

# 원자력기반연구

자외선 영역의 레이저를 이용한  
공명 광이온화 분광 연구

Resonance Ionization Spectroscopy  
using Ultraviolet laser

# KAERI

한국원자력연구소

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2001 연도 “자외선 영역의 레이저를 이용한 공명 광이온화 분광 연구” 과제의 연차보고서로 제출합니다.

2002 . 1.

과제책임자 : 한 재 민

참 여 자 : 차용호  
이용주  
박현민  
고도경

# 요 약 문

## I. 제 목

자외선 영역의 레이저를 이용한 공명 광이온화 분광 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 원자력 산업 응용뿐만 아니라 원자분광학 분야에서도 공명 광이온화 분광을 위하여 이용되고 있는 고반복률의 레이저는 주로 가시광 영역의 레이저이다. 최근 들어 새로운 레이저인 다이오드 레이저 펌핑 고체레이저가 개발되었고, 이를 이용하는 Ti:sapphire 레이저 및 제 2 조화 파 발생 장치가 등장하면서 자외선 영역의 레이저를 응용하는 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 자외선 영역의 레이저를 이용하게 되면 광자의 에너지가 크기 때문에 이온화 단계를 줄일 수 있어 사용되는 레이저를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 안정성이 향상되는 장점이 있을 것이라고 많은 분광학 연구자들은 예측하고 있다. 본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 펄스 레이저를 개발하고, 이를 이용하여 공명 광이온화를 실증함으로써 원자력 산업에의 응용 가능성을 타진하고자 한다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 펄스형 레이저를 개발하고 개발된 레이저를 이용하여 공명 광이온화를 실증하기 위해 당해년도에는 다음과 같은 연구를 수행한다.

### 1. 다이오드 펌핑 Nd:YAG 레이저 개선

Ti:sapphire 레이저를 펌핑하기 위한 레이저로서 고반복률의 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한다. 이 레이저는 본 연구실에서 연속형 레이저로 개발된 것을 본 연구에 알맞게 고반복률 펄스형 레이저로 개선한다. 발진 파장은 532nm, 출력은 5kHz 반복률에서 20W이상을 목표로 한다.

## 2. Ti:sapphire 레이저 설계

고반복률의 펄스형 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 분광학 연구용 Ti:sapphire 레이저를 설계 및 설치한다.

## 3. 자외선 영역의 분광 자료 수집

자외선 영역의 레이저를 이용하여 공명 광이온화를 실증하기 위한 시료로 이용될 Yb 원자의 여기준위 자료를 수집한다.

## IV. 연구개발결과

본 연구에서는 주로 Ti:sapphire 레이저를 펌핑하기 위한 다이오드 펌핑 Nd:YAG 레이저를 개선하고 이 레이저로 펌핑되는 Ti:sapphire 레이저를 설계 제작하였다. AO Q-switch를 이용하여 연속발진 형의 Nd:YAG 레이저를 고반복률의 펄스형으로 만들고, 레이저빔의 quality를 좋게 하기 위하여 cavity 내에 두 개의 헤드를 설치하였다. 레이저빔의 출력과 quality에 큰 영향을 주는 열렌즈 효과, cavity 길이 및 구조를 simulation에 의해 최적화 함으로써 Nd:YAG 레이저의 개선을 완료하였다. 개선 후 5kHz의 반복률에서 30W의 532nm 레이저빔을 발진하는데 성공하였다.

또한 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 분광용으로 사용할 Ti:sapphire 레이저를 설계 완료하였다. 레이저 발진을 위한 기초실험으로서 기본적인 파장가변 영역을 조사한 결과 730 - 850 nm의 넓은 영역에서 파장가변이 가능함을 확인할 수 있었다. 분광을 위한 Ti:sapphire 레이저는 선폭이 좁아야하므로 Grating을 이용한 self-seeding 형식의 파장가변 레이저를 제작할 계획이다.

## V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

당해년도에 개선된 고반복률 펄스형 Nd:YAG 레이저와 이 레이저로 펌핑되는 Ti:sapphire 레이저는 차기년도에 기술 실증하려는 공명 광이온화 분광 연구에서 자외선 영역의 레이저를 발진시키는데 활용될 예정이다. 또한 차기년도의 공명 광이온화 분광연구가 성공적으로 수행 완료되면 원자 분광기술을 개발하고 있는 중장기 사업에도 활용가능할 것으로 기대된다.

# SUMMARY

## I. Project Title

Resonance Ionization Spectroscopy using UV (Ultraviolet) laser

## II. Objective and Importance of the Project

Currently, the high repetition lasers used in the MPI (Multi-Photon Ionization) research in the atomic spectroscopy field as well as in the nuclear industries were visible range lasers. Recently however, solid state lasers pumped by diode lasers has been emerged, and Ti:Sapphire laser pumped by this type of solid state laser generates the UV laser beams with the help of the SHG(Second Harmonic Generator), enabling the research using these lasers. The need for the research with UV laser has risen since the introduction of the Ti:sapphire laser and the SHG that uses the new diode laser pumping solid state laser. When using this UV laser, scientists are expecting that it can increase the stability of the system as well as reduce the number of necessary lasers by reducing the number of steps for ionization due to the large photon energy. This study was carried out with the objective of examining the possibility of nuclear industrial application by demonstrating the resonant photo-ionization by developing the high repetition UV pulse laser.

## III. Scope and Contents of Project

In this study the following research has been carried out to prove the resonant photo-ionization by using the high repetition pulse-type UV laser in the UV range.

1. Enhancement of the Nd:YAG laser pumped by Diode laser

The high repetition pulse-type Nd:YAG laser is used for the pumping of Ti:sapphire laser. This CW(continuous wave) laser that was developed in this lab was enhanced into a high repetition pulse-type laser appropriate for this study. The final goal of the laser is of the wave length 532nm with the output of 20W or more at 5 kHz.

2. Ti:sapphire Laser Designing

The Ti:sapphire laser for atomic spectroscopy research that is pumped by the high repetition pulse-type Nd:YAG laser was designed and installed.

3. Collecting the spectroscopic data in the UV region

The spectroscopic data for the excitation state of the Yb atom was collected, which will be used as the feasibility test for the proving of resonant photo-ionization using UV laser.

#### IV. Result of Project

In this study, Ti:sapphire laser which is pumped by the enhanced Nd:YAG laser using laser diode, was designed and manufactured. The AO Q-switched CW Nd:YAG laser was converted into a high repetition pulse-type laser using the AO Q-switch, and two heads were installed inside the cavity in order to improve the laser beam quality. The Nd:YAG laser enhancement was completed by optimization using a simulation for the cavity length, structure and thermal lens effect that greatly effected the laser beam output and quality. As the result of the enhancement, a 30W laser at 532nm and at 5kHz was successfully made.

Also, the Ti:sapphire laser that will be used for atomic

spectroscopy which is pumped by the Nd:YAG laser, was completely designed. As a basic experiment for laser oscillation, we measured the tunability of the laser, and it turned out that the wave tunability range was 730–850 nm. A self-seeding type tunable laser using grating for narrow line width, is planned to be designed due to the fact that the Ti:sapphire laser should be of narrow line width for spectroscopy use.

## V. Proposal for Applications

The Ti:sapphire laser and the high repetition pulse-type Nd:YAG laser that pumps it developed this year, is planned to be used in demonstrating the technology of the resonant photo-ionization spectroscopy utilizing the UV lasers in the coming years. Also, when the resonant photo-ionization spectroscopy research completes successfully in the coming years, it is expected to be applied to the nuclear long-term projects in developing the atomic spectroscopy technology.

