



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](#)

2019년 2월
석사학위 논문

반도체 포화흡수체를 이용한
모드 잠금된 레이저 제작 및 광대역
광원 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술평학과

나은주

반도체 포화흡수체를 이용한
모드 잠금된 레이저 제작 및 광대역
광원 개발에 관한 연구

**Fabrication of mode-locked optical fiber laser using semiconductor
saturable absorber and study on broadband light source
development**

2019년 02월 25일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

나 은 주

반도체 포화흡수체를 이용한
모드 잠금된 레이저 제작 및 광대역
광원 개발에 관한 연구

지도교수 박종락

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광기술훈공학과

나은주

나은주의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 김 현 수 (인)

위 원 한국생산기술연구원 수석연구원 이 호 재 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 종 락 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제2장 이론	3
제1절 이터븀이 첨가된 광섬유	3
제2절 모드 잠금	5
1. 능동형 모드 잠금	5
2. 수동형 모드 잠금	5
제3절 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파	8
1. 솔리톤 광섬유 레이저	8
2. 확대 펄스 광섬유 레이저	8
3. 시밀래리톤 광섬유 레이저	9
4. 완전 정상 분산 광섬유 레이저	9
제4절 반도체 포화흡수체	14
제5절 광자결정 광섬유	16
제3장 실험 결과 및 분석	20
제1절 반도체 포화흡수체를 이용한 모드잠금된 광섬유 레이저	20
1. 광섬유 레이저 공진기 구성 및 제작	20

2. 반도체 포화흡수체 사양에 따른 공진기 출력 특성	20
3. 광섬유 레이저 공진기 출력 특성	21
가. LASER I	21
나. LASER II	22
4. 광섬유 레이저 공진기 펄스 전파 특성	22
제2절 광섬유 레이저 증폭단	38
1. 광섬유 레이저 증폭단 구성 및 제작	38
2. 광섬유 레이저 증폭기 출력 특성	38
가. LASER I	39
나. LASER II	39
제3절 광자결정 광섬유를 이용한 대역폭 확장	50
1. 광섬유 레이저 PCF단 구성 및 제작	50
2. 광섬유 레이저 PCF단 출력 특성	50
가. LASER I	50
나. LASER II	50
제4장 결 론	60
[참고문헌]	62

표 목차

표 2.1 희토류 이온별 특성	4
표 3.1 수치해석에 사용된 광섬유(PM980-XP) 파라미터	24

그림 목차

그림 2.1 수동형 모드잠금 소자인 포화흡수체의 원리	7
그림 2.2 솔리톤 광섬유 레이저의 구성도	10
그림 2.3 솔리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성	10
그림 2.4 확대 펄스 광섬유 레이저의 구성도	11
그림 2.5 확대 펄스 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성	11
그림 2.6 시밀래리톤 광섬유 레이저의 구성도	12
그림 2.7 시밀래리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성	12
그림 2.8 완전 정상 분산 광섬유 레이저의 구성도	13
그림 2.9 완전 정상 분산 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성	13
그림 2.10 반도체 포화흡수체 종류 (a) SESA(투과형), (b)SESAM(반사형)	15
그림 2.11 광자결정 광섬유의 종류 (a) 고체-코어 PCF, (b) 공기-코어 PCF	18
그림 2.12 실리카-공기층 광자결정 광섬유의 유효굴절률 분포	19
그림 3.1 완전 정상 분산 광섬유 레이저 공진기 구성도	25
그림 3.2 반도체 포화흡수체의 특성(빨강: SA-1064-25-500fs, 파랑: SA-1064-40-500fs) (a) 빛의 세기에 따른 투과율, (b) 포화흡수 체 투과 전, 후의 예상 펄스 파형	26
그림 3.3 모드잠금된 레이저 펄스 열(LASER I)	27
그림 3.4 펌핑 파워에 따른 출력 특성(LASER I)	28
그림 3.5 안정, 불안정한 모드잠금된 펄스 열(LASER I) (a) 120 mW, (b) 130 mW	29
그림 3.6 모드잠금된 레이저의 스펙트럼(LASER I)	30
그림 3.7 모드잠금된 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER I)	31

그림 3.8 모드잠금된 레이저 펄스 열(LASER II) 32
 그림 3.9 펌핑 파워에 따른 출력 특성(LASER II) 33
 그림 3.10 안정, 불안정한 모드잠금된 펄스 열(LASER II) (a) 220 mW (b) 230 mW 34
 그림 3.11 모드잠금된 레이저의 스펙트럼(LASER II) 35
 그림 3.12 모드잠금된 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER II) .. 36
 그림 3.13 수치해석을 통한 제작된 레이저 공진기의 펄스 전파 특성 (LASER II) 37
 그림 3.14 본 논문에서 제작한 광섬유 레이저 공진기와 증폭기 시스템 (a) 구성도, (b) 사진 41
 그림 3.15 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 증폭기 출력 특성(LASER I) 42
 그림 3.16 레이저 출력 안정성 측정 결과(LASER I) 43
 그림 3.17 4단 증폭기 통과 후 출력 스펙트럼(LASER I) 44
 그림 3.18 4단 증폭기 통과 후의 출력에 대한 자기상관기 측정 결과 (LASER I) 45
 그림 3.19 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 증폭기 출력 특성(LASER II) 46
 그림 3.20 레이저 출력 안정성 측정 결과(LASER II) 47
 그림 3.21 4단 증폭기 통과 후 출력 스펙트럼(LASER II) 48
 그림 3.22 4단 증폭기 통과 후의 출력에 대한 자기상관기 측정 결과 (LASER II) 49
 그림 3.23 용착기에서 획득한 광자결정 광섬유의 단면 사진 52
 그림 3.24 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 PCF 출력 특성(LASER I) ... 53
 그림 3.25 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I) · 54
 그림 3.26 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I) 55
 그림 3.27 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 PCF 출력 특성(LASER II) ... 56

그림 3.28 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER II) · 57

그림 3.29 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER II) (a) 선형 스케일, (b) dB 스케일 58

그림 3.30 LASER I 과 LASER II 의 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼 (LASER II) (a) 선형 스케일, (b) dB 스케일 59

ABSTRACT

Fabrication of mode-locked optical fiber laser using semiconductor saturable absorber and study on broadband light source development

By Eun Ju Na

Advisor : Prof. Jong-Rak Park, Ph.D.

**Department of Photonic Engineering,
Graduate School of Chosun University**

In this study, mode-locked optical fiber laser oscillators using a semiconductor saturable absorber and four-stage optical fiber amplifiers were fabricated. In addition, experiments for output bandwidth enhancement were conducted using a photonic crystal optical fiber and the output characteristics of the laser system were investigated.

An Yb-doped optical fiber was used as the active medium for the laser oscillators, and the semiconductor saturable absorber, which is a passive mode-locking component, was utilized for the mode-locking operation. Saturable absorption is a phenomenon in which light absorption decreases as light intensity increases. Although greater loss occurs at the edges of an optical pulse by a saturable absorber, there is a small loss at the peak, that leads to a short optical pulse. The semiconductor saturable absorber used in this study has a quantum-well structure made of InGaAs with an absorption band around 1030 nm. Two types of laser oscillators (LASER I and LASER II) were fabricated using two different saturable absorbers (one with transmission 64%/modulation depth 13%, and the other with transmission 52%/modulation depth 25%) and their output characteristics were measured and compared. The maximum output power, repetition rate, pulse width, pulse energy, central wavelength and

bandwidth for LASER I were 12 mW, 37 MHz, 27 ps, 0.3 nJ, 1037 nm, 3 nm, respectively, and those for LASER II were 20 mW, 37 MHz, 10 ps, 0.5 nJ, 1034 nm, 5 nm, respectively. The overall performance of LASER II was superior to that of LASER I.

The output characteristics of the optical fiber amplifiers, which consisted of four stages, were investigated for two cases in which LASER I and LASER II were employed individually as the input to the amplifiers. The output power of these amplifiers increased as the pumping power of the amplifiers increases and the average output powers were measured to be approximately 400 mW in both the cases.

The bandwidth enhancement using a photonic crystal optical fiber was investigated. The length of the photonic crystal optical fiber was 20 m. The higher the peak powers of an input light source, the greater the bandwidth enhancement owing to stronger nonlinear effects. The bandwidth of the output spectrum gradually increased as the number of working amplifier stages increased. The final output spectrum of LASER II was in the range of 800~1400 nm, which was wider than that of LASER I (800~1350 nm) by about 50 nm and showed better overall spectral flatness. The laser system developed in this study will be utilized as a light source for a spectrally-resolved interferometer.

제1장 서론

1960년 미국의 T. H. Maiman에 의해 유도방출을 통해 빛을 증폭하는 레이저(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER)가 발명됨으로써 광학 분야에 매우 큰 변화가 일어났다.^[1] 레이저는 기존의 광원과 다르게 직진성, 결맞음성, 단색성의 장점을 가지고 있어 국방, 통신, 의료, 계측, 가공 등 매우 다양한 분야에 사용되고 있으며 현재에도 레이저의 개발 및 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2000년대 초반에 들어서면서 광섬유를 이용하여 제작한 레이저에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는데, 이는 기존 고체 레이저에 비하여 가볍고 작으며 광 정렬이 필요 없고 유지보수 및 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있기 때문이다.^[2]

광섬유 레이저는 코어에 희토류 원소가 첨가된 광섬유(rate earth doped fiber)를 이득 매질로 사용한다. 특히, 이터븀이 첨가된 광섬유(ytterbium doped fiber)는 이득 대역폭(gain bandwidth)이 넓고 양자 효율(quantum efficiency)이 좋다는 장점을 가지고 있어 고출력 극초단 광섬유 레이저의 이득 매질로 큰 주목을 받고 있다.^[3]

극초단 광섬유 레이저를 구현하기 위해서는 광학 펄스(optical pulse)가 공진기 내부의 광섬유를 통과하면서 발생하는 군속도 분산(group velocity dispersion, GVD)을 보상해 주어야 한다.^[4] 공진기 내부에 벌크 타입(bulk-type)의 프리즘(prism) 또는 회절 격자(diffraction grating) 등을 삽입하여 공진기 내부의 분산을 0에 가깝도록 만들어 줄 수 있다. 이러한 극초단 광섬유 레이저 구현 방법을 확대 펄스 모드 잠금(stretched pulse mode-locking)이라고 한다.^[5] 그러나 이러한 방법은 공진기 내부가 복잡해져 광 정렬이 어려울 뿐만 아니라 레이저 공진기의 출력이 제한된다는 단점을 갖고 있다. 2006년 C. Y. Chong은 공진기 내부에 군속도 분산을 보상하는 부분 없이 정상 분산 광섬유(all normal dispersion fiber)로만 이루어진 이터븀 첨가 광섬유 레이저를 발표하였다.^[6] 이러한 기술을 통해 확대 펄스 모드 잠금의 단점을 해결하였으며 용이하게 공진기를 구성할 수 있어 최근 고출력 극초단 광섬유 레이저 시스템에 활발히 적용되고 있다.

고출력 극초단 광섬유 레이저는 산업 전반에서 다양하게 응용되고 있는데, 그 중 한 분야가 초연속광 생성(supercontinuum generation)이다. 초연속광 생성은 1970년대 벌크 매질을 사용한 실험에서 최초로 관측되었다.^[7] 이를 통해 높은 침투 출

력을 갖는 짧은 펄스를 고체나 액체상의 매질에 초점을 맞추어 집광시키면 매우 넓은 대역폭을 갖는 초연속광이 생성된다는 것이 처음으로 알려지게 되었다. 하지만 벌크 매질에서의 초연속광 생성은 변환 효율이 매우 낮으며 이론적 분석이 난해하여 광섬유를 이용한 초연속광 생성 기술이 개발된 이후에는 주목을 받지 못하고 있다. 1996년 J. C. Knight와 동료들에 의해 광자 결정 광섬유(photonic crystal fiber, PCF)가 개발되었으며^[8], 2000년 초반부터 광자 결정 광섬유를 이용한 초연속광 생성과 광대역 광원 개발에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다.^[9] 광자 결정 광섬유는 비선형성이 매우 크며 색분산 특성을 비교적 자유롭게 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이 때문에 벌크 매질보다 훨씬 더 낮은 입력 레벨에서 보다 더 효율적인 초연속광 생성이 가능하며 광섬유의 특성에 기인하는 월등히 좋은 빔 품질(*beam quality*)을 얻을 수 있다.^[10] 최근에는 광자 결정 광섬유의 종류, 입력 펄프광의 파장, 펄스 폭 등이 초연속광 생성에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[11-12]

본 논문에서는 반도체 포화흡수체를 이용한 모드 잠금된 광섬유 공진기와 광섬유 증폭기를 제작하였고, 광자 결정 광섬유에서의 초연속광 생성에 기반한 광대역 광원을 개발하였다. 두 종류의 반도체 포화흡수체를 사용하여 모드 잠금된 광섬유 공진기를 제작하였는데, 이터븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하였으며 정상분산 광섬유로만 구성하였다. 증폭기는 4단의 이터븀 첨가 광섬유로 제작되었으며, 증폭기의 출력을 광자 결정 광섬유의 입력 펄프광으로 사용하였다. 공진기, 증폭기의 출력 특성을 공진기 구성에 사용한 반도체 포화흡수체 각각의 경우에 대하여 측정하고 비교하였다. 공진기, 증폭기, 광자 결정 광섬유로 구성된 광대역 광원의 중심 파장과 대역폭 등 최종 출력 특성을 측정하고 정리하였다.

제2장 이 론

제1절 이터븀이 첨가된 광섬유

레이저는 유도방출을 일으킬 수 있는 이득 매질(gain medium)과 매질에 에너지를 공급하여 밀도 반전을 일으키는 펌핑원, 레이저 광의 피드백을 제공하는 공진기로 이루어져 있다. 광섬유 레이저는 희토류 이온(rare-earth ion)을 첨가한 광섬유를 이득 매질로 사용한다. 이때 사용하는 레이저의 목적에 따라 적절한 희토류 이온들을 사용하여 파장과 출력 특성 등을 결정한다. 희토류 이온을 첨가한 광섬유는 일반 광섬유와 같은 형태이지만 광섬유의 코어에 희토류 원소인 네오디뮴(neodymium), 이터븀(ytterbium), 어븀(erbium) 등이 첨가되어 있다. 이러한 희토류 이온들의 특성을 표 2.1에 정리하였다.^[13-15]

먼저, 네오디뮴의 방출 파장은 940 nm, 1060 nm, 1300 nm이며, 일반적으로 좋은 흡수율을 얻기 위해 808 nm의 파장을 갖는 펌프 광원을 주로 사용한다. 이터븀의 방출 파장은 1030 nm, 1060 nm이며, 975 nm의 파장을 갖는 펌프 광원을 사용한다.^[16] 이터븀은 에너지 준위가 준3준위 형태를 보이고 있어 4준위의 에너지 구조를 갖는 네오디뮴에 비해 레이저 동작 임계값이 상대적으로 높으나 양자 결합이 적으며 레이저 동작 효율(efficiency of operation)은 더 높은 것으로 알려져 있다.^[17] 어븀은 방출 파장이 광섬유의 최저 손실 영역과 일치한다는 장점을 갖고 있기 때문에 통신 분야에서 선호되고 있지만, 석영계 유리에 대한 용해도가 낮아 고농도의 첨가가 불가능하다는 단점이 있다. 반면에 이터븀은 고농도 첨가가 가능하고 농도 소광(concentration quenching)이 없어 이득 매질의 길이를 줄일 수 있다는 장점이 있으며, 1 μm 파장대역을 요구하는 다양한 레이저 응용분야에서 선호되고 있다.^[18]

이터븀은 넓은 형광 폭과 다른 희토류 이온보다 낮은 10% 이하의 양자결함을 갖고 있어 펌프광의 변환 효율이 우수하기 때문에 고출력 광섬유 레이저 구현에 적합하다. 고출력 광섬유 레이저를 구현하기 위한 중요한 요소 중 하나는 발생하는 열을 해결하는 것이다. 이터븀이 첨가된 광섬유 레이저는 펌프 에너지의 열 변환 비율이 15% 미만인 매우 좋은 열적 특성을 갖고 있으며, 고체 레이저에 비해 상대적으로 공진기의 길이가 길기 때문에 여기 과정에서 발생하는 열을 분산시킬 수 있는 장점도 갖고 있다.^[19]

표 2.1 희토류 이온별 특성^[13-15]

	네오디뮴 (Nd)	이터븀 (Yb)	어븀 (Er)
에너지 준위	4	준3	3
여기 파장 (nm)	808	975	980
형광 파장 (nm)	1060	1035	1550
양자 결합 (%)	24	5.8	37
흡수 대역 (nm)	700~950	800~1100	950~1030
형광 대역 (nm)	1000~1200	900~1200	1400~1650
형광 폭 (nm)	~50	~60	~40

제2절 모드 잠금

펄스 레이저는 출력 파장, 펄스 폭, 반복률 등에 따라 광통신, 레이저 가공, 분광학, 광계측, 의료분야 등에서 활발히 활용되고 있다. 펄스 레이저를 구현하기 위해 일반적으로 Q-스위칭과 모드 잠금 기술을 사용한다. Q-스위칭 기술^[20]은 회전 거울이나 회전 프리즘을 이용하는 기계적인 방법, 가포화성 색소 같은 비선형 흡수체를 이용하는 방법, 초음파 셀의 음향광학 및 포켈스(pockels) 셀의 전기광학 스위치 소자를 이용하는 방법 등을 사용한다.^[21] Q-스위칭 기술을 통해 수 나노초의 펄스 폭, 수 Hz에서 수 kHz의 반복률을 얻을 수 있다. Q-스위칭 기술보다 더 짧은 펄스 폭의 레이저를 구현하기 위해서는 모드 잠금 기술을 사용하는데, 모드 잠금 기술을 사용하여 수 피코초 이하의 펄스 폭, 수 Mhz 이상의 고 반복률을 갖는 극초단 펄스 레이저를 제작할 수 있다.^[22] 이러한 모드 잠금에는 능동형 모드 잠금(active mode-locking)과 수동형 모드 잠금 (passive mode-locking) 방법이 있다.

