주기 동안 샘플링 한다. 샘플 개수는 삼각파 1주기를 구성하는 데이터 개수 N 보다 충분히 큰 정수배가 되게 한다.

② 샘플링된 데이터를 삼각파 1주기 구성 데이터 N 개와 시간상에서 일치시킨다. 시간상에서 삼각파 구성 데이터와 시점이 일치하는 샘플링 데이터를 별도로 구분하여 윈도우 중앙 데이터라고 한다. 그러면 윈도우 중앙 데이터의 총 개수는 삼각파 구성 데이터와 동일하게 N 개다.

③ 이제 샘플링 데이터 끝부분의 2^{m-1} 개를 복사하여 샘플링 데이터의 첫 부분에 붙인다. 여기서 m 은 정수이다.

④ 첫 번째 윈도우 중앙 데이터를 중앙으로 하는 폭 2^m 개의 샘플링 데이터를 취하여 여기에 Hanning 윈도우를 적용한 다음 FFT를 수행하여 전력스펙

트럼을 얻는다. 다음으로 전력스펙트럼의 최대치에 해당하는 주파수와 윈도우 중앙 데이터의 순서 번호 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 을 하나의 좌표 값으로 저장한다. 나머지 윈도우 중앙 데이터들에 대하여 순차적으로 위의 과정을 반복하면 총 N 개의 좌표 값이 얻어진다. 한편 사실적인 고찰에 의하여 좌표 값의 주파수는 dk/dt 에 비례한다[8]. 따라서 N 개의 좌표 값들로부터 인가 파형 1주기에 대응하는 dk/dt 대 t 의 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 k 는 파수(wave number)이며 $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ 으로 주어지고, c 는 빛의 속도, λ 는 빛의 파장, f 는 빛의 주파수이다.

⑤ 위의 dk/dt 대 t 의 그래프를 시간에 대하여 적분하면 인가 파형 1주기에 대응하는 k_{nonlin} 대 t 의 그래프가 얻어진다. 단 오른쪽 반주기를 적분할 때는 부호의 값을 바꾸어 계산한다.

⑥ 이제 k_{nonlin} 대 t 의 그래프에서 최대 점과 양 끝점을 연결하는 직선을 그리면 두 개의 k_{lin} 대 t 의 선형 그래프가 얻어진다. 왼쪽 직선의 기울기는 양수이고 오른쪽 직선의 기울기는 음수이다. 양 끝점 사이의 시간 간격을 N 등분한다. 각 k_{lin} 대 t 의 선형 그래프 방정식을 구한다.

⑦ 두 개의 k_{lin} 대 t 의 선형 방정식으로부터 각 등분에 해당하는 $k_{lin,n}$ 값을 계산한다. 그리고 $k_{nonlin,n}$ 값과의 차 즉 $\Delta k_n (= k_{nonlin,n} - k_{lin,n})$ 을 계산하여 저장한다. 여기서 $n = 1, 2, \dots, N$ 으로 주어진다.

⑧ 이제 FOP-LF에 인가될 새로운 보정 파형의 1주기 데이터 $S_{new,n}$ 은 아래와 같이 얻어진다. $S_{old,n}$ 은 삼각파 1주기 구성 데이터를 나타낸다. C 는 비례상수이며, $n = 1, 2, \dots, N$ 으로 주어진다.

$$S_{\neq w,n} = S_{old,n} + C \times \Delta k_n \quad (3)$$

⑨ 식 (3)의 C 값을 변경하면서 이에 대한 dk/dt 대 t 의 그래프를 측정한다. 그래프가 수평 직선으로 주어질 때의 C 값을 최적 값으로 선정한다.

나. 신호처리

처음에 FFP-TF에 인가되는 $1kHz$ 삼각파의 1주기 구성 데이터의 개수는 $N = 500$ 이다. 이는 삼각파를 생성하는 아날로그 출력 DAQ 모듈의 데이터 출력 속도가 $500ks/s$ 이기 때문이다. 삼각파의 1주기 동안에 레이저의 발진주파수(또는 파수)는 낮은 값에서 높은 값으로, 그리고 다시 낮은 값으로 또는 이의 역

방향으로 왕복 비선형 스위핑한다. 이때 빗살무늬 광 필터 모듈에서는 처핑된 정현파 신호가 출력된다.

