

# 광원의 비선형 파장스위핑이 보정된 SS-OCT

엄진섭\*

## Swept Source-Optical Coherence Tomography Using New Recalibration Method for Nonlinear Sweeping Laser

Jinseob Eom\*

### Abstract

In this paper, Frequency Domain Mode Locked(FDML) wavelength swept laser with 55.027 kHz sweeping speed and 125 nm sweeping range has realized, and also a new method for recalibrating a nonlinear frequency sweeping of a swept laser has proposed. The Swept Source-Optical Coherence Tomography system using the proposed method has performed. For a mirror surface, the system showed the very clean 2-dimensional image and the advanced image speed of 7 frames per sec compared to the previous recalibration method.

**Keywords :** Optical Coherence Tomography, Nonlinear Sweeping, Recalibration

### 1. 서론

수  $\mu\text{m}$  이하의 분해능을 가지는 광 결맞음 단층촬영(OCT : Optical Coherence Tomography) 기술은 기존의 의료영상 촬영 기술로는 접근하기 힘든 인체 피하조직 및 혈관조직 등에 대한 실시간 고분해능 의료 영상획득을 가능케 한다[1]. 이러한 의료 진단용 목적 이외에도 이의 응용기술을 통하여 농수축산물에 대한 비파괴 검사 및 산업용 정밀 계측 등 다양한 산업분야에 적용될 수 있는 차세대 정밀영상 촬영기술이다. 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 성능면에서 우수하기 때문에 각광을 받고 있다. 고화질 및 고속영상 획득을 장점으로 가지는 SS-OCT 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소중의 하나는 파장 스위핑 레이저(wavelength swept laser) 광원이다. 즉 레이저의 고속 광대역 파장 스위핑 특성이 SS-OCT의 고화질 및 고속영상 성능을 좌우한다고 하여도 과언이 아니

다[2, 3]. 그러나 실물과 일치하는 정확한 영상을 얻기 위해서는 파장 스위핑 레이저의 발진 주파수(또는 파수, wave number)가 시간에 대해 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 요구된다. 즉 SS-OCT를 위하여 요구되는 가장 이상적인 파장 스위핑 레이저는 고속 광대역 발진 주파수 선형 스위핑 레이저이다. 하지만 현재 사용되는 파장 스위핑 레이저들은 발진 주파수 대 시간의 선형성을 제공하지 못하고 있다. 이는 파장 스위핑 레이저를 구현하기 위해서는 시간에 따라 서로 다른 파장이 레이저의 공진기내를 진행하여야 하는데 발진 주파수 대 시간의 선형성이 유지되도록 파장 가변 필터[4] 또는 회전 폴리곤 스캐너[5]같은 모듈을 제어하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 이 때문에 SS-OCT 시스템에서는 획득된 간섭신호에 보정 과정을 수행하여 발진 주파수의 비선형성을 보정하여주고 있다. 파장 스위핑 레이저의 광 출력이 빛살무늬 광 필터 모듈을 통과할 때 정현파성 전기 신호가 출력된다. 현재 알려진 보정 방법은 이 신호의 연속된 두 피크점간의 시간 간격은 비록 변할지라도 주파수(또는 파수  $k$ ) 간격은 일정하다는 사실에 기반을 둔다. 이를 바탕으로  $k_{\text{nonlin}}$  대  $t$ 의 비선형 그래프를 얻어 보정을 수행한다[6]. 한편 이러한 보정 과정이 필요없는 발진 주파수 선형 스위핑 레이저를 구현하려는 노력도 계속되고 있다[7]. 본 논문에서는 1310 nm 대역의 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)와 광섬유 페브리 페롯 파장 가변 필터(FFP-TF : fiber fabry perot-tunable filter), 그리고 광섬유 지연선(fiber delay line)을 이용하여 주파수영역 모드 잠김(FDML : frequency domain mode locked) 방식 파장 스위

강원대학교 IT대학 전자공학과(Department of Electronics Engineering, The School of Information Technology, Kangwon National University)

\*Corresponding author: jeom@kangwon.ac.kr

(Received : Nov. 23, 2011, Revised : Jan. 5, 2012, Accepted : Jan. 11, 2012)

핑 링 레이저를 구성하였다. 이는 55 kHz의 고속 왕복 스위핑과 9 mW의 평균 출력 광 파워, 그리고 125 nm의 파장 스위핑을 보여준다. 또한 발진 주파수(또는 파수)의 시간에 대한 비선형 스위핑을 보상하기 위하여 새로운 보정 방식을 제안하였으며, 이를 적용한 SS-OCT 시스템을 구현하였다. 그리고 거울면에 대한 2차원 이미지 획득을 통하여 구현된 시스템의 성능을 확인하였다.

