

특집 ■ 최근 레이저 개발동향

파장훅음 레이저의 개발

김창석* · 이휘돈**

1. 파장훅음 레이저의 개념

파장훅음 레이저는 광섬유격자(Fiber Bragg grating) 센서 및 광결맞음 단층영상(Optical Coherence Tomography, OCT) 등 응용 분야의 확대에 따라 많은 발전 중이다. 특히 생체 조직의 깊이 방향 단층 정보 및 3차원 영상을 고해상도, 실시간으로 제공해주는 OCT 기술은 최근 안과를 비롯한 다양한 생체 광의료영상 기기로 급격히 상용화되고 있다. OCT 영상 기술은 기본적으로 조직에서 산란되어 반사된 빛과 기준단 빛의 경로차이에 의한 광학적인 간섭 현상을 바탕으로 하며, 그 광경로 차이에 의존하는 간섭 현상을 측정하기 위하여 다양한 방식이 개발되어 왔다.

OCT 는 간섭 신호 측정 방법에 따라 간섭계 기준단의 길이를 기계적으로 변화시켜 광간섭신호를 획득 하는 1세대 Time-domain OCT (TD-OCT), 간섭계의 기계적 이동이 없이 파장(주파수) 별 광세기를 측정하여 간섭 무늬 간격 분포를 동시에 획득하는 Frequency-domain OCT (FD-OCT) 로 크게 나눌 수 있다. 특히 실시간 영상 획득에 제약이 있는 TD-OCT에 비해 빠른 영상 속도를 가지는 FD-OCT 는 광대역 광원과 Spectrometer 기반 분광계를 이용한 2세대 Spectral domain OCT (SD-OCT) 와 파장훅음 광원을 이용하는 3세대 Swept-source OCT

(SS-OCT) 로 세부 분류가 가능하다.

이러한 세대별 OCT 시스템의 발전은 주로 광원의 발전에 의존하고 있으며, 특히 최근 SS-OCT의 성능은 곧 침단 파장훅음 레이저(Wavelength Swept Laser) 광원의 성능이라고 말할 수 있다. 최근의 상용화된 파장훅음 레이저 광원의 기술적 경향과 연구되고 있는 발전 방향은 더 빠른 반복률과 더 넓은 대역을 더 안정되고 값싸게 Sweeping하는 쪽으로 집중되어 있다. 본 기고에서는 이러한 파장훅음 레이저의 발전 과정과 현재 상황에 관하여 기술하고자 한다.

파장훅음 레이저는 특정한 선폭을 가진 레이저가 광대역의 발전 가변폭을 가지고 일정한 주기로 반복되는 레이저를 의미한다. 레이저의 선폭, 가변폭, 반복률(주기의 역수, [Hz]) 에 의해 파장훅음 레이저의 성능 및 적용 범위가 주요하게 결정된다. 좁은선폭을 가질수록, 넓은 가변폭을 가질수록, 빠른 반복률을 가질수록 고성능의 파장훅음 레이저라고 말할 수 있다.

2. 긴 공진기 방식의 파장훅음 레이저

일반적인 광섬유 공진기 기반의 파장훅음 레이저는 기본적으로 파장을 선택하는 수동형 소자의 성능에 관계가 있다. 파장 선택 소자로서 가장 일반적으로

* 부산대학교 광메카트로닉스공학과

** 광주과학기술원 고등광기술연구소 바이오광학실

파장훅음 레이저의 개발

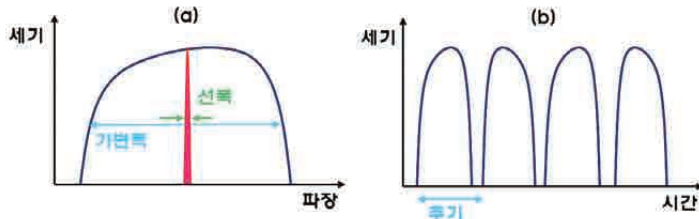


그림 1. 파장 가변 레이저의 기본 정의 (a) 파장 영역 (b) 시간 영역

표 1. 레이저 성능지표와 OCT 영상 관계

레이저 성능 지표	OCT 영상 관계
선폭	좁을수록 SS-OCT 영상 획득 가능 깊이가 깊어짐
가변폭	넓을수록 SS-OCT 영상의 해상도가 좋아짐
반복률	빠를수록 SS-OCT 영상획득 시간이 짧아짐

