

# FDML 방식 스위핑 광원을 사용한 SS-OCT 구현

엄진섭\*

## Realization of Swept Source-Optical Coherence Tomography using FDML Laser

Jinseob Eom\*

### Abstract

In this paper, the swept source-optical coherence tomography system using frequency domain mode locked(FDML) laser has realized. The FDML swept source laser showed 55.03 kHz sweeping speed, 125 nm sweeping range, and 9 mW output optical power, which are the superiority of FDML laser compared to previous swept source lasers. Also, through the cross-sectional image captured at 5 frames per second for a mirror, a 1 mm-thickness glass plate, and a thumb bottom, the performance of the system has demonstrated.

**Keywords :** Swept source-Optical Coherence Tomography, Wavelength tunable filter, Dual balanced detector

### 1. 서론

다양한 형태의 OCT 구현 방식중에서 SS-OCT(Swept Source-Optical Coherence Tomography) 시스템은 고속의 영상 프레임과 높은 분해능을 제공할 수 있기 때문에 차세대 의료영상 진단 기술로 인식되고 있다[1].

실시간 3차원 표피 영상진단이 가능한 SS-OCT 시스템은 안정적인 고속 광대역 파장 스위핑(sweeping) 레이저를 바탕으로 한다. 이는 광원의 특성이 영상의 분해능과 투과깊이, 프레임속도 등과 같은 주요 성능변수들의 대부분을 좌우하기 때문이다[2].

일반적으로 파장 스위핑 레이저는 레이저 공진 구조내에 반도체 광 증폭기(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)와 같은 광대역 이득매질 및 파장 스위핑이 가능한 광필터를 삽입하여 구성된다. 일반적으로 SOA로부터 방출된 자연방출 광(ASE : Amplified Spontaneous Emission)증 필터의 통과대역에 해당하는 파장만이 공진기내를 공진하면서 증폭 및 발진되어 레이저 외부로 출력된다. 현재 널리 쓰이는 파장 스위핑 레이저는 왕복형 공진 구조를 가지며, 파장 스위핑 필터[2]를 구현하기 위하여 공진기내의 회절격자를 일부 반복 회전시키거나 회절

격자는 고정시키고 공진기의 한쪽 미러(mirror)를 일부 회전시키는 기전적인 움직임을 필요로 한다. 따라서 이 방식은 스위핑 속도에 있어서 어느정도 한계가 있으며 현재까지 알려진 파장 스위핑 속도는 25 kHz 정도이다. 그리고 광 출력 파워는 약 7 mW이고, 파장 스위핑 범위는 약 120 nm이다. 한편 스위핑 속도가 너무 높을 경우 이득매질인 SOA 내부의 에너지 분포가 non-stationary 분포를 갖게 됨으로써 원치 않는 잡음의 증가 및 낮은 광 출력, 그리고 발진선폭(linewidth)의 증가 등의 문제가 발생할 수도 있다[3]. 따라서 우수한 SS-OCT 시스템을 구현하기 위해서는 특히 광원에 대한 주의깊은 설계가 요구된다.

본 논문에서는 1310 nm 대역의 SOA와 광섬유 페브리 패킷 파장 가변 필터(FFP-TF : fiber Fabry Perot-tunable filter), 그리고 광섬유 지연선(fiber delay line)을 이용하여 주파수영역 모드잠김(FDML : frequency domain mode locked) 방식 링 공진기 구조를 가지는 레이저를 구성하였다. 이러한 모드잠김 방식을 이용하면 FFP-TF의 구동 주파수가 증가해도 레이저의 광 출력 저하가 발생하지 않고 좁은 발진선폭을 얻을 수 있다. 그리고 SOA의 이득범위를 충분히 활용할 수 있어 광대역에 걸친 파장 스위핑이 가능하다. 따라서 높은 광 출력 파워와 넓은 파장 스위핑 범위, 그리고 좁은 선폭을 가지는 FDML 파장 스위핑 광섬유 링 레이저는 다른 구조의 파장 스위핑 레이저에 비해 투과 깊이, 분해능, 고속 영상프레임 획득 등에서 우수한 특성을 보여준다. 실험에서 구현된 FDML 파장 스위핑 광섬유 링 레이저는 55.03 kHz의 왕복 고속 스위핑, 9 mW의 출력 광 파워, 그리고 125 nm의 스위핑 범위를 제공하였다. 또한 본 논문에서