## 2. SS-OCT 시스템 구성방법

본 논문에서 구현된 SS-OCT 시스템의 전체 구성도는 Fig. 1과 같다. 이를 기능별로 구분하여보면, 광섬유 링 공진기 구조를 가지는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저, 샘플로부터 간섭신호를 얻기위한 간섭계 구조, 보정용 기준 신호를 얻기 위한 빔살무늬 광 필터(comb filter) 모듈, 그리고 간섭신호 데이터 수집 및 영상 표시를 위한 신호 처리부로 구분된다. 파장 스위핑 광원은 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 증심파장 1310 nm의 SOA, 광 아이솔레이터, 1x2 광 커플러, 광섬유 지연선, 고속 FFP-TF(Fiber Fabry Perot-Tunable Filter), 편광조절기(PC : polarization controller), 광 아이솔레이터 등이 링 형태로 연결된 구조를 가진다. 간섭계는 광 서큘레이터, 기준팔(reference arm)과 샘플팔(sample arm)로 이루어진 마이켈슨 간섭계, 샘플의 횡방향 스캔(B-scan)을 위한 갈바노미터(galvanometer), 그리고 균형 광 검출기(balanced detector) 등으로 구성된다. 자유공간상에서 구현된 빔살무늬 광 필터 모듈은 2개의 2x2 광 커플러, 2개의 광 컬리메이터(collimator), 그리고 균형 광 검출기로 구성된다. 신호처리부는 고속 DAQ(Data Acquisition) 보드, 보정(recalibration) 및 FFT(Fast Fourier Transform) 연산, 그리고 디스플레이 등으로 이루어진다.

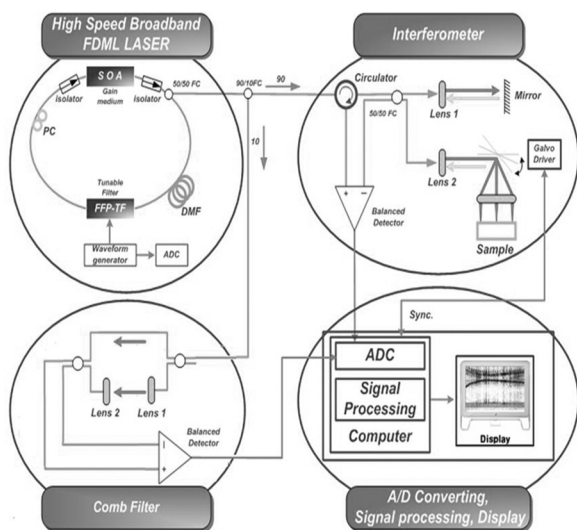


Fig. 1. Schematic diagram of SS-OCT with 55 kHz and 125 nm wavelength sweeping.