# 목 차

제 1 장 서 론	10
제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1 절 Nd:YAG 레이저 개선	11
1. Nd:YAG 레이저의 기본적 성질	11
2. DPSSL의 공진기	13
3. Nd:YAG 레이저 매질의 열효과	15
4. 레이저 공진기 내에서의 열효과에 대한 전산시뮬	25
5. 열효과를 고려한 DPSSL의 개선	36
제 2 절 Ti:sapphire 레이저 설계 및 제작	45
1. Ti:sapphire 레이저의 특성	46
2. Ti:sapphire 레이저의 공진기	47
3. 자기 과중형 Ti:sapphire 레이저	52
제 3 절 Yb 원자의 분광학적 특성	57
1. Yb 원자의 물리적 성질	57
2. Yb 원자의 에너지 준위와 이온화 경로	58
3. 공명 이온화 실험 장치	60
제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	62
제 4 장 참고문헌	64

# 그 림 목 차

그림 1. Nd:YAG 레이저 매질의 흡수 스펙트럼 -----	12
그림 2. Nd:YAG 레이저 head의 구성도 -----	13
그림 3. 레이저 다이오드로 펌핑된 Nd:YAG rod의 형광분포 -----	14
그림 4. 열적 stress에 의한 Nd:YAG 레이저 rod의 복굴절 -----	16
그림 5. 광선의 정의 -----	18
그림 6. Gaussian 빔의 진행과 정의 -----	20
그림 7. 두 개의 거울로 이루어진 공진기 -----	21
그림 8. 두개의 평면거울과 볼록렌즈로 이루어진 공진기의 모드 ---	23
그림 9. 두 개의 평면거울과 초점거리 500 mm의 렌즈로 이루어진 공진기의 모드 -----	24
그림 10. Nd:YAG 레이저 rod와 평면거울로 이루어진 공진기 ----	25
그림 11. Nd:YAG 열 렌즈 효과에 따른 공진 모드의 변화 -----	26
그림 12. Nd:YAG 레이저 rod의 열 렌즈 효과를 고려한 공진기 길이에 따른 공진 모드 -----	27
그림 13. 열 복굴절 효과에 의한 편광 모드 변화의 예 -----	27
그림 14. 열 복굴절 효과를 고려한 레이저 공진기의 모드 변화 ---	28
그림 15. Nd:YAG 레이저에서 발생하는 열량에 따른 두 편광 모드의 안정조건 영역 -----	29
그림 16. 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 이용하는 공진기 -----	30
그림 17. 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod로 구성된 공진기의 $Q_T$ 에 대한 공진 모드 -----	31
그림 18. 두 Nd:YAG 레이저 rod가 중앙에 있는 경우와 양 끝에 있는 경우의 공진 모드 -----	32
그림 19. 두 Nd:YAG 레이저 rod 사이에 90도 편광 회전판을 설치한 공진기의 $Q_T$ 에 따른 공진 모드 -----	33
그림 20. 두 Nd:YAG 레이저 rod에 90도 편광 회전판을 설치한 경우의 공진 모드 분포 -----	34
그림 21. 공진기의 비대칭성이 복굴절 상쇄에 미치는 영향 -----	35
그림 22. 제작한 Nd:YAG 레이저 -----	37
그림 23. 제작한 Nd:YAG 레이저의 연속발전 출력 특성 -----	38
그림 24. 레이저에 사용된 음향광학 변조기 -----	39
그림 25. Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 출력 -----	39
그림 26. Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스 에너지 -----	40

그림 27. 2차 조화파 발생을 위한 KDP 결정이 설치된 모습	41
그림 28. Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력 특성	41
그림 29. Nd:YAG 레이저의 연속발진 출력 특성	42
그림 30. Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력 특성	43
그림 31. Nd:YAG 레이저 2차 조화파의 펄스 에너지 특성	44
그림 32. Ti:sapphire 이득 매질의 에너지 준위	45
그림 33. Ti:sapphire의 파장에 따른 흡수 단면적과 형광 스펙트럼	46
그림 34. 회절격자의 입사각과 회절각	47
그림 35. Littrow 형 레이저 공진기의 구조	48
그림 36. GIM 레이저 공진기의 구조	49
그림 37. GIM 레이저의 회절격자와 파장가변 거울	50
그림 38. 자기 파종형 Ti:sapphire 레이저	52
그림 39. 기본 발진 실험을 위한 Ti:sapphire 레이저 공진기	52
그림 40. Ti:sapphire 레이저 결정이 설치된 모습	53
그림 41. 기본 Ti:sapphire 레이저의 출력 특성	53
그림 42. 기본 Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼 특성	54
그림 43. 파장 가변 범위 측정을 위한 Ti:sapphire 레이저 공진기	54
그림 44. Ti:sapphire 레이저의 파장 가변 범위	55
그림 45. 자기 파종형 Ti:sapphire 레이저의 구성도	56
그림 46. Yb 원자의 주요 에너지 준위도	59
그림 47. 자외선 영역의 레이저를 이용한 공명이온화 실증 실험 장치 구성	61

## 표 목 차

표 1. Nd:YAG 레이저 매질의 물리적, 광학적 성질	11
표 2. Nd:YAG 레이저 매질의 열 특성	17
표 3. 많이 쓰이는 ABCD matrix	19
표 4. Yb 동위원소의 자연상태의 성분비	57

# 제 1 장 서 론

현재 원자력 산업 응용뿐만 아니라 원자분광학 분야에서도 공명 광이온화 분광을 위하여 이용되고 있는 고반복률의 레이저는 주로 가시광 영역의 레이저이다. 최근 들어 새로운 레이저인 다이오드 레이저 펌핑 고체레이저가 개발되었고, 이를 이용하는 Ti:sapphire 레이저 및 제 2 조화파 발생 장치가 등장하면서 자외선 영역의 레이저를 응용하는 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 자외선 영역의 레이저를 이용하게 되면 광자의 에너지가 크기 때문에 이온화 단계를 줄일 수 있어 사용되는 레이저를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 안정성이 향상되는 장점이 있을 것이라고 많은 분광학 연구자들은 예측하고 있다. 본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 펄스 레이저를 개발하고, 이를 이용하여 공명 광이온화를 실증함으로써 원자력 산업에의 응용 가능성을 타진하고자 한다.

본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 펄스형 레이저를 개발하고 개발된 레이저를 이용하여 공명 광이온화를 실증하기 위해 당해년도에는 다음과 같은 연구를 수행하였다.

## 1. 다이오드 펌핑 Nd:YAG 레이저 개선

Ti:sapphire 레이저를 펌핑하기 위한 레이저로서 고반복률의 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한다. 이 레이저는 본 연구실에서 연속형 레이저로 개발된 것을 본 연구에 알맞게 고반복률 펄스형 레이저로 개선하였다. 발진 파장은 532nm, 출력은 5kHz 반복률에서 30W이상을 얻어 목표를 초과 달성하였다.

## 2. Ti:sapphire 레이저 설계

고반복률의 펄스형 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 분광학 연구용 Ti:sapphire 레이저를 설계 및 설치하였다.

## 3. 자외선 영역의 분광 자료 수집

자외선 영역의 레이저를 이용하여 공명 광이온화를 실증하기 위한 시료로 이용될 Yb 원자의 여기준위 자료를 수집하였다.

## 제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 Nd:YAG 레이저 개선

레이저 발명 이후 Ti:sapphire 레이저, 색소 레이저 등의 펌핑에 유용한 고출력 청색 레이저 개발에 관한 연구가 꾸준히 지속되었다. 1990년대 중반까지는 구리 증기 레이저와 같은 플라즈마 튜브에 기초한 레이저가 고출력 청색 광원으로 주로 사용되었으나, 장치가 거대하고 수명이 짧아 유지 보수에 어려운 점이 많았다. 이에 반해 1 $\mu$ m 정도의 근적외선 영역에서는 많은 Nd 계열의 고체 레이저가 개발되어 급속한 발전이 이루어 졌다. 특히, Nd:YAG 레이저는 물리적 특성이 우수하여 지금까지 가장 많이 상용화되어 널리 사용되고 있다.

