



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 8월

석사학위논문

반사율 가변형 출력경을 갖는 Yb  
첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금  
출력 특성 연구

조선대학교 대학원

광기술평학과

임한범

반사율 가변형 출력경을 갖는 Yb  
첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금  
출력 특성 연구

Characteristics of mode-locked output of an  
Yb-doped fiber laser coupled by a output coupler  
with a variable reflectance

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

임 한 범

반사율 가변형 출력경을 갖는 Yb  
첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금  
출력 특성 연구

지도교수 김 현 수

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

임 한 범

## 임한범의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박종락 (인)

위원 조선대학교 교수 김현수 (인)

위원 조선대학교 교수 주기남 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제1장 서 론 .....	1
제2장 이 론 .....	3
제1절 이터븀 광섬유 특성 .....	3
제2절 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 .....	7
2.1 솔리톤(soliton) 광섬유 레이저 .....	7
2.2 stretched 펄스 광섬유 레이저 .....	10
2.3 self-similar 광섬유 레이저 .....	13
제3절 레이저 출력경의 반사율 효과 .....	16
제4절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)을 이용한 모드 잠금 원리 .....	20
<b>제3장 반사율 가변형 출력경 갖는 선편광 Yb     첨가된 광섬유 레이저 .....</b>	<b>24</b>
제1절 반사율 가변형 출력경 갖는 광섬유 레이저 공진기 구조 .....	24
제2절 설계된 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 출력특성 ...	26

제3절 레이저 출력경의 반사율 효과 .....	29
<b>제4장 반사율 가변형 출력경과 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)을 사용하여 모드 잠금된 Yb 첨가된 광섬유 레이저 출력 특성 .....</b>	<b>33</b>
제1절 빠른 이완시간의 SESAM을 이용한 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금 .....	33
제2절 늦은 이완시간 갖는 SESAM을 이용한 선형구조 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금 .....	39
<b>제5장 결 론 .....</b>	<b>43</b>
<b>[참고문헌] .....</b>	<b>45</b>
<b>[감사의 글] .....</b>	<b>48</b>

## 그림 목 차

그림 1. 이터븀 이온의 에너지 준위 구조 .....	5
그림 2. 게르마늄 실리카 유리에서 이터븀의 흡수와 방출 스펙트럼 .....	6
그림 3. 솔리톤 광섬유 레이저에서 펄스 진화 .....	8
그림 4. 어븀 첨가된 광섬유 레이저의 솔리톤 스펙트럼 .....	9
그림 5. 캐비티 내부의 stretched 펄스 진화 .....	11
그림 6. 이터븀 광섬유 레이저의 stretched 펄스 스펙트럼 .....	12
그림 7. self-similar 광섬유 레이저에서 발생하는 펄스 진화 .....	14
그림 8. 이터븀 첨가된 광섬유 레이저의 일반적인 self-similar 스펙트럼 .....	15
그림 9. 레이저 거울 반사율에 따른 출력 .....	17
그림 10. 반사율 가변 출력경 구성도 및 투과도 계산을 위한 Jones 행렬 .....	18
그림 11. 1/4 파장판의 굴절축과 수직 편광축이 이루는 각( $\theta$ )에 따른 투과율 ..	19
그림 12. 전형적인 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)의 구조 .....	21
그림 13. SESAM의 반사특성 곡선 .....	22
그림 14. SESAM을 이용한 모드 잠금 원리 .....	23
그림 15. 반사율 가변형 출력경을 갖는 광섬유 레이저 구성도 .....	25
그림 16. 출력경 반사율에 따른 레이저 출력 .....	27
그림 17. 최적 투과율에서 펄스폭 세기에 따른 레이저 출력 .....	28
그림 18. 출력 빔 형상 측정 장치 구성도 .....	30
그림 19. 펄스폭 0.4 W에서 1/4 파장판 회전각에 따른 $M^2$ .....	31
그림 20. 펄스폭 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 $M^2$ .....	32
그림 21. 광섬유 레이저 구성도 .....	34
그림 22. 펄스폭 세기 약 200 mW일 때 1/4 파장판 회전각에 따른 단일 펄스와 펄스열 .....	36
그림 23. 펄스폭 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 모드 잠금 스펙트럼 .....	37
그림 24. 펄스폭 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 레이저 출력 특성 .....	38
그림 25. 펄스폭 230 mW일 때, 1/4 파장판 회전각에 따른 단일펄스와 펄스열 ...	40



그림 26. 펄프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 모드 잠금 스펙트럼 ..... 41  
그림 27. 펄프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 레이저 출력 특성 ..... 42

# ABSTRACT

## Characteristics of mode-locked output of an Yb-doped fiber laser coupled by a output coupler with a variable reflectance

**Han Bum Lim**

**Advisor : Prof. Hyun Su Kim, Ph.D.**

**Department of Photonic Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

We design an mode-locked Yb-doped fiber laser coupled by a output coupler with a variable reflectance and investigate its output characteristics. To have a output coupler with a variable reflectance, we utilize a output coupler composed of a polarizing beam splitter (PBS), a 1/4 wave plate(QWP) and a high reflectance (HR) mirror. The reflectance of the output coupler varies with the QWP rotation angle. Hence we measure the output power as a function of the QWP rotation angle. There are the QWP optimum angles to

get the maximum output power, which depend on a pumping power in a CW laser mode. From the experiment results, we find that the higher the pumping power, the smaller the QWP rotation angle. The designed laser has a beam quality ( $M^2$ ) of 1~1.1.

To get a mode-locked pulse from our designed laser, we replace a HR mirror of a component of a output coupler with a semiconductor saturable mirror (SESAM). And we investigate the mode-locked laser output characteristics for two kinds of SESAMs with fast and slow relaxation time(500 fs, 9ps). The experiment results show that the larger the QWP rotation angle, the lower the mode-locked output power in our designed laser. And the results show that only a mode-locking output with multi-pulses lasing can be obtained from the laser with a fast SESAM. On the other hand, the laser with a slow SESAM can operate in a CW mode-locking region without multi-pulses lasing. And its spectral band width (2 nm) is 10 time than one (0.2 nm) for a fast SESAM. Hence we conclude that the output of a laser with a slow SESAM can be more stable than one with a fast SESAM in our designed fiber laser.

## 제1장 서 론

레이저는 1960년에 Maiman이 최초로 루비 레이저를 발명한 이후 짧은 기간 동안 많은 발전을 이루었다<sup>[1]</sup>. 그 후 1963년에 최초의 광섬유 레이저가 Snitzer에 의해 증명되었다<sup>[2]</sup>. Snitzer가 처음으로 Nd 첨가된 광섬유 레이저를 구현한 이후 희토류 원소를 첨가된 많은 광섬유 레이저들이 개발되었다. 광섬유 레이저는 작고, 가벼우며, 효율이 높은 집 등 부피가 있는 고체 레이저에 비해 많은 장점을 가지고 있다<sup>[3]</sup>. 1960년대에 초고속 광 펄스들이 생성기술이 개발되었고<sup>[4]</sup>, 특히 짧은 광 펄스 발생할 수 있는 광섬유 레이저는 출력 과장과 펄스폭 그리고 펄스 반복율 등에 따라 광통신, 레이저 가공, 의료 분야, 초정밀 광주파수 측정 및 분광학등의 광계측 분야 등의 응용분야에서 많은 활용 연구가 이루어지고 있다. 레이저에서 극초단 펄스 발생 기술은 레이저 중 모드들의 위상을 일정한 상수로 고정시켜 모드 잠금(mode locking)되도록 하는 기술이다<sup>[5]</sup>. 모드 잠금 기술은 크게 수동형 모드 잠금과 능동형 모드 잠금으로 구분된다. 능동형 모드 잠금 빠른 스위칭 소자를 이용해 레이저 중 모드들의 위상을 강제로 맞추는 방법이다. 빠른 스위칭 소자로 보통 음향광학 변조기나 전기광학 변조기와 같이 외부 신호에 의해 공진기 내부 손실을 변조시킬 수 있는 소자를 활용한다. 이러한 능동형 모드 잠금 레이저는 보통 100 ps정도의 펄스폭을 생성할 수 있다<sup>[6]</sup>. 수동형 모드 잠금은 레이저 공진기 내부에 포화 흡수체, Kerr 효과와 같은 비선형 광학 소자 또는 현상을 이용한다. 이러한 수동형 모드 잠금은 능동형 보다 더 짧은 펄스를 만들 수 있고<sup>[7]</sup> 제작비용이 낮아 경제적이라는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서도 이러한 장점을 활용하기 위해 수동형으로 모드 잠금되는 광섬유 레이저 연구를 수행했다.

수동형으로 모드 잠금된 광섬유 레이저는 구조에 따라 고리형과 선형 구조로 분리할 수 있다<sup>[8,9]</sup>. 보통 고리형 광섬유 레이저는 모드 잠금 방법으로 광섬유에서 유도되는 Kerr 효과를 이용한다. 반면에 선형 광섬유 레이저는 반사형 포화 흡수체를 이용하여 모드 잠금을 수행한다. 일반적으로 고리형 보다는 선형 구조의 광섬유 레이저의 구조가 간단하고 쉽게 모드 잠금 펄스를 얻을 수 있는 장점

을 가지고 있다. 선형 구조의 광섬유 레이저의 광학 소자를 모두 광섬유 소자로 구성하게 되면 레이저의 매개변수의 조정이 어려워 레이저 출력을 최적화하기 어려워진다. 이런 문제를 해결하기 위해 선형구조의 광섬유 레이저 공진기 내에 고전적인광학 소자를 일부 사용하여 레이저 매개변수 조정이 가능하도록 한다.

본 연구에서는 광섬유 레이저 출력경의 반사율을 제어하기 위해 편광기와 1/4 파장판(QWP)을 이용하였고 이것을 모드 잠금된 Yb 첨가된 광섬유 레이저 적용하여 출력 특성을 조사하였다. 모드 잠금된 출력을 얻기 위해 반도체 포화 흡수체 거울(SESAM)을 사용하였다. SESAM에 의한 모드잠금의 특성은 SESAM의 이완시간과 상관관계가 있기 때문에 SESAM의 이완시간에 대한 레이저의 출력 특성도 조사하였다.

## 제2장 이 론

### 제1절 이터븀 광섬유 특성

광섬유 레이저는 극초단 펄스를 발생시킬 수 있기 때문에 짧은 반응시간이 요구되는 많은 응용분야에서 활용될 수 있다. 극초단 펄스를 만들기 위해서는 광섬유 첨가되는 활성이온의 스펙트럼의 선폭이 넓어야 하지만 광섬유 레이저 개발 초기에는 다양한 활성이온이 개발되지 못하여 큰 발전은 하지 못했다. 그 이후 넓은 스펙트럼폭을 가지는 희토류 원소가 첨가된 광섬유가 제작<sup>[10,11]</sup>되었고, 발진 파장이 대략 380 nm에서 3.9  $\mu\text{m}$ 범위에서 발진할 수 있는 광섬유 레이저들이 개발되었다<sup>[12]</sup>.