## 3. SS-OCT 기능블록별 동작과정

### 3.1 FDML 방식 파장 스위핑 레이저

레이저 구현에 사용된 고속 FFP-TF는 패브리-페롯 간섭계 구조를 가진다. 이는 간섭계의 한쪽에 부착된 압전소자(PZT: piezoelectric transducer)에 정현파 전압을 인가하여 내부 공진간격을 주기적으로 변화시킴으로써 투과대역을 주기적으로 스위핑시킨다. 이때 정현파 한 주기당 왕복 스위핑 즉 2번의 스위핑을 얻을 수 있다. PZT는 유도성 리액턴스(reactance) 성분으로 인하여 특정 공진주파수를 가지며, 이 공진주파수에서는 낮은 전압을 인가하여도 큰 변위를 얻을 수 있다. 본 논문에서 사용된 FFP-TF는 FSR(Free Spectral Range) 160 nm, Finesse 600, 삽입손실 2.5 dB, -20 V ~ 50 V의 인가전압 범위를 가지며, 측정결과 공진주파수는 약 55 kHz 이었다. FDML의 동작원리는 다음과 같다[8]. 빛의 광섬유 링 공진기 1회전 주기와 FFP-TF의 구동 주기(구동 주파수의 역수)가 서로 일치하도록 적절한 길이의 광섬유 지연선을 링 공진기내에 설치한다. 빛은 링 공진기내의 광 아이솔레이터 때문에 링 공진기를 단방향(실험에서는 시계방향)으로 진행한다. 따라서 FFP-TF의 투과대역을 통과한 빛이 링 공진기를 시계방향으로 1회전 진행한 후 다시 FFP-TF에 도달하면 이전과 동일한 투과대역을 통과하게 된다. 이러한 과정이 반복되면 그 빛은 광 주파수 영역에서 모드잠금을 얻게 되어 증폭 및 발진하게 된다. 모드잠김 현상을 이용하면 FFP-TF의 구동 주파수 증가에 따른 레이저의 광 출력 저하가 발생하지 않고 또한 SOA의 전체 이득범위를 충분히 활용할 수 있어 광대역에 걸친 파장 스위핑이 가능하다. 이로 말미암아 FDML 파장 스위핑 광섬유 링 레이저는 다른 구조의 파장 스위핑 레이저에 비해 투과 깊이, 분해능, 고속 영상프레임 획득 등에서 우수한 특성을 보여준다. 55,027 kHz의 스위핑 속도(왕복을 고려할 경우 실제로는 이의 2배인 110 kHz)를 가지는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저를 구성하기 위해서는 SOA로부터 방출된 빛이 링 레이저를 1회전하는데 소요되는 시간이  $1/55,027 \text{ kHz} = 18.17 \mu\text{s}$ , 또는 이의 정수배가 되어야 한다. 그러므로 FDML 링 레이저에서는 이러한 시간지연이 발생할 수 있도록 링 내부에 적절한 길이의 광섬유 지연선을 삽입하여야 한다. 이와 더불어, 빛이 링 공진기를 순회하는 동안 발생하는 분산(dispersion)을 최소화 하기 위하여 광섬유 지연선으로서 분산유지 광섬유를 사용하는 것이 권장된다. 그러나 본 논문에서는 일반 보급형인 SMF-28e 광섬유를 사용하였다. 만일 링 공진기가 모두 광섬유로 구성되어 있다고 가정하면 링 공진기의 전체 길이는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$L_{\text{fiber}} = \frac{c}{n} T_{\text{sweep}} \quad (1)$$

$$= \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.46} \times 18.17 \mu\text{s} = 3.733 \text{ km}$$

이외에 SOA의 이득 특성은 입력되는 빛의 편광에 민감하므로 이를 제어하기 위하여 SOA 전단에 편광조절기를 설치하였다.

OCT 시스템의 중요한 성능 변수중 하나는 거리 분해능이다. 거리 분해능은 광원의 스윙핑 범위( $\Delta\lambda$ )가 클수록 유리하며, 식 (2)와 같이 주어진다[3].

$$R_{\text{axial}} = L_c = 0.44 \left( \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \right) \quad (2)$$

논문에서 구현된 광원의 경우  $\Delta\lambda=125$  nm,  $\lambda=1310$  nm이므로, 가능한 거리 분해능은  $R_{\text{axial}} \cong 6$   $\mu\text{m}$ 이다. 여기에서  $L_c$ 는 빛의 코히어런트 길이(coherent length)이다.

### 3.2 간섭계

링 레이저로부터 출력된 빛은 Fig. 1에 보인 바와 같이 광 서클레이터를 통과하여 50:50 광 커플러로 입사된 후 마이켈슨 간섭계를 구성하는 기준팔과 샘플팔로 분배된다[10]. 기준팔에 설치된 미러와 샘플팔의 샘플로부터 반사된 빛은 각각 다시 50:50 광 커플러로 입사된 후 서로 간섭되어 파수영역(wave number domain 즉 k-domain)상에서 기준팔과 샘플팔의 거리 차에 비례하는 광 비트 주파수(optical beat frequency)를 생성하게 된다. 따라서 광 비트 주파수는 기준팔과 샘플간의 거리 차 정보(A-scan)를 가진다. 50:50 광 커플러로부터 출력된 광들은 균형 광 검출기의 두 단자로 입력된 후에 광 비트 주파수와 동일한 주파수를 가지는 전기신호로 바뀌고 증폭과정을 거친 후 DAQ 보드에 의하여 A/D 변환된다. 간섭계에서 균형 광 검출기[9]를 사용하는 이유는 샘플 거리정보를 담고 있는 비트 주파수를 제외한 불필요한 DC 성분, 자기상관성 간섭신호, 그리고 증폭 잡음들을 제거하여 높은 SNR을 얻기 위함이다. 일반적으로 샘플에 의해 반사되어 비트 주파수를 생성하는 빛은 매우 약하기 때문에 검출과정에서 발생하는 잡음 등에 민감하여 신호 왜곡이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 샘플에 대한 횡방향 스캔(B-scan)을 제공하기 위하여 갈바노미터를 사용하였다. 갈바노미터는 보이스 코일(voice coil)에 미러를 부착하여 보이스 코일의 부분적인 왕복 회전운동을 이용한다. 미러에 입사된 빛은 미러의 움직임에 따라 반사방향이 바뀌어 샘플에서의 횡방향 스캔을 가능케 한다. 구현에 사용된 갈바노미터는 약 50 Hz 로 작동시켰으며 이를 통하여 얻어진 영상 프레임 속도는 초당 7 프레임이었다. 더욱 높은 영상 프레임 속도를 얻기 위해서는 신호처리에 걸리는 시간을 줄여야 하는데 이는 다중 코어 컴퓨터를 이용하여 멀티트레드 방법을 사용함으로써 가능할 것으로 사료된다.

