



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2010年 02月
碩士學位論文

레이저 다이오드로 중 펌핑된
디스크형 Yb:YAG 레이저 출력 특성

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

梁禎文

레이저 다이오드로 종 펌핑된
디스크형 Yb:YAG 레이저 출력 특성

Output characteristics of a longitudinally LD pumped
Yb:YAG disk laser

2010年 02月

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

梁禎文

레이저 다이오드로 종 펌핑된
디스크형 Yb:YAG 레이저 출력 특성

指導教授 金 玓 秀

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2009年 10月

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

梁 禎 文

梁禎文의 碩士學位論文을 認准함

심사위원장 조선대학교 교수 김진태 인

심사위원 고등광기술연구소 박사 이성구 인

심사위원 조선대학교 교수 김현수 인

2009年 11月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	3
제1절 Yb:YAG 매질	3
1. Yb:YAG 매질 특성	3
2. 준안정 3준위 레이저	5
제2절 레이저 발진 조건	8
1. 광 공진기의 원리 및 종류	8
2. 이득 조건	13
3. 위상 조건	16
제3절 레이저의 출력과 손실을 계산	18
제4절 디스크형 레이저 매질 열분포 해석	21
1. 디스크 측면 냉각 구조에서의 열분포 해석	21
제5절 열 렌즈 효과에 대한 레이저 공진기 안정 조건	26
제3장 종 펄핑 Yb:YAG 레이저	34
제1절 렌즈 모듈 전산모사	34
제2절 매질 냉각장치 설계	38

제3절 LD의 온도 측정	39
제4절 증편핑을 위한 레이저 제작	40
제5절 광 공진기의 길이 조정	42
제4장 실험 결과 및 고찰	44
제1절 출력 측정	44
제2절 Knife-edge 방식을 이용한 M^2 계산	45
제3절 광 공진기 길이 조절에 따른 출력 측정	49
제4절 광 공진기 길이 변화에 따른 M^2 값의 변화	52
제5장 결론	53
[감사의 글]	54
[참고문헌]	56

표 목 차

표 1. Yb:YAG 매질의 특성표	4
표 2. 렌즈모듈 전산모사 조건	36

그림 목 차

그림 1. 300 K에서 Yb:YAG 흡수 스펙트럼	3
그림 2. Yb:YAG 레이저의 에너지 준위도	6
그림 3. 온도에 따른 Yb:YAG의 여기방출 단면적 변화	7
그림 4. 광 공진기의 기본적인 구성	8
그림 5. 광 공진기의 다양한 구성	9
그림 6. 레이저 공진기의 안정조건(빋금)과 불안정 조건(백색)	11
그림 7. 안정영역과 불안정영역의 공진기	12
그림 8. 얇은 Yb:YAG 매질에서 펌프광의 방향과 냉각방식	21
그림 9. 등간격 직사각형 격자	23
그림 10. 종 펌핑된 매질의 열분포 및 최대온도	24
그림 11. 종 펌핑된 Yb:YAG에서 열 렌즈 유효초점거리	27
그림 12. 광학계의 일반적인 광선 경로	28
그림 13. 실험에 사용된 광 공진기의 구조	29
그림 14. 광 공진기 안을 진행하는 광선 경로	30
그림 15. d_1 의 변화에 따른 출력경의 레이저 광 크기	31
그림 16. d_1 의 변화에 따른 Yb:YAG의 레이저 광 크기	32
그림 17. 펌프용 렌즈모듈 구조	34
그림 18. 렌즈모듈 전산모사 결과	37
그림 19. Point Spread Function	37
그림 20. 레이저 매질 냉각 장치 (a) 설계도면, (b) 제작된 냉각 장치 사진 ..	38
그림 21. 입력 전류에 따른 LD의 출력 및 온도 변화	39
그림 22. 종 펌핑 Yb:YAG 레이저 발진 실험 장치도	40

그림 23. 종 펌핑 Yb:YAG 레이저 발진 실험 장치 사진	41
그림 24. 광 공진기의 거리 조정	42
그림 25. 출력 빔 형상 측정 장치도	43
그림 26. LD 파워에 대한 레이저 출력	44
그림 27. Knife edge 측정 방식	45
그림 28. Knife edge 방식에 의한 빔질 측정 장치 구성도	46
그림 29. M^2 그래프	48
그림 30. LD 파워에 따른 M^2 값	48
그림 31. 광 공진기 길이에 따른 출력	49
그림 32. 렌즈에 의한 집속면에서 펌프광의 상	50
그림 33. 광 공진기 길이에 따른 M^2 값	52

ABSTRACT

Output characteristics of a longitudinally LD pumped Yb:YAG disk laser

Jeong Moon Yang

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

Department of Photonic Engineering,

Graduate School of Chosun University

With the advent of laser diode pumping technology, high power, high beam quality, and compact lasers could be realized. However, laser engineers are still interested in developing more compact lasers with higher power and higher beam quality. One of the excellent candidates for new lasers is the Yb:YAG disk laser longitudinally pumped by a laser diode. Since Yb:YAG crystal has the quantum efficiency of 91% and the life time of 951 μ s, the longitudinally pumped Yb:YAG lasers can be operated with high output power and high quality beam profile. The CW Yb:YAG disk laser with more than 100 W in TEM₀₀ mode^[1]. An electro-optical efficiency of 20% and an optical conversion efficiency of 58% had been achieved and a laser power of 1 kW had been demonstrated.

In this thesis, we demonstrate a Yb:YAG disk Laser longitudinally pumped by laser diode with the wavelength of 940 nm and investigate its output characteristics.

To design a high efficient laser, we optimized the lens system to tightly focus the pump beam on the Yb:YAG disk. Also we fabricated the laser crystal mount cooled by a water circulation. We used the plane-parallel resonator consisting of a Yb:YAG disk (Φ 5 mm x 3.5 mm) with Yb-doping rate of 5wt% and a output coupler of 97% reflectance. Maximum output power of the designed laser was 4.36 W at the 23.5 W pump power and its slope efficiency was 22%. We also investigate the beam quality(M^2) of the output beam. The measured beam quality (M^2) depended on the resonator length and the pump power. The designed laser had M^2 value of 1.3 under best experimental conditions, which means almost Gaussian beam.

제1장 서 론

레이저(LASER)란 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약어로서 유도방출에 의해 광을 발진시키거나 증폭시켜 만들어진 광을 총칭한다.

레이저는 1913년 보어(N. H. D. Bohr)에 의해 빛의 발생에 대한 이론이 확립되었다. 보어는 전자가 핵 주위의 안정된 궤도에만 존재할 수 있으며, 불안정한 궤도에 있는 전자들이 안정된 궤도로 떨어지면서 전자의 에너지가 줄어들게 되며 줄어든 에너지만큼 빛으로 방출된다고 하였다. 이때 빛의 에너지는 $E = h\nu$ 이다. 원자 구조와 스펙트럼에 관한 이론 발표 후 1916년에 아인슈타인의 유도방출에 대한 이론을 토대로 1952년 러시아 레베데프(Levedev)연구소의 바소프(N. G. Basov)와 프로호로프(A. M. Prokhorov)에 의해 레이저의 원리가 고안되었다. 1958년 타운즈와 샬로우(A. L. Schawlow)는 광 공진기의 가능성에 대한 이론을 발표하였다. 1960년 미국 휴즈(Hughes) 연구소의 메이만(T. H. Maiman)이 침두 출력 5 kW의 적색광 루비 레이저(694.3 nm)를 발진시켜 레이저가 탄생되었다. 1년 뒤 벨 연구소의 자반(A. Javan) 등에 의해 근적외선의 He-Ne 레이저(1153 nm)가 발진에 성공하였다. 그 후 레이저 여기물질의 발전으로 인하여 다양한 레이저가 개발되게 되었다. 레이저는 여기물질의 상태에 따라 고체, 기체, 액체로 분류 되어 각 응용분야에 유용하게 사용되어 지고 있다. 고체 레이저에는 Yb:YAG(1030 nm), Nd:YAG(1064 nm), 루비(694 nm) 등이 있으며, 기체 레이저는 He-Ne(632.8 nm), Ar⁺(514 nm), CO₂(10600 nm) 등, 액체 레이저는 색소레이저 등이 있다^[2].

고체레이저는 에너지 저장 능력이 우수하며, 고체레이저가 만드는 극초단 레이저를 증폭단에서 증폭하게 되면 적은 규모의 레이저 시스템에서도 일조와트(=1TW) 이상의 출력을 낼 수 있다. 고체 레이저 중 하나인 Ytterbium doped Yttrium Aluminum Garnet(Yb:YAG) 매질은 주로 고효율 레이저에 사용되고 있다. 그 이유는 흡수 밴드폭이 930 nm에서 945 nm로 InGaAs 계의 레이저 다이오드(Laser Diode : LD)에 의한 발진에 용이하여 안정적으로 1030 nm의 형광을 방출할 수 있기 때문이다. 또한 1000 nm 파장대의 레이저 활성이온 중 Yb:YAG 매질은 양자효율이 91%로 상위 레이저 준위 에너지의 10% 정도 밖에 열로 전환되지 않으므로

열적 손실이 적으며, 가장 적게 열을 발생하는 특징을 가지고 있다^[3]. 이러한 특성을 가진 Yb:YAG 매질을 사용함으로써 고효율 레이저의 소형화가 이루어지고 있다^[4].

본 논문에서는 중 펌핑되는 Yb:YAG 레이저를 제작하기 위해 Yb:YAG 매질 냉각장치 설계와 펌프광을 효율적으로 집광시켜 주기 위한 렌즈 설계 등을 수행하였다. 중 펌핑 Yb:YAG 레이저를 제작 후 출력 특성을 고찰하였으며, 광 공진기 거리별 레이저의 출력과 빔질을 측정하였다. 측정 결과를 토대로 중 펌핑 Yb:YAG 레이저 매질의 열 분석을 수행하여 Yb:YAG의 열 렌즈 효과를 고려한 광 공진기 안정조건영역과 불안정조건 영역을 계산하였다.

제2장 이 론

제1절 Yb:YAG 매질

1. Yb:YAG 매질의 특성

Yb:YAG 매질은 주로 고출력 레이저에 사용되고 있으며, 그 이유는 다음과 같다. 흡수 밴드폭이 930 nm에서 945 nm로 펌프 파장에 대하여 15 nm 정도의 넓은 흡수 밴드를 가지고 있어 InGaAs 계열의 고출력 레이저 다이오드(LD)에 의한 펌핑이 용이하기 때문에 안정적으로 1030 nm의 형광을 방출할 수 있다. 그림 1은 Yb:YAG의 흡수 스펙트럼으로 Yb³⁺의 도핑 농도에 따른 흡수 효율을 보여주고 있다^[5].

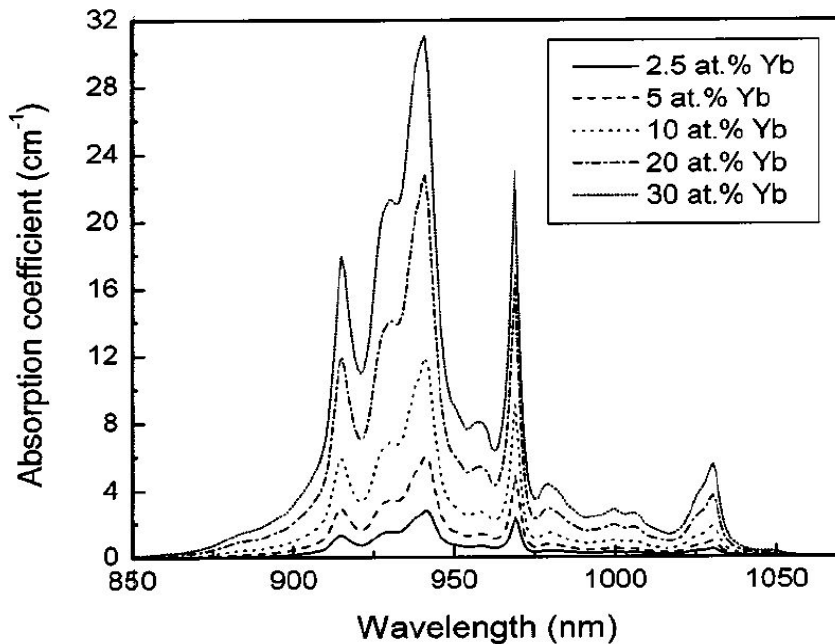


그림 1. 300 K에서 Yb:YAG의 흡수 스펙트럼

Yb:YAG 레이저 매질은 Yb³⁺의 도핑 농도를 100% 까지 자유롭게 할 수 있어 레이저 매질의 길이를 줄이면서 광학적 길이(Optical Length)를 유지할 수 있다^[6, 7].

또한, 1000 nm 파장대의 레이저 활성이온 중 Yb:YAG 매질은 양자효율이 91%로 양자결함(Quantum Defect)가 낮기 때문에 상위 레이저 준위 에너지의 10% 정도 밖에 열로 전환 되지 않아 결정에서 발생하는 열이 적기 때문에 열로 인해 생기는 열 부굴절, 열 렌즈, 파손 등을 효율적으로 줄일 수 있다^[8]. 또한, 상위 준위에서 생명주기가 951 μ s로 길기 때문에 높은 에너지를 저장 할 수 있다^[9].

이러한 특성을 가진 Yb:YAG 매질을 사용함으로써 LD를 이용한 고품질, 고출력 레이저의 소형화가 이루어질 수 있다. 표 1은 Yb:YAG 매질의 특성표이다.

표 1. Yb:YAG 매질의 특성표

화학식	Yb:Y ₃ Al ₅ O ₁₂
펌프 파장	940 nm
펌프 광원의 흡수 밴드	15 nm
레이저 발진 파장	1030 nm
상온에서 생명주기 시간	951 μ s
침투 방출 단면적	$2.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$

2. 준안정 3준위 레이저

1913년 보어(N. H. D. Bohr)의 원자모형에 의하면, 원자는 원자핵과 그 주위를 원운동하고 있는 음전하의 전자들이 각자 에너지를 갖고 있음이 알려졌다. 원자에 따라 전자 수는 다르지만, 전자는 원자핵 주위를 일정한 원궤도 운동하게 된다.

일정한 원궤도를 하는 전자는 안정하다고 하며, 안정한 전자에 에너지가 인가되면 안정한 전자는 에너지를 받아 원자핵에서 좀 더 바깥쪽 궤도로 이동하게 되며 원래의 상태보다 큰 에너지를 갖게 된다. 전자가 에너지를 얻은 상태를 여기상태(excited state)라 하며, 원자와 전자에 외부적인 에너지가 가해지는 것을 펌핑(pumping)이라 한다. 가장 낮은 전자의 에너지 상태를 기저상태(ground state)라 한다.

기저준위(E_1)에 있는 전자는 외부 펌프 광에 의해 여기 되어 여기준위(E_2)로 여기된다. 여기준위(E_2)에 있는 전자는 불안정한 상태이므로 안정된 준위인 기저준위(E_1)으로 천이(transition) 되며, $E_2 - E_1 = h\nu$ ($h=6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$, 플랑크상수)의 에너지를 가지는 광자를 방출하게 된다. 또한 보어의 진동수 조건(frequency condition)에 따르면 원자의 공진주파수(천이주파수) ν_{21} 은 두 에너지 준위의 에너지 차에 의해 결정된다. 따라서 공진주파수는 다음과 같다.

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1)$$

파장 λ_{21} 은 다음과 같이 표현한다.

$$\lambda_{21} = \frac{c}{\nu_{21}} \quad (2)$$

c 는 진공에서의 광속이다.

