



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](#)

2018년 2월
석사학위 논문

Eye safe 거리 측정기용으로 설계된
종편핑 구조 Er:Yb:Glass 레이저의
Q-스위치 펄스 출력 특성

조선대학교 대학원

광기술평학과

채 동 원

Eye safe 거리 측정기용으로 설계된 종편 펌 구조 Er:Yb:Glass 레이저의 Q-스위치 펄스 출력 특성

Q-switched pulse output characteristics of a
longitudinally pumped Er:Yb:Glass laser designed for
an eye safe rangefinder

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

광기술평학과

채 동 원

Eye safe 거리 측정기용으로 설계된 종편핑 구조 Er:Yb:Glass 레이저의 Q-스위치 펄스 출력 특성

지도교수 김 현 수

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

광기술훈학과

채 동 원

채동원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김진태 (인)

위원 조선대학교 교수 김현수 (인)

위원 조선대학교 교수 주기남 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	4
제1절 1.5 μm 파장의 Er:Yb:Glass 거리측정기 레이저	4
1.1 1.5 μm 파장의 Eye-safe 레이저	4
1.2 Er:Yb:Glass 매질 특성	5
1.3 Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도에 따른 레이저 효율	8
제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 광학계 해석	10
2.1 광선 전달 행렬 (ABCD 행렬)	10
2.2 ABCD 행렬을 이용한 안정조건 및 모드 크기	11
제3절 Q-스위칭	14
3.1 Q-스위칭	14
3.2 포화흡수체($\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$)를 이용한 수동형 Q-스위칭	17
제4절 Er:Yb:Glass 디스크 매질 열 분포 해석	18
제3장 실험 결과 및 논의	20
제1절 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 설계	20
1.1 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 구조	20
1.2 Er:Yb:Glass 매질에서 펌프광 크기 계산	21
1.3 Er:Yb:Glass 매질, 출력경에서 레이저 모드 크기 계산	23
1.4 준 연속발진(QCW) Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성	25
제2절 펌프광 크기 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 설계 및 열	

초점 길이 계산	28
2.1 펌프광 크기 조절을 위한 QCW 레이저 공진기 구성 및 출력 특성	29
2.2 펌프 에너지에 대한 레이저 매질의 열 초점 길이 측정	33
제3절 $Co^{2+} : MgAl_2O_4$ 를 이용한 Q-스위칭 된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성	37
3.1 Q-스위칭을 위한 중 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 ..	37
3.2 레이저 공진기 파라미터 변화에 따른 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성	38
3.3 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 소형화 및 출력 특성 분석	43
제4절 펌프광 펄스 반복률과 펄스폭변화에 따른 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성	47
4.1 레이저 매질에서 열 방정식 해석	47
4.2 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성 분석	50
제5절 반복률 증가에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성	57
 제4장 결 론	 60
 [참고문헌]	 62
 [감사의 글]	 65

그림 목 차

그림 1. Eye-safe 레이저에 대한 각막에서의 세기분포도(좌)와 각막 구조도(우) ·	1
그림 2. 거리측정기용 레이저의 파장에 따른 MPE(좌) 및 대기 흡수율(우) ······	2
그림 3. 전자기파 영역에 대한 눈의 투과 스펙트럼 ······	4
그림 4. 1% Er:Yb:Glass 흡수 스펙트럼 ······	6
그림 5. Er:Yb:Glass 매질의 에너지 전달과정과 준위도 ······	7
그림 6. 자유공간을 전파하는 일반적인 광선 경로 표현 ······	10
그림 7. 두 개의 렌즈를 전파한 펌프 광학계 광선 전달 ······	12
그림 8. Q-스위칭 펄스 발생 원리 ······	15
그림 9. 포화흡수체 Co:MALO의 특성, (a) 에너지 준위도 및 파장에 따른 투과율, (b) 광세기에 따른 비선형 특성 ······	17
그림 10. 디스크 매질의 냉각구조 방식 (a) 측면 냉각 방식, (b) 종면 냉각 방식 ······	18
그림 11. 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 구성도 ······	20
그림 12. Er:Yb:Glass 레이저 매질에 집속하는 펌프 광학계 구성도 ······	21
그림 13. 펌프 LD와 x_3 의 거리에 따른 Er:Yb:Glass 매질에서의 펌프광 크기 변화 (a) 코어직경 105 μm , (b) 코어직경 400 μm ······	22
그림 14. 두 개의 평면거울로 구성된 광 공진기 구조 ······	23
그림 15. 열 초점 길이(a)와 d_2 길이(b) 변화에 따른 레이저 매질에서의 레이저 공진 모드 빔 반경(ω_L) ······	24
그림 16. 열 초점 길이(a)와 d_2 길이(b) 변화에 따른 출력경에서의 레이저 공진 모드 빔 반경(ω_{LO}) ······	24
그림 17. (a) 광섬유 코어직경 105 μm , (b) 광섬유 코어직경 400 μm 에 결합된 펌프 LD의 출력 특성 ······	25
그림 18. 펌프 LD의 코어직경에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성 (a) 코어직경 105 μm , (b) 코어직경 400 μm ······	26
그림 19. 펌프 펄스폭 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 (a) 출력 특성과 (b) 레이저 방출 파장 ······	27

그림 20. 펌프 펄스 에너지와 펄스폭에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 지연시간 27

그림 21. 펌프광 크기 조절을 위한 QCW Er:Yb:Glass 레이저 공진기 29

그림 22. f_2 초점길이와 d_2 거리변화에 따른 매질내 펌프광 크기 계산 30

그림 23. 펌프광 크기 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성 30

그림 24. 펌프광과 레이저 모드 크기간의 관계 31

그림 25. 렌즈(f_2)의 초점거리 변화에 따른 매질표면과 매질내 펌프광 크기변화 32

그림 26. 펌프광 크기변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2) 32

그림 27. 레이저 매질의 열 초점 길이 측정을 위한 공진기 구조 33

그림 28. 평균 펌프파워 증가에 따른 출력경에서 측정된 레이저 모드 크기 34

그림 29. 평균 펌프파워 증가에 따른 Er:Yb:Glass 매질의 열 초점 길이 변화 35

그림 30. 펌프광 크기에 따른 평균 펌프파워 변화에 대한 열 초점 길이 변화 36

그림 31. Q-스위칭 펄스 발생을 위한 긴 펌프 광학계 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 구성 37

그림 32. 펌프광 크기 약 $525 \mu m$, 포화흡수체의 투과율에 따른 Q-스위칭 펄스 출력
특성 (a) Co:MALO 투과도 = 90%, (b) Co:MALO 투과도 = 93.5% 39

그림 33. 펌프광 크기 약 $700 \mu m$, 포화흡수체의 투과율에 따른 Q-스위칭 펄스 출력
특성 (a) Co:MALO 투과도 = 90%, (b) Co:MALO 투과도 = 93.5% 40

그림 34. 공진기 길이 변화에 따른 Q-스위칭 펄스폭 변화 41

그림 35. 오실로스코프로 측정된 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 단일 펄스열 42

그림 36. Q-스위칭 펄스 발생을 위한 소형화된 펌프 광학계 구조의 Er:Yb:Glass
레이저 구성 43

그림 37. 단일 렌즈를 이용한 짧은 펌프 광학계의 구조에서 공진 길이 변화에 따른
Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성(좌)과 발진 문턱 에너지(우) 44

그림 38. 단일 렌즈를 이용한 펌프 광학계에서 1 Hz의 반복률을 가진 Q-스위칭된
Er:Yb:Glass 레이저 빔질(M^2) 45

그림 39. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 측면 냉각 구조 47

그림 40. $\Delta T(0,0)$ 에서 펌프광 크기($\omega_0 = 0.3 mm$), 매질의 길이($L = 3 mm$)가 동일할 때,
펌프 펄스 반복률과 펄스폭, 매질의 반경(b)에 따른 온도 변화
(a) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 3 mm$;
(b) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1.5 mm, L = 3 mm$;
(c) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 2 mm, L = 3 mm$;

(d) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 2.5 mm, L = 3 mm$ 52

그림 41. $\Delta T(0,0)$ 에서 펌프광 크기($\omega_0 = 0.3 mm$), 매질의 반경($b = 1 mm$)이 동일할 때,
 펌프 펄스 반복률과 펄스폭, 매질의 길이(L)에 따른 온도 변화

(a) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 2 mm$;

(b) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 2.5 mm$;

(c) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 3 mm$;

(d) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 3.5 mm$ 53

그림 42. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 길이와 반경에 대한 온도 분포도 54

그림 43. $\Delta T(0,0)$ 에서 매질의 반경($b = 1 mm$)과 길이($L = 3.5 mm$)가 동일할 때,
 펌프 펄스 반복률과 펄스폭, 펌프광 크기(ω_0)에 따른 온도 변화

(a) $Q = 1 W, \omega = 0.1 mm, b = 1 mm, L = 3.5 mm$;

(b) $Q = 1 W, \omega = 0.3 mm, b = 1 mm, L = 3.5 mm$;

(c) $Q = 1 W, \omega = 0.5 mm, b = 1 mm, L = 3.5 mm$;

(d) $Q = 1 W, \omega = 0.75 mm, b = 1 mm, L = 3.5 mm$ 55

그림 44. 실험에 사용된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반복률 증가에 대한 온도 변화 56

그림 45. 반복률 증가에 대한 (a)열 초점 길이 변화와 (b)Q-스위칭 펄스 출력 특성 57

그림 46. 펌프광 반경에 따른 열 초점 길이 변화와 레이저 모드 크기 변화

(a) 펌프광 반경 0.2 mm, (b) 펌프광 반경 0.35 mm 58

표 목 차

표 1. Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도에 따른 매질의 종류	8
표 2. 펌핑 방식과 펌프 파장에 대한 Er:Yb:Glass 매질의 레이저 효율 특성	9
표 3. 광학계 구성에 대한 6개의 광선 전달 행렬식	11
표 4. 열 초점 길이 계산을 위한 Er:Yb:Glass 매질의 파라미터들	33
표 5. 3차원 열전달 방정식의 해를 얻기 위한 Er:Yb:Glass 디스크 매질 특성	50
표 6. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반경과 길이변화에 대한 경계조건의 해(β_m, η_m)	51

ABSTRACT

Q-switched pulse output characteristics of a longitudinally pumped Er:Yb:Glass laser designed for an eye safe rangefinder

Dong Won Chae

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

An laser-diode pumped Er:Yb:Glass laser is one of a useful range finder light source which emits at the eye-safe wavelength region of 1.54 μm . The main advantage of a laser-diode pumped Er:Yb:Glass laser is its good efficiency, compactness, and low cost. However an Er:Yb:Glass laser has the drawback of the relatively small emission cross section and low thermal conductivity. This limits the high-average power of a Q-switched Er:Yb:Glass laser. Hence to improve the performance of a Q-switched Er:Yb:Glass laser, it is necessary to investigate the effect of Er:Yb:Glass material thermal-optic property and laser parameters on a laser output characteristics.

In this thesis, we design a longitudinally pumped Er:Yb:Glass laser which operates in a Q-switching mode by a Co:MALO saturable absorber. To optimize the laser output, we analyzed the effect of Er:Yb:Glass material thermal-optic property and laser parameters on laser output characteristics. And we theoretically analyzed the transient temperature dependence of an Er:Yb:Glass laser on a pumping beam repetition rate. By using the optimized laser parameters, we obtained the output pulse of 1.3-mJ energy with a pulse width of 15 ns and a M^2 value of 1.52 from our designed Er:Yb:Glass laser.

제1장 서 론

거리측정기용 레이저는 1970년대 가시광선 범위(694 nm)의 펄스 모드로 작동한 Q-스위칭된 루비 레이저를 시작으로 처음 사용되면서 수년에 걸쳐 근적외선 영역(1064 nm)의 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저의 개발로 이어졌다.^[1] 하지만 초기의 루비 레이저는 가시광선(380~780 nm)영역의 과도한 방사 노출로 망막에 광 화학적 및 열적 손상을 유발하였고, Nd:YAG 레이저는 780~1400 nm의 근적외선 파장 영역으로 각막과 렌즈를 침투하여 백내장을 일으키는 주요 원인으로 작용하였다. 이러한 문제로 인해 거리측정기용 레이저에 대한 눈에 대한 안전성이 필수적으로 요구되면서 1990년대 이래로 Eye-safe 거리측정기용 레이저가 개발되었다.^[2] Eye-safe 레이저는 전자기파에 대한 눈의 투과 스펙트럼 특성상 각막과 렌즈에 흡수되어 망막에 손상을 주지 않는 1.4 μm 파장 이상의 레이저로 거리측정기나 레이저 레이더(Lidar), 통신 및 대기 관측 등에 많이 응용되고 있다.^[3,30] 1.4 μm 파장 이상의 주요 Eye-safe 레이저는 1.5 μm 파장영역의 Er:Glass 레이저, 2 μm 파장영역의 Tm:YAG 레이저, 10 μm 파장영역의 CO_2 레이저 등이 있다. 이중 10 μm 파장의 CO_2 레이저는 그림 1과 같이 강한 에너지로 각막과 렌즈에 집중적으로 흡수되면서 각막의 손상을 초래하지만 1.5 μm 파장의 Er:Glass 레이저는 각막 표면에 대해 흡수가 훨씬 낮아 빛은 더 깊이 침투하고 열이 분산되어 CO_2 레이저보다 각막 손상이 훨씬 더 적다.^[4]

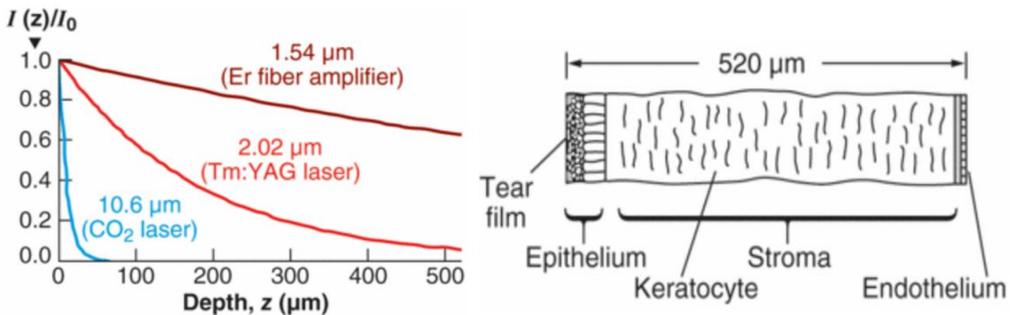


그림 1. Eye-safe 레이저에 대한 각막에서의 세기분포도(좌)와 각막 구조도(우)^[4]

뿐만 아니라 1.5 μm 파장의 레이저는 그림 2와 같이 눈에 대한 최대 허용 노출 (Maximum permissible Exposure)이 10 μm 레이저에 비해 약 100배 높고, 2 μm 레이저보다 10배나 높은 장점이 있어 눈에 훨씬 더 안전하며 대기 투과율이 약 90%로 상당히 높아 거리측정기용 레이저로써 많은 장점을 가진다.^[2,5]

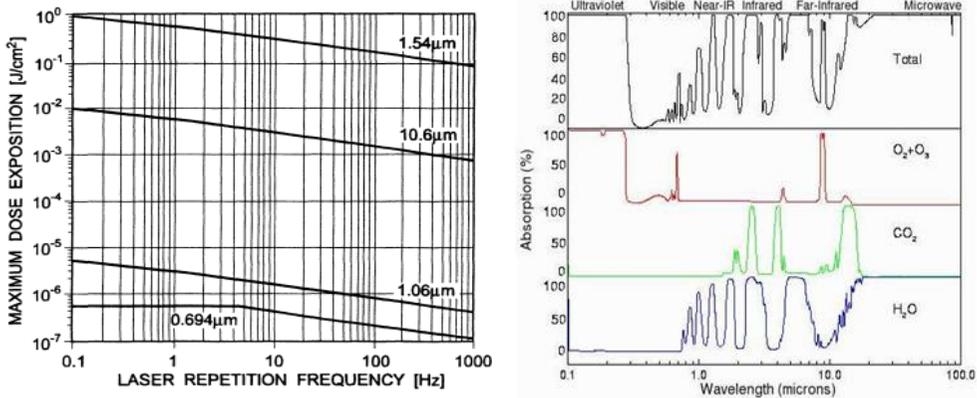


그림 2. 거리측정기용 레이저의 파장에 따른 MPE(좌) 및 대기 흡수율(우)^[2,5]

이러한 1.5 μm 파장의 레이저 빔을 얻기 위한 대표적인 방법으로는 활성 매질에 희토류 이온이 첨가된 Er:Yb:Glass 레이저와 Nd:YAG 레이저를 씨앗(seed)으로 사용하여 비선형 광학을 이용한 유도 라만 산란(Stimulated Raman Scattering), 광 매개 발진(Optical Parametric Oscillator), 등이 있다.^[3,6] 이 중 비선형 광학을 이용한 유도 라만 산란, 광 매개 발진 레이저는 1.5 μm 의 거리측정기용 레이저로 가장 많이 사용되어 왔으며 높은 펄스 에너지와 고반복률의 작동이 가능하여 군사 분야의 레이저로 많이 사용되어왔지만 낮은 에너지 변환 효율로 인해 높은 펌프 에너지가 필요로 하며 광학부품이 많이 사용되므로 가격이 비싸고 소형화하기 힘든 단점이 있다.^[29] 반면 Er^{3+} 이온이 첨가된 Er:Yb:Glass는 레이저 방출 파장이 1.5 μm 로 높은 펌핑 효율과 낮은 문턱에너지를 가지며 광학부품이 단순하고 가격 또한 저렴하여 소형화된 거리측정기용 레이저로 사용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 우수한 화학적 내구성, 높은 광학 품질, 큰 에너지 저장특성으로 인해 최근에 많은 관심을 받고 있다.^[7] 그러나 Glass로 구성된 레이저 매질의 물질 특성상 낮은 열전도도와 쉬운 열적 손상으로 인해 고반복률로 동작하기 어렵다는 단점이 있지만 이

런 단점에도 불구하고 최근 거리측정 분야에 있어서 Er:Yb:Glass 레이저의 사용은 크게 증가하였고, 장거리 측정을 위한 높은 첨두 출력과 빔질을 개선하기 위한 집중적인 연구가 진행 중이다.^[8] 특히 저반복률에서 지상용 거리측정기로 활용하기 위해 고효율, 고품질의 Er:Yb:Glass 레이저 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다.

레이저 다이오드로 펌핑되는 Er:Yb:Glass 레이저는 펌핑 구조에 따라 횡 펌핑 구조와 종 펌핑 구조로 나뉜다. 횡 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저는 넓은 면적을 통해서 펌핑되는 구조로 많은 펌핑 에너지를 공급할 수 있어 고에너지의 출력과 수십 Hz의 반복률을 갖도록 설계할 수 있다.^[7] 그러나 낮은 펌핑 효율과 부피가 크다는 단점을 가지고 있다. 반면에 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저는 좁은 영역에 펌프광을 집속을 시켜 펌핑 효율과 레이저 빔질을 향상시키는 장점이 있지만 종 펌핑 구조에서 펌프광의 강한 집속에 의한 레이저 Glass 매질의 열적 손상이 발생하므로 이를 해결하기 위해서는 레이저 매질의 열 확산 분석과 레이저 공진 모드 분석을 기반으로 하는 레이저 설계가 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 Eye safe 거리측정용 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력을 최적화하기 위한 레이저 매질의 열 해석과 레이저 공진기 길이, 레이저 거울의 반사율, Q-스위처 투과도, 펌프광 크기 등 레이저 공진기 설계를 위한 파라미터들에 대한 분석을 수행하였다. 본 논문에서 최적화 연구를 통해 제작된 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저는 14 ns 펄스폭과 1 mJ 이상의 출력을 가지며 반복률은 1 Hz 이상, 빔질은 $M^2=1.52$ 값을 가진다.

제2장 이론

제1절 1.5 μm 파장의 Er:Yb:Glass 거리측정기 레이저

1.1. 1.5 μm 파장의 Eye-safe 레이저

1.5 μm 파장의 레이저는 그림 3과 같이 눈의 투과 스펙트럼 특성상 각막과 렌즈에 흡수되어 망막에 손상을 주지 않아 거리측정기나 레이저 레이더(Lidar), 통신, 군사 분야의 레이저로 많이 응용되고 있다.^[7]

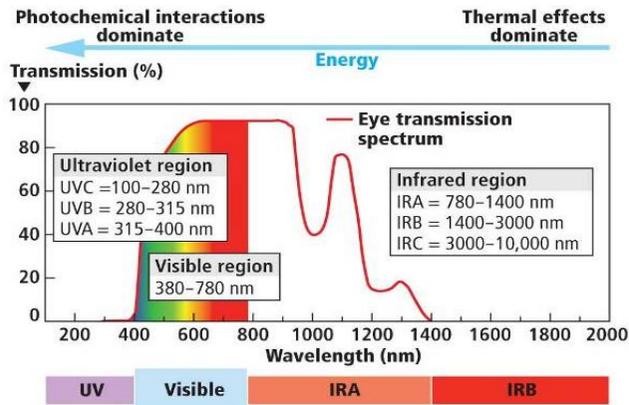


그림 3. 전자기파 영역에 대한 눈의 투과 스펙트럼^[9]

1.5 μm 의 "Eye-safe" 파장의 방사를 위한 거리측정용 레이저는 주로 TOF(Time Of Flight)의 방식으로 거리를 측정하며 크게 Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용한 광매개 발진(Optical Parametric Oscillator)과 유도 라만 산란(Stimulated Raman Scattering)레이저, 최근에 개발된 고체 매질에 희토류 이온을 첨가한 Er:Yb:Glass 레이저가 있다.^[10,11] 일반적으로 1.5 μm 파장을 위해 사용되는 OPO, SRS 방법은 비선형 크리스탈(KTP)을 이용하여 사용되지만, 파장 변환을 위해 또 다른 레이저 광원이 필요하게 되어 광학 공진기가 커지는 것과 파장 변환으로 인한 효율이 감소하는 문제가 있어 모듈의 소형화와 레이저 효율을 향상시키는 방법으로 최근에 Er:Yb:Glass 레이저가 주목받고 있다.^[10,11] Er:Yb:Glass 레이저는 OPO, SRS 레이저와는 다르게 활성매질의 높은 흡수로 인해 효율이 높아 소형화된 모듈

로 고효율의 펄스에너지를 구현할 수 있는 이점이 있다.