### 3.3 빗살무늬 광 필터 모듈

Fig. 1에 보인 것처럼 90:10 광 커플러를 통하여 링 레이저 출력의 10% 정도가 빗살무늬 광 필터 모듈로 입사된다. 모듈 구조는 마

하젠더 간섭계 구조와 동일하며, 이의 주파수 특성은 동일한 간격을 가지는 빗살무늬(comb like) 형태를 보인다. 빗살무늬간 즉 투과대역간 주파수 간격  $\Delta f_{\text{comb}}$ (또는 FSR : Free Spectral Range)와 두 팔간의 거리 차  $\Delta L$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다[10].  $\Delta k$ 는 투과대역의 파수 간격이다.

$$\Delta f_{\text{comb}} = \frac{c}{\Delta L} \quad \text{또는} \quad \Delta k = \frac{2\pi}{\Delta L} \quad (3)$$

이를 투과대역간 파장차로 다시 표시하면,

$$\Delta\lambda_{\text{comb}} = \frac{\lambda^2}{\Delta L} \quad (4)$$

으로 주어진다. 여기서  $c$ 는 빛의 속도이고,  $\lambda$ 는 빛의 파장이다.  $\Delta f_{\text{comb}}=100$  GHz로 할 때, 이를 위한 마하젠더 간섭계의 공기중에 서의 두 팔간 거리 차  $\Delta L$ 은 식 (3)으로부터 다음과 같이 주어진다.

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

따라서 식 (4)로부터 투과대역간 파장차를 계산하면

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

이 얻어진다.

빗살무늬 광 필터 모듈은 보정을 위한 기준 신호를 제공한다. 일반적으로 레이저 발진 주파수의 비선형 스윙핑시에 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호는 그 주파수가 시간에 따라 다소 변하는 처핑(chirping)된 정현파(빗살무늬) 형태를 보인다.

만일 실험에서 파장 스윙핑 레이저가 55 kHz 의 속도로  $\Delta\lambda_{\text{source}}=125$  nm 에 걸쳐 왕복 선형 스윙핑을 수행한다면, 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력에서 얻어지는 빗살무늬 신호의 평균 주파수  $f_{\text{ref,avg}}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{\text{ref,avg}} = \frac{125 \text{ nm}}{0.572 \text{ nm}} \times 2 \times 55 \text{ kHz} \cong 24 \text{ MHz}$$

실험에서 사용된 고속 DAQ 보드는 최대 200 MSps를 제공하므로 이러한 주파수 신호를 충분히 샘플링할 수 있음을 알 수 있다.

빗살무늬 광 필터 모듈의 출력은 DAQ 보드의 한 채널을 통하여 샘플링되고 본 논문에서 제안된 과정을 거쳐 처리된 후에, 신호처리 부에서 간섭계 신호를 보정하기 위하여 사용된다.

### 3.4 신호처리부

#### 3.4.1 제안된 보정 과정

SS-OCT에서는 정확한 영상정보를 얻기위하여 발진 주파수(또는 파수)를 x축으로 하고 샘플로부터의 간섭신호 세기를 y축으로 하는 데이터 집합(A-scan)을 필요로 한다. 다음으로 이 데이터 집

합을 FFT하여 이로부터 기준파와 샘플간의 거리정보를 얻어낸다.