E_2 에서 E_1 으로 자연천이 될 때의 완화시간(relaxation time)은 원자의 종류나 들뜬 에

너지준위 등에 따라 다르며, 일반적으로 들뜬 원자수가 $1/e$ 로 감소할 때까지 걸리는 시간을 의미한다. 원자의 완화시간은 보통 10^{-9} s 정도이지만 원자 특유의 에너지준위에 따라서는 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ s 정도로 긴 것도 있다. 완화시간이 긴 준위를 준안정상태 (metastable state)라 부른다.

그림 2는 희토류 원소 중 Yb^{3+} 가 활성매질인 Yb:YAG의 준안정 3준위 레이저 에너지 준위도이다. Yb:YAG는 고에너지와 저에너지에 많은 준위가 밀집해 있는 밴드 형태를 가지고 있다. 각 준위는 간격이 좁기 때문에 레이저의 유도 방출 시간보다 빠른 시간에 광자의 상호작용에 의해 열적 평형을 이루게 된다^[6].

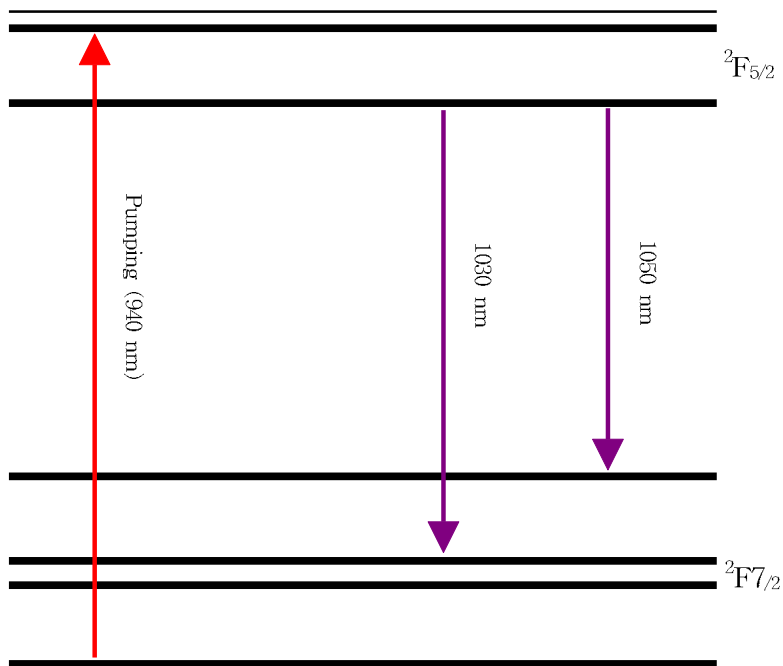


그림 2. Yb:YAG 레이저의 에너지 준위도

원자, 분자 등에 대하여 유도방출의 강도 즉, 활성 물질이 실제로 유도방출에 관여하는 면적을 나타내는 유도방출 단면적(Stimulated Emission Cross Section)은 레이저 발진특성인 출력, 펄스 폭, 문턱전압 등에 따른 온도변화에 의존하여 변화한다^[10].

그림 3은 온도에 따른 Yb:YAG의 유도 방출 단면적을 나타낸 것으로써 Yb³⁺의 도핑율에 대하여 각각 나타내었다. 온도가 높아질수록 유도방출 단면적이 낮아지는 것을 그림 3에서 확인할 수 있다^[5].

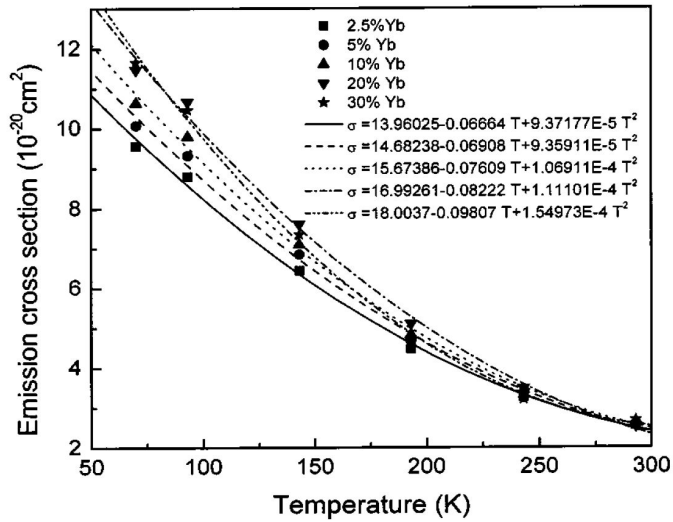


그림 3. 온도에 따른 Yb:YAG의 여기방출 단면적 변화

Yb³⁺가 5wt% 도핑된 Yb:YAG의 유도방출단면적 값은 300 K에서 약 $2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 이다.

제2절 레이저 발진 조건

1. 광 공진기의 원리 및 종류

일반적으로 공진기는 레이저 매질을 중심으로 양 끝에 반사경을 부착시킨 Fabry-Perot 간섭계가 사용된다. 그림 4는 중 펌핑하는 광 공진기의 기본적인 구성 모습이다. 매질을 중심으로 양 끝에 두 장의 거울을 설치한 것을 볼 수 있다. 레이저 공진기를 구성하고 있는 이색거울(Dichroic Mirror) M_1 은 펌프광을 전부 투과시키고 여기 된 광은 전부 반사시키며, 출력경(Output couplor) M_2 는 적절한 투과율을 가지고 여기광을 반사시키며 투과율에 따라 레이저 출력이 변화된다.



그림 4. 광 공진기의 기본적인 구성

매질에 펌프광을 집속 시켜 줌으로써 매질의 활성 영역에서 여기 된 원자의 자연방출에 의해 서로 다른 파장, 위상, 편광을 갖는 광이 방출 되게 된다. 방출 된 광에 의해 유도방출이 일어나게 되며, 유도방출에 의해 발생 된 광은 광축방향으로 진행하며 한 쪽 거울에 의해 반사되어 다시 매질의 활성영역으로 되돌아가 원자를 다시 유도방출 시키게 된다. 이렇게 두 거울의 반사에 의해 유도방출 된 광은 매질의 활성영역을 왕복하게 된다. 왕복하는 광에 의해 강한 유도방출이 일어나게 되어 증폭작용을 하게 된다. 여기서 레이저 출력을 높이기 위하여 M_2 의 투과율을 광 공진기의 이득율과 손실율을 고려하지 않고 높일 경우 레이저 출력 감소를 초래한다. 이득율이 낮을 경우는 거울이나 매질 내의 손실에 의하여 레이저가 발진하지 않게 된다.

그림 5는 광 공진기에 사용되는 양 쪽 거울의 종류에 따라 광 공진기의 다양한 구성을 보여주고 있다.

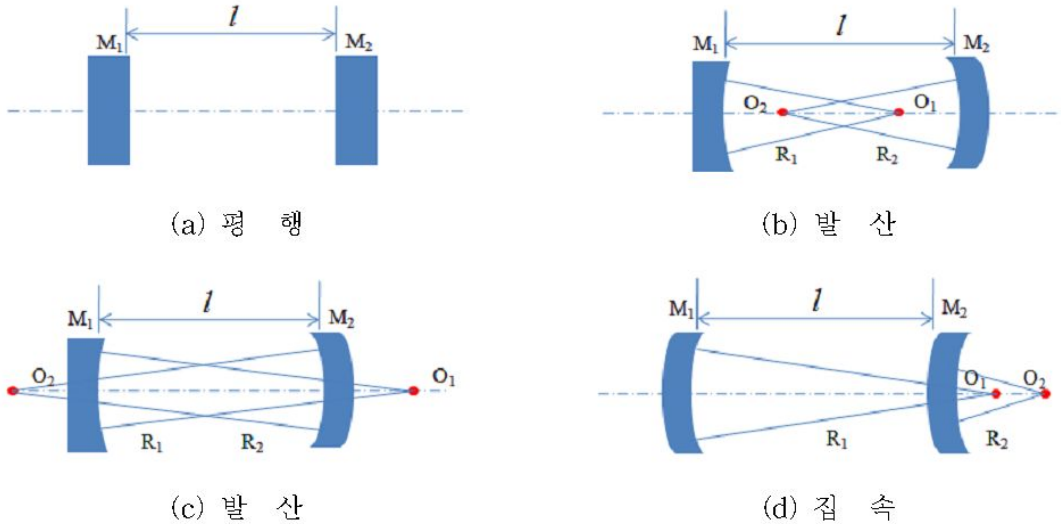


그림 5. 광 공진기의 다양한 구성

그림 5(a)의 광 공진기 구성은 두 거울 모두 평면거울을 사용하기 때문에 두 거울이 평행하지 않을 경우 여기 광의 반복이 광축을 벗어나게 되어 손실이 생길 수 있다. 그림 5(b)는 두 거울 간격 l 보다 두 거울의 곡률 반지름이 작은 경우이다. 이 광 공진기 구조는 l 과 M_1 과 M_2 각각의 곡률 R_1 과 R_2 에 따라서 여기 광이 집속 되거나 확산 될 수 있다.

R_1 과 R_2 의 곡률 반지름이 l 보다 많이 작을 경우 즉, R_1 과 R_2 의 합이 l 보다 크지 않을 경우는 여기 광은 확산 되게 된다. 그림 5(c)와 같이 각 거울의 곡률 반지름 R_1 과 R_2 의 길이가 두 거울 간격 l 보다 길 경우 집속하게 된다. 거울의 곡률 반지름이 커질수록 평면거울과 비슷한 조건이 되기 때문에 두 거울의 평행에 주의해야 한다. 그림 5(d)는 $R_1 > l$, $R_1 + R_2 > l$ 인 경우, 즉 M_1 의 곡률 중심 O_1 이 M_2 와 M_2 의 곡률 중심 O_2 와의 사이에 있을 경우만 여기 광이 집속되어 반복반사가 가능하다^[11].

광 공진기 구조에서 레이저 광이 반복 반사하여 광 공진기 내에 머물러 있는 경우를 안정 공진기라 하며, 레이저 광이 광 공진기 내에 머물지 않을 경우 불안정 공진기라 한다. 공진기 내부에서 왕복 운동하는 레이저 광이 공진기를 벗어나지 않기 위해서는 식

(3)의 조건이 필요하다.

$$0 \leq \left(1 - \frac{l}{R_1}\right) \left(1 - \frac{l}{R_2}\right) \leq 1 \quad (3)$$

위 식을 만족할 경우 안정 공진기라 하며, 만족하지 않을 경우 불안정 공진기라 한다.

레이저 공진기의 왼쪽 거울을 기준으로 나타낸 광속 초점의 위치는

$$z_1 = \frac{(R_2 + |l|)l}{R_2 - R_1 + 2|l|} \quad (4)$$

이며, 초점에서 레이저 광의 반경을 W , 진공에서의 파장을 λ_0 라고 할 때 레이레이 (Rayleigh) 영역은

$$b_1 = \pi W^2 / \lambda_0 \quad (5)$$

이다.

그림 6은 식 (3)을 사용한 안정 공진기와 불안정 공진기를 쉽게 판단할 수 있는 그래프이다. 도표에서 빗금 친 부분 외의 영역은 손실이 많아 불안정 영역이며, 빗금 친 부분은 손실이 적어 안정 공진기의 조건을 만족하는 부분이다. 도표에서 대칭공초점 ($R_1=R_2=l/2$), 공초점 ($R_1=R_2=l$), 평행평면 ($R_1=R_2=\infty$)의 각 공진기는 안정 영역과 불안정 영역의 경계에 있기 때문에 매개변수가 조금이라도 불안정 방향으로 변하게 되면 큰 손실을 가져 오게 된다^[11].

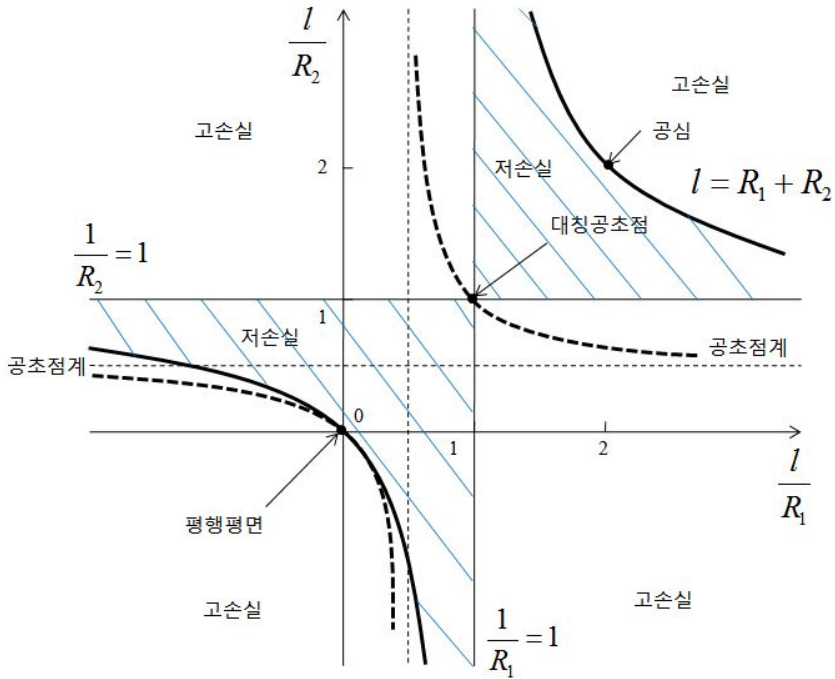


그림 6. 레이저 공진기의 안정조건(빗금)과 불안정 조건(백색)

그림 7은 안정영역과 불안정영역에 속하는 공진기를 나타 내었다. 그림 7에서 안정공진기 영역에 속하는 공진기는 (1)번부터 (6)번까지이며, 불안정공진기 영역에 속하는 공진기는 (7)번부터 (14)번까지이다.

레이저 공진기에서는 레이저의 출력경을 통해 빠져나가는 유도방출광 손실과 공진기 내부 손실이 발생한다. 출력경의 반사율이 95%라면 나머지 5%는 투과하게 된다. 즉 공진기 내부에 레이저 강도(I_0)가 출력경에 의해 $I_0(1-R)$ 만큼 투과하게 된다. 따라서 레이저의 출력을 높이기 위하여 출력경의 반사율을 낮출 경우 출력경을 통하여 많은 유도방출광이 손실되어 레이저 발진이 되지 않을 수 있다.

내부 손실은 공진기 내에서 레이저 매질의 제조 불량이나 이색거울에서 레이저 매질을 지나 출력경으로 진행하는 동안 공기 분자, 먼지 등에 인하여 광자가 흡수 및 산란되어 광자 수가 줄어들게 되는 것을 말한다.