1988년, Hanna 등은 840 nm에서 동작하는 색소 레이저를 이용하여 이터븀 첨가된 파이버 레이저를 발진시켰다<sup>[13]</sup>. 광섬유 레이저 개발 초기에는 네오디뮴과 어븀이 첨가된 광섬유를 더 선호되었고 이터븀이 첨가된 광섬유는 쓰이지 않았다. 네오디뮴이 첨가된 광섬유는 800 nm에서 펄핑되어 1060 nm에서 고효율 방출을 하고, 어븀이 첨가된 광섬유는 510 nm에서 1480 nm까지의 파장범위에서 빛을 흡수하고 1520 nm에서 1600 nm까지의 넓은 범위 방출 파장을 가졌다. 어븀이 첨가된 광섬유는 여기 준위에서의 흡수가 일어나 이득 감소가 일어나고, 네오디뮴이 첨가된 광섬유 경우는 좁은 방출 선폭을 가지고 있어 극초단 펄스를 만드는 데 제한이 있다. 따라서 다른 희토류 원소가 첨가된 광섬유로 관심이 돌려지게 되었고, 새로운 레이저 매질로 이터븀이 첨가된 광섬유에 대한 연구가 이루어졌다. 이터븀이 첨가된 광섬유에 대한 자세한 연구는 1997년에 Paschotta 등에 의해 이뤄졌다<sup>[14]</sup>.

그림 1은 이터븀 이온의 에너지 구조를 나타낸 것이다. 이터븀은 기저 준위인  $^2F_{7/2}$  와 여기준위인  $^2F_{5/2}$ 로 구성되어 있다. 이 두 에너지 준위 준들은 Stark효과에 의해 여러 개의 에너지준위들로 구성되어진다. 그리고 펄프 천이와 레이저 천이는 윗 준위와 아래 준위 사이에 화살표로 나타나 있다. 이터븀 이온은 그림 1과 같이 기저 상태와 여기 상태 사이의 각각의 작은 에너지 차이는 작은 양자

결함을 야기한다. 이에 따라 고효율의 레이저 출력이 가능하고, 열 효과, 소광(quenching)과 여기 상태 흡수와 같은 해로운 영향 등이 상당히 감소된다<sup>[15]</sup>.

이터븀이 첨가된 광섬유는 펌프와 입사광 파장에 따라 준 3준위 혹은 4준위 동작으로 분류할 수 있다. 1080 nm이하의 방출 파장에서는, 레이저 천이를 하는 하준위 에너지 상태가 준 3준위 시스템과 비슷하게 기저 준위와 매우 가깝게 위치해 위치해 있다. 반면에 1080 nm이상에서는, 기저 준위보다 상당히 높은 에너지 준위에서 레이저 천이가 일어나고 4준위 레이저로 동작하게 된다. 기저 준위와 레이저 천이 준위인 하준위 사이의 에너지 차이가 크기 때문에 밀도 반전이 쉽게 일어나고 레이저 발진 문턱이 낮게 된다<sup>[16]</sup>.

이터븀 이온의 흡수와 방출 단면적은 이터븀 이온의 호스트 매질에 크게 의존한다. 게르마늄 실리카 유리는 이터븀이 첨가된 광섬유 코어에 사용되어지는 가장 일반적인 호스트 매질이다. 흡수와 방출 단면적은 그림 2에 나타나있다. 975 nm에서 1150 nm의 넓은 방출 파장을 가지며, 915 nm와 980 nm에서 강한 흡수가 발생한다. 이터븀이 첨가된 파이버는 높은 출력 효율, 낮은 열 효과 그리고 넓은 이득 밴드폭과 같은 장점으로 인해 고효율 광섬유 레이저 및 극초단 광섬유 레이저에 많이 활용되고 있다.<sup>[16]</sup>.

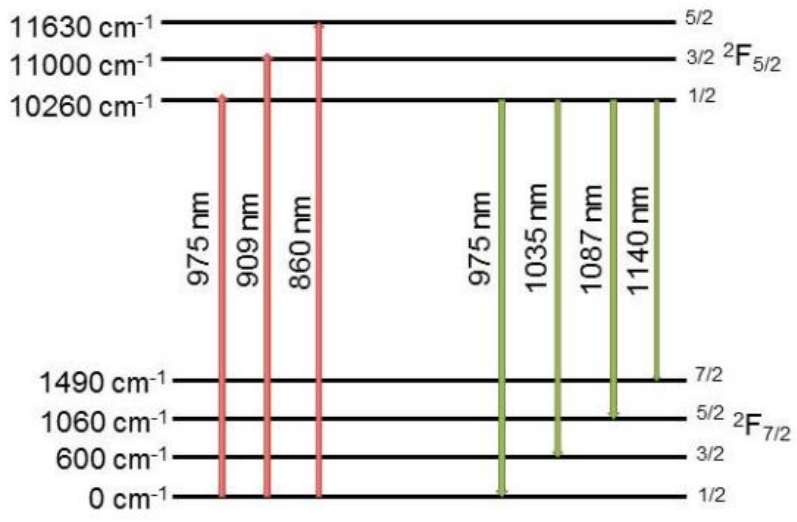


그림 1. 이터븀 이온의 에너지 준위 구조<sup>[15]</sup>



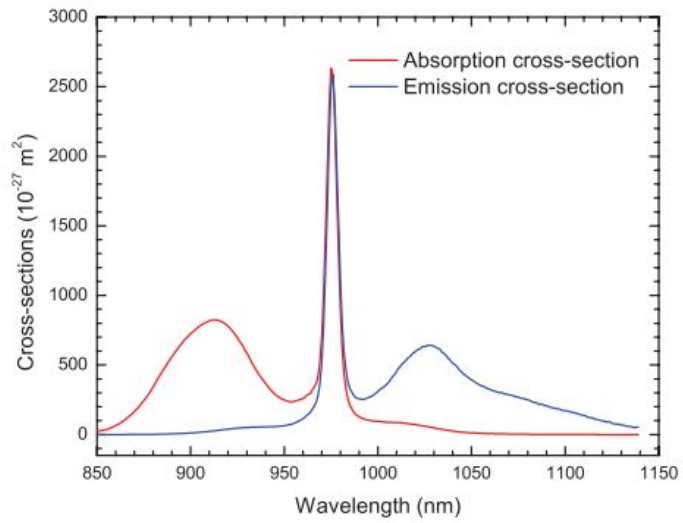


그림 2. 게르마늄 실리카 유리에서 이터븀의 흡수와 방출 스펙트럼<sup>[16]</sup>

## 제2절 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파

모드 잠금된 광섬유 레이저 유형은 레이저 공진기 내부에서 펄스가 전파되는 형태에 따라 몇 가지로 분류할 수 있다. 대표적으로 솔리톤 광섬유 레이저, stretched 광섬유 레이저, self-similar 광섬유 레이저 등이 있다.

### 2.1 솔리톤(soliton) 광섬유 레이저

솔리톤 광섬유 레이저는 그림 3과 같이 비정상 군속도분산과 양의 비선형성을 갖는 광섬유를 이용하여 솔리톤 펄스가 발생하게 한다. 그림 3은 공진기 내부에서 펄스 전파 형태를 나타낸 것으로 일정한 펄스폭을 갖는 솔리톤이 전파함을 보여준다. 실제로 광섬유 레이저는 이득과 다른 손실들로 인해 완벽한 솔리톤을 만들지는 못한다. 그림 3에서는 펄스 전파 특성을 보여주기 위해 이러한 효과들은 고려하지 않았다. 그러나 이러한 불완전한 미세 변화가 있을 경우 솔리톤은 분산과 형태로 전환이 일어난다. 솔리톤의 불안정성에 기인한 어븀 첨가된 광섬유 레이저에서 나타나는 솔리톤 스펙트럼의 한 예를 그림 4에 나타내었다<sup>[6]</sup>.

그림 4는 분산파들이 특정한 주파수에서 공진이 잘 일어나서 스펙트럼의 측대파(side band)를 이루고 있음을 보여 주고 있다. 솔리톤 에너지와 펄스 폭은 솔리톤 면적 이론에 따라 식(1)과 같이 서로 반비례한다.

$$P_0 T_0^2 = \frac{|\beta_2|}{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $P_0$ 는 첨두 파워를 나타내고,  $T_0$ 는 광 세기  $1/e$  지점의 폭을 나타낸다.

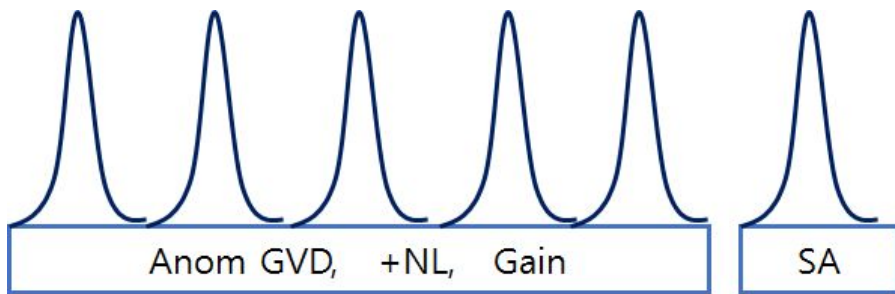


그림 3. 솔리톤 광섬유 레이저에서 펄스 진화

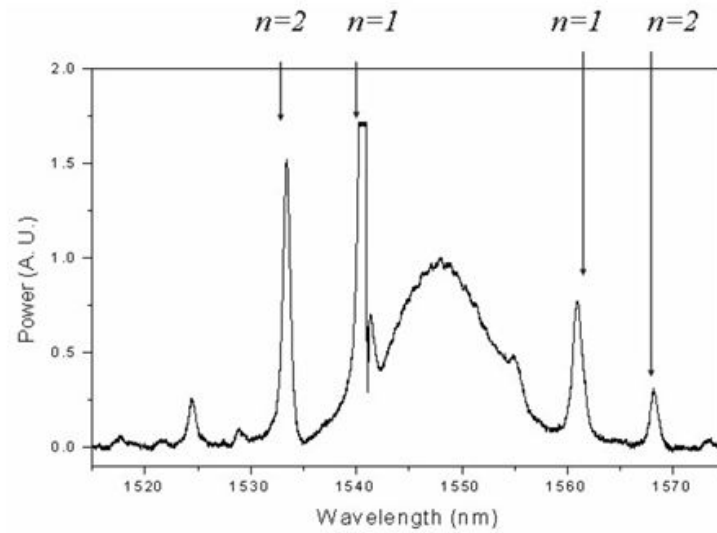


그림 4. 어븀 첨가된 광섬유 레이저의 솔리톤 스펙트럼<sup>[6]</sup>

## 2.2 stretched 펄스 광섬유 레이저

광섬유 레이저는 광섬유의 비선형성 때문에 긴 펄스를 생성하곤 한다. 비선형성을 조절하는 효과적인 방법으로는 비정상 군속도 분산과 정상 군속도 분산 부분이 번갈아 나오는 광섬유 레이저를 구성하는 것이다. 그렇게 되면 한번 왕복하는 동안 펄스가 늘어지고 압축되는 과정을 거친다. 그림 5는 stretched 펄스 전파 특성을 나타내고 있다. stretched 펄스는 한번 왕복할 때마다 두 번의 최소 펄스폭을 가지게 되며, 처프된(chirped) 부호는 왕복당 두 번 바뀌게 된다. 그림 6은 일반적인 stretched 펄스 스펙트럼이다. 처프된 펄스에서 낮은 강도의 측면 부분을 제외시키는 포화 흡수체(Saturable Absorber)에 의해 스펙트럼의 날개 부분이 가파른 모양을 가지게 된다. stretched 펄스 광섬유 레이저는 1 nJ 단위의 펄스를 만들어 낼 수 있고, 가장 높은 에너지는 3 nJ까지 생산할 수 있다<sup>[17]</sup>.

