

# 1300 nm 대역 파장 훑음 레이저의 훑음 주파수에 따른 출력 특성

이병창 · 오민현 · 전민용<sup>†</sup>

충남대학교 자연과학대학 물리학과  
Ⓞ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

(2009년 4월 3일 받음, 2009년 5월 13일 수정본 받음, 2009년 5월 25일 게재 확정)

광섬유 일체형으로 된 파브리-페롯 가변 필터를 레이저 공진기에 삽입하고, 1300 nm 대역의 반도체 광 증폭기를 이득매질로 이용하여 링 공진기 형태의 파장 훑음 레이저를 구현하였다. 파장 훑음 레이저의 훑음 주파수에 따른 레이저 출력 특성을 시간영역과 파장영역에서 분석하였다. 파장 훑음 주파수가 증가하면 레이저 출력이 급격하게 줄어들고, 훑음 반치폭도 감소한다. 또한 훑음 주파수 증가에 따라 전방 훑음과 후방 훑음의 광 세기가 비대칭으로 나타나며, 실제 응용 시스템에 적용할 수 있는 제한요소로 작용한다.

주제어: 파장 훑음 레이저(wavelength swept laser), Fiber optics and optical communications, Fiber-optic sensors

## I. 서 론

파장 훑음 레이저(Wavelength swept laser)는 광섬유 센서, 바이오 이미징 등을 위한 광원으로 널리 사용하고 있다.<sup>[1-3]</sup> 세계적으로 이에 대한 연구 결과를 활발하게 발표하고 있으며, 지금까지 파장 훑음 레이저는 여러 가지 방법으로 개발하여 왔다. 빠른 속도로 회전할 수 있는 폴리곤 미러와 회전격자로 구성된 폴리곤 파장 필터를 이용하여 구현하는 기술<sup>[4]</sup>, 회절 격자판(grating plate)과 평면거울을 이용하여 구현하는 기술<sup>[5]</sup>, 또는 가변형 파브리페롯 필터<sup>[6]</sup>를 이용하는 기술 등으로 개발되었다. 최근의 개발 목표는 얼마나 넓은 범위와 얼마나 빠른 속도로 파장을 훑을 수 있는지이다. 빠른 속도로 회전하는 폴리곤 미러를 사용하여 구현한 파장 훑음 레이저의 기록은 약 100 kHz의 스캔 속도를 갖는다. 하지만 광섬유 속을 진행하는 빛을 집속 렌즈와 콜리메이터를 이용하여 정밀하게 정렬해야 하는 단점과 광 손실이 크다는 단점 등이 있다. 마찬가지로 격자를 이용하여 구현하는 파장 훑음 레이저도 큰 광 손실과 광 정렬의 어려움이 있고, 벌크한 격자와 거울이 부착된 갈바노미터는 덩치가 큰 기계적인 부분을 회전해야 하기 때문에 스캔 속도도 빠를 수 없는 단점이 있다. 한편, 레이저 공진기 내에 광섬유 파브리 페롯 가변 필터(fiber Fabry-Perot tunable filter: FFP-TF)를 삽입하여 구현하는 파장 훑음 레이저는 모든 소자가 광섬유로 연결하기 때문에 광 정렬이 쉽고, 광 손실도 벌크형으로 구현하는 것보다 적지만, FFP-TF의 열적 특성에서 불안정한 단점이 있다. 최근 MIT Fujimoto 그룹에서 FFP-TF를 이용하여 훑음 속도가 370 kHz까지 얻을 수 있는 주파수 영역 모드록킹 고속 파장 훑음 레이저(Fourier domain mode locked wavelength swept laser)의 결과를 발표하였다.<sup>[7]</sup> 주파수 영역 모드록킹 파장 훑음 레이저는 훑음 속도가 레이저 공진기의 기본 종모드 주파수와 일치시켜서 얻어내는 방법이며, 기존 레이저 공진기에 비해서 상대

적으로 공진기 길이가 긴 단점이 있다.