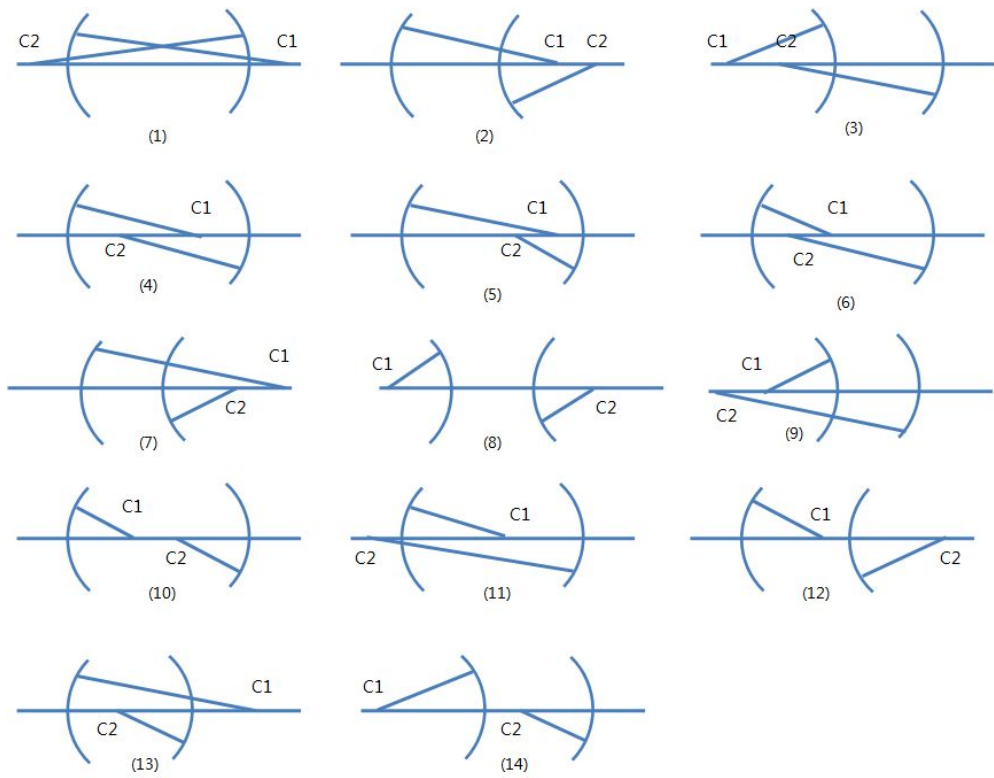


그림 7. 안정영역과 불안정영역의 공진기

2. 이득 조건

여기광은 두 개의 거울에 의해 계속 반사되어 왕복하게 되며 광 공진기 속에 놓인 매질을 지날 때마다 광의 세기가 점점 증가하고, 그 일부는 출력경의 반사율만큼을 제외한 나머지는 공진기 밖으로 나오게 된다. 광의 진행방향을 레이저 매질의 길이 l 방향으로 하고 단위 면적당 광강도를 I_ν , 이득계수를 $\gamma(\nu)$ 라 하면, 광의 강도변화량은

$$\frac{dI_\nu}{dl} = \gamma(\nu)I_\nu \quad (6)$$

의 관계로 표현할 수 있으며, 그 해는

$$I_\nu(l) = I_\nu(0)e^{\gamma(\nu)l} \quad (7)$$

이 된다. 레이저 발진이 준위 E_2 와 E_1 사이의 유도 천이에서 일어날 때, 전자에 주어지는 단위체적당 광파워는

$$P = h\nu W_i(\nu)(N_2 - N_1) = h\nu W_i(\nu)\Delta N \quad (8)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, W_i 는 유도천이확률이다. 식 (8)은 단위 길이당 I_ν 의 증가량인 dI_ν/dl 과 같기 때문에 이득계수는

$$\gamma(\nu) = (N_2 - N_1) \frac{c^2}{8\pi n^2 \nu^2 \tau_s} g(\nu) \quad (9)$$

가 된다^[12].

매질의 이득계수는 $\gamma(\nu)$, 공진기의 소멸 계수를 α 라고 가정하면, 레이저가 동작하기

위한 필요조건은

$$\gamma(\nu) \geq \alpha \quad (10)$$

이다. 위 조건으로부터 레이저 동작에 필요한 균일 선폭 확대 매질의 문지방 밀도 반전 (threshold population inversion)은

$$\Delta N_{th} = (N_2 - N_1)_{th} = \frac{c\alpha}{h\nu B g_H(\nu)} \quad (11)$$

가 된다. 여기서 $B(=B_{21}=B_{12})$ 는 레이저 동작과 관련된 에너지 준위 사이의 아인슈타인 계수로써 원자의 유도 천이율이며, ν 는 광의 진동수, c 는 진공에서 광의 속도이다. $g_H(\nu)$ 는 원자가 방출 할 광자의 진동수 분포이다^[13].

R_1 과 R_2 의 반사율을 가지며 이득계수 $\gamma(\nu)$ 인 레이저 장치에서 레이저가 발진하기 위해서는 I_0 의 광자가 R_1 의 반사율을 가지는 M_1 반사경을 출발하여 증폭기를 지나 R_2 의 반사율을 가지는 M_2 에서 반사하여 증폭기를 역방향으로 진행하여 M_1 에서 반사되어 다시 제자리로 되돌아오는 과정에서 손실과 증폭의 여러 과정을 거치면서 최종적으로는 I_0 이상의 광자가 있어야만 한다. 이것을 발진조건(Oscillation condition)이라하며, I_0 보다 적은 광자가 있다면 공진기 안에서 반복 왕복하면서 소멸하여 레이저 발진이 이루어지지 않을 것이다.

I_0 의 광자가 M_1 을 거쳐 M_2 에 도달할 때의 광자수는 $I_1 = I_0 e^{\gamma(\nu)l}$ 이며, M_2 에서 반사된 후의 광자수는 $I_2 = I_1 R_2$ 이다. 증폭기를 거쳐 M_1 에 도달할 때의 광자수는 $I_3 = I_2 e^{\gamma(\nu)l}$

이다. M_1 에서 반사 된 후에 광자수는 최종적으로 $I_4 = I_3 R_1$ 이다. I_4 가 I_0 보다 커야하므로 $I_4 > I_0$ 이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_0 R_1 R_2 e^{2[\gamma(\nu)l]} > I_0 \quad (12)$$

$$R_1 R_2 e^{2[\gamma(\nu)l]} > 1$$

위의 조건이 만족되어야 레이저가 발진 될 수 있다. 식 (12)를 보면 두 반사경의 반사율 R_1 과 R_2 가 고정 된다면 증폭기의 길이 l 이 긴 것이 유리하다. 하지만, 현실적으로 증폭기의 길이가 길어질수록 레이저 광의 손실이 발생하므로 이득계수 $\gamma(\nu)$ 를 크게 하는 것이 비교적 손쉬운 방법이다.

3. 위상 조건

레이저가 발진하기 위해서는 이득조건 뿐만 아니라 레이저 매질을 통과한 후 왕복 운동한 여기광이 원래의 여기광과 겹쳤을 경우 위상 변화가 2π 의 정수 배가 되어 보강 간섭을 하기 위한 조건이 필요하다.

레이저 발진을 위한 위상 조건은 광 공진기 길이 l 과 레이저 매질에서의 파수벡터 크기 $\beta(\nu)$ 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$2l\beta(\nu) = 2\pi q \quad (13)$$

여기서 파수벡터의 크기는 식 (14)와 같으며, $\Delta\nu$ 는 이득계수의 반치폭(FWHM)이며, 공명 진동수 ν_0 보다 큰 진동수를 ν 라 한다.

$$\beta(\nu) \simeq k + \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right) \gamma(\nu) \quad (14)$$

식 (13)와 식 (14)을 이용하여 $\beta(\nu)$ 를 소거하면 식 (15)를 얻게 된다.

$$2d \left[k + \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right) \gamma(\nu) \right] = 2\pi q \quad (15)$$

길이 l 인 수동 공진기의 고유 진동수를

$$\nu_p = q \left(\frac{c}{2d} \right) \quad (16)$$

이라 하고, 진공에서의 파수 벡터 크기를

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad (17)$$

이라 한다. 식 (15)를 정리하면

$$\nu + \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right) \gamma(\nu) = \nu_q \quad (18)$$

가 된다. 만일 레이저광의 진동수가 $\nu \simeq \nu_p \simeq \nu_0$ 근처에서 동작한다고 가정하면, 식 (18)은

$$\nu \simeq \nu_q - \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\nu_p - \nu_0}{\Delta\nu} \right) \gamma(\nu_p) \quad (19)$$

식 (19)과 같이 쓸 수 있다.

여기서 $\nu_p = q(c/2d)$ 로써 레이저 매질을 제외한 광 공진기의 고유 진동수이며, $\Delta\nu$ 는 매질의 공명 진동수폭이다. 매질의 공명 진동수 ν_0 가 광 공진기의 진동수 ν_q 보다 작아지면 레이저 광의 진동수 ν 는 ν_q 보다 작아지는 것을 알 수 있다. 반대로 광 공진기의 진동수 ν_q 가 커지면 레이저 광의 진동수 ν 는 ν_q 보다 커지게 된다. 이러한 현상을 진동수 끌림(frequency pulling)이라고 부르며, 레이저의 동작이 정상 상태에 도달하면 레이저 매질의 이득 계수 $\gamma(\nu)$ 는 공진기의 소멸 계수 α 와 거의 같아지며, 광의 진동수는

$$\nu \simeq \nu_q - \frac{\delta\nu}{\Delta\nu} (\nu_q - \nu_0) \quad (20)$$

식 (20)와 같이 표현된다. 여기서 $\delta\nu$ 는 공진기의 고유 진동수 폭이며, 매질의 공명 진동수폭 $\Delta\nu$ 가 고유 진동수폭 $\delta\nu$ 보다 매우 클 경우 진동수 끌림 현상은 일어나지 않는다 [13].

제3절 레이저의 출력과 손실을 계산

우리가 레이저를 구성하여 측정할 수 있는 양의 기본적인 관계는 다음과 같다^[14]. 내부 공진기의 파워밀도(I_i) 변화는 광 공진기의 출력(P_{out})과 관계되며, 다음과 같이 레이저 출력을 나타내게 된다.

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_i \quad (21)$$

여기서 A 는 펌프광이 닿는 레이저매질 표면의 단면적, R 은 출력경의 반사율이다.

식(21)은 공진기 내에서 일어날 수 있는 총 파워 손실을 나타내는 식(22)와 이득 계수를 나타내는 식 (23)에 의해서 식 (24)로 나타낼 수 있다.

$$2gl = L - \ln R_1 \approx T + L \quad (22)$$

여기서 $L = 2\alpha l + L_M$ 으로 내부 광공진기에서 왕복 손실이며 L_M 은 거울에 의한 손실이다. α 는 레이저 매질의 흡수 계수이며, l 은 레이저 매질의 두께이다.

$$g = \frac{g_0}{1 + I/I_s} \quad (23)$$

여기서 g_0 는 소 신호 이득계수(small-signal gain coefficient), I_s 는 활성매질에서의 선속으로 $I_s = \left(w_p + \frac{1}{\tau_f} \right) \frac{h\nu}{\gamma\sigma_{21}}$ 이다. w_p 는 펌핑효율, τ_f 는 형광수명이이며, I 는 시스템에서의 파워밀도이다.

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{L - \ln R} - 1 \right) \quad (24)$$

Yb:YAG 매질은 완화시간($10^{-3} \sim 10^{-6}$ s)이 길어 준안정 3준위의 레이저 준위를 가지고 있다. 준안정 3준위 레이저는 3준위 레이저보다 4준위 레이저에 가깝기 때문에 레이저의 출력과 레이저 매질이 흡수한 펌프광의 기울기효율을 식 (25)과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{2(1-R)}{(1+R)(L-\ln R)} \eta_P \eta_T \eta_a \eta_u \eta_B \quad (25)$$

여기서 R 은 출력경의 반사율, σ_s 는 기울기효율(slope efficiency), η_P 는 펌프광효율(pump source efficiency), η_T 는 방사광 전달효율(radiation transfer efficiency), η_a 는 흡수효율(absorption efficiency), η_u 는 상준위효율(upper state efficiency), η_B 는 광일치효율(beam overlap efficiency)이다.

식 (25)는 손실율(L)에 대하여 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{2(1-R)}{(1+R)} \frac{\eta_P \eta_T \eta_a \eta_u \eta_B}{\sigma_s} + \ln R \quad (26)$$

기울기효율(σ_s)는

$$\sigma_s = \frac{\text{레이저의 출력}}{\text{전원 전력 소비량}} \quad (27)$$

이다. 펌프광효율(η_P)는

$$\eta_P = \frac{\text{펌프광의 파워}}{\text{전기적 입력 파워}} \quad (28)$$

이다.

방사광 전달효율(η_T)는 LD에 의해 중펌핑 된 레이저라면 $\eta_T = (1-r)$ 로 나타낼 수 있다. 레이저 매질과 광학적 구성품이 모두 무반사 코팅되어있 다면 η_T 는 매우 적기 때문에 1로 가정할 수 있다. 흡수효율(η_a)는 레이저 다이오드로 펌핑된 경우

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_a = 1 - e^{-\alpha l} \quad (29)$$

여기서 α 는 흡수계수이며, l 은 레이저 매질의 두께이다. 상위상태효율(η_u)는

$$\eta_u = \eta_Q \eta_s \quad (30)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Yb:YAG의 양자효율(η_Q)는 0.9이며, η_s 는 스토크스 요소로 식 (31)와 같다.

$$\eta_s = \frac{\text{펌프광의 파장}}{\text{레이저의 파장}} \quad (31)$$

광일치효율(η_B)는 공진모드와 펌프 파워사이 에 공간적으로 겹친 부분을 나타낸 것으로 가우시안 광으로 가정한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 펌프광의 크기 (w_g)가 레이저 광의 크기(w_B)보다 큰 경우

$$\eta_B = \frac{2w_B^2}{w_g^2 + w_B^2} \quad (32)$$

이며, $w_g \leq w_B$ 인 경우는 $\eta_B = 1$ 로 나타낼 수 있다.

제4절 디스크형 레이저 매질 열분포 해석

1. 디스크 측면 냉각 구조에서의 열분포 해석

고품질, 고효율 레이저 다이오드가 개발됨에 따라 종펌핑 구성의 레이저는 많이 개발되어지고 있다^[1]. 이에 따라 종펌핑 열분포 모양에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 종펌핑 레이저의 열 특성은 균일하지 않은 스트레스 특성과 복잡한 온도 분포를 가진다. 펌프영역의 끝에서 볼 때 온도는 레이저 막대의 옆 표면이 냉각되어 옆 표면의 온도는 감소한다.

레이저는 냉각 방식과 레이저 막대의 모양에 따라 경계 조건이 달라진다^[15-17]. 레이저 매질의 열 분포는 흡수계수에 따라 열 분포 모양이 다르며 흡수계수가 높을수록 펌프광이 닿는 곳의 온도는 높다. 그림 8은 실험에서 사용된 얇은 디스크형 Yb:YAG 매질의 펌프광의 방향과 냉각 방식을 보여준다.

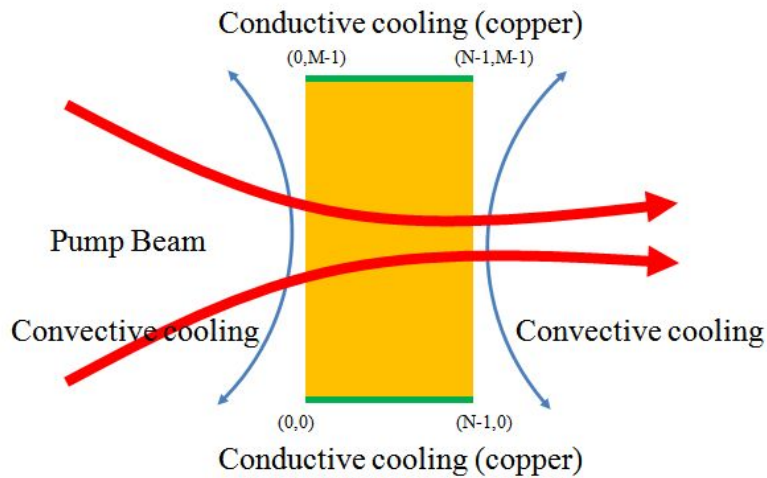


그림 8. 얇은 Yb:YAG 매질에서 펌프광의 방향과 냉각 방식

얇은 디스크형 Yb:YAG의 옆면은 구리와 접촉하여 전도성 냉각을 이용하며, 앞면과 뒷면은 대류에 의한 냉각방식을 이용한다. 레이저 매질에서 펌프광에 의한 열

분포를 계산하기 위해서는 식 (33)의 열전달 방정식을 이용해야 한다^[18].

$$(\rho c) \frac{\partial T}{\partial t} - K \nabla^2 T = q(r, z) \quad (33)$$

여기서 ρ 는 매질의 밀도, c 는 비열용량, K 는 레이저 매질의 열전도도이며, $q(r, z)$ 는 열 발생율이다. 단위 체적당 열 발생량을 계산하기 위한 총 열 발생율은 다음과 같다.

$$Q = \beta P_0 (1 - e^{-\alpha L}) \quad (34)$$

여기서 β 는 비례계수이며, P_0 는 레이저 매질에 입사되는 펌프광의 파워이다.