#### 1. Nd:YAG 레이저의 기본적 성질

Nd:YAG 레이저는 4준위 레이저 매질로서 1,064 nm의 발진 파장을 가지며 물리적, 화학적으로 안정한 성질을 가진다[1]. Host 물질인 YAG의 강도 및 경도도 비교적 높은 편이어서 가공 및 연마가 용이한 장점도 가진다(표 1). 또한, 그림 1과 같이 넓은 흡수 대역을 가지기때문에 섬광등, 방전등과 같이 연속적인 넓은 스펙트럼을 가지는 펌핑광원으로도 비교적 효율적인 펌핑이 가능하다. 형광수명도 230  $\mu$ s 정도로 긴 편이기 때문에, 수백  $\mu$ s의 방전시간을 갖는 섬광등으로 펌핑 가능하여 펄스형 레이저 제작에도 유리하다.

표 1. Nd:YAG 레이저 매질의 물리적, 광학적 성질.

화학식	Nd:Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
녹는점	1970 °C
Knoop hardness	1215
밀도	4.56 g/cm <sup>3</sup>
Rupture stress	1.3-2.6 × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>3</sup>
Modulus of stress	3 × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>3</sup>
Linewidth	4.5Å
Stimulated emission cross section	R <sub>2</sub> - Y <sub>3</sub> : 6.5 × 10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup> 4F <sub>3/2</sub> - 4I <sub>11/2</sub> : 2.8 × 10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup>
Spontaneous fluorescence lifetime	230 $\mu$ s
굴절율	1.82 at 1.0 $\mu$ m

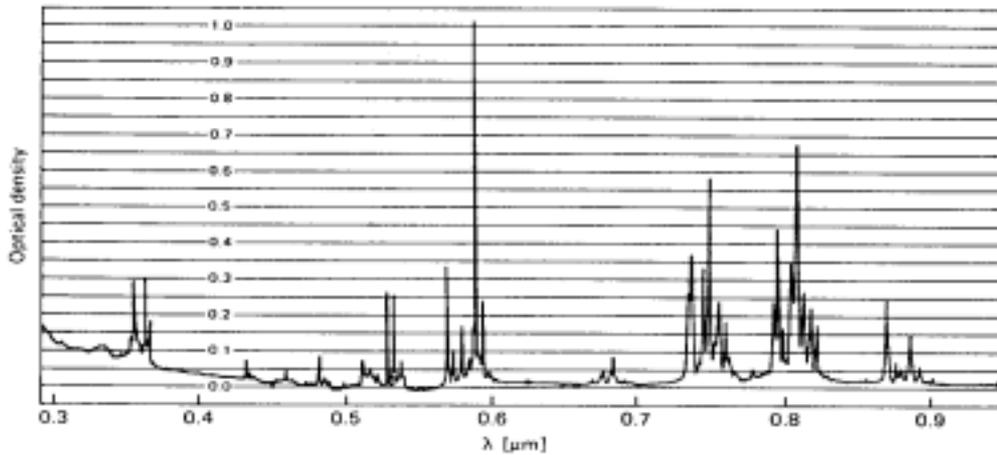


그림 1. Nd:YAG 레이저 매질의 흡수 스펙트럼.

이러한 우수한 특성 때문에 지금까지 많은 Nd:YAG 레이저가 연구되었으며, 평균출력 수 kW, 첨두출력 수십 MW 등의 고출력 레이저가 개발되었다. 그러나, 1990년도 초까지는 Nd:YAG의 펌핑광원이 섬광등이나 방전등으로 한정되었고, 이러한 펌핑광원은 전기 에너지에서 흡수대역의 빛 에너지로의 변환효율이 낮기 때문에 레이저 출력에 비해 장치가 거대한 문제점이 있었다. 특히, Nd:YAG의 흡수 대역은 몇몇 특정 영역의 파장에서만 높은 흡수율을 가지기 때문에 흡수율이 낮은 영역의 파장은 레이저 출력에 기여하지 못하고 대부분 열로 손실되어 심각한 열적 문제를 일으켰고, 레이저 출력의 공간적인 특성도 좋지 못했다.

1990년대부터 전기 에너지에서 빛 에너지로의 변환 효율이 수십%에 이르는 레이저 다이오드가 개발되면서 펌핑광원으로 주목받기 시작했다. 레이저 다이오드는 특정한 파장의 빛만 생성하고, 레이저의 특성상 방향성이 우수하기 때문에 펌핑효율이 높아지고 균일한 펌핑이 가능한 장점이 있다. 최근에는 수십, 수백 W의 고출력 레이저 다이오드가 개발되어 기존의 섬광등이나 방전등과 같은 펌핑광원을 대체하기에 이르렀다. 특히, Nd:YAG와 같은 Nd 계열의 레이저 매질은 그림 1과 같이 800 nm 근처에 높은 흡수대역이 있어서, 고출력 GaAlAs 레이저 다이오드의 출력 파장과 잘 일치한다. 레이저 다이오드로 펌핑되는 고체 레이저 (diode-pumped solid state laser, DPSSL)는 섬광등으로 펌핑되는 레이저 보다 열문제가 적어서 레이저 출력의 공간적인 특성이 우수하고 펌핑 효율이 높아서 레이저가 소형화되며, 레이저 다이오드의 수명이 길어서 장시간 안정적인 동작이 가능한 장점이 있다. 이러한 특성 때문에 1990년대 중반부터 레이저 다이오드로 펌핑되는 고체 레이저가 급속히 개발되고 있다.

## 2. DPSSL의 공진기

레이저 다이오드로 펌핑되는 우수한 Nd:YAG 레이저가 등장하면서 1  $\mu\text{m}$  영역의 레이저 파장을 2차 조화파 발생을 통한 청색광으로 변환하여 사용하려는 연구가 많이 진행되었다. 이러한 청색 광원은 기존의 플라즈마 튜브를 사용하는 레이저에 비해 소형이면서도 안정성이 우수하여, 아르곤 이온 레이저나 구리 증기 레이저 등을 대체하고 있다. 본 연구에서는 자체 보유하고 있던 레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YAG 레이저를 개선하고 이를 2차 조화파로 파장 변환하여 Ti:sapphire 펌핑용 레이저를 개발하였다.

고출력과 우수한 빔 특성을 가지는 레이저를 제작하기 위해서는 레이저 매질을 효율적으로 균일하게 펌핑해야 하며, 펌핑과정에서 생기는 열을 제거하기 위해 효과적인 냉각이 이루어져야 한다. 본 연구에서 사용한 Nd:YAG 레이저 head는 균일한 펌핑을 위해 그림 2와 같이 rod를 레이저 다이오드로 세방향에서