1.2. Er:Yb:Glass 매질 특성

최초의 Er:Glass 레이저는 1965년 Snitzer와 Woodcock이 규산염 유리에서 Er^{3+} 이온의 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 준위의 천이과정으로부터 $1.5 \mu m$ 파장의 방사를 얻음으로써 처음 보고 되었다.^[3,12,13] 이후 $1.5 \mu m$ 방사를 위한 Er:Glass 레이저의 효율 향상을 위한 개발이 활발히 이루어졌으며 레이저 매질로 사용되는 유리종류에 따른 특성에 대한 연구가 수행되었다.^[3] 레이저 매질로 사용되는 유리는 크게 규산염 기반의 유리나 인산염 기반의 유리로 나뉜다. 규산염 유리는 높은 화학적 안정성과 기계적 특성 외에도 낮은 열팽창 및 우수한 광 전달 특성의 장점을 가지고 있지만 농도 퀀칭(Concentration quenching)현상과 낮은 용해도 등에 의해 희토류원소 도핑에 제한이 있고, 이로 인해 레이저 파장에 대한 유도방출 단면적이 낮아 $1.5 \mu m$ 방사에서 레이저 효율이 떨어지는 문제가 있다. 반면 인산염 유리의 Er:Glass 레이저는 규산염 유리에 비해 희토류 이온에 대한 용해도가 매우 높으며 상위 준위 수명시간의 농도 퀀칭이 낮아 활성이온에 대한 고농도 도핑이 가능한 장점이 있어 고체 레이저 활성매질로 많이 사용되고 있다. 하지만 여전히 고체 레이저 활성매질로 사용되는 Er:Glass 매질은 Er이온의 도핑농도가 제한적 이므로 일반적으로 976 nm InGaAs 기반의 레이저 다이오드(LD)에 의한 펌프 흡수 단면적($\sim 1 \times 10^{-21} cm^2$)이 상당히 작다.^[3] 이로 인해 펌프 에너지를 흡수하는 문턱 에너지가 높다는 단점이 있어 높은 펌핑 문턱에너지 문제를 해결하기 위해 일반적으로 Er^{3+} 이온은 Yb^{3+} 이온과 함께 도핑하여 Er:Yb:Glass 매질로 많이 사용한다.^[3]

Er:Yb:Glass 매질은 펌프 흡수 파장에 대한 펌프 흡수를 높이기 위해 상대적으로 Yb^{3+} 이온이 Er^{3+} 이온에 비해 높게 도핑하며, 매질의 흡수계수는 Yb^{3+} 이온의 도핑 농도에 따라 달라진다. 이는 $Yb^{3+} \rightarrow Er^{3+}$ 이온으로의 비복사 에너지 전달로 인한 것으로 펌프 흡수 파장에 대한 Er^{3+} 이온보다 Yb^{3+} 이온의 흡수 단면적($\sim 1.4 \times 10^{-20} cm^2$)이 상당히 높기 때문에 Er^{3+} 이온에 의한 펌프 흡수를 무시할 수 있다.^[3,14,15] 그림 4는 실험에 사용된 1% Er:Yb:Glass(CLASER. Inc) 매질의 Yb^{3+} 이온의 도핑농도 $2 \times 10^{21} / cm^3$ 에 대한 흡수 스펙트럼을 보여준다.

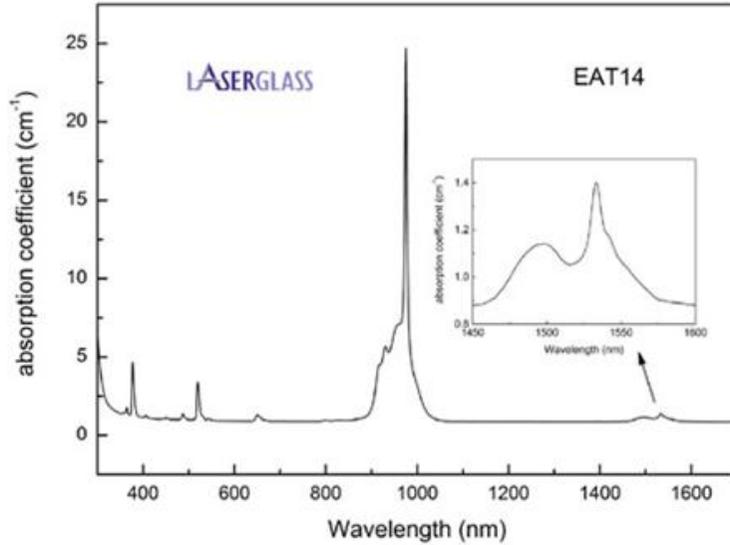


그림 4. 1% Er:Yb:Glass 흡수 스펙트럼^[16]

실험에 사용된 CLASER사의 1% Er:Yb:Glass 매질의 흡수계수는 976 nm 파장에서 약 25 cm^{-1} , 940 nm 파장에서 약 7.5 cm^{-1} 를 가진다. 그림 4에서 보는 바와 같이 레이저 펌프 파장은 976 nm에서 가장 효율적인 흡수를 하지만 중심파장에 대한 흡수 스펙트럼의 선폭이 너무 좁아 펌핑용 레이저 다이오드의 온도에 따른 중심 파장 이동으로 인해 흡수가 효율적으로 이루어지지 않는다. 따라서 다양한 온도범위($-30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$)에 대한 안정적인 펌프 흡수 효율을 유지하기 위해서는 InGaAs 기반의 940 nm 파장의 레이저 다이오드(LD)로 펌핑하는 것이 용이하다.

Er:Yb:Glass는 준 3준위로 Yb^{3+} 이온의 $^2F_{5/2}$ 준위와 Er^{3+} 이온의 $^4I_{11/2}$ 준위의 스펙트럼 겹침이 좋기 때문에 펌프 파장에 대해 흡수된 Yb^{3+} 이온은 대부분 Er^{3+} ($^4I_{11/2}$) 이온으로 전달된다. 그림 5는 Er:Yb:Glass 매질의 에너지 전달과정과 준위도를 나타낸다.^[17]

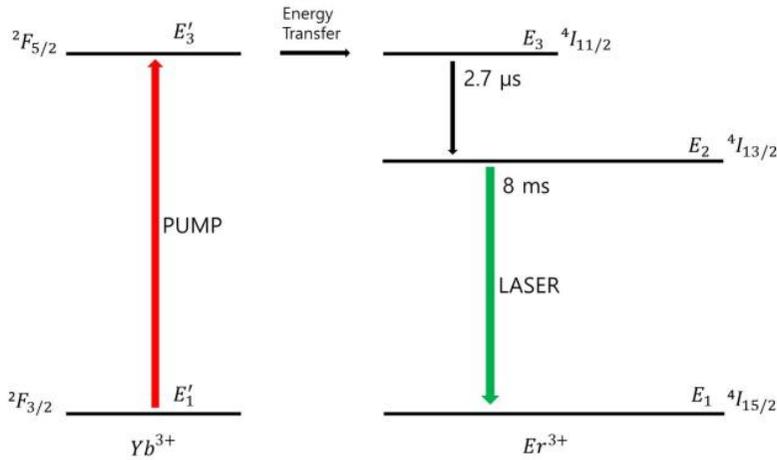


그림 5. Er:Yb:Glass 매질의 에너지 전달과정과 준위도

Yb^{3+} 에서 Er^{3+} 이온으로의 에너지 전달 계수(k)는 레이저 성능을 결정하는 중요한 변수로 일반적으로 $2 \times 10^{-22} m^3 s^{-1} \sim 5 \times 10^{-22} m^3 s^{-1}$ 값을 가진다. 에너지 전달 계수는 레이저 방출의 감쇠시간(decay time)과 간단한 Rate equation (1)~(3)으로 구할 수 있다.^[17]

$$\frac{dN'_3}{dt} = \sigma_p N'_p \Phi_p(r, t) - k N'_3 N_1 - \gamma_{Yb} N'_3 \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = k N'_3 N_1 - \gamma_{31} N_3 - \gamma_{32} N_3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_{32} N_3 - \gamma_{21} N_2 - (N_2 - N_1) \sigma_e \Phi_1(r, t) \quad (3)$$

위 식에서 $\sigma_p N'_p \Phi_p(r, t)$ 는 펌프 항, $k N'_3 N_1$ 은 $Yb^{3+} \rightarrow Er^{3+}$ 으로의 전달된 에너지 항, $\gamma_{Yb} N'_3$ 은 Yb^{3+} 이온의 밀도 감쇠율, $\gamma_{ij} N_i$ 은 $i \rightarrow j$ 준위로의 밀도 감쇠율, $(N_2 - N_1) \sigma_e \Phi_1(r, t)$ 는 유도 방출, σ_p , σ_e 는 각각 흡수 단면적과 유도 방출 단면적, k 는 $Yb^{3+} \rightarrow Er^{3+}$ 이온으로의 에너지 전달 계수, $\Phi_p(r, t)$ 는 펌프 광자 유속(Pump photon flux), $\Phi_1(r, t)$ 는 레이저 광자 유속(Laser photon flux)을 의미한다.^[17]

1.3. Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도에 따른 레이저 효율

Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도는 레이저 효율에 있어 중요한 변수로 작용하기 때문에 효율적인 레이저 설계를 위해서는 매질의 도핑농도에 대한 분석이 필수적이다. 도핑농도에 따른 Er:Yb:Glass 매질은 러시아 모스크바 아카데미센터의 물리학회에서 레이저 재료 및 기술을 연구하는 Denker's 교수에 의해 Yb^{3+} 이온의 도핑농도를 상대적으로 높게 만들거나 Er^{3+} 이온의 도핑농도를 상대적으로 높게 제작함으로써 최초로 보고되었다.^[18] 일반적인 에너지 전달과정을 보면 Yb^{3+} 이온에서 대부분 흡수를 하여 Er^{3+} 이온으로 전달하기 때문에 Yb^{3+} 이온의 도핑농도가 높을수록 레이저 효율이 높다. 표 1은 Er^{3+} , Yb^{3+} 이온의 도핑농도에 따른 매질의 종류를 나타낸다.

표 1. Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도에 따른 매질의 종류^[18]

매 질	Yb 도핑율	Er 도핑율
GLASS-1	$4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
GLASS-2	$4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$0.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
GLASS-3	$4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$0.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
SELG-1	$1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$0.75 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
SELG-2	$1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
SELG-3	$1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	$1.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

표 1에서 편의를 위해 상대적으로 Yb^{3+} 이온의 도핑율이 높은 매질을 GLASS, 상대적으로 Er^{3+} 이온의 도핑율이 높은 매질을 SELG로 명명하였다. 매질의 종류에 따르면 GLASS 매질은 Yb^{3+} 이온의 도핑율이 Er^{3+} 이온의 도핑율보다 약 26~130배 높고, SELG 매질은 약 10~23배 높다. 이러한 도핑 농도에 따른 Er:Yb:Glass 매질은 펄핑 방식(CW, QCW)과 펌프 파장(974, 940 nm)에 대한 효율이 다르게 나타난다. 펄핑 방식과 펌프파장에 대한 GLASS(1, 2, 3) 매질과 SELG(1, 2, 3) 매질의 레이저의 특성은 표 2에 기술하였다.

표 2. 펌핑 방식과 펌프 파장에 대한 Er:Yb:Glass 매질의 레이저 효율특성^[18]

Material	Pump wavelength [nm]	CW		QCW	
		Slop efficiency [%]	Threshold [mW]	Slop efficiency [%]	Threshold [mW]
Glass-1	939	12.81	257	14.53	157
	974	20.37	255	23.11	160
Glass-2	939	24.03	116	23.75	80
	974	20.78	150	25.11	93
Glass-3	939	18.88	113	19.37	67
	974	10.33	217	10.57	125
SELG-1	939	14.50	106	14.50	71
	974	24.32	122	24.99	75
SELG-2	939	10.72	164	12.03	99
	974	22.79	151	24.02	96
SELG-3	939	9.76	245	10.19	156
	974	22.29	177	23.90	109

표 2로부터 Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도에 따른 레이저 효율은 974 nm 펌프 파장에 대해 SELG-1 매질이 가장 높고, 940 nm 펌프 파장에 대해 GLASS-2 매질이 가장 높다. 펌핑 방식에 대한 특성은 일반적으로 QCW모드가 CW모드에 비해 효율이 좋다.^[20] 이는 그림 2에서 본바와 같이 974 nm 펌프 파장에서는 매질의 흡수계수가 높아 낮은 Yb³⁺ 이온 농도에서도 효율적인 흡수가 가능하지만, 940 nm 펌프 파장에서는 매질의 흡수계수가 낮기 때문에 효율적인 펌프에너지 흡수를 위해서 높은 Yb³⁺ 이온의 농도를 도핑 해야 함을 의미한다.

제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 광학계 해석

2.1. 광선전달 행렬 (ABCD 행렬)

입사면(z_1)에 대해 θ_1 의 각도를 가지고 전파하는 광선은 입사면에서 근축광선의 높이(y_1)와 전파거리만큼 진행한 후 출사면(z_2)에서 광선의 높이(y_2)와 출사각(θ_2)에 대한 전달 행렬로 표현할 수 있다. 광학 매질을 전파하는 일반적인 광선 경로는 그림 6과 같다.^[19,20]

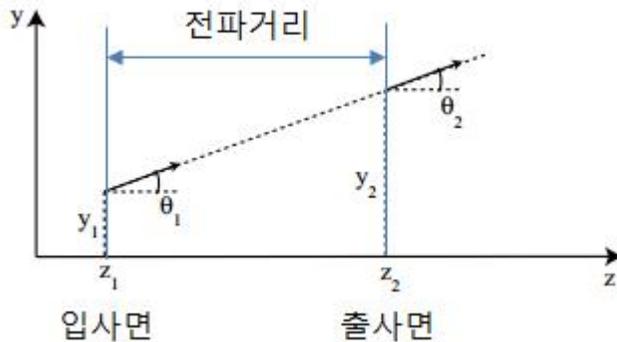


그림 6. 자유공간을 전파하는 일반적인 광선 경로 표현

자유공간을 전파한 광선의 경우 출사면에서 광선의 높이 y_2 는 입사면에 대한 광선의 높이와 근축광선의 기울기로 주어진다. 광학계의 굴절률이 일정한 공간을 전파거리만큼 진행하므로 광축에 대한 근축광선의 기울기는 $\theta_1 = \theta_2$ 이므로 변하지 않는다. 따라서 출사면에서의 광선의 높이는 근축광선을 이용하여 표현하면 식(4)와 같다. 편의를 위해 입사면으로부터 출사면까지의 거리를 d 로 정의하였다. 이 관계를 행렬적으로 표현하면 식(5)과 같다.^[19,20]

$$y_2 = y_1 + d\theta_1 \tag{4}$$

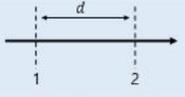
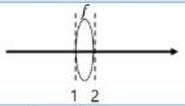
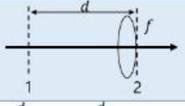
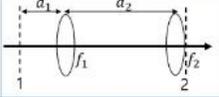
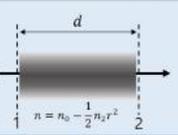
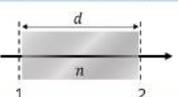
$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

이러한 2x2 행렬을 $ABCD$ 광선 전달 행렬이라고 한다. $ABCD$ 행렬식은 1을 만족 한다.

2.2 ABCD 행렬을 이용한 안정조건 및 모드 크기

레이저 공진기 반사경 사이를 왕복하는 광선은 주기적으로 다른 광학계를 통과 한다. 각 광학소자를 통과하는 광선의 추적은 앞에서 언급한 $ABCD$ 행렬을 이용해서 구할 수 있다. 대표적인 $ABCD$ 광선 전달 행렬식은 표 3에 나타내었다.

표 3. 광학계 구성에 대한 6개의 광선 전달 행렬식

NO	광학계	광선 전달 행렬식
1		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$
2		$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix}$
3		$\begin{vmatrix} 1 & 0 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 & -\frac{d}{f} \end{vmatrix}$
4		$\begin{vmatrix} 1 - \frac{d_2}{f_1} & d_1 + d_2 \frac{d_1 d_2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_1} - \frac{d_2}{f_1} - \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} \end{vmatrix}$
5		$\begin{vmatrix} \cos \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \frac{1}{\sqrt{n_0 n_2}} \sin d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \\ -\sqrt{n_0 n_2} \sin d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \cos d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \end{vmatrix}$
6		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$

광선 입사면에서 광학소자의 $ABCD$ 행렬을 M_1 이라고하고 순차적으로 k번째 광학소자의 $ABCD$ 행렬을 M_k 라고하면 n번째 광학소자를 통과한 후의 광선의 높이 (y_n)와 출사각(θ_n)은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} y_n \\ \theta_n \end{pmatrix} = M_n \cdots M_k \cdots M_1 \begin{pmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

각 광학 소자들의 행렬곱은 n개의 광학소자들로 이루어진 광학시스템에 대한 ABCD 광선 전달 행렬이 된다. 광학시스템에 대한 행렬 성분은 가우시안 빔이 광학 시스템에 입사했을 때의 전파 특성을 결정해주는 주요한 매개 변수가 된다. 예를 들면 그림 7과 같은 두 개의 렌즈로 구성된 펌프 광학계에 의한 펌프광 크기는 ABCD 행렬성분을 이용해서 구할 수 있다. 식(6)은 두 개의 렌즈를 전파한 광선의 ABCD 행렬식이다.

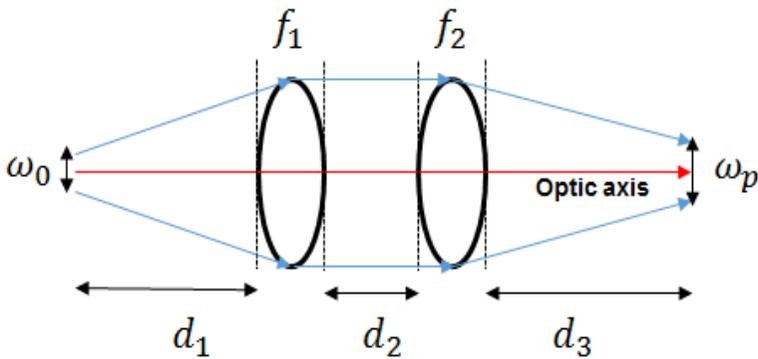


그림 7. 두 개의 렌즈를 전파한 펌프 광학계 광선 전달

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

두 개의 렌즈를 전파한 펌프광학계 구조에서 펌프 빔의 반경(ω_p)은 식(6)을 이용해서 펌프광 크기를 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_p = \sqrt{(A\omega_0)^2 + \left(\frac{\lambda B}{\pi\omega_0}\right)^2} \quad (7)$$

또한 레이저 공진기의 안정조건과 레이저 공진기의 모드크기를 공진기 내부의 광학소자들의 ABCD 행렬을 이용해서 구할 수 있다. 공진기를 해석하기 위해 먼저

레이저 광선이 왕복했을 때의 각 광학소자의 $ABCD$ 행렬들의 총 곱을 구한다. 행렬곱을 통해 얻는 $ABCD$ 행렬성분은 공진기의 광학적 특성을 결정짓는 주요 요소가 된다. 즉, 공진기 안정 조건은 식 (8)을 만족해야 한다. 레이저 공진기에 의해 형성된 TEM_{00} 모드의 크기는 식 (9)를 만족한다.^[19,21]

$$-1 < \frac{1}{2}(A + D) < 1 \quad (8)$$

$$\omega_L^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{|B|}{\sqrt{4 - (A + D)^2}} \quad (9)$$

여기서 빔 모드 크기 ω_L 은 공진기에 대한 총 $ABCD$ 행렬을 구하기 위해 사용한 첫 번째 광학소자 위치에서 빔 반경을 나타낸다. 다른 위치에서 빔의 크기를 구하고 싶으면 $ABCD$ 행렬곱의 시작점을 빔의 크기를 알고 싶은 위치에 있는 광학소자의 $ABCD$ 행렬을 시작점으로 하여 총 $ABCD$ 행렬의 곱을 구하고 식 (9)에 대입하면 된다.

제3절 Q-스위칭

3.1 Q-스위칭^[22]

Q-스위칭은 광학 공진기의 손실을 증가시켜 이득 계수가 발진 문턱 값보다 아주 큰 값이 되어 순간적으로 강한 레이저를 발진 시킬 수 있는 기술을 Q-스위칭이라 하며, Q-스위칭 기술로 레이저 펄스를 발생시키는 레이저를 Q-스위칭 레이저라고 한다. Q-스위칭 레이저 펄스 동작은 광학 공진기의 Q값에 의해 이루어진다. Q값은 공진기 내에 저장된 에너지와 주기 당 손실된 에너지 비율로 정의되며, Q값이 작을수록 큰 손실값을 의미한다. Q-스위칭 펄스를 발생시키기 위해서는 펌프광에 의해 레이저 매질이 여기 되는 동안 인위적으로 광 공진기의 Q값을 작게 하고 반전 밀도가 충분히 커졌을 때 Q값을 크게 만들면 Q-스위칭이 일어난다. Q-스위칭 펄스의 에너지 함량, 첨두 출력, 상승 및 하강시간 등의 형성은 레이저 율 방정식(Rate equation)으로부터 얻을 수 있다. Q-스위칭 펄스 형성에 대한 레이저 공진기 내의 광자 밀도 변화율은 식(10)와 같이 주어지며 여기준위의 시간에 따른 반전밀도량은 식(11)와 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left(c \sigma_e n \frac{l}{L} - \frac{\epsilon}{t_r} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi \sigma_e c \quad (11)$$

위 식에서 c 는 빛의 속도, σ_e 는 유도방출 단면적, l 은 레이저 매질의 길이, L 은 공진기 길이, ϵ 은 공진기내의 손실, $t_r = 2L/c$ 은 공진기내 광자의 왕복 시간, $\gamma = 1 + g_2/g_1$ 에서 g_i 는 i 준위의 축퇴(degeneracy)량이다. 공진기내의 손실(ϵ)은 출력경 반사율의 함수로 식(12)로 주어진다.

$$\epsilon = -\ln R + \delta + \zeta(t, \phi) \quad (12)$$

식(12)에서 첫 번째 항은 출력경 반사율(R)에 의해 결정되는 출력 결합 손실, 두 번째 항은 산란과 회절, 흡수와 같은 모든 부수적인 손실, 세 번째 항은 Q-스위칭 펄스 발생으로

인한 공진기 손실을 나타낸다. 그림 8은 Q-스위칭 펄스 발생 원리를 보여준다.

