

SOA 2개의 병렬연결을 통한 파장 가변 레이저 개발

Development of Wavelength Swept Laser by using the two SOAs parallel configuration

김 훈 섭* 엄 진 섭**
Kim, Hoon-Sup Eom, Jin-Seob

Abstract

In this paper, we have developed wavelength swept laser system for the swept source optical coherence tomography(SS-OCT). A laser is constructed by using the two SOAs parallel configuration, fiber Fabry-Perot tunable filter(FFP-TF). The wavelength sweeps are repetitively generated with the repetition period of 50Hz. The wavelength tuning range of the laser is more than FWHM of 80nm centered at the wavelength of 1310nm and the line-width of the source is 0.12 nm.

키워드 : 파장 가변 레이저, 파장가변광원 광 결맞음성 단층촬영장치,
반도체 광 증폭기, 광섬유 패브리페로트 가변 필터

Keywords : *Wavelength Swept Laser, Swept Source-optical coherence tomography,
Semiconductor Optical Amplifier, Fiber Fabry-Perot tunable filter*

1. 서론

최근 OCT(Optical Coherence Tomography)를 이용한 생체 영상진단 기술이 국외는 물론, 국내에서 활발하게 연구되고 있다[1]. 특히 SS-OCT(Swept source OCT) 방식이 기존의 TD-OCT(Time-Domain OCT) 방식에 비해, 안정적이고, 고속으로 동작할 수 있으며, 레이저의 선포이 좁을수록 SNR이 높아지는 장점을 갖고 있다[2]. 이런 SS-OCT에서는 고품질의 레이저 광원개발이 중요하다. SS-OCT를 위한 파장가변 레이저에 요구되는 특성들은 다음과 같다. 1) 넓은 파장

가변 대역폭, 2) 좁은 선포, 3) 고속의 파장가변 등이다. 이 특성들은 각각 SS-OCT 시스템의 거리 분해능(axial-resolution), 투과깊이, 영상출력속도를 결정한다[3]. 실제 SS-OCT 광원 개발을 하고 있는 외국 사례의 경우 실시간 영상구현을 위하여 수십 kHz 이상의 파장가변 속도, 수십 nm 이상의 파장가변 범위, 0.1nm 이하의 선포 등의 특성을 만족시켜야 한다고 보고하고 있다[3].

본 논문은 2개의 병렬 연결된 반도체 광 증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)와 광섬유 패브리 페로 필터(FFP-TF : Fiber Fabry-Perot Tunable Filter)를 이용하여 고리형 레이저(ring laser)를 제작하였다. 이로써 약 80nm 정도의 파장가변 대역폭과 약 0.12nm 정도의 레이저 발진 선포와 50Hz 정도의 파장가변 속도 성능을 내는 SS-OCT용 파장가변 광원을 개발하였다.

* 강원대학교 전자공학과 박사과정

** 강원대학교 전자공학과 교수, 공학박사(교신저자)

2. 파장 가변 레이저의 동작 원리

고속 광대역 스위핑 레이저를 구성하기 위한 요소기술에는 고속 광대역에 걸쳐 통과대역 스위핑이 가능한 필터가 사용되어야 한다. 현재 상용화된 필터로는 AA Opto-Electronic 사의 음향광학필터(AOTF : Acousto-optic Tunable Filter)와 LamdaQuest사의 FFP-TF가 적합한 것으로 분석되었다. AOTF 를 사용한 구성의 경우 파장 파수 변환 과정(λ to k domain recalibration)이 필요없기 때문에 신호처리 과정이 더욱 단순해지므로 영상 프레임 속도 향상에 도움이 된다. 하지만 AOTF의 구조상 음파의 속도 한계로 인해 고속 파장 가변용으로는 적합하지 못하다. 현재 AOTF의 최대 스위핑 속도를 계산해 보면, 약 50Hz 정도에 불과하다. 반면에 FFP-TF는 AOTF에 비해 속도에 대한 제약이 거의 없다. 그러므로 향후 고속 파장 가변용 목표로 본 연구에서는 FFP-TF를 사용한 파장가변 레이저 개발에 대한 내용을 다루었다.

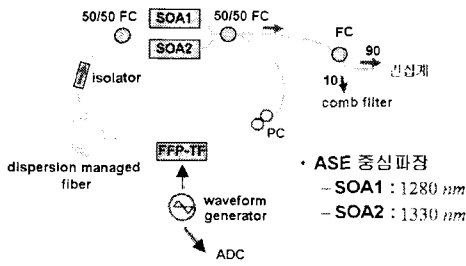


그림 1 파장가변 링 레이저

그림 1에 FFP-TF를 사용한 파장가변 링 레이저 구성도를 보였다. 위의 링 레이저는 이복대길로사 2개의 SOA 를 Fiber Coupler(FC)를 통해, 병렬로 연결하였다. 이는 SOA 1개를 사용할 때 보다 더 넓은 파장 가변 범위(sweeping range)를 얻기 위함이다. Isolator 는 링 레이저 공진기 안의 불필요한 반사(extraneous reflections)를 제거해 주고, 링 공진기의 단방향 발진을 가능하게 해준다.