1. 능동형 모드 잠금

능동형 모드 잠금 기술은 공진기의 내부에 변조기를 통해 주기적으로 손실을 가하거나 왕복운동(round trip) 위상을 변조하여 이루어지는 모드 잠금을 말한다. 공진기 내부에 주기적으로 가하는 손실의 속도가 수동형 모드 잠금 소자인 포화흡수체에 비해 느리기 때문에 펨토초 펄스를 얻기에 어렵다는 단점을 가지고 있다.^[23]

능동형 모드 잠금은 내부 변조기를 통해 진폭 변조(amplitude modulation), 위상 변조(phase modulation), 주파수 변조(frequency modulation) 등을 발생시킨다. 진폭 변조 방식의 AM 변조기는 음향광학 변조기(acousto-optic modulator)라고도 하며, 위상 변조 방식의 FM 변조기는 전기광학 변조기(electro-optic modulator)라고도 한다.^[24]

2. 수동형 모드 잠금

수동형 모드 잠금 기술은 외부의 신호 주입이나 능동형 변조기 없이 이루어지는 모드 잠금을 말한다. 수동형 모드 잠금은 공진기 내에 비선형 광학소자를 삽입한 형태로 공진기가 구성되며, 레이저 광의 출력 세기에 따라 공진하는 광의 위상 또는 진폭을 비선형적으로 변조함으로써 이루어진다.^[24] 일반적으로 수동형 모드 잠금 기술은 능동형 모드 잠금 기술에 비하여 제조비용이 낮기 때문에 기술적, 경제적 가치가 높고 레이저 펄스 폭이 더 작아 첨두 광 세기가 높은 레이저 출력을 갖는

다.^[25]

수동형 모드 잠금을 위해 커 효과(kerr effect)를 이용한 비선형 편광 회전 (nonlinear polarization rotation), 비선형 루프 거울(nonlinear loop mirror), 포화흡수체 (saturable absorber, SA) 등을 사용할 수 있다.^[26-28] 이 중에서 가장 간단한 수동형 모드 잠금 기술은 포화흡수체를 이용하는 것이다. 포화흡수는 광의 세기가 증가하면 광의 흡수가 감소하는 비선형 광학 현상이다. 그림 2.1은 수동형 모드 잠금 소자인 포화흡수체의 원리를 보여주고 있다. 공진기 안에서 진행되는 펄스의 가장자리 부분은 광의 세기가 약하기 때문에 포화흡수체를 통해 흡수가 되어 더 이상 공진기 내부를 진행하지 못하게 된다. 또한 펄스의 중간 부분은 광의 세기가 강하기 때문에 포화흡수체에서 흡수를 포화시켜 적은 손실이 일어나게 되고 공진기 내부를 계속 진행하며 결과적으로 좁은 펄스 폭을 갖게 하는 모드 잠금을 유도한다.^[29]

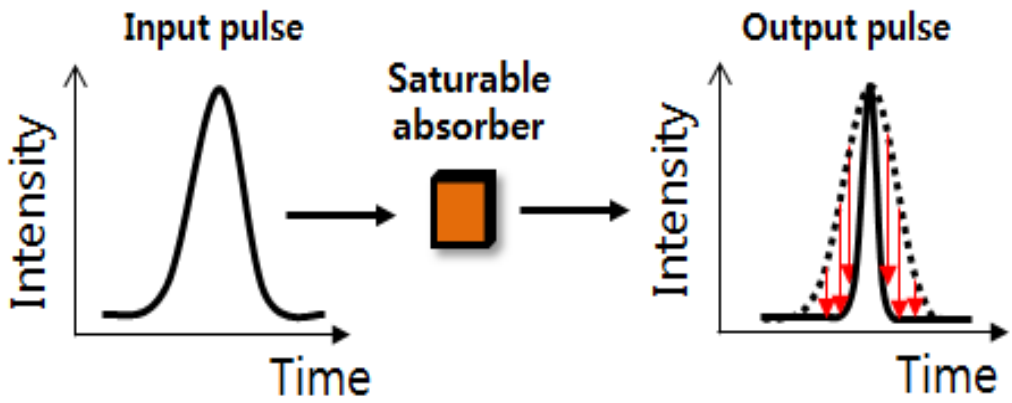


그림 2.1 수동형 모드 잠금 소자인 포화흡수체의 원리

제3절 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파

분산은 공진기를 형성하는 서로 다른 부호와 크기를 갖는 광섬유의 길이 조합으로 조절할 수 있으며, 분산을 조절함으로써 광섬유 공진기 내부에 전파하는 펄스의 특성 또한 조절할 수 있다. 정상 분산 영역에서 비정상 분산 영역까지 다양한 분산 조건에서 동작하는 광섬유 레이저 공진기가 제안되었다. 제안된 레이저에는 솔리톤(soliton) 광섬유 레이저, 확대 펄스(stretched-pulse) 광섬유 레이저, 시밀라리톤(similariton) 광섬유 레이저, 완전 정상 분산(all normal dispersion) 광섬유 레이저 등이 있다.^[30]

1. 솔리톤 광섬유 레이저^[30-32]

솔리톤 광섬유 레이저는 비정상 군속도 분산과 양의 비선형성을 갖는 광섬유로 구성되어 있다. 그림 2.2는 솔리톤 광섬유 레이저의 구성도를 보여주고 있다. 공진기의 구성이 비정상 분산 광섬유로만 구성되어 있기 때문에 어븀이 첨가된 광섬유가 이득 매질로 많이 활용된다. 그림 2.3은 솔리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성을 보여주고 있다. 공진기 내부의 레이저 펄스가 솔리톤 조건을 만족할 경우, 비정상 군속도 분산과 양의 비선형성이 균형을 이루어 일정한 펄스 폭을 갖는 솔리톤이 형성되어 전파하게 된다. 그러나 출력이 솔리톤 조건 이상으로 높아지면 비선형성이 증가하여 분산과 균형을 이루지 못해 일정한 펄스 폭을 유지할 수 없게 된다. 따라서 솔리톤 광섬유 레이저는 생성할 수 있는 펄스 폭과 출력이 제한되어 있고 비선형 조건과 분산 조건을 맞춰야하기 때문에 제작하기 어려운 단점이 있다.

2. 확대 펄스 광섬유 레이저^[5,30]

광섬유 레이저 공진기에서 안정적인 초단 펄스를 얻기 위해서는 비선형성이 일정 수준 이하로 제한되어야 한다. 이를 위해서는 공진기 내부에서의 평균 침투 출력이 낮아야만 한다. 그림 2.4는 확대 펄스 광섬유 레이저의 구성도이다. 비정상 분산 광섬유와 정상 분산 광섬유로 구성되어 있다. 정상 분산 광섬유 영역에서 유도된 분산이 비정상 분산 광섬유 영역에서 보상되는 구조이며, 공진기 내부의 광은 펄스 폭 확대와 압축의 과정을 번갈아 경험하며 진행한다. 정상 분산 광섬유의 도입에 의한 펄스 폭 확대를 통하여 공진기 내부에서의 평균 침투 출력을 낮출 수 있

다. 그림 2.5는 확대 펄스 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성을 나타내고 있다. 확대 펄스 광섬유 레이저는 한 번 왕복할 때마다 두 번의 최소 펄스 폭을 가지게 되며, 처핑의 부호는 왕복 당 두 번 바뀌게 된다. 솔리톤 광섬유 레이저와 비교할 때 평균 침투 출력을 일정 수준 이하로 낮출 수 있어 광섬유 내부의 비선형 효과가 상대적으로 억제된다. 따라서 솔리톤 광섬유 레이저보다 높은 펌프 세기에서 안정적으로 발진하는 레이저 출력을 얻을 수 있다.

3. 시밀래리톤 광섬유 레이저^[30]

그림 2.6은 시밀래리톤 광섬유 레이저의 구성도를 보여준다. 시밀래리톤 광섬유 레이저는 정상 분산 광섬유로 구성되어 있으며 분산 보상을 위하여 매우 작은 비선형성을 갖는 벌크 타입의 회절 격자나 프리즘과 같은 광학 소자를 추가적으로 사용한다. 그림 2.7은 시밀래리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성을 보여준다. 정상 분산 영역에서 정상 분산 광섬유의 분산과 비선형 효과에 의해 펄스 폭은 증가하게 된다. 이 후, 포화흡수체를 지나며 펄스 폭이 일차 감소하게 되고, 분산 보상 소자 구간을 거치며 펄스 폭이 추가적으로 감소하게 되어 초기의 입력 펄스 형태로 되돌아가게 된다.

4. 완전 정상 분산 광섬유 레이저^[30,33]

그림 2.8은 완전 정상 분산 광섬유 레이저 구성도를 보여준다. 완전 정상 분산 광섬유 레이저는 정상 분산 광섬유만으로 구성되어 있다. 그림 2.9는 완전 정상 분산 광섬유 레이저에서의 펄스 전파 특성을 보여준다. 단일모드 광섬유 내에서 분산과 비선형성에 의해 펄스 폭이 증가하게 되고, 포화흡수체에 의한 주파수 필터링으로 인해 펄스 폭이 감소하게 되어 일정한 폭을 갖는 안정적인 펄스를 형성한다. 분산 보상을 위해 프리즘이나 회절격자 등과 같은 추가적인 광학 소자를 필요로 하지 않기 때문에 제작이 용이하다. 완전 정상 분산 레이저는 처프된 펄스가 진행하고 펄스 폭이 다른 광섬유 레이저에 비해 다소 넓은 특징을 갖고 있으나 펄스 압축(pulse compression) 기술을 통해 충분히 짧은 펄스로 변환할 수 있다. 또한 처프 펄스 증폭(chirped pulse amplification) 기법을 사용하여 펄스 에너지 및 침투 출력을 증폭하고자할 경우 펄스 폭을 넓히기 위한 추가적인 장치가 필요하지 않아 최근 고출력 펄스 레이저의 공진기로 큰 주목을 받고 있다.