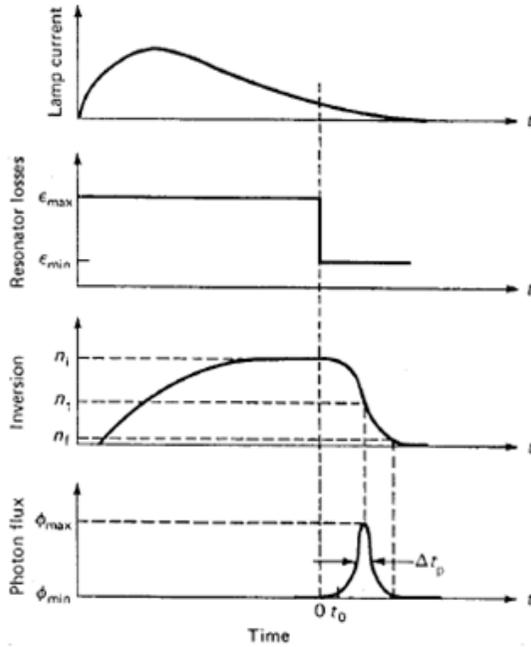


그림 8. Q-스위칭 펄스 발생 원리^[22]

그림 8과 같이 반전밀도는 초기 반전 밀도(n_i)에서 시작하여 최종 반전 밀도(n_f)로 단조롭게 감소한다. 최초의 광선속은 레이저가 펌핑되고 공진기 손실이 ϵ_{max} 인 동안 낮지만 손실이 갑자기 ϵ_{min} 으로 줄어들면서 Q-스위칭 펄스를 발생시킨다. 이 때, Q-스위칭된 레이저 출력 에너지는 식(13)과 같이 주어진다.^[22]

$$E_{out} = \frac{h\nu A}{2\sigma_e \gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (13)$$

위 식에서 $h\nu$ 는 레이저 광자 에너지이며, A 는 효율적인 빔의 단면적, n_i, n_f 는 각각 반전밀도의 초기값과 최종값이다. 또한 Q-스위칭 펄스의 펄스폭(Δt_p)은 반전밀도 준위의 함수로 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\Delta t_p = \tau_c \frac{n_i - n_f}{n_i - n_t [1 + \ln(n_i/n_f)]} \quad (14)$$

여기서 τ_c 는 공진기 왕복시간이며 n_t 는 문턱값에서의 반전밀도량으로 식 (15)와 같다.

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln \frac{1}{R} + \delta \right) \quad (15)$$

위 식 (14)를 통해 Q-스위칭 펄스폭은 의해 공진기 왕복시간에 비해, 반전밀도량에 반비례함을 알 수 있다. 이는 공진기의 길이가 작을수록 펄스폭 또한 작아지며 반전된 밀도량(n_t)이 클수록 짧고 강한 펄스를 얻을 수 있음을 의미한다. 반전된 밀도량(n_t)은 출력경의 반사율(R)이 낮을수록, 공진기내 손실(δ)이 클수록 증가한다.

3.2 포화흡수체 $Co^{2+} : MgAl_2O_4$ 를 이용한 수동형 Q-스위칭

거리측정용 레이저로 $1.5 \mu m$ 영역에서 수동형 Q-스위칭 펄스 발생을 위해 많이 활용되는 포화흡수체 소자는 $Co:MALO(Co^{2+} : MgAl_2O_4)$ 이다. $Co:MALO$ 크리스탈의 파장에 대한 흡수 스펙트럼은 $1.1 \sim 1.7 \mu m$ 영역으로 흡수폭이 넓으며, 단위 면적당 펄스 에너지(J/cm^2)가 낮은 광과 높은 광에 대한 흡수율이 비선형적 특성을 갖는다. $1.5 \mu m$ 영역에서 높은 흡수 단면적($3.5 \times 10^{-19} cm^2$)과 광학적 손상 문턱값이($500 MW/cm^2$) 높기 때문에 고출력 펄스에너지 영역에서 사용 가능하며, 공진기 내부에 집속된 곳이 없어도 충분히 Q-스위칭 펄스를 발생할 수 있다.^[24] 수동형 Q-스위칭된 레이저 펄스의 에너지와 펄스폭은 Q-스위치의 초기 투과율에 많은 영향을 받는다. 일반적인 초기 Q-스위치의 투과도는 $0.7 \sim 0.9$ 범위에서 많이 사용하고 포화흡수체의 두께를 조절함으로써 제작된다. 그림 9는 수동형 Q-스위칭 발생을 위해 사용되는 포화흡수체의 에너지 준위와 파장에 대한 투과율 스펙트럼 및 광세기에 따른 비선형 특성을 보여준다.^[23]

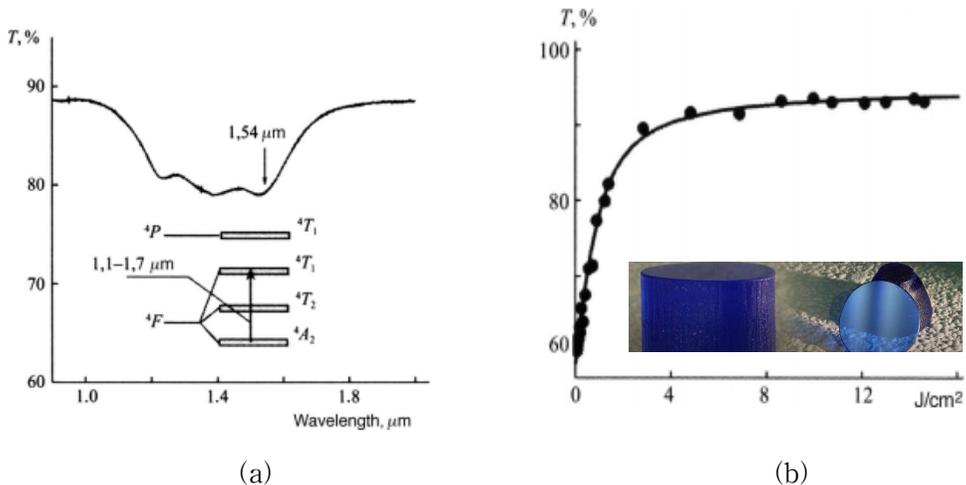


그림 9. 포화흡수체 $Co:MALO$ 의 특성

(a) 에너지 준위도 및 파장에 따른 투과율, (b) 광세기에 따른 비선형 특성

포화흡수체($Co:MALO$)를 이용한 수동형 Q-스위칭 펄스를 발생시키기 위한 조건은 비선형 효과가 충분히 발생할 수 있는 충분한 펌프 에너지가 필요로 하며, 초기 투과율이 낮을수록 높은 펄스에너지와 낮은 펄스폭을 갖는다.

제4절 Er:Yb:Glass 디스크 매질 열 분포 해석

디스크형 매질은 레이저 다이오드(LD)로 중 펌핑 된 고체레이저의 고효율, 고품질 및 소형화를 위해 개발되었다.^[25] 최근 거리측정 분야에 있어서 Er:Yb:Glass 디스크 레이저의 사용이 증가됨에 따라 장거리측정을 위한 높은 침투 출력과 빔질을 개선하기 위한 많은 연구가 진행 중이다. 특히 고효율, 고품질 및 소형화를 위해 Er:Yb:Glass 디스크형 레이저 매질을 이용한 연구를 활발히 하고 있다. 레이저 매질(Glass)의 물질 특성상 낮은 열전도도와 쉬운 열적 손상으로 인해 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 디스크 레이저는 높은 펄스 에너지와 고반복률의 레이저 출력을 얻는데 많은 어려움이 있다. 따라서 고효율과 고반복의 레이저 설계를 위해서는 Er:Yb:Glass 디스크 레이저의 열 분포 해석이 필수적이다. 중 펌핑 레이저의 열 특성을 이해하기 위해서는 매질의 냉각 구조 방식과 경계조건을 이용하여 3차원 열전달 방정식을 해석해야 한다.^[26] 그림 10은 디스크 매질의 냉각구조에 따른 냉각 방식을 보여준다.

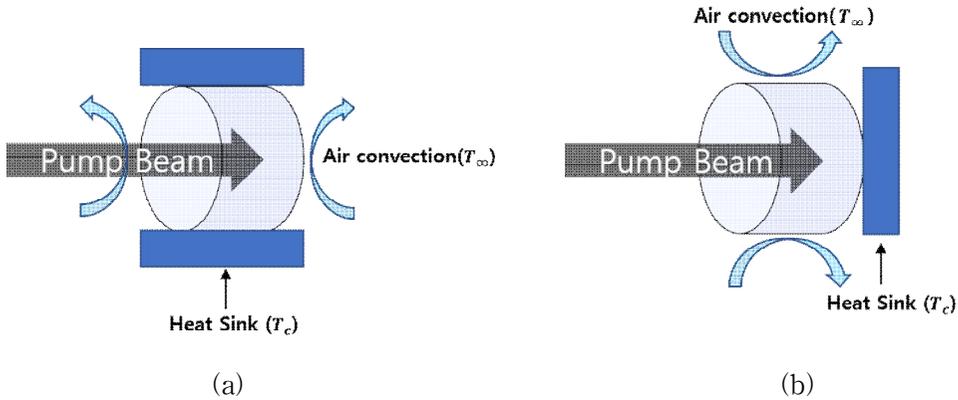


그림 10. 디스크 매질의 냉각구조 방식 (a) 측면 냉각 방식, (b) 종면 냉각 방식

그림 10에서 (a)는 중 펌핑 구조에서의 측면 냉각방식을, (b)는 종면 냉각방식 구조를 보여주고 있다. 디스크 매질의 열 해석을 위한 3차원 열전달 방정식은 식(16)와 같다.^[27]

$$\nabla^2 T(r, z) + \frac{q(r, z)}{k_t} = \frac{1}{\alpha_d} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

식 (16)에서 α_d 는 열확산도, k_t 는 열전도도, $q(r, z)$ 는 레이저 매질내의 단위부피당 열 발생량이다. 레이저 다이오드(LD)를 이용한 펌프광으로부터 레이저 매질내 열 발생량의 공간적 분포는 펌프광의 분포와 같으며 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 표면에서 반경방향(r)으로 펌프광의 분포는 가우시안 빔이라고 가정하였을 때 식(17)과 같다. 또한 측면 냉각 방식 구조에서 3차원 열전달 방정식 (16)을 해석하기 위한 펌프광의 투과에 대한 열 발생량은 식 (18)과 같이 표현 할 수 있다.^[25]

$$I(r) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \cdot \exp\left(-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right) \quad (17)$$

$$q(r, z) = \frac{\alpha_{ac}Q}{\pi\omega^2} \cdot \exp\left(-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right) \cdot \frac{\exp(-\alpha_{ac}z)}{1 - \exp(-\alpha_{ac}L)} \quad (18)$$

식 (17)에서 P 는 펌프광의 총 출력, ω 는 펌프광의 반경, Q 는 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 총 열 발생량, L 은 매질의 길이, α_{ac} 는 펌프광 파장에 대한 매질의 흡수계수를 의미한다. 종 펌핑된 Er:Yb:Glass 매질에 대한 3차원 열전달 방정식 (16)을 풀기 위한 경계조건은 전도성 냉각판에 의한 디스크 매질의 경계조건 식(19)와 대류에 의한 경계조건 식 (20)으로 표현 할 수 있다.^[25]

$$T = T_c \quad (19)$$

$$-k_t \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (20)$$

식 (19)에서 T_c 는 전도성 냉각판의 온도와 같고, 식 (20)에서 n 은 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 경계표면에 수직인 방향의 변위, h 는 공기 대류로 인한 열전달계수, T_∞ 는 매질의 경계면으로부터 멀리 떨어진 주변의 온도이다.

제3장 실험 결과 및 논의

제1절 종 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 설계

본 절에서는 Eye safe 거리측정용 레이저 설계를 위해 먼저 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저를 설계하여 준 연속발진의 Er:Yb:Glass 레이저 출력특성을 연구하고, 펌프광의 펄스폭에 따른 레이저의 펄스 지연시간을 분석하였다. 종 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저의 공진기 구성은 패브릿-패롯 공진기로 구성하였으며 펌프 LD의 코어 크기에 따른 Er:Yb:Glass 레이저의 출력특성을 연구하였다. 또한 매질의 열 초점 길이에 따른 매질과 출력경에서의 레이저 모드 크기를 계산하였다.

1.1 종 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 구조

종 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기의 구성은 그림 11과 같다.

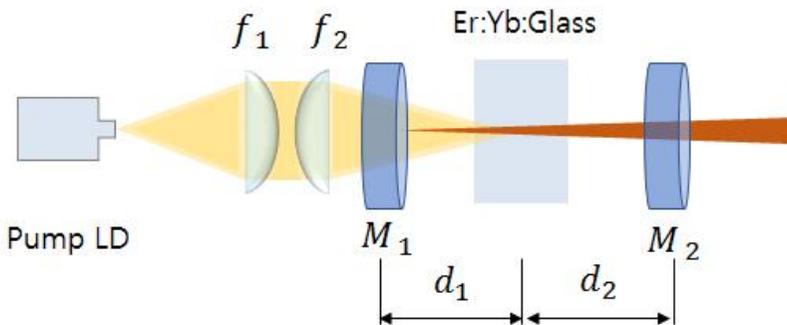


그림 11. 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 구성도

그림 11의 Er:Yb:Glass 매질의 도핑농도는 1절 1.3에서 조사한 문헌을 바탕으로 SELG-2 매질과 비슷한 CLASER사의 1% Er:Yb:Glass 매질을 사용하였다. 사용된 매질의 Er^{3+} 도핑농도는 $1 \times 10^{20} cm^{-3}$, Yb^{3+} 도핑농도는 $2 \times 10^{21} cm^{-3}$ 이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 실험에 사용한 Fiber가 결합된 펌프용 LD는 발진 중심파장 940 nm이고 광섬유 코어의 크기는 각각 105 μm 와 400 μm 이며

CW(Continuous Wave)모드에서 최대 출력이 30 W이다. 레이저 매질에 펌프광을 집광하기 위해 두 개의 평-볼록 렌즈를 사용하였고, 각 렌즈의 초점거리는 $f_1=35$ mm, $f_2=25.4$ mm이다. 전반사경(M_1)은 파장 940 nm에서 투과 (>98%)하고 파장 1535 nm에서는 전반사 (>99%) 하도록 설계된 평면경이며, 고반사경(M_2)은 파장 1535 nm에서 98% 반사율을 갖는다.

1.2 Er:Yb:Glass 매질에서 펌프광 크기계산

렌즈계를 지나 Er:Yb:Glass 레이저 매질에 집속하는 펌프 광학계는 그림 12와 같다.

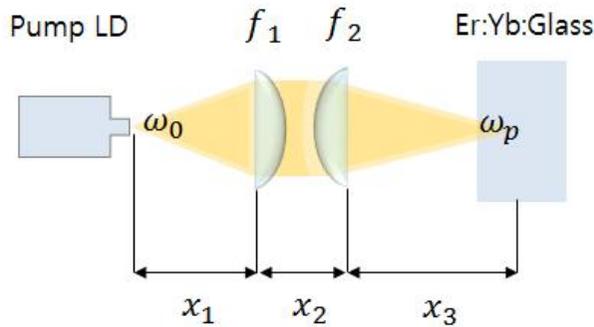


그림 12. Er:Yb:Glass 레이저 매질에 집속하는 펌프 광학계 구성도

레이저 매질에서 펌프광의 크기는 펌프광 전달 광학계의 ABCD행렬을 이용하여 구할 수 있다. 그림 12에 대한 ABCD 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

펌프 LD에 연결된 광섬유 끝단에서 나온 펌프광의 분포가 가우시안 형태이면 Er:Yb:Glass 매질에서 펌프광의 크기는 식 (7)에 의해 구할 수 있다. 그러나 대부분의 펌프광은 다중모드에 의한 Top-hat 모양을 가지고 있으므로 다중 모드형 펌

프광의 크기(w_p)는 가우시안형 펌프광의 크기(w_0)에 펌프광 빔질(M^2)효과를 보정해야 한다. 식 (21)은 다중 모드형 펌프광과 가우시안형 펌프광 크기의 관계를 나타낸다.

$$w_p = \sqrt{M_{LD}^2} w_0 \quad (21)$$

식(21)의 다중 모드형 펌프광의 크기(w_p)를 구하기 위해서는 빔질 요소 M^2 를 고려해주어야 한다. 실험에 사용된 광섬유가 부착된 LD의 M^2 의 측정값은 105 μm , 400 μm 코어직경에 대해 각각 23, 121값을 가졌다. 이 값을 이용하여 환산된 광섬유 코어에서의 가우시안 모드 크기(w_0)는 각각 약 11 μm , 18 μm 정도이었다. 매질에서의 다중 모드형 펌프광의 크기(w_p)는 펌프 LD의 코어 크기(w_0)와 빔질(M^2)에 의존하며 렌즈(f_2)와 매질사이의 거리(x_3)에 따라 그림 13과 같이 변화한다.

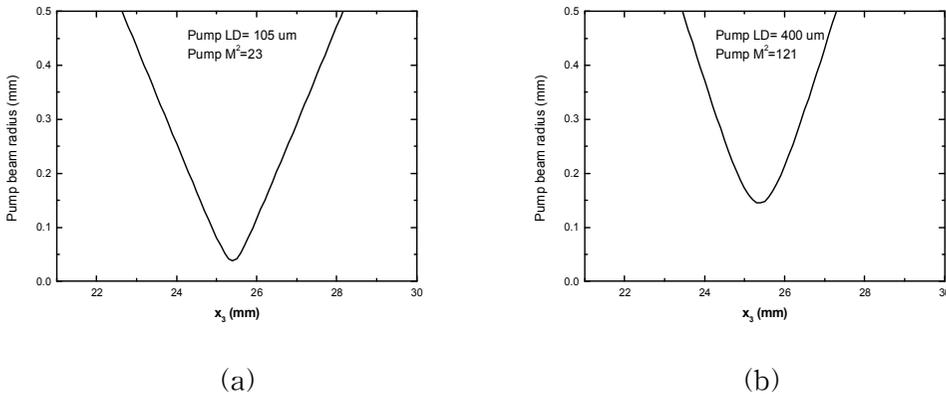


그림 13. 펌프 LD와 x_3 의 거리에 따른 Er:Yb:Glass 매질에서의 펌프광 크기 변화
 (a) 코어직경 105 μm , (b) 코어직경 400 μm

그림 13에서와 같이 계산된 펌프광의 빔 허리 위치는 펌프 LD의 광섬유 코어 직경크기와 관계없이 25 mm에서 26 mm 사이에 있었다. 이는 렌즈의 초점거리 위치에서 빔 허리가 형성되는 것을 의미한다. 또한 렌즈(f_2)로부터 Er:Yb:Glass 레이저 매질까지의 거리인 x_3 거리에 펌프광 빔 크기가 작을수록 민감하게 변화 되어지는 걸 확인 할 수 있었다.

1.3 Er:Yb:Glass 매질, 출력경에서 레이저 모드 크기계산

두 개의 평면거울과 Er:Yb:Glass 디스크 레이저 매질로 구성된 패브리-페롯 공진기의 공진 모드가 가우시안 빔이라고 가정할 때 모드 빔 크기는 광학계 전달 행렬을 이용하여 ABCD 행렬 성분으로 표현 할 수 있다. 두 개의 평면거울로 구성된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 구조는 그림 14와 같다.

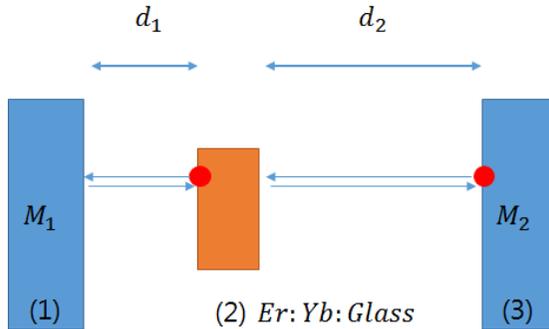
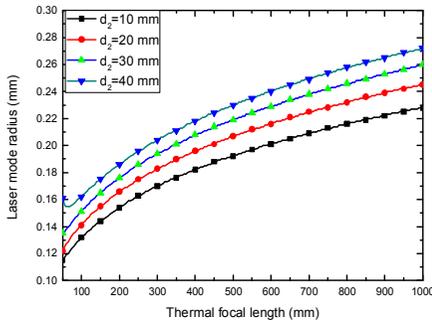


그림 14. 두 개의 평면거울로 구성된 광 공진기 구조

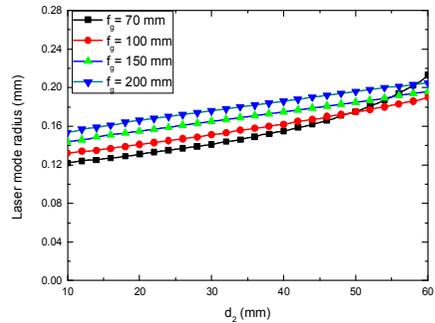
그림 14와 같은 광 공진기의 레이저 매질에서의 모드 빔 크기를 구하기 위한 레이저 공진기 ABCD 행렬은 식 (22)와 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

여기서 레이저 매질은 열 렌즈 효과에 의해 f_g 의 초점거리를 갖는다고 가정했다. 식 (22)를 통하여 나온 ABCD 행렬은 식 (9)를 이용하여 열 렌즈 효과에 의한 레이저 모드 빔 크기를 표현 할 수 있다. 레이저 매질의 열 초점 길이(f_g)와 매질과 출력경(M_2)사이의 거리 변화(d_2)에 따른 레이저 매질에서 모드 빔 크기(ω_L)는 그림 15와 같다.