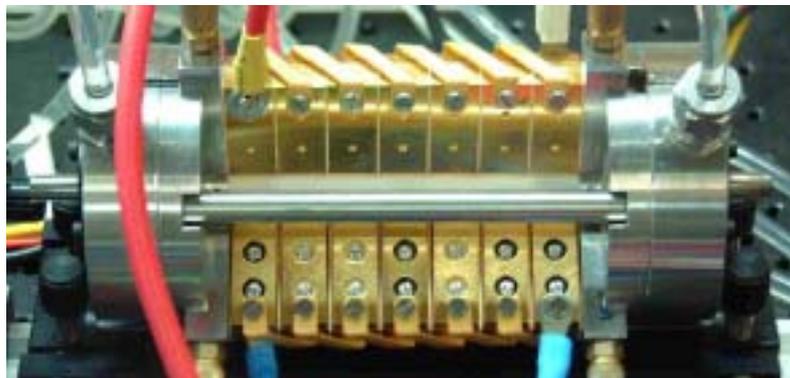
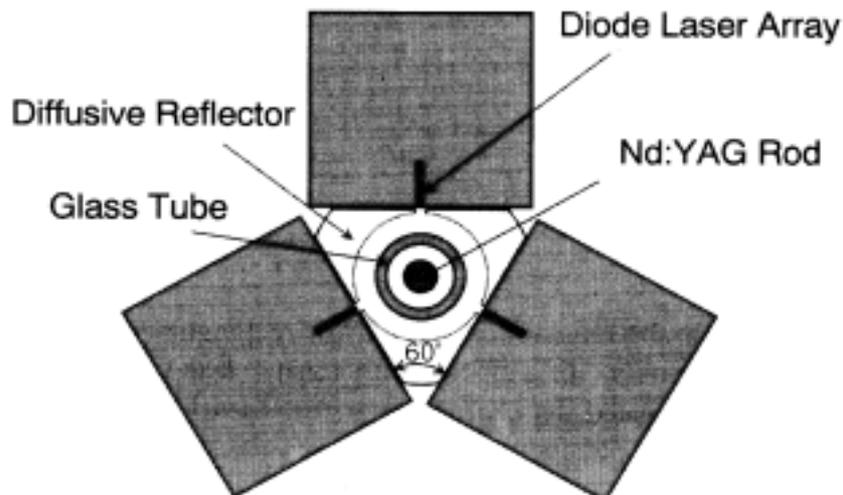


그림 2. Nd:YAG 레이저 head의 구성도.

대칭적으로 펌핑하였다[2]. Nd:YAG rod(Litton)는 직경 4 mm, 길이 110 mm였으며, 도핑율은 0.6 at.%였다. 레이저 다이오드는 연속발전형으로서 한 개의 bar 형태의 모듈이 7개의 20 W diode bar(Opto Power)로 구성되어 있으며, DC power supply(Hewlett Packard, 6673A)로 구동되었다. 한 개의 모듈에는 최대 25 A까지 전류가 공급되었다. 레이저 다이오드에서 출력되는 레이저의 파장은 다이오드의 온도에 따라서 변하기 때문에 Nd:YAG 레이저의 흡수 피크 파장과 레이저 다이오드의 파장을 일치시키기 위해서는 다이오드의 온도를 일정하게 유지시켜야한다. 이를 위해 레이저 다이오드는 열전도율이 좋은 heat sink에 부착되었고 heat sink는 수냉각 방식으로 일정한 온도로 유지하였다. 이 때, 레이저 다이오드의 파장은 807.5 nm로서 Nd:YAG의 흡수 피크 파장인 808.5 nm와 거의 일치하였다.

레이저 다이오드에서 출력된 펌핑 레이저가 Nd:YAG에 보다 균일하고 효율적으로 흡수되도록 하기 위해 그림과 같이 난반사체(Labsphere사의 Spectralon)를 사용하였다. 난반사체의 내부는 실린더형으로 되어있어서 Nd:YAG rod가 중심에 놓이도록 하였으며, 외형은 삼각형으로 되어있어 각 면에 있는 슬릿을 통해 레이저 다이오드 출력이 통과하도록 하였다. 각 슬릿의 길이는 90 mm, 폭은 1.5 mm였다. 난반사체는 1  $\mu\text{m}$  영역에서 97% 이상의 반사율을 가지기 때문에 균일

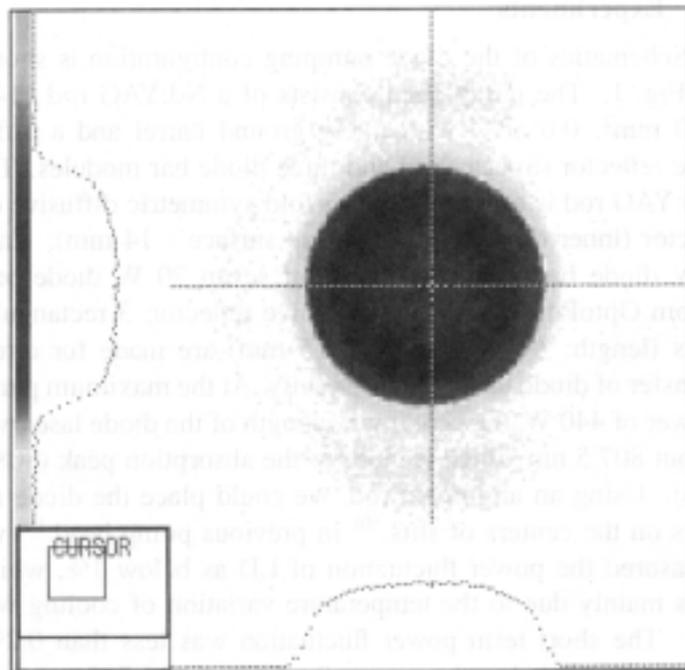


그림 3. 레이저 다이오드로 펌핑된 Nd:YAG rod의 형광분포.

하면서도 고효율의 펌핑을 가능하게 한다. Nd:YAG rod와 난반사체 사이에는 유리관을 설치하고 유리관을 통해 냉각수를 공급함으로써 Nd:YAG rod에서 발생하는 열을 제거하였다. 그림 3은 이렇게 구성된 Nd:YAG 레이저 head를 펌핑하였을 때 발생하는 형광을 상전송하여 CCD로 관측한 것이다. 그림과 같이 균일하게 형광이 발생하여 균일한 펌핑이 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 Nd:YAG 레이저 head를 가지고 평면거울로만 이루어진 짧은 레이저 공진기를 구성하여 다중모드로 동작시킨 결과  $M^2$  값은 50 이상으로 집속도는 나뉘으나 전체적으로 원형대칭적인 모드를 나타내었다. 최대 출력은 10 - 20%의 출력거울을 사용하였을 때 약 130 W였다.

### 3. Nd:YAG 레이저 매질의 열효과

고출력 레이저 제작에 있어서 가장 심각하게 나타나는 문제중의 하나가 열 문제이다. 레이저 매질을 펌핑할 때 발생하는 열은 매질의 광학적 성질을 변형시켜서 열 렌즈 효과, 열 복굴절 효과 등을 유도하며, 이러한 효과들은 레이저의 공간적인 모드 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서, 빔 모드 특성이 우수한 레이저를 제작하기 위해서는 열 효과에 대해 분석하여야 한다.

그림 2와 같이 실린더 형태의 레이저 rod가 펌핑되어 rod 내부에 열이 균일하게 발생하고 rod 표면에 냉각수가 흘러서 표면 온도가 일정하게 유지된다고 하면, 열은 대부분 radial 방향으로만 흐르게 되고, rod 끝부분의 열 효과는 무시할 수 있다. 레이저 rod의 열전도율을  $K$ 라고 하고, rod 내부에서 균일하게 단위 부피당 발생하는 열량을  $Q$ 라고 하면, radial 방향으로의 열전도 방정식은 다음과 같이 나타난다[3].

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r}\right)\left(\frac{dT}{dr}\right) + \frac{Q}{K} = 0 \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 rod 중심으로부터 radial 방향으로의 위치이다. 레이저 rod의 반지름을  $r_0$ 라고 하면, rod 표면은 냉각수에 의해 일정한 온도  $T(r_0)$ 로 유지되므로 rod 내부의 온도 분포는 다음과 같다.