본 연구에서 사용한 FFP-TF은 약 50Hz로 주어지는 AOTF에 비하여 스위핑 반복률이 월등히 높다는 장점을 갖고 있다.(100kHz 이상도 보고됨) 이는 영상의 프레임 속도를 증가시키므로 큰 장점으로 부각된다. 본 연구에서는 LamdaQuest사의 FFP-TF를 사용하였다. 이 소자는 내부에 압전소자(PZT)를 사용하여 특별히 제작된 캐브리-페롯 공진기 구조로부터 최대 40kHz의 스위핑 반복률을 가지며, FSR(free spectral range) = 160nm, Finesse = 600, 그리고

삽입손실 = 2.5dB, 튜닝 인가전압 = -20~50V 범위에 있다. DC에서의 FSR 튜닝 전압은 19V/FSR 이다.

한편, 분산 유지 광섬유는 향후 고속의 FDML(Frequency Domain mode locked) 레이저 구성을 위해 필요한 광섬유 소자이다[4]. 40kHz의 스위핑 반복률을 가지는 FFP-TF를 사용하여 FDML 레이저를 구성하기 위하여는 빛이 FDML 링 레이저를 1회전하는데 소요되는 시간이 $1/40kHz = 25\mu s$ 또는 이의 정수배가 되어야 한다. 따라서 FDML 레이저의 링의 총 길이가 이러한 시간지연을 제공하도록 내부 광섬유 지연선(fiber delay line)의 길이를 조정하여야 한다. 만일 링이 모두 광섬유로 구성되어 있다고 가정하면 링 광섬유의 전체 길이는

$$L_{fiber} = \frac{c}{n} T_{sweep} \quad \text{또는 이}$$

$$= \left(\frac{3 \times 10^8 m/s}{1.46} \right) \times 25\mu s = 5.137km$$

의 정수배가 되어야 한다.

링 공진구조 안에서 발진된 레이저는 우측의 50/50 FC(fiber coupler)를 통해, 50% 출력광은 다시 공진기 안으로 들어가서 공진하게 되며, 다른 50% 출력광은 10/90 FC 에 의해서, 90% 출력광은 OCT 간섭계로 들어가게 되며, 10% 출력광만은 A/D 변환을 위한 동기신호 추출을 위한 목적으로 사용된다. 즉, 90%의 많은 레이징 출력광이 OCT 간섭계로 보내져서, 생체에서 반향반사되는 빛이 좀 더 많아지도록 구성하였다.

편광 조절기(PC : Polarization Controller)는 광섬유 내에서의 편광 요동 문제를 해결하기 위한 편광 보상역할을 해준다. 실제로 실험을 통해, PC의 조정에 따른 파장 가변 출력에 리플의 유무가 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험 및 결과

개발한 파장 가변 레이저의 성능을 측정해 보았다. 우선 그림 2는 FFP-TF 를 구동시키지 않은 상태에서 레이저의 발진 선폭을 측정하였다. 발진 선폭이 좁을 수록, SS-OCT의 영상의 품질 중 SNR이 더 우수해지고, 투과 깊이 범위도 더 넓어지는 장점이 있다. 본 연구에서는 약 0.12 nm 이하의 선폭을 얻을 수 있었다. 그림 3은 병렬 연결한 2개의 SOA ASE 스펙트럼 합을 측정된 결과이다. 3dB 대역폭이 약 60nm 임을 알 수 있다. 하지만 향후 1300nm 중심파장의 SOA 대신, 1335nm 중심파장의 SOA로 교체한다면, 3dB 대역폭은 약 100nm 가까이까지 넓어질 수 있을 것이다. 3dB 대역폭이 넓으면, 파장 가변 범위가 넓어지게 되며, 파장 가변 범위가 넓을수록 SS-OCT의 거리

분해능(axial resolution)도 좋아지기 때문에 향후 SOA 교체와 같은 개선이 필요하다.