펌프광이 가우시안(Gaussian) 빔이라고 가정하면 단위 면적당 펌프광의 세기는

$$I_0(r, z) = \frac{2P_0}{\pi w_0^2} e^{\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right)} \quad (35)$$

이다. 단위체적($\Delta z \cdot \Delta A$)에서 열 발생량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} q(r, z) &= \frac{-\beta \Delta I \Delta A}{\Delta V (\Delta z \Delta A)} = -\beta \frac{\Delta I}{\Delta z} = \beta \alpha I \\ &= \beta \alpha \frac{2P_0}{\pi w_0^2} e^{\left(-\frac{2r^2}{w_0^2} - \alpha z\right)} \end{aligned} \quad (36)$$

여기서 $I = I_0 e^{-\alpha z}$ 이다.

β 에 대해 식 (34)에서 구하고 식 (36)에 대입하면 다음과 같이 레이저 매질의 열 발생율을 유도할 수 있다.

$$q(r,z) = \frac{Q\alpha}{P_0(1-e^{-\alpha L})} \frac{2P_0}{\pi w_0^2} e^{\left(-\frac{2r^2}{w_0^2} - \alpha z\right)} \quad (37)$$

$$= \frac{2\alpha Q}{\pi w_0^2} \frac{\exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2} - \alpha z\right)}{(1-e^{-\alpha L})}$$

열전달 방정식을 풀기 위하여 비교적 알고리즘이 간단한 차분법을 이용하여 열전달 방정식을 해석하였으며, 디스크형 레이저 매질은 원통대칭 구조를 가지고 있기 때문에 수치해석을 위한 마디(node)점을 설정하기 위하여 레이저 매질을 원통의 반지름 방향(r)과 광축 방향(z)로 그림 9와 같이 등간격의 직사각형 격자 형태로 나타내었다^[19].

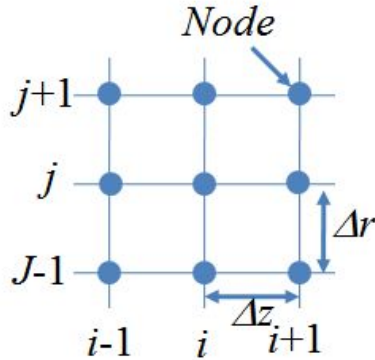


그림 9. 등간격 직사각형 격자

정상상태에서 식 (33)은 다음과 같이 차분 미분식으로 변환될 수 있다.

$$T_{i,j} = \frac{2r\Delta z^2(T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) + \Delta r\Delta z^2(T_{i,j+1} - T_{i,j-1}) + 2r\Delta r^2(T_{i-1,j} + T_{i+1,j}) + 4r\frac{\Delta r^2\Delta z^2}{2k}q_{i,j}}{4(\Delta r^2 + \Delta z^2)r} \quad (38)$$

그림 8과 같이 얇은 디스크형 Yb:YAG 매질의 열 분포를 확인하기 위하여 식 (38)을 사용하여 계산하였으며, 계산 조건은 다음과 같다. Yb:YAG의 흡수계수(α)는 그림 1의 Yb³⁺의 도핑 농도에 따른 흡수효율을 고려하여 6 cm⁻¹로 정하였으며, 두께(L)은 0.35 mm, 펌프광의 반경(w_0)는 가우시안 광으로 가정하여 0.2 mm, Yb:YAG 디스크의 반경(R)은 2.5 mm, 총 열생성 비율(Q)은 10 W, 열전도도(K)은 14×10⁻³ W/mm·K, 냉각 열 전송 효율(h)은 10×10⁻⁶ W/mm²·K, 온도(T)는 300 K로 가정하였다^[20,21]. 그림 10(a)는 실험에 사용된 중펌핑 Yb:YAG 매질의 열 분포도이다.

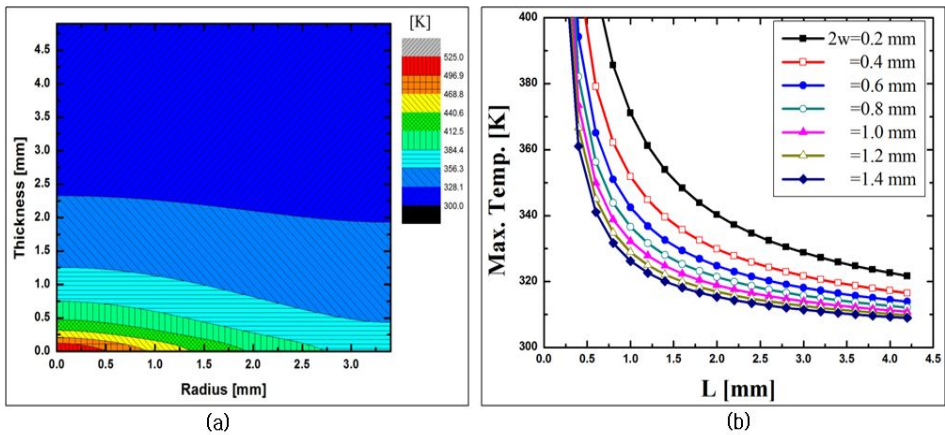


그림 10. 중 펌핑된 레이저 매질의 열분포 및 최대온도

(a) 중 펌핑된 레이저 매질의 열분포도($\alpha L = 2.1$, $Q = 10$)

(b) 면 냉각 방식을 사용하는 중 펌핑된 레이저 매질의 두께와 펌프광 지름에 따른 최대온도($\alpha L = 2.1$, $Q = 1$)

그림 10(a)와 같이 펌프광이 맞는 레이저 매질의 중심부의 표면에 고온이 발생한 것을 볼 수 있으며, 레이저 매질의 두께에서 보면 펌프광이 맞는 표면에서 멀어질수록 온도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한, 레이저 매질의 반경 3.5 mm(레이저 매질의 옆면)부분은 전도성 냉각을 이용하여 레이저 매질의 두께에 따른 열 분포를 고려할 경우 중심부분 보다 열이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 10(b)는 αL 을 2.1로 고정하고 레이저 매질의 두께별로 펌프광의 지름을 0.2 mm에서 1.4 mm까지 변화시켜 레

이저 매질의 최대 온도를 계산한 것이다. 계산 조건은 그림 10(a)의 계산 조건과 같으나 총 열생성 비율(Q)은 최대온도의 크기에만 관여하기 때문에 그림 10(b)의 계산에서 Q 는 1로 두었다. 그림 10(b)를 보면 레이저 매질의 두께가 얇을수록 최대 온도가 높아지며, 두께가 두꺼울수록 최대 온도가 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 레이저 매질의 두께가 3 mm 이상일 경우 레이저 매질의 최대 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 두께가 3.5 mm인 Yb:YAG를 사용하였다.

제5절 열 렌즈 효과에 대한 레이저 공진기 안정 조건

광 공진기의 설계에 대하여 중요한 변수는 증펄펄 레이저 매질에서 온도 분포에 의해 야기된 열 렌즈 이다. 열적으로 생긴 렌즈는 온도에 의존하는 굴절률을 고려하였으며, 레이저 매질에 가우시안 펄프 광이 입사하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(r, z) = I_0 e^{\left(\frac{-2r^2}{w_p^2}\right)} e^{(-\alpha z)} \quad (39)$$

여기서 α 는 흡수계수이며, w_p 는 가우시안 펄프광의 반경($1/e^2$) 이다.

열적 결과에서 펄프파워 P 에 따라 레이저 막대 중심에서 유효 초점 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[14].

$$f = \frac{\pi K_c w_p^2}{P(dn/dT)} \left(\frac{1}{1 - e^{(-\alpha l)}} \right) \quad (40)$$

여기서 K_c 는 레이저 매질의 열 전도성이며, dn/dT 는 온도에 따른 굴절률 변화이다. 유효 초점길이 식 (40)으로부터 유효 초점길이는 펄프 광선의 반경 w_p 의 제곱에 의존한다. 그러므로 유효 초점길이는 공진기 모드와 일치하며 반경이 큰 펄프 광선을 사용하는 것이 바람직하다.

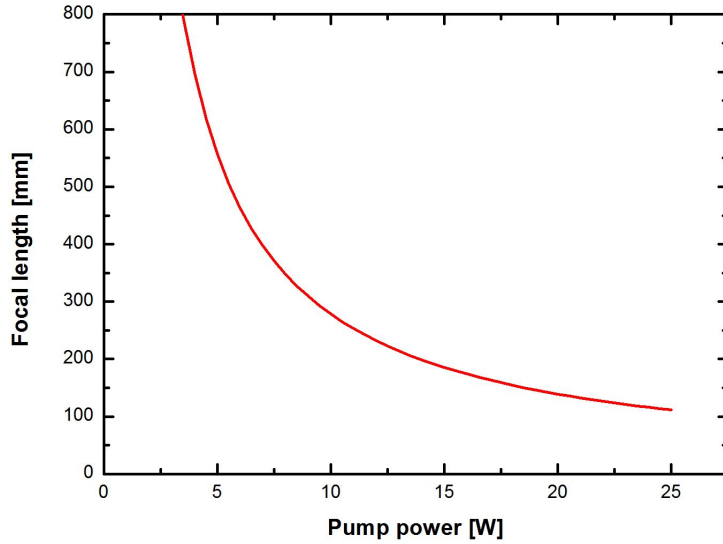


그림 11. 중 펌핑된 Yb:YAG에서 열 렌즈 유효초점거리

Yb:YAG에 대한 요소는 K_c 는 $0.13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, dn/dT 는 $7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 이며^[27], α 는 그림 1의 Yb³⁺의 도핑 농도에 따른 흡수효율을 고려하여 약 6 cm^{-1} 로 가정하였다. 그림 11을 통해 펌프 광의 출력이 높아질수록 레이저 매질의 열적 문제에 의하여 열 렌즈 효과가 발생하여 초점거리가 짧아지는 것을 알 수 있다.

광 공진기 내의 레이저 광 크기를 분석 하기위하여 다음과 같이 분석을 수행하였다.

광학계의 주어진 단면에서 근축광선은 축과 관계되어 각 혹은 기울기 x' , 광축(z)로부터 거리 x 에 의해 정의된다. 광학적 구조를 통과하는 일반적인 광선 경로는 그림 12에서 보여준다.

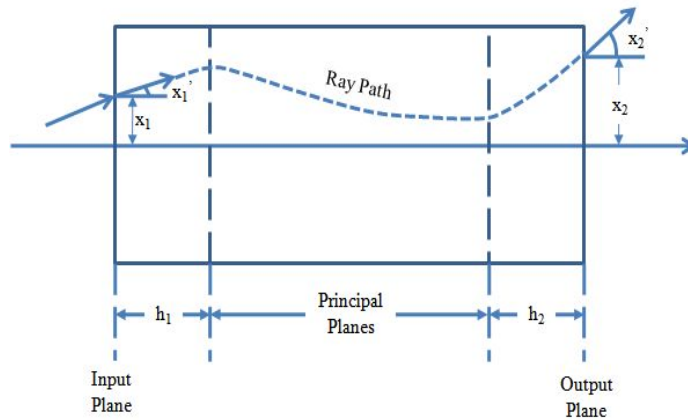


그림 12. 광학계의 일반적인 광선 경로

근축광선의 기울기 x' 은 작다고 가정하고 광학계를 통과하는 광선 경로는 입력 조건 (광학계의 입사면에서 위치 x_1 과 기울기 x_1')과 물질의 광학적 특성에 의존한다. 근축광선에 대하여 출력 요소 x_2 와 x_2' 는 입력요소 x_1 과 x_1' 에 의존하며 이것은 식 (41)과 같이 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad (41)$$

식 (41)은 ABCD 행렬로 광전송행렬이라 불려진다. 행렬 요소는 식 (42)과 같이 광학계의 초점거리 f 와 주요점(h_1, h_2)의 위치와 관계된다.

$$f = -\frac{1}{C} \quad (42)$$

$$h_1 = \frac{D-1}{C}$$

$$h_2 = \frac{A-1}{C}$$

여기서 h_1 과 h_2 는 그림 12에서 입력면과 출력면으로부터 주요면까지의 거리이다^[22].

광전송 행렬식은 광학계의 구조에 따라서 행렬요소가 정해져 있다. 그림 13은 실험에 사용된 광 공진기의 구조이다.

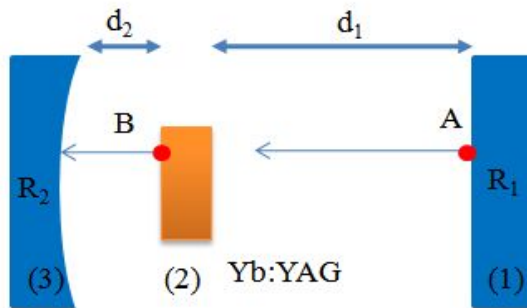


그림 13. 실험에 사용된 광 공진기의 구조

그림 13에서 점 A의 위치에서 화살표 방향으로 광이 진행하는 것을 가정 한다면 광선의 이동은 그림 14와 같은 광학계를 지나가는 것과 같다. 광선이 진행하는 경로는 이해하기 쉽도록 그림 14에서 (1)~(7)까지 각각 설명하였다.

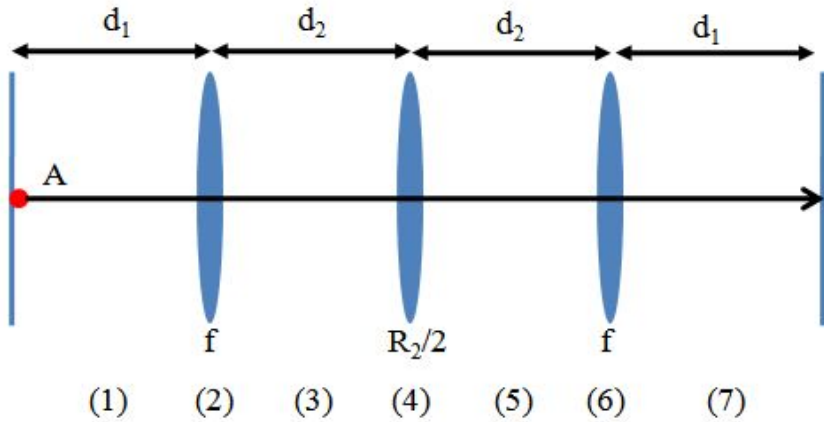


그림 14. 광 공진기 안을 진행하는 광선 경로

- (1) 평면형 출력경에서 출발 한 광(그림 13에서 점 A)은 공기중에서 전파하는 광선과 같이 진행한다.
- (2) 레이저 매질(Yb:YAG)를 지나가게 된다. 이때 레이저 매질내에 펄스광이 분포함과 동시에 열분포가 생기게 된다. 열 분포에 의해 레이저 매질에 열 렌즈 효과가 생기게 되며 레이저 매질이 디스크형이라고 가정하면 초점거리 f 인 얇은 렌즈로 가정하게 된다.
- (3) 레이저 매질을 통과한 광선은 다시 공기 중을 전파하는 광과 같이 진행한다.
- (4) 이색거울(R_2)에 닿은 광선은 이색거울이 오목형 거울이므로 볼록 렌즈와 같이 광선을 집광시키게 되며, 초점거리가 $R_2/2$ 인 얇은 렌즈 전송행렬식으로 나타낼 수 있다.
- (5) 이색거울에 의해 반사된 광선은 공기 중을 전파하는 광과 같다.
- (6) 레이저 매질을 통과 하므로 초점 거리가 f 인 얇은 렌즈 전송 행렬을 사용한다.
- (7) 레이저 매질을 통과한 광선은 다시 공기 중을 전파하는 광과 같다.