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4K}\right)(r_0^2 - r^2) \quad (2)$$

식으로부터 rod 내부의 온도는  $r$ 에 대한 2차 함수이며, 온도 변화율은 rod 표면의 온도와 상관없이 일정함을 알 수 있다. 단위 부피당 발생하는 열량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \frac{P_a}{\pi r_0^2 L} \quad (3)$$

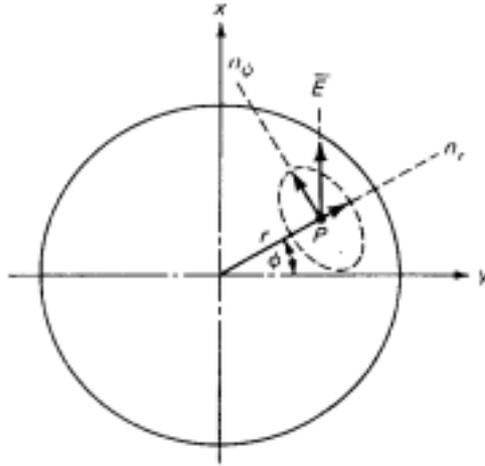


그림 4. 열적 stress에 의한 Nd:YAG 레이저 rod의 복굴절.

$P_a$ 는 rod에서 발생하는 열의 총량이며  $L$ 은 rod의 길이이다. 이로부터 rod 중심과 표면사이의 온도차이를 구하면,

$$T(0) - T(r_0) = \frac{P_a}{4\pi KL} \quad (4)$$

이 된다.

이러한 rod 내부와 외부의 온도차이는 stress를 발생시킨다. 즉, rod 안쪽이 높은 열에 의해 팽창하려는 힘이 낮은 온도를 갖는 외부 영역에 의해 제한되어 stress가 생성된다. stress는 다시 매질의 굴절율을 변화시켜서 복굴절을 유도한다. 그림 4와 같이 rod 형태의 매질의 경우에는 원대칭으로 stress가 발생하므로 복굴절도 radial 방향과 tangential 방향으로 생각할 수 있다. 각 지점에서 stress에 의한 radial 방향과 tangential 방향의 굴절율 변화  $\Delta n_r$ ,  $\Delta n_\phi$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta n_r = -\frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_r r^2 \quad (5)$$

$$\Delta n_\phi = -\frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_\phi r^2 \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 Nd:YAG의 열팽창 계수,  $C_r$ ,  $C_\phi$ 는 각각 radial 방향과 tangential 방향의 photoelastic 계수이다. 굴절율이  $r$ 에 대한 2차 함수로 변화하는 것을 알 수 있다.

매질의 온도가 변화하면 stress에 의한 굴절율 변화외에도 온도 변화 자체에

표 2. Nd:YAG 레이저 매질의 열 특성.

열 전도율, $K$	$0.14 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
열 팽창 계수, $\alpha$	$7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
굴절율의 열 변환 계수, $\frac{dn}{dT}$	$7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Radial 방향의 photoelastic 계수, $C_r$	0.017
Radial 방향의 photoelastic 계수, $C_\phi$	-0.0025

의해 굴절율이 변화한다. 이러한 온도변화에 의한 굴절율 변화  $\Delta n(r)_T$ 는 1차 근사식으로

$$\Delta n(r)_T = [T(r) - T(0)] \left( \frac{dn}{dT} \right) \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $\frac{dn}{dT}$ 는 굴절율의 열변화 계수이다. 식 (2)를 위식에 적용하면

$$\Delta n(r)_T = -\frac{Q}{4K} \frac{dn}{dT} r^2 \quad (8)$$

이 됨을 알 수 있다. 열변화에 의한 굴절율 변화도 열적 stress에 의한 굴절율과 마찬가지로  $r$ 에 대한 2차 함수로 나타남을 알 수 있다.

이상으로부터 알 수 있듯이, 펌핑에 의해 열이 발생하는 Nd:YAG 레이저 rod의 굴절율 변화를 나타내기 위해서는 열에 의한 굴절율 변화와 열적 stress에 의한 굴절율 변화를 함께 고려해야 한다. 이 두 효과를 고려하여 rod에서 생성되는 굴절율을 radial 방향과 tangential 방향에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$n_r(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{Q}{2K} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_r \right) r^2 \right] \quad (9)$$

$$n_\phi(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{Q}{2K} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_\phi \right) r^2 \right] \quad (10)$$

여기서  $n_0$ 는 rod 중심에서의 굴절율이다. 굴절율이  $r^2$ 에 비례하여 변화하기 때문에 graded index 렌즈와 같은 효과가 나타나며, radial 방향과 tangential 방향의 편광에 따라 굴절율이 다르기 때문에 복굴절 효과가 나타난다. 보다 정확한 Nd:YAG 레이저 rod의 열 렌즈 효과를 계산하기 위해서는 표 2에 나타낸 열 특성 값들을 사용하여 레이저 공진기 모드를 분석해야 한다.

레이저 공진기의 모드를 분석하기 위해 가장 많이 사용되는 방법은 ABCD

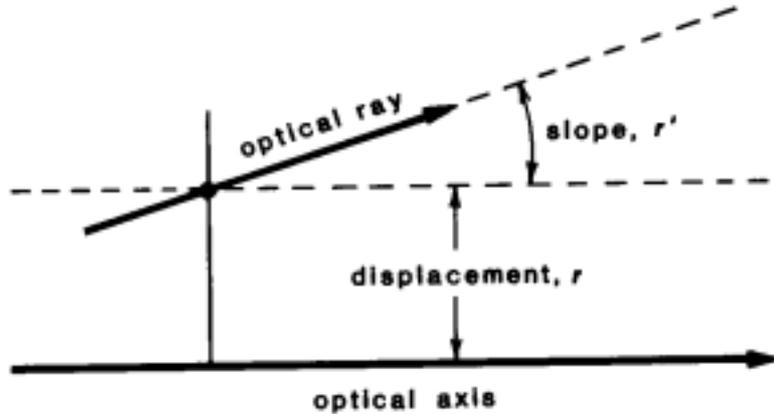


그림 5. 광선의 정의.

matrix를 사용하는 것이다[4]. ABCD matrix란 특정한 광학계를 지나기 전, 후의 광선(optical ray) 특성이 어떻게 바뀌는가를 기술하는 matrix이다. 일반적으로 광선은 그림 5와 같이 광축에 대한 높이  $r$ 과 광선의 기울기  $r'$ 으로 표현된다. 이러한 광선이 길이  $L$ 의 자유공간을 지나간다고 하면,  $L$ 만큼 진행하기 전의 광선  $r_1, r'_1$ 은 진행한 후의 광선  $r_2, r'_2$ 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + Lr'_1 \\ r'_2 &= r'_1 \end{aligned} \quad (11)$$

이 식을 matrix 형식으로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

이 된다. 여기서 matrix  $\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 을 길이  $L$ 의 자유공간에 대한 ABCD matrix라고 한다. 마찬가지로 초점거리  $f$ 의 렌즈를 통과한 다음의 광선은

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 \\ r'_2 &= -(1/f)r_1 + r'_1 \end{aligned} \quad (12)$$

와 같이 바뀌므로, 렌즈에 대한 ABCD matrix는  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$ 이 된다. 표 3에 공진기에 많이 쓰이는 ABCD matrix를 정리하였다. 고출력 Nd:YAG 레이저에서 열에 의한 모드 변형을 분석하기 위해서는 식 (9), (10)과 같이 radial 방향으로 굴절율이 변하는 매질에 대한 ABCD matrix를 구해야 한다. 식 (9), (10)은

표 3. 많이 쓰이는 ABCD matrix.