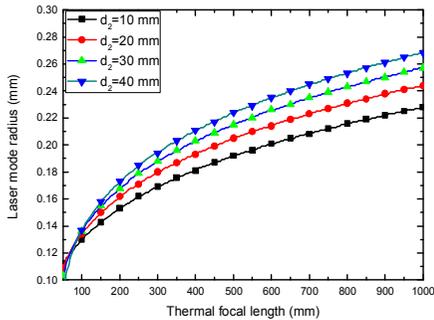
(a)



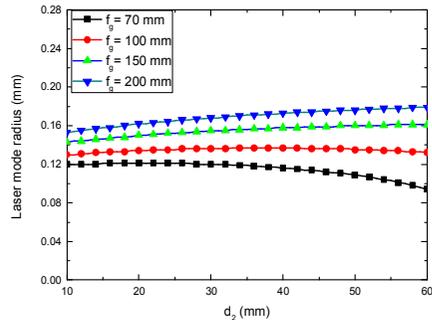
(b)

그림 15. 열 초점 길이(a)와 d_2 길이(b) 변화에 따른 레이저 매질에서의 레이저 공진 모드 빔 반경(ω_L)

출력경의 위치에서 모드 빔 크기는 ABCD 행렬 식 (9)를 이용하여 계산하였다. 식 (24)로부터 계산된 ABCD 행렬을 이용하여 출력경에서의 레이저 모드 빔 반경(ω_{LO})은 그림 16과 같다.



(a)



(b)

그림 16. 열 초점 길이(a)와 d_2 길이(b) 변화에 따른 출력경에서의 레이저 공진 모드 빔 반경(ω_{LO})

그림 15, 16에서 레이저 매질과 전반사경(M_1)사이의 거리(d_1)는 20 mm로 하여 d_2 와 f_g 변화에 따른 공진모드 빔 반경을 계산하였다. 열 초점 길이에 따라 변화하는 공진 모드 빔 크기변화를 알아보기 위해 계산에 사용된 Er:Yb:Glass 열 초점 길이

(f_g)는 매질의 열전도도가 낮은 것을 고려하여 50~200 mm 범위로 설정하였다. 레이저 매질부터 출력경(M_2)까지의 거리(d_2)의 위치 변화는 짧은 공진기 구성을 위해 10~60 mm 범위로 설정하였다. 그림 15(a), 16(a)는 열 초점거리 변화에 따른 광 공진기 내 레이저 매질과 출력경에서 레이저 공진모드의 크기를 계산상으로 보여주며 그림 15(b), 16(b)는 실질적으로 매질에서 발생하는 열 렌즈 효과 범위 내에서 d_2 길이변화에 따른 레이저 매질과 출력경에서의 레이저 모드 빔 크기 변화를 보여준다. 계산 결과 매질의 열 초점 길이(f_g)보다 d_2 가 길어지면 레이저 모드 빔은 발산하여 레이저 모드 크기는 무한대로 계산된다. 즉, 불안전 공진모드 조건이 된다.

1.4 준 연속 발진(QCW) Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성

본 실험에서는 준 연속발진 모드로 펌핑된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 펌프 펄스폭 변화와 펌프 광원의 광섬유 코어 직경에 따라 분석하였다. LD의 광섬유 코어 직경에 따른 QCW(Quasi-Continuous Wave) 에너지 측정을 위해 펌프 펄스폭 20 ms에서 1 Hz의 반복률로 수행하였다. 코어 직경(105 μm , 400 μm)에 대한 펌프 광원의 출력 특성은 그림 17과 같다.

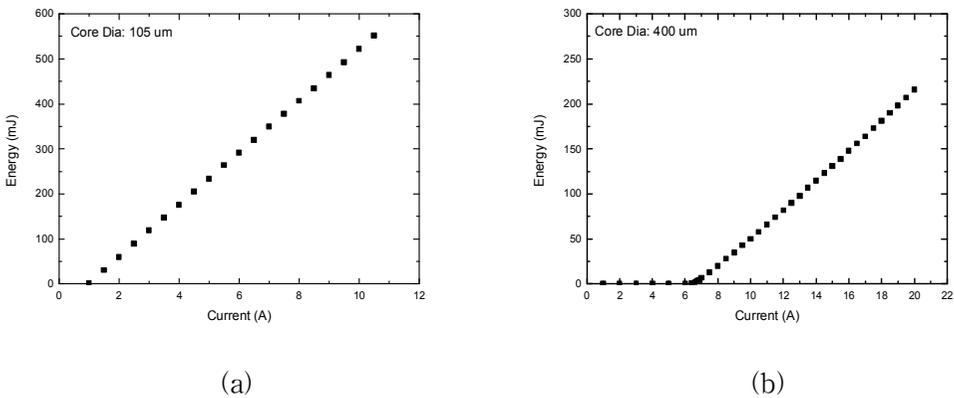


그림 17. (a) 광섬유 코어직경 105 μm , (b) 광섬유 코어직경 400 μm 에 결합된 펌프 LD의 출력 특성

측정에 사용된 광섬유 코어직경 105 μm LD는 BWT사의 제품을 사용하였고 10.5 A에서

최대 출력이 552 mJ이다. 코어직경 400 μm LD는 LIMO사의 제품을 사용하였고 20 A에서 최대 출력이 216 mJ이다. QCW모드 레이저 발진을 위해 각각의 코어직경에 따른 LD로 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 분석한 결과 그림 18과 같다.

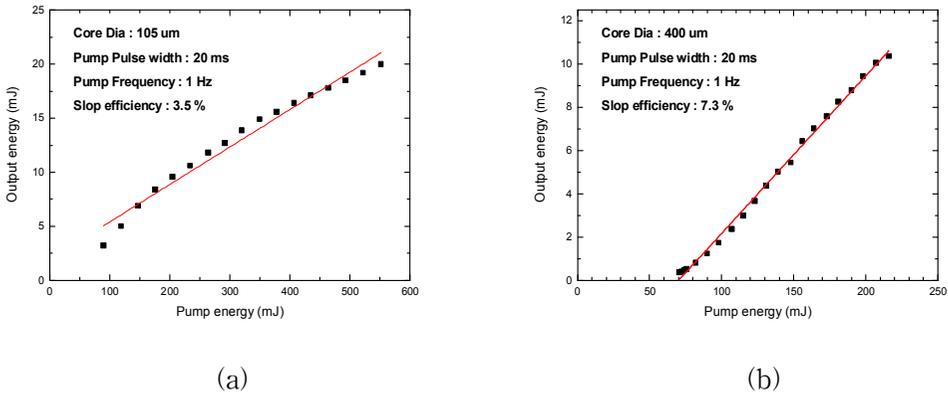
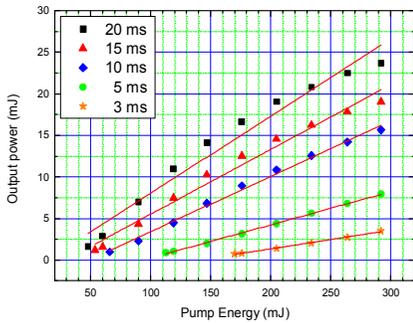


그림 18. 펌프 LD의 코어직경에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성

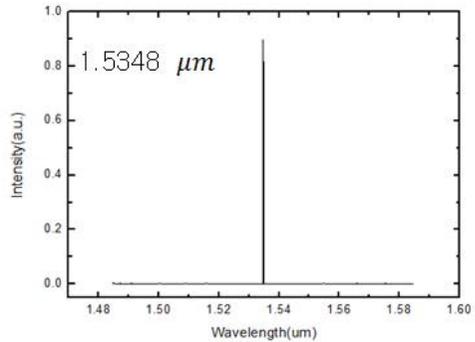
(a) 코어직경 105 μm , (b) 코어직경 400 μm

LD의 광섬유 코어직경에 따른 출력 특성 분석을 위해 펌프광학계의 구조는 동일한 집광용 렌즈 $f_1 = 35 \text{ mm}$, $f_2 = 25.4 \text{ mm}$ 를 사용하였다. 광섬유 코어 직경 105 μm LD를 이용한 레이저는 문턱 에너지 값이 약 90 mJ이고, 광섬유 코어 직경 400 μm LD를 이용한 레이저 문턱 에너지 값은 약 70 mJ이었다. 이 때 레이저 매질에서 펌프광의 반경은 각각 38 μm , 145 μm 이었다. 펌프광의 세기가 증가할수록 레이저 출력은 증가하였고, 기울기 효율은 각각 (a) 3.5%, (b) 7.3%이다. 코어직경 105 μm LD를 이용한 레이저 구조는 펌프 LD의 최대출력이 높아 레이저 출력이 20 mJ까지 측정되었지만 높은 문턱 에너지와 낮은 기울기 효율을 가졌다. 반면 광섬유 코어직경 400 μm LD는 펌프광과 레이저 모드 크기간의 정합이 잘되어 기울기 효율이 높게 나왔지만 펌프 LD의 최대출력 한계로 인해 높은 에너지를 얻을 수 없었다. 이는 펌프광과 레이저 모드 크기가 정합이 잘 되지 않기 때문에 발생한 것으로 효율을 향상시키기 위해서는 기하광학적 렌즈 구조를 조정하여 펌프광의 크기를 조절해 모드정합을 해야 한다. 따라서 펌프광과 레이저 모드 빔 반경을 정합을 향상시키기 위해 펌프광 집광용 렌즈를 $f_1 = 25.4 \text{ mm}$, $f_2 = 35 \text{ mm}$ 로 조정하여 펌프광 크기를 키웠다. 이 때 레이저 매질에서 105 μm LD를 이용한 레이저 구조의 펌프광 반경은 72 μm 로 계산 되었다. QCW 펌프 펄스폭

을 3~20 ms로 변화시키면서 레이저 출력 특성을 조사하였고 그 결과는 그림 19(a)와 같다. 레이저 방출 파장은 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer)로 측정된 결과 그림 19(b)와 같고 중심 발진 파장은 $1.535 \mu\text{m}$ 이었다.



(a)



(b)

그림 19. 펌프 펄스폭 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 (a) 출력 특성과 (b) 레이저 방출 파장

펌프광 세기에 따른 레이저 출력 특성은 펌프 펄스폭 20 ms 일 때 가장 높은 출력(23 mJ)과 가장 높은 기울기 효율(9.3%)을 보여주었다. 펌프 에너지 증가와 펌프 펄스폭에 대한 레이저 출력 지연시간은 그림 20과 같이 측정되었다.

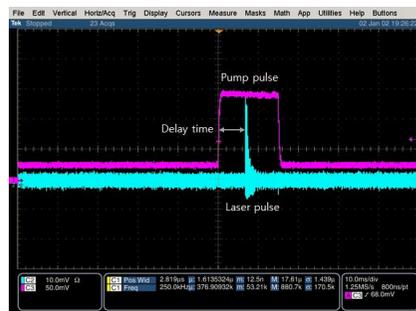
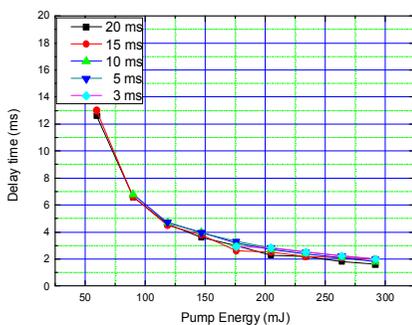


그림 20. 펌프 펄스 에너지와 펄스폭에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 지연시간

그림 20으로부터 펌프 펄스폭에 따른 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 지연시간은 펌프 에너지가 증가함에 따라 최소 2 ms 까지 측정되었고, 펌프 펄스폭 변화에 대한 지연시간은 같은 펌프에너지에서 오차 범위 내($\pm 10\%$) 동일한 지연시간을 가졌다. 측정 결과로부터 레

이제 펄스 지연시간은 펄스폭 변화에 대하여 큰 변화를 갖지 않고 펄프 에너지에 의존하는 것을 알 수 있었다.

제2절 펄프광 크기 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 공진기 설계 및 열 초점 길이 계산

이 절에서는 앞 절에서 설계된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기의 출력특성을 분석하여 펄프 광 크기 변화에 대한 레이저 출력특성을 분석하였다. 펄프광의 크기와 레이저 모드 크기 간의 정합이 잘 이루어질수록 레이저 출력이 향상되므로 펄프 광학계의 집광용 렌즈의 초점거리를 조절하여 레이저 매질에서의 펄프광 크기를 증가시키면서 실험하였다. 또한 본 절에서는 출력경에서의 레이저 모드 크기를 측정하여 레이저 매질의 열 초점 길이를 구한 후 매질에서 레이저 모드 크기를 계산하였다. 본 실험에서 설계된 레이저 공진기에서 Er:Yb:Glass 매질내 레이저 모드 크기는 열 초점 길이와 식 (23), 출력경에서의 모드 크기는 식 (24)와 같은 관계를 만족한다.

$$\omega_L = \left[\left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{f_g^2 L}{f_g - L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

$$\omega_{L.O} = \left[\left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L(f_g - L) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (24)$$

여기서 f_g 는 레이저 매질의 열 초점거리, ω_L 는 이득 매질에서의 레이저 빔 반경, $\omega_{L.O}$ 는 출력경에서의 레이저 빔 반경, L 은 공진기 길이이다. 위의 식(23), (24)에서 레이저 매질의 열 초점 거리(f_g)는 평균 펄프 파워(P_{av})와 펄프광 반경(ω_p)크기의 함수로 식 (25)과 같다.^[28]

$$f_g = \frac{2\pi k_t \omega_p^2}{\xi P_{av}} \cdot \frac{1}{\frac{dn}{dT} + (n-1)(1+v)\alpha_T + n^3 \alpha_T C_r} \quad (25)$$

식 (25)에서 ξ 는 평균 펌프 파워에 대한 열 변환율, dn/dT 는 온도 변화에 대한 매질의 굴절률 변화량, n 은 레이저 매질의 굴절률, α_T 는 열팽창계수, C_r 은 광탄성계수, v 는 포아손 비, ω_p 는 레이저 매질에서 펌프광 크기 이다.^[28] 열 초점 길이를 계산하기 위해 렌즈를 이용하여 레이저 출력경에서 빔 분포가 측정용 카메라 센서에 상이 맺히도록 하여 출력경에서 레이저 모드 빔 크기를 측정하였다. 이 측정 결과를 식 (23), 식 (24)를 이용해 분석하여 열 초점 길이 및 매질에서 레이저 모드 크기를 계산하였다.

2.1 펌프광 크기 조절을 위한 QCW 레이저 공진기 구성 및 출력 특성

펌프광 크기 조절을 위한 Er:Yb:Glass 레이저 공진기는 그림 21과 같으며 집광용 렌즈 (f_2)의 초점길이 변화에 따른 펌프광 크기를 ABCD 행렬을 이용해 계산하였다.

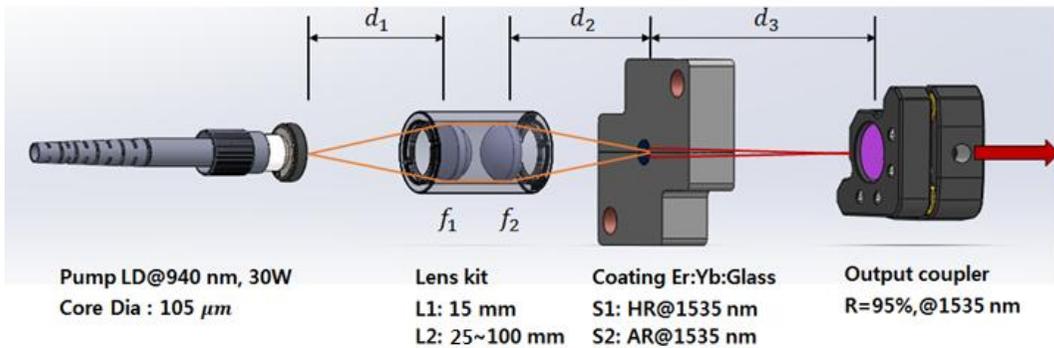


그림 21. 펌프광 크기 조절을 위한 QCW Er:Yb:Glass 레이저 공진기

레이저 구성은 이전의 공진기 구성과 다르게 레이저 공진기의 소형화를 위해 이색성 거울을 포함하지 않고, Er:Yb:Glass 매질의 한쪽 표면(S1)에 펌프파장(940 nm)에 대해 투과(T>99%)하고 반대 표면(S2)에 레이저 발진 파장(1535 nm)에 대해 고반사(R>99%)하도록 이색성 코팅 하였다. 펌프광 조절을 위한 집광용 렌즈의 초점길이는 $f_1=15$ mm로 고정하고 $f_2=25\sim 100$ mm로 변화시킴에 따라 매질내 펌프광 크기를 조정하였다. 렌즈 f_2 의 초점길이와 d_2 거리변화에 대한 매질내 펌프광의 크기는 그림 22와 같다.

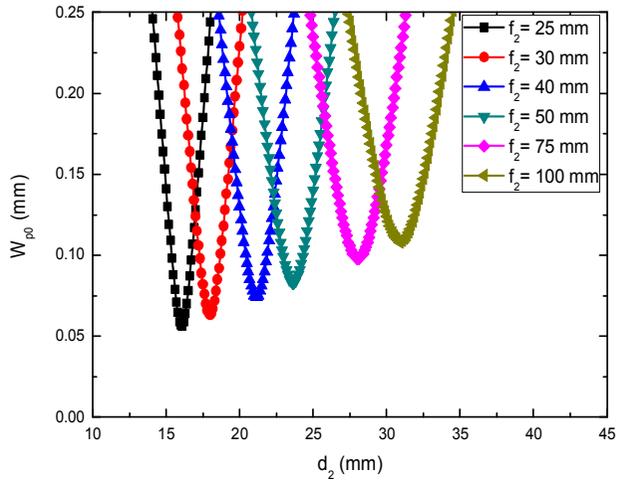


그림 22. f_2 초점길이와 d_2 거리변화에 따른 매질내 펌프광 크기 계산

f_2 와 d_2 의 길이에 따른 매질내 펌프광 크기 계산을 위해 d_1 의 거리는 20 mm로 고정하였다. 그림 22의 계산에 사용된 렌즈(f_2)의 초점길이에 대응하는 매질내 펌프광 크기는 각각 56, 63, 74, 83, 98, 108 μm 이었다. 레이저 공진기 길이가 35 mm일 때 다양한 펌프광 크기에 대한 Er:Yb:Glass 레이저 출력특성은 그림 23과 같다.

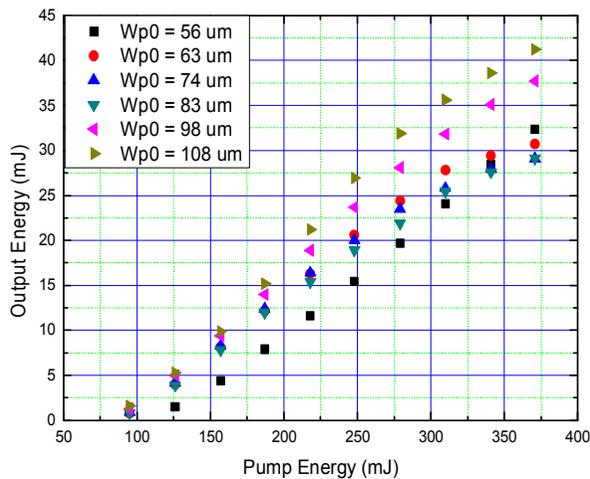


그림 23. 펌프광 크기 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성

그림 23의 출력 특성은 펌프 펄스폭이 20 ms, 1 Hz의 반복률에서 펌프 에너지를 증가시킴에 따라 수행되었다. 출력 특성을 분석한 결과 펌프광의 크기가 클수록 Er:Yb:Glass 레이저 출력은 향상되었으며 최대 기울기 효율은 15%였다. 이는 펌프광의 크기와 레이저 모드 크기간의 정합이 잘 이루어진 결과로 생각된다. 펌프광의 크기와 레이저 모드 크기의 정합은 그림 24와 같이 설명할 수 있다.

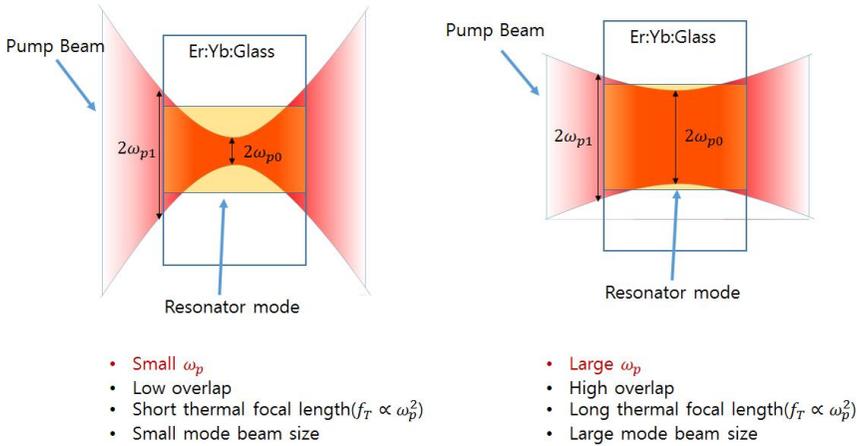


그림 24. 펌프광과 레이저 모드 크기간의 관계

그림 24로부터 펌프광의 크기가 작으면 펌프광이 매질의 중심에서 강한 흡수를 하기 때문에 펌프 에너지가 증가하더라도 효율은 떨어지는 것을 알 수 있다. 반면 펌프광의 크기가 크면 레이저 매질 표면과 중심사이의 빔 크기 차이가 적어 매질의 광축을 따라 넓은 흡수를 하여 출력이 향상된다. 즉, 펌프광과 레이저 모드 크기의 정합이 잘되어 높은 효율을 갖는다. 렌즈(f_2)의 초점 거리변화에 대한 매질 표면(ω_{p1})에서의 펌프광 크기와 매질내(ω_{p0}) 펌프광 크기 계산 결과는 그림 25와 같다. 계산 결과로부터 초점거리(f_2)가 짧은 경우 레이저 매질 중심부의 펌프광 크기와 레이저 매질 표면에서의 펌프광 크기가 많이 차이가 나서 모드 정합이 어려움을 알 수 있었다. 펌프광 크기변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2)은 빔 허리를 중심으로 광축을 따라 측정된 빔 크기를 식 (26)을 이용해 커브 피팅해서 얻었고 그 결과는 그림 26과 같다.