파장 훑음 레이저에서 빠른 스캔 속도와 마찬가지로 중요한 요소가 파장 훑음 범위이다. 얼마나 넓은 파장 범위에서 훑음을 할 수 있는지는 사용하는 광원의 분해능과 관련된다. 광원의 분해능은 사용하는 파장이나 훑음 범위에 따라 그 값이 다르며, 같은 훑음 범위일지라도 상대적으로 단파장 영역에서 분해능이 훨씬 좋다. 파장 훑음 레이저의 스캔속도와 분해능은 사용하는 응용 기술에 따라서 매우 중요할 수 있다. 일반적으로 FFP-TF는 그 사용방법에 따라서 필터를 레이저 공진기 내부와 출력단인 공진기 외부에 삽입할 수 있는데 공진기 내부에 삽입하는 경우 공진기 가변 필터링(cavity tuning filtering)이라 하며, 공진기 외부에 삽입하는 경우를 후 필터링이라 한다. 후 필터링(post filtering)은 광 손실이 큰 것으로 알려져 있으며, 고출력의 파장 훑음 레이저 광원을 제작하기 위해서는 공진기 가변 필터링 방식을 이용하는 것이 일반적이다. 공진기 길이를 짧게 하면서 FFP-TF를 이용하여 파장 훑음 레이저를 구현하면 고속 ( $f > 20$  kHz)의 파장 훑음은 구현할 수 없지만 10 kHz 이상의 훑음 주파수에서 나타나는 여러 가지 특성을 분석하고 해결점을 제안함으로써 구현이 가능할 수 있다. 본 연구에서는 광섬유 일체형으로 된 FFP-TF를 레이저 공진기에 삽입하고, 1300 nm 대역의 반도체 광 증폭기를 이득매질로 이용하여 공진기 길이가 짧은 파장 훑음 레이저를 구현하였다. 또한 파장 훑음 레이저의 훑음 주파수에 따른 주파수 특성 및 훑음 주파수에 따른 레이저 출력 특성을 분석하였다.

## II. 파장 훑음 레이저 광원의 구동원리

파장 훑음 레이저는 필터링 방식에 의해 두 가지로 구분되어 지는데, 하나는 후 필터링이고, 다른 하나는 공진기 가변 필터링이다. 후 필터링은 광대역 광원 출력 단 뒤에 파장 가변 필터를 삽입하여 필터링 하는 방식이며 피드백(Feed Back)

<sup>†</sup>E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

되지 않기 때문에 필터에 의한 광원의 손실(loss)이 커서 광 출력 세기(Output Power)가 작다는 단점이 있다. 공진기 가변 필터링은 그림 1과 같은 구조를 가진 필터링 방식이며, 필터를 레이저 공진기 안에 삽입하여 필터링하며 다시 출력의 일부를 되먹임 하는 방식이다.

FFP-TF의 압전 물질에 인가전압을 변화시켜주면 필터 공극의 간격이 변화되면서 간섭으로 선택된 필터의 일정한 선평(linewidth)을 가진 Window가 파장영역에서 이동하며 필터링을 해주게 된다. 그림 2에서 공진기 내의 필터에 가해주는 전압을 가변시켰을 때 레이저가 발진하는 모습을 보여준다. 필터를 사인함수인 일정한 주파수로 변조해 줄 때 한 주기 동안 필터링 bandpass 파장은 전압이 증가하는 방향에 대해서는 단파장에서 장파장으로(전방 홀음), 반대로 전압이 감소하는 방향에 대해서는 장파장에서 단파장으로(후방 홀음) 파장 범위 내에서 훑어준다. 만약 파장 홀음에 대해 두 방향 모두 사용한다면 유효 홀음 주파수는 변조 주파수의 두 배에 해당한다. 일반적으로 파장 홀음 레이저에서 최대 파장 홀음 주파수는 ASE로부터 레이저가 형성되는 레이저의 시상수(time constant)에 제한되며, 이 값은 필터 특성, ASE 세기, 포화 출력, 레이저 이득, 및 레이저 일주시간에 의존한다. 공진기 가변 필터링을 이용한 파장 홀음 레이저는 파장 홀음 주파수의 홀음 특성과 관계해서 광포화 한계(Saturation Limit)와 일주 한계(One roundtrip Limit)의 구별된 두 한계가 있다. 레이저 홀음 주파수가 낮을 경우 어느 한 파장에서 필터링

된 빛은 한 주기가 돌아오기 전에 레이저 공진기 안을 한번 또는 여러 번 이상 일주하게 된다. 이 경우 발진하는 시간은 레이저의 시상수보다 길어서 레이저는 ASE로부터 충분한 광 세기를 갖게 되며, 이러한 경우를 광 포화 한계의 경우로 이야기 하며, 포화시간(Saturation time)과 같은 홀음 주파수를 포화 한계 홀음 주파수(Saturation limit sweep frequency)라고 한다. 한편, 파장 홀음 주파수가 점점 증가하면 어느 한 파장에서 필터링 된 빛은 레이저 공진기 안에서 머무르는 시간이 점점 짧아지며, 어느 순간 레이저의 일주시간(one round-trip time)과 같아지는 주파수가 존재한다. 이 경우를 일주 한계 홀음 주파수(one round-trip limit sweep frequency)라고 한다. 이 두 경우 홀음 속도의 제한은 레이저의 이득매질과 공진기의 특성에 따라 달라질 수 있으며, 포화 한계 홀음 주파수는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.<sup>[6]</sup>

$$f_{saturation} = \frac{\log(G \cdot \rho) \cdot c \cdot \Delta\lambda \cdot \eta}{\log\left(\frac{P_{sat} \cdot \Delta\lambda_{tuningrange}}{\Delta\lambda \cdot P_{ASEtotal}}\right) \cdot L \cdot n_{ref} \cdot \Delta\lambda_{tuningrange}}$$