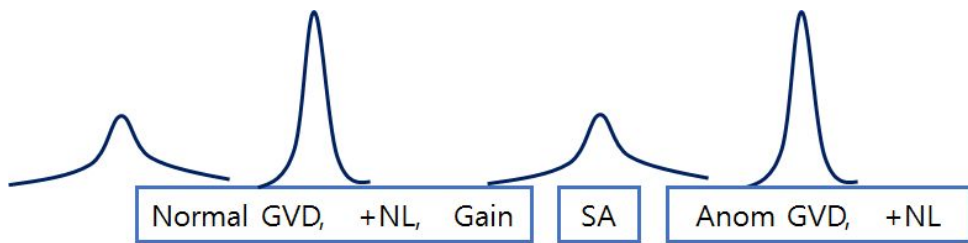


그림 5. 캐비티 내부의 stretched 펄스 진화

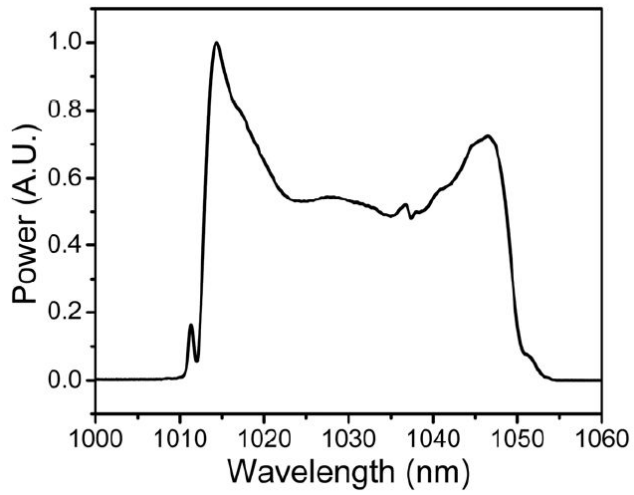


그림 6. 이터븀 광섬유 레이저의 stretched 펄스 스펙트럼<sup>[6]</sup>

## 2.3 self-similar 광섬유 레이저

최근 Ilday 등은 광섬유 레이저 내부에서 발생하는 self-similar 펄스의 전파를 증명해 보였다<sup>[18]</sup>. 그림 7에서 self-similar 펄스 전파 형태를 나타냈다. 비정상 분산 부분에서는 무시해도 될 정도의 비선형성을 갖는 광학 소자를 사용한다. 이런 특성은 비정상 군속도 분산을 만들어내는 회절 격자나 프리즘을 사용하여 이루어진다. 정상 군속도 분산 부분 내에서, 군속도 분산과 자기 위상 변조의 통합된 효과는 펄스의 선형적인 처프(chirp)가 축적되게 한다. 그림 8은 일반적인 self-similar 스펙트럼을 나타내고 있다. 꼭대기와 측면 부분이 거의 포물선 모양을 가진다. self-similar 이터븀 첨가된 광섬유 레이저의 수치적인 시뮬레이션 결과에 의하면 100 nJ의 펄스 에너지를 생성할 수 있다고 한다<sup>[18]</sup>.



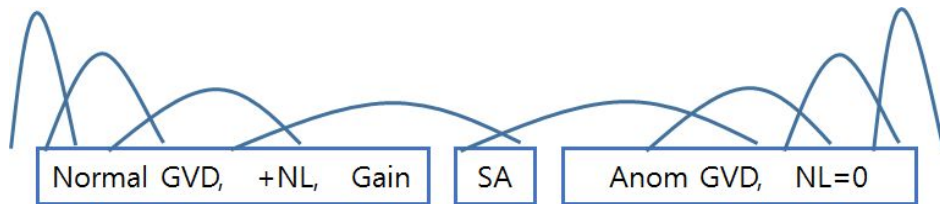


그림 7. self-similar 광섬유 레이저에서 발생하는 펄스 진화

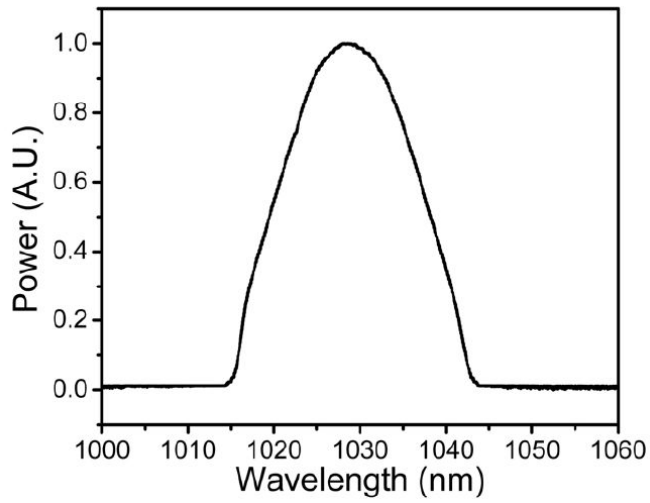


그림 8. 이터븀 첨가된 광섬유 레이저의 일반적인 self-similar 스펙트럼<sup>[6]</sup>

### 제3절 레이저 출력경의 반사율 효과

광섬유 레이저의 출력은 일반적으로 레이저 출력경의 반사율에 따라 출력 특성이 변한다. 광섬유 레이저의 출력을 최적화하기 위해서는 출력경의 반사율에 대한 출력 특성 조사를 수행해야 한다. 그러나 광섬유 레이저에 많이 사용되는 출력 결합기는 투과율이 고정되어 있기 때문에 투과율을 조절하기 위해서는 또 다른 결합기가 요구되어진다.

그림 9는 레이저 출력과 출력경 반사율과의 상관관계를 보여준다. 그림에서 보듯이 최대 출력에 대한 최적 거울의 반사율이 존재한다. 최적 반사율을 얻기 위해서는 거울 반사율을 다양하게 바꾸어 실험해야하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 10과 같이 출력경 반사율을 가변 할 수 있게 하기 위해 편광기, 1/4 파장판, 반사 거울을 이용한 출력 경을 구성하였다<sup>[19]</sup>. 1/4 파장판 회전을 통하여 출력경 반사율( $T$ )을 조절 하였고  $T = \sin^2(2\theta)$ 이다. 여기서 각( $\theta$ )는 1/4 파장판의 굴절축과 편광기의 수직 편광축이 이루는 각이다.

그림 11은 1/4 파장판과의 굴절축과 수직 편광축이 이루는 각에 따른 투과율 그래프이다.  $\theta$ 가 10도면 약 11 %정도의 투과율을 보이는 것을 알 수 있다.

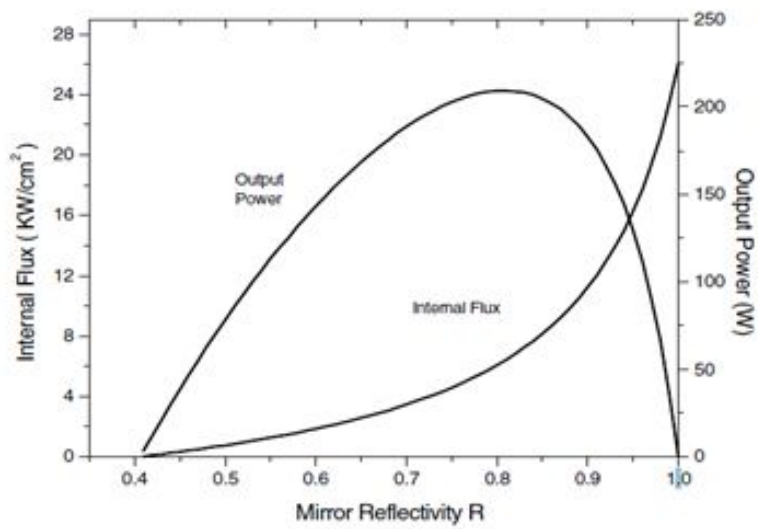
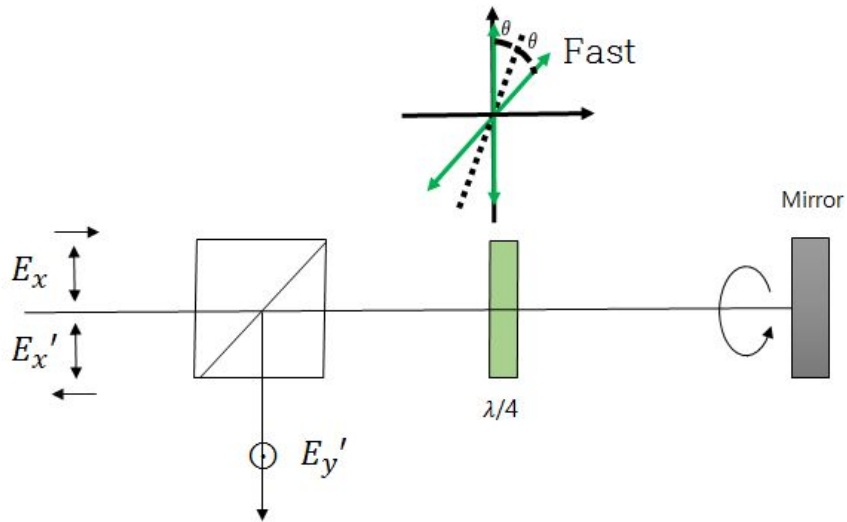