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(z - z_0)M^2\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2} \quad (26)$$

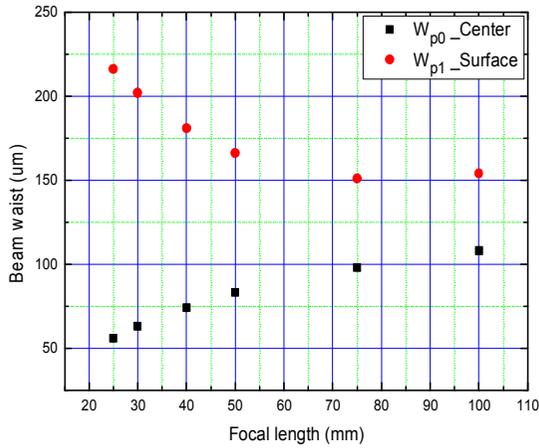


그림 25. 렌즈(f_2)의 초점거리 변화에 따른 매질표면과 매질내 펌프광 크기변화

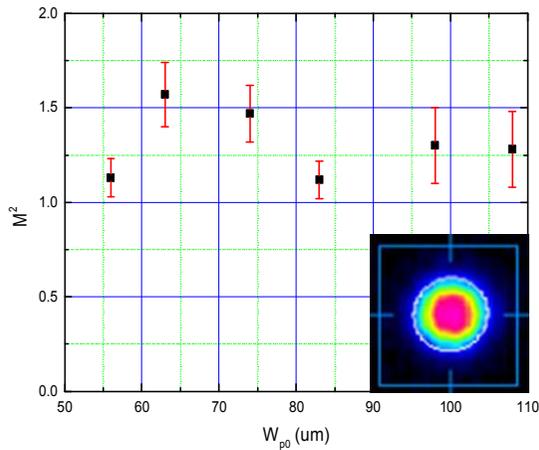


그림 26. 펌프광 크기변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2)

그림 26에서 펌프광 크기 변화에 대한 레이저의 빔질(M^2)은 평균 펌프 에너지가 약 371 mJ일 때 측정하였다. 펌프광 크기에 따른 Er:Yb:Glass 레이저의 M^2 는 1.1~1.6 사이값으로 측정되었다. 레이저 빔질의 오차값이 큰 이유는 1 Hz의 반복률을 측정하는데 레이저 빔과 CCD 장비간의 동기화하기 어려워 빔 크기 측정값에 오차가 포함된 것으로 보인다.

2.2 펌프 에너지에 대한 레이저 매질의 열 초점 길이 측정

레이저 출력과 효율을 향상시키기 위해서는 레이저 매질의 열 렌즈 효과에 대한 분석이 필수적이다. 이는 레이저 모드 크기와 펌프광의 정합을 위한 것으로 레이저 매질의 열 렌즈 효과에 의한 레이저 매질의 열 초점 길이는 식 (23)에 의해 레이저 모드 크기와 관련되어 있다. 또한 펌프광 크기와 비례, 평균 펌프 파워와 반비례 관계가 있다. Er:Yb:Glass 레이저 매질의 열 초점 길이를 계산하기 위한 공진기 구조는 그림 27과 같으며, 분석을 위해 사용된 파라미터는 표 4와 같다.

표 4. 열 초점 길이 계산을 위한 Er:Yb:Glass 레이저 파라미터들

레이저 파장	$\lambda = 1535 \text{ nm}$
펌프광 크기	$\omega_p = 0.2 \text{ mm}$
레이저 공진기 길이	$L = 40 \text{ mm}$
평균 펌프파워	$P_{av} = 70 \sim 150 \text{ mW}$
펌프광 펄스폭(Δt_p) 및 반복률(f_p)	$\Delta t_p = 8 \text{ ms}, f_p = 1 \text{ Hz}$
Er:Yb:Glass 매질의 열전도도	$k_t = 0.7 \text{ W/m.K}$
Er:Yb:Glass 매질의 굴절률	$n = 1.52$
온도 변화에 대한 매질의 굴절률 변화량	$dn/dT = -1.72 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
포아손 비	$\nu = 0.24$

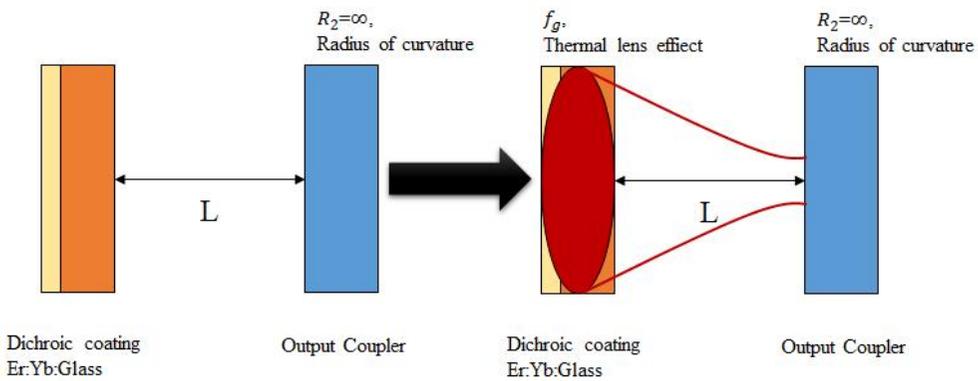


그림 27. 레이저 매질의 열 초점 길이 측정을 위한 공진기 구조

그림 27과 같이 레이저 매질의 열 렌즈 효과에 의한 열 초점 길이 변화는 식 (25)와 같이 펌프광의 크기와 흡수된 펌프 에너지에 의존한다. 따라서 정확한 매질의 열 초점 길이 계산을 위해서는 펌프광 크기와 펌프 에너지에 대한 파라미터를 설정해 주어야 한다. 표 4를 이용한 펌프광 반경 크기와 평균 펌프 파워 증가에 대한 Er:Yb:Glass 레이저 매질의 열 초점 길이를 계산하기 위해서 펌프 파워를 증가시키면서 출력경에서 레이저 모드 크기 ($\omega_{L.O}$)를 그림 28과 같이 측정하였다.

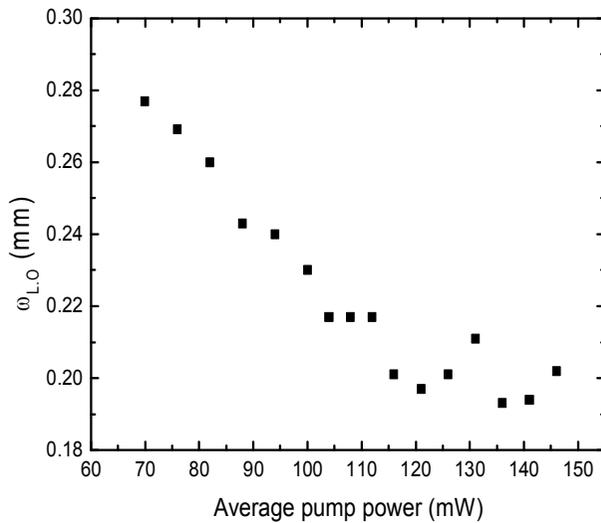


그림 28. 평균 펌프 파워 증가에 따른 출력경에서 측정된 레이저 모드 크기

측정된 출력경에서 레이저 모드 크기는 펌프 파워(70~150 mW)에 대해 0.19~0.28 mm의 값을 가졌다. 이때의 열 초점 길이는 300~700 mm이었다. 펌프 파워 변화에 대한 레이저 매질에서 모드 크기는 약 0.22~0.29 mm이었다. 펌프 파워 증가에 따른 열 초점 길이 변화는 평균 펌프파워에 대한 열 발생률(ξ)을 알지 못하여 이를 계산하기 위해 식 (25)를 이용하여 평균 펌프파워에 대한 열 초점 길이를 커브 피팅 하였다. 평균 펌프파워 증가에 따른 열 초점 길이 변화는 그림 29와 같이 계산되었다.

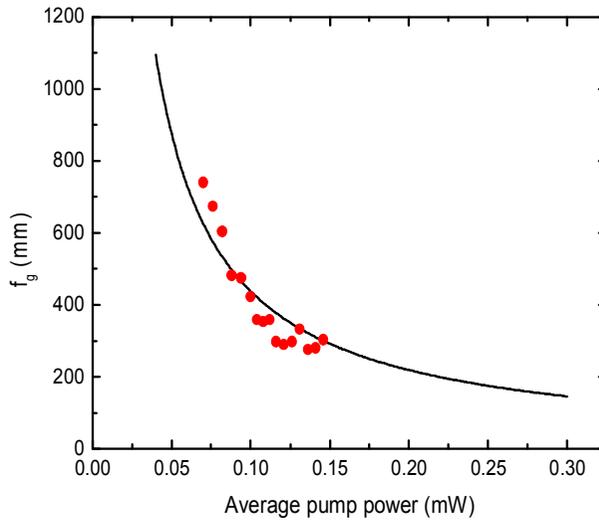


그림 29. 평균 펌프파워 증가에 따른 Er:Yb:Glass 매질의 열 초점 길이 변화

커브 피팅 결과 본 실험에 사용된 Er:Yb:Glass 레이저 매질의 평균 펌프 파워에 대한 열 변환율(ξ)은 $0.91(\pm 0.03)$ 으로 계산되었다. 평균 펌프파워가 150 mW 이상에서는 펌프광 형광의 영향으로 인해 CCD 카메라에서 정확한 가우시안 레이저 모드를 측정하기 어려웠다. 따라서 높은 펌프 에너지에 대한 열 초점 길이는 그림 29의 피팅 데이터의 값으로 예측할 수 있을 것이라 생각된다.

펌프광 크기변화에 따른 열 초점 길이는 흡수된 펌프 파워에 대한 열 변환율($\xi = 0.91$)을 알기 때문에 식 (25)를 이용하여 그림 30과 같이 계산할 수 있다.

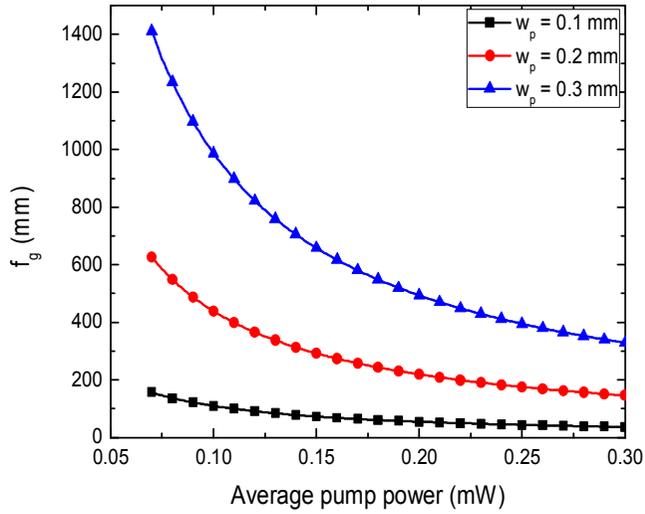


그림 30. 펌프광 크기에 따른 평균 펌프파워 변화에 대한 열 초점 길이 변화

본 실험에서 사용된 Er:Yb:Glass 매질의 펌프광 크기변화에 따른 열 초점 길이 변화는 그림 30과 같다. 평균 펌프파워(70~150 mW)증가에 따른 매질의 열 초점 길이는 펌프광 크기 0.1~0.3 mm에 대하여 각각 73~150 mm, 290~620 mm, 660~1400 mm이었다.

제3절 $Co^{2+} : MgAl_2O_4$ 를 이용한 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성

본 절에서는 거리측정용 레이저 설계를 위해 포화 흡수체(Co:MALO)를 이용한 Q-스위칭된 레이저 공진기를 제작하였다. 2절에서 펌프광 크기 변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 분석한 결과 모드 정합 범위 내에서 펌프광의 크기가 커질수록 출력 또한 증가한다는 것을 확인하였고, 레이저 모드 크기는 공진 길이와 매질의 열 초점 길이에 의존하는 것을 알았다. 수동형 Q-스위치를 이용해 높은 침투 출력의 펄스 에너지를 얻기 위해서는 많은 양의 에너지가 레이저 매질에 저장되어야 한다. 그렇기 위해서는 Q-스위치로 사용되는 포화흡수체의 비선형 특성과 공진기 손실 등 여러 요소에 대한 분석이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력을 향상시키기 위해 펌프광의 크기와 레이저 모드 크기를 조절하여 모드 정합이 잘 이루어지도록 하였다. 포화 흡수체는 $1.5 \mu m$ 파장에서 최근 많이 Q-스위치로 사용되는 Co:MALO를 이용하였으며 포화 흡수체(Co:MALO)의 투과율과 공진기 길이, 출력경의 반사율을 변화시키면서 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성과 펄스폭 변화 대한 연구를 수행하였다.

3.1 Q-스위칭을 위한 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 공진기

포화 흡수체(Co:MALO)를 이용한 수동형 Q-스위칭 펄스 발생을 위한 종 펌핑 구조의 Er:Yb:Glass 레이저는 그림 31과 같이 구성하였다.

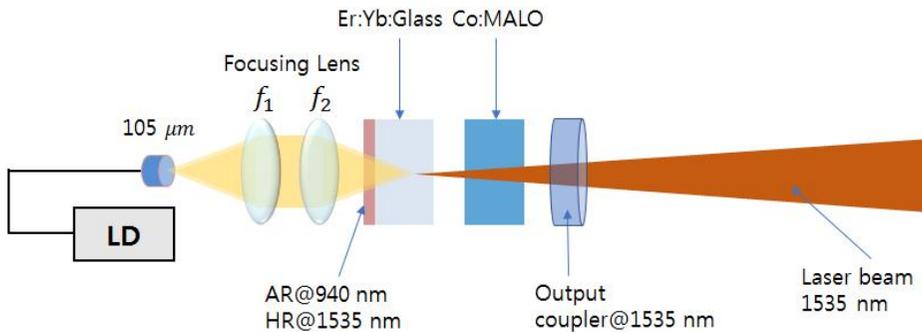
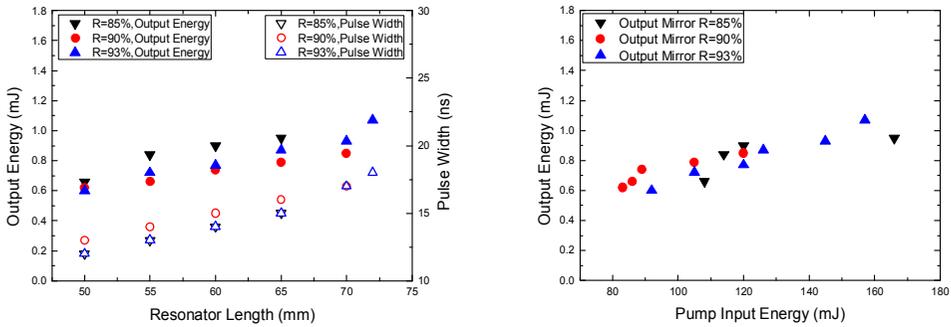


그림 31. Q-스위칭 펄스 발생을 위한 긴 펌프 광학계 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 구성

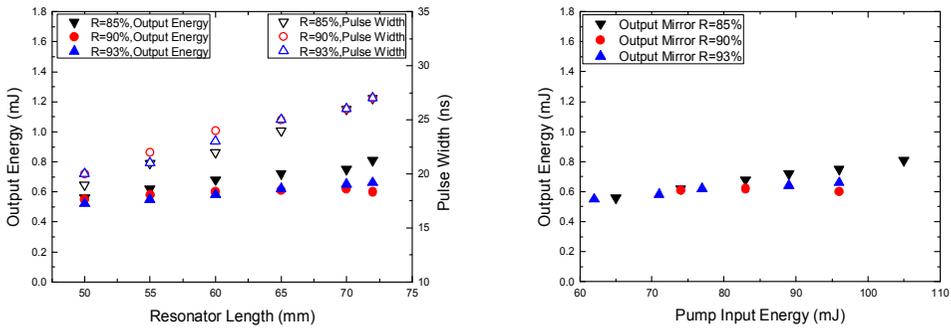
그림 31에서 Q-스위칭된 레이저 펄스 발생을 위해 사용된 펌프용 광섬유 결합된 LD는 중심파장 940 nm에서 발진하고 최대출력이 40 W이다. 레이저 구성에서 Er:Yb:Glass 매질의 열적 손상을 피하기 위해 1 Hz의 반복률과 8 ms의 펌프 펄스폭을 가진 QCW 펌핑 구조가 적용되었다. Er:Yb:Glass 매질의 Er^{3+} , Yb^{3+} 도핑농도는 각각 $1 \times 10^{20} cm^{-3}$, $2 \times 10^{21} cm^{-3}$ 이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 레이저 매질에 펌프광을 집광하기 위해 두 개의 평-볼록 렌즈를 사용하였다. 두 개의 평-볼록 렌즈는 구면 수차를 줄이기 위해 볼록한 면이 서로 마주보게 하였다. 펌프광 크기 변화에 대한 출력 특성을 분석하기 위해 사용된 각 렌즈의 초점길이는 $f_1 = 15$ mm, $f_2 = 75, 100$ mm 이다. 공진기 정렬을 간단히 하고 굴절률이 다른 매질 사이 경계의 반사에 의한 공진기 손실을 줄이기 위해 Er:Yb:Glass 매질 한 쪽 표면에 이색성 코팅(HR@1535 nm, AR@940 nm)하였고, 매질과 출력경 사이에 포화흡수체(Co:MALO)를 삽입하였다. Q-스위칭된 펄스 에너지 출력 특성을 분석하기 위해 포화흡수체의 초기 투과율(T)은 90%, 93.5%, 95%, 98%를 사용하였고, 출력경 반사율은 레이저 중심파장에 대해 각각 85%, 90%, 93%, 95%를 사용하여 레이저 출력 특성을 조사하였다.

3.2 레이저 공진기 파라미터 변화에 따른 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성

매질의 열적 손상을 줄이고 레이저 출력을 높이기 위해서는 펌프광의 크기를 증가 시켜야한다. 펌프광의 크기를 증가시키기 위해서는 집광용 렌즈의 기하광학적인 구조 때문에 펌프 광학계의 크기가 늘어나게 된다. 펌프광의 크기와 출력경 반사율, 포화흡수체의 투과율이 Q-스위칭 펄스 에너지에 미치는 영향을 분석하기 위해 펌프광 크기와 포화흡수체의 투과율을 변화시키면서 출력경 반사율에 따른 출력 특성을 분석하였다. 포화흡수체의 초기 투과율에 따른 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성은 90%, 93.5%, 95%, 98%에서 분석하였지만 95%, 98%의 투과율에서는 공진기 손실(ϵ)이 작아 고출력의 펄스 에너지를 얻을 수 없었다. 출력경 반사율에 따른 출력 특성 또한 반사율 95%에서는 낮은 펄스 에너지를 얻어 데이터 분석에서 제외하였다. 그림 29와 같은 구조에서 펌프광 크기가 동일할 때 Q-스위칭된 펄스 에너지 출력 특성은 출력경의 반사율(85%, 90%, 93%)과 포화흡수체(Co:MALO)의 투과율(90%, 93.5%)에 따라 그림 32와 같이 나타난다.



(a)

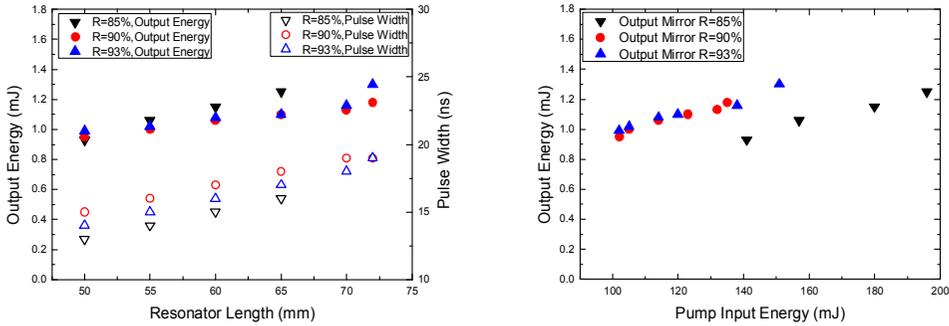


(b)

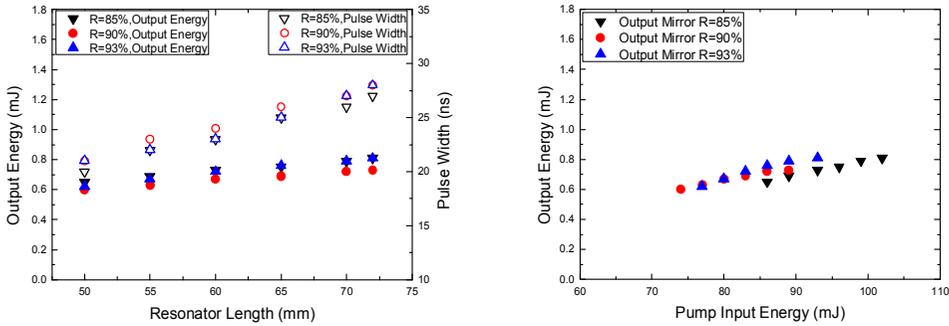
그림 32. 펌프광 크기 약 $525 \mu\text{m}$, 포화흡수체의 투과율에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성
(a) Co:MALO 투과도 = 90%, (b) Co:MALO 투과도 = 93.5%

펌프광 집속용 렌즈의 초점거리(f_1, f_2)가 각각 15 mm, 75 mm일 때 레이저 매질에서 펌프광의 직경은 약 $525 \mu\text{m}$ 이다. 그림 32는 펌프광의 직경 크기가 약 $525 \mu\text{m}$ 이고 펌프광 펄스폭이 8 ms 일 때 출력경의 반사율과 공진기 길이 변화에 대한 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 보여준다. 동일한 펌프광 크기 일 때, Q-스위칭된 펄스 에너지 출력 특성은 포화흡수체(Co:MALO)의 투과율이 낮을수록 펄스폭이 줄어들고 펄스 에너지는 증가하는 것을 알 수 있었다. 다음 펌프광 크기변화에 대한 Q-스위칭된 펄스 에너지 출력 특성을 분석하기 위해 같은 구조에서 펌프광의 직경 크기를 약 $700 \mu\text{m}$ 로 키워 출력 특성을 분석한 결과 그림 33과 같다. 펌프광의 직경 크기를 $700 \mu\text{m}$ 로 만들

기 위해 펌프광 집속용 렌즈의 초점거리(f_2)를 100 mm로 변경하였다.