$\Delta\lambda$ 는 필터의 선평(Linewidth),  $G$ 는 레이저 이득매질의 이득(Small signal gain),  $c$ 는 빛의 속도,  $\Delta\lambda_{tuningrange}$ 는 필터의 FSR (Free Spectral Range),  $L$ 은 레이저 공진기(Cavity)의 길이,  $n_{ref}$ 는 공진기 내의 굴절률,  $\rho$ 는 출력 커플링 계수(Output Coupling coefficient),  $\eta$ 는  $\frac{1}{\pi}$ ,  $P_{ASEtotal}$ 은 레이저의 자발방출 복사곡선(ASE)의 총 광 출력(Total Power)이다. 본 연구에 사용한 실험 변수 값은  $\Delta\lambda = 0.2$  nm,  $\Delta\lambda_{tuningrange} = 90$  nm,  $P_{ASEtotal} = 2$  mW,  $P_{sat} = 6$  mW,  $G = 158(22\text{dB})$ ,  $L = 10$  m,  $n_{ref} = 1.46$ ,  $\rho = 0.3$ 이다. 이 값을 위 식에 대입하면, 포화한계 홀음 주파수는 대략 7.78 kHz가 된다. 즉 이 홀음 주파수까지는 레이저 출력이 거의 일정하게 유지된다. 홀음 주파수가 포화 한계 주파수보다 커지기 시작해서 일주 한계 홀음 주파수에 도달하기까지 레이저 출력은 계속적으로 감소한다. 일주한계 홀음 주파수는 다음과 같이 계산 되어 진다.<sup>[6]</sup>

$$f_{O.R} = \frac{c \cdot \Delta\lambda \cdot \eta}{L \cdot n_{ref} \cdot \Delta\lambda_{tuningrange}}$$

위의 실험 변수 값을 위 식에 대입하면 일주 한계 홀음 주파수는 대략 14.54 kHz가 된다. 이 주파수는 레이저가 ASE로부터 발진 할 수 있는 최대 주파수이다. 이론적으로 이 주파수 이상에서는 공진기 가변 필터링으로 구현하더라도 실제 후 필터링 방식과 동일한 효과를 갖게 된다. 즉, 더 이상 ASE로부터 레이저가 발진되지 않고, 높은 광 손실을 갖게 됨을 의미한다.

### III. 실험 및 결과

파장 홀음 레이저는 공진기 가변 방식으로 구성하였으며, 그림 1과 동일하다. 레이저 공진기의 이득매질로는 1300 nm 대역

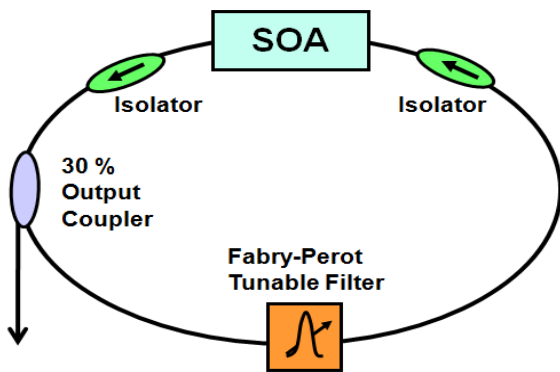


그림 1. 공진기 가변 필터링 방식의 파장 홀음 레이저 광원 구성도.

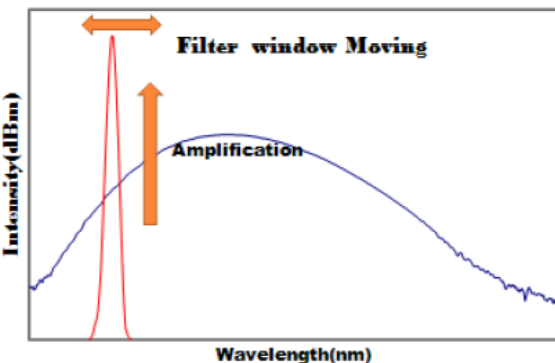


그림 2. 공진기 가변 필터링 방식의 Sweep Laser 발진.