그림 9. 레이저 거울 반사율에 따른 출력



$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} E_x' \\ E_y' \end{pmatrix} &= R^{-1}(\theta)M\left(\frac{\lambda}{4}\right)R(\theta)R^{-1}(\theta)M\left(\frac{\lambda}{4}\right)R(\theta)\begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\text{where, } R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, M\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$$

$$T = \frac{|E_y'|^2}{|E_x'|^2} = \sin^2(2\theta) \quad (3)$$

그림 10. 반사율 가변 출력경 구성도 및 투과도 계산을 위한 Jones 행렬

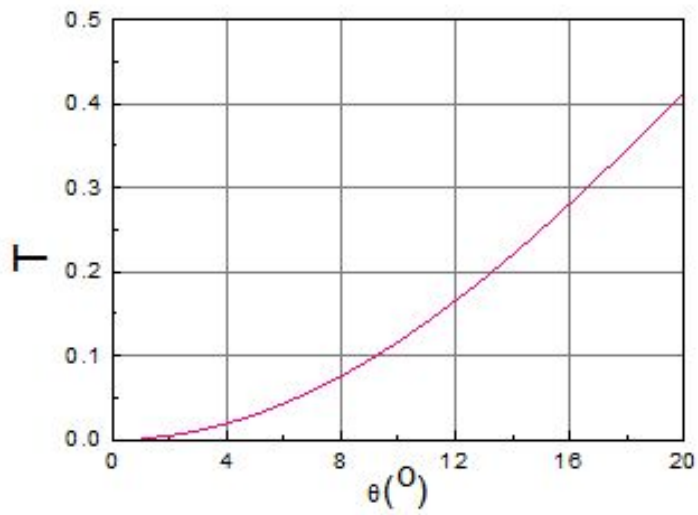


그림 11. 1/4 파장판의 굴절축과 수직 편광축이 이루는 각( $\theta$ )에 따른 투과율

## 제4절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)을 이용한 모드 잠금 원리

SESAM은 수동형 모드 잠금 소자로 많이 사용되며, 반도체 거울과 반도체 포화흡수체로 이루어져 있다. 그림 12은 SESAM의 전형적인 구조를 보여주고 있다. SESAM은 GaAs와 AlAs층을 여러 겹으로 증착하여 반사체 거울을 만들고, InGaAs를 단일 양자우물구조(Single Quantum Well) 또는 다중 양자우물구조(Multi Quantum Well)로 증착한 포화흡수체를 기본 구조로 한다<sup>[20]</sup>. SESAM은 그림 13과 같이 입사되는 광의 세기가 증가 하면 반사율이 증가하는 비선형적인 특성을 가진다. 즉, 펄스의 세기에 따라 반사율이 달라짐으로써 펄스를 형성하게 된다. 보통 SESAM을 모드 잠금용으로 활용하기 위해서는 SESAM의 이완시간이 수백 fs~수 ps의 범위에서 사용한다<sup>[21]</sup>. SESAM을 이용한 모드 잠금 발생 원리는 그림 14과 같다. 공진기에서 모드 잠금이 시작되기 이전에는 노이즈에서 시작하는 레이저 발진이 시작된다. 공진기에서 왕복되는 초기 레이저 빔은 작은 스파이크(spike)과 노이즈 성분으로 구성되어 있다. SESAM의 비선형 반사특성에 의해 강한 광세기 성분을 갖은 스파이크(spike) 성분들이 공진기 내부에 존속하게 됨으로써 공진기 왕복주기와 같은 주기의 펄스열이 발생하게 된다. 이론적으로는 중 모드들의 위상들이 고정되었을 때의 전기장 분포와 같게 되어 모드 잠금 펄스라고 부른다.

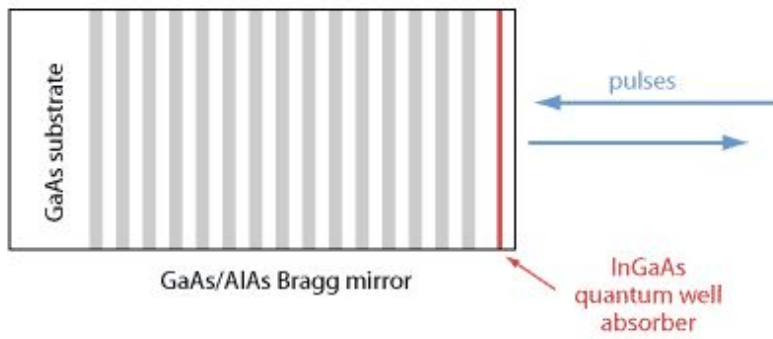


그림 12. 전형적인 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)의 구조



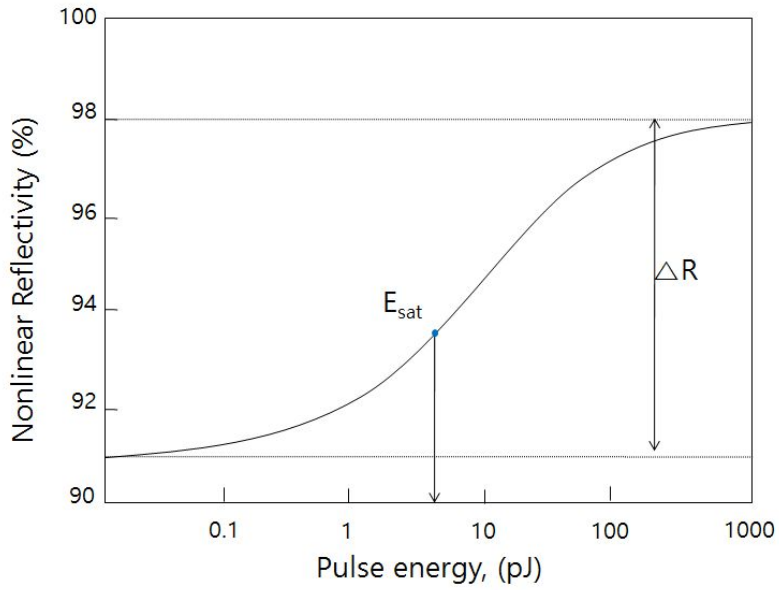


그림 13. SESAM의 반사특성 곡선

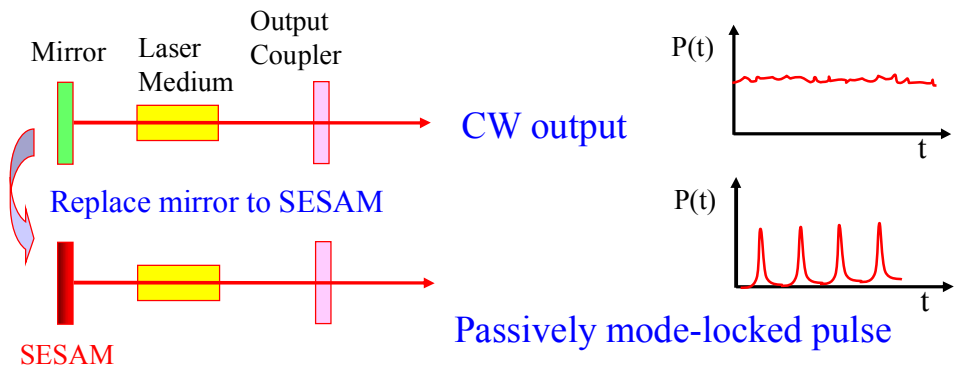


그림 14. SESAM을 이용한 모드 잠금 원리

## 제3장 반사율 가변형 출력경 갖는 선편광 Yb첨가된 광섬유 레이저

### 제1절 반사율 가변형 출력경 광섬유 레이저 공진기 구조

그림 15는 반사율 가변형 출력경을 갖는 선편광된 Yb 첨가된 광섬유 레이저 구성도이다. 이득 매질을 여기 시키기 위한 펌프 광원은 976 nm이고 최대 출력이 720 mW인 14핀 나비형 형태의 레이저 다이오드를 여기 광으로 사용하였다. 편광 유지형 파장분할 다중화 결합기(PM WDM)을 사용하여 여기 광을 입사시켰고, 5 W의 평균파워, 10 kW의 피크파워를 허용한다. 편광 유지형 파장분할 다중화 결합기(PM WDM)는 펌프 파장과 중심 발진 파장인 1030 nm를 필터에 의해 투과와 반사시켜, 서로 다른 파장의 경로를 조정할 수 있다. 이득 매질로는 Nufern사의 (PM-YSF-HI)이며, 975 nm에서 250 dB/m의 코어 흡수율을 가지고, 코어 지름은 6  $\mu\text{m}$ 와 코어 개구수는 0.12이다. 본 실험에서는 132 cm가 사용되었다. 수동형 광섬유도 마찬가지로 Nefurn사 제품으로 개구수는 0.12이고, 모드필드 지름은  $6.6 \pm 1.0 \mu\text{m}$ 를 가진다. 레이저 구성에 사용된 광섬유는 모두 편광 유지 광섬유이다. 거울에 집속시키기 위한 렌즈로는 초점거리가 8 mm와 4.5 mm인 두 종류 렌즈를 사용하였고, 광섬유 끝단은 초점거리가 7.5 mm인 렌즈가 설치되어 끝단에서 나온 광선이 평행광이 되도록 했다. 광섬유 끝 단면은 FC-APC으로 광섬유 끝이 8도 정도 기울어져 있기 때문에 경계면에서 반사된 펄스가 클래딩이나 외부로 나가도록 하여 반사에 의한 빔 왜곡을 줄이도록 했다.