사용되는 Polygon mirror scanner와 Fiber Fabry-Perot tunable filter(FFP-TF) 가 있다. 다각형의 Polygon mirror scanner를 Grating 소자와 결합하여 Scanner의 회전을 이용하여 파장을 변화시키는 방식은 소자들의 정렬이 어렵고 부피가 큰 경우가 있다. 이 경우 최고 파장훅음 반복률은 W. Y. Oh 교수팀의 115 kHz 로 보고되고 있다 [1]. FFP-TF는 PZT를 기반으로 하여 Filter의 공진기 길이를 변화시킴으로써 출력 파장을 변화시킨다. 그러나

PZT 기반의 동작으로 인하여 파장훅음 반복률에 한계를 가진다는 단점이 있다. 현재까지 FFP-TF의 파장훅음 최고 반복률은 필터를 Resonance frequency에서 동작시킨 R. Huber 교수팀의 370 kHz 가 보고되고 있다 [2].

파장훅음 레이저를 kHz급 이상 고속에서 동작시키기 위하여, 위 방식들은 Fourier domain mode-locking(FDML) 기술을 사용한다. 이는 레이저 공진기의 길이에 해당하는 Free spectral range (FSR)을 필터 가변 속도의 정수배에 일치시켜 레이저의 특정 훅음 반복률에서의 효율을 높이는 방식이다. 이에 파장훅음 반복률을 정수배로 증대시키기 위해서 일반적으로 Buffering method를 사용하여 1.6 MHz 까지 파장을 가변시킨 레이저도 보고되고 있다 [3]. 현재 OptoRes 사에서 1,060, 1,310, 1,550 nm 중심 파장의 FDML 파장훅음 레이저를 최대 1.5 MHz 급 파장훅음 반복률로 상용화 하여 판매하고 있다. 이는 현재 보고 되고 있는 최고 반복률의 상용화 파장훅음 레이저이다.

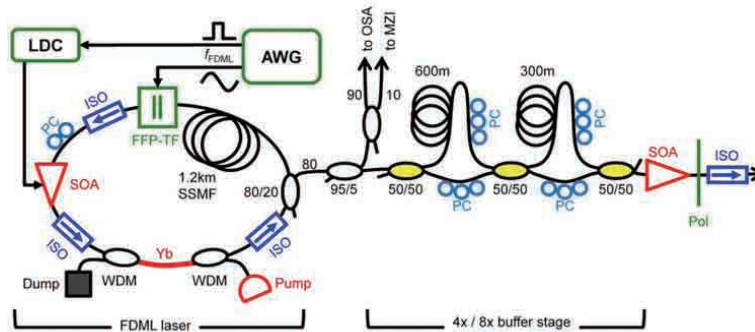


그림 2. Buffered FDML 파장훅음 레이저의 모식도 [3]

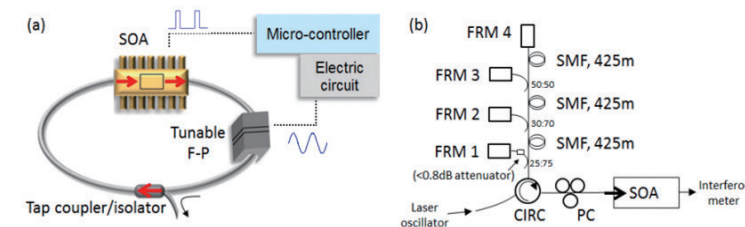


그림 3. (a) 광섬유 기반 Short cavity 파장훅음 레이저 (b) buffering method [4]

3. 짧은 공진기 방식의 파장훅음 레이저

최근에는 수백 m~수 km의 Delayed fiber를 사용해야 하고 복잡한 공진기 및 추가적인 광섬유의 Dispersion flattening을 필요로 하거나 온도나 편광의 변화와 같은 환경에 많은 영향을 많이 받게되는 FDML의 단점을 극복하고자, 파장 가변 효율을 높이고 단일 모드 발진이 가능하도록 하기 위하여 Bouma 교수팀에서 짧은 공진기 구조를 갖는 Short-cavity laser도