(a)



(b)

그림 33. 펌프광 크기 약 $700 \mu\text{m}$, 포화흡수체의 투과율에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성
 (a) Co:MALO 투과도 = 90%, (b) Co:MALO 투과도 = 93.5%

그림 32과 33을 분석한 결과 같은 조건하에서 펌프광 크기가 $700 \mu\text{m}$ 일 때 펄스폭과 펄스 에너지가 증가하는 것을 확인 하였다. 출력경 반사율에 대한 출력 특성은 출력경 반사율이 낮을수록 펄스 에너지는 증가하였고, 펄스폭은 감소하는 경향을 보였다. 이는 포화흡수체를 이용한 Q-스위칭 펄스 발생에서 출력경 반사율이 낮을수록 공진기 내 손실이 크게 발생되어 공진기 발진을 위한 문턱 에너지가 높아지고, 이로 인해 발생된 Q-스위칭 펄스 에너지는 증가 되는 것으로 판단된다. 레이저 공진기 길이는 50~72 mm 범위에서 변화시키면서 Q-스위칭 레이저 펄스 출력 특성을 분석하였다. 50 mm 이하의 공진 길이에

서는 Q-스위칭 펄스의 높은 첨두 출력으로 인해 포화흡수체(Co:MAL0)의 표면에서 광학적 손상이 발생하였으며, 72 mm 이상의 공진 길이에서는 광학계의 크기가 커질 것을 염려해 수행하지 않았다.

그림 32, 33에서 Q-스위칭 펄스를 발생시키기 위한 문턱 에너지는 전반적으로 200 mJ 이하였다. 공진기 길이 변화에 대한 Q-스위칭 펄스 에너지는 공진 길이가 증가할수록 식 (14), (15)와 같이 공진기 내 손실값 또한 커지게 되어 출력된 펄스폭이 증가하게 되고 펄스 에너지가 또한 증가하였다. 그림 33(a)와 같이 본 실험장치에서 펌프광 크기와 출력경 반사율을 통해서 얻을 수 있는 최대 펄스 출력 에너지는 약 1.2 mJ과 19 ns의 펄스폭을 얻었다. 공진기 길이 변화에 따른 일반적인 Q-스위칭 펄스폭 변화는 그림 34와 같았다. 같은 조건에서 포화흡수체의 초기 투과율 변화에 대한 출력 특성은 투과율이 낮을수록 펄스 에너지는 증가, 펄스폭은 감소하였다. 따라서 높은 펄스 에너지를 얻기 위해 다음절의 레이저 소형화 연구에서는 포화흡수체의 투과율이 상대적으로 낮은 90%를 이용해 Q-스위칭 펄스 출력 특성 연구를 분석하였다.

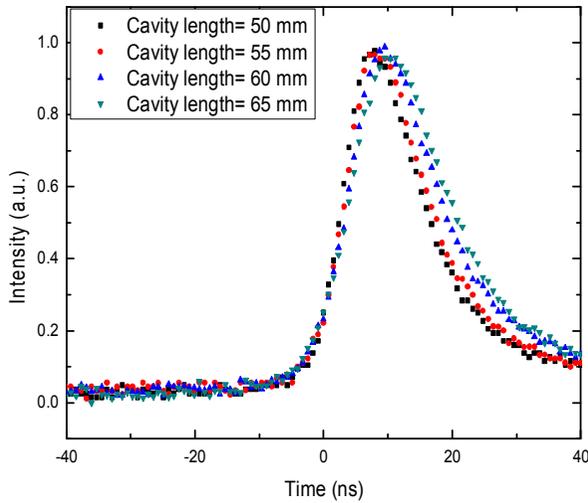


그림 34. 공진기 길이 변화에 따른 Q-스위칭 펄스폭 변화

공진기 길이 변화에 따른 Q-스위칭 펄스폭 변화 특성은 펌프광 크기, 포화흡수체의 투과율 및 출력경의 반사율과 관계없이 동일한 경향성을 가졌다. 그림 34는 대표적으로 펌프광 직경 크기가 약 700 μm , 포화흡수체의 투과율이 90%, 출력경 반사율 93%일 때, 공진기

길이 변화에 대한 Q-스위칭된 펄스폭의 변화를 나타낸 것이다. 이 때의 공진 길이(50~65 mm) 변화에 대한 펄스폭 변화는 각각 14, 15, 16, 18 ns 이였고, 단일 펄스 에너지는 각각 0.99, 1.02, 1.08, 1.1 mJ로 측정되었다. 이 실험 결과로부터 공진기 길이가 증가하면 Q-스위칭된 펄스폭과 펄스 에너지는 증가하며 펄스의 침두 출력은 줄어드는 것을 알 수 있었다.

펌프광 크기 및 포화흡수체의 투과율, 출력경의 반사율 변화는 공진기 길이 변화보다 Q-스위칭된 펄스의 에너지와 펄스폭에 많은 영향을 주지 않았다. 측정된 Q-스위칭 펄스 에너지가 단일 펄스에 의한 에너지임을 확인하기 위해 오실로스코프 장비를 이용해 측정된 결과 그림 35와 같이 펄프 펄스 반복률(1 Hz)에 대해 단일 펄스임을 확인하였다.

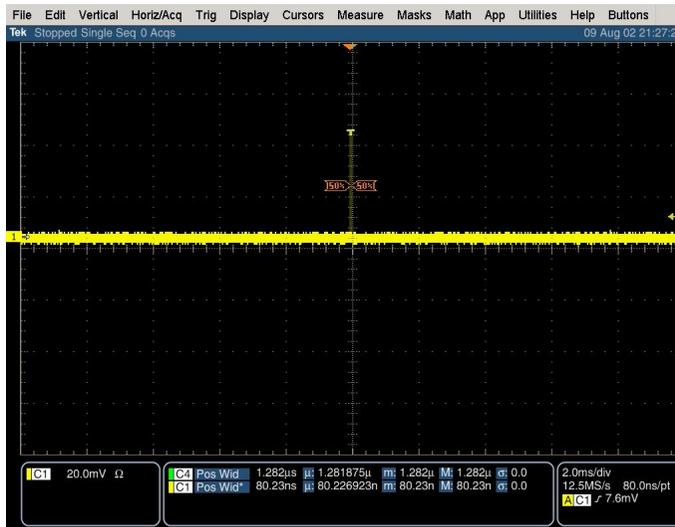


그림 35. 오실로스코프로 측정된 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 단일 펄스열

3.3 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 소형화 및 출력 특성 분석

앞 절 3.2에서 펌프광 직경크기를 증가시키기 위해 두 개의 렌즈로 구성된 펌프광 집속 광학계를 이용하였고, Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 포화흡수체 (Co:MALO)의 투과율과 출력경 반사율, 공진 길이 변화에 대해 분석하였다. 분석 결과 포화흡수체의 투과율이 상대적으로 낮을수록, 펌프광 크기, 공진 길이가 클수록 펄스 에너지 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 하지만 펌프 LD의 코어 직경(105 μm)이 작기 때문에 펌프광 크기를 키우기 위해서는 기하광학적 렌즈 구조로 인해 펌프 광학계와 레이저 공진 길이가 길어지는 문제가 발생한다. 따라서 소형화된 중장거리 측정용 레이저 개발을 위해서는 짧은 레이저 공진기와 짧은 펌프 광학계의 설계가 필수적이다. 본 실험에서는 두 개의 평-볼록 렌즈의 구조로 인한 긴 펌프 광학계의 길이를 줄이기 위해 펌프 LD의 광섬유 코어직경을 400 μm 로 키움으로써 단일 렌즈로 펌프 광학계를 설계하였다. 펌프 광학계의 길이는 단일 렌즈의 초점거리를 조절하여 최대 20 mm까지 펌프 광학계의 길이를 줄여 레이저 출력 특성을 조사하였다. 단일 렌즈로 구성된 펌프 광학계 구조의 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 구성은 그림 36과 같다.

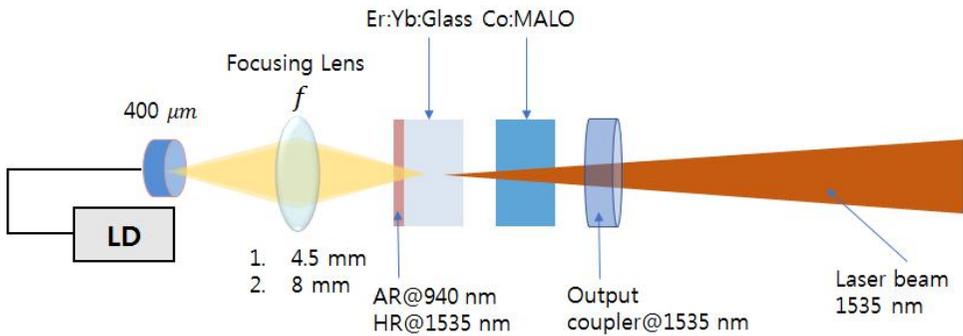
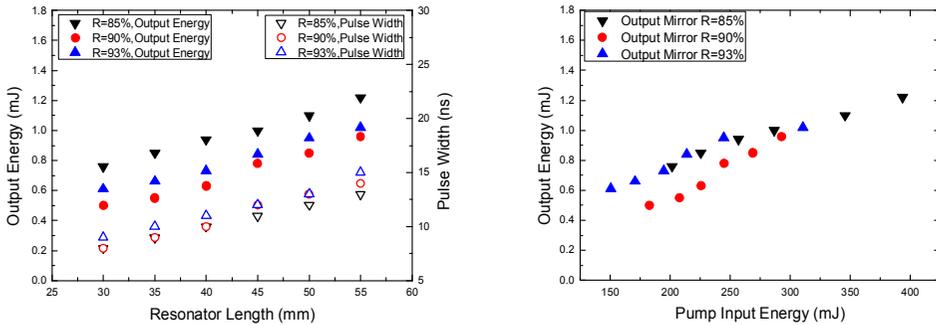


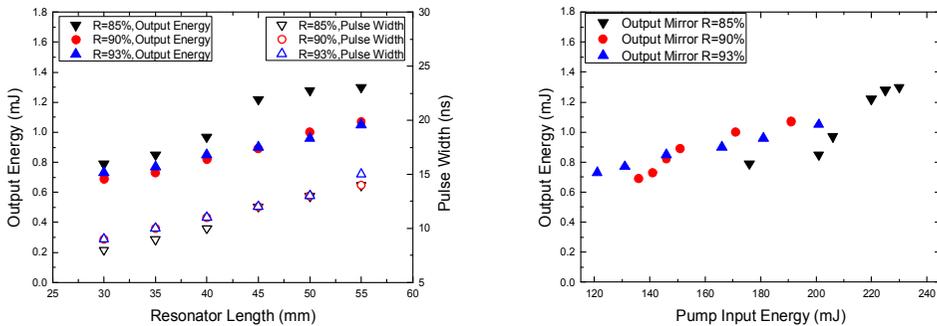
그림 36. Q-스위칭 펄스 발생을 위한 소형화된 펌프 광학계 구조의 Er:Yb:Glass 레이저 구성

실험에 사용된 펌프 LD의 광섬유 코어 직경은 400 μm 이며, 펌프 LD의 빔질(M^2)은 80이다. 소형화된 펌프광학계를 구성하기 위해 사용된 단일 렌즈(f)의 초점거리는 4.5 mm, 8 mm이며 직경은 각각 6.5 mm, 10 mm이다. 펌프 LD의 광섬유 코어 크기와 매질에서의 펌프광 크기를 일치시키기 위해 펌프 LD의 광섬유 끝단과 매질은 단일 렌즈(f)로부터 초

점거리 2배인 거리($2f$)에 근사하도록 위치하였다. Q-스위칭 펄스 발생을 위한 포화흡수체의 투과율은 90%이며 출력경의 반사율은 각각 85%, 90%, 93%에 대해 실험을 수행하였다. 단일 렌즈(f)를 이용한 짧은 펌프 광학계 구조에서 출력경의 반사율, 공진기 길이 변화에 대한 Q-스위칭 펄스 출력 특성과 그에 대한 문턱에너지 실험결과는 그림 37에 나타내었다.



(a) $f = 4.5 \text{ mm}$



(b) $f = 8 \text{ mm}$

그림 37. 단일 렌즈를 이용한 짧은 펌프 광학계의 구조에서 공진기 길이 변화에 따른 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 출력 특성(좌)과 발진 문턱 에너지(우)

단일 렌즈를 이용한 펌프광 크기는 렌즈의 $2f$ 위치로부터 1 mm만 벗어나도 펌프광 크기는 약 $100 \mu\text{m}$ 정도 변하므로 정확한 펌프광 크기를 맞추기 어렵다. 따라서 그림 37은 펌프광 직경 크기가 근사적으로 $400 \mu\text{m}$ 일 때, 단일 렌즈의 초점거리 4.5 mm와 8 mm에 따른 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 보여준다. 소형화된 거리측정용 레이

저 설계를 위해 공진기 길이는 30~55 mm 범위에서 수행하고 출력 특성을 조사하였다. 단일 렌즈의 초점거리가 $f = 4.5\text{ mm}$ 일 때 Q-스위칭 펄스 출력 특성은 Q-스위칭 펄스 발생을 위한 문턱에너지가 $f = 8\text{ mm}$ 보다 상대적으로 높았다. 이는 단일 렌즈의 직경 ($D = 6.5\text{ mm}$)이 작기 때문에 펌프광 전달 손실이 크게 발생하여 매질에 집속되는 펌프광의 세기가 작은 것으로 생각된다. 반면 단일 렌즈의 초점거리가 $f = 8\text{ mm}$ 일 때는 상대적으로 렌즈의 직경($D = 10\text{ mm}$)이 커서 펌프광 전달 손실이 4.5 mm 렌즈에 비해 작아 매질에 집속된 펌프광의 세기가 많아진 결과로 Q-스위칭 펄스 발생을 위한 문턱에너지가 낮은 것으로 판단된다. 최대 펄스 에너지는 펌프 펄스폭(8 ms)에 대한 펌프 에너지가 230 mJ에서 1.3 mJ, 펄스폭 14 ns를 가졌다. 이때의 레이저 매질의 열 초점 길이는 175 mm이었다. 또한 그림 37과 같이 Q-스위칭 펄스 에너지를 높이기 위해서는 공진기내의 손실이 커져야 함을 알 수 있다. 공진기내의 손실은 일반적으로 출력경 반사율이 낮을수록, 공진기 길이가 커질수록 증가하였다. 다음 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2)을 측정하기 위해 식 (26)을 이용하여 커브 피팅한 결과 그림 38과 같았다.

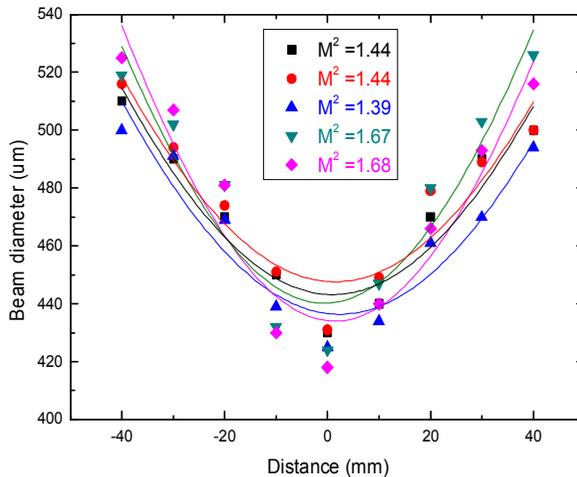


그림 38. 단일 렌즈를 이용한 펌프 광학계에서 1 Hz의 반복률을 가진 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 빔질(M^2)

그림 38은 단일 렌즈를 이용한 짧은 펌프 광학계 구조에서 1 Hz의 반복률을 가진 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2)값을 나타낸다. 수동형 포화흡수체를 이용한 1 Hz의 Q-스위칭된 펄스는 CCD 카메라로 단일 펄스를 측정함에 있어 펄스 에너지의 오차가

발생해서 빔 크기를 측정하기 위해 같은 위치에서 5번 측정하였다. 5번의 측정 결과 빔질 (M^2)은 1.39~1.67의 값을 가졌으며 단일 펄스의 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 빔질 (M^2)은 5개의 측정값을 평균한 결과 1.52 였다.

제4절 펌프광 펄스 반복률과 펄스폭변화에 따른 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성

본 절에서는 매질의 열적 손상이 이루어지지 않는 범위 내에서 Er:Yb:Glass 펄스 레이저의 반복률을 증가시키기 위해 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성을 연구하였다. 중 펌핑된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성을 수치적으로 분석하기 위해 펌프광 크기와 반복률, 펌프 펄스폭 변화에 대해 조사하였으며 펌프 에너지에 대한 열적 손상이 이루어지지 않는 조건을 찾기 위해 매질의 크기 및 두께에 대해 수치 해석하였다. 디스크 매질의 최대 온도 변화 값은 측면 냉각구조에서 매질의 크기 및 두께 변화에 대한 경계조건을 적용하여 3차원 열전달 방정식의 해를 구하여 계산하였다.

4.1 레이저 매질에서 열 방정식 해석

QCW로 중 펌핑되는 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 열적 특성을 조사하기 위해 그림 39와 같이 매질의 크기 및 두께 변화에 따라 측면 냉각 방식 구조에서 3차원 열전달 방정식 해를 구하였다.

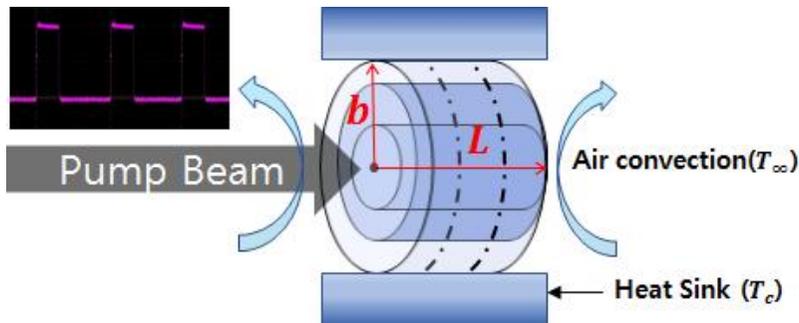


그림 39. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 측면 냉각 구조

레이저 다이오드(LD)를 이용한 펌프광으로부터 레이저 매질안의 열 발생량 $q(r,z)$ 의 공간적 분포는 펌프광의 분포와 같으며, Er:Yb:Glass 디스크 매질의 표면에서 펌프광의

공간적 분포는 Top-hat mode 빔이라고 가정하였다. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반경으로 Top-hat mode 빔의 분포는 식 (27)과 같고, 측면 냉각구조에서 펌프광은 매질의 입사표면에서 어떠한 반사도 없다고 가정하였다.^[25] 측면 냉각구조에서 3차원 열전달 방정식을 해석하기 위한 Top-hat mode 펌프광의 단일 투과에 대한 단위부피당 열 발생량 $q(r, z)$ 은 식 (28)과 같다.

$$I(r) = \begin{cases} \frac{P}{\pi\omega^2}, & (0 < r < \omega) \\ 0, & (\omega < r) \end{cases} \quad (27)$$

$$q(r, z) = \frac{\alpha_{ac}Q}{\pi\omega^2} \cdot \frac{\exp(-\alpha_{ac}z)}{1 - \exp(-\alpha_{ac}L)} \quad (28)$$

위 식 (27), (28)에서의 각각의 변수는 2장 4절에서 언급한 바와 같고 Er:Yb:Glass 디스크 매질로 입사하는 펌프광의 빔 허리영역($z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$)이 매질의 두께(L)보다 충분히 커서 매질내에서 회절에 의한 펌프광의 발산이 없다고 가정하였다. 3차원 열전달 방정식 (16)의 연속발전 펌핑에 대한 해는 식(29)와 같이 표현된다.^[25]

$$\begin{aligned} \Delta T(r, z) &= \frac{4}{k_t b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_m r) [\eta_n \cos(\eta_n z) + (h/k_t) \sin(\eta_n z)]}{(J_1(\beta_m b))^2 (\beta_m^2 + \eta_n^2)} \\ &\times \int_0^r \int_0^L r' J_0(\beta_m r') \left[\eta_n \cos(\eta_n z') + \frac{h}{k_t} \sin(\eta_n z') \right] q(r, z) dr' dz' \\ &\times \left[(\eta_n^2 + (h/k_t)^2) \left(L + \frac{h/k_t}{\eta_n^2 + (h/k_t)^2} \right) + \frac{h}{k_t} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (29)$$

위 식에서 b 는 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반경, L 은 매질의 길이, ΔT 는 디스크 매질의 공간적 온도분포($T(r, z)$)와 주변 공기의 열평형 온도(T_{∞}) 차이이다. 경계조건으로부터 디스크 매질의 반경과 길이는 다음의 식 (30)과 식 (31)을 만족해야 한다.^[25,31]

$$J_0(\beta_m b) = 0 \quad (30)$$

$$\tan(\eta_n L) = \frac{2\eta_n (h/k_t)}{\eta_n^2 - (h/k_t)^2} \quad (31)$$

QCW에 대한 3차원 열전달 방정식 해 $\Delta T(r, z, t)$ 는 다음 식 (32)와 같이 복잡한 형태로 주어진다.^[25]

$$\begin{aligned} \Delta T(r, z, t) = & \frac{4\alpha_{ac} Q}{\pi k \omega^2 b^2 (1 - e^{-\alpha_{ac} L})} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_m r) [\eta_n \cos(\eta_n z) + (h/k) \sin(\eta_n z)]}{(J_1(\beta_m b))^2 (\beta_m^2 + \eta_n^2) (\eta_n^2 + (h/k)^2)} \quad (32) \\ & \times \frac{\left[\left(\frac{h}{k} \eta_n + \alpha_{ac} \eta_n \right) - \left(\frac{h}{k} \alpha_{ac} - \eta_n^2 \right) \sin(\eta_n L) e^{-\alpha_{ac} L} - \left(\frac{h}{k} \eta_n + \alpha_{ac} \eta_n \right) \cos(\eta_n L) e^{-\alpha_{ac} L} \right]}{\left[L + 2 \frac{h/k}{(\eta_n^2 + (h/k)^2)} \right] (\eta_n^2 + \alpha_{ac}^2)} \\ & \times \int_0^{r'=w} r' J_0(\beta_m r') dr' \int_0^t \exp(-\alpha (\beta_m^2 + \eta_n^2) (t - \tau)) F(\tau, t_p, T) d\tau \end{aligned}$$

위 식에서 펄스 폭(t_p)과 반복률($1/T$)에 따른 매질의 온도 변화의 항은 식 (33)과 같다.

$$F(\tau, t_p, T) = u(\tau) - u(\tau - t_p) + u(\tau - T) - u(\tau - t_p - T) + u(\tau - 2T) - u(\tau - t_p - 2T) \dots (33)$$

여기서 $u(\tau)$ 는 단위 계단 함수이다. 식 (32)으로부터 해를 구하기 위해 적용된 경계조건 고유값(β_m, η_n)은 식 (30), 식 (31)를 이용해 구하였다. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반경(b)은 1~2.5 mm, 길이(L)는 2~3.5 mm 범위 안에서 매질내의 온도분포를 해석하였다. 경계조건의 해를 구하기 위해 사용된 공기의 열전달계수(h)는 6 W/m²K, 열전도도(k_t)는 0.7 W/mK 이다. 일반적으로 대류에 의한 열전달계수의 크기는 매질 표면의 기하학적인 구조, 공기의 온도와 습도, 유체의 흐름 등에 따라 6~30 W/m²K 범위를 가지지만 대류에 의한 열전달계수가 가장 나쁜 조건에서 분석하였다고 하였을 때를 고려해 본 연구에서는 최소값을 사용하였다.