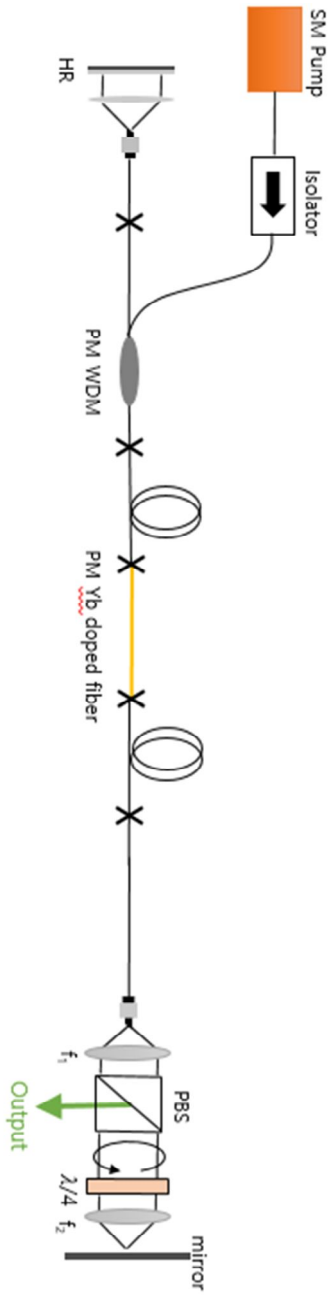
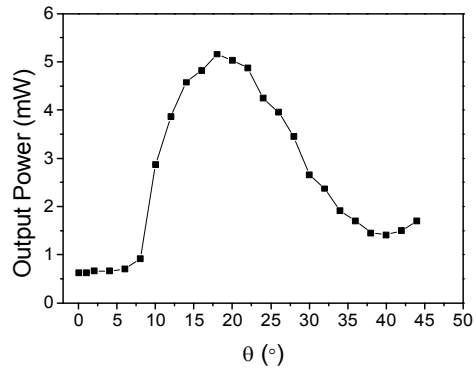


그림 15. 반사율 가변형 출력경을 갖는 광섬유 레이저 구성도

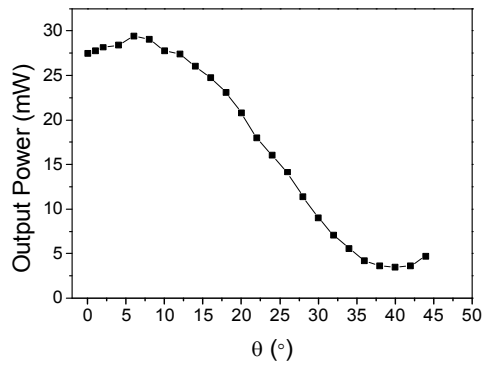
## 제2절 설계된 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 출력 특성

1/4 파장판 회전각에 따른 레이저의 출력은 그림 16과 같다. 펄스광을 변화시키고, 1/4 파장판의 회전각을 돌려가며 최적화된 출력을 확인하였다. 0.2 W일 때는 1/4 파장판의 회전각이 18도에서 최적의 출력을 얻을 수 있었다. 펄스광이 0.3 W일 때는 1/4 파장판의 회전각이 6도에서 최적의 출력이 나타났고, 펄스광이 0.4 W이고 1/4 파장판의 회전각이 1도일 때, 최적화된 출력이 확인 되었다. 펄스광의 세기에 따라 1/4 파장판 최적 투과율이 변함을 확인할 수 있었다.

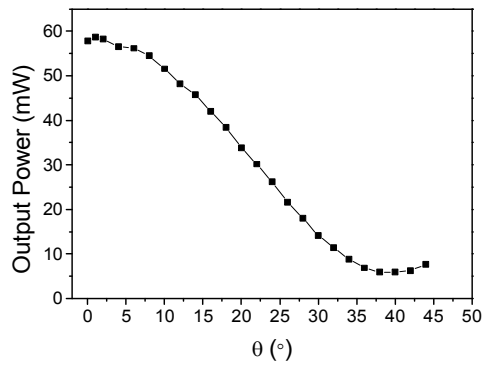
그림 17은 최적 투과율에서 펄스광 세기에 따른 레이저 출력이다. 1/4 파장판의 회전각이 1도일 때 펄스광을 변화 시켜가면 측정하였고, 펄스광 세기가 증가할수록, 광섬유 레이저 공진기의 출력이 증가함을 확인하였다. 1/4 파장판의 회전각이 1도일 때 가장 좋은 기울기 효율을 보였다. 최대 출력은 약 74 mW로 확인되었고, 측정된 기울기 효율은 약 30 %이다.



(a)



(b)



(c)

그림 16. 출력경 반사율에 따른 레이저 출력  
 (a) 펌프광 0.2 W, (b) 펌프광 0.3 W, (c) 펌프광 0.4 W

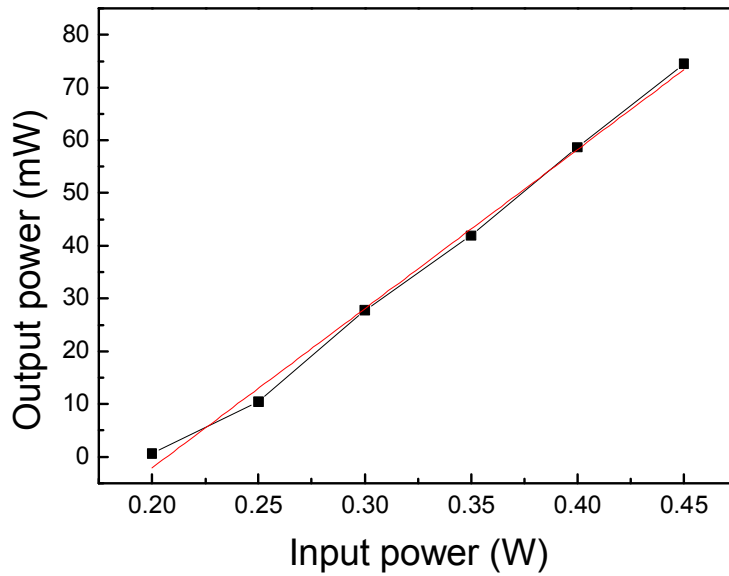


그림 17. 최적 투과율에서 펌프광 세기에 따른 레이저 출력

### 제3절 설계된 광섬유 레이저의 $M^2$ 측정

레이저 빔질의 척도를 나타내는  $M^2$ 값을 이용하여 빔질 특성을 확인할 수 있으며, 본 실험에서 빔질을 측정하기 위해 CCD 카메라를 이용하였다.  $M^2$ 값은 1에 가까울수록 우수한 빔질 특성을 보인다.  $M^2$ 값은 1에 가까울수록 우수한 특성을 보인다.  $M^2$ 값을 구하기 위해서 빔 직경을 측정해야 한다.

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{(z - z_0)M^2\lambda}{\pi \times \omega_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

CCD 카메라를 이용하여 빔 직경을 측정하고 측정된 데이터를 식(2)을 이용하여  $M^2$ 를 계산하였다.  $z_0$ 는 빔 허리의 위치이고  $z$ 는 측정 위치이며,  $\lambda$ 는 발진된 레이저 광의 파장이다. 그림 18은 발진되는 레이저 빔 직경을 측정하기 위한 장치 구성도이다. Spiricon사의 SP620U의 Beam profiler를 이용하여 출력되는 빔의 횡방향 분포특성과 빔의 지름을 측정하였다. 이와 같은 방법을 통해 1/4파장판의 회전각에 따라  $M^2$ 값을 측정하였다.

그림 19는 1/4 파장판의 회전각에 따른  $M^2$ 값이다. 펌프광이 0.4 W일 때 측정되었으며, 그림에 보이는 회전각이 1도일 때  $M^2$ 값이 1.01 값으로 거의 1에 가까운 결과를 얻었다. 그리고 다른 각도에 대해서도 1.12 이하로 좋은 값을 얻을 수 있었다. 레이저의 출력이 최대가 되는 1/4 파장판의 위치에서 가장 좋은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 20은 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른  $M^2$ 값이다. 펌프파워 0.25 W, 0.3 W, 0.35 W, 0.4 W, 0.45 W로 변화시켜 가며 측정하였고, 출력이 변함에 따라  $M^2$ 값 또한 변한다는 것을 확인하였다. 1도에서 다른 펌프파워 대해서도  $M^2$ 값이 1에 가까운 좋은 결과를 얻었다.



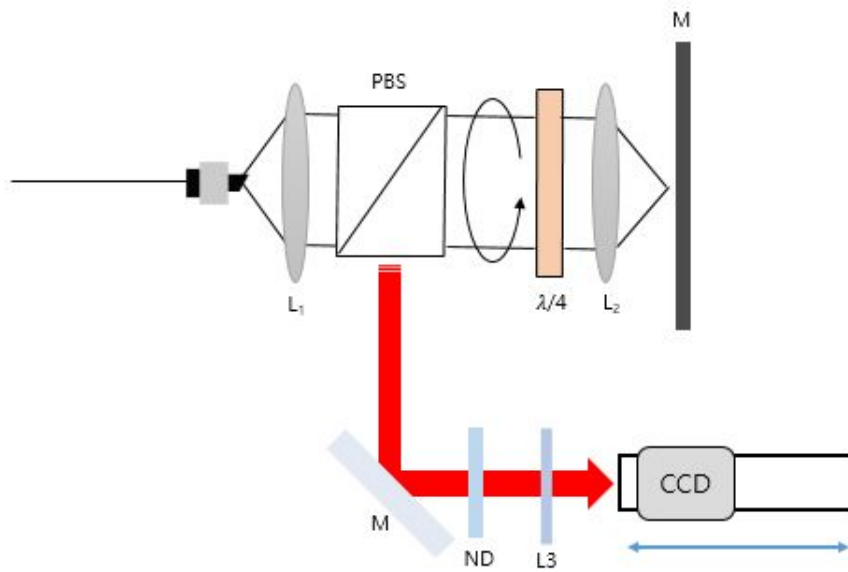
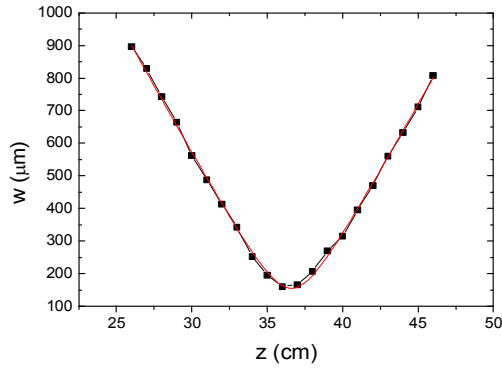
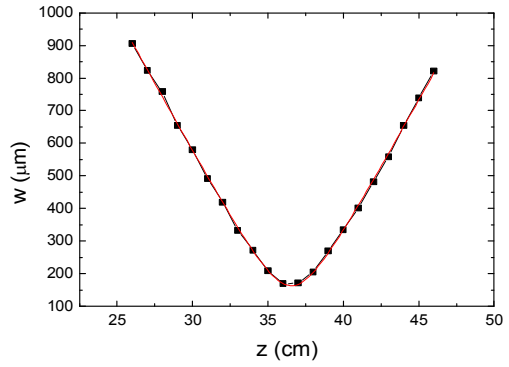


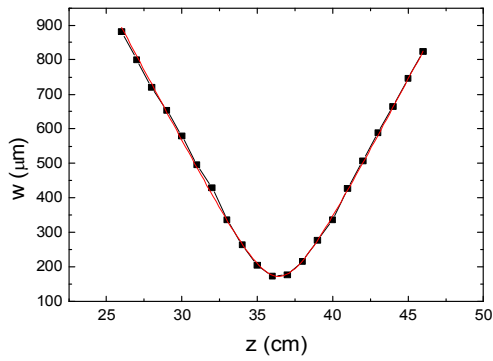
그림 18. 출력 빔 형상 측정 장치 구성도



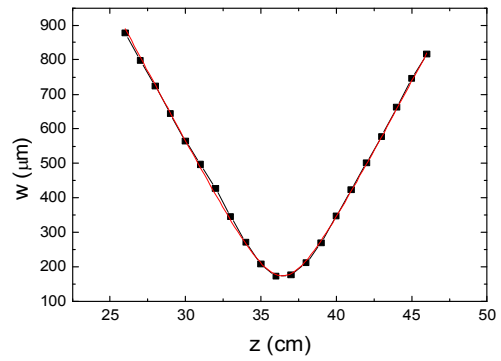
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 19. 펌프광 0.4 W에서 1/4 파장판 회전각에 따른  $M^2$   
 (a) 1/4 파장판 회전각 1도, (b) 1/4 파장판 회전각 20도,  
 (c) 1/4 파장판 회전각 30도, (d) 1/4 파장판 회전각 40도