의 SOA(Semiconductor Optical Amplifier, Inphynix Co.)를 사용하였다. 그림 3은 SOA의 ASE 곡선을 보여주며, SOA의 중심 파장은 1280 nm이다. 파장 훑음을 위한 필터로는 FFP-TF (Lambda Quest Co.)를 사용하였으며, 필터의 FSR (free spectral range)은 160 nm이고, Finesse는 650이며, instantaneous linewidth는 0.2 nm, insertion loss는 약 2.5 dB 정도이다. FFP-TF는 필터 내부에 있는 압전소자에 전압을 가해 줌으로써 필터의 공극의 간격을 조절하여 필터링 파장을 가변하게 된다. 광 고립기(Optical isolator)는 레이저의 발진이 한 방향으로만 진행하기 위해 공진기 내부에 삽입하였으며, 1300 nm 대역에서 삽입손실이 0.5 dB이다. 광섬유 결합기(Fiber Coupler)를 이용해 70%는 이득매질로 되먹임시키고, 30%는 출력(Output)으로 샘플링

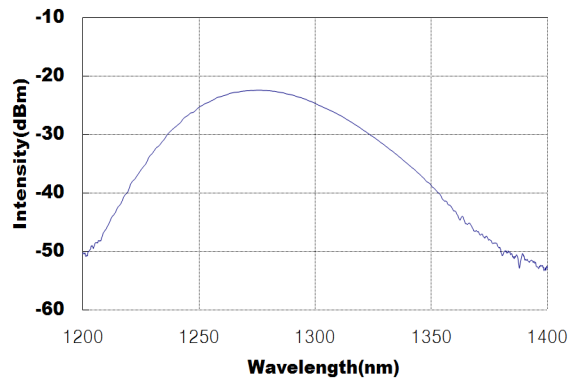
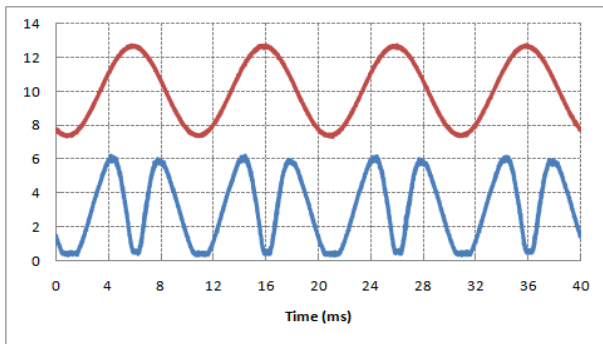
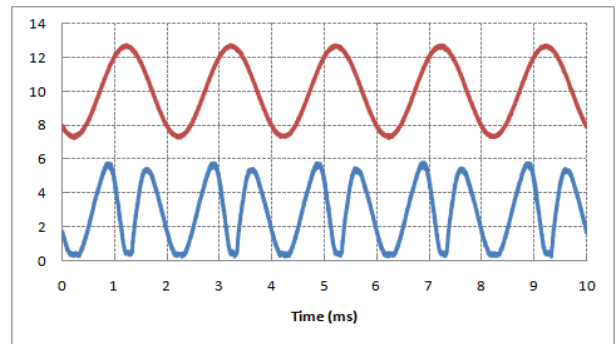


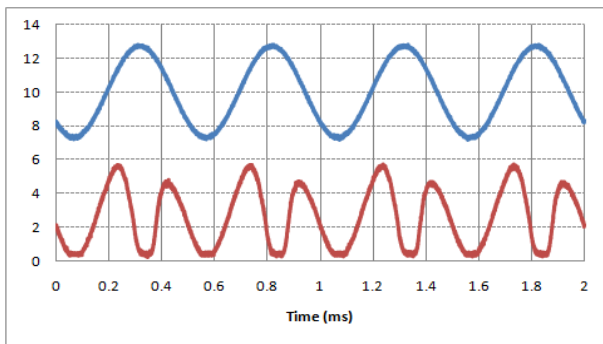
그림 3. 파장 훑음 레이저 광원의 이득매질로 사용된 SOA의 ASE 곡선.