위의 순서대로 광선이 진행하게 되며 광전송 행렬식은 식 (43)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

식 (43)의 행렬식을 통하여 나온 ABCD 행렬은 식 (44)를 이용하여 열렌즈 효과에 의한 레이저 광의 크기를 표현할 수 있다.

$$w^2 = (2\lambda B/\pi) / \sqrt{4 - (A + D)^2} \quad (44)$$

열 렌즈 분석은 실험에서 사용한 $R_2 (= 1500 \text{ mm})$ 값과 $d_2 (= 10 \text{ mm})$ 를 이용하여 수행했다. 레이저 매질의 열 렌즈 초점거리 변화에 따른 출력경 표면의 레이저 광의 크기 변화를 그림 15에 보였다.

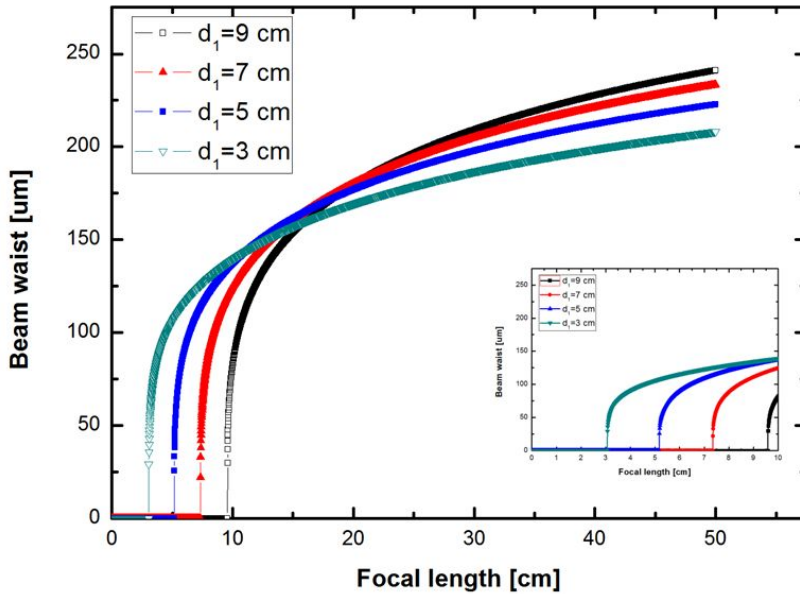


그림 15. d_1 의 변화에 따른 출력경의 레이저 광 크기

광 공진기 구조의 이색거울, 레이저 매질, 출력경 각각의 위치에서 레이저 광의 크기를 위와 같은 방법으로 계산하여 볼 때 광 공진기 안에서 레이저 광이 어떻게 분포 되는지 알 수 있다. 따라서 그림 13의 B점에서의 레이저 광의 크기를 구하기 위하여 식

(45)와 같이 행렬식을 구하여, 식 (44)를 활용하여 계산한 결과 레이저 매질 표면에서의 레이저 광의 크기는 그림 16과 같이 나타났다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

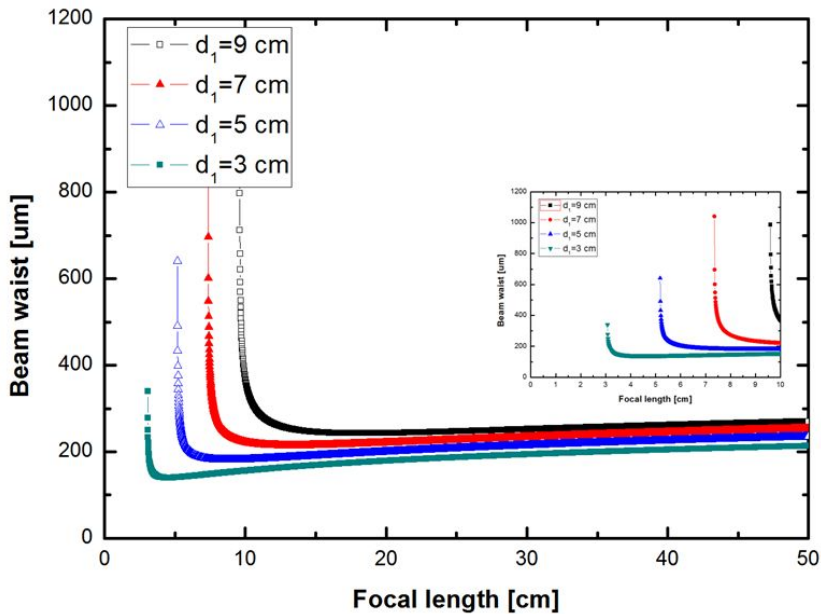


그림 16. d_1 의 변화에 따른 Yb:YAG의 레이저 광 크기

분석결과 그림 15와 같이 레이저 매질과 출력경의 거리에 따라서 레이저가 발진할 수 있는 최소의 열 렌즈 초점거리가 보이고 있다. 열 렌즈의 초점 거리는 펌프 광이 증가할수록 레이저 매질의 열적 문제가 많이 발생함으로써 열 렌즈의 초점거리가 짧아진다. 예를 들어 레이저 매질과 출력경의 거리가 5 cm이면 열 렌즈의 초점 거리가 약 5 cm 아래가 될 경우 레이저 광이 퍼짐으로써 레이저가 발진하지 않을 수 있다는 것을 그림 15에서 보여주고 있다. 그림 15와 그림 16을 비교하여 볼 때 레이저 광이 광 공진기 내 레이저 매질(Yb:YAG)과 출력경 사이에서 어떻게 분포 하는지를 계산상으로 알 수 있다. 여기서 레이저 매질에서 레이저 광의 크기가 반경 약 200 ~ 250 μm 이며, 펌프광의

반경 크기가 약 $200\ \mu\text{m}$ 인 점을 볼 때 공진 모드와 펌프 영역이 잘 일치하였음을 알 수 있다. 이렇게 레이저 발진에 영향을 주는 레이저 매질의 열적 효과인 열 렌즈는 광 공진기 내의 공진 모드와 펌프 영역에 영향을 주기 때문에 레이저 매질을 효율적으로 냉각 시켜 주어야 한다. 따라서 레이저 안정한 조건을 만족하여 레이저 광이 집속되는 광 공진기라도 펌프광의 집광에 의해 발생하는 레이저 매질의 열적 문제에 의한 열 렌즈 효과에 의하여 공진 조건이 바뀌게 된다. 따라서 열을 효율적으로 해소시켜 주어야 하며 본 논문 제 3 장 2절에서는 레이저 매질 냉각 장치를 설계하였다.

제3장 중 펌핑 Yb:YAG 레이저

제1절 렌즈모듈 전산모사

Yb:YAG는 레이저 하위 준위에 열적으로 여기 된 원자밀도가 존재하며, 원자밀도의 양에 의해 레이저 발진 문턱값(lasing threshold), 발진 효율 등이 크게 변하게 된다. 상온에서는 Yb:YAG의 발진 문턱값은 $2-4 \text{ kW/cm}^2$ 정도로 매우 높다^[23]. 초기에는 발진 문턱값이 높아 Ti:sapphire 레이저 등의 여기에 의해서만 발진되었다^[24]. 최근에는 InGaAs 계열의 LD에 의해서 발진이 이루어지고 있다^[25]. 그러나 고출력 LD는 배열(array) 형태로 되어있어서 효율적인 광 펌핑을 하기 위해 집광 렌즈의 설계가 필요하다. 펌프광을 집광시키기 위한 렌즈 모듈은 초점길이를 짧게 할수록 광의 허리가 작아지며 광의 허리가 작아질수록 단위 면적당 펌프광의 세기가 증가하게 된다. 초점길이를 짧게 하기 위해서는 렌즈의 곡률이 큰 것을 써야 한다. 반면 렌즈의 곡률이 커질수록 렌즈에 의한 구면수차가 발생하게 된다. 구면수차는 렌즈의 외곽부분과 렌즈의 중심부분을 통과하는 광선이 꺾이는 정도가 틀려 생기는 수차이다. 이를 보정하기 위해서는 일반적으로 비구면 렌즈를 사용한다. 비구면 렌즈를 가공이 어려우므로 렌즈의 곡률이 다른 렌즈를 조합하여 수차를 줄이기도 한다. 따라서 그림 17과 같이 수차 보정을 해주기 위해서 두 개의 평볼록 렌즈를 사용하였다.

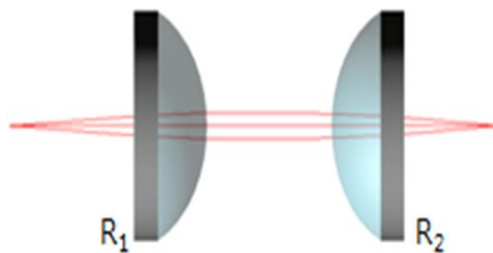


그림 17. 펌프용 렌즈모듈 구조

가장 이상적인 평볼록 렌즈의 곡률을 결정하기 위하여 본 실험에서는 광학설계 프로그램인 Optical Research Associates(ORA)사의 Code V를 사용하여 전산모사 하였다. 렌즈모듈 전산모사를 하기 위한 조건은 표에 나타내었다.

표 2의 (a)와 (b)에서 렌즈 사이의 거리 변화는 5 mm와 20 mm에 일 경우 펌프광의 집광에 크게 영향을 주지 않는 것을 확인 할 수 있었으나, 평볼록 렌즈1과 평볼록 렌즈2를 고정하기 위한 경통에 평볼록 렌즈1을 통하여 퍼지는 펌프광이 경통에 맞아서 분산되어 생기는 손실을 최소화하기 위하여 두 렌즈 사이의 거리는 최대한 짧을수록 좋다고 판단하여 렌즈 사이의 거리를 2 mm 이내로 하였다. 렌즈 모듈과 이색거울을 고정시켜주는 마운트와 매질의 냉각장치의 크기를 고려하였을 경우 렌즈모듈의 최적 초점거리는 30 mm로 결정 하였다. LD에서 나오는 광의 위치를 고려하여 펌프광의 출사구와 렌즈 모듈 사이의 거리를 20 mm로 고정하였다.

그림 18은 전산모사에 의한 결과이다. 전산모사 조건에 따른 결과를 보면 스케일은 0.127로 초점위치를 기준으로 1 mm 간격으로 ± 2 mm 씩 spot diagram을 측정 한 결과이다. 그림 18(a)와 (b)는 광선의 폭이 초점위치를 기준으로 대칭적이지 않은 빔 모양을 보여주며, 수차가 발생된 것을 보여주고 있다. 그림 18(c)는 초점위치를 기준으로 광선의 폭이 거의 대칭적인 빔 모양을 보여주고 있다. 그림 19은 각 렌즈의 반경이 $R_1=13$ mm, $R_2=18$ mm일대의 Point Spread Function 그림이다. 초점위치에서 중심점을 기준으로 광선의 세기 분포를 보여주는 것으로써 이상적인 것을 볼 수 있다. RMS(Root Mean Square)는 0.0091이다. 이러한 전산모사 결과를 바탕으로 본 논문에서 펌프광을 집광시키기 위해 사용된 렌즈의 곡률은 각각 $R_1=18$ mm, $R_2=13$ mm이다.

표 2. 렌즈모듈 전산모사 조건

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Full aperture
Object	-	-	20	-	-	-
Stop	Sphere	Infinity	11.7	BK7_SCHO	Refract	24
2	Sphere	-13.1	5	-	Refract	24
3	Sphere	13.1	11.7	BK7_SCHO	Refract	24
4	Sphere	Infinity	15.6	-	Refract	1.817
Image	Sphere	Infinity	-0.3087	-	Refract	0

(a) $R_1=13.1$ mm, $R_2=13.1$ mm, 렌즈사이의 거리: 5 mm, 초점거리: 15.6 mm

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Full aperture
Object	-	-	20	-	-	-
Stop	Sphere	Infinity	11.7	BK7_SCHO	Refract	24
2	Sphere	-13.1	20	-	Refract	24
3	Sphere	13.1	11.7	BK7_SCHO	Refract	24
4	Sphere	Infinity	15.5095	-	Refract	1.7157
Image	Sphere	Infinity	-0.3087	-	Refract	0

(b) $R_1=13.1$ mm, $R_2=13.1$ mm, 렌즈사이의 거리: 20 mm, 초점거리: 15.5 mm

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Full aperture
Object	-	-	20	-	-	-
Stop	Sphere	Infinity	7.2	BK7_SCHO	Refract	24
2	Sphere	-18	1	-	Refract	24
3	Sphere	13.1	11.7	BK7_SCHO	Refract	24
4	Sphere	Infinity	28.1447	-	Refract	1.9637
Image	Sphere	Infinity	-0.3087	-	Refract	0

(c) $R_1=18$ mm, $R_2=13.1$ mm, 렌즈사이의 거리: 1 mm, 초점거리: 28.1 mm

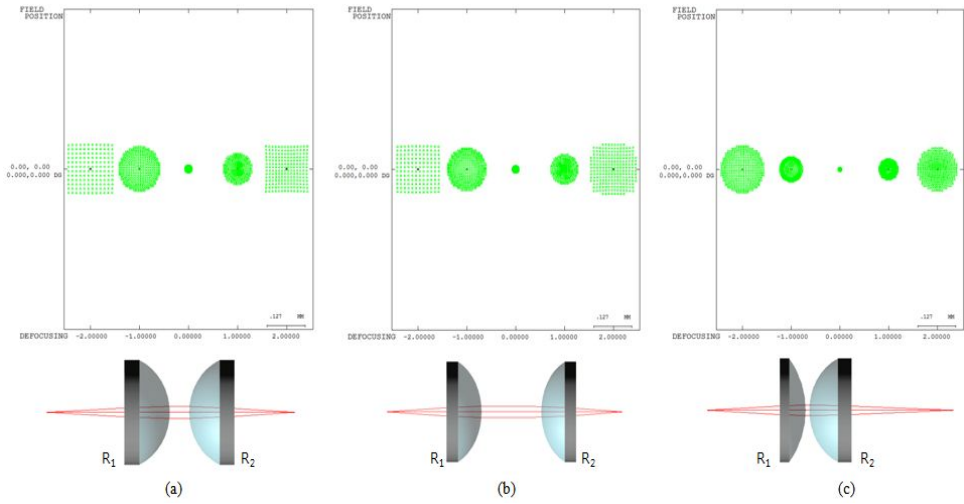


그림 18. 렌즈모듈 전산모사 결과

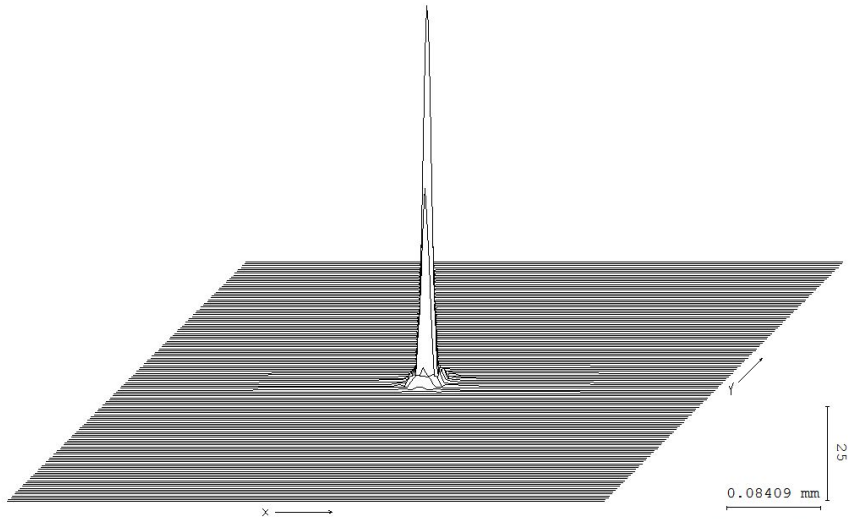


그림 19. Point Spread Function

제2절 매질 냉각장치 설계

Yb:YAG 매질 표면의 극소영역에 펌프광이 집광되기 때문에 극소영역에서 많은 열을 발생하게 된다. 발생된 열을 효율적으로 냉각 시켜 주지 못 한다면 매질에 열적 변형이 일어나거나, 깨질 수가 있을 뿐만 아니라 레이저 출력광의 질을 저하시키기 때문에 매질 내의 열을 안정적으로 냉각 시켜 주어야 한다. 매질을 냉각시키기 위한 수냉식 냉각 장치는 열전도성이 높은 구리(300 K에서 열전도도 401 W/m·K)를 사용하여 제작하였으며, 매질의 옆 표면을 인듐(300 K에서 열전도도 81.8 W/m·K)으로 감싸 구리 냉각 장치와 결합하였다. 구리보다 열전도성이 좋지 않은 인듐으로 매질의 옆 표면을 감싼 이유는 냉각장치와 매질의 결합 시 발생할 수 있는 공간을 제거함으로써 효율적으로 냉각을 시키기 위함이다.