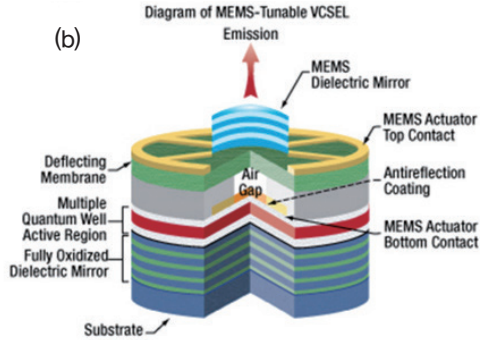
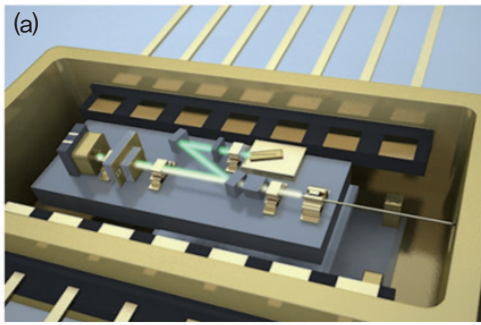
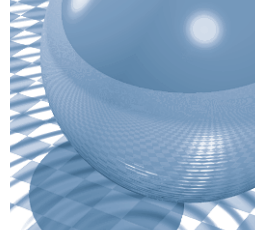


그림 4. (a) Axsun 사 MEMS external cavity laser [5], (b) Thorlabs 사의 MEMS VCSEL laser 공진기 구조 [6]

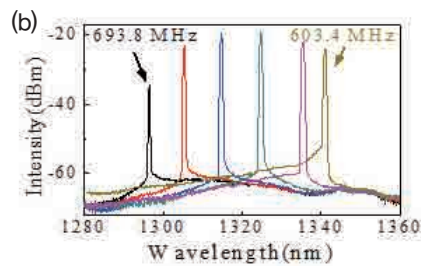
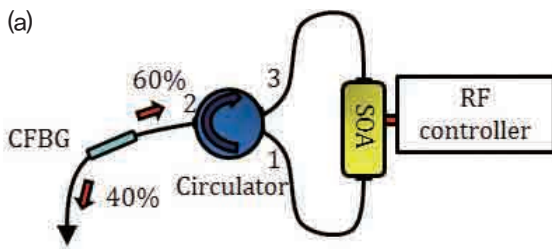


그림 5. (a) 능동 모드 잠금 파장홀음 레이저 모식도, (b) 변조 주파수 변화에 따른 발진 파장 변화 스펙트럼 [7]

제안되었다 [4]. 이 경우 파장 선택 필터로 사용되는 FFP-TF 의 기계적인 동작 한계 때문에 60 kHz 반복률에서 파장홀음 레이저를 동작 시켰으며, 반복률을 높이기 위하여 마찬가지로 Buffering method를 사용하여 4배의 반복률을 구현해 240 kHz에서 동작하였다.

최근에는 광섬유 구조를 사용하지 않는 짧은 공진기 구조의 레이저들도 상용화가 되고 있다. 먼저 Axsun사에서 MEMS external cavity 방식으로 파장홀음 레이저를 구성 하였으며 공진기 길이는 약 14 mm 이다. 공진기 내에 Tunable Fabry-Perot 필터를 사용하여 기계적 동작을 통해 발진 파장을 제어한다. 1,310 nm 대역에서 최고 100 kHz, 그리고 1,060 nm에서 최고 200 kHz 반복률까지 상용화 및 판매 하고 있다 [5]. 또 대표적으로 Thorlabs 사에서는 광학적 펄프광에 의한 MEMS VCSEL 형태로 매우 짧은 공진기를 구현하여 최대 200 kHz 반복률까지 상용화하여 판매중이다. 이 레이저는 MEMS 거울을 사용하여 공진기의 길이를 제어하며 이 공진기 길이에 따라 발진 되는 파장을 제어하는 방법을 사용하였다. 두 가지 형태 모두 짧은 공진기를 통해 안정적인 모드 발진 및 높은 가간섭 거리를 확보하고자 하였다 [6].

4. 능동모드잠금 방식의 파장홀음 레이저

지금까지 언급하였던 파장홀음 레이저들은 모두 기계적인 움직임을 기반으로 한 파장 선택 메커니즘을 사용하였다. 기계적인 동작의 속도 한계에 따라서 최대 370 kHz(Resonance frequency)의 반복률을 보였으며, 이를 MHz 속도로 끌어올리기 위하여 Buffering method를 사용함을 보았다.