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

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

(Received : Nov. 15, 2010, Revised : Jan. 5, 2011,

Accepted : Jan. 7, 2011)

는 이를 이용한 SS-OCT 시스템을 구현하였으며 유리 기관 및 생체 샘플에 대한 2차원 단면 이미지를 획득하였다.

## 2. SS-OCT 시스템 구성

본 논문에서 구현된 SS-OCT 시스템의 전체 구성도는 Fig. 1 과 같다. 이를 기능별로 구분하여보면, 광섬유 링 공진기 구조를 가지는 FDML 방식 파장 스위핑 광원, 샘플로부터 간섭신호를 얻기위한 간섭계, recalibration용 주파수 기준 신호를 얻기 위한 마이켈슨 간섭계 구조 클럭 모듈(comb filter), 그리고 영상 데이터 수집 및 처리를 위한 신호처리부로 구분된다.

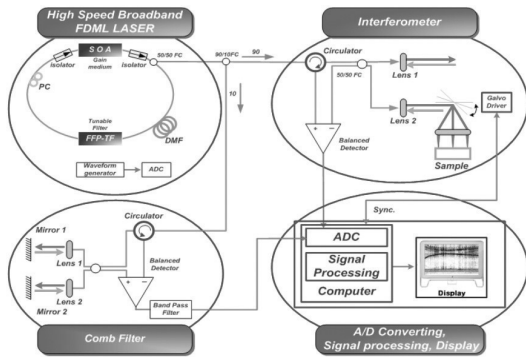


Fig. 1. Schematic diagram of 55.027 kHz, 125 nm wavelength sweeping SS-OCT.

파장 스위핑 광원은 ASE 중심파장 1310 nm의 SOA, 광 아이솔레이터, 1x2 광 커플러, 광섬유 지연선, 고속 FFP-TF, 편광 조절기(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 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈은 광 서큘레이터, 2x2 광 커플러, 2개의 광 콜리메이터(collimator), 2개의 미러, 그리고 균형 광 검출기로 구성된다. 신호처리부는 컴퓨터(PC)를 통하여 수행되며 고속 DAQ 보드(data acquisition board), recalibration 및 FFT(fast fourier transform) 연산, 그리고 디스플레이 등으로 이루어진다.

## 3. 기능블록별 동작과정

구현된 SS-OCT 시스템을 기능블록별로 자세히 살펴본다.

### 3.1 FDML 방식 파장 스위핑 광원

광원 구현에 사용된 고속 FFP-TF는 페브리-페롯 간섭계 구조를 가지며 압전소자(PZT: piezoelectric transducer)에 의한 내부 공진간격의 변화에 의하여 통과파장을 가변시킨다. 구현 시스템에서는 FFP-TF에 정현파 전압을 인가하여 내부 공진간격을 주기적으로 변화시킴으로써 통과파장을 주기적으로 스위핑하였다. 이때 정현파 한 주기당 왕복 스위핑이 일어난다.

일반적으로 PZT는 유도성 리액턴스(reactance) 성분으로 인하여 특정 주파수에서 공진된다. 즉 특정 공진주파수에서는 낮은 전압을 인가하여도 FFP-TF의 전체 FSR(free spectral range)을 스위핑할 수 있을 정도의 큰 변위를 일으킬 수 있다. 본 논문에서 사용된 FFP-TF는 FSR 160 nm, Finesse 600, 삽입손실 2.5 dB, 그리고 -20~50 V의 인가전압 범위를 가지며, 측정결과 공진주파수는 55.03 kHz이었다.