만일 이 출력신호를 아날로그 입력 DAQ 모듈의 외부 샘플링 클럭으로 직접 사용할 수 있다면 신호 처리부에서 후 보정이 생략될 수 있다. 그러나 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호는 상당히 처핑되어 있고, 이러한 처핑 신호를 외부 샘플링 클럭으로 허용하는 고급 DAQ 모듈이 아직은 제공되고 있지 않다. 후 보정을 생략할 수 있는 또 한 가지 방법은 파장 스위핑 레이저의 발진 주파수를 시간에 대해 선형으로 스위핑시키는 것이다. 본 논문에서는 이를 위한 새로운 방법을 제안하였다.

빗살무늬 광 필터 모듈의 출력 신호를 샘플링하기 위하여 NI사의 FPGA 모듈인 PXIe-7965R과 어댑터 모듈인 NI-5761을 사용하였다. NI-5761은 4개의 아날로그 입력 채널을 가지며, 채널당 최대 $250MS/s$, 그리고 $14bit$ 분해능을 가진다. 실험에서는 샘플링 속도로서 삼각파의 데이터 출력 속도인 $500ks/s$ 의 40배인 $20MS/s$ 를 사용하였다. 따라서 1주기 동안 샘플링된 데이터 개수는 20000 개(= $N \times 40$ 배)이다. 여기에 일정한 데이터 간격(실험에서는 40 개 = 20000 개/ N)으로 순차적으로 Hanning 윈도우(실험에서는 폭 2048 개)를 적용시키면서 해당 윈도우에 대해 FFT(실험에서 원소 개수는 2048 개)를 수행한다. FFT의 결과스펙트럼에서 최대값에 해당하는 주파수를 추출하면 총 N 개의 주파수가 얻어진다.

한편 위에서 얻어진 주파수는 dk/dt 에 비례한다. 따라서 N 개의 주파수로부터 삼각파 1주기 동안의 dk/dt 대 t 의 그래프를 얻을 수 있다. 이는 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력 신호인 정현파 신호의 처핑 여부를 나타낸다. 만일 파장 스위핑 레이저가 선형으로 스위핑한다면 dk/dt 대 t 의 그래프는 수평 직선으로 나타날 것이다.

위에서 언급된 신호처리 과정은 LabVIEW FPGA 프로그래밍을 통하여 수행되었다.

4. FFP-TF 드라이버부

신호처리부에서 얻어진 보정 신호는 FFP-TF에 인가되어 레이저의 선형 스위핑을 가져온다. 본 논문에서는 아날로그 전압 출력을 위한 DAQ 모듈로서 NI사의 PXI-7841R을 사용하였다. 이 모듈은 최대 $1MS/s$ 의 출력 속도, $16bit$ 의 분해능, $\pm 10V$ 의 출력전압 범위를 가진다. 실험에서는 PXI-7841R을

통하여 500ks/s 의 속도로 보정 신호를 출력하였으며, 이는 자체 제작된 드라이버 회로에서 증폭 및 반전된 후에 FFP-TF를 구동시킨다. 원활한 구동을 위하여 드라이버 회로의 끝단에 위치한 구동 연산 증폭기(op-amp)는 매우 적은 출력임피던스 및 큰 구동전류를 제공하여야 한다.

IV. 실험 및 결과

1. 파장 스위핑 레이저 구현

본 절에서는 파장 스위핑 링 레이저를 제작하고 이의 성능을 측정하였다. 광원인 ThorLabs사의 BOA1132SL SOA에는 600mA 의 전류를 인가하였으며, LabVIEW FPGA 프로그래밍을 통하여 주파수 1kHz , 크기 1V_{p-p} 의 삼각파 구성 데이터를 생성하였다. 이 데이터는 PXI-7841R을 통하여 아날로그 출력 전압으로 전환된 후에 FFP-TF 드라이버 회로에 인가되었다. 그림 2는 실험에 사용된 레이저 셋업과 DAQ 모듈, 그리고 드라이버 회로들을 보여준다.

Anritsu사의 9710B 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 레이저의 스위핑 특성을 측정한 결과, 그림 3에서 보인 것처럼 중심파장 1310nm 를 중심으로 약 80nm 에 걸친 스위핑을 확인하였으며, 평균 광 출력은 약 9mW 이었다.