본 기고에서는 기계적인 움직임을 배제한 형태의 새로운 파장 선택 메커니즘을 소개하고자 한다. 그림 5 (a) 는 기계적인 움직임이 없는 능동 모드 잠금(Active mode locking, AML) 기반 파장홀음 레이저의 모식도를 보여준다. 본 기술은 공진기 FSR의 정수배에 해당하는 RF 변조 신호를 걸어줌으로써 펄스를 생성하는 AML 기술을 기반으로 한다. 공진기는 Semiconductor optical amplifier (SOA)를 이득 물질로 하여 링 공진기를 위한 Circulator 와 분산 매개체인 Chirped fiber Bragg grating(CFBG) 만으로 간단하게 구성된다. 파장 가변은 CFBG를 이용해 공진기내에 색분산을 가하여 파장마다 공진기내의 일주 속도 즉 FSR을 파장에 따라 다르게 대응하여 각각의 파장에 맞는 RF 변조 신호

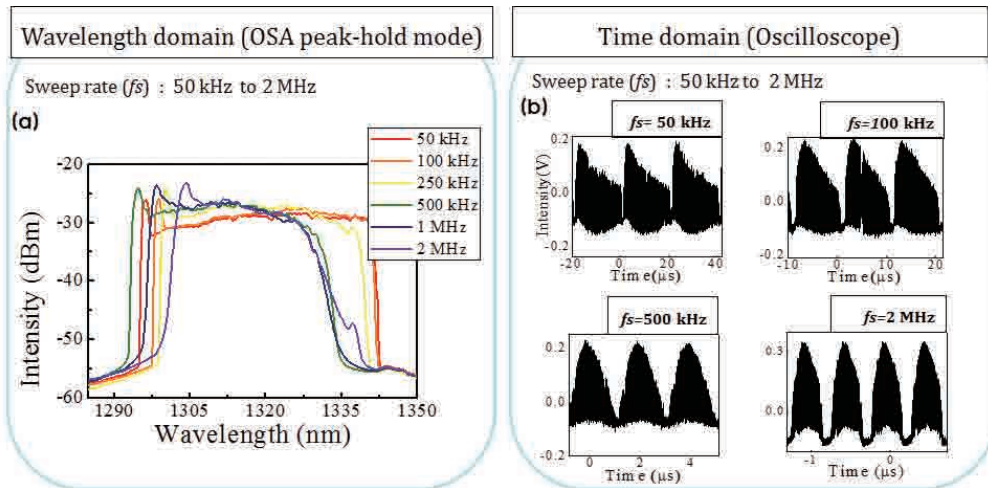


그림 6. 파장 반복률에 따른 스펙트럼 (a)wavelength domain (b) time domain

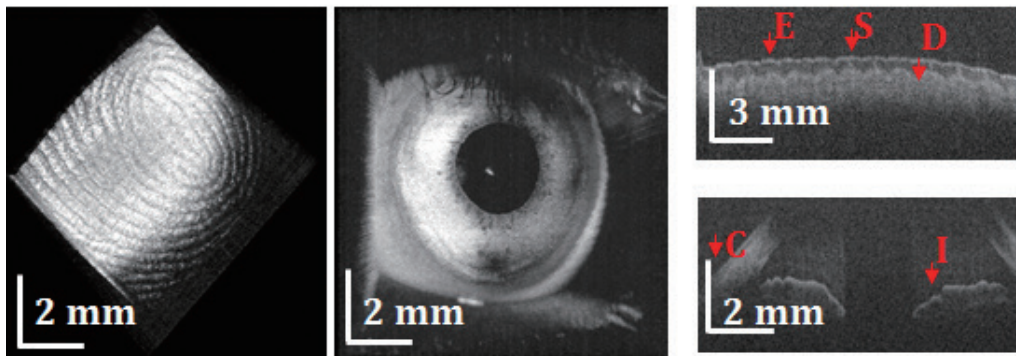


그림 7. AML 파장훅음 레이저를 이용한 SS-OCT en-face 및 단층 영상 [7]

호를 SOA 에 직접 가함으로써, 해당 파장을 발진 시킨다. 이에 해당하는 수식은 다음과 같다.

$$\Delta\lambda = -\frac{n_0^2 L}{c^2 N D} \Delta f_m = -\frac{n_0}{c N D F_0} \Delta f_m = -\frac{n_0}{c D f_{m0}} \Delta f_m \quad (\text{수식 1})$$