이로부터 55.03 kHz의 스위핑 속도(왕복을 고려할 경우 실재는 이의 2배인 약 110 kHz)를 가지는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저를 구성하기 위해서는 SOA로부터 방출된 빛이 링 레이저를 1회전하는데 소요되는 시간이  $1/55.03 \text{ kHz} = 18.17 \mu\text{s}$ , 또는 이의 정수배가 되어야 한다. 그러므로 FDML 링 레이저에서는 이러한 시간지연이 발생할 수 있도록 링 내부에 계산된 길이의 광섬유 지연선을 삽입하여야 한다. 이와 더불어, 빛이 링 공진기를 순회하는 동안 발생하는 분산(dispersion)을 최소화하기 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.

$$L_{fiber} = \frac{c}{n} T_{sweep} = \left( \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.46} \right) \times 18.17 \mu\text{s} = 3.73 \text{ km} \quad (1)$$

이외에 SOA의 이득 특성은 입력되는 빛의 편광에 민감하므로 이를 제어하기 위하여 SOA 전단에 편광조절기를 설치하였다. 광 아이솔레이터는 링 공진기내에서 빛이 한쪽 방향으로만 순회하도록 하기 위한 것이다.

FDML 방식이란 주기적으로 스위핑되고 있는 FFP-TF를 어느 한 순간에 통과한 임의의 파장이 링 레이저를 1회전하고 다시 FFP-TF에 도달하였을 때 FFP-TF가 동일 파장을 통과시키도록 서로 동기가 이루어지는 것을 일컫는다. 따라서 이론적으로는 임의의 파장이 링 레이저를 무한히 돌면서 증폭과 손실을 겪는 구조이다.

본 구현에서는 Thorlabs사의 BOA1132SL SOA에 600 mA를 인가하고, 파형발생기를 통하여 FFP-TF에 55.03 kHz의 정

현과 전압을 인가할 때 1x2 광 커플러를 통하여 출력되는 광 파워는 약 9 mW이고, 파장 스윙 범위는 125 nm이었다.

생체에 대한 광의 투과깊이를 고려하면 광 출력이 높을수록 유리하며 이를 위해서는 링 레이저 외부에 별도의 광 증폭기가 요구된다. 본 논문에서는 추후에 증폭용 SOA를 추가 장착하여 충분한 광 파워를 확보할 예정이다.

OCT 시스템의 중요한 성능 변수중 하나는 거리 분해능이다. 거리 분해능은 광원의 스윙 범위( $\Delta\lambda$ )가 클수록 유리하며, 식 (2)와 같이 주어진다[5].

논문에서 구현된 광원의 경우  $\Delta\lambda=130$  nm,  $\lambda=1310$  nm이므로, 가능한 거리 분해능은  $R_{axial} \approx 6 \mu\text{m}$ 이다. 여기에서  $L_c$ 는 빛의 코히어런트 길이(coherent length)이다.

### 3.2 간섭계

$$R_{axial} = L_c = 0.44(\lambda^2/\Delta\lambda) \quad (2)$$

링 레이저로부터 출력된 빛은 Fig. 1에 보인 바와 같이 광 서큘레이터를 통과하여 50:50 광 커플러로 입사된 후 마이켈슨 간섭계의 기준팔과 샘플팔로 분배된다. 기준팔에 설치된 미러와 샘플팔의 샘플로부터 각각 반사된 빛은 다시 50:50 광 커플러로 입사후 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 샘플 반사지점까지의 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 변환(ADC) 된다.

간섭계에서 균형 광 검출기를 사용하는 이유는 샘플 거리 정보를 담고 있는 비트 주파수를 제외한 불필요한 DC 성분, 자기 상관성 간섭신호, 그리고 증폭 잡음들을 제거하여 높은 SNR을 얻기 위함이다. 일반적으로 샘플에 의해 반사된 후 마이켈슨 간섭계로 재 입사되어 비트 주파수를 생성하는 빛은 매우 약하기 때문에 검출과정에서 발생하는 잡음 등에 민감하여 신호 왜곡이 발생할 수 있다.