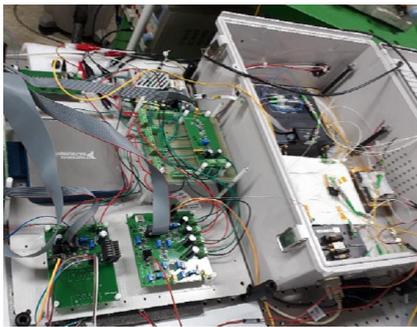


Fig. 2. Experimental set-up.
그림 2. 실험 셋업

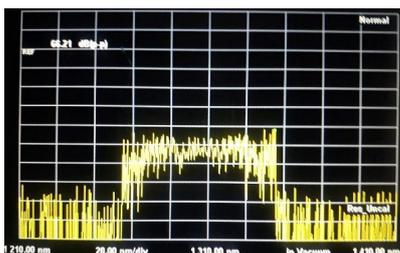
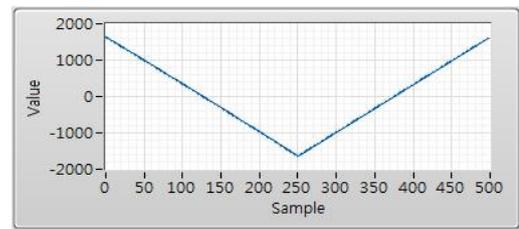
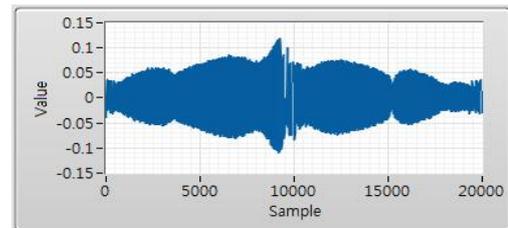


Fig. 3. Measured sweeping spectrum.
그림 3. 측정된 스위핑 스펙트럼

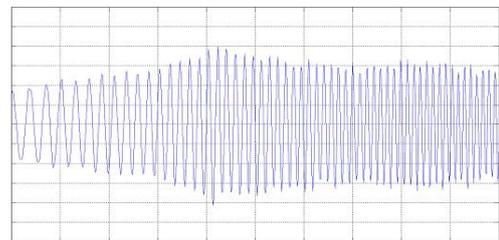
그림 4(a)는 레이저 on 직후에 FFP-TF에 인가된 삼각파의 한 주기를 보여주며 500개의 데이터로 구성된다. 그림에서 y 축에 표시된 값은 PXI-7841R에 입력되는 2진 데이터 값이며 PXI-7841R의 출력에서는 크기 1V_{p-p} 의 삼각파 전압파형이 출력된다. 삼각파의 감소부분은 긴 파장(낮은 파수)에서 짧은 파장(높은 파수)으로 스위핑되는 과정에 해당되고, 증가부분은 다시 반대로 복귀하는 과정에 해당된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. (a) Triangle waveform applied to FFP-TF, (b) output signal from comb filter module, (c) picture magnified for a part of (b).

그림 4. (a) FFP-TF에 인가된 삼각파형, (b) 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호, (c) (b)의 일부를 확대한 파형

그림 4(b)는 빗살무늬 광 필터 모듈로부터 출력되는 신호의 1주기 부분을 보인다. 고속 어댑터 모듈인 NI-5761을 사용하여 이 신호를 샘플링 하였으며, 1주기당 샘플링 개수는 20000개이다. 그림 4(c)는 그림 4(b)의 일부를 확대한 것이다. 앞 절에서 언급한 것처럼 레이저의 비선형 스위핑시에 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력은 처핑된 정현파 형태의 빗살무늬 신호임을 확인할 수 있다.

2. 레이저 스위핑 선형화

1kHz 삼각파 1주기의 시작점에 동기를 맞추어 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호를 1주기 즉 1ms 동안 20MS/s의 속도로 샘플링하면 그림 4(b)에서 보인 20000개의 데이터가 얻어진다. 이제 샘플링된 데이터 20000개와 삼각파 1주기 구성 데이터 N(=500)개를 시간상에서 일치시킨다. 시간상에서 구성 데이터의 시점과 일치되는 샘플링 데이터를 별도로 구분하여 윈도우 중앙 데이터라고 한다. 그러면 윈도우 중앙 데이터의 총 개수는 N(=500)개이며 연속된 윈도우 중앙 데이터 간에는 40개의 샘플링 데이터가 존재한다. 이제 샘플링 데이터 끝부분의 1024개를 복사하여 샘플링 데이터의 첫 부분에 붙인다. 첫 번째 윈도우 중앙 데이터를 중심으로 폭 2048개의 샘플링 데이터를 취하여 Hanning 윈도우를 적용한 다음 FFT를 수행하면 전력스펙트럼이 얻어진다. 다음으로 전력스펙트럼의 최대치에 해당하는 주파수와 윈도우 중앙 데이터의 순서 번호를 하나의 좌표 값으로 저장한다. 순차적으로 나머지 윈도우 중앙 데이터들에 대하여도 위의 과정을 반복하면 총 500개의 좌표 값들이 얻어진다.