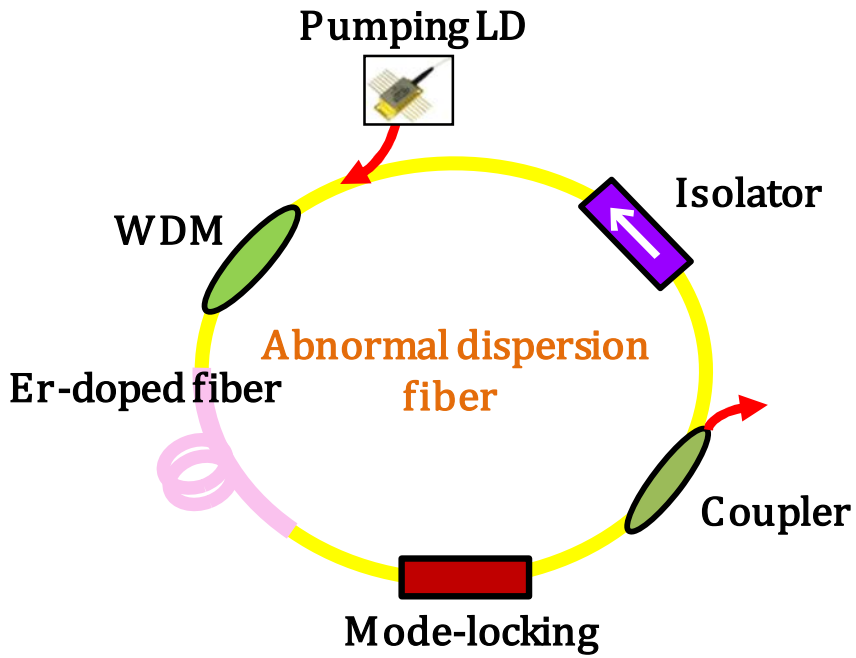


그림 2.2 솔리톤 광섬유 레이저의 구성도

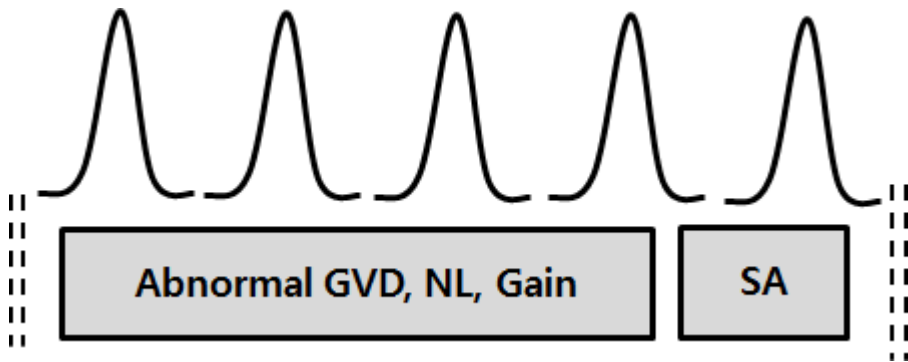


그림 2.3 솔리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성

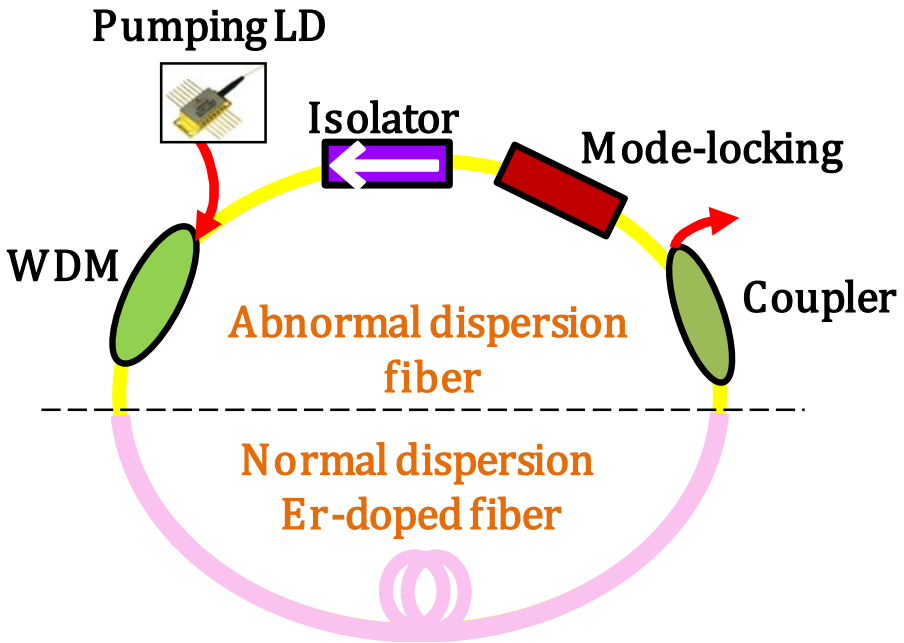


그림 2.4 확대 펄스 광섬유 레이저의 구성도

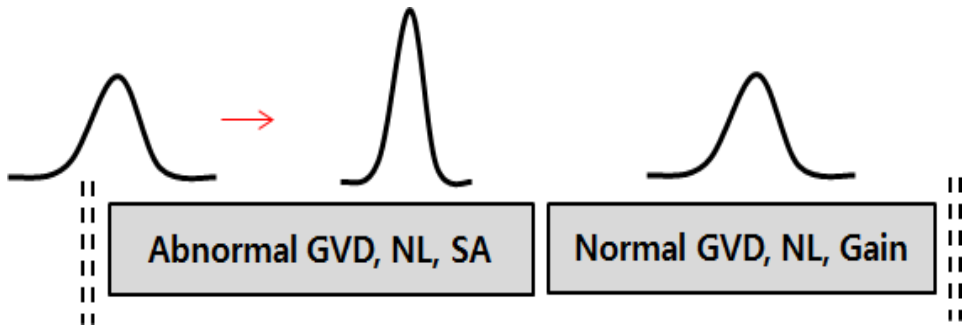


그림 2.5 확대 펄스 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성

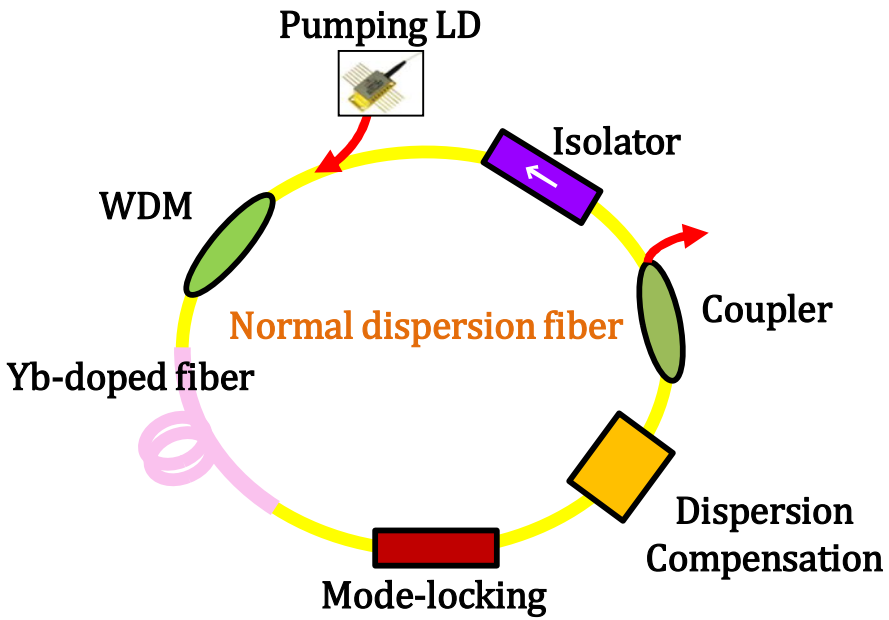


그림 2.6 시밀래리톤 광섬유 레이저의 구성

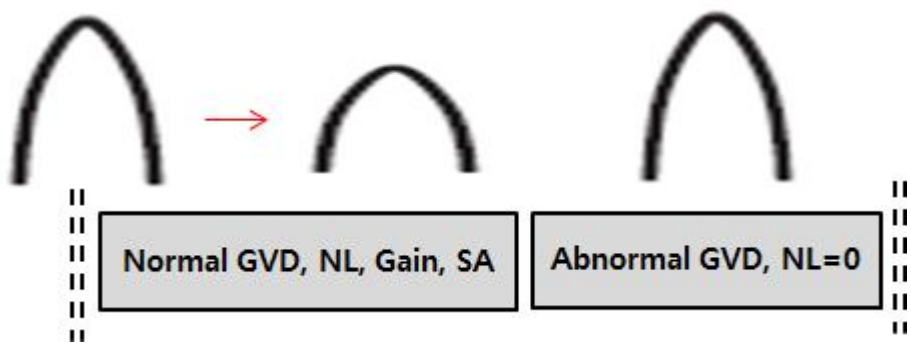


그림 2.7 시밀래리톤 광섬유 레이저의 펄스 형성과 전파 특성

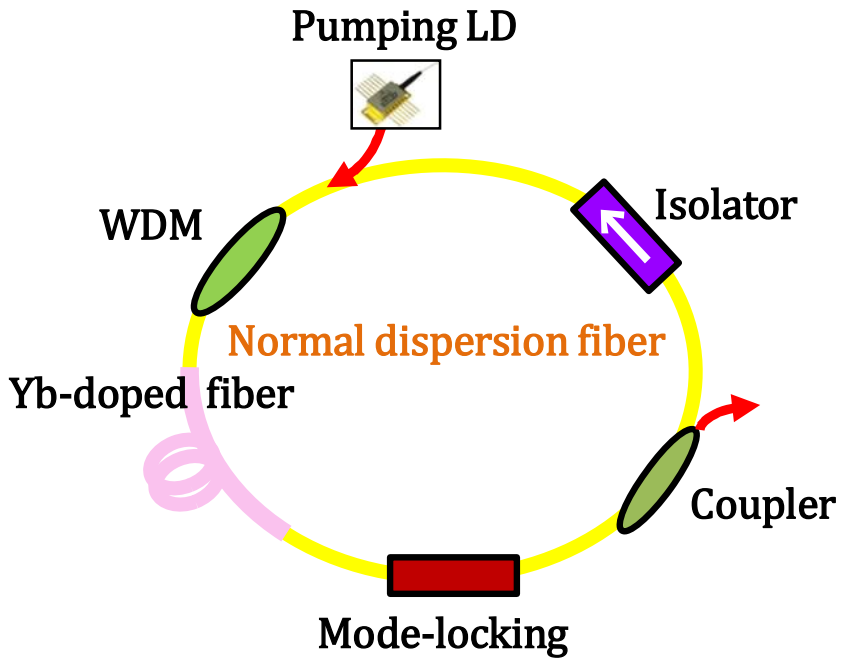


그림 2.8 완전 정상 분산 펄스 레이저의 구성도

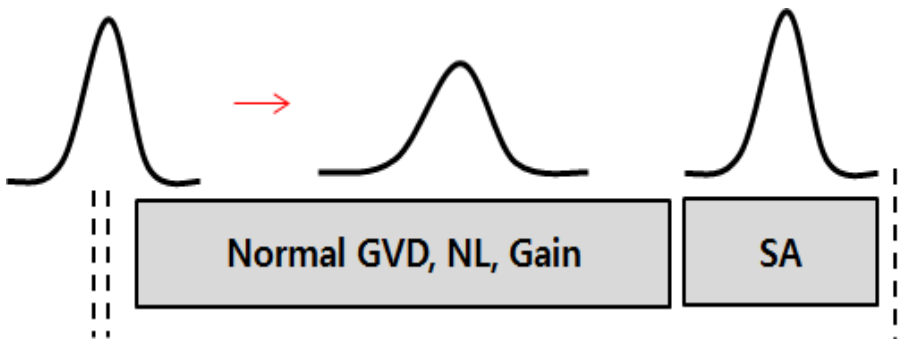
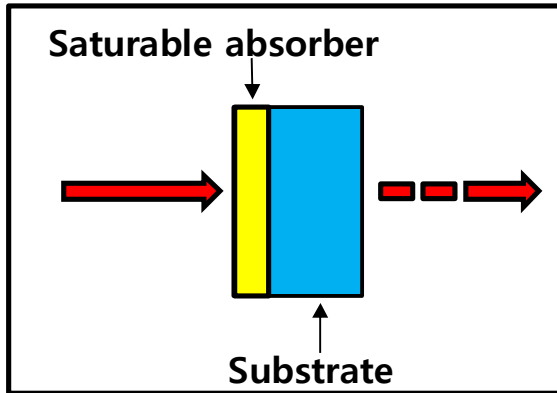


그림 2.9 완전 정상 분산 펄스 레이저의 펄스 형성과 전파 특성

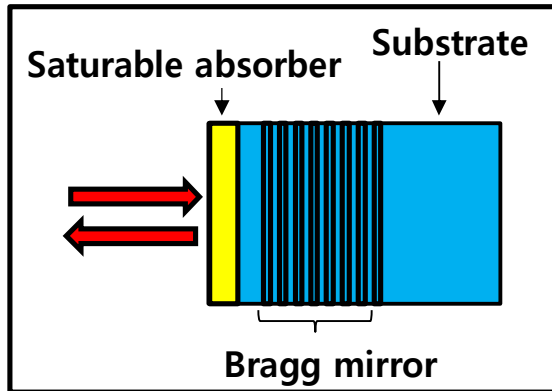
제4절 반도체 포화흡수체

수동형 모드 잠금 소자 중에서 반도체 포화흡수체는 초단 펄스 광섬유 레이저에 많이 활용되고 있다. 반도체 포화흡수체는 반도체 공정으로 만들어진다. 반도체 화합물인 GaAs와 InGaAs를 사용하여 단일 양자 우물(single-quantum well) 구조 또는 다중 양자 우물(multi-quantum well) 구조로 증착하여 포화흡수체 역할을 하도록 만들어져 있다.^[34] 양자 우물 구조에 사용된 반도체 화합물의 종류는 모드 잠금 하려는 레이저의 파장에 따라 결정이 되는데, GaAs는 가시광 영역의 파장은 투과하지 않고 적외선 대역의 파장에 투과도가 좋은 화합물이며, InGaAs는 1030 nm 파장 주변에 흡수가 있는 반도체 화합물이기 에 이터븀이 첨가된 광섬유 레이저에 사용되기 적합하다.^[35]

반도체 포화흡수체는 기본적으로 투과형과 반사형으로 나눌 수 있다. 투과형은 SESA(semiconductor saturable absorber)라고 하며, 반사형은 SESAM(semiconductor saturable absorber mirror)이라고 한다.^[36] SESA는 그림 2.10과 같이 포화흡수체만으로 이루어져 있어 광이 입사되면 투과되는 성질을 가지며, SESAM은 포화흡수체 아래에 GaAs와 AlAs층을 여러 겹으로 증착하여 만들어진 브래그 거울(bragg mirror)이 형성되어 있어 광이 투과되지 않고 반사된다. SESA는 입사하는 광의 세기가 증가하면 투과율이 증가하며, SESAM은 입사하는 광의 세기가 증가하면 반사율이 증가하는 특성을 갖는다. 입출력단이 광섬유로 되어있는 SESA를 사용할 경우 빔 정렬 없이 전 광섬유 링 레이저(all fiber ring laser)를 만들 수 있어 레이저 공진기의 구성이 용이하다. 반면 SESAM의 경우 선형의 레이저를 구성할 수는 있으나 빔의 정렬이 필요하여 레이저 공진기의 구성이 SESA에 비해 다소 어렵다.



(a)



(b)

그림 2.10 반도체 포화흡수체 종류^[36]
 (a) SESA(투과형), (b) SESAM(반사형)

제5절 광자 결정 광섬유

광자 결정 광섬유는 주기적으로 배열된 유리층과 공기층으로 구성되어 있으며, 그림 2.11과 같이 빛의 도파 원리에 의해 두 가지로 분류할 수 있다. 전반사 원리에 의해 빛이 도파되며 코어가 고체인 광자 결정 광섬유와 광 밴드갭 효과에 의해 빛이 도파되며 코어가 공기인 광자 결정 광섬유로 나누어진다.

코어가 고체인 광자 결정 광섬유는 일반 광섬유와 동일한 도파원리를 사용한다. 광섬유의 코어가 실리카로 구성되어 있고 주변에 공기구멍이 배열되어 있어 광섬유에 입사된 빛은 코어 영역을 통해서 도파하게 된다. 코어 부분의 굴절률은 실리카의 굴절률(1.44)과 같으며, 클래딩 부분은 실리카와 공기구멍이 섞여있기 때문에 실리카 굴절률보다 작은 유효 굴절률을 갖게 된다. 따라서 광자 결정 광섬유를 실리카로 이루어진 코어 영역과 실리카와 공기구멍의 유효 굴절률을 갖는 클래딩 영역으로 그림 2.12와 같이 근사화시킬 수 있고, 코어 영역의 굴절률이 클래딩 영역보다 높기 때문에 빛을 손실 없이 전송할 수 있다.^[37] 일반 광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 2% 이내이지만 광자 결정 광섬유는 공기층과 실리카의 굴절률이 각각 1과 1.44로 굴절률 차이가 훨씬 크다. 따라서 클래딩의 유효 굴절률의 변화 폭이 넓기 때문에 넓은 파장 영역에서 단일모드 전송이 가능하며, 특이한 분산특성, 넓은 모드 분포 등 기존의 광섬유로 구현하기 힘든 특성들을 쉽게 얻을 수 있다.^[12] 이러한 특성들은 공기층 분포의 조절을 통해 구현이 가능하다. 클래딩 영역의 공기층이 차지하는 비율을 낮추면 유효 굴절률과 실리카의 굴절률 차이가 작아지며 넓은 단일모드 동작 파장 영역과 큰 코어 단면적을 얻을 수 있다. 코어 면적이 클 경우 결합 효율이 높아진다. 또한, 비선형 문턱값이 커져 비선형 현상에 의한 신호의 왜곡이 감소하는 장점을 갖게 된다. 반대로 공기층의 비율을 높이면 유효 굴절률과 실리카의 굴절률 차이가 커져 개구수가 증가하고, 이로 인해 기존의 광섬유보다 작은 코어 영역을 통해 높은 파워 밀도의 광을 전송하는 것이 가능하다.^[38]

코어가 공기인 광자 결정 광섬유는 코어의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 낮은 것이 특징이다. 광섬유의 단면을 통해 주기적으로 배열된 공기층 구조는 광 밴드갭(optical band gap)을 형성하여 빛을 가운데의 공기층에 가두게 된다. 광자 결정은 특정 파장 영역의 빛을 반사시키는 특성을 갖고 있는데, 이러한 파장 영역을 광 밴드 갭이라고 한다. 코어 주변의 광자 결정에 의해 형성된 광 밴드 갭 영역에 해당

하는 파장을 갖는 광은 광자 결정 영역을 투과하지 못하고 반사되어 가운데의 공기층을 따라 전파된다. 실리카 유리가 차지하는 비율이 작아 광이 광섬유를 통해 전파될 때 발생할 수 있는 비선형 효과, 분산, 산란 등의 현상을 현저히 줄일 수 있다.^[37]

광자 결정 광섬유의 비선형성을 이용하여 스펙트럼 밴드 폭을 확장시키는 기술에 대한 이론적, 실험적 연구가 활발히 수행되었다. 밴드 폭 확장을 통해 광대역 광원을 제작할 수 있는데, 유도 라만 산란(stimulated Raman scattering), 4-광파 혼합(four-wave mixing), 자기 위상 변조(self-phase modulation) 등의 비선형 효과가 작용하는 것으로 알려져 있다.^[39-41] 비선형이 큰 광자 결정 광섬유를 이용하여 광대역 광원을 제작하기 위해서는 입력 펌프 광의 침투 출력이 높아야 한다.^[10] 따라서 연속 발진 레이저보다는 초단 펄스 레이저를 사용하는 것이 훨씬 더 효율적이다. 또한, 광자 결정 광섬유의 영 분산 파장 값과 유사한 파장의 입력 펌프 광을 사용하여 높은 비선형 효과를 얻을 수 있다.^[11] 광자 결정 광섬유는 공기 구멍의 크기와 간격 등의 설계 변수 변경을 통해 재료 특성과 무관하게 영 분산 파장 값을 조절할 수 있다.^[10] 영 분산 파장 값을 비교적 자유롭게 조절할 수 있으며 광자 결정 광섬유의 길이 변화를 통해 펨토초 뿐만 아니라 수십 피코초에서 수 나노초의 펄스 폭을 갖는 레이저를 사용하여 효과적인 스펙트럼 밴드 폭 확장이 가능하다는 장점 때문에 다양한 파장과 펄스 폭을 갖는 레이저를 펌핑 광원으로 사용하고 광자 결정 광섬유를 밴드 폭 확장 소자로 사용하는 광대역 광원 개발 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[10,12]

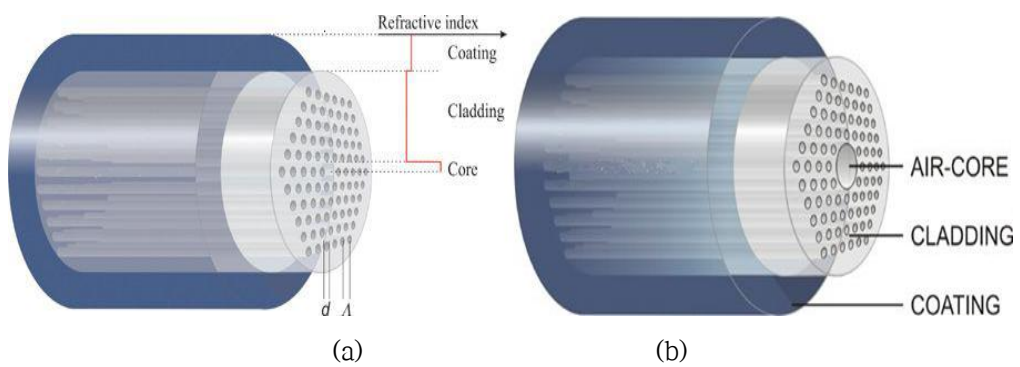


그림 2.11 광자 결정 광섬유의 종류^[42]
 (a) 고체-코어 PCF, (b) 공기-코어 PCF

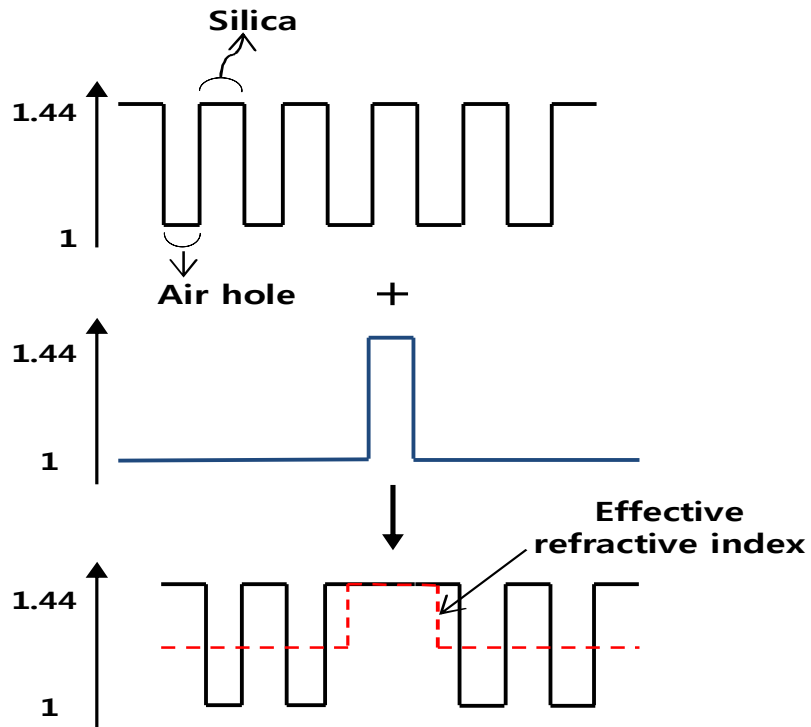


그림 2.12 실리카-공기층 광자 결정 광섬유의 유효굴절률 분포^[37]

제3장 실험 결과 및 분석

제1절 반도체 포화흡수체를 이용한 모드 잠금된 광섬유 레이저

1. 광섬유 레이저 공진기 구성 및 제작

본 논문에서는 정상 분산 광섬유로만 구성된 완전 정상 분산 광섬유 공진기를 제작하였다. 그림 3.1은 본 논문에서 제작한 광섬유 레이저 공진기의 구성도를 보여주고 있다. 광섬유 레이저에 사용된 광섬유는 레이저의 안정성을 확보하기 위해 모두 PANDA(polarization-maintaining and absorption reducing)형 편광유지 광섬유(Nufern사 PM980-XP)로 구성되어 있으며, 이득 매질을 여기시키기 위한 펌프 광원으로 COSET사의 중심 파장 975 nm, 최대 출력 500 mW인 14-pin butterfly 형태의 레이저 다이오드(laser diode, LD)를 사용하였다. 여기 광을 입사시키기 위한 소자로는 Haphit사의 1 W 평균파워를 갖는 3-port 타입 파장분할 다중화 결합기(wavelength division multiplexing, WDM)가 사용되었다. 이득 매질로 사용한 광섬유는 Thorlabs사의 코어 개구수 0.12, 코어 지름 $7.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$, 920 nm 파장 흡수율에서 $0.55 \pm 0.1 \text{ dB/m}$ 를 갖는 이터븀이 첨가된 광섬유이었다. 또한 공진기가 한 쪽 방향으로만 공진할 수 있도록 Haphit사의 최대 출력 300 mW인 광 고립기(optical isolator)를 사용하였다. 출력 결합기(output coupler)는 Thorlabs사의 75:25% 출력 비를 갖는 제품을 사용하였으며, 모드 잠금 소자로는 BATOP사의 투과형 반도체 포화흡수체가 사용되었다.

2. 반도체 포화흡수체 사양에 따른 공진기 출력 특성

본 논문에서는 2종의 반도체 포화흡수체(투과율 64%/변조깊이 13%, 투과율 52%/변조깊이 25%)를 사용하여 광섬유 레이저 공진기를 제작하였고, 그 출력 특성에 대해 조사하였다. LASER I 은 흡수율 35%, 투과율 64%, 변조깊이 13%인 Batop사의 SA-1064-25-500fs를 사용하였으며, LASER II 는 흡수율 35%, 투과율 64%, 변조깊이 13%인 SA-1064-40-500fs를 사용하였다.