본 구현에서는 샘플에 대한 횡방향 스캔(B-scan)을 제공하기 위하여 갈바노미터를 사용하였다. 갈바노미터는 보이스 코일(voice coil)에 미러를 부착하여 보이스 코일의 부분 반복 회전 운동을 이용한다. 미러에 입사된 빛은 미러의 움직임에 따라 반사방향이 바뀌어 샘플단에서의 횡방향 스캔을 가능케 한다. 구현에 사용된 갈바노미터는 약 5 Hz의 저속 스캔용이므로 획득된 영상 프레임의 최고 속도를 초당 5 프레임 이하로 제한하게 된다. 고속 영상 신호를 얻기위하여는 갈바노미터의 스캐닝 속

도를 더 높여야 한다.

### 3.3 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈

간섭계에서 얻어지는 비트 주파수로부터 실제 구조와 일치하는 정확한 단면 이미지를 얻기위해서는 recalibration 과정이 요구된다. 예를들면, 파장 스윙 광원으로부터 출력되는 빛의 파장이 시간에 따라 선형적으로 스윙될 때, 앞 절의 간섭계로부터 얻어진 비트 주파수 신호를 일정한 속도로 샘플링하는 경우를 고려해본다. 이 경우에 획득된 비트 주파수 신호의 x축은 파장(또는 시간)이다. 그러나 정확한 거리정보를 얻기위해서는 획득된 비트 주파수 신호의 x축이 파수(wave number, k)이어야 하기 때문에 비트 주파수 신호의 x축을 파장에서 파수로 변경하여야 한다. 이 러한 과정을 recalibration 이라하며 이를 위해서는 스윙 레이저의 스윙 시간에 따른 파수 정보가 별도로 요구된다. 이러한 정보를 발생시키기 위한 목적으로 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈이 사용된다.

Fig. 1에 보인 것처럼 90:10 광 커플러를 통하여 링 레이저 출력의 10 % 정도가 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈로 입사된다. 모듈 구조는 3.2절에서 언급된 간섭계 구조와 동일하고 동작원리도 같지만 단지 샘플팔에서의 스캔과정이 생략된다. 일반적으로 마이켈슨 간섭계는 두 팔간의 거리 차에 반비례하는 등간격의 주파수 영역 빗살무늬(comb like) 출력특성을 보인다.

마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 투과대역 주파수 간격  $\Delta f_{comb}$  (또는 FSR)와 두 팔간의 거리 차  $\Delta L$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다[5].

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

따라서 두 팔간의 거리차가 고정되면 마이켈슨 간섭계의 투과대역 간 주파수 간격은 동일하다. 이를 투과대역 간 파장차로 다시 표시하면

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

으로 주어진다. 여기서 c는 빛의 속도이고  $\lambda$ 는 빛의 파장이다. 만일 파장 가변 광원의 파장 스윙 범위가  $\Delta\lambda_{source} = 125\text{nm}$ 이고 이를  $m=1024$ 개의 파장으로 나누어 ADC를 수행한다고 가정하면, 마이켈슨 간섭계의 두 팔간 거리 차  $\Delta L$ 은 식 (4)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda_{comb}} = \frac{\lambda^2}{2\left(\frac{\Delta\lambda_{source}}{m}\right)} \\ &= \frac{m\lambda^2}{2\Delta\lambda_{source}} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)로부터

$$\Delta L = \frac{1024 \times (1310 \text{ nm})^2}{2 \times 125 \text{ nm}} \approx 0.7 \text{ cm}$$

으로 주어진다.

일반적으로 스위핑 광원의 파장 스위핑시에 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈로부터는 처핑(chirping)된 빔살무늬 출력이 얻어진다. 그러나 빔살무늬 피크 점들간의 주파수 차는 전체 빔살무늬에 걸쳐 동일하다.