굴절율 $n_0$ , 길이 L의 자유공간	$\begin{bmatrix} 1 & L/n_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
초점거리 $f$ 의 렌즈 (집속 렌즈일 때, $f > 0$ )	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$
곡률반경 $R$ 의 구면거울에 수직 입사할 때. (오목거울일 때, $R > 0$ )	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix}$
곡률반경 $R$ 의 구면거울에 비스듬히 입사할 때. (입사각 $\theta$ )	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_e & 1 \end{bmatrix}$ $R_e = R \cos \theta$ for tangential plane $R_e = R / \cos \theta$ for sagittal plane
Radial 방향으로 $n(r) = n_0 - \frac{1}{2} n_2 r^2$ 의 굴절율을 갖는 매질.	$\begin{bmatrix} \cos \gamma z & (n_0 \gamma)^{-1} \sin \gamma z \\ -(n_0 \gamma)^{-1} \sin \gamma z & \cos \gamma z \end{bmatrix}$ $\gamma^2 = n_2 / n_0$

$n(r) = n_0 - \frac{1}{2} n_2 r^2$ 의 형태이므로 표 3에 나타난 ABCD matrix로 기술될 수 있다. 광선이 여러 개의 광학계를 지나는 경우는 각 광학계의 ABCD matrix를 곱한 matrix를 구하여 전체 광학계에 대한 ABCD matrix를 구할 수 있다.

레이저 공진기를 분석하는 데 있어서 가장 기본이 되는 모드는 Gaussian 모드이다. Gaussian beam의 전기장은 다음과 같이 기술된다.

$$E(r, z) \propto \exp \left[ -\frac{r^2}{w^2(z)} - ik \frac{r^2}{2R(z)} \right] \quad (13)$$

여기서,  $R(z)$ 는 위상면의 곡률반경이고  $w(z)$ 는 Gaussian 빔의 크기를 나타내는 것이다(그림 6). Gaussian 빔은 특정한 위치에서의  $R(z)$ ,  $w(z)$ 를 알면 자유공간에서 전파하는 빔 특성이 완전히 결정되므로  $R(z)$ ,  $w(z)$ 를 구하는 것이 중요하다. 즉, 광학계를 통과하기 전, 후의  $R(z)$ ,  $w(z)$ 의 변화를 분석함으로써 Gaussian 빔의 전파특성을 알 수 있다.

이러한  $R(z)$ ,  $w(z)$ 의 변화를 기술하기 위해서는 식 (13)의 Gaussian 빔 전기장을 다음과 같은 복소수 곡률반경(complex radius of curvature)  $q(z)$ 로 나타

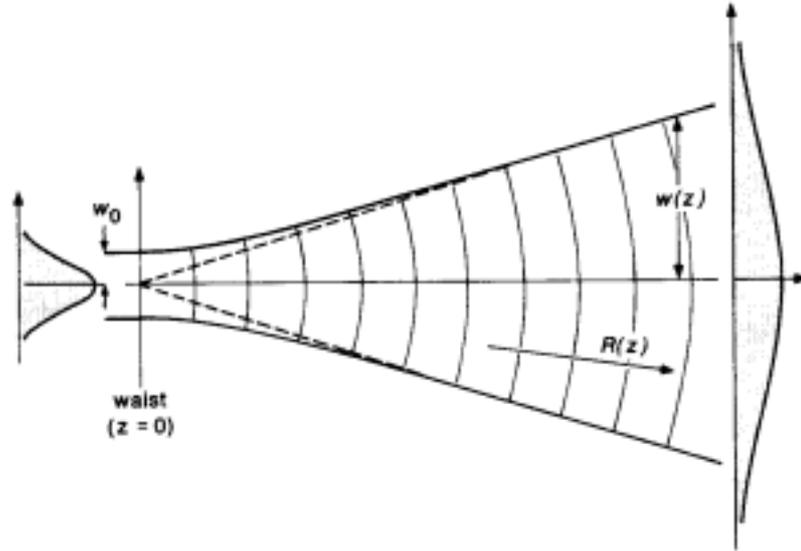


그림 6. Gaussian 빔의 진행과 정의.

내는 것이 편리하다.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} \quad (14)$$

여기서  $\lambda$ 는 레이저 파장이다. 이 복소수 곡률반경  $q(z)$ 를 사용하여 식 (13)을 기술하면 다음과 같이 표현된다.

$$E(r, z) \propto \exp\left[-ik \frac{r^2}{2q(z)}\right] \quad (15)$$

따라서, 복소수 곡률반경  $q(z)$ 의 값이 결정되면 Gaussian 빔의 특성이 결정됨을 알 수 있다.

Gaussian 빔이 광학계를 통과하면서 생기는 빔의 특성 변화는 다음과 같은 광학계를 통과하기 전, 후의 복소수 곡률반경  $q_1$ ,  $q_2$ 와 광학계의 ABCD matrix 성분과의 관계로 기술된다.

$$q_2 = \frac{q_1 A + B}{q_1 C + D} \quad (16)$$

즉, 광학계의 ABCD matrix를 계산하면 그 광학계를 통과하는 복소수 곡률반경의 변화를 구할수 있고, 복소수 곡률반경으로부터 Gaussian 빔의 위상면 곡률반경  $R$ 과 빔의 크기  $w$ 를 구하여 빔의 특성을 기술할 수 있다.

레이저 공진기 내부에서 생기는 Gaussian 빔 모드를 계산하기 위해서는 먼저 공진기의 특정위치부터 시작해서 공진기를 한번 왕복하는 동안 지나는 모든 광학계를 고려한 ABCD matrix를 구해야 한다. 공진기에서 생기는 빔 모드는 레

이저가 공진기를 한번 왕복했을 때, 빔 특성이 같아야하므로 식 (16)에서 시작점의  $q_1$ 과 ABCD matrix로부터 구한  $q_2$ 를 같다고 하면 공진기 내부에서 생성되는

Gaussian 빔 모드를 계산할 수 있다. 즉,  $q = \frac{qA+B}{qC+D}$  을  $q$ 에 대해 풀면

$$\frac{1}{q} = \frac{D-A}{2B} \pm i \frac{\sqrt{4-(A+D)^2}}{2B} \quad (17)$$

이 되므로, 식 (14)로부터 다음과 같이 Gaussian 빔의 위상면 곡률반경과 빔 크기를 구할 수 있다.

$$R = \frac{2B}{D-A} \quad (18)$$

$$w^2 = \frac{2\lambda|B|}{\pi\sqrt{4-(A+D)^2}} \quad (19)$$

따라서, 공진기 내부의 특정 위치로부터 공진기를 한번 왕복하는 동안의 ABCD matrix를 구하면 위 식으로부터 빔 모드를 쉽게 계산할 수 있다.

가장 간단한 공진기 형태는 그림 7과 같이 두 개의 거울로 이루어진 공진기이다. 그림과 같이 곡률반경이 각각  $R_1$ ,  $R_2$ 인 두 오목거울 거리  $L$ 만큼 떨어져

있다고 하면, 공진기를 한번 왕복하는 동안  $\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix}$ ,

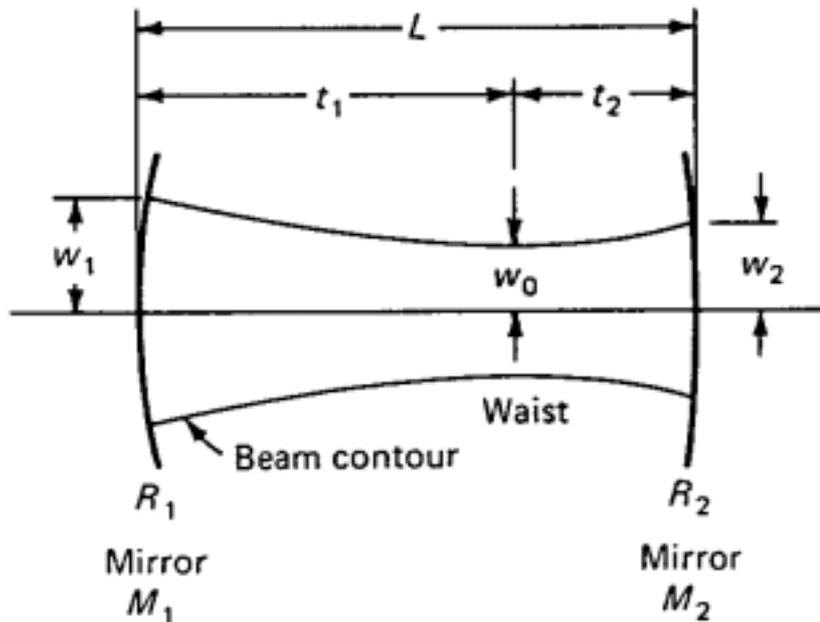


그림 7. 두 개의 거울로 이루어진 공진기.