그림 3.2(a)는 빛의 세기에 따른 반도체 포화흡수체의 투과율 특성 그래프를 나타낸다. 각 소자들은 최소 세기에서 투과율이 64%와 52%를 갖기 때문에 최소 투과

율과 최대 투과율의 차인 변조깊이를 통해 포화 세기에서의 투과율이 두 소자 모두 77%라는 것을 알 수 있다. SA-1064-25-500fs 소자의 최소 투과율이 더 높기 때문에 출력 손실이 적게 발생하게 되어 LASER I의 기울기 효율(slope efficiency)이 LASER II보다 높을 것으로 예상된다. 한편, SA-1064-40-500fs 소자의 변조깊이가 SA-1064-25-500fs 소자의 값보다 더 크기 때문에 그림 3.2(b)를 통해 LASER II의 모드 잠금된 펄스 폭이 LASER I보다 더 짧을 것으로 예상된다.

3. 광섬유 레이저 공진기 출력 특성

앞서 설명한 것과 같이 2종의 반도체 포화흡수체를 사용하여 모드 잠금된 레이저 LASER I, LASER II를 제작하였다. 이때, 2종의 반도체 포화흡수체 각각을 같은 조건을 갖는 두 개의 공진기에 삽입하여 공진기를 구성하였다.

가. LASER I

그림 3.3은 오실로스코프(Keysight사 DSOX6004A)로 측정된 모드 잠금된 레이저 펄스 열(LASER I)을 보여주고 있다. 광 검출기로는 Thorlabs사의 DET01CFC를 사용하였다. 레이저 펄스들 사이의 간격은 약 27 ns로 약 37 MHz의 펄스 반복률을 얻을 수 있었다. 그림 3.4는 펌핑 파워에 따른 출력 특성(LASER I)을 보여주고 있다. Thorlabs사의 PM320E와 S120C를 각각 광 파워미터와 포토다이오드 파워 센서(photodiode power seor)로 사용하였다. LASER I의 기울기 효율은 약 19%이었다. 펌핑 파워가 70 mW 이하일 때는 모드 잠금이 이루어지지 않았으며 연속 발진 출력을 얻을 수 있었다. 펌핑 파워가 70 mW 이상 120 mW 이하의 영역에서 안정적인 모드 잠금 출력을 얻을 수 있었으나(그림 3.5(a) 참조), 펌핑 파워가 더 커져 130 mW 이상인 영역에서는 모드 잠금이 오랜시간 지속되지 못하거나 2개 이상의 펄스가 발진하는 불안정한 펄스 열이 관측되었다(그림 3.5(b) 참조). 모드 잠금된 상태에서 펌핑 파워를 계속 증가시키면 펄스 외의 잡음 성분에 이득을 주게 되는데, 이득 매질에서의 펄스 증폭은 포화되는 반면에 잡음 성분은 상당한 수준까지 증폭되어 다수의 펄스를 생성하게 되는 것으로 이해할 수 있다.^[43] 그림 3.6은 모드 잠금된 레이저의 스펙트럼(LASER I)을 보여주고 있다. 광 스펙트럼 분석기인 Yokogawa사의 AQ6370D로 측정하였다. 스펙트럼의 중심 파장은 1037 nm, 대역폭은 약 3 nm이었다. 그림 3.7은 LASER I의 모드 잠금된 출력에 대한 자기상관기(Femtochrome사 FR-103XL) 측정 결과

이다. 자기상관기로 측정된 레이저의 펄스 폭은 약 27 ps 이었으며, 펌핑 파워를 증가시키며 펄스 폭을 측정하였을 때 안정된 모드 잠금 출력 영역에서 거의 일정한 값을 얻을 수 있었다.

나. LASER II

그림 3.8은 LASER II의 모드 잠금된 레이저 펄스 열을 보여주고 있다. 이 경우에도 LASER I 과 마찬가지로 레이저 펄스 간 간격 약 27 ns, 펄스 반복률 약 37 MHz를 얻을 수 있었다. 그림 3.9는 LASER II의 펌핑 파워에 따른 출력 특성을 보여주고 있다. LASER II의 기울기 효율은 약 13%로 LASER I의 기울기 효율보다 약 6% 정도 작았다. 앞서 반도체 포화흡수체의 투과 특성을 바탕으로 예측한 것과 같이 최소 투과율이 높은 LASER I의 기울기 효율이 LASER II보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 펌핑 파워가 150 mW 이하일 때는 모드 잠금이 이루어지지 않았으며, 펌핑 파워가 150 mW 이상 220 mW 이하의 영역에서 안정적인 모드 잠금 출력을(그림 3.10(a) 참조), 펌핑 파워가 더 커져 230 mW 이상인 영역에서는 불안정한 펄스 열이 관측되었다(그림 3.10(b) 참조). 그림 3.11은 LASER II의 모드 잠금된 출력 스펙트럼을 보여주고 있다. 스펙트럼의 중심 파장은 1034 nm, 대역폭은 약 5 nm이었다. 그림 3.12는 LASER II의 모드 잠금된 출력에 대한 자기상관기 측정 결과이며, 레이저 펄스 폭은 약 10 ps이었다. 이 경우에도 펌핑 파워를 증가시키며 펄스 폭을 측정하였을 때 안정된 모드 잠금 출력 영역에서 거의 일정한 값을 얻을 수 있었다. 앞서 반도체 포화흡수체의 투과 특성을 바탕으로 예측한 것과 같이 변조깊이가 큰 LASER II의 펄스 폭이 LASER I보다 더 작음을 확인할 수 있다.

4. 광섬유 레이저 공진기 펄스 전파 특성

본 논문에서 제작한 완전 정상 분산 광섬유 레이저 공진기(LASER II)의 펄스 전파 특성을 확인해 보기 위하여 비선형 슈뢰딩거 방정식을 통해 수치해석을 진행하였다. 비선형 슈뢰딩거 방정식은 식 (1)과 같이 주어진다.^[44]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

A 는 시간과 진행방향에 대한 레이저 펄스의 진폭변화를 나타내고, z 는 전파 거리, t 는 전파 시간, β_2 는 분산 계수, γ 은 비선형 계수를 나타낸다. 또한 α 는 양수이면

손실 계수, 음수이면 이득 계수이다. 식 (1)의 우변 3항은 각각 광섬유 손실, 분산, 비선형성에 의한 효과를 의미한다. 일반적으로 입사한 펄스는 순수 광섬유 및 이득 매질을 진행하는 동안 비선형성과 분산에 의한 영향을 받아 펄스 폭의 변화가 발생한다.

LASER II의 각 광섬유 길이에 따른 펄스 폭 변화를 식 (1)을 이용해 수치해석하기 위해 광섬유(PM980-XP) 관련 파라미터(parameter) 및 입사광의 조건을 표 3.1에 정리하였다. 입사광의 세기는 LASER II의 출력 값과 출력 결합기의 투과율을 역산하여 구하였다. 그리고 출력 결합기를 통과하여 공진기 내부로 전파하는 입력 레이저의 펄스 폭은 출력된 모드 잠금 펄스 폭과 같다고 가정하고 수치해석을 진행하였다. 그림 3.13은 제작된 레이저 공진기의 펄스 전파 특성에 대해 수치해석한 결과이다. 입력 레이저의 펄스 폭은 순수 광섬유와 이득 광섬유를 통해 전파하면서 점차적으로 증가하였다. 그 후, 분산과 비선형 효과에 의해 증가된 레이저의 펄스 폭은 포화흡수체의 비선형 투과 특성에 의해 감소하고, 다시 짧은 순수 광섬유를 전파하면서 레이저 펄스의 펄스 폭은 증가하게 된다. 이렇게 증가된 레이저의 펄스 폭이 수치계산에서 사용한 초기의 입력 레이저 펄스 폭과 일치하게 되면 레이저 공진 조건이 만족하여 모드 잠금된 펄스가 안정적으로 발생하게 된다.

표 3.1 수치해석에 사용된 광섬유(PM980-XP) 파라미터

β_2 (dispersion coefficient)	0.026 ps ² /m
γ (nonlinearity coefficient)	0.006 W ⁻¹ m ⁻¹
α (loss coefficient)	0.02 m ⁻¹
pulse duration	10 ps
peak power	150 W
fiber length	5 m
wavelength	1030 nm

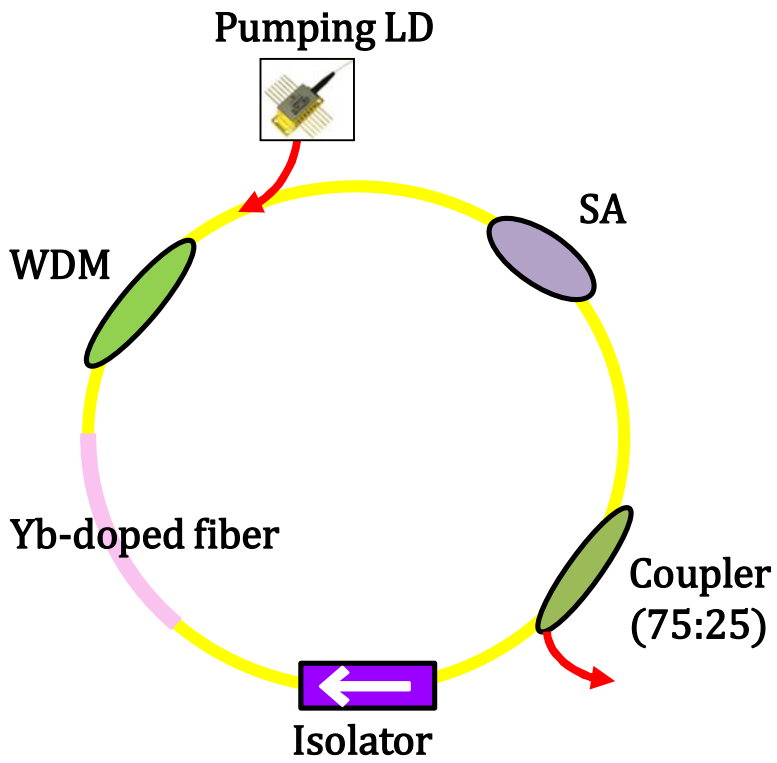
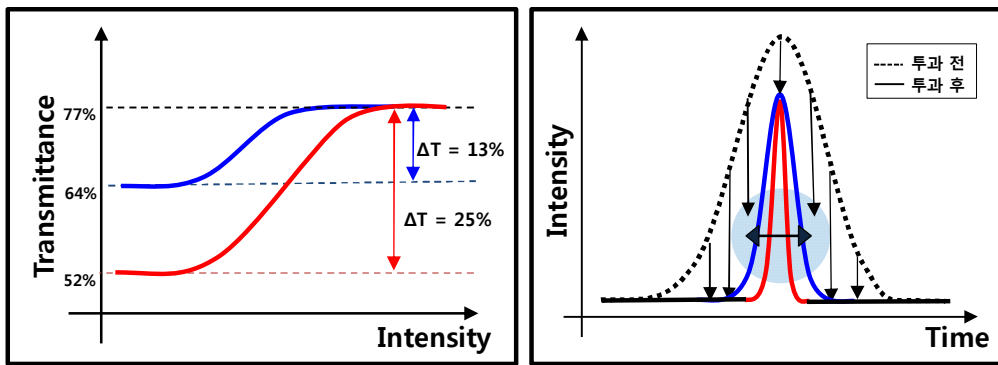


그림 3.1 완전 정상 분산 광섬유 레이저 공진기 구성도



(a)

(b)

그림 3.2 반도체 포화흡수체의 특성(빨강:SA-1064-25-500fs, 파랑:SA-1064-40-500fs)

(a) 빛의 세기에 따른 투과율, (b) 포화흡수체 투과 전, 후의 예상 펄스 파형

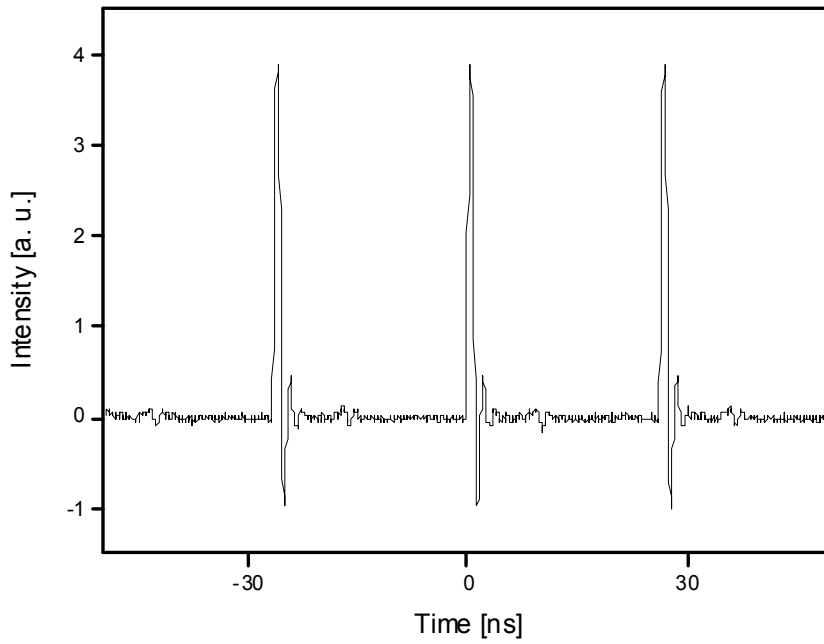


그림 3.3 모드 잠금된 레이저 펄스 열(LASER I)

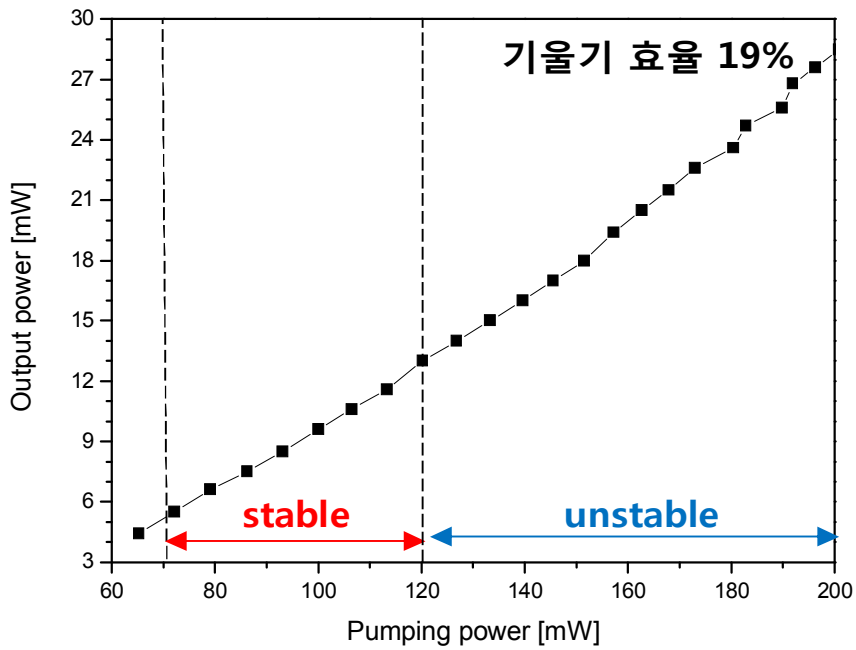
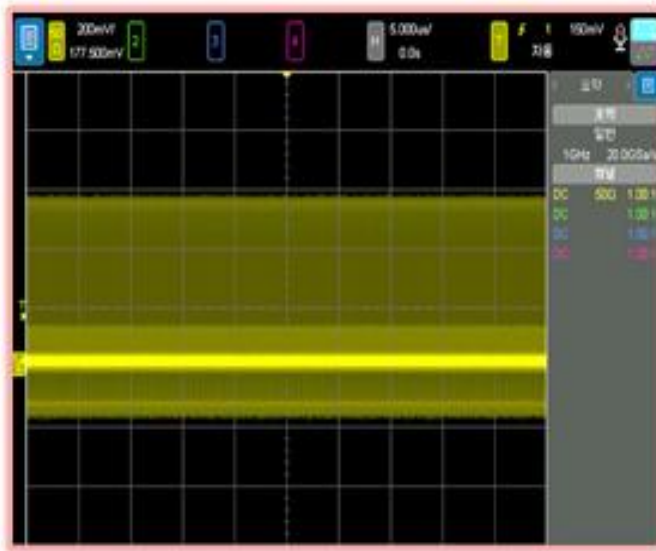
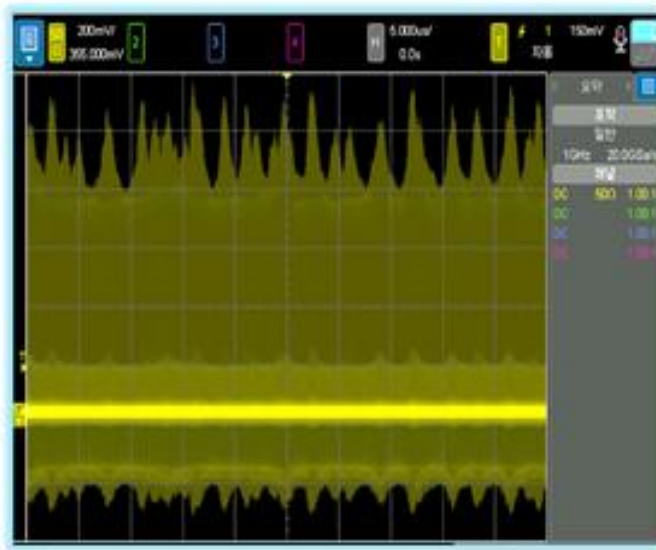


그림 3.4 펌핑 파워에 따른 출력 특성(LASER I)



(a)



(b)

그림 35 안정, 불안정한 모드 잠금된 레이저의 펄스 열(LASER I)