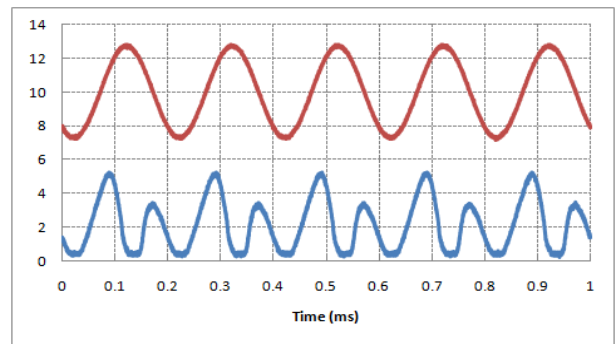
(a) 100 Hz



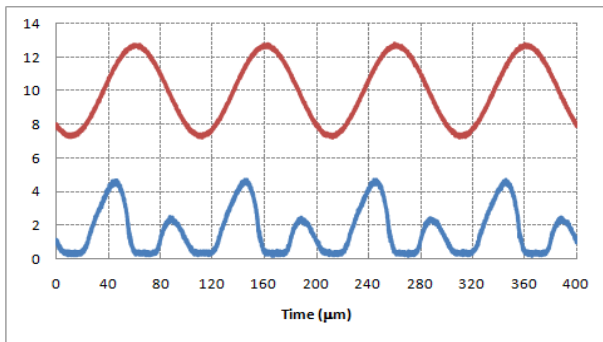
(b) 500 Hz



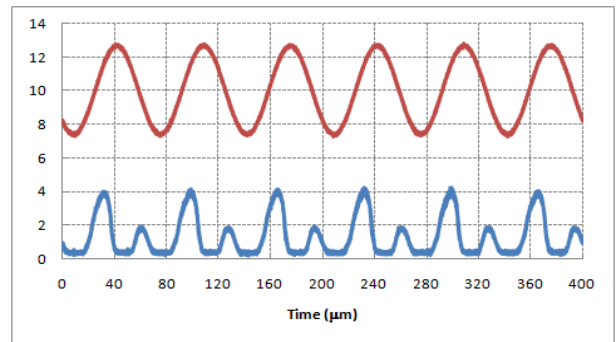
(c) 2 kHz



(d) 5 kHz



(e) 10 kHz



(f) 15 kHz

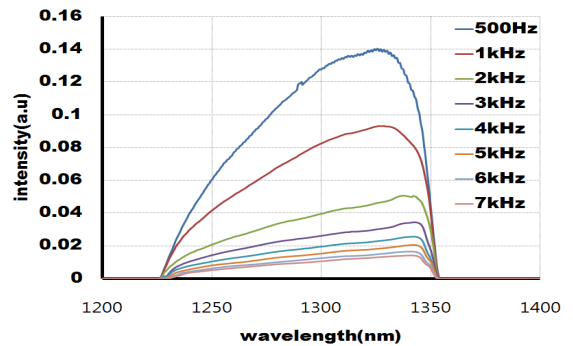
그림 4. FFP-TF PZT 인가전압에 따른 파장 훑음 레이저의 시간영역 출력; 빨간색(upper traces): FFP-TF 인가전압 신호; 파랑색(lower traces): 파장 훑음 레이저 출력.

오실로스코프와 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer; OSA)를 이용하여 광 신호를 측정하고 분석하였다.

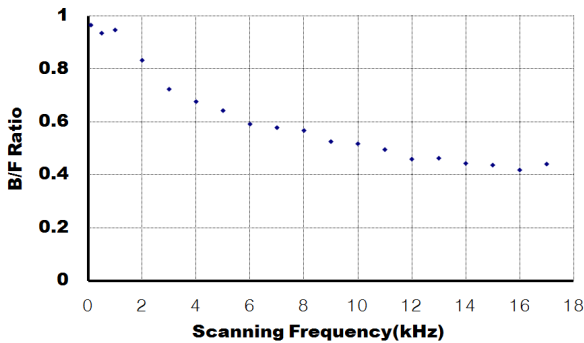
레이저 공진기 안의 FFP-TF에 가해주는 주파수에 따라 전·후방 홀음의 시간영역 출력과 파장 영역 출력을 측정하고 분석하였다. 필터에 가해주는 홀음 주파수가 증가함에 따라 시간영역에서 광 출력세기의 변화를 볼 수 있다. 그림 4는 FFP-TF에 가해주는 주파수에 따라 전·후방 홀음의 광 출력의 파형을 오실로스코프의 시간영역에서 보여준다. 이득매질인 SOA가 갖는 광학적인 비선형(non linearity) 특성으로 인해 전·후방 홀음의 출력 세기에서 비대칭성을 보이게 된다. 실험적으로 단파장에서 장파장으로 홀음이 일어날 때 장파장에서 단파장으로의 홀음보다 신호가 더 크게 나온다. 이러한 현상은 반도체 광 증폭기가 비선형 매질이기 때문에 파장 홀음이 일어나면서 동시에 4광파 혼합이 발생하여 일어나는 현상으로 해석된다.<sup>[8,9]</sup> 500 Hz 이하의 낮은 홀음 주파수에서는 전방 홀음과 후방 홀음 사이에 광세기 차이가 거의 없지만, 홀음 주파수가 점점 증가할수록 전·후방 홀음의 광세기에서 비대칭성이 커짐을 관찰할 수 있다. 10 kHz의 홀음 주파수에서 전방 홀음과 후방 홀음 사이의 광세기 차이가 절반 이하로 떨어짐을 볼 수 있다. (그림 4의 (e))

홀음 주파수의 증가에 따른 광세기 차이를 그림 5에서 보여준다. 그림 5의 (a)는 홀음 주파수에 따른 전방 홀음의 크기에 대한 후방 홀음의 세기 비를 보여준다. 또한 그림 5의 (b)는 홀음 주파수에 따른 전방 홀음과 후방 홀음의 광 세기