마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력은 3.2절의 간섭계 출력과 함께 DAQ 보드의 서로 다른 채널을 통하여 동시에 샘플링된 다음, 신호처리부에서 위의 특성을 이용하여 recalibration이 수행된다.

### 3.4 신호처리부

샘플에 대한 A-scan/B-scan 데이터 및 recalibration을 위한 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈 출력신호 데이터 수집을 위하여 NI사의 고속 DAQ 보드를 사용하였다. 실험에 사용된 NI PCI-5124 보드는 최대 200 MSps, 12 bit resolution, 그리고 두개의 입력 채널 특성을 가진다. 만일 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력신호를 DAQ 보드의 외부 샘플링 클럭으로 직접 사용할 수 있다면 신호처리부에서 recalibration이 생략되는 장점을 얻을 수 있다. 그러나 3.3절에서 언급한 것처럼 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력신호는 심하게 처핑(chirping)되어 있어 이러한 처핑을 외부 샘플링 클럭으로 허용하는 고급 DAQ 보드가 아직 제공되고 있지 않다. 따라서 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력신호를 간섭계 신호와 함께 서로 다른 채널을 통하여 동시에 샘플링하고 이를 이용한 recalibration 과정이 수행되어야 한다. Recalibration은 획득된 빔살무늬 신호의 피크간 시간 간격에 대한 분석을 통하여 파수와 시간에 대한 그래프를 얻은 다음, 시간에 대해 선형화된 파수에 대응하는 비트 주파수 신호값을 다시 계산하여 이루어진다. Recalibration후에는 1024개의 깊이 방향(A-scan) 데이터에 대한 FFT를 수행하여 전력스펙트럼을 얻고 이를 크기에 따라 흑백레벨로 표시하였다. 이를 500개의 횡방향(B-scan) 지점에 대하여 반복 수행하면 2차원 표피 단면 영상이 얻어진다.

## 4. 실험 및 결과

본 논문에서 구현된 FDML 방식 파장 스위핑 링 레이저의

성능을 측정하였다. Fig. 2는 스위핑 링 레이저의 출력스펙트럼을 측정한 것이다. SOA에 600 mA를 인가하고, 파형발생기를 통하여 FFP-TF에 55.03 kHz의 정현파 전압을 인가하였다. 중심파장 1310 nm를 중심으로 약 125 nm에 이르는 범위에 걸쳐 레이저 발진모드가 형성됨을 확인하였으며, 레이저 평균 광 출력은 약 9 mW이었다. 중심파장은 FFP-TF에 인가되는 정현파 전압의 DC 오프셋값을 조절하여 변경이 가능하지만 그 값이 너무 치우치면 스위핑 범위를 감소시킨다.

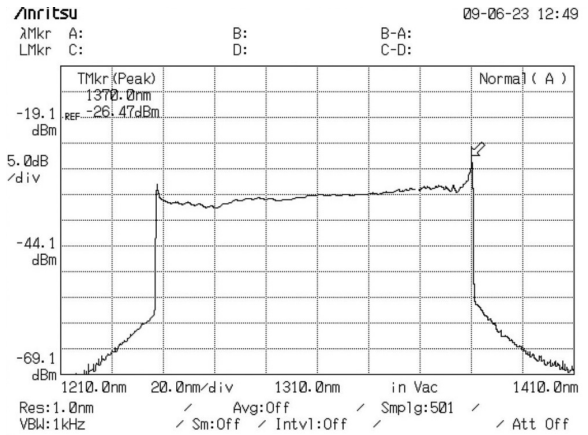


Fig. 2. Sweeping spectrum of FDML wavelength swept ring laser.