(a) 펌핑 파워 120 mW, (b) 펌핑 파워 130 mW

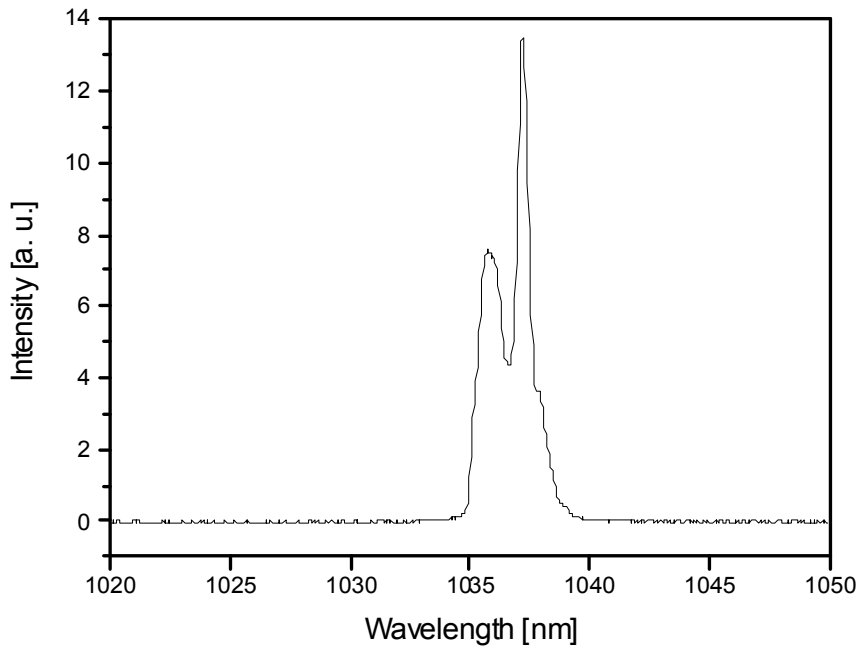


그림 3.6 모드 잠금된 레이저의 스펙트럼(LASER 1)

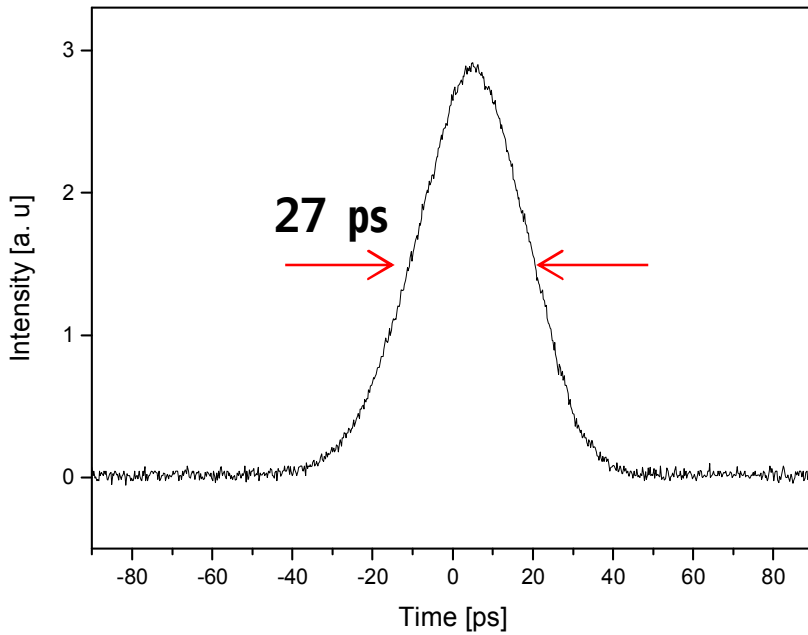


그림 3.7 모드 잠금된 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER I)

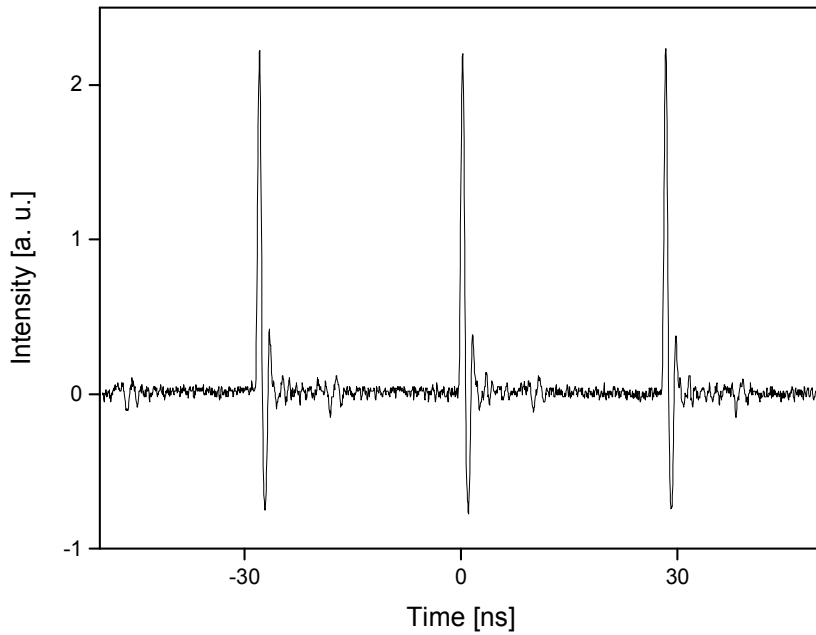


그림 3.8 모드 잠금된 레이저 펄스 열(LASER II)

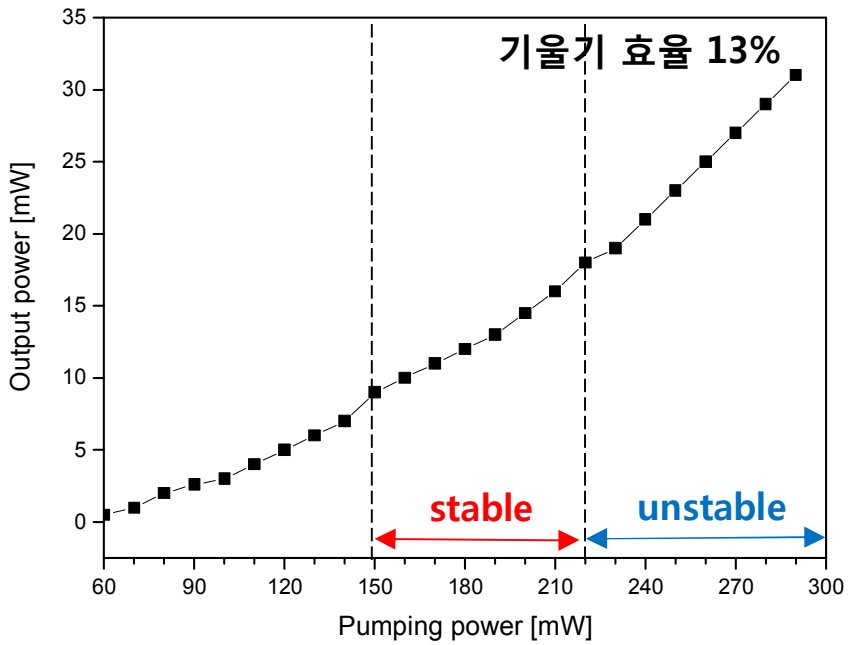
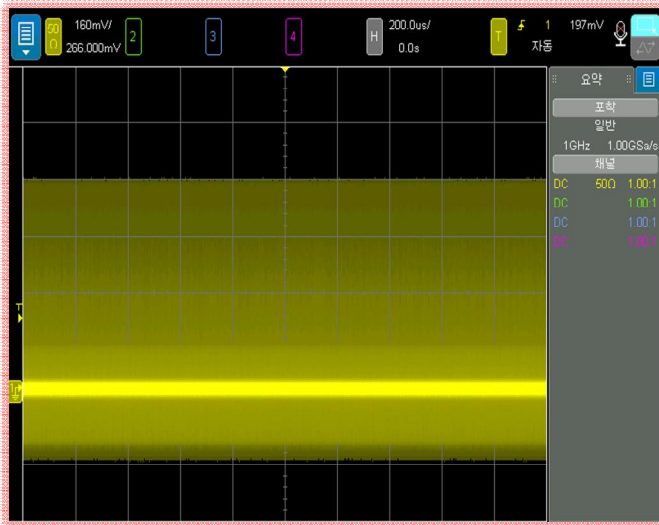
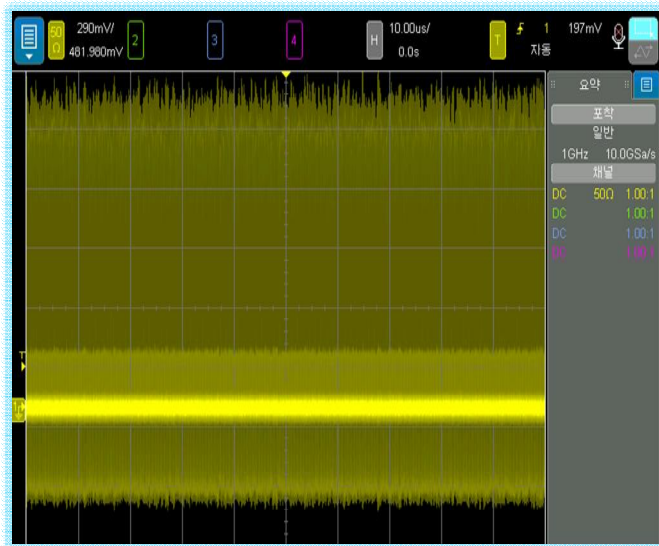


그림 3.9 펌핑 파워에 따른 출력 특성(LASER II)



(a)



(b)

그림 3.10 안정, 불안정한 모드 잠금된 레이저의 펄스 열(LASER II)

(a) 펌핑 파워 220 mW, (b) 펌핑 파워 230 mW

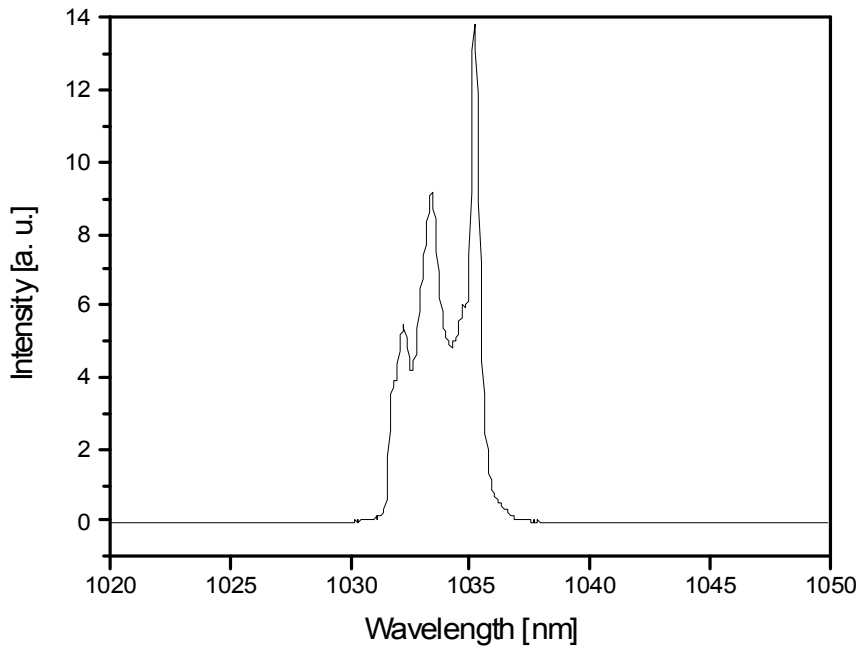


그림 3.11 모드 잠금된 레이저의 스펙트럼(LASER II)

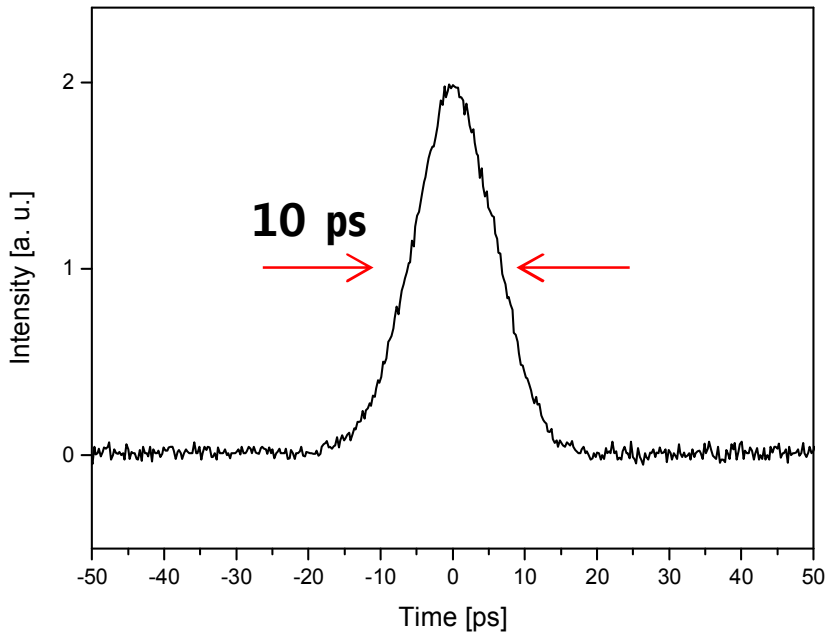


그림 3.12 모드 잠금된 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER II)

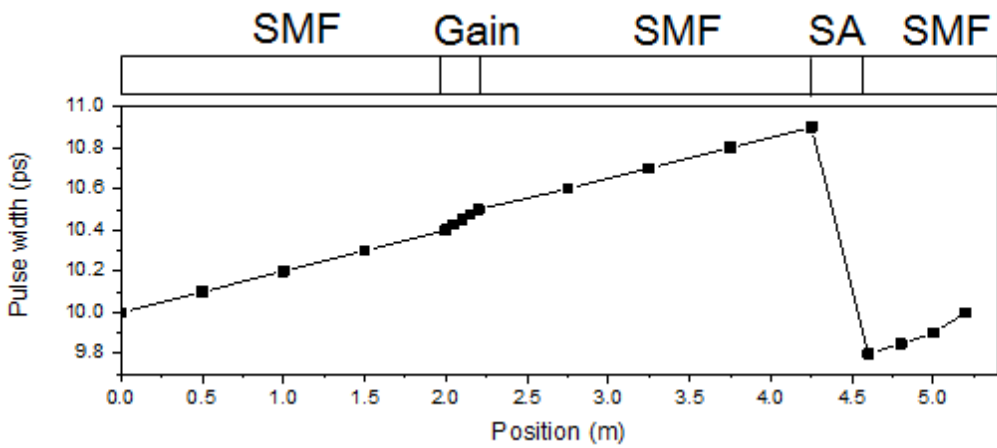


그림 3.13 수치해석을 통한 제작된 레이저 공진기의 펄스 전파 특성(LASER II)

제2절 광섬유 레이저 증폭단

1. 광섬유 레이저 증폭단 구성 및 제작

광섬유 증폭기는 펌프 광원, 이득 매질, WDM로 구성되어 있다. 광섬유 증폭기는 공진기에서 나오는 광의 출력을 증폭시켜주는 역할을 한다. 유도방출에 의한 광 신호 증폭 현상을 이용한 것으로 높은 에너지 상태로 여기된 이터븀 원자가 천이될 때 방출되는 에너지로 입사광을 증폭시키는 원리이다. 광섬유 증폭기는 입력광과 다른 파장을 갖는 펌프광이 필요하다. 입력광과 펌프광이 WDM을 통해서 이득 매질로 들어가게 되고, 이때 펌프광은 이득 매질에 첨가된 원자를 여기상태로 만들고 여기된 원자는 유도방출 과정을 통해 입력광을 증폭하게 된다. 즉, 작은 크기의 입력광이 이득 매질을 통과하며 펌프광으로부터 에너지를 전달받아 신호가 증폭되고 고출력 레이저를 만들 수 있다. 그림 3.14는 본 논문에서 제작한 광섬유 레이저 공진기와 증폭기 시스템의 구성도와 사진을 보여준다. 공진기의 출력단에 90:10%의 결합기를 부착하였으며, 10%의 출력은 공진기의 모니터링용으로 사용하고 나머지 90%의 출력은 증폭기의 입력으로 사용하였다. 또한 증폭기에서 나오는 광이 되반사(back reflection)되어 공진기에 영향을 주지 않도록 공진기와 증폭기 사이에 최대 출력 1 W의 광 고립기를 삽입하였다. 본 논문에서 제작한 광섬유 증폭기는 그림 3.14에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 총 4단으로 구성되어 있다.

2. 광섬유 레이저 증폭기 출력 특성

공진기 뒤에 증폭기를 연결하여 출력 특성을 측정한 결과 각 증폭단의 펌핑 파워를 증가시킬수록 출력이 증가함을 확인하였다. 레이저 공진기의 펄스 당 평균 출력 에너지는 약 0.3~0.5 nJ이었으나 광 고립기 및 증폭단의 광섬유들을 용착하는 과정에서 접촉 손실이 발생하여 증폭단의 입력 에너지는 약 0.02~0.03 nJ이었다. 증폭기의 펌핑 파워가 약 900 mW일 때 출력 파워는 LASER I 과 LASER II 모두 약 400 mW로 측정되었는데, 이는 펄스당 10.8 nJ에 해당하는 값이다. LASER II는 LASER I 에 비해 1단 증폭기에서의 증폭률이 현저히 낮았다. 다음 절에서 소개할 광자 결정 광섬유를 이용한 대역폭 확장 실험 수행 중 LASER II의 1단 증폭기 펌핑을 위해 사용되는 LD1이 손상을 입어 출력 저하가 발생한 것으로 파악되었다. 이는 증폭된 레이저 펄스가 광자 결정 광섬유에 입사

하였을 때 발생한 되반사 현상에 의한 것으로 추측된다. 되반사에 의한 펌핑 광원 손상을 막기 위해서는 증폭단의 펌핑 광원에 광 고립기를 연결하거나, 증폭단과 광자 결정 광섬유 사이에 고출력의 광 고립기를 삽입하는 방법 등을 향후 사용해야 할 것으로 판단된다. 아래에서 LASER I 과 LASER II 의 증폭 특성에 대해 자세히 소개하도록 하겠다.