이렇게 얻어진 500개의 좌표 값을 그래프로 그리면 그림 5와 같은 dk/dt 대 t 의 그래프가 얻어진다.

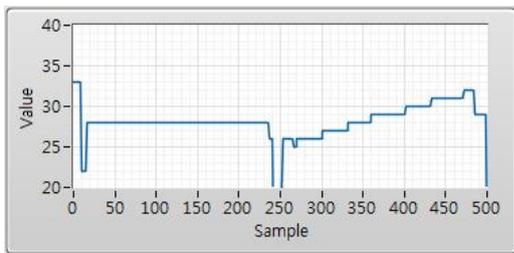


Fig. 5. dk/dt vs t under triangle waveform.

그림 5. 삼각파가 인가된 경우의 dk/dt 대 t

일반적으로 레이저의 선형 스위핑을 고려할 때 FFP-TF에 정현파 보다는 삼각파를 인가하는 것이 더 유리하다고 알려져 있다. 그러나 삼각파의 경우에도 비선형 스위핑은 여전히 존재한다. 그림 5에서 그래프의 왼쪽 반 부분은 수평선으로 나타나는 데 이 동안에 레이저는 선형으로 스위핑하고 있음을 보여준다. 그러나 오른쪽 반 부분은 점차 증가하는 계단 형태를 보여준다. 이는 빗살무늬 광 필터 모듈에서 출력되는 정현파의 주파수가 점차 높아지는 양의 처핑이 발생하고 있으며, 이 동안에 레이저는 비선형으로 스위핑하고 있음을 나타낸다.

또한 그림 5의 그래프로부터 스위핑의 방향이 바뀌는 시점에서 정현파의 주파수가 일시적으로 낮아짐을 알 수 있다.

그림 5에서 보인 dk/dt 대 t 의 그래프를 적분하면 그림 6과 같은 k_{nonlin} 대 t 의 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 dk/dt 대 t 그래프의 오른쪽 반 부분을 적분할 때는 부호의 값을 바꾸어 계산하였다. 예상한대로 k_{nonlin} 대 t 그래프의 오른쪽 반 부분이 비선형 상태임을 알 수 있다. 또한 그림 6에는 이 비선형 구간에 대응하는 k_{lin} 대 t 의 그래프를 함께 표시하였다. 이로 부터 오른쪽 반 부분에 대한 $\Delta k_n (= k_{nonlin,n} - k_{lin,n})$ 을 계산할 수 있으며 그림으로부터 이 값들은 양수이다.

여러 번의 실험을 통하여 식 (3)에서 보인 비례상수 c 의 최적 값은 0.48이었다. 이 경우에 대한 보정 파형을 그림 7(a)에 보였으며, 이전의 삼각파와는 조금 다른 파형임을 알 수 있다. 이 파형은 드라이버 회로를 통하여 증폭되고 반전되어 FFP-TF에 인가된다. 보정 파형을 인가한 후에 새로이 얻어진 dk/dt 대 t 의 그래프를 그림 7(b)에 보였다. 스위핑의 방향 전환 시점을 제외한 나머지 전 구간에 대하여 수평 직선으로 나타난 것은 빗살무늬 광 필터 모듈로부터 처핑이 없는 일정한 주파수의 정현파 신호가 출력되고 있음을 의미한다. 이는 다시 레이저가 왕복 스위핑 전 구간에서 선형 스위핑하고 있음을 나타낸다. 이로부터 제안된 보정 방식의 유효성을 확인할 수 있었다. 또한 반복하여 dk/dt 대 t 의 그래프를 측정해 본 결과 초기에 한번만 보정하면 이 신호는 계속하여 안정적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

기존의 후 보정 방식은 측정 데이터를 얻을 때마다 보정을 필요로 하므로 많은 시간이 소요되지만 제안된 선 보정 방식은 FFP-TF 인가 파형에 대한 초기 한 번의 보정만을 필요로 하므로 시간 소요 및 CPU 사용률이 대폭 줄어든다. 이러한 선 보정 방식은 기존 분광학 장치에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다[9].