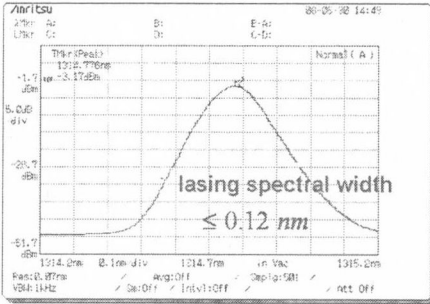


그림 2 레이저의 발진 선폭

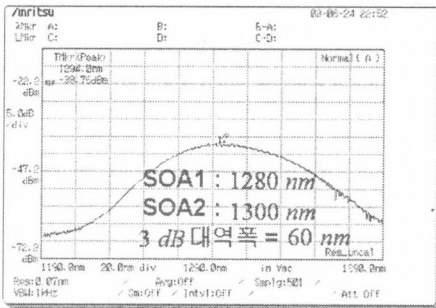


그림 3 병렬 연결한 2개의 SOA ASE 스펙트럼 합

그림 4은 파장 가변되고 있는 레이저의 가변 범위 및 평균 출력 광파워 스펙트럼을 측정한 그림이다. 약 80nm의 파장 가변 범위, 약 3.7mW의 평균 출력 광 파워를 얻을 수 있음을 확인하였다.

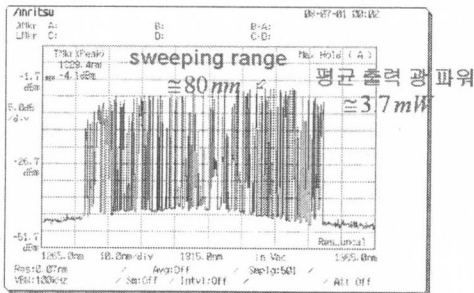


그림 4 레이저의 가변 범위 및 평균 출력 광 파워

OCT에서 중요한 성능 중 거리 분해능이 있다. 이는 오로지 광원의 사양에 의존하게 되는데, 광원의 스위핑 범위($\Delta\lambda$)가 클수록, 광원의 중심파장 대역이 작을수록 좋아진다. 이와 관련된 식은 다음과 같이 주어진다[5].

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

본 연구에서 $\Delta\lambda = 80 \text{ nm}$, $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 이므로 거리 분해능은 $R_{axial} \approx 9.45 \mu\text{m}$ 으로 주어진다. 그러나 실험에 사용한 SOA의 중심파장은 각각 1280nm, 1300nm 인데, 1300nm를 1335nm로 대체하게 되면, 100nm 이상의 파장 가변 범위를 획득하여, 거리 분해능이 개선될 것으로 사료된다.

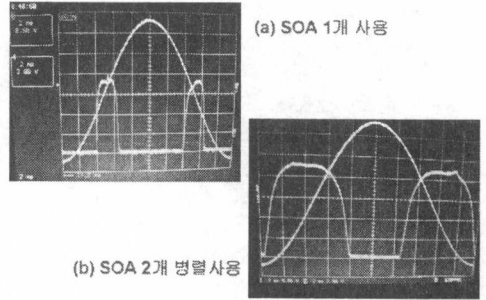


그림 5 레이저 출력의 시간적 세기($f_{sweep} = 50 \text{ Hz}$)

그림 5 (a)는 1300nm의 중심 파장을 가지는 하나의 SOA로 구성된 링 레이저의 FFP-TF에 50 Hz, 14V_{p-p} 정현파를 인가하여 레이저 출력의 시간에 따른 세기(intensity)를 광 검출기로 측정한 그림이다. 이때 SOA에 인가된 전류는 200mA이다. 그림 5 (b)는 각각 1280nm와 1300nm의 중심 파장을 가지는 2개의 SOA를 병렬로 연결하여 구성된 링 레이저의 FFP-TF에 50 Hz, 14V_{p-p} 정현파를 인가하여 레이저 출력의 시간에 따른 세기(intensity)를 광 검출기로 측정한 그림이다. 그림 5로부터 2개의 SOA를 병렬로 연결한 경우의 발진 스펙트럼이 더욱 넓어지는 것을 볼 수 있다.

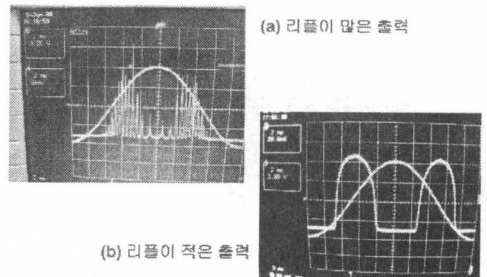


그림 6 편광조절기에 의한 스위핑시 출력 리플 조정

한편 출력 광파워의 리플을 최소화하기 위하여 파장가변레이저 내에 편광조절기(PC : Polarization Controller)를 설치하였다. 이러한 리플은 A/D 변환을 위한 동기신호 추출시에 잡음처럼 작용하게 되어 동기신호 추출을 방해한다. 따라서 편광조절기를 통하여 스위핑시에 파장가변 레이저의 광출력 리플을 최소화시키며 아울러 스위핑에 따른 전

체적인 광파워 패턴이 균일하도록 조정한다. 그림 6에서 (a)는 편광조절기를 조정하여 스위핑시에 리플이 많은 출력을 보여주며 (b)는 스위핑시에 출력 파워의 리플이 적어지도록 편광조절기를 조정된 경우를 보여준다.