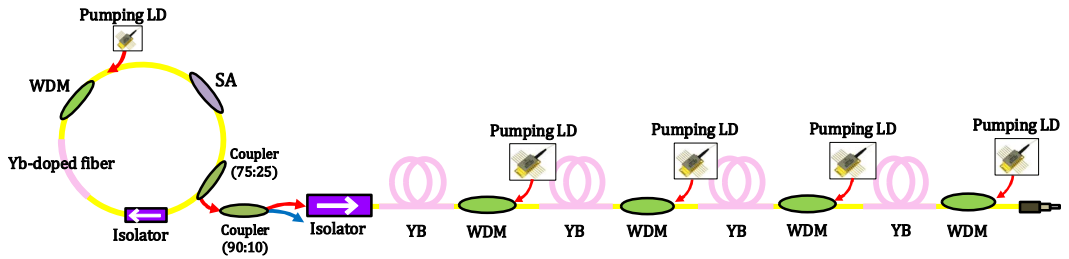
가. LASER I

그림 3.15는 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 출력 특성(LASER I)을 보여주고 있다. 펌핑 파워를 증가시키며 각 증폭단별 출력을 측정하였을 때 약 40 mW(1단 증폭기), 약 140 mW(2단 증폭기), 약 330 mW(3단 증폭기), 약 390 mW(4단 증폭기)의 평균 출력을 얻을 수 있었다. 그림 3.16은 LASER I 의 출력 안정성 측정 결과이다. 약 120분 동안 증폭된 레이저의 출력을 1.5초 간격으로 측정한 결과 평균출력은 391.7 mW이었으며, ± 0.3 mW안에서 안정된 출력을 보였다. 그림 3.17은 4단 증폭기 통과 후의 출력 스펙트럼(LASER I)을 보여주고 있다. 펌프광의 파장 성분은 관측되지 않았으며 레이저 공진기 출력의 스펙트럼과 모양이 일치함을 확인하였다. 그림 3.18은 4단 증폭기 통과 후의 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER I)이다. 펄스 폭은 약 27.6 ps으로 측정되었는데 공진기 출력에 대하여 측정된 펄스 폭보다 약 0.6 ps 증가한 값이다. 이는 증폭단을 구성하고 있는 단일모드 광섬유의 분산과 비선형성에 의한 펄스 폭 증가로 이해할 수 있다.

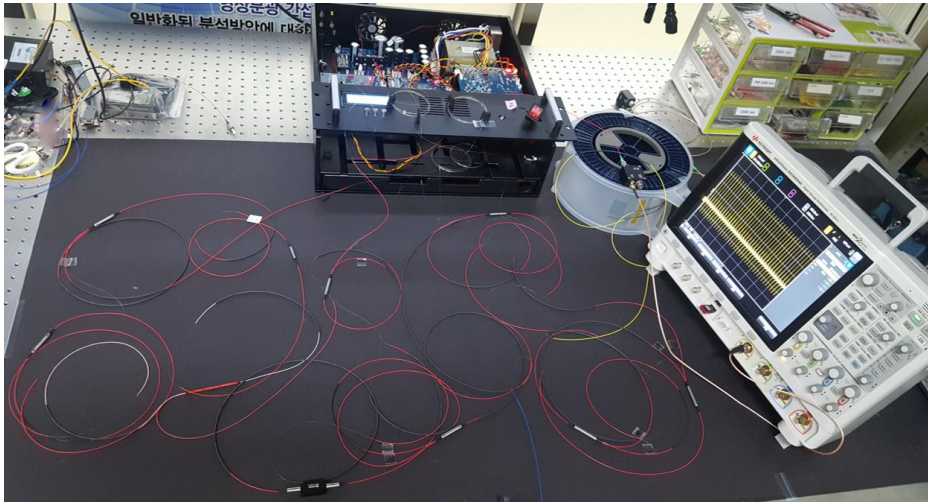
나. LASER II

그림 3.19는 LASER II 에 대한 각 증폭단별 출력 특성을 보여주고 있다. 펌핑 파워를 증가시키며 각 증폭단별 출력을 측정하였을 때 약 8 mW(1단 증폭기), 약 100 mW(2단 증폭기), 약 270 mW(3단 증폭기), 약 400 mW(4단 증폭기)의 평균 출력을 얻을 수 있었다. 그림 3.20은 LASER II 의 출력 안정성 측정 결과이다. 이 경우에도 약 120분 동안 증폭된 레이저의 출력을 1.5초 간격으로 측정하였는데 출력은 400.5 ± 0.5 mW이었다. LASER I 의 경우와 마찬가지로 매우 안정된 출력을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3.21은 LASER II 의 4단 증폭기 통과 후 출력 스펙트럼을 보여주고 있다. 이 경우에도 레이저 공진기 출력의 스펙트럼 모양과 일치하였다. 그림 3.22는 LASER II 의 4단 증폭기 통과 후 출력에 대한 자기상관기 측정 결과이다. 펄스 폭은 약 11.2 ps로 측정되었으며, 공진기 출력에 대하여 측정된 펄스 폭보다 약 1.2 ps 증가한 값이다. 이 또한 증폭단에

서의 광섬유 분산과 비선형성에 기인한 현상으로 이해할 수 있다. LASER I 에 비해 LASER II 의 펄스 폭 증가가 더 컸다. 이는 LASER II 의 펄스 폭이 짧고 첨두 출력이 높아 증폭단의 광섬유를 진행하며 더 많은 처핑이 발생되었기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

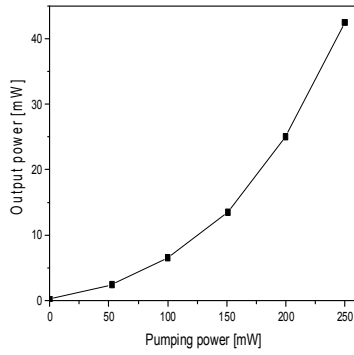


(a)

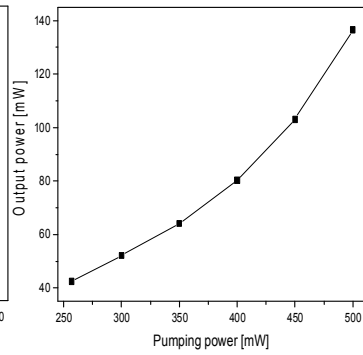


(b)

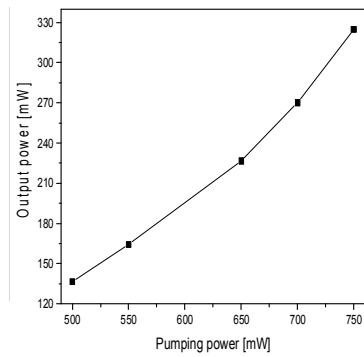
그림 3.14 본 논문에서 제작한 광섬유 레이저 공진기와 증폭기 시스템
(a) 구성도, (b) 사진



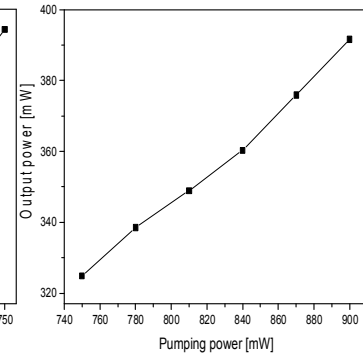
(a) 1단



(b) 2단



(c) 3단



(d) 4단

그림 3.15 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 증폭기 출력 특성(LASER I)

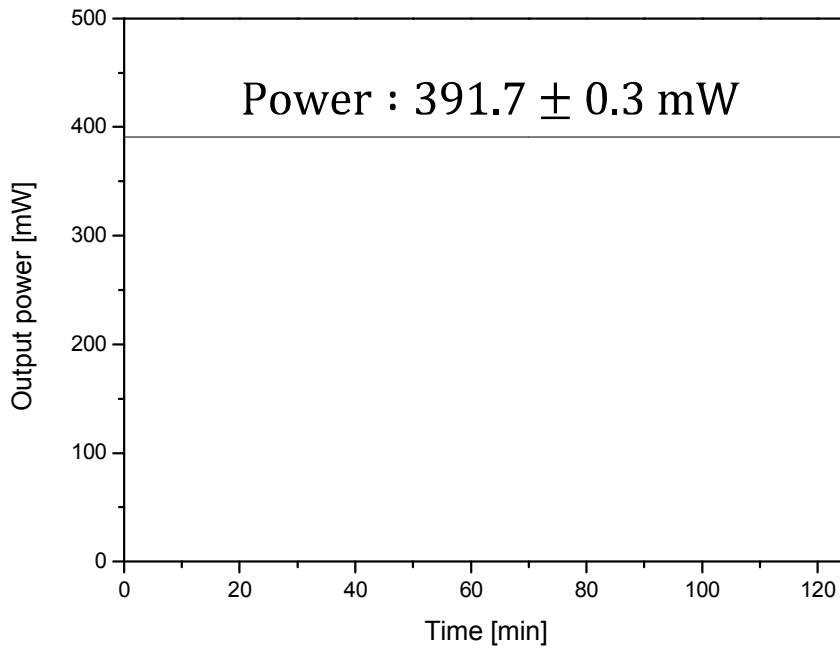


그림 3.16 레이저 출력 안정성 측정 결과(LASER I)

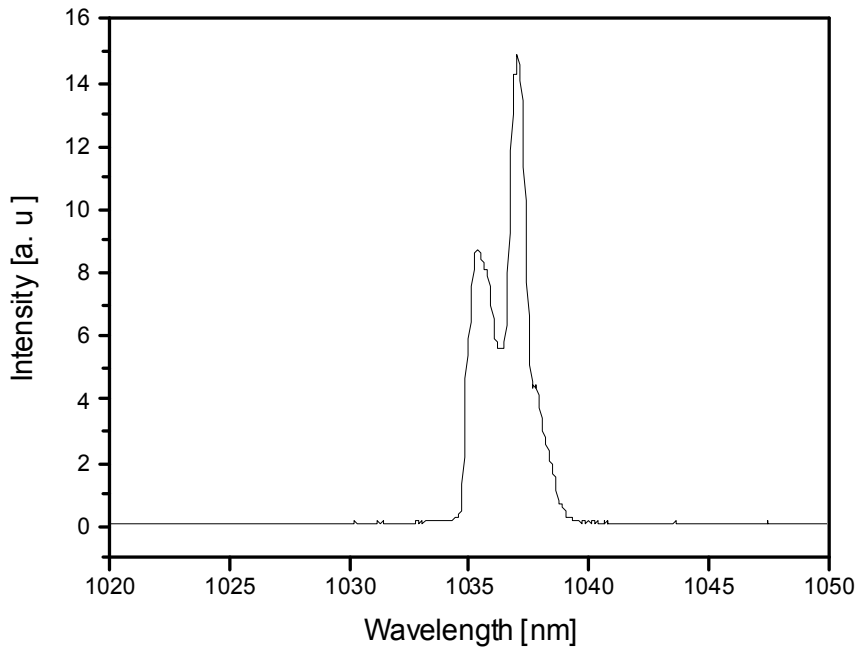


그림 3.17 4단 증폭기 통과 후 출력 스펙트럼(LASER I)

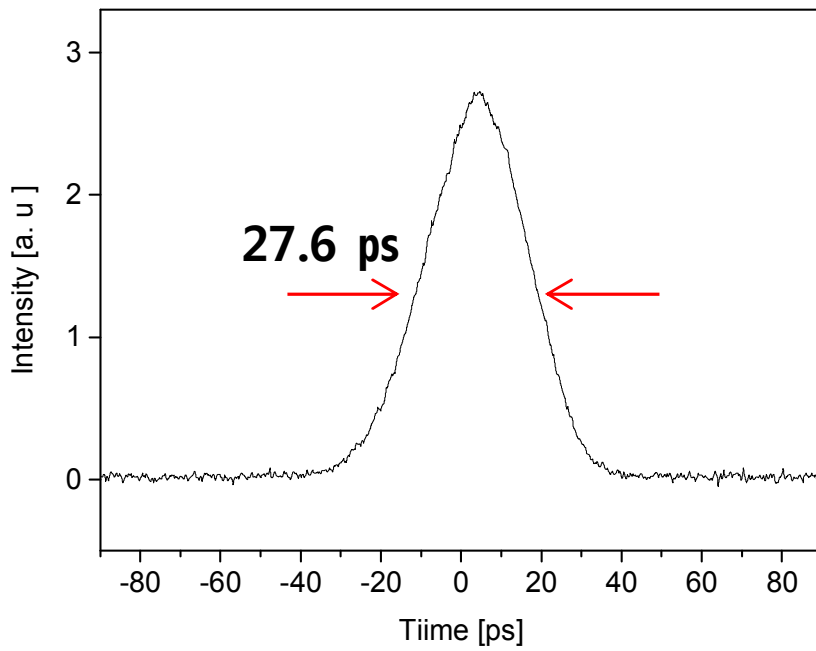
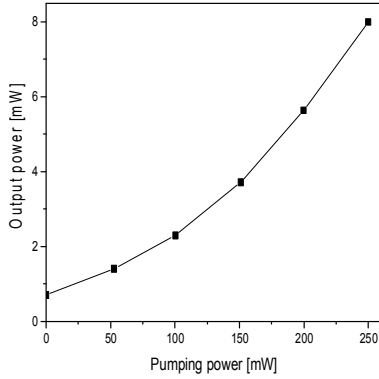
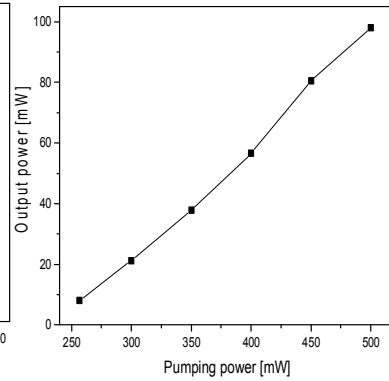


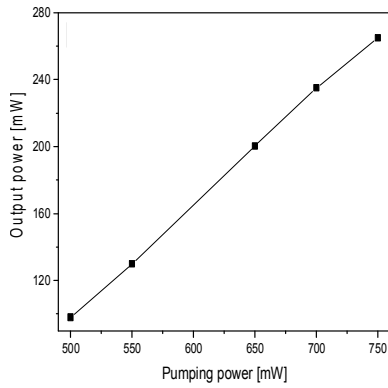
그림 3.18 4단 증폭기 통과 후의 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER I)



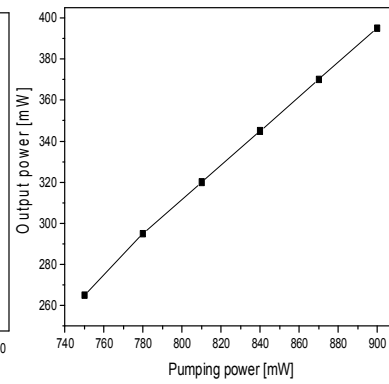
(a) 1단



(b) 2단



(c) 3단



(d) 4단

그림 3.19 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 증폭기 출력 특성(LASER II)

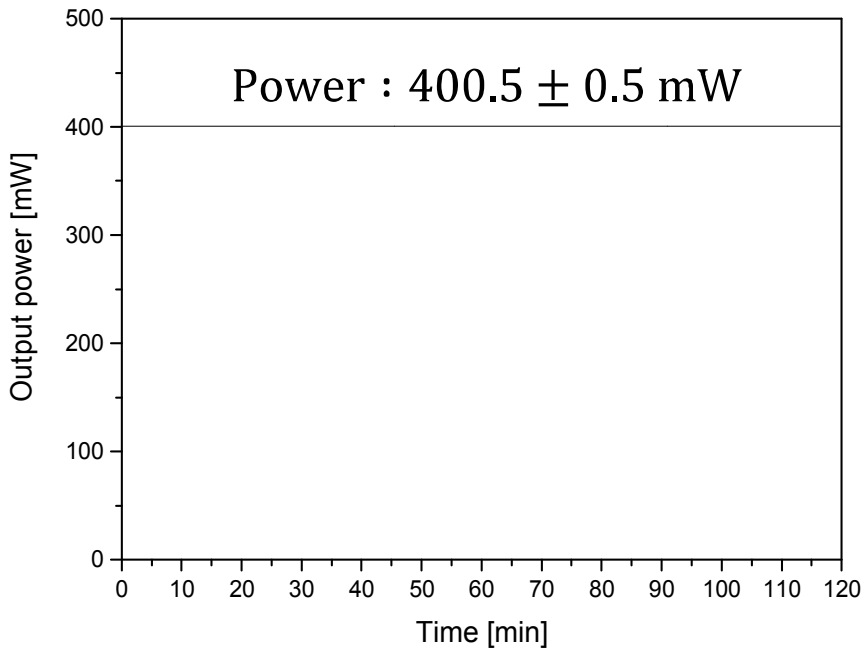


그림 3.20 레이저 출력 안정성 측정 결과(LASER II)

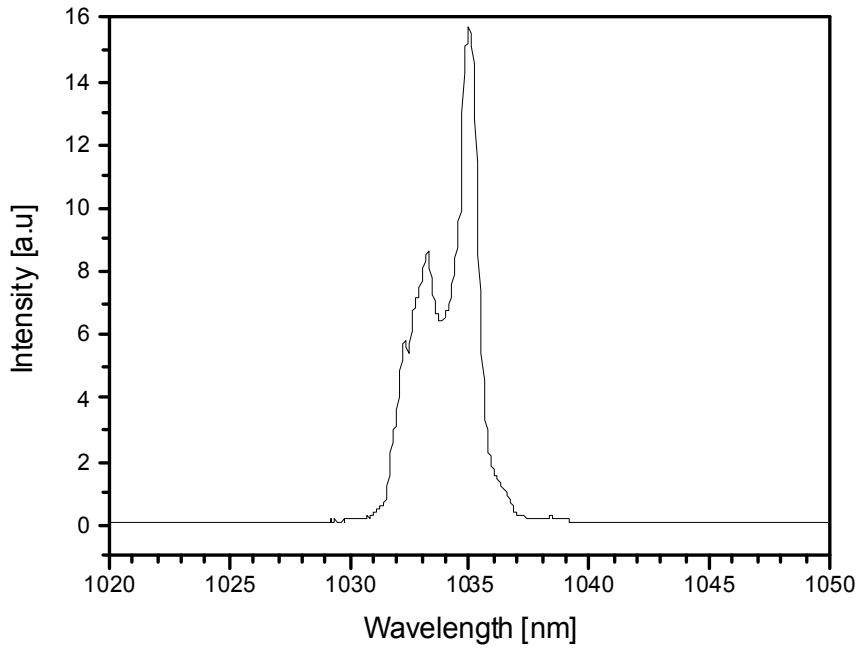


그림 3.21 4단 증폭기 통과 후 출력 스펙트럼(LASER II)