만일 스위핑 레이저의 발진 주파수(또는 파수)가 시간에 대해 선형적으로 스위핑된다면 DAQ 보드의 내부클럭에 따라 간섭신호를 샘플링하고 이 샘플링된 데이터에 대해 FFT를 수행하는 것으로 정확한 영상을 얻을 수 있다. 또한 보정과정이 생략되므로 신호처리시간이 감소되어 고속 영상을 얻을 수 있다. 나아가 DAQ 보드의 샘플링 기능이 단순해지므로 고가의 다채널 DAQ 보드를 사용할 필요없이 내부클럭만을 갖춘 싱글채널 DAQ 보드만이 요구되므로 SS-OCT 시스템의 비용을 낮출 수 있다. 그러나 기존의 파장 스위핑 레이저들[4, 5, 8, 11]의 발진 주파수 vs 시간의 그래프는 비선형성을 벗어나기 어려운 것이 현실이다. 따라서 오늘날의 SS-OCT 시스템에서는 여전히 간섭신호를 일정한 속도로 샘플링한 후에 이를 다시 발진 주파수(또는 파수)를 x축으로 하고 y축은 간섭신호의 세기를 나타내는 그래프로 변환해주는 보정 과정이 수행되어야 한다. 이는 신호처리 과정에서 S/W적으로 이루어지며 이 과정에서 시간지연 및 원치 않는 신호왜곡이 발생하고 이는 다시 영상속도 및 영상품질을 저하시킨다. 따라서 고속이며 정확한 보정 과정은 고속 고품질 영상획득을 위한 필수 요소기술이다. 기존의 보정 과정에서는 빔살무늬 광 필터 모듈로부터 출력되는 신호의 연속된 두 피크점간의 시간 간격은 비록 변할지라도 주파수(또는 파수 k) 간격은 일정하다는 사실에 기반을 둔다. 이를 바탕으로 측정된 데이터에 대한 분석을 통하여  $k_{nonlin}$  대 t의 비선형 그래프를 얻어 보정을 수행하였다[6]. 그러나 본 논문에서는 빔살무늬 광 필터 모듈 출력신호의 시간에 대한 주파수 변화(이는 frequency modulation 변조신호와 유사함)는 시간에 대한  $dk/dt$ 의 변화에 비례한다는 사실적 고찰을 바탕으로 새로운 보정 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 빔살무늬 광 필터 모듈의 출력신호에 대한 주파수 분석을 바탕으로 하기 때문에 매우 안정적인 발진 주파수 대 t의 그래프를 얻을 수 있다. 따라서 SS-OCT 시스템을 on 시킨 후 한번 얻어진 발진 주파수 대 t의 그래프는 측정중에 매번 획득할 필요가 없이 반복하여 재사용할 수 있다. 아래에 제안된 보정 방식을 순서대로 정리하였다.

① 빔살무늬 광 필터 모듈 출력 신호와 간섭계 출력신호를 DAQ 보드의 두 개의 입력 채널에 각각 연결한다. 다음에 레이저의 발진 주파수(또는 파수)가 낮은 값에서 높은 값으로 스위핑하는 동안 또는 이의 역방향으로 스위핑하는 동안 DAQ 보드의 내부클럭을 사용하여 위의 두 신호를 동시에 일정한 속도로 샘플링한다.

② 샘플링된 데이터들(실험에서는 1151 개 = 1024 개 + 127 개)에 일정한 데이터 간격(실험에서는 3 개)으로 Hanning 윈도우(실험에서는 폭 128 개)를 순차적으로 적용시키면서 각각의 윈도우에 대해 FFT를 수행한다. 각각의 결과스펙트럼에서 최대값에 해당하는 주파수를 얻고 또한 각 윈도우의 중앙에 해당하는 샘플링 시간을 함께 저장한다. 이때 사실적인 고찰에 의하여 위에서 얻어진 주파수는  $\frac{dk}{dt}$ 에 비례한다. 따라서 각각의 윈도우에 대하여 얻어진 주파수

와 샘플링 시간의 집합으로부터  $\frac{dk}{dt}$  대 t의 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 k는 파수(wave number)이며  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ 으로 주어지고, c는 빛의 속도,  $\lambda$ 는 빛의 파장, f는 빛의 주파수이다.

③ 위의  $\frac{dk}{dt}$  대 t의 그래프를 시간에 대하여 적분하면  $k_{nonlin}$  대 t의 그래프를 얻는다. 이때  $k_{nonlin}$  대 t의 그래프는 당연히 비선형 관계에 있다.

④  $k_{nonlin}$  대 t의 그래프상에 놓여있는 양 끝점을 선택한다. 이때 두 점 사이의 샘플링 갯수는 나중에 수행할 FFT 데이터 갯수(실험에서는 1024개)와 같다. 이제 두 점간을 직선으로 연결하여  $k_{lin}$  대 t의 선형 그래프 방정식을 구하고, 두 점사이의 직선을 FFT 데이터 갯수(실험에서는 1024 개)만큼 등분한다.