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix}$ 의 ABCD matrix를 지나므로 빔이 지나는 순서대로 이들 matrix를 곱하여 전체 ABCD matrix를 구한 후, 식 (18), (19)를 이용하면 각 거울에서의 빔 크기를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_1^A = \left( \frac{\lambda R_1}{\pi} \right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \left( \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right) \quad (20)$$

$$w_2^A = \left( \frac{\lambda R_2}{\pi} \right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \left( \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right) \quad (21)$$

마찬가지로 각 거울에서의 위상면 곡률반경을 구하면, 각각  $R_1$ ,  $R_2$ 로서 거울의 곡률반경과 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 레이저가 공진기를 왕복하면서 모드가 변하지 않기 위해서 반드시 만족해야할 조건이다.

빔 직경이 최소가 되고 위상면이 평면( $R = \infty$ )이되는 빔 허리의 크기와 위치는 그림 8의 경우 다음과 같다.

$$w_0^A = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (22)$$

$$t_1 = \frac{L(R_2 - L)}{R_1 + R_2 - 2L} \quad (23)$$

양 거울이 모두 오목거울일 경우에는 공진기 내부에 빔 허리가 생성되나 블록거울이 사용될 거울에는 공진기 내부에 빔 허리가 존재하지 않는다.

식 (20), (21)에서 두 거울이 모두 볼록 거울( $R_1 < 0$ ,  $R_2 < 0$ )일 경우에는 빔 모드를 구할 수 없음을 알 수 있다. 이것은 공진기가 안정조건을 만족하지 못해서 공진기 내부에 모드가 생성되지 못한다는 것을 뜻한다. 일반적으로 그림 8과 같이 두 개의 거울로 이루어진 공진기의 안정조건은 다음과 같이 공진기의 왕복 ABCD matrix로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} 1 - 2\frac{L}{R_2} & L\left(1 - 2\frac{L}{R_2}\right) \\ -\frac{2}{R_1} - \frac{2}{R_2} + 4\frac{L}{R_1 R_2} & 1 - 4\frac{L}{R_1} - 2\frac{L}{R_2} + 4\frac{L^2}{R_1 R_2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

식 (19)로부터 유한한 실수의 빔 크기가 존재할 조건, 즉 공진기의 안정조건을 만족하기 위해서는 ABCD matrix의 A와 D성분이  $-2 \leq (A + D) \leq 2$ 의 조건을 만

축해야 한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1 \quad (25)$$

대부분의 레이저 공진기는 두 거울 사이에 레이저 매질과 같은 추가적인 광학계를 가진다. 고풍력 Nd:YAG 레이저의 rod는 앞에서 설명한 바와 같이 열 렌즈 문제를 일으키므로 두 거울 사이에 렌즈가 있는 형태의 공진기로 근사시킬 수 있다. 두 개의 평면거울로만 이루어진 공진기의 경우에는 식 (25)에 따라 안정조건을 만족시키지 못하여 모드가 생성될 수 없지만, 공진기 내부에 볼록렌즈가 있을 경우에는 두 거울이 평면거울일 경우에도 모드가 생성될 수 있다. 이와 같이 두 개의 평면거울과 볼록렌즈로 이루어진 공진기가 가장 많이 쓰이는 공진기 형태이므로 이에 대해 분석하였다.

그림 8은 두 개의 평면거울로 이루어진 길이 200 mm의 공진기 중앙에 볼록렌즈가 있을 경우에, 렌즈의 초점거리에 따라 공진기의 Gaussian 모드를 계산한 것이다. 모드 계산을 위해서 공진기 내부의 각 위치에서 공진기 왕복 ABCD matrix를 구하고 식 (19)로부터 모드의 크기를 구하였다. 평면 거울로 이루어진 공진기이기 때문에 각 거울에서의 위상면도 역시 평면인 것을 볼 수 있다. 즉, 공진기 끝에 모드의 빔 허리가 생성된다. 렌즈의 초점거리가 길어질수록 전체적인 빔 모드의 크기가 커지며, 초점거리가 짧아질수록 공진기 내부에서 모드의 크기변화가 심해짐을 알 수 있다. 따라서, 열 렌즈효과가 심해지면 공진기 내부의 모드 크기가 전체적으로 작아지면서 공진기 끝과 중앙의 상대적인 모드크기 변

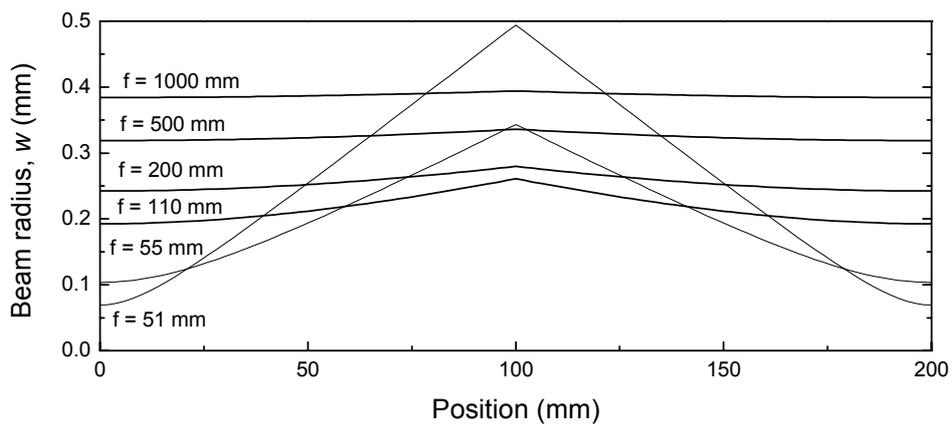


그림 8. 두개의 평면거울과 볼록렌즈로 이루어진 공진기의 모드.  
공진기 길이 = 200 mm.

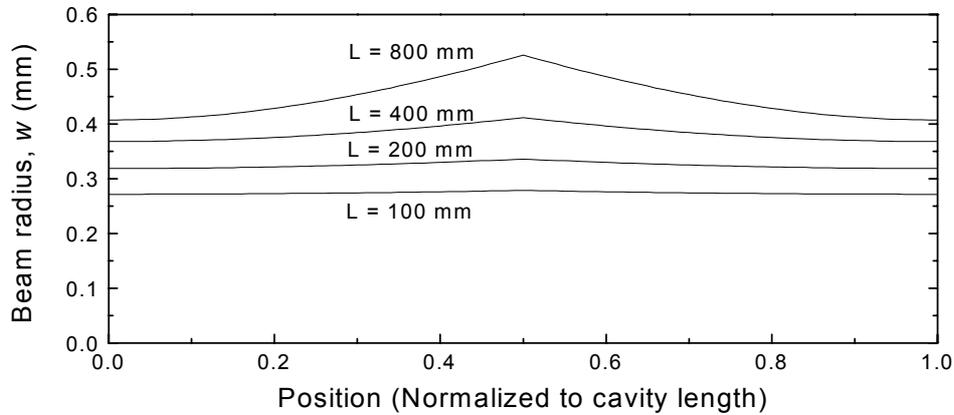


그림 9. 두 개의 평면거울과 초점거리 500 mm의 렌즈로 이루어진 공진기의 모드.