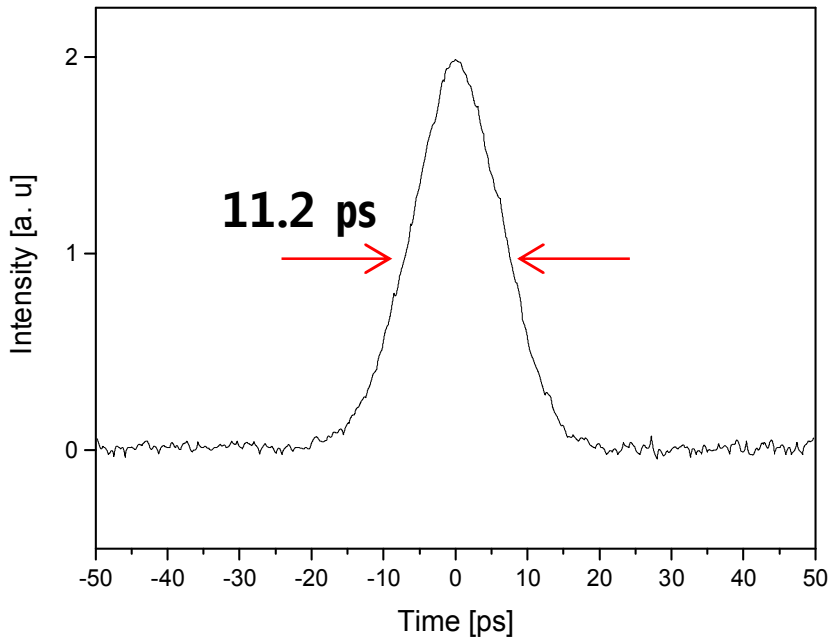


그림 3.22 4단 증폭기 통과 후의 출력에 대한 자기상관기 측정 결과(LASER II)

제3절 광자 결정 광섬유를 이용한 대역폭 확장

1. 광섬유 레이저 PCF단 구성 및 제작

광대역 광원을 제작하기 위하여 코어가 고체로 이루어진 광자 결정 광섬유를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 광자 결정 광섬유는 NKT사의 SC-5.0-1040 모델로 영 분산 파장이 1040 ± 10 nm이다. 따라서 본 논문에서 제작한 공진기의 중심 파장인 1030 nm과 영 분산 값 대역이 거의 일치함을 알 수 있다. 광자 결정 광섬유와 단일모드 광섬유의 융착을 위하여 Vytran사의 광자 결정 광섬유 전용 광섬유 융착기를 사용하였다. 그림 3.23은 융착기에서 획득한 광자 결정 광섬유의 단면 사진이다. 본 논문에서 제작한 LASER I(펄스 폭 27 ps)과 LASER II(펄스 폭 10 ps)를 광자 결정 광섬유에 입사시켜 출력 특성을 비교 측정하였다.

1. 광섬유 레이저 PCF단 출력 특성

가. LASER I

그림 3.24는 각 증폭단별 펄핑 파워에 대한 PCF 출력 특성(LASER I)을 보여주고 있다. 1단, 2단, 3단, 4단 증폭기까지의 출력을 PCF에 입사시켰을 경우 각각 최대 약 20 mW, 약 45 mW, 약 63 mW, 약 73 mW의 평균 출력을 얻을 수 있었다. 그림 3.25는 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I)을 함께 보여주고 있다. 최종 출력의 스펙트럼은 공진기 출력 스펙트럼 대역폭 약 3 nm에서 약 550 nm(스펙트럼 영역: 800~1350 nm)로 약 547 nm정도 확장된 것을 확인할 수 있다. 그림 3.26은 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I)을 보여주고 있다. PCF의 입력 파워가 증가함에 따라 최종 출력의 스펙트럼 대역폭이 넓어지고 있음을 확인할 수 있다. 입력 파워 증가에 따라 PCF내에서의 비선형성 또한 증가하여 출력 스펙트럼 대역폭이 점차 확대되는 것으로 이해할 수 있다.

나. LASER II

그림 3.27은 LASER II의 각 증폭단별 펄핑 파워에 대한 PCF 출력 특성을 보여주고 있다. 1단, 2단, 3단, 4단 증폭기까지의 출력을 PCF에 입사시켰을 경우 각각 최대 약 2.5 mW, 약 30 mW, 약 58 mW, 약 92 mW의 평균 출력을 얻을 수 있었다. 그림 3.28은

LASER II에 대한 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력 스펙트럼을 함께 보여주고 있다. LASER II의 경우 최종 출력의 스펙트럼은 공진기 출력 스펙트럼 대역폭 약 5 nm에서 약 600 nm(스펙트럼 영역: 800~1400 nm)로 약 595 nm정도 확장되었다. 그림 3.29는 LASER II의 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력 스펙트럼을 보여주고 있는데, 이 경우에도 PCF의 입력 파워가 증가함에 따라 최종 출력의 스펙트럼 대역폭이 확대됨을 확인 할 수 있다.

그림 3.30은 LASER I과 LASER II에 대한 PCF 통과 후 최종 출력 스펙트럼을 함께 보여주고 있다. LASER II의 스펙트럼이 LASER I보다 약 50 nm정도 더 확대되었음을 알 수 있다. LASER I과 LASER II의 최종 출력 스펙트럼을 비교해보면 단파장 영역에서는 비슷한 경향을 보이고 있으나 장파장 영역에서는 LASER II의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)가 LASER I보다 더 큼을 알 수 있다. 이는 LASER II의 장파장 영역 변환 효율이 더 뛰어남을 의미한다. 또한 파워 스펙트럼 밀도의 전체적인 평탄도 또한 LASER II가 우수하여, 전반적으로 LASER II의 출력 특성이 LASER I보다 뛰어난 것으로 판단된다.

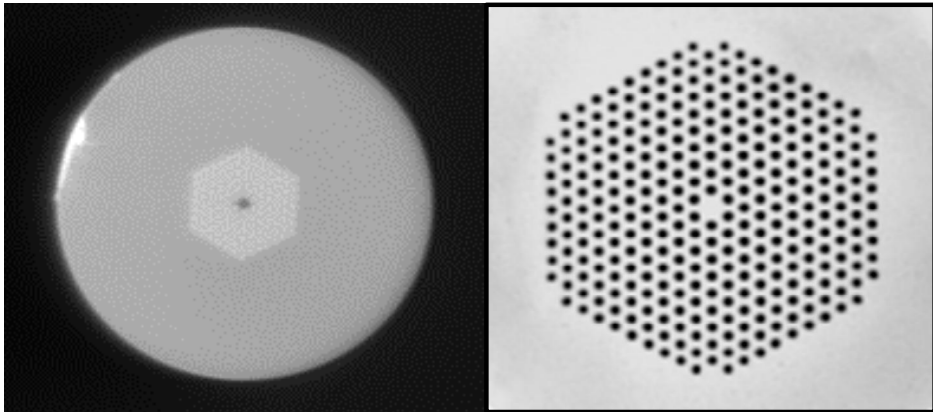
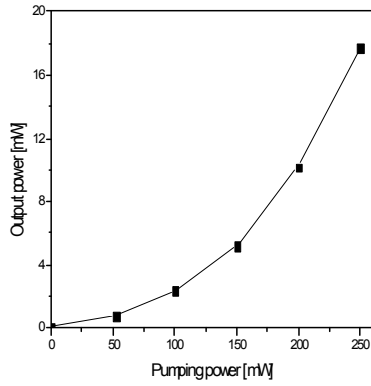
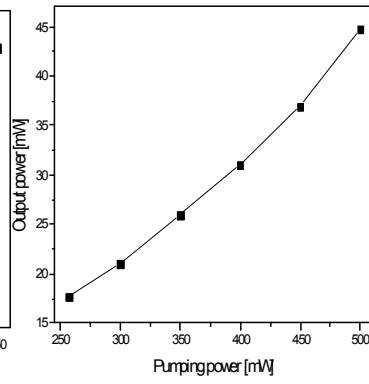


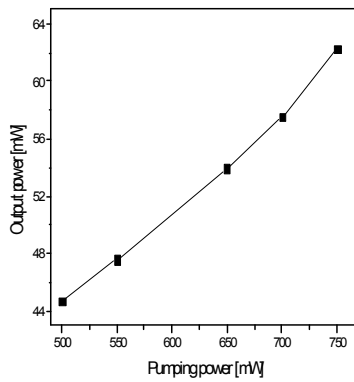
그림 3.23 용착기에서 획득한 광자 결정 광섬유의 단면 사진



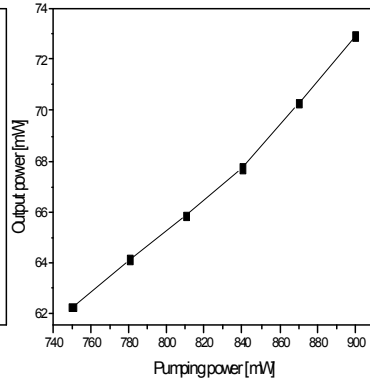
(a) 1단



(b) 2단



(c) 3단



(d) 4단

그림 3.24 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 PCF 출력 특성(LASER I)

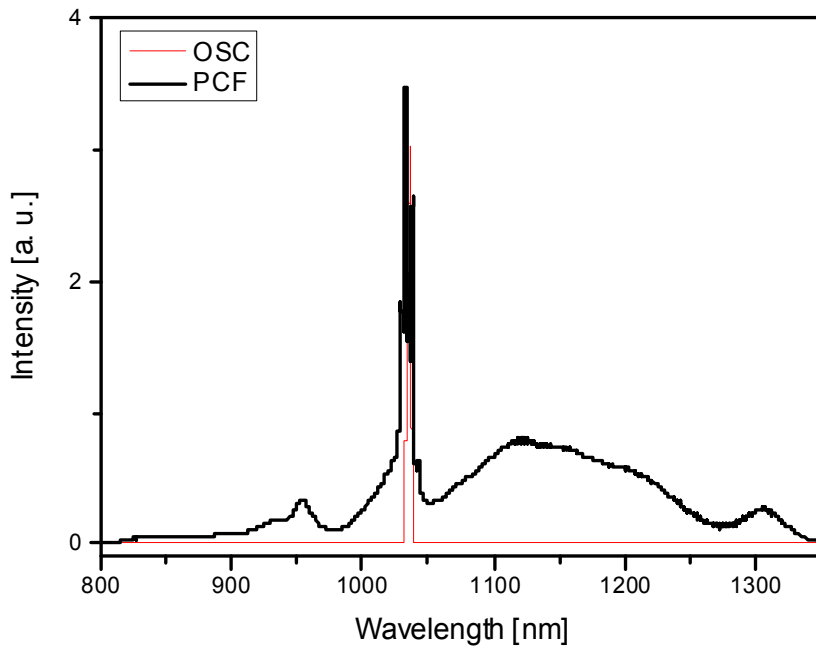
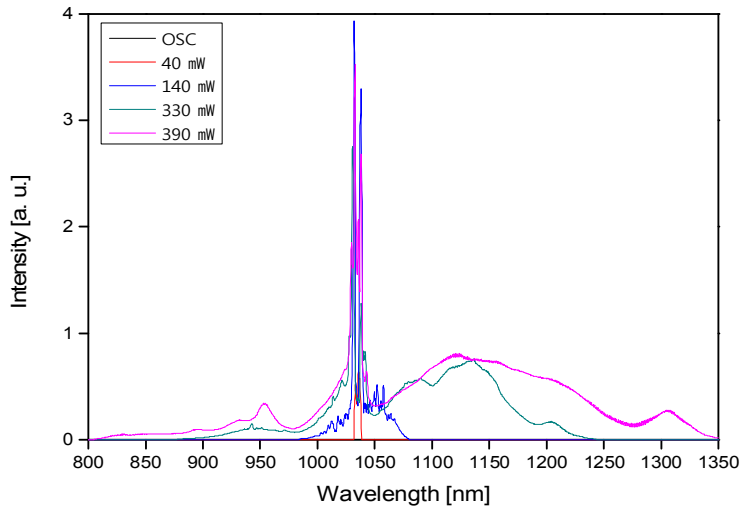
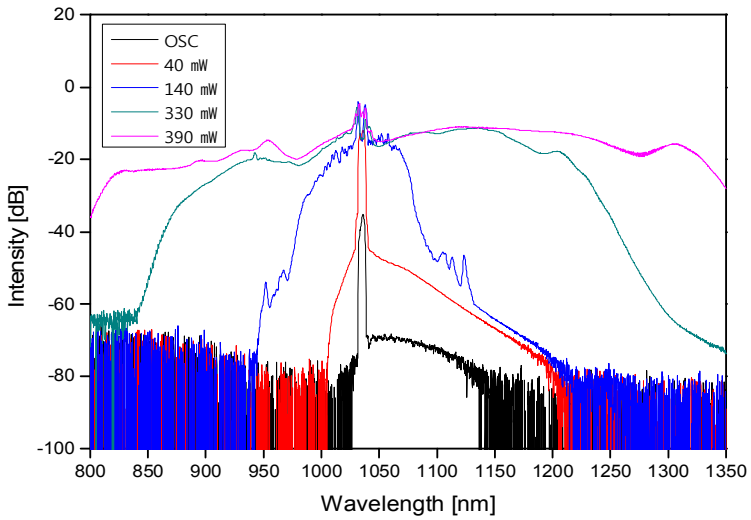


그림 3.25 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I)



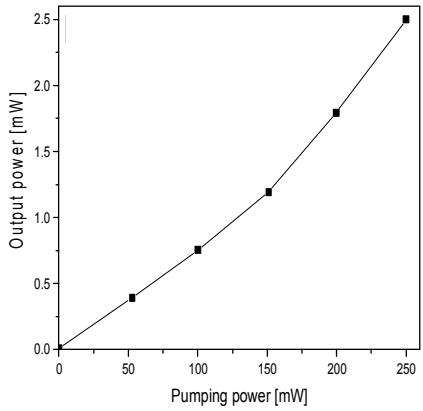
(a)



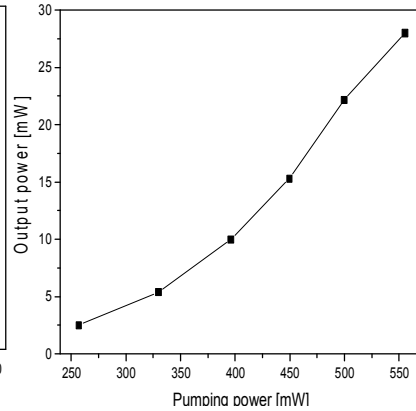
(b)

그림 3-26 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER I)

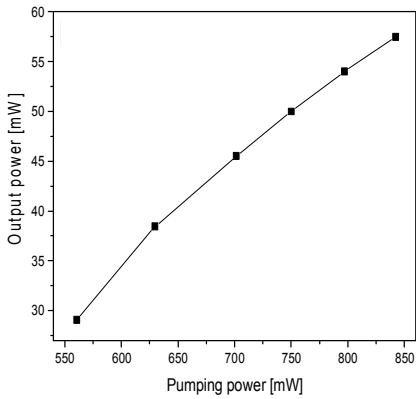
(a) 선형 스케일, (b) dB 스케일



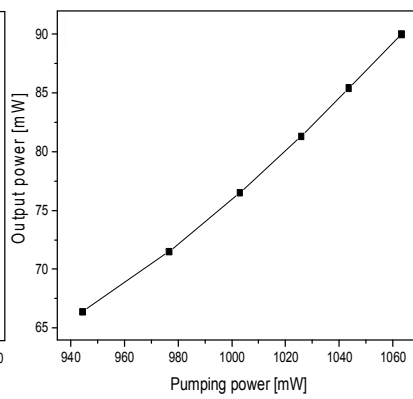
(a) 1단



(b) 2단



(c) 3단



(d) 4단

그림 3.27 각 증폭단별 펌핑 파워에 대한 PCF 출력 특성(LASER II)