⑤ 등분된 각  $k_{lin}$ 값을 저장한다. 그리고 각  $k_{lin}$ 값을 비선형 그래프상의  $k_{nonlin}$ 값과 비교하여  $k_{lin}$ 값보다 바로 아래와 위에 있는  $k_{nonlin,1}$ 과  $k_{nonlin,2}$ 값 및 이에 해당하는 샘플링 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 를 저장한다. 아울러 DAQ 보드의 다른 채널을 통해서 샘플링 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에 동시에 샘플링된 간섭신호 데이터  $S_1$  및  $S_2$ 를 저장한다.

⑥ 이제 등분된 각  $k_{lin}$  값에 대응하는 보정된 간섭신호 값  $S_{recal}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{recal} = S_1 + \frac{k_{lin} - k_{nonlin,1}}{k_{nonlin,2} - k_{nonlin,1}} (S_2 - S_1) \quad (4)$$

⑦ 스위핑 구간에 대하여 보정된  $S_{recal}$ 들(실험에서는 1024개)에 대하여 FFT를 수행하면 A-scan 영상을 얻을 수 있다. 위의 과정을 각 B-scan에 대하여 반복수행하므로써 2차원 영상을 얻을 수 있다.

### 3.4.2 신호처리 및 디스플레이

간섭계의 A-scan/B-scan 데이터 및 빔살무늬 광 필터 모듈의 출력신호 데이터를 획득하기 위하여 NI사의 고속 DAQ 보드를 사용하였다. 실험에 사용된 NI PCI-5124 보드는 최대 200 MSps, 12 bit resolution, 그리고 두 개의 입력 채널을 가진다.

만일 빔살무늬 광 필터 모듈의 출력신호를 DAQ 보드의 외부 샘플링 클럭으로 직접 사용할 수 있다면 신호처리부에서 보정이 생략되는 잇점을 얻을 수 있다. 그러나 빔살무늬 광 필터 모듈의 출력신호는 상당히 처핑되어 있고, 이러한 처핑 신호를 외부 샘플링 클럭으로 허용하는 고급 DAQ 보드가 아직 제공되고 있지 않다. 신호처리부에서 보정이 생략될 수 있는 또 한가지 방법은 앞에서 언급된 것처럼 파장 스위핑 레이저의 발진 주파수가 시간에 대해 선형으로 스위핑되는 것이다. 그러나 현재로서는 이러한 스위핑 특성을 얻기가 어렵다.

따라서 DAQ 보드 한 채널을 통하여 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호를 샘플링하여  $k_{lin}$  대  $t$ 의 관계식을 얻고 이를 이용한 보정 과정이 수행되어야 한다. 보정후에는 1024 개의 깊이방향(A-scan) 데이터에 대한 FFT를 수행하여 전력스펙트럼을 얻고 이를 크기에 따라 그레이(gray)레벨로 표시한다. 이러한 과정을 500 개의 횡방향(B-scan) 지점에 대하여 반복 수행하면 2차원 포피 단면 영상이 얻어진다.

## 4 실험 및 결과

### 4.1 FDML 방식 파장 스위핑 링 레이저 구현

본 절에서는 구현된 FDML 방식 파장 스위핑 링 레이저의 성능을 측정하였다. Thorlabs사의 BOA1132SL SOA에는 600 mA를 인가하였고, ATmega128 마이크로 컨트롤러와 정현파발생 칩(AD9832)을 이용하여 제작한 파형발생기를 통하여 FFP-TF에 주파수 55.027 kHz, DC 오프셋 5 V, 그리고 1.5 V<sub>p-p</sub>의 정현파 전압을 인가하였다. 레이저가 중심파장 1310 nm를 중심으로 약 125 nm의 범위에 걸쳐 스위핑하는 것을 확인하였으며, 평균 광 출력은 약 9 mW이었다.

Fig. 2의 (a)그림은 FFP-TF에 인가된 정현파형의 한 주기를 보여준다. 인가파형의 감소부분은 긴 파장(낮은 파수)에서 짧은 파장(높은 파수)으로 스위핑되는 과정에 해당되고, 증가부분은 다시 반대로 복귀하는 과정에 해당된다. 또한 (a)그림에서는 빗살무늬 광 필터 모듈로부터 출력되는 신호를 보여주고 있다. (b)그림은 (a)그림의 출력신호 일부분을 확대한 그림이다. 앞의 3.3절에서 언급한 것처럼 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력은 처핑된 정현파 형태의 빗살무늬 신호임을 보여준다. Fig. 2의 신호들은 DAQ 보드를 사용하여 획득하였으며, 정현파형 한 주기당 샘플링 갯수는 3636 개이었다.