향후 고속 파장 가변 레이저 구성을 위해, 현재 사용하고 있는 FFP-TF의 공진 주파수를 알 필요가 있다. 즉, FFP-TF 안의 PZT는 유도성(reactance) 리액턴스 성분으로 인해 특정한 주파수대역에서 직렬 공진주파수와 병렬 공진주파수를 가지며, 병렬 공진주파수에서 상대적으로 높은 임피던스를 가진다. 또한 특정한 공진주파수에서는 낮은 인가전압으로도 FFP-TF의 공극이 한 FSR을 스위칭할 수 있을 만큼 변위가 증가한다. 이는 PZT의 편극현상으로 인하여, PZT의 구동변위가 공극의 축방향으로 증가하기 때문이다. 이러한 주파수 대역에서 FFP-TF를 구동할 경우, $20V_{p-p}$ 보다 낮은 전압과 수십 mA의 구동전류로 FSR 영역의 파장 가변이 가능하다. 구동주파수에 따른 FFP-TF의 임피던스(impedance)를 측정하기 위해 임의의 소자의 임피던스 측정 장비인 LCR meter 등의 impedance analyzer가 필요하지만, 구할 수 없는 관계로, 그림 7과 같이 FFP-TF에 인가하는 정현파의 주파수를 조정해 가면서, 그 때의 FFP-TF에 인가되고 있는 V_{p-p} 출력 전압을 측정하여, 공진 주파수를 측정할 수 있었다[6]. FFP-TF 내부 PZT의 병렬 공진주파수는 그림 7에서 보듯이, 61kHz였고, 이 때의 FSR을 스위칭할 수 이Tssm 전압은 $4.1V_{p-p}$ 였다. 그러므로, 향후, FDML을 구현하기 위해서는 약 3.36km 길이의 dispersion managed fiber가 필요하다. 이와 같이 FDML 레이저를 구성을 하게 되면, 현재 50Hz의 파장가변 속도에서 약 61kHz의 고속파장 가변 속도의 성능을 낼 수 있을 것으로 사료된다.

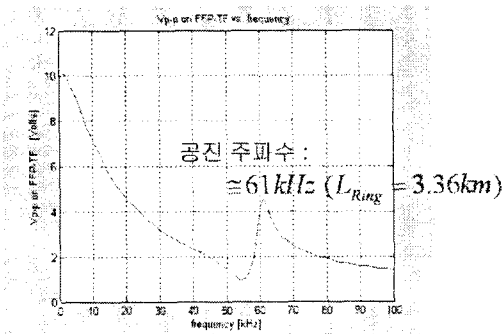


그림 7 FFP-TF 공진 주파수 측정

4. 결론

본 연구에서는 50Hz의 파장 가변 속도, 약 80nm의 파장 가변 범위의 OCT용 파장가변 링 레이저를 개발하였다. 이를 통해, 거리 분해능 약 9.45 μm 의 성능을 얻을 수 있었다. 향후 delay-line 으로서 길이 약 3km의 dispersion managed fiber를 구매하여 FDML로 구성하게 되면, 60kHz 이상의 고속 파장 가변 속도의 성능을 얻을 수 있게 된다. 아울러 중심파장 1335nm SOA 광섬유를 구매하여, 중심파장 1280nm SOA와 병렬 연결해주면, 파장 가변 범위도 현재의 80nm에서 100nm로 넓힐 수 있어, 거리 분해능도 더욱 우수해질 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 교육인적자원부·산업자원부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 이충희, 생체 영상 진단 및 생체 물질 측정 기술, 한국 과학 기술 정보 연구원, 한국, 2005.
- [2] R. A. Leitgeb, C. K. Hitzenberger and A. F. Fercher, "Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography," *Optics Express*, vol. 11, pp889-894, 2003.
- [3] Choma, M. A., Sarunic, M. V., Yang, C. H., and Izatt, J. A., Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography. *Opt. Express* 11(18), 2183-2189, 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* 14, pp.3225-3237, 2006.
- [5] Brett E. Bouma, Guillermo J. Tearney, eds., "Handbook of Optical Coherence Tomography" *Marcel Dekker*, New York, 2002.
- [6] W. V. Sorin, "High resolution optical frequency analysis" in Fiber optic test and measurement. D. Derickson, ed. Hewlett Packard Company, *Prentice Hall*, 1998.