그림 20은 제작된 레이저 매질 냉각 장치이다.

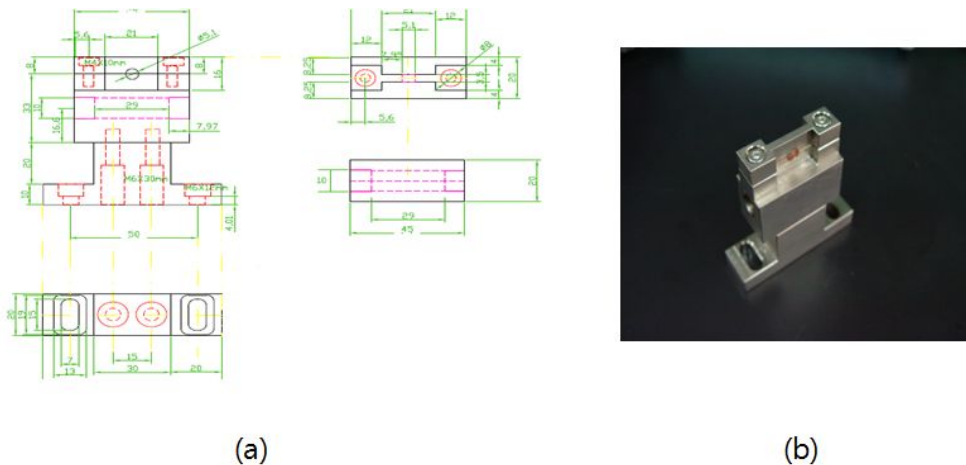


그림 20. 레이저 매질 냉각 장치 (a) 설계도면, (b) 제작된 냉각 장치 사진

제3절 LD의 온도 측정

레이저 광의 출력을 높이기 위해서는 LD의 파워 또한 상승 시켜야 된다. LD의 파워가 상승할수록 LD 자체의 온도도 상승하게 되며, 이를 효율 적으로 냉각 시켜주지 못 하면 LD의 손상을 초래할 뿐만 아니라 안정적인 펄스광을 얻지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 LD에 수냉식 방열판을 부착하여 온도를 효과적으로 낮출 수 있다. 온도를 효과적으로 낮추기 위하여 LD의 출력 증가에 따른 온도 상승을 측정하여 수냉식 냉각기의 설정 온도를 조절함으로써 LD의 온도를 낮추었다.

그림 21은 LD의 수냉식 냉각기(Neslab M25)의 설정 온도가 17°C일 때 출력 증가에 따른 온도 변화를 나타내는 그림이다. LD의 파워가 최저(0 W)일 때 온도는 약 13.8°C, LD의 파워가 최고(23.8 W)일 때 온도는 약 21.8°C 나타냄을 볼 수 있다. 수냉식 냉각기의 설정 온도를 13°C로 조절하여 최고 온도를 19°C 내로 유지 되도록 하였다. 이렇게 함으로써 LD의 손상방지 하였으며, 펄스광의 안정성을 껴하였다.

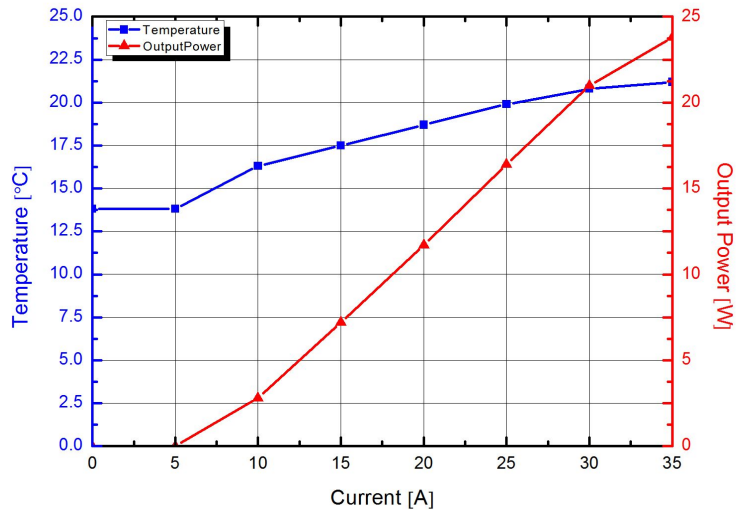


그림 21. 입력 전류에 따른 LD의 출력 및 온도 변화

제4절 종핼핼을 위한 레이저 제작

그림 22는 LD를 사용하여 Yb:YAG 매질을 종핼핼하기 위한 실험 장치도이며, 그림 23은 실험장치 사진이다. 광 공진기 구조는 이색거울(DM)과 출력경(OC)으로 구성되며, 이색거울은 곡률 1500 mm, 942 nm에서 투과율 92%, 1030 nm에서 반사율 99%이며, 출력경은 97%의 반사율을 가진다. 핼프광에 의해 여기 된 Yb:YAG($\phi 5 \times 3.5$ mm, 5wt%) 레이저는 1030 nm의 광을 발진하게 된다. 이색거울의 곡률이 1500 mm로 매우 크므로 그림 5(a)와 같이 평행 구조로 볼 수 있다. 따라서 이색거울과 출력경이 서로 평행하도록 주의를 기울여야 한다.

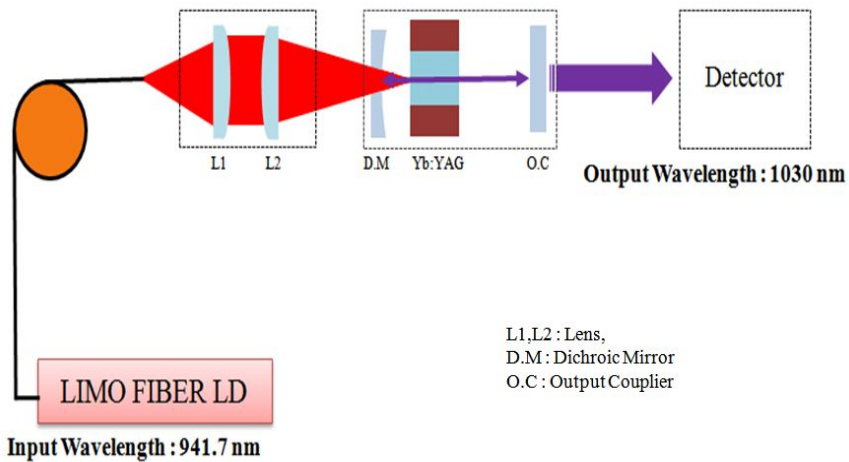


그림 22. 종핼핼 Yb:YAG 레이저 발진 실험 장치도

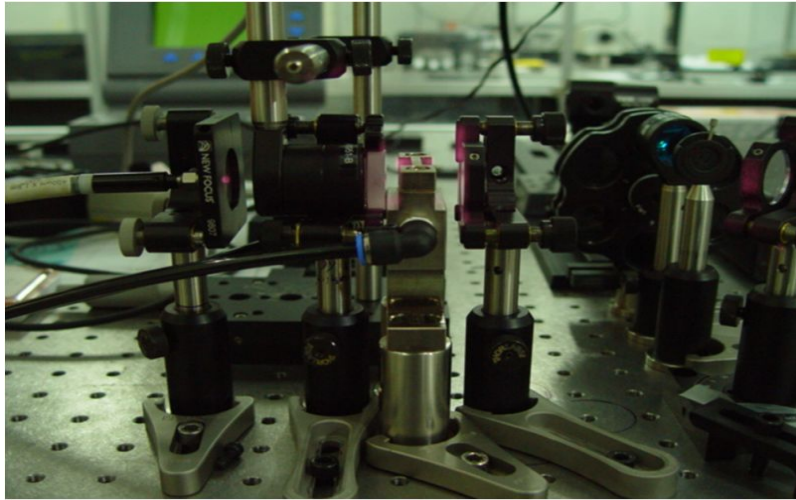


그림 23. 중 펌핑 Yb:YAG 레이저 발진 실험 장치 사진

레이저를 발진하기 위해서는 매질을 여기시킬 수 있는 펌프광과 매질에 펌프광을 집광시켜 주기 위한 렌즈모듈, 매질을 냉각시켜주기 위한 냉각장치, 적절한 공진 거리의 결정이 필요하게 된다. 레이저의 출력을 높게 하기 위해서는 매질의 표면에 닿는 펌프광의 허리를 렌즈 모듈을 통해 작게 하여 단위 면적당 세기를 높게 하여 Yb:YAG의 발진 문턱값을 넘어야 하며, 동시에 매질의 극소 표면적에서 발생하는 열을 효율적으로 냉각시켜야 한다.

제5절 광 공진기의 길이 조정

광 공진기는 이색거울과 레이저 매질(Yb:YAG), 출력경으로 구성된다. 이색거울과 출력경의 구성이 식 (3)의 조건을 만족할 경우 안정적인 공진기가 구성되며 레이저의 발진이 이루어질 수 있다. 그러나 기본 공진기 구조가 안정조건을 만족하여도 Yb:YAG의 극소표면에 펌프광의 집광으로 인한 열 렌즈 효과에 의해 불안정 공진기 구조로 변할 수 있다. 레이저 매질의 열 분포에 의하여 열 렌즈 효과가 발생하게 되어 안정조건을 만족할 수 있는 공진기의 거리에 영향을 주게 된다. 일반적으로 공진기의 거리가 짧을수록 레이저의 출력은 높아지나 빔질은 떨어지며, 공진기의 거리가 길어질수록 레이저의 출력은 낮아지지만 빔질은 좋아진다.

공진기 길이에 대한 레이저 출력 특성을 고찰하기 위해 공진기의 거리별 출력과 그에 따른 빔질을 측정하였다.

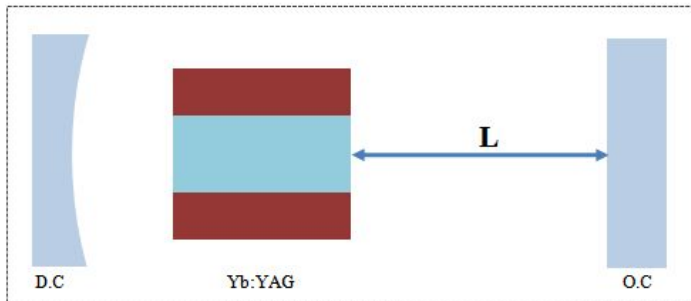


그림 24. 광 공진기의 거리 조정

그림24는 광 공진기의 구성인 이색거울과 레이저 매질(Yb:YAG), 출력경을 보여주며, 레이저 매질과 출력경 사이의 거리(L)를 조정하면서 출력과 빔질을 측정 하였다.

출력경을 통하여 레이저가 발진하더라도 광 공진기에서 새어나오는 레이저 광이 출력 측정에 영향을 주는 것을 방지하기 위하여 출력경과 파워미터 사이에 조리개를 두어 레이저 광을 차단하였다. 광 공진기의 거리가 길어질수록 빔질이 좋아지는 것을 확인하기

위하여 그림 24에서 L을 2, 3, 5, 7, 9 cm 움직여 CCD(Charge-Coupled Device)를 이용하여, 그림 25의 출력 빔 형상 측정 장치도와 같이 렌즈모듈(L3와 L4)의 초점거리를 기준으로 출력 광의 모양을 확인하여 지름을 측정하였다. 빔질 측정에 있어서 출력 측정과 같이 펌프광의 효과를 줄이기 위하여 조리개를 이용하여 차단하여 주었다. 실험에 사용된 CCD의 사양은 다음과 같다.

< CCD : SP620U >

spectral response : 190 nm - 1320 nm

Maximum Beam size : 7.1 mm W × 5.4 mm H

Pixel spacing : 4.4 μm × 4.4 μm

Minimum system dynamic range : 62 dB

Saturation intensity : 2.2 μW/cm²

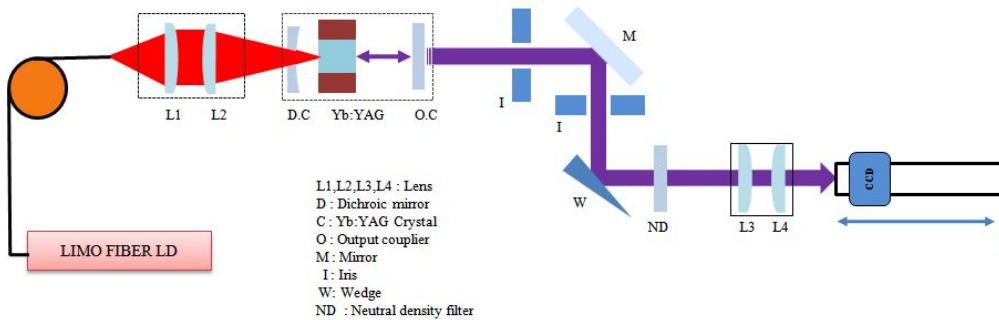


그림 25. 출력 빔 형상 측정 장치도

제4장 실험 결과 및 고찰

제1절 출력 측정

941.7 nm의 파장을 가지는 LD에 의해 중 펌핑 된 Yb:YAG 매질은 1030 nm의 레이저를 발진하게 된다. 그림 26은 LD의 펌프파워 증가에 따라 발진되는 레이저의 출력을 보여준다.

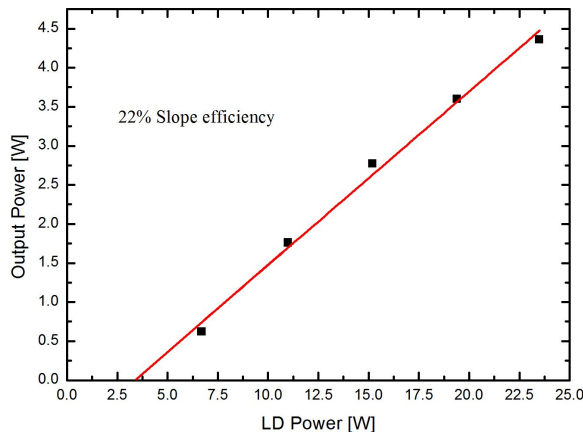


그림 26. LD 파워에 대한 레이저 출력

실험에 사용된 레이저 매질(Yb:YAG)은 Ytterbium이 5wt%로 도핑 되었으며, 지름 5 mm, 두께 3.5 mm 이다. 그림 26에서 보면 레이저를 발진시킬 수 있는 최소한의 LD 파워는 약 3.7 W 정도되는 것을 볼 수 있다. 또한 기울기 효율은 22%로 23.5 W의 LD 파워가 레이저 매질에 집광되었을 경우 4.36 W의 출력을 내는 것을 볼 수 있다. 예를 들어 LD의 파워가 30 W일 경우 발진 된 레이저의 출력은 약 7 W 정도 되어야 한다. 하지만, LD의 파워가 높아질수록 레이저 매질의 열적 문제의 증가에 인하여 예상했던 출력보다 적게 나올 것이며, 빔질 또한 불안한 공진으로 인하여 더욱더 나빠질 것으로 예상되어진다.