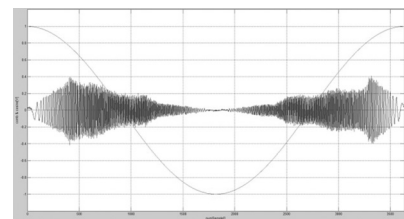
### 4.2 레이저의 비선형 스위핑 보정

Fig. 2 (a)의 빗살무늬 광 필터 모듈의 출력신호를 샘플링하여 얻어진 데이터(1151개)에 폭 128의 Hanning window를 적용한 다음 FFT를 수행하면 전력스펙트럼이 얻어진다. 다음으로 전력스펙트럼의 최대에 해당하는 주파수와 또 Hanning window의 중앙에 위치한 샘플링 시간을 하나의 좌표값으로 저장한다. 다음에 Hanning window를 3개 간격으로 순차적으로 이동시키면서 위의 과정을 반복하면 일련의 좌표값들이 얻어진다. 이를 그래프로 그리면 Fig. 3의  $\frac{dk}{dt}$  대  $t$ 의 그래프를 얻을 수 있다. 전체 그림에서 오른쪽 반 부분은 다음에 수행될 적분과정을 고려하여 왼쪽부분과 반대로 표시하였다. 즉 주파수가 높을수록 더 음수가 되도록 표시하였다.

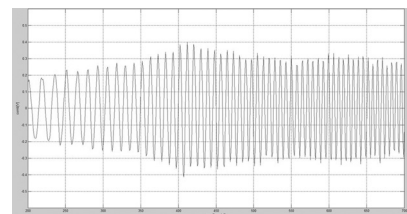
Fig. 4는 Fig. 3의  $\frac{dk}{dt}$  대  $t$ 의 그래프를 적분하여 얻어진  $k_{nonlin}$  대

$t$ 의 그래프를 보여준다. 예상한대로  $k_{nonlin}$  대  $t$ 의 그래프가 비선형 상태에 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 샘플로서 미러를 사용하여 획득한 간섭신호 및 이의 전력스펙트럼, 그리고 스펙트럼을 바탕으로 얻어진 2차원 이미지를 보여준다. (a)는 보정을 수행하지 않은 경우이며, (b)는 보정을 수행한 경우이다. (a)에서는 측정된 간섭신호에 처핑이 존재하여 이의 전력스펙트럼이 넓게 퍼짐을 보여준다. 이로 말미암아 미러 표면의 이미지가 흐리게 번져서 두껍게 나타남을 알 수 있다. 그러나 (b)에서는 보정으로 인하여 간섭신호의 처핑이 사라졌으며, 따라서 전력스펙트럼이 좁고 높게 나타나고, 더 정확하고 선명한 영상이 얻어짐을 보여준다. 이로부터 제안된 보정 방식의 유효성을 확인할 수 있다. 또한 제안된 방식을 사용하여 초기에 한번 얻어진  $k_{nonlin}$  대  $t$ 의 그래프는 계속되는 측정중에도 안정적으로 반복 사용할 수 있음을 확인하였다. 제안된 보정 방식을 적용하여 획득한 2차원 영상(256 × 500)의 프레임 속도는 약 7 프레임/초이었다. 그러나 기존의 보정 방식을 구현하여 실험한 결과 동일한 조건에서 약 5 프레임/초의 영상 속도를 나타내었다. 더 높은 프레임 속도는 멀티코어 컴퓨터를 이용하여 전체 과정을 DAQ, 신호처리, 디스플레이 등으로 구분하고 각 부분에 멀티트레드 방식을 적용하므로써 가능하리라 사료된다. 특히 많은 시간이 소요되는 신호처리 시간을 줄이는 것이 관건이며 앞으로 이 부분에 대하여 추가로 연구하고자 한다. 한편 고속 광대역 스위핑 특성을 지니는 FDML 파장 스위핑 링 레이저 구현 기술은 기존의 분광학 장치의 광원으로 응용개발될 수 있을 것으로 사료된다[12].



(a)



(b)

Fig. 2. Drive signal and measured output signal : (a) cosine drive signal applied to FFP-TF(big one) and signal from Mach-Zender interferometer clock module(small one), (b) enlarged partial image for small one in (a).

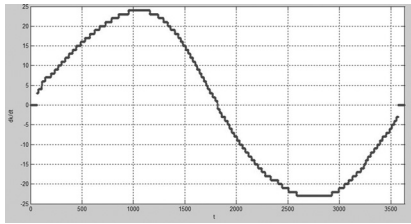


Fig. 3. Plot of  $\frac{dk}{dt}$  vs  $t$ .