Fig. 3에서 첫번째 그림은 FFP-TF에 인가된 드라이브 파형을 보여주고, 두번째는 간섭계 출력신호의 샘플링을 위한 동기 신호를 보여준다. 세번째와 마지막 그림은 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력신호와 이를 확대한 신호를 보여준다. 첫 번째 그림에서 보여진 FFP-TF 인가파형의 감소부분과 증가부분은 각각 긴 파장에서 짧은 파장으로 스위핑되는 과정과 다시 반대로 복귀하는 과정에 해당한다. 따라서 두 번째 그림에서 보여진 샘플링 동기신호의 간격을 반으로 줄여 각 과정의 스위핑을 모두 이용하면 영상의 프레임 속도를 2배 정도 향상시킬 수 있을 것이다. 마지막 그림은 앞서 3.3절에서 언급한 것처럼 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈의 출력은 피크점 간의 간격이 변하는 즉 처핑된 정현파 형태의 빔살무늬 신호임을 보여준다.

Fig. 4는 샘플로서 미러를 사용하여 획득한 2차원 이미지를 보여준다. (a)는 recalibration을 수행하지 않은 경우이며, (b)는 recalibration을 수행한 경우이다. (a)에서는 미러 표면의 이미지가 흐리게 번져서 나타나지만, (b)에서는 선명한 영상을 보여준다. 이는 신호처리 과정에서 recalibration의 필요성을 상기시킨다.

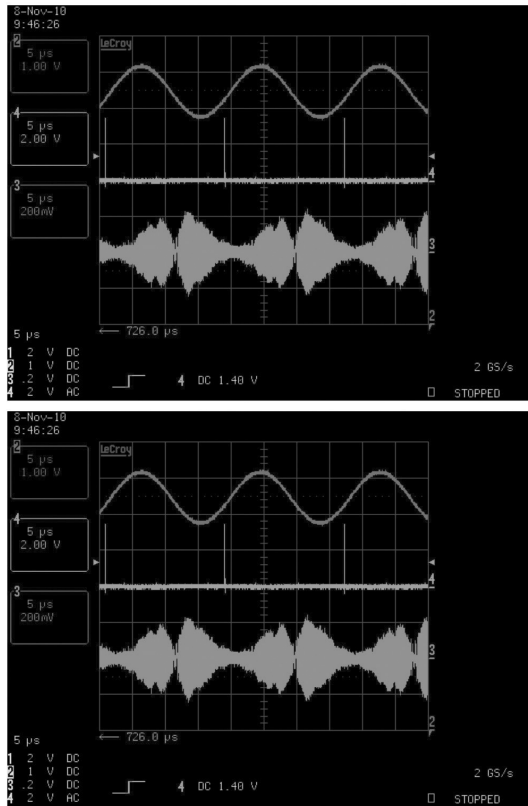


Fig. 3. (a) Drive waveform applied to FFP-TF (b) Synchronization signal for ADC (c) Output signal from Michelson interferometer clock module (d) Expanded view of (c).

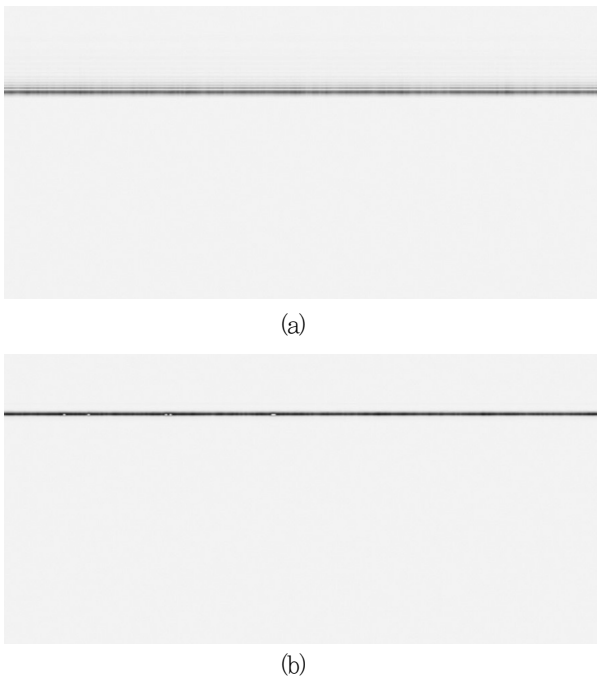


Fig. 4. Image captured from mirror sample (a) without recalibration (b) with recalibration.