4.2 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성 분석

QCW로 중 펄핑된 Er:Yb:Glass 디스크 매질에서 최대온도는 매질의 입사표면의 펄프광 중심에서 발생한다. 펄프광 중심과 주변 사이의 큰 온도 차이는 열적 변형을 유발한다. Er:Yb:Glass 디스크 매질은 열적 변형점이 다른 크리스탈에 비해 낮기 때문에 반복률을 증가시키기 위해서는 펄프광 크기, 펄프 펄스 반복률 및 펄스폭에 대한 열적 변형 임계치 이하의 조건에 대한 분석이 필요하다. 따라서 열적 변형을 피하고 레이저의 높은 효율과 빔질을 얻기 위해서 가장 온도 변화가 큰($r=0, z=0$) 위치에 대한 온도 특성 분석을 수행 하였다. 매질의 입사표면에 대한 온도 변화 특성을 분석하기 위해 측면 냉각구조에서 경계조건을 적용하여 3차원 열전달 방정식의 해를 이용하였다. 해를 구하기 위한 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 특성은 표 5와 같다.

표 5. 3차원 열전달 방정식의 해를 얻기 위한 Er:Yb:Glass 디스크 매질 특성

매 질	특 성	적용값
1%Er:Yb:Glass, (CLASER)	열전도도(k_t)	0.7 W/mK
	흡수계수(α_{ac})	0.75 mm^{-1}
	열확산도(α_d)	0.32 mm^2/s
	열적 변형 온도(T_{max})	556℃

또한 측면 냉각 구조에서 매질의 반경과 길이 변화가 디스크 매질의 최대온도 상승치에 미치는 영향을 분석하기 위해 식 (30), (31)을 이용하여 계산된 경계조건의 해는 표 6과 같다.

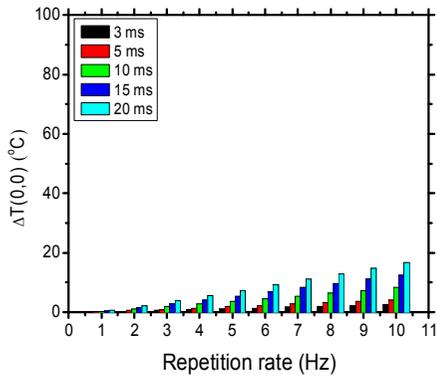
표 6. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반경과 길이변화에 대한 경계조건의 해(β_m, η_n)

(mm^{-1})

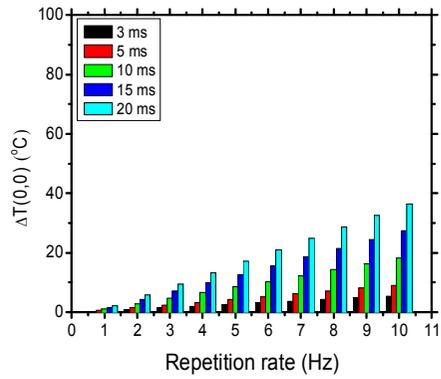
b	1 mm								1.5 mm							
	2 mm		2.5 mm		3 mm		3.5 mm		2 mm		2.5 mm		3 mm		3.5 mm	
L	β_m	η_n														
1	2.38	0.11	2.38	0.08	2.38	0.08	2.38	0.07	1.58	0.11	1.58	0.08	1.58	0.08	1.58	0.07
2	5.53	1.59	5.53	1.27	5.53	1.06	5.53	0.91	3.7	1.59	3.7	1.27	3.7	1.06	3.7	0.91
3	8.65	3.15	8.65	2.52	8.65	2.11	8.65	1.8	5.76	3.15	5.76	2.52	5.76	2.11	5.76	1.8
4	11.8	4.73	11.8	3.78	11.8	3.15	11.8	2.7	7.87	4.73	7.87	3.78	7.87	3.15	7.87	2.7
5	14.91	6.29	14.91	5.03	14.91	4.20	14.91	3.6	9.94	6.29	9.94	5.03	9.94	4.20	9.94	3.6
6	18.1	7.86	18.1	6.29	18.1	5.24	18.1	4.49	12.05	7.86	12.05	6.29	12.05	5.24	12.05	4.49
7	21.21	9.44	21.21	7.55	21.21	6.29	21.21	5.39	14.14	9.44	14.14	7.55	14.14	6.29	14.14	5.39
8	24.36	11.01	24.36	8.81	24.36	7.34	24.36	6.29	16.25	11.01	16.25	8.81	16.25	7.34	16.25	6.29
9	27.48	12.57	27.48	10.06	27.48	8.38	27.48	7.18	18.31	12.57	18.31	10.06	18.31	8.38	18.31	7.18
10	30.66	14.15	30.66	11.32	30.66	9.43	30.66	8.08	20.42	14.15	20.42	11.32	20.42	9.43	20.42	8.08

b	2 mm								2.5 mm							
	2 mm		2.5 mm		3 mm		3.5 mm		2 mm		2.5 mm		3 mm		3.5 mm	
L	β_m	η_n														
1	1.2	0.11	1.2	0.08	1.2	0.08	1.2	0.07	0.95	0.11	0.95	0.08	0.95	0.08	0.95	0.07
2	2.77	1.59	2.77	2.77	2.77	1.06	2.77	0.91	2.21	1.59	2.21	1.27	2.21	1.06	2.21	0.91
3	4.32	3.15	4.32	2.52	4.32	2.11	4.32	1.8	3.46	3.15	3.46	2.52	3.46	2.11	3.46	1.8
4	5.9	4.73	5.9	3.78	5.9	3.15	5.9	2.7	4.72	4.73	4.72	3.78	4.72	3.15	4.72	2.7
5	7.46	6.29	7.46	5.03	7.46	4.20	7.46	3.6	5.97	6.29	5.97	5.03	5.97	4.20	5.97	3.6
6	9.04	7.86	9.04	6.29	9.04	5.24	9.04	4.49	7.24	7.86	7.24	6.29	7.24	5.24	7.24	4.49
7	10.59	9.44	10.59	7.55	10.59	6.29	10.59	5.39	8.48	9.44	8.48	7.55	8.48	6.29	8.48	5.39
8	12.19	11.01	12.19	8.81	12.19	7.34	12.19	6.29	9.75	11.01	9.75	8.81	9.75	7.34	9.75	6.29
9	13.74	12.57	13.74	10.06	13.74	8.38	13.74	7.18	10.99	12.57	10.99	10.06	10.99	8.38	10.99	7.18
10	15.33	14.15	15.33	11.32	15.33	9.43	15.33	8.08	12.26	14.15	12.26	11.32	12.26	9.43	12.26	8.08

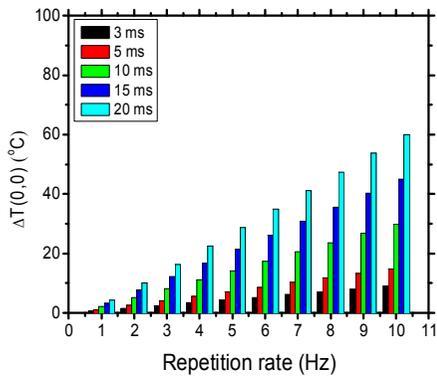
표 5와 6을 바탕으로 식 (32)를 계산한 결과 펄프광 펄스 반복률(1~10 Hz)과 펄프광 펄스폭(3~20 ms)에 따른 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 입사표면에 대한 최대온도 상승치는 매질의 반경(b)변화에 대해 그림 40, 매질의 길이(L)변화에 대해 그림 41과 같은 결과를 얻었다. 계산된 매질의 온도는 QCW 펄프광이 입사한 후 레이저 매질이 열적 평형이 이루어진 시간($t = 40$ s)에서 얻은 온도이다.



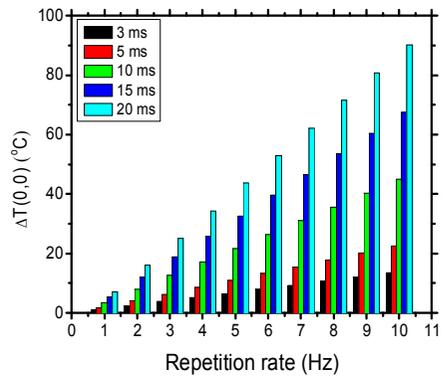
(a)



(b)



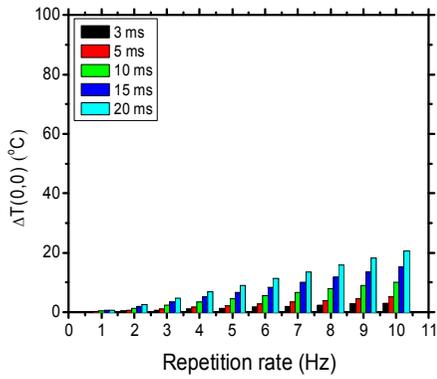
(c)



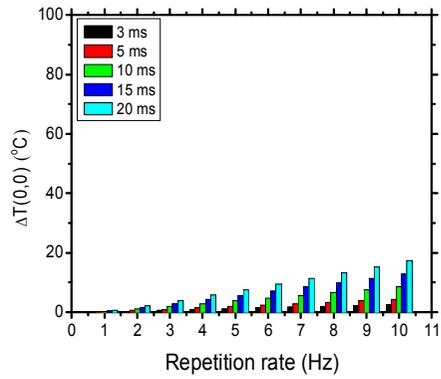
(d)

그림 40. $\Delta T(0,0)$ 에서 펌프광 크기($\omega_0 = 0.3 \text{ mm}$), 매질의 길이($L = 3 \text{ mm}$)가 동일할 때, 펌프 펄스 반복률과 펄스폭, 매질의 반경(b)에 따른 온도 변화.

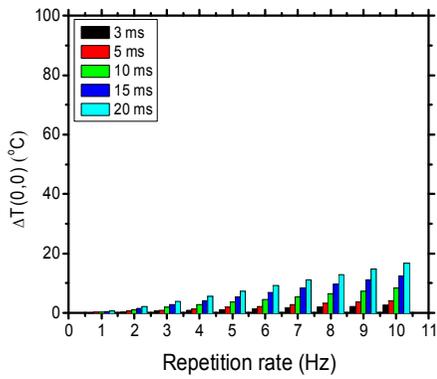
- (a) $Q = 1 \text{ W}, \omega = 0.3 \text{ mm}, b = 1 \text{ mm}, L = 3 \text{ mm}$;
- (b) $Q = 1 \text{ W}, \omega = 0.3 \text{ mm}, b = 1.5 \text{ mm}, L = 3 \text{ mm}$;
- (c) $Q = 1 \text{ W}, \omega = 0.3 \text{ mm}, b = 2 \text{ mm}, L = 3 \text{ mm}$;
- (d) $Q = 1 \text{ W}, \omega = 0.3 \text{ mm}, b = 2.5 \text{ mm}, L = 3 \text{ mm}$.



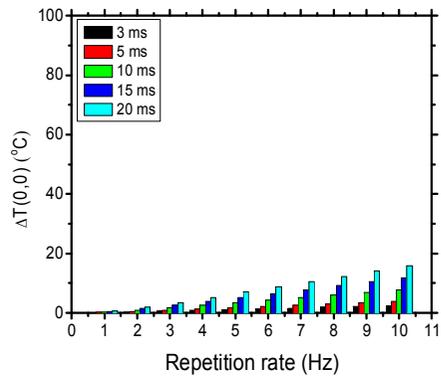
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 41. $\Delta T(0,0)$ 에서 펄스광 크기($\omega_0 = 0.3\text{ mm}$), 매질의 반경($b = 1\text{ mm}$)이 동일할 때, 펄스 펄스 반복률과 펄스폭, 매질의 길이(L)에 따른 온도 변화.

- (a) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.3\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 2\text{ mm}$;
- (b) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.3\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 2.5\text{ mm}$;
- (c) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.3\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3\text{ mm}$;
- (d) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.3\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3.5\text{ mm}$.

그림 40, 41을 분석한 결과 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 최대온도 상승치는 매질의 반경 (b)이 커질수록, 매질의 길이(L)가 줄어들수록 증가하였다. 매질의 반경 변화에 대한 매질 온도 변화는 길이변화의 매질온도 변화보다 컸다. 이는 표 6에서 보는바와 같이 측면 냉각구조에서 매질의 반경 변화에 대한 전도성 냉각판에 의한 경계조건 식 (30)의 해가 매질의 길이 변화에 대한 대류에 의한 경계조건 식 (31)의 해보다 온도 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 펄프광 펄스의 반복률과 펄스폭에 있어서 매질의 온도 변화에 크게 영향을 주는 요소는 펄프 펄스폭 변화로 분석되었다. 매질 내에서 반경(b)과 길이(L) 방향에 대한 온도 분포도($\Delta T(r, z)$)는 그림 42와 같다.

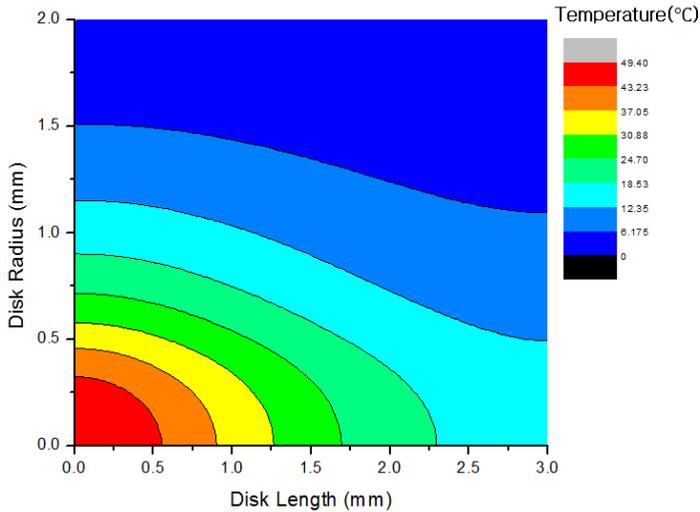
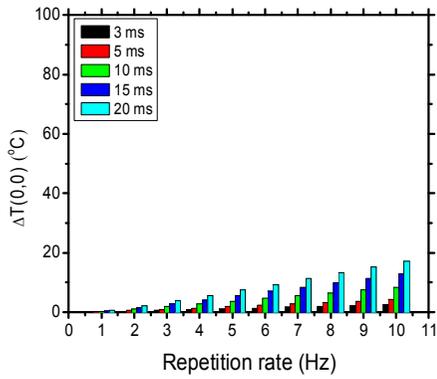


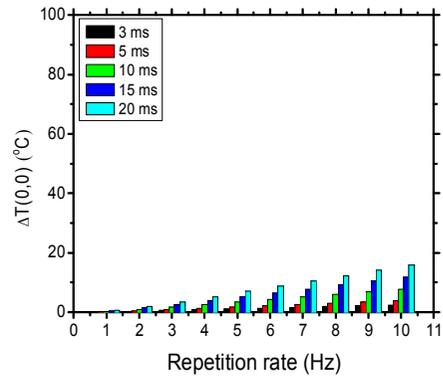
그림 42. Er:Yb:Glass 디스크 매질의 길이와 반경에 대한 온도 분포도

그림 42에서 디스크 매질의 입사표면으로부터 길이와 반경에 대한 온도 분포는 매질의 길이가 3 mm, 반경이 2 mm의 조건에서 계산하였다.

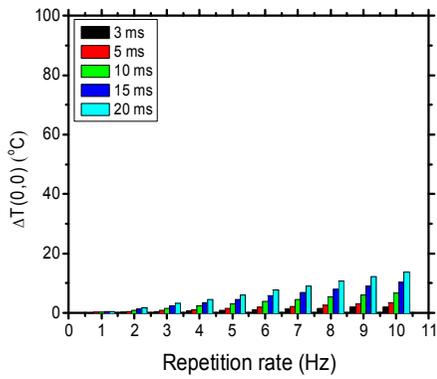
다음은 펄프광 크기 변화에 대한 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 특성을 조사하기 위해 매질의 반경과 길이가 동일하다고 가정하였을 때, 펄프광 크기변화($\omega_0 = 0.1 \sim 0.75 \text{ mm}$)에 대한 온도 특성을 분석하였다. 매질의 반경과 길이변화의 영향으로 인한 온도 변화를 배제하기 위해 동일한 매질의 조건으로 펄프광 크기 변화만 고려하였다. 펄프광의 크기 변화에 대한 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성은 그림 43과 같다.



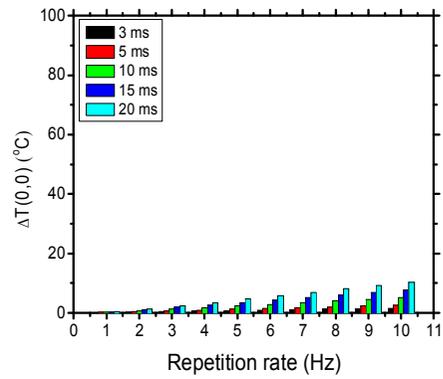
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 43. $\Delta T(0,0)$ 에서 매질의 반경($b = 1\text{ mm}$)과 길이($L = 3.5\text{ mm}$)가 동일할 때, 펌프 펄스 반복률과 펄스폭, 펌프광 크기(ω_0)에 따른 온도 변화.

- (a) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.1\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3.5\text{ mm}$;
- (b) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.3\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3.5\text{ mm}$;
- (c) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.5\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3.5\text{ mm}$;
- (d) $Q = 1\text{ W}$, $\omega = 0.75\text{ mm}$, $b = 1\text{ mm}$, $L = 3.5\text{ mm}$.

펌프광 크기 변화에 대한 디스크 매질의 $\Delta T(0,0)$ 는 펌프광 크기가 작을수록 증가하였다. 하지만 펌프광 크기변화는 다른 변수요인들, 즉 매질의 크기와 두께변화에 비해 디스크 매질의 최대온도 상승에 크게 영향을 주지 않은 것으로 확인되었다. 그림 40~43의 분석에 사용된 총 열 발생량(Q)은 식 (32)에 의해 온도 분포와 비례관계가 있으므로 크게 고려하지 않고 1 W로 가정하였다. 이는 Q 값이 연속발전 펌프 LD의 총 열 발생량으로 펌프광 출력에 따라 N 배 증가됨으로써 매질의 최대온도 또한 N 배 증가된다. 따라서 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 정확한 온도 분석을 위해서는 실험에 사용된 펌프 LD의 출력을 Q 값의 배수로 고려해 주어야 한다. 본 실험에서 사용된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 크기는 5 mm, 두께 3.5 mm이고 단일 렌즈($f = 8\text{ mm}$)를 이용한 구조에서 펌프광 반경 크기는 약 $200\ \mu\text{m}$ 이다. 1 mJ 이상의 Q-스위칭 단일 펄스 에너지를 얻기 위한 연속 발전 펌프 LD의 침투 출력을 고려한 총 열 발생량(Q)은 매질의 열 변환율(ξ)을 환산하면 약 27 W이다. 실험에 사용된 디스크 매질의 반복률 증가에 대한 온도 변화는 그림 44와 같았다.