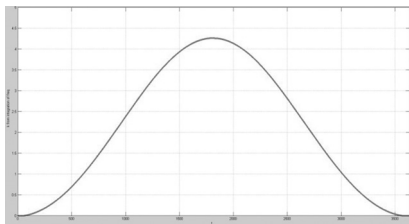
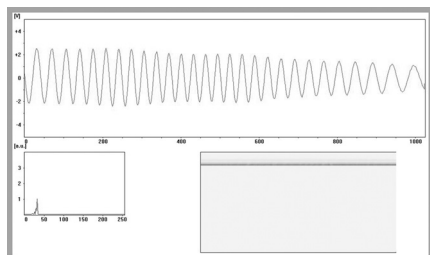
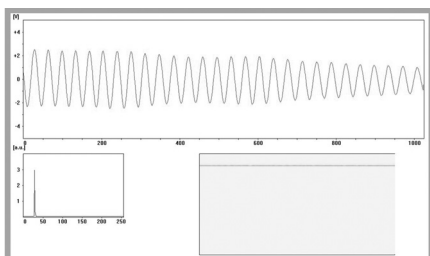


Fig. 4. Plot of  $k_{\text{nonlin}}$  vs  $t$ .



(a)



(b)

Fig. 5. Signal and image captured from mirror surface (a) without recalibration, (b) with recalibration.

## 5. 결론

본 논문에서는 55,027 kHz, 125 nm 스위핑이 가능한 FDML 방식 파장 스위핑 링 레이저를 구현하였으며, 이의 발전 주파수 대 시간의 비선형성을 보정하기 위한 새로운 방식을 제안하였다. 이를 적용한 SS-OCT 시스템을 제작하여 보정여부에 따른 미러의 2차원 이미지를 측정/비교하였다. 제안된 보정 방식으로 이미지의 퍼짐

현상이 잘 해결되었으며, 기존 방식에 비해 영상의 프레임 속도가 향상되었다. 현재는 7 프레임/초 정도의 영상 획득이 가능하지만 멀티코어 컴퓨터를 이용한 멀티트레드 방식을 적용하면 더 높은 프레임 속도를 얻을 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 중소기업청의 출연금으로 수행한 산학연 공동기술개발사업의 연구결과입니다.

## REFERENCES

- [1]David Huang and James G. Fujimoto, "Optical coherence tomography", *Science*, vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [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.
- [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.
- [4]M. Y. Jeon, J. Zhang, Q. Wang, and Z. Chen, "High-speed and wide bandwidth Fourier domain mode-locked wavelength swept laser with multiple", *Opt. Express*, vol. 16, pp. 2547-2554, 2008.
- [5]S. H. Yun, C. Boudoux, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter", *Opt. Lett.*, vol. 28, pp. 1981-1983, 2003.
- [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]C. M. Eigenwillig, B. R. Biedermann, G. Palte, and R. Huber, "K-space linear Fourier domain mode locked laser and applications for optical coherence tomography", *Opt. Express*, vol. 16, pp. 8916-8937, 2008.
- [8]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.
- [9]A. G. Podoleanu, “Unbalanced versus balanced operation in an optical coherence tomography system”, *Appl. Opt.* vol. 39, pp. 173-182, 2000.
- [10]Eugene Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 1987.
- [11]H. S. Kim, M. Y. Namgoong, J. R. Lee, and J. S. Eom, “Realization of swept source-optical coherence tomography system using loop mirror within reference arm”, *Conference on Optoelectronics & Optical Communications(COOC) 2007*, vol. 14, pp. 402-403, 2007.
- [12]Wook Jae Yoo, Ji Yeon Heo, Dong Hyun Cho, Kyoung Won Jang, Jeong Ki Seo, Bongsoo Lee, Young-Ho Cho, Joo Hyun Moon, and Byung Gi Park, “Spectroscopic study on the development of fiber-optic pH sensor”, *J. of the Kor. Sensors Soc.*, vol. 18, no. 5, pp.365-371, 2009.



엄진섭(Jinseob Eom)

- 1982년 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1984년 서울대학교 전자공학과(공학석사)
- 1990년 미국 Texas A&M University, Dept. of Electrical Eng.(공학박사)
- 1984년 3월~1985년 2월, 금성반도체 연구소 전임연구원
- 1985년 5월~1987년 7월, KT 품질보증단 전임연구원
- 1991년 3월~1992년 8월, KT 연구소 선임연구원
- 1992년 8월~현재 강원대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : 광통신, 광센싱, 광교환