제2절 Knife-edge 방식을 이용한 M^2 계산

레이저의 출력 측정에 이어, 각 출력에 따른 빔질을 측정하였다. 빔질을 측정하기 위해 Knife-edge 방식을 사용하여 측정하였다. Knife-edge 방식은 CCD 측정기가 개발되기 전에 레이저 광의 폭을 측정하기 위한 기술이다. 이 기술은 변도날로 레이저 광선을 얇게 차단하면서 출력을 측정한다. 광선의 폭은 측정되어진 출력 곡선에서 출력의 최대값의 10%와 90%(혹은 20%와 80%)의 거리로 정해진다. 기준선이 낮다면 Knife-edge의 광선 폭은 20/80의 경우 60%일치하며, 10/90일 경우 80%일치한다. 그림 27은 Knife-edge 방식을 그림으로 보여준다.

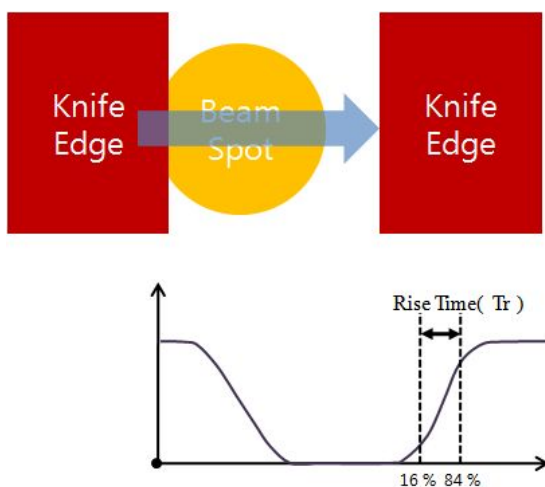


그림 27. Knife edge 측정 방식

본 실험에서는 Knife-edge 방식을 사용하여 광의 지름을 측정하는 장치인 WM100-EC와 WM100을 사용하였다. WM100의 특성은 아래와 같다.

- ▷ Beam Diameter ($1/e^2$): 20 μm to 8 mm
- ▷ Operating Wavelength : 400 nm to 1050 nm
- ▷ Input Optical Power : 10 μW to 1 mW

그림 28은 Knife-edge 방식을 이용한 광의 지름을 측정하기 위한 장치 구성도 이다.

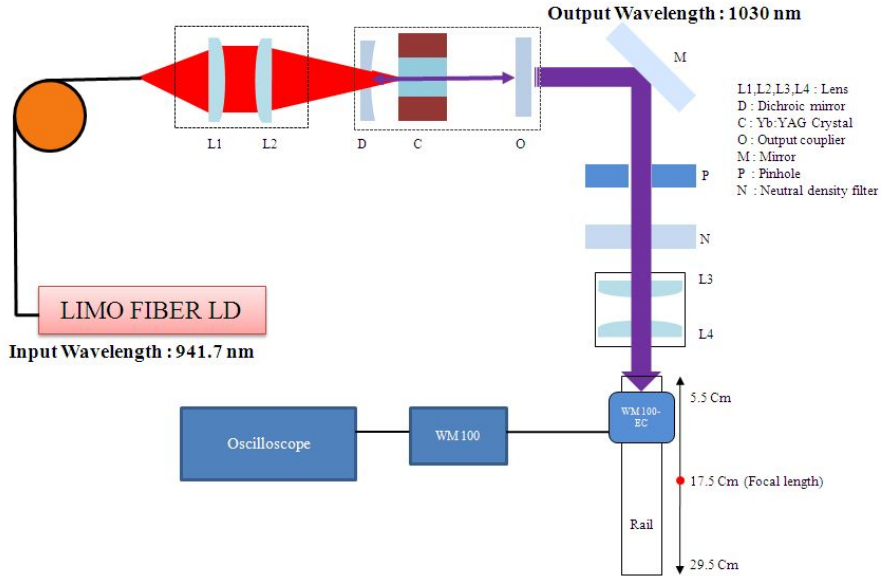


그림 28. Knife edge 방식에 의한 빔질 측정 장치 구성도

중편평에 의하여 발진된 1030 nm의 레이저는 거울에 의해 90° 꺾여서 조리개를 통과시킨다. 조리개를 통과시키는 이유는 주변 형광을 제거하기 위해서 이다. 조리개를 통과한 광을 ND 필터를 사용하여 WM100의 측정 특성에 맞게 광의 출력을 10 μW에서 1 mW로 낮춘 후 렌즈 모듈로 집광하여 생긴 초점 위치를 중심으로 앞뒤로 WH 100-EC를 1 cm 씩 총 25 cm 움직여서 측정 하였다.

WM100은 측정된 광의 지름을 숫자로 보여주지만 값의 변화가 커서 WM100의 모니터 출력을 오실로스코프와 연결하여 상승시간과 주파수를 측정하여 계산하였다. 계산에 사용된 식은 다음과 같다^[26].

$$D = 2 \times \pi \times f \times 16002 \times Tr \quad (46)$$

D : 광 지름($1/e^2$)

f : 주파수(드럼 스피드)

Tr : 상승 시간(16%에서 84%)

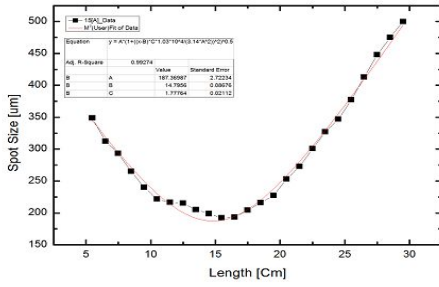
식 (46)을 이용하게 계산되어진 레이저 광의 지름을 활용하여 식 (47)에 의하여 M^2 값을 구하게 된다.

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(z - z_0)M^2\lambda}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (47)$$

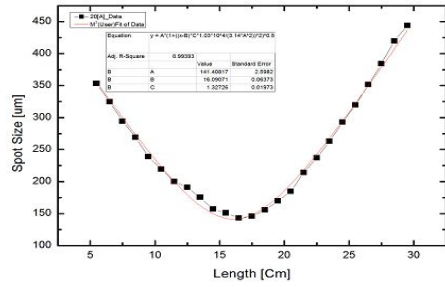
여기서 w_0 는 렌즈모듈의 초점위치에서의 광의 폭이며, z_0 는 렌즈모듈의 초점 위치, λ 는 발진된 레이저 광의 파장이다.

그림 29는 LD의 입력 전류 15 A(LD 파워 : 6.7 W), 20 A(LD 파워 : 11 W), 25 A(LD 파워 : 15.2 W), 30 A(LD 파워 : 19.4 W) 별로 Knife-edge 방식을 이용하여 광의 폭을 측정 후 M^2 를 구하기 위하여 식 (47)을 이용하여 피팅한 그래프이다. 광의 크기가 가장 적게 나온 부분이 렌즈모듈의 초점거리(z_0)로 볼 수 있으며, 초점에 위치한 레이저 광의 지름은 식 (47)의 w_0 에서 사용된다.

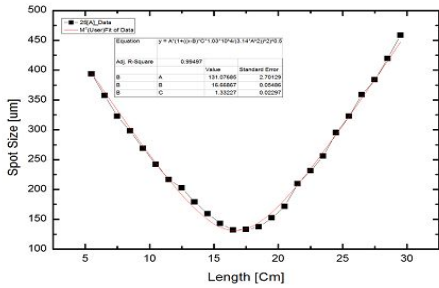
LD의 파워에 따라 출력되는 레이저 광의 빔질(M^2)은 그림 30에서 볼 수 있다. LD의 파워가 11 W와 15.2 W일 경우 M^2 의 값이 1.3인 것과는 달리 6.7 W와 19.4 W 일 경우는 각각 1.7과 1.5인 것을 볼 수 있다. LD의 출력이 6.7 W와 19.4 W의 경우 빔 질이 떨어지는 이유는 각각 생각하여 볼 수 있다. 6.7 W의 경우는 펌프광의 파워가 약하여 레이저 매질(Yb:YAG)에서 열 렌즈 효과가 일어나지 않았을 것으로 보인다. 공진기 구조가 매우 안정하여 저차모드 이외의 모드들이 일부 발진하여 빔질이 떨어졌을 것으로 판단된다. 19.4 W의 경우는 레이저 매질의 극소표면에 파워가 높은 펌프광이 집속됨으로 인하여 레이저 매질의 열 효과에 의해 빔 질이 약간 떨어진 것으로 보인다. 열적문제는 해결하기 위해서는 제 3 장 2절과 같이 효율적인 레이저 매질 냉각 장치를 설계하여야 한다.



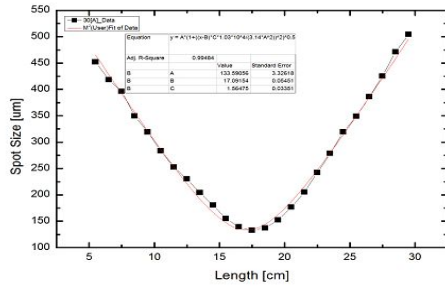
(a)



(b)



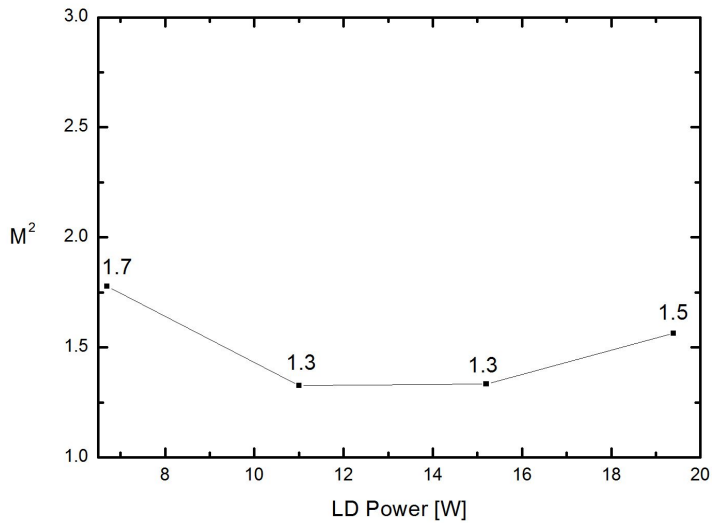
(c)



(d)

그림 29. M^2 그래프

- (a) 입력 전류가 15 A 일 때 M^2 (b) 입력 전류가 20 A 일 때 M^2
 (c) 입력 전류가 25 A 일 때 M^2 (d) 입력 전류가 30 A 일 때 M^2

그림 30. LD 파워에 따른 M^2 값

제3절 광 공진기 길이 조절에 따른 출력 측정

광 공진기 구조에 따라서 레이저의 발진 조건은 달라진다. 그 중 한가지로 광 공진기의 거리를 예로 들 수 있다. 일반적으로 광 공진기의 거리가 멀어질수록 출력은 줄어든다. 그림 24와 같이 광 공진기의 구성 중 이색거울와 레이저 매질(Yb:YAG)사이의 거리를 1 cm로 고정한 후, 레이저 매질과 출력경사이의 거리(L)를 조정하여 거리별로 레이저의 출력을 측정하였다. 레이저 매질과 출력경 사이의 거리가 멀어질수록 레이저 매질에서 나오는 여기광의 손실이 늘어남에 따라 문턱파워(레이저가 발진하기 위한 LD의 최소 파워) 높아졌으며, 또한 레이저의 출력도 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 레이저 매질과 출력경의 거리가 2, 3, 5 cm일 경우는 문턱출력이 6.7 W이며, 7 cm는 7.2 W, 9 cm는 7.8 W였으며, 출력 또한 광 공진기의 거리가 길어질수록 낮아지는 것을 그림 31에서 보여주고 있다.

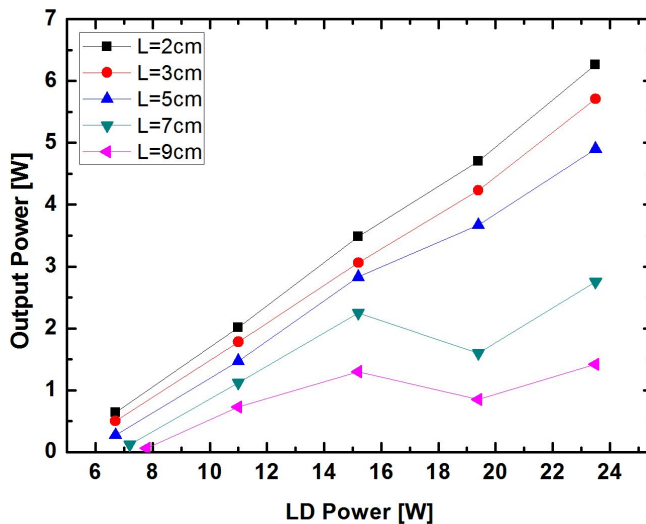


그림 31. 광 공진기 길이에 따른 출력

레이저 매질과 출력경의 거리가 7 cm, 9 cm 일 경우에는 레이저 다이오드의 출력이 약 19.5 W일 때 레이저 발진 출력이 감소하였다가 증가하는 경향을 보였다. 원인 분석을 위

해 펌프광의 상을 렌즈의 집속 면에서 측정하였고 펌프광이 그림 32와 같이 약간 비대칭 모양을 가졌다.

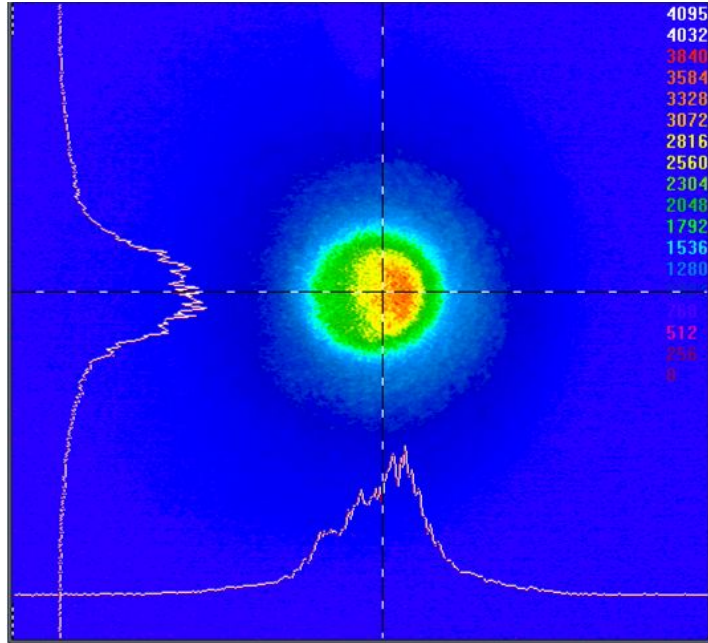


그림 32. 렌즈에 의한 집속면에서 펌프광의 상

그림 15와 16은 펌프광이 대칭구조라는 가정 하에서 광 공진기 안에서 레이저 광의 크기를 구한 것으로 레이저 광의 크기가 없는 지점은 레이저가 발진하지 않는 영역이다. 그리고 그림 11에서 펌프광의 출력이 약 9.5 W일 때 초점거리가 약 15 cm인 점을 알 수 있다. 초점거리에 대한 그림 15와 16에서의 초점거리 15 cm의 위치는 레이저 안정조건의 경계영역 근방에 해당됨을 알 수 있다. 그러나 그림 31과 같이 펌프광이 비대칭 혹은 수차가 있는 경우는 레이저 매질이 수차를 갖는 광학 렌즈와 같은 역할을 하여 레이저 발진이 불안할 수 있다. 레이저 매질과 출력경의 거리가 7 cm, 9 cm 일 경우, 이런 요인에 의해 수치분석 상 안정조건이지만 불안한 출력 특성을 보여 준 것으로 보인다. 따라서 광 공진기를 구성하는 광학계와 레이저 매질에서 발생하는 열적문제 등을 고려하여 효율적으로 공진거리를 조정하여야 한다.