Fig. 5는 샘플로서 1 mm 두께의 유리판을 사용하여 얻어진 2차원 단면 이미지를 보여준다. 그림 상단의 파형은 B-scan 중

의 임의의 한 지점에서 측정된 비트 주파수 신호를 보여준다. 이는 기준판의 미러와 유리 앞면, 기준판의 미러와 유리 뒷면, 그리고 유리 앞면과 뒷면간의 간섭등 3 종류의 간섭으로 인하여 생성된 3가지 주파수 비트 신호들의 혼합된 파형이다. 하단 좌측은 상단의 파형에 대한 FFT 결과 전력스펙트럼을 보여준다. 예상으로는 3개의 서로 다른 스펙트럼이 나타나야 한다. 그림에서 첫 번째로 보이는 스펙트럼의 경우 주파수는 가장 낮지만 크기가 가장 크다. 이는 기준판의 미러와 유리 앞면간의 거리차를 나타내며 강한 빛들간에 간섭이 이루어진 경우이다. 두 번째 스펙트럼은 유리 앞면과 뒷면간의 간섭에 기인한 것이며 유리판의 두께(약 1 mm)를 나타낸다. 본 논문에서 구현된 광원의 스위핑 범위로부터 계산된 A-scan 거리 분해능은 약 6 μm 이었다. 그런데 두 번째 스펙트럼의 위치는 약 1 mm에 해당되므로 6 μm는 그 위치를 1000/6≈167 등분한 것중의 한 칸에 해당한다. 하지만 두 번째 스펙트럼의 선폭으로 미루어 볼 때 167개를 구분하는 것은 다소 무리인 것을 알 수 있으며 따라서 A-scan의 실제 거리 분해능은 계산치보다 열악해짐을 알 수 있다. 한편 기준판의 미러와 유리 뒷면간의 간섭으로 인한 마지막 스펙트럼은 매우 작게 나타나고 있다. 이는 레이저 발진 광의 코히어런스 길이에 따른 제약으로 인하여 간섭 신호의 세기가 매우 약하고 이로 인하여 FFT 결과 전력스펙트럼이 매우 작음을 알 수 있다. 하단 오른쪽 쪽은 유리판의 2차원 단면 이미지를 보여준다. 그림의 맨 아랫 부분에 유리 뒷면의 이미지가 흐리게 나타남을 알 수 있다.

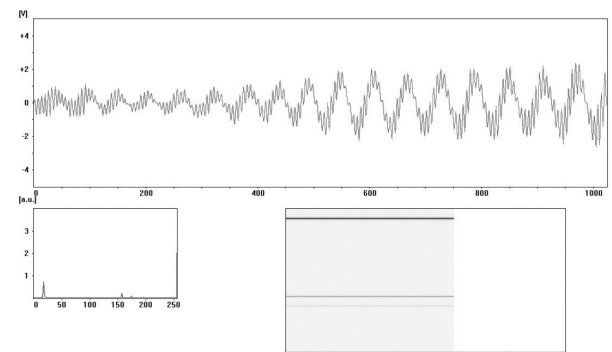


Fig. 5. Cross-sectional image captured from glass plate with 1mm thickness.

Fig. 6은 생체 샘플로서 엄지 손가락의 바닥면을 사용하여 얻어진 2차원 표피 단면 이미지로서 표피의 내부 경계가 나타나고 있음을 알 수 있다. 더 깊은 부분의 영상을 얻기 위해서는 샘플로의 입사 광파워가 더욱 증가되어야 한다. 이는 광원 출력 광을 증폭용 SOA를 사용하여 다시 증폭시킴으로써 가능하며 이때 약 20 mW 이상의 광 파워가 얻어질 것으로 사료된다. 본 실험에서는 증폭용 SOA가 준비되지 않아 더 깊은 부분의 영상 획득은 불가능하였다. 획득된 영상의 프레임 속도는 현재 약 5 프레임/초이다. 이는 실험에 사용중인 갈바노미터의 스캔속도(5 Hz)