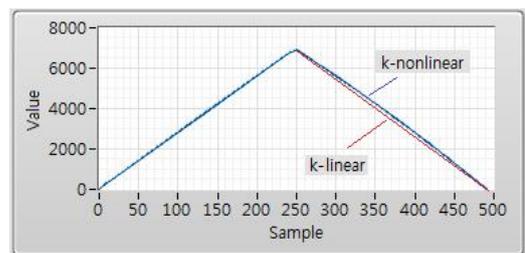


Fig. 6. Comparison between k_{nonlin} vs t and k_{lin} vs t .
그림 6. k_{nonlin} 대 t 와 k_{lin} 대 t 의 비교

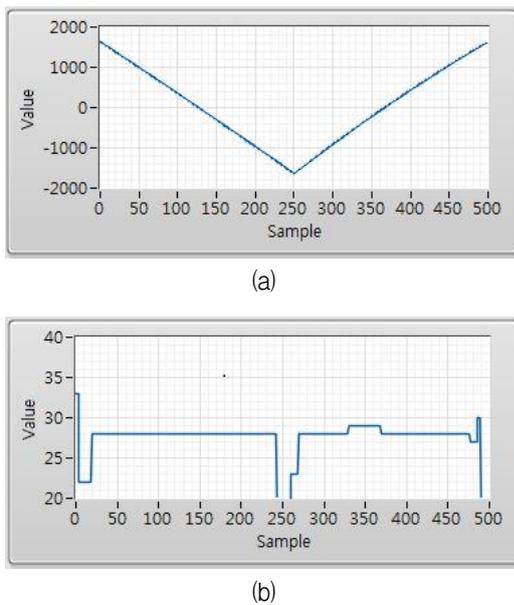


Fig. 7. (a) calibrated waveform applied to FFP-TF,
(b) $\frac{dk}{dt}$ vs t under calibrated waveform.

그림 7. (a) FFP-TF에 인가된 보정 파형,
(b) 보정 파형이 인가된 경우의 $\frac{dk}{dt}$ 대 t

V. 결론

본 논문에서는 선형으로 스위핑하는 파장 스위핑 레이저를 구현하기 위한 새로운 방식을 제안하였으며, 레이저 제작 및 실험을 통하여 1kHz, 80nm의 선형 스위핑 특성을 확인하였다. 이는 FFP-TF 인가 파형에 대한 초기 한 번의 선 보정만을 필요로 하므로 기존의 비선형 스위핑 레이저에서 요구되는 후 보정의 복잡성 및 시간 소요 문제를 해결해 준다. 이러한 선형 스위핑 레이저를 이용하면 SS-OCT 시스템에서는 실물과 더욱 가까운 영상을, 그리고 안전 진단 모니터링 시스템에서는 더욱 정확한 구조물 변형 정보를 얻을 수 있다.

References

- [1] D. Huang and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science*, vol.254, pp.1178-1181, 1991. DOI:10.1126/science.1957169
- [2] R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, and 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

[3] M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. Yang, and 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

[4] 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.

DOI:10.1364/OPEX.13.003513

[5] Eugene Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 1987.

[6] A. G. Podoleanu, "Unbalanced versus balanced operation in an optical coherence tomography system," *Appl. Opt.* vol.39, pp.173-182, 2000.

DOI:10.1364/AO.39.000173

[7] H. S. Kim, M. Y. Namgoong, J. R. Lee, and J. Eom, "Realization of Swept Source-Optical Coherence Tomography System using Loop Mirror within Reference Arm," *Conference on Optoelectronics & Optical Communications 2007 (COOC 2007)*, pp.402-403, 2007.

[8] J. Eom, "Swept Source-Optical Coherence Tomography using New Recalibration Method for Nonlinear Sweeping Laser," *J of Sensor Science and Technology*, vol.21, no.1, pp.68-74, 2012. DOI:10.5369/JSST.2012.21.1.68

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

DOI:10.5369/JSST.2009.18.5.365

BIOGRAPHY

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.