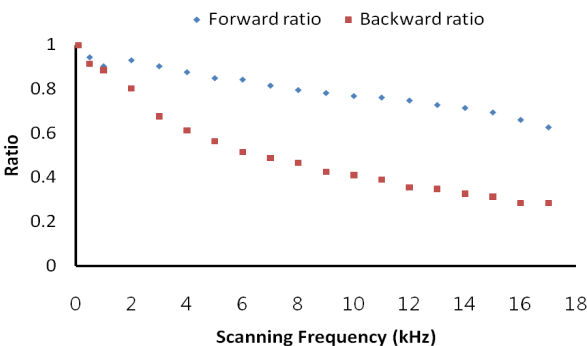
의 첨두치를 오실로 스코우프에서 측정한 값으로 보여준다. 전방 홀음에 대한 후방 홀음의 광 세기의 첨두치(Peak) 비율은 10 kHz 부근에서 50% 이하로 떨어지며, 홀음 주파수의 증가에 따라 전·후방 홀음의 광세기는 동시에 감소하는 것을 볼 수 있다. 홀음 주파수의 증가에 따른 광 세기의 감소는 전방 홀음보다 후방 홀음이 더 빠르게 일어나며, 실제 광 영상 단층 촬영에서 전방 홀음과 후방 홀음을 둘 다 사용할 수 있으나, 이처럼 홀음 주파수가 수 kHz 이상에서 전·후방 홀음의 광 세기에서 비대칭성이 있으면 상대적으로 광 세기가 낮은 후방 홀음은 사용하는데 제한이 있다. 이러한 제한 요소를 해결하기 위해 Huber는 파장 홀음 레이저 출력단에



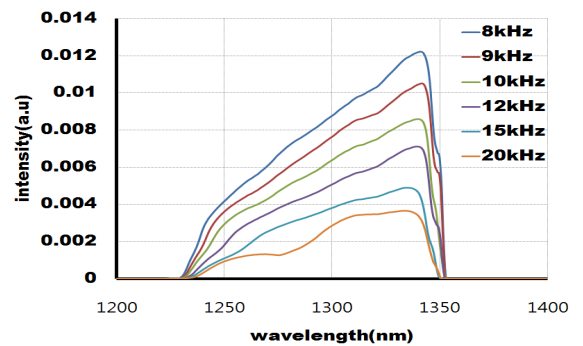
(a) 500 Hz ~ 7 kHz의 출력세기에 대한 상대적인 출력세기



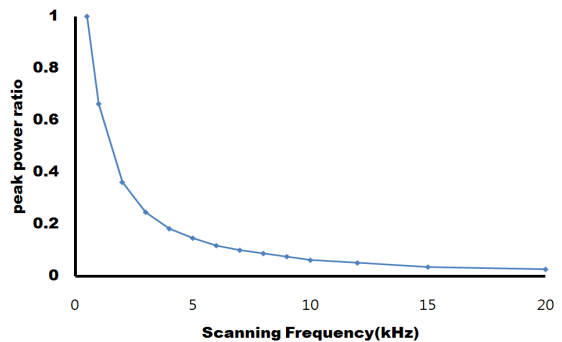
(a) 홀음 주파수에 따른 전방 홀음과 후방 홀음의 광세기.



(b) 홀음 주파수에 따른 전방 홀음에 대한 후방 홀음의 광세기 비율.



(b) 8 kHz ~ 20 kHz의 출력세기에 대한 상대적인 출력세기



(c) 500 Hz의 출력세기에 대한 상대적인 출력세기

그림 6. 홀음 주파수에 따른 파장영역에서의 출력 스펙트럼과 출력세기비율.

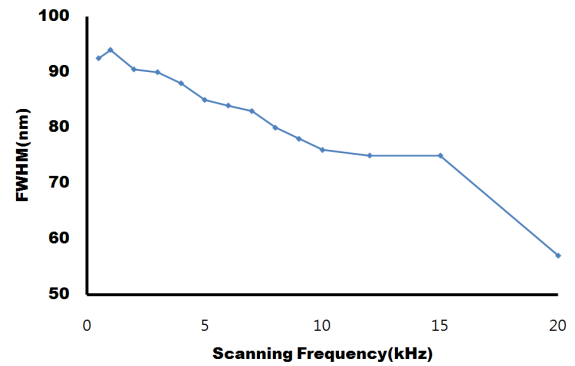
Booster용 SOA를 하나 더 사용함으로써 높은 홀음 주파수에서도 거의 균일한 출력을 낼 수 있음을 실험적으로 보고하였다.<sup>[6]</sup> 고속의 파장 홀음 레이저는 주로 광 영상 단층 촬영이나 광섬유 센서의 광원으로 이용하며, 특히 광 영상 단층 촬영에서 실시간 이미지를 얻기 위해서는 고속의 파장 홀음이 필요하다. 하지만 전·후방 홀음에서 광 세기의 비대칭성과 광 세기의 감소는 실제적인 응용에 제한을 받게 된다.