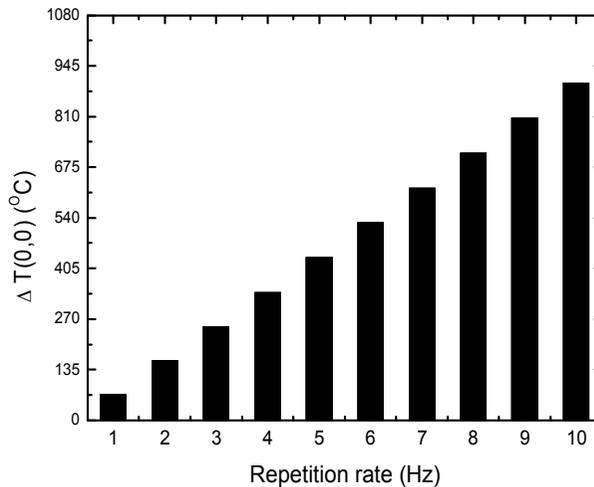


그림 44. 실험에 사용된 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 반복률 증가에 대한 온도 변화

본 연구에서 1 mJ 이상의 Q-스위칭 펄스 에너지를 얻기 위한 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 최대 온도 상승치는 그림 44에서 보는바와 같이 1 Hz의 반복률에서 약 68°C 였다. 반복률 변화에 대한 온도 특성을 보았을 때, 본 실험에서 사용된 디스크 매질은 열적 변형 임계치(556°C)이하에서 6 Hz의 반복률 까지 수행될 것으로 판단되었다.

제5절 반복률 증가에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성

본 절에서는 4절에서 분석한 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 열적 특성을 바탕으로 반복률을 증가에 따른 Q-스위칭된 펄스 에너지 출력 특성을 연구 하였다. 실험에 사용된 Er:Yb:Glass 디스크 매질은 열적 변형 임계치 이하에서 6 Hz 까지 수행될 것으로 분석되었으며 반복률 증가에 대한 Q-스위칭 펄스 출력 특성은 단일 렌즈를 이용하여 1 Hz의 반복률로 1 mJ이상의 Q-스위칭 펄스 에너지를 얻는 조건으로 수행되었다. 레이저 공진기의 구조는 그림 36과 같으며 공진기 길이는 50 mm, 출력경 반사율은 85%이다. 펌프광 반경이 근사적으로 0.2 mm이고 단일 펄스 에너지가 1 mJ 이상일 때 펌프 반복률 증가에 따른 열 초점 길이 변화와 Q-스위칭 펄스 출력 특성은 그림 45와 같다.

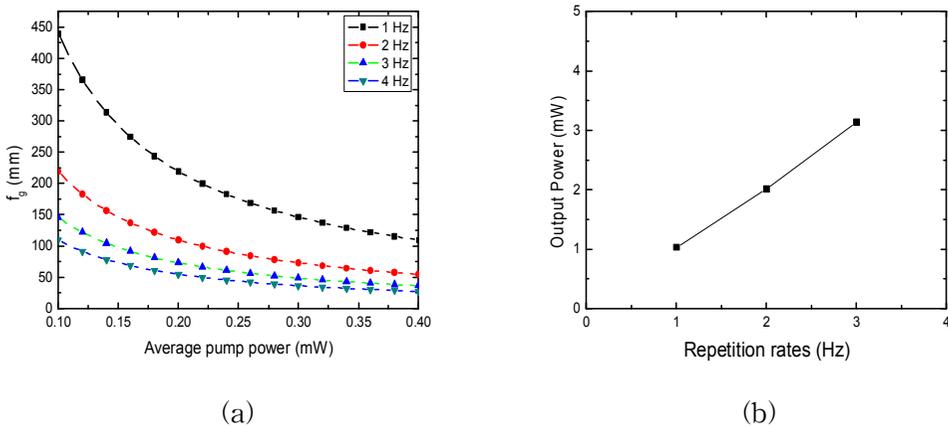
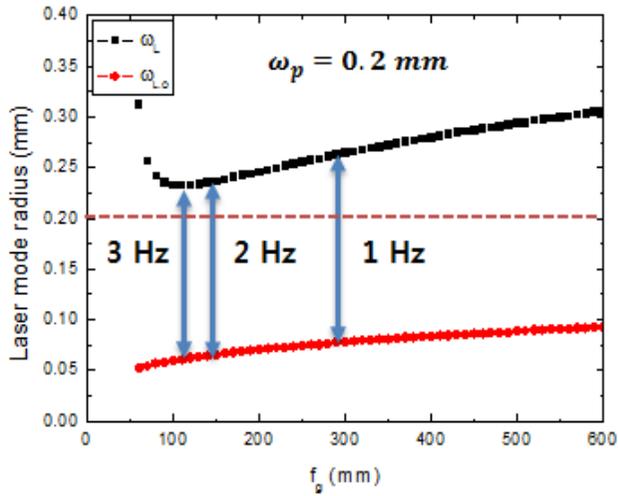
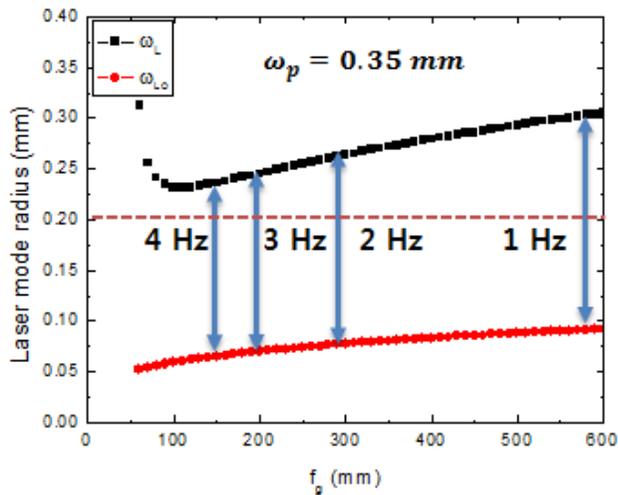


그림 45. 반복률 증가에 대한 (a) 열 초점 길이 변화와 (b) Q-스위칭 펄스 출력 특성

펌프 반복률이 증가하면 매질의 온도가 그림 44와 같이 증가하므로 그림 45(a)와 같이 레이저 매질의 열 초점 길이가 감소하였다. 펌프 반복률 증가에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성은 그림 45(b)와 같이 동일한 펌프 에너지(230 mJ)에서 3 Hz의 반복률 까지 측정되었다. 그 이상의 반복률에서는 매질의 열 초점 길이 감소로 레이저 모드 크기가 작아져 포화흡수체 표면의 광학적 손상을 유발하였다. 포화흡수체 표면의 레이저 모드 크기는 레이저 매질과 출력경에서의 모드 크기의 사이 값을 가진다. 펌프 광 크기와 열 초점 길이를 고려한 레이저 매질과 출력경에서의 모드 크기는 그림 46과 같다.



(a) 펌프광 반경 0.2 mm



(a) 펌프광 반경 0.35 mm

그림 46. 펌프광 반경에 따른 열 초점 길이 변화와 레이저 모드 크기 변화

(a) 펌프광 반경 0.2 mm, (b) 펌프광 반경 0.35 mm

앞선 소형화된 레이저 공진 구조에서 단일 렌즈를 이용한 펌프광의 크기는 렌즈의

초점거리 2배인 위치($2f$)로부터 1 mm정도만 벗어나도 펌프광의 크기는 약 $100 \mu\text{m}$ 오차가 발생한다. 이로 인하여 단일 렌즈를 이용한 펌프 광학계에서 펌프광의 크기는 정확히 계산하기 어려워 근사적으로 $2f$ 위치에서 대칭구조로 설계하였을 때 0.2 mm 이었다. 펌프광 반경이 0.2 mm일 때 매질의 열 초점 길이는 300 mm 이하의 값을 가졌으며 매질과 출력경에서의 레이저 모드 크기 변화는 그림 46(a)와 같았다. 이 경우는 4 Hz 이상 반복률에서는 레이저 모드 빔이 발산하여 불안전 공진모드로 분석되었다. 그러나 실험결과에서는 4 Hz의 반복률에서 포화흡수체의 손상이 발생하였으므로 불안전 공진모드가 존재 하지 않았다. 따라서 펌프광 렌즈의 위치가 광섬유와 레이저 매질 사이에서 정확히 $2f$ 위치에 놓여 있지 않는 것으로 판단된다. 4 Hz의 반복률이 상에서 레이저가 동작하기 위해서는 열 초점 길이가 길어져야 함으로 펌프광의 반경 크기는 0.2 mm 보다 커야한다. 그러기 위해서는 LD의 광섬유와 집속렌즈 사이의 거리가 $2f$ 보다 작게 정렬된 것으로 보인다. 약 1.5 mm 정도 정렬 오차를 가정하면 펌프광 반경은 약 0.35 mm 정도이다. 따라서 펌프광 반경은 0.35 mm에 레이저 모드 크기에 대하여 그림 46(b)와 같이 분석하였다. 분석 결과 펌프광 반경 0.35 mm에 대해서는 열 초점 길이가 600 mm 이하의 값을 가졌으며 4 Hz의 반복률에서 레이저 작동이 가능한 것으로 계산되었다. 본 실험실에서 얻은 최대 레이저 출력 1.3 mJ 에너지, 14 ns 펄스폭에 대한 공진기 내부에서 포화흡수체의 광학적 손상 (500 MW/cm^2)은 포화흡수체의 표면에서 레이저 모드 크기가 약 0.2 mm일 때 발생한다. 펌프광 반경 크기와 반복률 증가에 따른 레이저 모드 크기를 분석한 결과 본 연구에서 반복률 4 Hz 이상에 대한 포화흡수체의 광학적 손상을 고려하였을 때 단일 렌즈를 이용한 펌프광의 반경은 0.35 이상으로 설계해야 할 것으로 판단된다.

제4장 결 론

본 논문에서는 거리측정용 레이저의 소형화와 고효율, 고출력 펄스 에너지를 얻기 위해 수동형 포화흡수체($Co^{2+}:MgAl_2O_4$)를 이용한 중 펄핑된 Q-스위칭 Er:Yb:Glass 레이저를 설계하고 그 출력 특성 연구를 수행하였다. Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저 공진기를 최적화하기 위해 준 연속 발진 모드를 이용한 Er:Yb:Glass 레이저의 출력 특성을 1 Hz의 반복률에서 펌프광 크기 변화와 펌프 펄스폭 변화에 따라 분석하였으며 펌프 펄스폭에 따른 레이저 펄스의 지연시간을 조사하였다. 펌프광 크기 변화에 따른 Er:Yb:Glass 레이저의 출력특성은 펌프광 크기가 커짐에 따라 펌프광과 레이저 모드 크기의 정합이 잘 이루어져 레이저 발진 문턱 에너지값은 낮아졌으며 출력 기울기 효율은 최대 15%까지 향상되었다. 또한 동일한 펌프 에너지(370 mJ)에서 펌프광 크기 변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저의 빔질(M^2)은 1.1~1.6 범위의 준 가우시안 빔을 가졌다. 펌프광 펄스폭 변화에 대한 Er:Yb:Glass 레이저 출력 펄스의 지연시간은 펌프 펄스폭 변화(3~20 ms)에 대해서 큰 변화가 없었지만 펌프 에너지가 증가할수록 최대 2 ms까지 줄어들었고 레이저 펄스의 지연시간은 펌프 펄스폭보다 펌프 에너지에 크게 의존하였다.

Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저를 설계하기 위해 포화흡수체를 레이저 공진기 내에 삽입하여 포화흡수체의 투과율과 출력경 반사율, 펌프광 크기에 따른 Q-스위칭 펄스 출력 특성을 분석하였다. Q-스위칭 펄스 에너지를 높이기 위해 공진기 손실을 크게 하였으며 이는 포화흡수체의 투과율과 공진기 길이, 출력경 반사율을 조절함으로써 수행하였다. 포화흡수체의 초기 투과율은 90%, 93.5%, 95%, 98%를 사용하였으며 출력경 반사율은 85%, 90%, 93%, 95%를 이용하였다. 포화흡수체의 투과율에 따른 출력 특성은 95%, 98%의 경우 펄스 에너지가 0.3 mJ이하로 낮았으며 출력경 반사율에 따른 출력 특성은 반사율 95%의 경우 펄스 에너지가 0.5 mJ 이하의 값으로 고출력 펄스 에너지 특성 분석을 위해 데이터에서 제외하였다. Q-스위칭 펄스 출력은 포화흡수체의 투과율과 출력경의 반사율이 낮을수록, 펌프광 크기와 레이저 공진기 길이가 늘어날수록 증가하였고 최대 펄스 에너지는 펌프 에너지 약 200 mJ에서 1.2 mJ, 펄스폭은 19 ns였다.

본 연구에서는 레이저 소형화를 위해 펌프 광학계 길이와 레이저 공진기 길이를 줄일 수 있는 단일 렌즈를 이용한 짧은 펌프 광학계를 설계하였고 그 특성을 또한

분석하였다. 설계된 소형화된 레이저의 Q-스위칭 최대 펄스 에너지는 펌프 에너지 230 mJ에서 약 1.3 mJ, 펄스폭은 14 ns였다. 이는 두 개의 렌즈로 구성된 펌프 광학계의 구조에 비하여 더 높은 펄스 첨두 출력을 가졌다. 펌프 광학계와 레이저 공진기 길이를 포함한 전체적인 레이저 모듈의 길이 또한 최대 출력에서 90 mm 이하였으며 이때의 빔질(M^2)은 약 1.52였다.

본 연구에서 또한 설계된 Er:Yb:Glass Q-스위칭 레이저의 반복률을 향상시키기 위해 Er:Yb:Glass 디스크 매질의 온도 변화 특성을 펌프광 펄스 반복률과 펄스폭, 펌프광 크기 및 매질의 크기에 대해 이론적으로 분석하였다. 디스크 매질의 온도 변화는 펌프광의 펄스폭과 매질의 직경이 작을수록, 입사하는 펌프광의 크기가 클수록 감소하였다. 수치 분석 결과, 본 연구의 설계된 레이저 공진기 구조에서 1 mJ 이상의 Q-스위칭 펄스 에너지를 얻기 위한 디스크 매질의 최대온도는 1 Hz의 반복률에서 약 68°C 정도 예상되었다. 따라서 레이저 매질의 열적 변형이 발생하는 온도를 레이저 임계 발진 조건이라고 한다면 6 Hz의 반복률에서도 1 mJ 이상의 펄스 에너지를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 실험 결과 1~3 Hz의 반복률에서는 포화흡수체의 손상 없이 선형적으로 Q-스위칭 펄스 출력이 증가하였다. 펌프광 크기에 대한 레이저 모드 크기분석을 통해 4 Hz이상의 반복률에서는 레이저 매질의 열 초점 길이의 영향으로 레이저 모드 크기가 줄어들면서 포화흡수체의 손상이 발생한 것으로 보여진다.

본 연구에서는 Eye safe 거리측정용 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저의 출력을 최적화하기 위한 레이저 매질의 열 해석과 레이저 공진기 길이, 레이저 거울의 반사율, Q-스위처 투과도, 펌프광 크기 등 레이저 공진기 설계를 위한 파라미터들에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 분석 결과가 거리측정용 Q-스위칭된 Er:Yb:Glass 레이저를 설계하는 레이저 공학자에게 설계 파라미터 설정에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

[참고문헌]

- [1] D. M. Finlayson, B. D. Sinclair, *Advances in Lasers and Applications: Proceedings of the Fifty Second Scottish Universities Summer School in Physics*, (Scottish Univ. Sum. Phys&Inst. Phys, Bristol and Philadelphia, 1998) 264-265.
- [2] K. Kopczyński, Z. Mierczyk, S.M. Kaczmarek, "Miniature eye-safe solid-state lasers," *Proc. SPIE*, 3186, 292-295 (1996).
- [3] Matthew C. Heintze, "Development and testing of an Er:Yb:Glass coherent laser radar for wind field mapping," Ph. D. thesis, Univ. of Adelaide Sch. of Chem. and Phys., Feb. (2010).
- [4] <http://www.laserfocusworld.com/articles/2008/03/photonic-frontiers-eye-safe-lasers-retina-safe-wavelengths-benefit-open-air-applications.html>
- [5] <https://wattsupwiththat.com/2008/06/21/a-window-on-water-vapor-and-planetary-temperature-part-2/>.
- [6] Y. J. Huang, Y. F. Chen, W. D. Chen, and G. Zhang, "Comparative study of intracavity KTP-based Raman generation between Nd:YAP and Nd:YAG lasers operating on the $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ transition," *Opt. Express*, 23, 10435-10443 (2015).
- [7] Ruikun Wu, TaoLue Chen, J.D. Myers, M.J. Myers, Chris R. Hardy, John K. Driver, "Eye-Safe Erbium Glass Laser Transmitter Study Q-Switched with Cobalt Spinel," Publication #144,1 Defense & Security Symposium 2004.
- [8] Jaroslaw Mlynczak, Nabil Belghachem, "Monolithic thermally bonded Er^{3+} , Yb^{3+} :glass/ Co^{2+} : $MgAl_2O_4$ microchip lasers," *Opt. Commun*, 356, 166-169 (2015).
- [9] <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-8/issue-10/features/led-based-products-must-meet-photobiological-safety-standards-part-1-magazine.html>.
- [10] Eduard Gregorio, Francesc Rocabosch, Ricardo Sanz and Joan R. Rosell-Polo, "Eye-safe Lidar System for Pesticide Spray Drift Measurement," *Sensors*, 15,

- 3650-3670 (2015).
- [11] Spinhirne. J.D, Chudamani. S, Cavanaugh. J.F, Bufton, J.L. "Aerosol and cloud backscatter at 1.06, 1.54, and 0.53 μm by airborne hard-target-calibrated Nd:YAG /methane Raman lidar," *Appl. Opt*, 36, 3475 - 3490 (1997).
- [12] E.snitzer and R. Woodcock, " Yb^{3+} - Er^{3+} glass laser," *Appl. Phys, Lett.*, 6, 45-46 (1965).
- [13] P. Laporta, S. Desilvestri, V. Magni and O. svelto, "Diode-pumped cw bulk Er:Yb:Glass laser," *Opt, Lett.*, 16, 1952-1954 (1991).
- [14] <http://www.kigre.com/files/qxdata.pdf>.
- [15] B.-C. Hwang, S. Jiang, T. Luo, J. Watson, G. Sorbello and N. Peyghambarian, "Cooperative upconversion and energy transfer of new high Er^{3+} - and Yb^{3+} -doped phosphate glasses," *J. Opt. Soc. Am. B*, 17, 833-839 (2000).
- [16] <http://www.claserinc.com/crystals/lasercrystals/Erglass.htm>
- [17] Eric Tanguy, Gilles Feugnet, Jean-Paul Pocholle, R. Blondeau, M.A. Poisson, et al., "High energy erbium laser end-pumped by a laser diode bar array coupled to a Nonimaging Optic Concentrator," *Opt. Commun.*, Elsevier, 145, 105-108 (1998).
- [18] Jaroslaw MLYNCZAK, Krzysztof KOPCZYNSKI, Zygmunt MIERCZYK, " Generation investigation of eye-safe microchip lasers pumped by 974 nm and 939 nm wavelength," *Optica Applicata*, XXXVIII, 657-668 (2008).
- [19] 김현철, "두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈로 구성된 레이저 출력 특성 연구," 석사학위청구논문, 조선대학교 (2015).
- [20] H. Kogelnik and T.Li, "Laser Beams and Resonators," *Appl Opt*, 5, 1550 (1966).
- [21] H. Kogelnik, "Imaging of optical mode-Resonators with internal lenses," *Bell Sys. Tech. J*, 44, 455 (1965).
- [22] Walter Koechner and Michael Bass, *Solid-state Laser: A Graduate Text*, (Springer-Verlag, New York, 2002) 280-282.
- [23] G. I. Ryabtsev, M. V. Bogdanovich, A. I. Erzhievskii, L. L. Teplyashin, A. P. Klishchenko, A.

- V. Pozhidaev, M. A. Shchemelev, A. G. Ryabtsev, A. S. Kraskovskii, S. N. Titovets, K. V. Yumashev, A. M. Malyarevich, O. S. Dymshits, and A. A. Zhilin, "Erbium-glass slab laser with transverse diode pumping," *J. Opt. Technol.* 75, 704-707 (2008).
- [24] <http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/SYNOPTICS/Products/SpecialtyCrystals/Pages/CoSpinel>.
- [25] Hyun Su Kim, "Effects of Cooling Condition and Disk Size on the Temperature Distribution in a Longitudinally Pumped Yb:YAG Disk," *J. Kor. Phys.* 59, 3229-3234 (2011).
- [26] 양정문, "레이저 다이오드로 중 펌핑된 디스크형 Yb:YAG 레이저 출력 특성," 석사학위 청구논문, 조선대학교 (2010).
- [27] F. Kreitha and M. S. Bohn, *Principle of Heat Transfer*, 6th ed. (Brooks/Cole, USA, 2001) 4-20.
- [28] Shujing Liu, Feng Song, Hong Cai, Teng Li, Bin Tian, Zhaohui Wu and Jianguo Tian, "Effect of thermal lens on beam quality and mode matching in LD pumped Er-Yb-codoped phosphate glass microchip laser," *J.Phys.D:Appl.Phys.* 41, 035104 (2008).
- [29] Carnuth. W, Trickl. T, "A powerful eyesafe infrared aerosol lidar: Application of stimulated Raman backscattering of 1.06 micron radiation," *Rev. Sci. Instrum.* 65, 3324 - 3331 (1994).
- [30] Spuler, S.M, Mayor, S.D, "Scanning eye-safe elastic backscatter lidar at 1.54 μm ," *J. Atmos. Ocean. Technol.* 22, 696-703 (2005).
- [31] M. N.Ozsisik, *Heat Conduction*, 2nd ed. (John wiley & Sons inc., NY, 1993) 214-220.