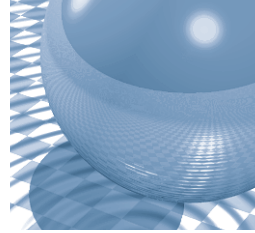
본 레이저는 기본적으로 Short cavity 광섬유 공진기로 구현하고 이에 RF 변조 주파수를 전기적으로 변화시켜 파장을 변화시킴으로써 기계적인 가변 성능의 한계를 극복할 수 있다. 그림 5 (b)에서 볼 수 있듯이, 변조 주파수를 변화함에 따라서 수식 1에 의거하여 발진되는 파장이 의존하여 변화함을 볼 수 있다.

그림 6에서 볼 수 있듯이, Buffering method 없이 최대 2 MHz 까지 파장이 가변하는 것을 볼 수 있다. 또

한 파장 선택 필터의 Resonance 특성을 고려하지 않기 때문에 여러 반복률에서 자유롭게 파장훅음이 가능하다. 이는 현재까지 보고되는 파장훅음 레이저 가운데 최고속도의 반복률 속도를 보인다. 또한 그림 7과 같이 본 레이저를 사용하여 SS-OCT 영상을 성공적으로 획득하였다.

5. 결론

본 기고에서는 다양한 종류의 파장훅음 레이저의 발전 과정과 종류를 살펴보았다. 그 동안은 광영상 기술 중 가장 성공적으로 임상에서 활용 중인 OCT 기기화 분야에서 특히 개발이 주도되어 오고 있다. 새로운 광학적



아이디어가 더해져서 더 고성능의 파장훅음 레이저가 새로 제안될 수가 있고, 다른 한편 OCT 이외의 또 다른 파장훅음 레이저의 큰 응용 분야가 새로 제안될 수도 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] W. Y. Oh, S. H. Yun, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, 115 kHz tuning repetition rate ultrahigh-speed wavelength-swept semiconductor laser, *Opt. Lett.* 2005, 30, 3159-3161.
- [2] R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography, *Optics Exp.* 2006, 14, 3225-3237.
- [3] T. Klein, W. Wieser, C. M. Eigenwillig, B. R. Biedermann, and R. Huber, Megahertz OCT for ultrawide-field retinal imaging with a 1050nm Fourier domain mode-locked laser, *Optics Exp.* 2011, 19, 3044-3062.
- [4] C. Jun, M. Villiger, W.-Y. Oh, and B. E. Bouma, All-fiber wavelength swept ring laser based on Fabry-Perot filter for optical frequency domain imaging, *Optics Exp.* 2014, 22, 25805-25814.
- [5] <http://www.axsun.com>
- [6] <http://www.thorlabs.com>
- [7] H. D. Lee, M. Y. Jeong, C. S. Kim, J. G. Shin, B. H. Lee, and T. J. Eom, Linearly Wavenumber-Swept Active Mode Locking Short-Cavity Fiber Laser for In-Vivo OCT Imaging. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2014, 20, 1-8.

약 력

김창석



김창석 교수는 KAIST 전기및전자공학과 학사, GIST 정보통신공학과 석사, 미국 Johns Hopkins University의 Electrical and Computer Engineering 박사 학위를 하였으며, KT 가입자망 연구소, 미국 Beckman Laser Institute and Medical Clinic 등의 연구 경험을 거쳤다. 2005년부터 부산대학교 광메카트로닉스공학과 교수로 재직 중이며, 신개념 레이저 광학 및 이의 다양한 광측정 센서와 광의료기기 응용 분야로 연구 중에 있다.

Email : ckim@pusan.ac.kr

이휘돈



이휘돈 박사는 부산대학교 나노과학기술학부에서 학사, 부산대학교 인지메카트로닉스공학과에서 석 박사 학위를 하였으며, 학위 기간내에 미국 Univ. of California Irvine의 Beckman Laser Institute and Medical Clinic 과 광주과학기술원 고등광기술연구소에서의 연수를 거쳤다. 현재는 광주과학기술원 고등광기술연구소의 바이오광학실에서 박사후 연구 중에 있다. 주요 연구 분야는 다양한 광섬유 기반 레이저 개발 및 이를 이용한 광섬유 센서와 OCT 시스템, 그리고 광음향 영상 기술을 이용한 생체 영상 기술 개발에 힘쓰고 있다.

Email : rahido@gist.ac.kr