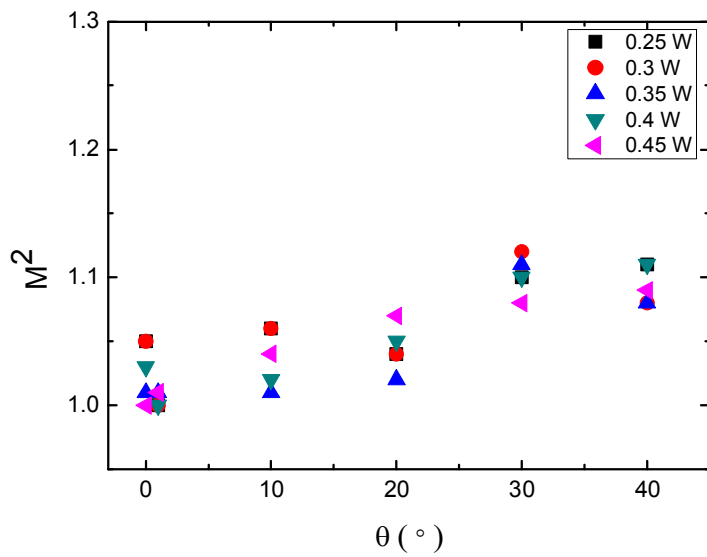


그림 20. 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른  $M^2$

## 제4장 반사율 가변형 출력경과 반도체 포화흡수체 거울 (SESAM)을 사용하여 모드 잠금된 Yb 첨가된 광섬유 레이저 출력 특성

본 연구에서는 반도체 포화흡수체 거울과 편광 유지 광섬유를 사용하여 모드 잠금을 수행하였다. 모드 잠금의 특성은 SESAM의 이완시간에 민감하기 때문에 SESAM의 이완시간이 빠른 것과 늦은 것에 대한 모드 잠금된 레이저 출력 특성 분석을 수행하였다.

### 제1절 빠른 이완시간의 SESAM을 이용한 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금

앞에서 반사율 가변형 출력경 갖는 광섬유 레이저를 통해 출력 특성을 알아보았고, 반도체 포화 흡수체 거울을(SESAM) 삽입하여 모드 잠금을 발생시켜 레이저의 출력 특성을 조사하였다. 사용된 SESAM는 흡수율 52 %와 이완 시간이 500 fs이고, 30 % 변조깊이를 갖는다.

그림 21은 그림 17의 구조에서 거울 대신 SESAM을 삽입하여 레이저가 모드 잠금이 되도록 구성한 광섬유 레이저 구성도이다. 여기서 집속용 렌즈( $f_2$ )의 초점거리는 4.5 mm를 사용하였고 공진기의 광학 길이는 9.4 m로 이었다. 출력경의 반사율에 따른 모드 잠금된 출력 변화를 조사하기 위해 1/4 파장판을 회전시켜 보았다.

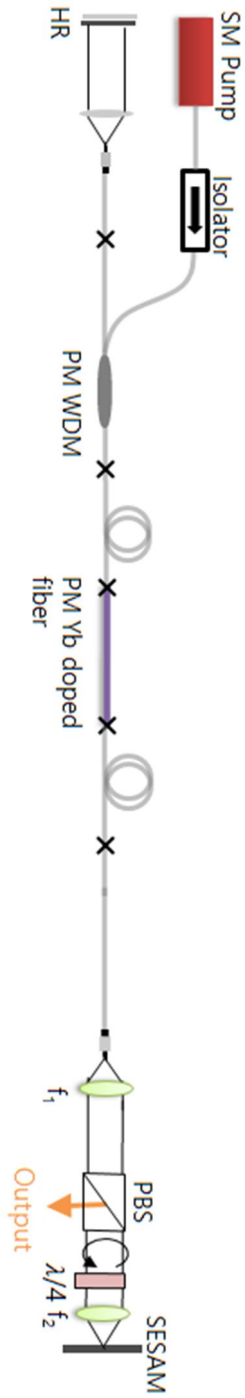
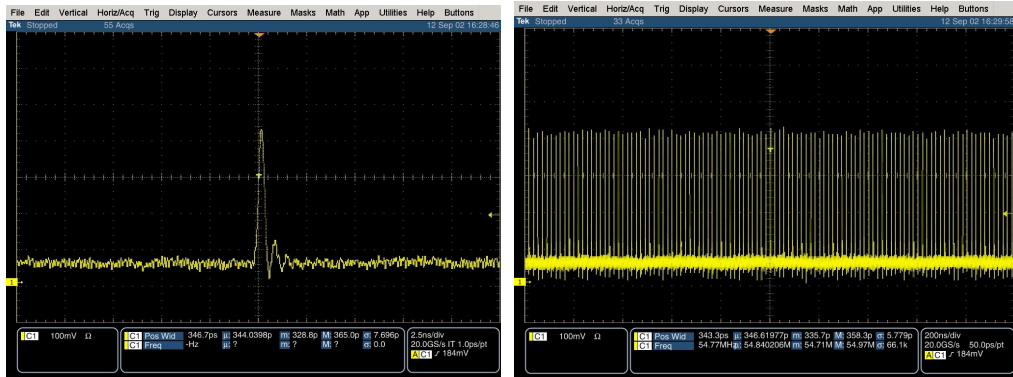


그림 21. 광섬유 레이저 구성도

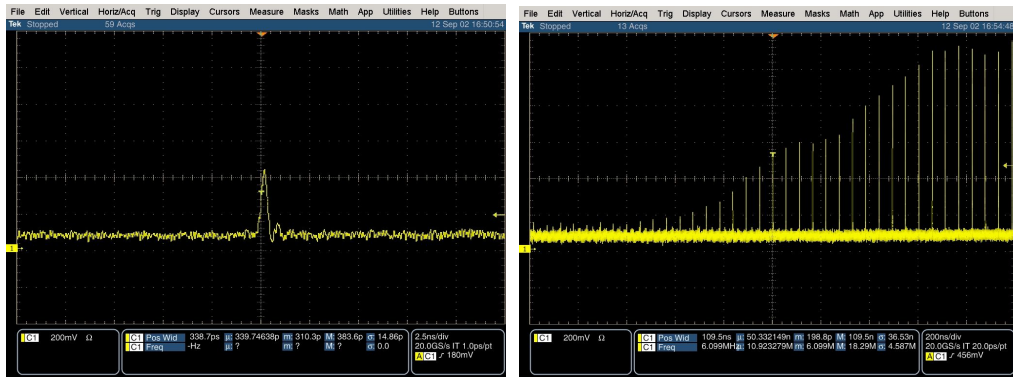
그림 22 (a)는 1/4 파장판 회전각이 0도일 때 펄스를 측정된 것이다. 원리적으로 회전각 0도에서는 출력되는 레이저 광세기는 영이 되어야 하지만 1/4 파장판과 편광기의 광학 특성이 완벽하지 못해 레이저 빔의 반사가 있는 것으로 보인다. 펌프광세기( $P_{Pump}$ ) 약 200 mW일 때, 모드 잠금이 발생 되었으며, 모드 잠금된 펄스폭은 약 347 ps이다. 측정된 펄스폭은 검출기의 한계에 해당되는 값으로 실제 모드 잠금된 펄스 폭은 더 짧은 것으로 기대되어진다. 그러나 그림 22 (a)의 모드 잠금 펄스는 멀티 펄스 상태로 발진하였다. 펌프광을 증가시킬수록 더욱 펄스열 주기와 파위가 불안정한 모습을 보였으며, 펌프광이 약 250 mW 이상에서는 더 이상 모드 잠금이 발생하지 않았다. 그림 22 (b)는 1/4 파장판 회전각이 1도일 때 측정된 것이다. 1/4 파장판 회전각이 0도 일때와 마찬가지로 큰 변화를 보이지 않았고 마찬가지로 멀티 펄스가 관측되었고 좀 더 불안정한 상태를 보였다. 1/4 파장판을 4도 이상 증가시키면 모드 잠금이 더 이상 발생하지 않았다.

펌프광 세기와 1/4 파장판의 회전각에 따른 모드 잠금 스펙트럼은 그림 23과 같다. 스펙트럼 모양은 2장에서 언급했던 전형적인 모드 잠금 형태로 나타나지 않고 여러 개의 밴드 스펙트럼이 나타났다. 각 밴드의 스펙트럼 폭은 약 0.2 nm로 확인되었으며, 1/4 파장판의 회전각이 0도와 1도일 때의 차이는 거의 없었다.

펌프광 세기를 증가시켜가며 1/4 파장판 회전각에 변화를 준 레이저 출력은 그림 24와 같다. 모드 잠금된 Yb 첨가된 광섬유 레이저는 펌프광 세기가 증가함에 따라 출력 또한 증가하였다. 1/4 파장판의 회전각이 0도와 1도일 때 차이는 거의 없었으며, 최대 출력은 약 5 mW였다. 펌프광이 약 200 mW에서 모드 잠금이 발생하였지만 멀티 펄스가 관측되었고, 그 이상의 4도 이상의 회전각에서는 모드 잠금이 발생하지 않았다.