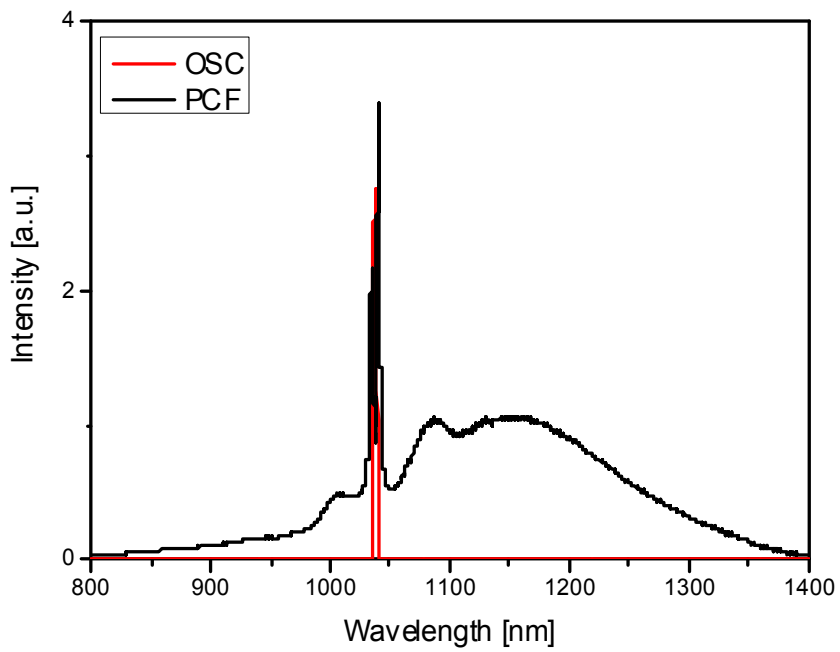
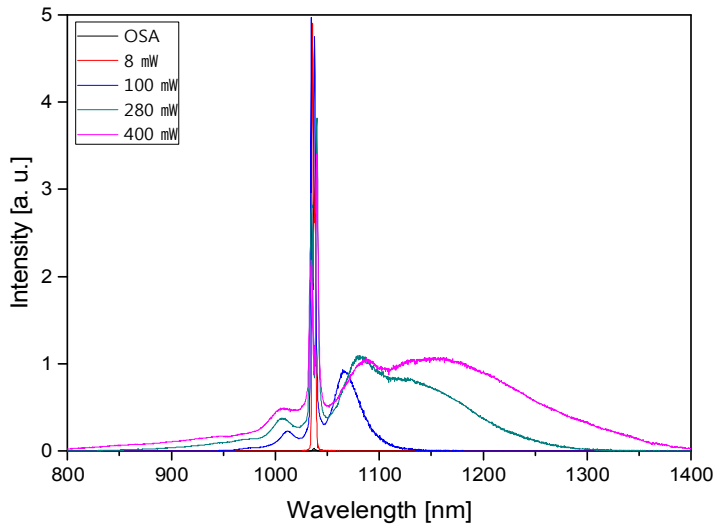
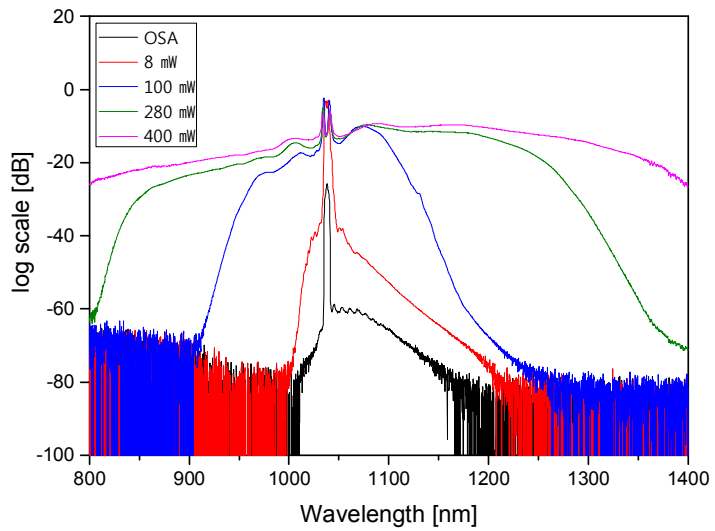


그림 3.28 공진기 출력과 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER II)



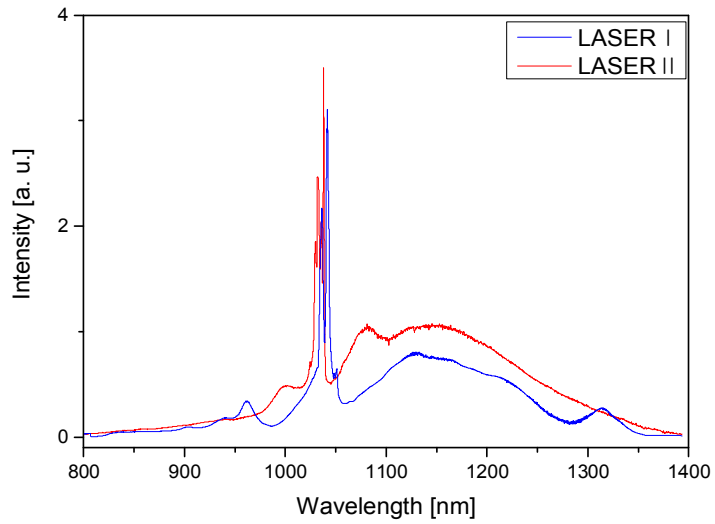
(a)



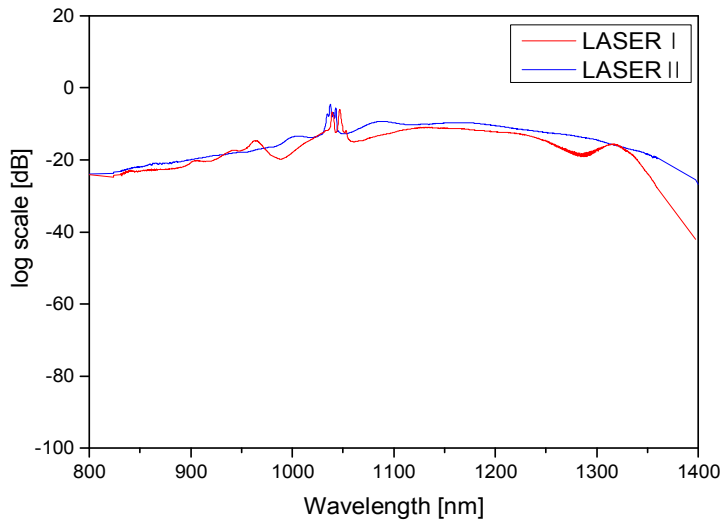
(b)

그림 329 입력 파워에 따른 PCF 통과 후 최종 출력의 스펙트럼(LASER II)

(a) 선형 스케일, (b) dB 스케일



(a)



(b)

그림 3.30 LASER I 과 LASER II 의 PCF 통과 후 최종 출력 스펙트럼

(a) 선형 스케일, (b) dB 스케일

제4장 결 론

본 논문에서는 반도체 포화흡수체를 이용한 모드 잠금된 광섬유 레이저 공진기와 4단 광섬유 증폭기를 제작하였다. 광자 결정 광섬유를 이용한 레이저 시스템의 출력 대역폭 확장 실험을 추가적으로 수행하였고 최종 제작된 광대역 광원의 출력 특성을 조사하였다.

제작한 레이저 공진기는 이득 매질인 이터븀이 첨가된 광섬유와 수동형 모드 잠금 소자인 포화흡수체를 이용하여 모드 잠금을 구현하였다. 포화흡수는 광의 세기가 증가함에 따라 광의 흡수가 감소하는 현상이다. 광의 세기가 약한 펄스의 가장자리 부분은 포화흡수체를 통해 흡수가 되어 큰 손실을 겪고 광의 세기가 강한 펄스의 중간 부분은 적은 손실이 일어나게 되어 결과적으로 좁은 폭의 펄스를 만들 수 있다. 본 논문에서 사용한 반도체 포화흡수체는 1030 nm의 파장대역에서 흡수가 일어나는 반도체 화합물인 InGaAs를 양자 우물 구조로 증착되어있어 이터븀을 이용한 모드 잠금 레이저 구현에 적합한 소자이다. 본 논문에서는 반도체 포화흡수체의 주요 사양인 흡수율이 다른 2종의 포화흡수체(투과율 64%/변조깊이 13%, 투과율 52%/변조깊이 25%)를 사용하여 2종의 레이저 공진기(LASER I, LASER II)를 제작하였고, 출력 특성을 비교하였다. LASER I의 경우 안정적인 모드 잠금 최대 출력은 12 mW이었으며, 펄스 반복률은 37 Mhz, 펄스 폭은 27 ps, 펄스 에너지는 0.3 nJ이었다. 공진기의 출력 스펙트럼은 1037 nm의 중심 파장에서 약 3 nm의 폭을 가졌다. LASER II의 경우 안정적인 모드 잠금 최대 출력은 20 mW이었으며, 펄스 반복률은 37 Mhz, 펄스 폭은 10 ps, 펄스 에너지는 0.5 nJ이었다. 공진기의 출력 스펙트럼은 1034 nm의 중심 파장에서 약 5 nm의 폭을 가졌다. 전체적으로 LASER I 보다 LASER II의 성능이 더 우수한 것으로 판단되었다.

광섬유 레이저 증폭기를 구성하고 2종의 레이저 공진기를 입력으로 사용하였을 경우에 대한 각각의 출력 특성을 조사하였다. 레이저 증폭기는 4단으로 구성되어 있으며 1단부터 4단까지의 증폭기 펌핑 파워를 증가시킬 경우, 증폭기 출력 파워 또한 증가하였다. 2종의 레이저 공진기 모두에 대해 평균 출력 파워는 약 400 mW이었다.

광자 결정 광섬유를 이용한 출력 대역폭 확대에 대한 연구를 수행하였다. 광자 결정 광섬유의 경우 입력시켜주는 펌프 광원이 높은 침투 출력을 가질수록 강한

비선형 효과에 의해 넓은 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 광대역 광원을 제작하기 위해 LASER I 과 LASER II 공진기 각각에 증폭단을 연결하고 20 m 길이의 광자 결정 광섬유를 사용하여 실험을 진행하였다. 각 레이저 모두 PCF 입력 파워를 점차적으로 증가시켰을 때 스펙트럼 대역폭 또한 증가함을 확인하였다. LASER II의 경우 약 800~1400 nm 대역의 스펙트럼 출력을 보여 약 800~1350 nm 대역의 스펙트럼 출력을 보인 LASER I 대비 약 50 nm정도 더 넓은 대역폭확대를 보였으며, 전체적인 평탄도 또한 우수하였다. 본 논문에서 제작된 레이저 시스템은 분광분해 간섭계의 광대역 광원으로 활용될 예정이다.

[참고문헌]

- [1] T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature* **4**, 564 (1960).
- [2] R. J Mears, L. Reekie, S. B. Poole and D. N. Payne, “Neodymium-doped silica single-mode fiber lasers,” *Electronics Letters* **21**, 738 (1985).
- [3] V. Cautaerts, D. J. Richardson, R. Paschotta and D. C. Hanna, “Stretched pulse Yb³⁺:silica fiber laser,” *Optics Letters* **22**, 316 (1997).
- [4] L. M. Zhao, D. Y. Tang and J. Wu, “Gain-guided solitono in a positive group-dispersion fiber laser,” *Optics Letters* **12**, 1788 (2006).
- [5] H. Lim, F. Ö. Ilday and F. W. Wise, “Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser,” *Optics Letters* **28**, 660 (2003).
- [6] A. Chong, J. Buckley, W. Renninger and F. Wise, “All-normal dispersion femtosecond fiber laser,” *Optics Letters* **14**, 10095 (2006).
- [7] R. R. Alfano and S. L. Shapiro, “Emission in the Region 4000 to 7000 Å Via Four-Photon Coupling in Glass,” *Phys. Rev. Lett* **24**, 584 (1970).
- [8] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin, “All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding,” *Optics Letters* **19**, 1547 (1996).
- [9] A. Apoloki, B. Povazay, A. Unterhuber, W. Drexler, W. J. Wadsworth, J. C. Knight and P. St. J. Russell, “Spectral shaping of supercontinuum in a cobweb photonic-crystal fiber with sub-20-fs pulses,” *Journal of the Optical Society of America B* **19**, 2165 (2002).
- [10] J. M. Dudley, G. Genty and S. Coen, “Supercontinuum generation in photonic crystal fiber,” *Reviews of Modern Physics* **78**, 1135 (2006).
- [11] K. M. Hilligsoe, T. V. Andersen, H. N. Paulsen, C. K. Nielsen, K. Molmer, S. Keiding, R. E. Kristiaes, K. P. Haes and J. J. Larsen, “Supercontinuum generation a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths”, *Optics Letters* **12**, 1045 (2004).
- [12] 김종두, 이기주, 전민용, 안성준, 최용규, “광자 결정 광섬유에서 펌프 광원의 파장과 입력파위에 따른 초 광대역 광원 발생의 특성,” *한국광학회지* **16**, 490 (2005).

- [13] H. W. Etzel, H. W. Gandy and R. J. Ginther, “Stimulated Emission of Infrared Radiation from Ytterbium Activated Silicate Glass,” *Applied Optics* **1**, 534 (1962).
- [14] M. J. F. Digonnet, *Rare-Earth-Doped Fibe Lasers and Amplifiers* (Marcel Dekker, New York, USA, 2001).
- [15] 엄성훈, *이터븀이 첨가된 광섬유 제작 및 이를 이용한 광섬유 레이저 특성 연구* (석사학위청구논문, 한양대학교, 대한민국, 2012).
- [16] R. Pashotta, J. Nilsson, A. C. Tropper and D. C. Hanna, “Ytterbium-doped fiber amplifiers,” *IEEE Journal of Quantum Electronics* **33**, 1049 (1997).
- [17] R. Royon, J. Lhermite, L. Sarger and E. Cormier, “High power, continuous-wave ytterbium-doped fiber laser tunable from 976 to 1120 nm,” *Optics Letters* **21**, 13818 (2013).
- [18] H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber and J. M. Dawes, “Ytterbium-doped silica fiber laser: versatile sources for the 1-1.2 μm Region,” *IEEE Journal of Photonics Society* **1**, 2 (1995).
- [19] J. Nilsson, J. K. Sahu, Y. Jeong, W. A. Clarkson, R. Selvas, A. B. Grudinin and S. Alam, “High Power Fiber Lasers: New Developments,” *SPIE Journal of Advances in Fiber Lasers* **4974**, 50(2003).
- [20] R. Paschotta, R. Häring, E. Gini, H. Melchior, U. Keller, H. L. offerhaus and D. J. Richardson, “Passively Q-switched 0.1-mJ fiber lasers system at 1.53 μm ,” *Optics Letters* **24**, 388 (1999).
- [21] 김병태, *레이저공학* (상학당, 서울, 대한민국, 2001).
- [22] D. Kuizenga and A. Siegman, “FM and AM mode-locking of the homogeneous laser-part 1: theory,” *IEEE Journal of Quantum Electronics* **6**, 709 (1970).
- [23] 모드잠금 이터븀 첨가 광섬유 레이저의 발진 특성 및 THz 응용연구(석사학위 청구논문, 충남대학교, 대한민국, 2017)
- [24] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, USA, 1986).
- [25] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser and U. Keller, “Q-switching Stability Limits of Continuous Wave Passive Mode Locking,” 1999 Optical Society of America. **16**, 46 (1999).
- [26] T. Brabec, Ch. Spielmann, P. F. Curley and F. Krausz, “Kerr Le Mode Locking,”

- 1992 Optical Society of America **17**, 1292 (1992).
- [27] V. J. Matas, T. P. Newson, D. J. Richardson and D. N. Payne, “Self-starting Passively Mode-locked Fiber Ring Soliton Laser Exploiting Nonlinear Polarization Rotation,” *Electron Letters*. **28**, 1391 (1992).
- [28] F. Ö. Ilday, F. W. Wise and T. Sosnowski, “High-energy Femtosecond Stretched Pulse Fiber Laser with a Nonlinear Optical Loop Mirror,” 2002 Optical Society of America **27**, 1531 (2001).
- [29] 김영진, *초고속 광학을 위한 광섬유 펨토초 레이저 고안정화 기술 개발* (일반 연구자지원사업보고서, 한국과학기술원, 대한민국, 2013).
- [30] C. Y. Chong, *Femtosecond Fiber Lasers and Amplifiers based on the Pulse Propagation at Normal Dispersion* (Ph.D. Thesis, Cornell University, USA, 2008).
- [31] D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak and M. L. Quiroga-Teixeiro, “Wave Breaking in Nonlinear-optical Fiber,” 1992 Optical Society of America **9**, 1358 (1992).
- [32] S. Gray and A. B. Grudinin, “Soliton Fiber Laser with a Hybrid Saturable Absorber,” 1996 Optical Society of America **21**, 207 (1996).
- [33] P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot and G. Mourou, “Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification,” *IEEE Journal of Quantum Electronics* **24**, 398 (1988).
- [34] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek and J. Aus der Au, “Semiconductor Saturable Absorber Mirror(SESAM’s) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid State Laser,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **2**, 435 (1996).
- [35] M. S. Alam, M. S. Rahman, M. R. Islam, A. G. Bhuiyan, and M. Yamada “Refractive index, absorption coefficient, and photoelastic cotant: key parameters of InGaAs material relevant to InGaAs-based device performance,” *Proceedings of 2007 IEEE 19th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, 343 (2007).
- [36] BATOP optoelectronics, “Saturable absorber,” <https://www.batop.de/products/saturable-absorber/saturable-absorber.html>.

- [37] 조형수, *광자 결정 광섬유의 제작 및 특성* (석사학위 청구논문, 경희대학교, 대한민국, 2006).
- [38] 조형수, 정해양, 김길환, 고동연, 이상배 “모세관 적층 방법에 의한 광자 결정 광섬유의 제작,” *한국광학회지*, **18**, 1 (2007).
- [39] S. Coen, A. Chau, R. Leonhardt, J. Harvey, J. Knight, W. Wadsworth and P. Russell, “Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fiber,” *2002 Optical Society of America* **19**, 753 (2002).
- [40] W. J. Wadsworth, N. Joly, J. C. Knight, T. A. Birks, F. Biancalana and P. St. J. Russell, “Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single mode photonic crystal fibers,” *2004 Optical Society of America* **12**, 299 (2004).
- [41] Z. Zhu and T. G. Brown, “Effect of frequency chirping on supercontinuum generation in photonic crystal fibers,” *2004 Optical Society of America* **12**, 689 (2004).
- [42] NKT photonics, “Nonlinear photonic crystal fibers,” <https://www.nktphotonics.com/lasers-fibers/product/nonlinear-photonic-crystal-fibers/>.
- [43] 김승우, 김승만, 김영진, 김윤석, 박지용, 박상욱, 한승희, “비선형 편광 회전과 포화흡수체의 결합 모드잠금에 의해 생성되는 고출력 광섬유 펄스 레이저 공진기,” 대한민국특허 출원번호 10-2012-0116127.
- [44] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, USA, 2006).

저작물 이용 허락서					
학 과	광기술공학과	학 번	20167444	과 정	석 사
성 명	한글 : 나 은 주 한문 : 羅 恩 姪 영문 : Eun Ju Na				
주 소	광주광역시 광산구 월곡로 40번길 9-18 1층				
연락처	E-MAIL : sk5137333@naver.com				
논문제목	한글 : 반도체 포화흡수체를 이용한 모드 잠금된 레이저 제작 및 광대역 광원 개발에 관한 연구 영어 : Fabrication of mode-locked optical fiber laser using semiconductor saturable absorber and study on broadband light source development				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 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. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(<input checked="" type="checkbox"/>) 반대(<input type="checkbox"/>)</p> <p style="text-align: center;">2018년 12월</p> <p style="text-align: center;">저작자: 나 은 주 (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center;">조선대학교 총장 귀하</p>					