에 의하여 제한된 것으로 사료된다. 데이터 획득에 사용된 DAQ 보드는 단순히 샘플링 및 PC로의 데이터 전송만을 고려하면 최대 100 프레임/초의 영상 속도를 제공할 수 있다. 하지만 신호 처리 및 디스플레이 과정에서의 지연 및 갈바노미터의 스캔속도 등을 고려하면 약 20 프레임/초의 영상 속도를 기대할 수 있다. 본 실험에서 더 높은 프레임 속도를 얻기 위해서는 갈바노미터의 스캔속도를 높여야 하는 것은 당연하고 신호처리에 소요되는 시간을 줄여야 한다. 또한 DAQ 보드의 메모리를 확장시켜 한 프레임에 해당하는 모든 스캔 데이터를 DAQ 보드의 메모리에 연속적으로 저장한 다음 이를 한꺼번에 PC로 전송시켜 데이터 획득에 소요되는 시간을 더욱 절약할 수 있다. 앞으로 더욱 뛰어난 고속 고해상도의 생체 이미징 기술구현이 차후 연구과제로 남는다. 한편 고속 광대역 스위핑 특성을 지니는 FDML 파장 스위핑 링 레이저 구현기술은 기존의 분광학 장치의 광원으로 응용개발될 수 있을 것으로 사료된다[8].

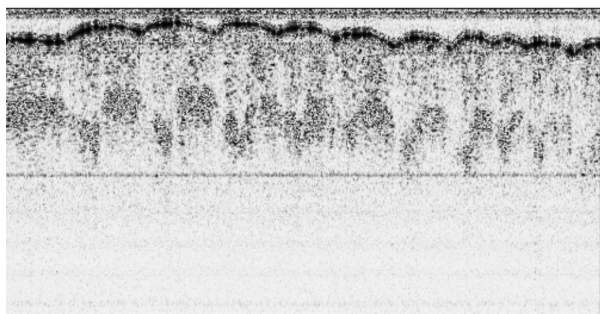


Fig. 6. Epidermis cross-sectional image of thumb bottom.

## 5. 결론

본 논문에서는 고해상도 실시간 SS-OCT 시스템 구성에 필수적인 FDML 방식 파장 스위핑 링 레이저를 구현하였다. 측정을 통하여 55.03 kHz의 스위핑 속도, 125 nm의 스위핑 범위, 그리고 9 mW의 출력 광 파워 등 FDML 방식 스위핑 레이저의 주요 특성들을 확보하였다. 또한 이를 광원으로 사용한 SS-OCT 시스템을 제작하였으며, 제작된 시스템을 통하여 유리판 및 엄지 손가락 바닥에 대한 2차원 단면 이미지를 획득하였다. 선명한 이미지를 얻기 위하여 마이켈슨 간섭계 클럭 모듈을 사

용하여 recalibration을 위한 기준 신호를 발생시켰으며, recalibration을 통하여 이미지의 퍼짐 현상을 해결하였다. 하지만 시스템에 사용된 갈바노미터의 스캔속도 제한(5 Hz)으로 인하여 5 프레임/초 정도의 영상속도에 그쳤다. 앞으로 본 연구 결과를 토대로 고해상도 실시간 생체 단면 영상을 제공하는 SS-OCT 시스템 구현이 가속화될 것으로 사료된다.

## 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] 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.
- [5] A. G. Podoleanu, "Unbalanced versus balanced operation in an optical coherence tomography system," *Appl. Opt.* vol. 39, pp. 173-182, 2000.
- [6] Eugene Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 1987.
- [7] H. S. Kim, M. Y. Namgoong, J. R. Lee, and J. S. Eom, "Real 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.
- [8] 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. Kor. Sensors. Soc.*, vol. 18, no. 5, pp. 365-371, 2009.



**엄진섭(Jin-Seob 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