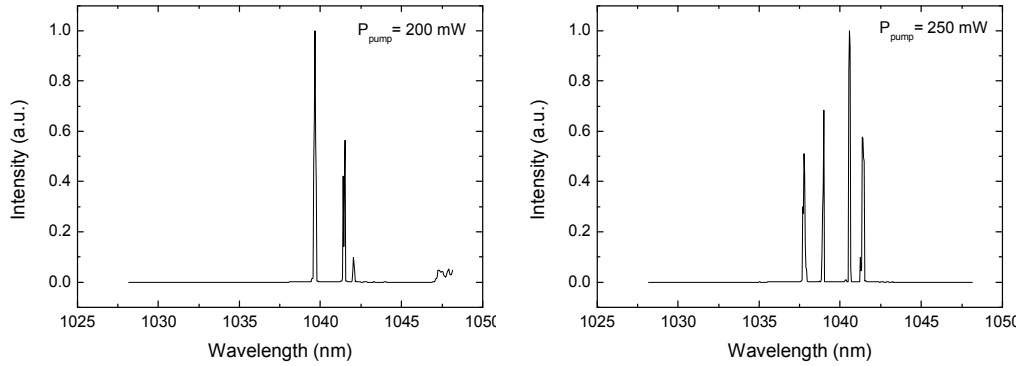


(a)

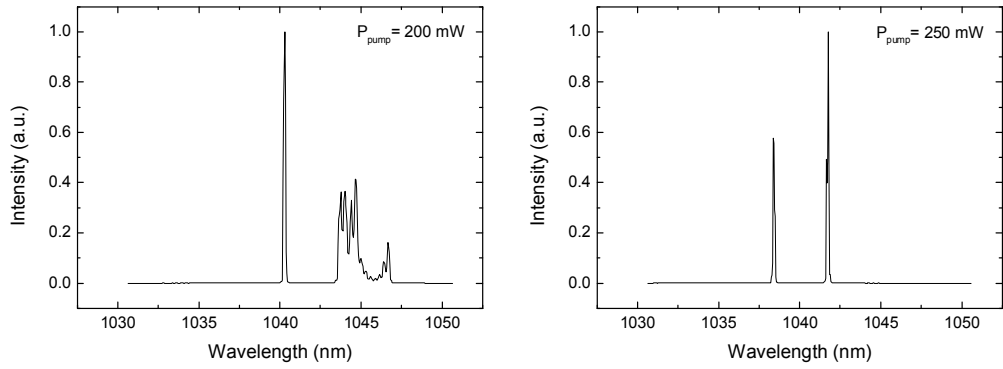


(b)

그림 22. 펌프광 세기 약 200 mW일 때 1/4 파장판 회전각에 따른 단일 펄스와 펄스열 (a) 1/4 파장판 회전각 0도, (b) 1/4 파장판 회전각 1도



(a)



(b)

그림 23. 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 모드 잠금 스펙트럼

(a) 1/4 파장판 회전각 0도, (b) 1/4 파장판 회전각 1도



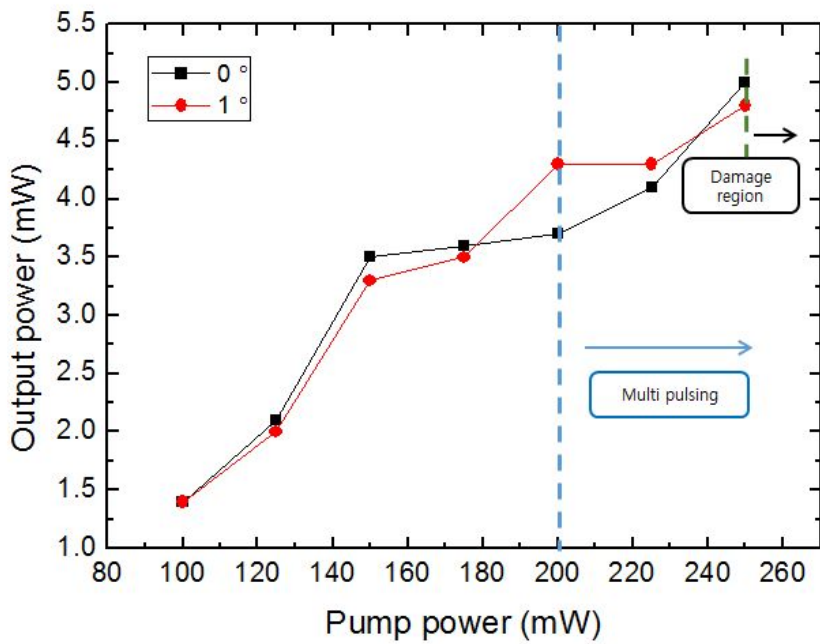


그림 24. 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 레이저 출력 특성

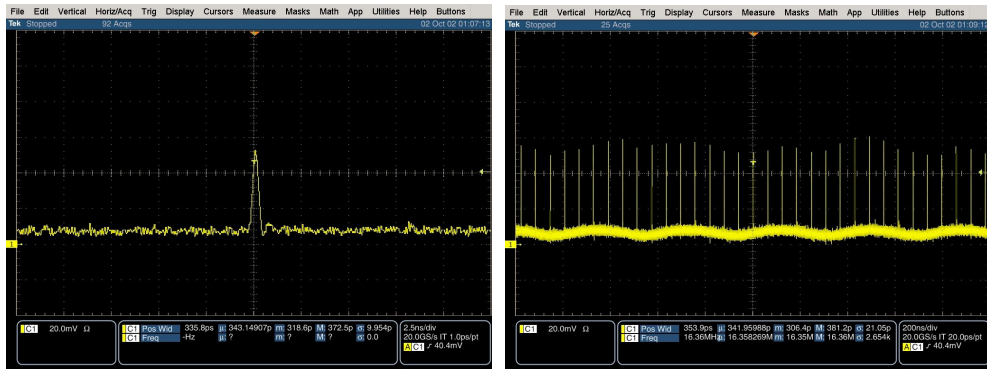
## 제2절 늦은 이완시간 갖는 SESAM을 이용한 선형구조 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금

늦은 이완시간 갖는 SESAM을 이용한 선형구조 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금 실험은 그림 23에 있는 레이저 구성도의 SESAM을 이완시간이 9 ps 인 SESAM으로 대체하여 수행하였다.

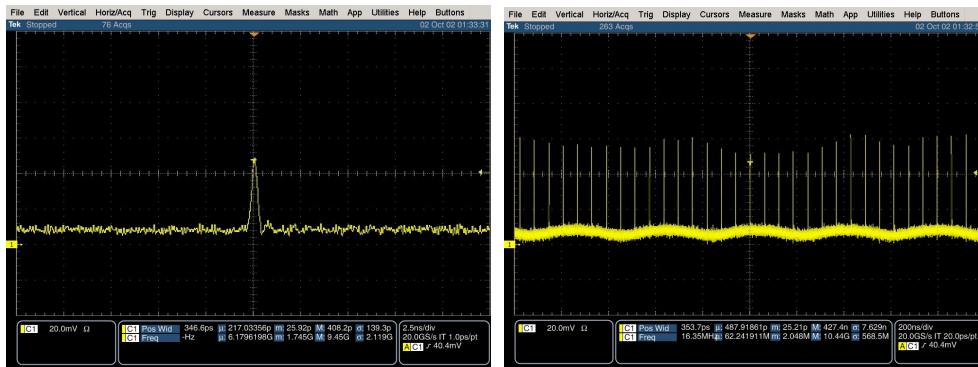
그림 25는 1/4 파장판 회전각이 0도와 1도일 때 펄스를 측정된 것이다. 1/4 파장판의 회전각이 0도와 1도 모두 펌프 광이 약 230 mW일 때, 모드 잠금이 발생되었으며, 모드 잠금된 펄스폭은 약 350 ps이었다. 앞의 500 fs의 이완시간을 갖는 SESAM의 경우와는 다르게 멀티펄스는 관측되지 않았다. 이때의 펄스의 반폭률은 16 MHz이었다. 측정된 스펙트럼은 그림 26과 같다. 빠른 이완시간을 갖는 SESAM의 경우에 비해 스펙트럼이 크게 증가했음을 알 수 있다. 측정된 스펙트럼 폭은 약 2 nm 정도이었다.

그림 26에서 1/4 파장판의 회전각이 0도와 1도일 때 모드 잠금 스펙트럼을 비교하였다. 펌프광을 증가시켰을 때, 1/4 파장판의 회전각이 0도에서는 중심파장이 이동하였고, 1도에서는 거의 차이가 없었다. 1/4 파장판의 회전각이 1도일 때, 1040 nm 부근의 스펙트럼이 작아지는 것을 확인하였다.

늦은 이완시간을 갖는 SESAM을 사용한 레이저의 출력은 그림 27와 같다. 모드 잠금 출력은 펌프광 세기가 증가함에 따라 증가하는 것을 확인하였고, 펌프광 약 230 mW에서 모드 잠금이 발생되었다. 레이저의 출력은 5.4 mW까지 확인되었고, 1/4 파장판의 회전각이 0도와 1도일 때 차이는 거의 없었으며, 1/4 파장판의 회전각이 약 4도를 넘어가게 되면 모드 잠금이 발생하지 않았다.

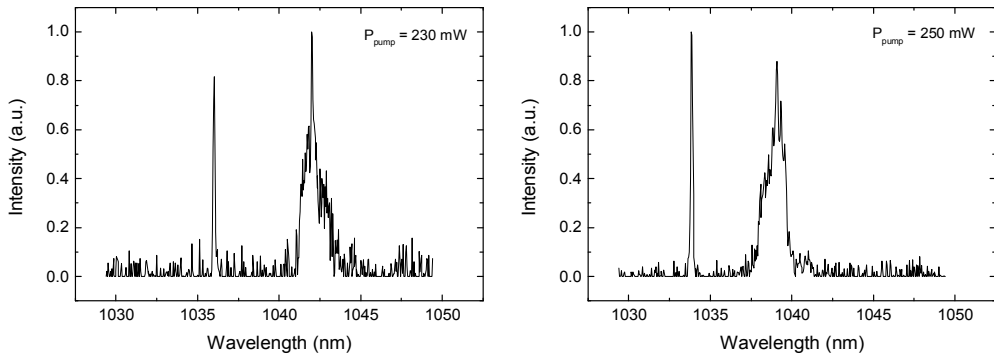


(a)

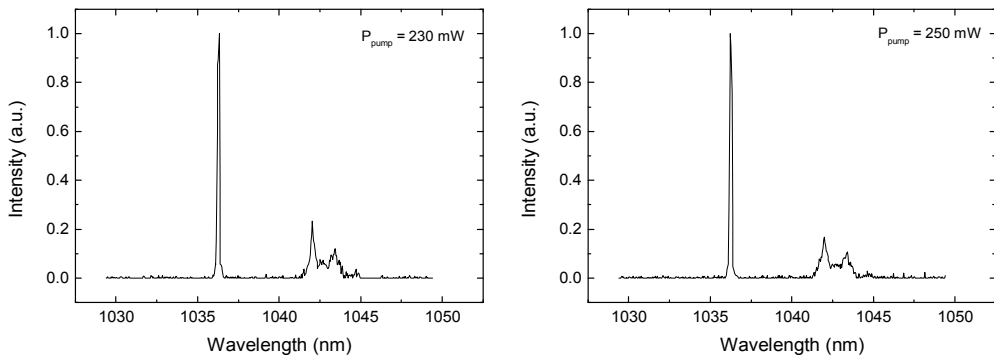


(b)

그림 25. 펌프광 230 mW일 때, 1/4 파장판 회전각에 따른 단일 펄스와 펄스열 (a) 1/4 파장판 회전각 0도, (b) 1/4 파장판 회전각 1도



(a)



(b)

그림 26. 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 모드 잠금 스펙트럼

(a) 1/4 파장판 회전각 0도, (b) 1/4 파장판 회전각 1도

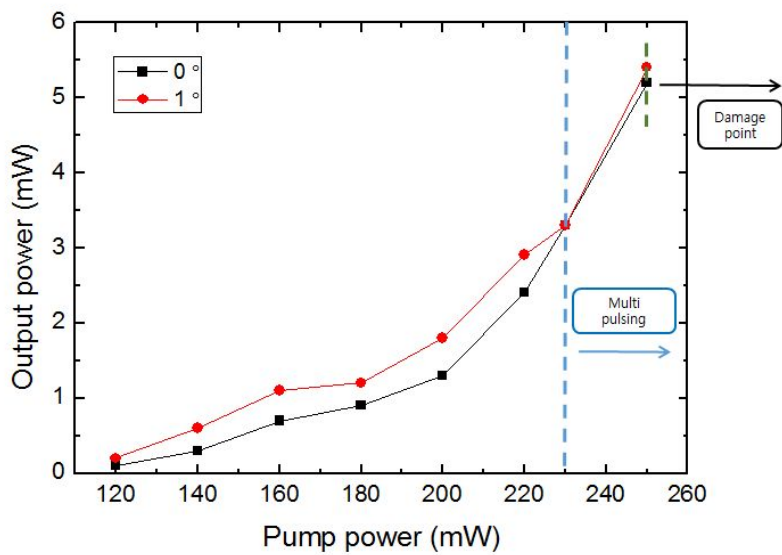


그림 27. 펌프광 세기와 1/4 파장판 회전각에 따른 레이저 출력 특성

## 제5장 결 론

본 논문에서는 레이저 출력경 반사율을 가변 할 수 있는 모드 잠금된 Yb 첨가 된 레이저 공진기를 설계 하고 출력 특성을 조사하였다.