그림 24의 광 공진기 길이(L)가 1 cm인 경우에서, 본 논문 제2장-제3절의 손실을 계산

을 수행하여 보았다. 식 (26)의 손실율 계산식에서 기울기효율(σ_s)는 식 (27)과 같이 전원 전력 소비량에 대한 기울기효율이다. 레이저 매질의 펌프광 흡수와 레이저 출력에 대한 기울기효율과의 관계는 다음과 같다^[14].

$$\sigma_s = \sigma'_s \eta_P \eta_T \eta_a \quad (48)$$

여기서 σ'_s 는 레이저 매질의 펌프광 흡수와 레이저 출력에 대한 기울기효율이다. 측정결과 σ'_s 는 0.38 이며, 식 (48)을 사용하여 계산한 결과 전원 전력 소비량에 대한 기울기효율 σ_s 는 0.1이다. LD 파워가 6.7 W일 때 LD에 흐른 전력은 22.5 W이기 때문에 펌프광효율 (η_P)는 식 (28)을 사용하여 계산한 결과 0.3이며, 방사광 전달 효율(η_T)는 1(본 논문 제3장-제3절), 흡수효율(η_a)는 흡수계수(α)가 6 cm^{-1} , 레이저 매질의 두께가 3.5 mm이기 때문에 식 (29)를 사용하여 계산한 결과 0.88이다. 식 (26)을 사용하여 광 공진기내 손실율을 계산한 결과 손실율은 3%가 나왔다. 손실율의 주요 원인은 불안정한 광학 코팅과 정교하지 못한 정렬 때문인 것으로 판단된다. 손실율이 클수록 레이저 효율을 저하시키므로 레이저 효율 개선을 위해서는 공진기 손실율을 감소시키기 위한 연구가 필요하다.

제4절 광 공진기 길이 변화에 따른 M^2 값의 변화

광 공진기의 거리가 길어짐에 따라서 문턱파워 올라가며, 출력은 낮아지는 것을 본 논문의 제 4장 3절에서 확인하였다. 그러나 광 공진기의 거리가 길어짐에 따라 빔질(M^2)은 좋아지는 것을 그림 33을 통하여 알 수 있다.

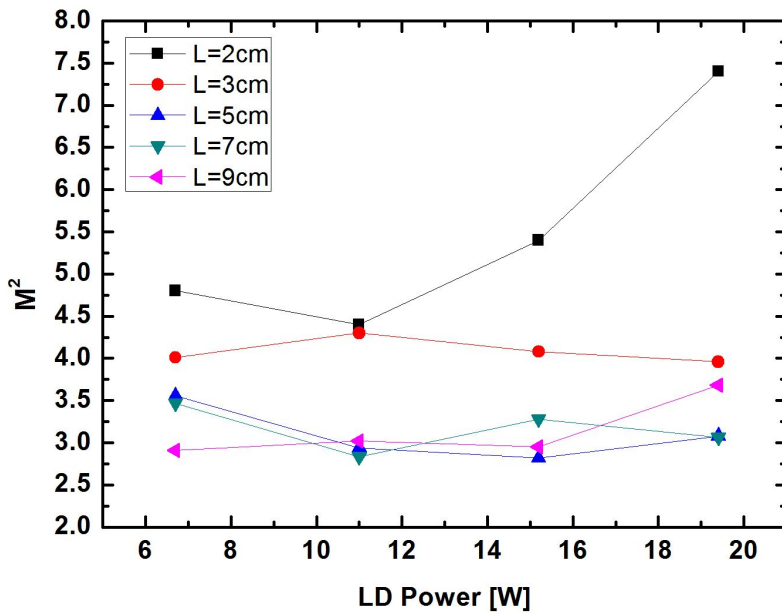


그림 33. 광 공진기 길이에 따른 M^2 값

광 공진기의 길이가 2 cm일 경우 LD 출력에 따른 빔질은 전반적으로 좋지않은 것을 볼 수 있으며, 광 공진기의 길이가 길어질수록 빔질은 좋아져 길이가 9 cm 일 때 균일하고 좋은 빔질을 나타내는 것을 볼 수 있다. 출력 광의 파워와 빔질은 서로 상반되는 특성을 가지고 있으므로 요구되어지는 레이저 사양에 따라 빔질과 출력 사이에 적절한 조절이 필요하다.

제5장 결론

본 논문에서는 중펌핑 Yb:YAG 레이저를 제작하였으며, 발진된 레이저의 출력 특성에 대하여 연구하였다. 중펌핑 Yb:YAG 레이저를 제작하기 위하여, 펌프광을 발생시키는 LD의 출력 증가에 따른 온도 변화를 측정하여 LD의 온도를 낮춤으로써 안정적으로 펌프광을 공급하였으며, LD에 의한 펌프 광을 효율적으로 집광시키기 위하여 Code V를 사용하여 렌즈모듈을 전산모사하였다. 또한 Yb:YAG를 효율적으로 냉각시키기 위한 냉각장치를 설계 및 제작하였다. 이러한 방법으로 제작된 레이저는 안정적으로 1030 nm 파장의 레이저를 발진하였다.

발진된 레이저는 LD의 파워증가에 따라 선형적으로 증가되는 추세를 보였다. 빔질(M^2)의 평균이 1.45일 때 기울기 효율은 약 22%였으며, 빔질의 평균이 3.5일 때는 기울기 효율이 38%이었다. 대체적으로 빔질이 떨어지는 부분은 펌프광의 공급이 약하여 레이저 매질의 충분한 여기가 되지 않았거나, 펌프광의 공급이 강하여 레이저 매질에 열적 문제가 발생하여 빔질이 떨어진 것으로 분석된다.

광 공진기 거리별 출력 측정에 있어서는 특정 거리에서 레이저의 출력이 감소하였다가 다시 증가하는 구간이 발생하였다. 이 문제는 레이저 매질의 열 렌즈 효과를 고려하여 분석하였다. 레이저 출력이 감소한 부분에서 펌프 파워에 대한 열렌즈의 초점거리와 초점거리에 따른 레이저 광의 크기를 비교한 결과 불안정조건의 경계 근처의 레이저 안정 조건 영역에 위치하였다. 펌프광의 모양도 약간 비대칭적인 것을 확인하였다. 이러한 요인으로 불안정한 발진 특성을 보여준 것으로 분석 되어졌다.

광 공진기 거리별 출력 및 빔질 측정에 있어서 거리가 길어질수록 발진 문턱값은 높아지며, 출력은 낮아 졌으나, 빔질은 전반적으로 좋아지는 것을 확인할 수 있었다.

광 공진기는 이색거울과, 레이저 매질, 출력경으로 구성되며, 이 구성이 레이저 공진조건을 만족할 시에 레이저가 발진 하지만, 레이저 매질의 열적 문제로 인하여 레이저가 발진되지 않거나, 빔질 및 출력을 저하시킬 수 있다. 따라서 레이저 설계에 있어서 고려해야 하는 여러 가지 문제 중에서 펌프광의 집광에 의해 발생하는 레이저 매질의 열을 우선 효율적으로 냉각시켜 주어야 한다.

[감사의 글]

대학원 생활을 끝내고 이제 사회의 물결에 인생의 배를 띄워 학부 과정과 대학원 과정동안 정말 많은 지인들을 만나 배우고, 느끼고, 보았던 것을 기초로 힘차게 노를 젓고자 합니다.

대학원 생활 2년 동안 실험한 것과 결과를 발표하고 떠난다고 생각하니 많은 아쉬움이 남지만, 제가 졸업할 수 있도록 이끌어주시고 힘이 되어주신 분들에게 이렇게 감사의 글을 올립니다. 먼저 저희 “아이고~ 정문아!”의 김현수 지도교수님, 제가 나아갈 수 있는 방향을 제시해 주시고 물심양면으로 지도해주셔서 정말 감사드리며, 한편으로는 열심히 하지 못한 저를 생각하면 죄송스럽기도 합니다. 그리고 부족한 논문을 검토하여 주시고 수정하여 주시며, 학부과정부터 대학원 과정까지 지도해주신 “음~ 정문아!”의 김진태 교수님, 저희 지도 교수님께서 해외 연가 중이실 때 저를 정말 잘 챙겨주시고 많은 이야기와 많은 조언을 아낌없이 주신 “아이고~”의 박종락 교수님, 모르는 것이 있을 때 찾아가면 항상 친절하게 가르쳐 주신 “같이 생각해 보자.”의 박시현 교수님, 대학원 과정 막바지에 오셨지만 저에게 많은 가르침을 주신 “하는 일은 잘되?”의 안태정 교수님께 감사드립니다. 또, 고등광기술 연구소에 있는 기간 동안 저를 지도해 주고 많은 것을 알려주신 최일우 박사님, 이성구 박사님, 성재희 박사님, 유태준 박사님, 김철민 박사님, 김형택 박사님, 정태문 박사님, 그리고 유용이형, 형근이형, 용환이형, 승우형에게 감사드립니다.

대학원 생활 동안 옆에서 같이 웃어주고 고민해주며, “글로벌 조직의 회장”이 되고 싶다고 우스갯소리로 말하며 웃는 최호형님, 말하면서 항상 “뭔 말인지 알지?”라고 물어보는 학석이형, “정문아~ 형 힘들다. 한잔하자!”의 준희형, 지금은 외국에 있지만 노래 잘 부르고 둥글둥글한 태원이형, 연구실을 돌아다니면서 들쭉시고 다니는 석현이형님, 멀리 가야할 일이 생기면 항상 차 태워주고 밥까지 사주는 진창이형, 항상 차분한 동준이형, 그리고 재훈이형, 경태형, 현행이형, 한글이형, 나를 형이라고 따라준 랩실 후배 철용이, 승곤이와 그 밖에 기찬이, 훈국이, 회석이, 현성이, 원식이와 외국인이지만 정말 재미있고 착한 Adnan에게 감사드립니다. 그리고 논문 쓰는게 힘들어서 매일 투덜거리고, 시무룩해 있는 나를 많이 챙겨주고 항상 위로해준 여자친구 미진이에게 정말 고맙

다는 말을 전하며, 앞으로 행복하게 해줄까라는 말도 전하고 싶습니다.

마지막으로 저를 이 세상에 낳아주시고 길러주신 아버지, 어머니 항상 건강하시고, 아들 양정문 사회에 나아가 정말 건강하고 열심히 살겠습니다. 그리고 오빠라고는 나 하나인데 대학교를 광주 올라오고 나서는 정말 신경을 써주지 못했지만, 성실하게 자기 일을 해나가는 동생에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

이 외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름을 하나하나 되새기지 못함을 죄송스럽게 생각하며, 대신 제 깊은 감사의 말로 이 글을 마칠까 합니다. “모두들 정말 감사드립니다.”

[참고문헌]

- [1] T. Dascalu, T. Taira, and N. Pavel, "100-W quasi-continuous-wave diode radially pumped microchip composite Yb:YAG laser," *Opt. Lett.* **27**, 1791 - 1793 2002.
- [2] 강성조, *레이저의 이야기*, 세화, 50 - 79, 2001.
- [3] L. D. Deloach, S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and W. F. Krupke, "Evaluation of absorption and emission properties of Yb doped crystals for laser applications," *IEEE J. QE* **29**(4), 1179 - 1190, 1993.
- [4] S. Y. LEE, B. H. Kim, S. J. Jeong, and Y. M. Yu, "부유대응법에 의한 Yb:YAG 단결정 성장 및 광특성," *Korean J. Crystallography* **11**(3), 151 - 156, 2000.
- [5] Jun Dong, Michael Bass, Yanli Mao, Peizhen Deng, and Fuxi Gan, "dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet," *J. Opt. Soc.* **20**(9), 1975 - 1979, 2003.
- [6] 임창환, 이성만, 차병현, 김철중, "종필핑 Thin-disk Yb:YAG 레이저의 출력 특성," Optical society of Korea Summer Meeting 16 - 17, 2001.
- [7] S. Y. Lee, B. H. Kim, S. J. Jeong, and Y. M. Yu, "Crystal Growth of Yb:YAG by Floating Zone Method and Their Optical Properties," *Korean J. Crystallography* **11**(3), 151 - 156, 2000.
- [8] W. W. Rigrod "Saturation effects in high gain lasers," *J. Appl. Phys.* **36**(8), 2487 - 2490, 1965.
- [9] C. Bibeau, R. Beach, C. Ebberts, and M. Emanuel, "Performance of a diode-End-Pumped Yb:YAG Laser," *Diode Laser Technical Review*, 9 - 12, 1997.

- [10] H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byren, "Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers," *IEEE J. QE* **3**(1), 105, 1997.
- [11] 김병태, *레이저공학*, 상학당, 64 - 68, 2006.
- [12] 김병태, *레이저공학*, 상학당, 51 - 53, 2006.
- [13] 장 수, *Fundamentals of Laser Optics*, OTEC 광기술총서, 139 - 141.
- [14] Walter Koechner, *Solid State Laser Engineering*, 5th ed. springer, 1937.
- [15] M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher, and R. A. Fields, "Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers," *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1831 - 1833, 1990.
- [16] J. Frauchiger, P. Albers, and H. P. Wever, "Modeling of Thermal Lensing and Higher Order Ring Mode Oscillation in End-Pumped CW Nd:YAG Lasers," *IEEE J. QE* **28**, 1046 - 1056, 1992.
- [17] S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers, and A. K. Cousins, "Scaling cw diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers," *IEEE J. QE* **28**, 997, 1992.
- [18] U. Farrukh, A. M. buoncristiani, and C. E. Byvik, "An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods," *IEEE J. QE* **24**, 2253, 1988.
- [19] H. S. Kim, J. M. Yang, and C. H. Lim, "Thickness conditions of a thin disk Yb:YAG laser medium for optimal base-surface cooling," *J. Kor. Phys. Soc.* **55**(4), 1425 - 1429, 2009.
- [20] W. Koechner, *Solid-state Laser Engineering*, 4th ed. Splinger Verlag, berlin, 1996.
- [21] F. Kreitha, and M. S. Bohn, *Principle of Heat Transfer*, 6th ed. Brooks/cole, CA, USA, 2001.
- [22] H. KOGELNIK, and T. LI, "Laser Beams and Resonators," *Proc. IEEE* **54**, 1312 - 1329, 1966.

- [23] 임창환 “Micro-Chip Yb:YAG 레이저의 발전 특성,” 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, 365 - 368, 2001.
- [24] T. Y. Fan, "Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG," IEEE J. QE **29**, 1457 - 1459, 1993.
- [25] R. J. Beach, "CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators," Opt. Commun. **123**, 385 - 393, 1995.
- [26] Thorlabs, Inc. *Operating Manual Model WM100 and WM100B Omega Meter Beam Profiler*, 17 - 18, 2005.
- [27] Daniel J. Ripin, Juan R. Ochoa, R. L. Aggarwal, and Tso Yee Fan, "165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser," Opt. Lett. **29**(18), 2154 - 2156, 2004.

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학번	20087137	과정	석사
성 명	한글 양 정 문	한문	梁 禎 文	영문	Yang-Jeong Moon
주 소	전남 순천시 연향동 동부 A 102 동 307 호				
연락처	E-mail : yangjeongmun@naver.com				
논문제목	한글 레이저 다이오드로 증 펌핑된 디스크형 Yb:YAG 레이저 출력 특성				
	영문 Output characteristics of a longitudinally LD pumped Yb:YAG disk laser				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 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 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2010년 02월

저작자: 양 정 문 (인)

조선대학교 총장 귀하