홀음 주파수의 변화에 따른 파장 홀음 레이저의 스펙트럼을 그림 6에서 보여준다. 그림 6의 (a)는 홀음 주파수가 500 Hz에서 7 kHz까지의 홀음 스펙트럼을 보여준다. 홀음 주파수가 점차 증가하면서 광세기는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그림 6의 (b)는 8 kHz부터 20 kHz까지 증가시키면서 측정된 광 스펙트럼이다. 8 kHz에서는 광 세기가 500 Hz에 비해 1/10 이하로 감소하였다. 이는 시간영역에서 측정된 광 세기의 형태와 동일한 결과를 보여준다. 그림 6의 (c)는 파장 홀음 레이저의 홀음 주파수 증가에 따른 광세기 감소를 보여준다. 광 세기의 감소는 홀음 주파수 증가에 따라 지수 함수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 8 kHz의 홀음 주파수는 이론적으로 계산한 포화한계 홀음 주파수에 근접한 값이다. 광세기 차이가 1/10 이하이면 log 스케일에서는 10 dB에 해당하며 실제 광 출력이 많이 감소했다고 볼 수 있다. 하지만 주파수가 일주 한계 홀음 주파수 근처인 15 kHz에서는 광 세기가 거의 1/30로 감소하며 이를 log 스케일로 보면 거의 15 dB 감소한 것으로 볼 수 있다. 즉 이론적으로 논의한 것처럼 일주 한계 주파수 이상에서는 레이저가 더 이상 ASE로부터 발전하지 않고 후 필터링과 동일한 결과를 주며, 실험적으로도 이와 같은 현상을 뒷받침해 준다.

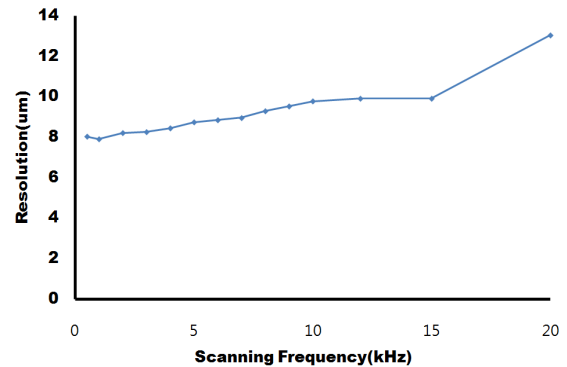
한편, 넓은 대역폭을 갖는 파장 홀음 레이저는 광섬유 센서 또는 고 분해능 OCT 시스템에서 매우 중요하다. 광섬유 센서에서는 사용할 수 있는 파장 대역이 넓으면 넓을수록 더 많은 센서 감지부를 이용할 수 있다. 광 영상 단층 이미징 시스템에서는 대역폭이 넓을수록 고 분해능이 가능해진다. 홀음 대역폭은 반치폭(Full Width at Half Maximum: FWHM)으로 표현하며, 광원의 스펙트럼이 가우스 함수(Gaussian)로 가정할 경우, 반치폭은 이미징의 분해능과 다음과 같은 관계가 있다.<sup>[10]</sup>

$$R_{axial} = \frac{2\ln 2 \lambda_0^2}{\pi \Delta \lambda}$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 파장 홀음 레이저의 중심파장이며,  $\Delta \lambda$ 는 반치폭이다. 이 식을 이용하여 파장 홀음 레이저의 홀음 파장 대역에 대한 분해능을 예측하였다. 그림 7의 (a)에서처럼 파장 홀음 주파수가 증가할수록 홀음 파장 반치폭은 좁아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 홀음 주파수가 증가하면 포화 한계 주파수를 거쳐서 일주 한계 주파수에 도달하며, 레이저 출력이 감소하는 동시에 반치폭도 함께 감소하게 된다. 또한 15 kHz 이상에서는 반치폭이 현저히 감소하는데 이는 15 kHz 근처가 일주 한계 주파수에 해당하고,



(a) 홀음 파장 반치폭(FWHM)



(b) 홀음 파장 반치폭에 따른 계산된 분해능(Axial Resolution)

그림 7. 홀음 주파수에 따른 (a), (b).

이 주파수 이상에서는 레이저가 후 필터링 방식과 동일한 결과를 가져오기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 축 방향의 분해능은 레이저의 가간섭성 길이와 관련이 있으며, 홀음 파장 범위가 넓으면 넓을수록 가간섭성 길이가 매우 짧아진다. 반대로 홀음 파장 범위가 좁아지면 좁아질수록 축 방향의 분해능(Axial Resolution)은 증가한다. 위 반치폭에 대한 식을 보면 축 방향의 분해능은  $\Delta \lambda$ 에 역비례함을 볼 수 있고, 따라서 홀음 파장 범위가 좁아지면, 광 영상 단층 이미징 시스템에서 고 해상도 이미징을 얻기가 더 어려워짐을 의미한다. 그림 7의 (b)에 홀음 주파수에 따른 반치폭을 이용하여 계산한 이론적인 분해능을 보여준다. 본 연구에서 제작한 파장 홀음 레이저는 약 10 kHz 홀음 주파수 범위까지 분해능이 10 um 이내임을 볼 수 있었다.