먼저 선편광되고 출력경 반사율을 가변 할 수 있는 1/4 파장판과 편광기를 이용한 공진기를 구성하고, 1/4 파장판 회전을 통하여 출력경 반사율을 조절 하였다. 설계된 레이저는 펌프광이 0.4 W이고, 1/4 파장판의 회전각이 1도일 때, 최적화된 출력이 확인 되었고, 펌프광이 0.3 W일때는 1/4 파장판의 회전각이 6도, 펌프광이 0.2 W일때는 1/4 파장판의 회전각이 18도에서 최적의 출력을 얻을 수 있었다. 펌프파워의 세기에 따라 1/4 파장판 최적 투과율이 변함을 확인하였고, 레이저의 기울기 최적 기울기 효율은 약 30 %로 측정되었다. 최대출력은 약 74 mW였고, 레이저의 빔질 ( $M^2$ )은 약 1 ~ 1.12로 확인되었다.

Yb 첨가된 광섬유 레이저를 모드 잠금 시키기 위해 반도체 포화흡수체 거울 (SESAM)을 이용하였고 출력 특성을 조사하였다. 흡수율 52 %와 이완 시간이 500 fs이고, 30 % 변조깊이를 갖는 반도체 포화 흡수체 거울(SESAM)과, 흡수율 40 %와 9 ps의 이완시간, 30 % 변조깊이를 가지는 반도체 포화 흡수체 거울 두 가지를 사용하여 모드 잠금을 발진시키고, 비교 분석해보았다. 이완시간 500 fs, 변조깊이 30% 를 갖는 반도체 포화 흡수체 거울(SESAM)을 이용한 실험에서는 모드 잠금이 발생함과 동시에 멀티 펄스가 확인되었고 1/4 파장판 회전각이 증가함에 따라 스펙트럼에 추가적인 피크가 나타났으며 출력 또한 낮아졌다. 펄스 폭은 약 350 ps이었다. 안정적인 모드 잠금이 발생하였지만 펌프광을 증가시켰을 때는 멀티 펄스가 나타났다. 반면에, 9 ps의 이완시간을 갖고, 변조깊이 30 %를 갖는 반도체 포화 흡수체 거울(SESAM)을 이용한 실험에서는 500 fs 이완시간의 SESAM을 사용할 때와는 다르게 멀티 펄스가 나타나지 않았다. 500 fs 이완시간의 SESAM을 사용할 때와 마찬가지로 1/4 파장판의 회전각이 증가함에 따라 스펙트럼에서 추가적인 피크가 나타났다. 스펙트럼 선폭은 약 2 nm로 넓어진 것을 확인할 수 있었고, 스펙트럼 모양 또한 좀 더 균일해졌다. 레이저의 최대 출력은 약 7 mW였으며, 펄스폭은 약 348 ps로 측정되었고 약 16 Mhz의 반복률을

가졌다. 두 SESAM을 사용한 실험 결과부터 본 연구에 사용되어진 반사율 가변형 출력경 구조를 갖은 광섬유 레이저는 낮은 이완시간을 갖은 SESAM에서 보다 더 안정적인 모드 잠금이 이루어짐을 알 수 있었다.

## [참고문헌]

- [1] T. H. Mainman, "Optical and microwave optical experiments in Ruby," Phys. Rev. Lett. Vol. 4, 564, (1960)
- [2] E. Snitzer, "Proposed Fiber Cavities for optical masers," J. Appl. Phys. Vol. 32, 36 (1961)
- [3] 전민용, "광섬유 레이저의 발전," 물리학과 첨단기술, Vol. 18, 7 (2009)
- [4] J. D. Maria, D.A. Stetser, and H. Heynau, "Self mode-locking of lasers with saturable absorbers," Appl. Phys. Lett. Vol. 8, 174 (1966)
- [5] J. Limpert, F. Röser, T. Schreiber, and A. Tünnermann, "High-Power Ultrafast Fiber Laser Systems," IEEE J. Sel. Top. Quant, Vol. 12, 233 (2006)
- [6] Joel Buchley, "High-energy ultrafast ytterbium fiber lasers," Ph.D. Thesis, Cornell University (2006)
- [7] U. Morgner, F. X. Krtner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, "Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Tisapphire laser," Opt. Lett, Vol. 24, 411 (1999)
- [8] Huihui Li, Jiang Liu, Zhaochen Cheng, Jia Xu, Fangzhou Tan, and Pu Wang, "Pulse-shaping mechanisms in passively mode-locked thulium-doped fiber lasers," Opt. Express. Vol. 23, 6292 (2015)
- [9] Philippe Grelu, Franck Belhache, François Gутty, and Jose M. Soto-Crespo, "Relative phase locking of pulses in a passively mode-locked fiber laser," J. Opt. SOC. AM. B. Vol. 20, 863 (2003)
- [10] S.B. Poole, D.N. Payne, M.E. Fermann, "Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions," Electron. Lett. Vol. 21, 737 (1985)
- [11] S.B. Poole, J.E. Townsend, D.N. Payne, M.E. Fermann, G.J. Cowle, R.I. Laming, P.R. Morkel, "Characterization of special fibers and fiber devices", J. Lightwave Tech. Vol. 7, 1242 (1989)



- [12] J. Schneider, "Fluoride fibre laser operating at 3.9  $\mu\text{m}$ ", Electron. Lett. Vol. 31, 1250 (1995)
- [13] D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry, R. G. Smart, P. J. Suni, J. E. Townsend, and A. C. Tropper, "Continuous-wave oscillation of a monomode Ytterbium-doped fiber laser," Electron Lett, vol. 24, 1111 (1988)
- [14] R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, and D. C. Hanna, "Ytterbium-doped fiber amplifiers," IEEE J. Quantum Elect, vol. 33, 1049 (1997)
- [15] <http://www.rp-photonics.com/>
- [16] Vasuki Durairaj, "Amplification in Ytterbium-doped fibers," Master's Thesis, Aalto University (2013)
- [17] L.E. Nelson, S.B. Fleischer, G. Lenz, and E.P. Ippen, "Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser," Opt. Lett. Vol. 21, 1759 (1996)
- [18] F.O. Ilday, J.R. Buckley, W.G. Clark, F.W. Wise, "Self-Similar Evolution of Parabolic Pulses in a Laser," Phys. Rev. Lett. Vol. 92, 3902 (2004)
- [19] Norman Hodgson, Horst Weber, "Optical Resonators: Fundamentals, Advanced Concepts, Applications," Springer, 347 (2005)
- [20] E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, and R. paschotta "60 W average power in 810 fs pulses from a thin-disc Yb:YAG laser," Opt. Lett. Vol 28, 367 (2003)
- [21] <http://www.batop.de/>

저작물 이용 허락서					
학 과	광기술공학과	학 번	20147098	과 정	석 사
성 명	한글: 임 한 범 한문 : 林 한 범 영문 : Han Bum Lim				
주 소	광주광역시 광산구 장덕동 숲안애2차@ 202동 302호				
연락처	E-MAIL : lhb4100@naver.com				
논문제목	한글 : 반사율 가변형 출력경을 갖는 Yb 첨가된 광섬유 레이저의 모드 잠금 출력 특성 연구 영어 : Characteristics of mode-locked output of an Yb-doped fiber laser coupled by a output coupler with a variable reflectance				
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
- 다 음 -					
1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.					
동의여부 : 동의( <input checked="" type="checkbox"/> ) 반대( <input type="checkbox"/> )					
2016년 5월					
저작자: 임 한 범 (서명 또는 인)					
<b>조선대학교 총장 귀하</b>					

## [감사의 글]

대학원 진학을 결정하고 실험실에서 연구를 하고, 대학원 생활을 하면서 값진 경험을 하고 많은 것을 느끼고 배웠습니다. 실험실 생활을 하면서 실수도 많이 하고, 많이 부족하지만 잘 이끌어주시고 지도해주신 김현수 교수님께 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 그리고 학부생 시절부터 대학원까지 수업을 통해 많은 가르침을 주신 김진태 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 실험실 2년의 생활을 같이 보내며 많이 챙겨주고 재밌게 해줬던 현철이형, 그리고 형으로써 조언을 아끼지 않았던 승연이형, 부족한 점을 많이 도와주고 잘 따라주었던 동원이, 영훈이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그 밖에도 동기로써 서로 조언도 해주고 격려도 해주었던 용범이형, 경민이형, 두형이형, 병권이, 재영이에게도 큰 힘이 되어줘서 고맙다고 전하고 싶습니다. 그리고 실험실에 자주 찾아와 즐겁게 해준 운혁이, 기동이, 항상 해맑고 고민도 많이 들어주던 승진이와 준혁이, 학교에 올 때마다 자주 찾아와서 반갑게 반겨주던 유현이, 민우, 현선이, 항상 실험에 바쁘지만 즐겁게 생활하던 회원이, 영호, 효미, 최근에 실험실에 들어와 활기를 불어넣어준 옥락이, 희택이, 경서, 민지, 세영이, 대회, 승은이 등, 동기 선후배들이 있어 대학원 생활이 즐거웠습니다.

마지막으로 자주 찾아뵙지도 못하지만 언제나 저를 믿어주시고 힘이 되어주신 부모님께 죄송하면서도 너무나도 감사드립니다. 그리고 불편하지 않게 신경써주고 저를 뒷바라지하느라 고생한 누나와 매형에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.