#### IV. 결 론

최근의 파장 홀음 레이저는 얼마나 빨리, 또 얼마나 넓게 파장 대역을 훑어내는가가 중요하게 되었다. 광 영상 단층 이미징 시스템에서는 고속 및 고 분해능의 파장 홀음 레이저를 요구하게 되었고, 빠른 진동을 측정하기 위한 광섬유 센서 인터로게이션 시스템에서는 고속의 파장 홀음 레이저를 요구하게 이르렀다. 이를 위해서는 파장 홀음 레이저에서 홀음 주파수에 따른 광 출력 특성을 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에



서는 광섬유 파브리-페롯 가변 필터를 이용한 파장 훑음 레이저의 출력 특성을 분석하였다. 1300 nm 대역의 SOA를 이득 매질로 링 공진기 형태의 파장 훑음 레이저를 구성하였다. 파장 훑음 주파수에 따른 시간 영역에서의 광 출력 특성을 측정, 분석하였고, 또한 훑음 주파수 증가에 따른 광 스펙트럼 특성을 측정, 분석하였다. 파장 훑음 주파수가 수 kHz 대역 이상으로 증가하면 전방 훑음과 후방 훑음의 광 세기에 비대칭 현상이 증가하며, 또한 훑음 주파수 증가에 따라 훑음 파장 대역이 감소하고 광 출력이 현저히 감소함을 볼 수 있었다. 이를 해결하기 위해서 파장 훑음 레이저 출력단에 부스터용 SOA를 하나 더 사용할 수 있으며, 이는 파장 훑음 레이저에서 훑음 주파수가 수 kHz 이상만 올라가도 실제 응용 시스템에 적용할 수 있는 제한요소를 해결해 준다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2007-000-20556-0)과 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-314-C00149).

### 참고문헌

[1] S. H. Yun, G. Tearney, J. de Boer, N. Ifimia, and B. Bouma, "High-speed optical frequency-domain imaging," *Opt. Exp.*, vol. 11, no. 22, pp. 2953-2963, 2003.  
 [2] Y. Wang, Y. Cui, and B. Yun, "A fiber Bragg grating sensor system for simultaneously static and dynamic measurements with a wavelength-swept fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 14, pp. 1539-1541, 2006.

[3] E. J. Jung, C.-S. Kim, M. Y. Jeong, M. K. Kim, M. Y. Jeon, W. Jung, and Z. Chen, "Characteristics of FBG sensor interrogation based on FDML wavelength swept laser," *Opt. Exp.*, vol. 16, no. 21, pp. 16552-16560, 2008.  
 [4] S. H. Yun, C. Boudoux, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength swept filter," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 20, pp. 1981-1983, 2003.  
 [5] S.-W. Lee, C. S. Kim, and B.-M. Kim, "External line-cavity wavelength -swept source at 850 nm for optical coherence tomography," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 176-178, 2007.  
 [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. Exp.*, vol. 13, no. 9, pp. 3513-3518, 2005.  
 [7] R. Huber, D. C. Adler, and J. G. Fujimoto, "Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 20, pp. 2975-2977, 2006.  
 [8] A. Bilenca, S. H. Yun, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "Numerical study of wavelength-swept semiconductor ring lasers: the role of refractive-index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers and implications for biomedical imaging applications," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 760-762, 2006.  
 [9] M. Y. Jeon, J. Zhang, and Z. Chen, "Characterization of Fourier domain mode-locked wavelength swept laser for optical coherence tomography imaging," *Opt. Exp.*, vol. 16, no. 6, pp. 3727-3737, 2008.  
 [10] M. E. Brezinski, "Optical coherence tomography: principles and applications," (Academic Press, 2006) Chapter 5.

## Characterization of Wavelength Swept Laser with a Scanning Frequency at 1300 nm

Byoung Chang Lee, Min Hyun Oh, and Min Yong Jeon<sup>†</sup>

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>†</sup>E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

(Received April 3, 2009; Revised manuscript May 13, 2009; Accepted May 25, 2009)

We demonstrate a ring type wavelength swept laser incorporating a fiber Fabry-Perot tunable filter in a laser cavity using 1300 nm semiconductor optical amplifier as a gain medium. The output characteristics of the wavelength swept laser according to the applied scanning frequencies are analyzed in the temporal and spectral domain. The output of the wavelength swept laser decreases dramatically as the scanning frequency increases. And there is a significant peak power imbalance between the forward scan and the backward scan as the scanning frequency increases. Its use in practical applications might be limited.