화는 커질 것으로 예상할 수 있다. Gaussian 모드의 크기가 작아지면 상대적으로 고차의 모드가 발생할 가능성이 높아져서 보다 많은 모드가 발진하기 때문에 레이저 출력의 공간적인 특성이 나빠진다. 따라서, 열 렌즈 효과를 최소로 해야 보다 좋은 모드 특성의 레이저를 제작할 수 있다. 렌즈의 초점거리가 더욱 짧아져서 공진기 길이의 4분의 1인 50 mm에 근접하게 되면 거울 위치에서의 모드 크기는 더욱 작아지지만, 렌즈 위치에서의 모드 크기는 급격히 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 렌즈의 초점거리가 50 mm보다 짧은 경우에는 공진기가 안정조건을 만족하지 못하여 모드가 형성되지 않았다. 이로부터 열 렌즈 효과가 커지면 공진기 안정조건을 만족시키지 못하여 레이저 출력이 감소할 수 있음을 알 수 있다.

렌즈의 초점거리를 고정하고 공진기의 길이를 바꿀 경우에 공진 모드 변화를 그림 9에 나타내었다. 렌즈의 초점거리는 500 mm로 고정하였고 공진기의 길이를 100 mm에서 800 mm로 변화시켰다. 공진기의 길이가 길어질수록 전체적인 공진 모드의 크기가 커지기 때문에, 다중 모드의 발진을 막고 레이저의 빔 특성을 향상시키기 위해서는 공진기 길이를 길게 하는 것이 유리함을 알 수 있다. 그러나, 공진기 길이를 길게 할수록 공진기가 점차 안정조건에서 멀어지게 되어 레이저 출력 면에서는 불리해진다. 공진기 길이를 2000 mm 이상으로 하였을 때는 안정조건을 만족하지 못하여 공진 모드가 형성되지 않았다. 따라서, 레이저의 공간적인 빔 특성보다는 출력을 최대화하려면 공진기의 길이를 짧게 하는 것이 유리하나, 빔 특성을 좋게 하려면 공진기의 안정조건을 만족하는 범위에서 공진기



그림 10. Nd:YAG 레이저 rod와 평면거울로 이루어진 공진기.

길이를 길게 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

#### 4. 레이저 공진기 내에서의 열효과에 대한 전산시뮬

이상에서는 공진기 내부에 얇은 렌즈가 설치된 경우를 생각하였으나, 실제 Nd:YAG 레이저 rod는 수 cm의 상당한 길이를 갖는 렌즈이기 때문에 정확한 모드 분석을 위해서는 수치적으로 공진기 모드를 계산해야 한다. 또한, radial 방향과 tangential 방향으로 굴절을 변화가 다르기 때문에 복굴절 현상도 고려해야 한다. 이러한 Nd:YAG rod를 포함하는 공진기의 기본적인 모드 분석을 위해서 그림 10과 같이 두 개의 평면거울과 rod 만으로 이루어진 공진기를 고려하였다. Nd:YAG 레이저 rod의 길이는 실제 레이저 제작에 사용한 것과 같이 110 mm로 하였으며, rod의 끝과 평면거울까지의 거리는 각각 L1, L2라고 하였다.

식 (9), (10)에서 알 수 있듯이, Nd:YAG 레이저 rod의 열 렌즈 효과는 rod 내에서 발생하는 열량  $Q$ 에 비례한다. 식 (9), (10)에서의  $Q$  값은 단위 부피당 발생하는 열량이므로 펌핑 출력과 직관적으로 비교하기가 어렵다. 따라서, rod에서 발생하는 총 열량  $Q_T$  값을 가정하고 이를 rod의 부피로 나누어  $Q$  값을 구하였다. 식 (9), (10)의 굴절을 변화는 표 1, 2에 나타난 Nd:YAG의 특성값을 대입하여 계산하였으며, 표 3에 나타난 ABCD matrix로부터 공진기의 공진 모드를 계산하였다. 일반적인 열 렌즈 효과만을 조사하기 위해서 복굴절 효과는 고려하지 않았으며 식 (9)를 사용하여 radial 방향의 편광에 대해서만 공진 모드를 계산하였다.

그림 11은 rod에서 발생하는 총 열량  $Q_T$  값에 따라 공진기의 모드를 계산한 결과이다. 두 평면거울은 Nd:YAG 레이저 rod 끝에서 각각 100 mm 떨어져 있다고 가정하였으며,  $Q_T$  값은 100 W에서 800 W까지 변화시켰다.  $Q_T$  값이 커지면 열 렌즈 효과가 커지기 때문에 그림과 같이 전체적인 공진 모드 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서, 열 렌즈 효과가 커지면 기본 모드의 크기가 작아져서 다중 모드 발생에 의해 레이저의 빔 특성이 나빠질 것을 알 수 있다. 레이저

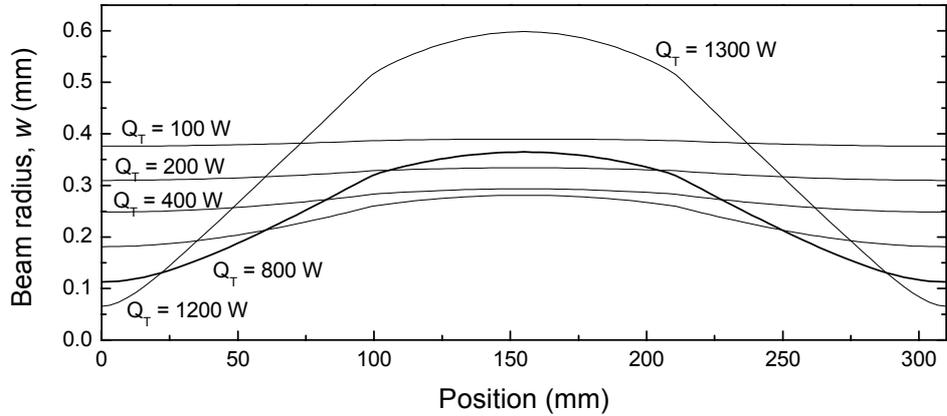


그림 11. Nd:YAG 열 렌즈 효과에 따른 공진 모드의 변화.

rod에서 생기는 열 렌즈 효과는 rod 전체에 걸쳐서 렌즈 효과가 나타나기 때문에 rod 내부에서 공진 모드가 완만하게 집속되는 것을 알 수 있다.  $Q_T$  값이 1000 W 이상으로 더욱 커지면 열 렌즈 효과가 심해지면서 평면거울 위치에서의 모드 크기는 작아지지만 레이저 rod에서의 모드 크기는 커지는 것을 볼 수 있다.  $Q_T$  값이 1400 W 이상이 되면 공진기 안정조건에서 벗어나서 공진 모드가 형성되지 않았다. 이로부터 열 렌즈 효과가 공진기의 안정조건을 벗어날 만큼 커지게 되면 rod에서의 기본 모드가 커지게 되어 오히려 빔 모드 특성이 좋아질 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 조건은 매우 좁은 범위에서만 만족하며 안정조건에서 벗어나는 영역이기 때문에 레이저 출력은 감소할 것으로 예상할 수 있다.

그림 12는 고정된 열 렌즈 효과를 갖는 Nd:YAG 레이저 rod에 대해 공진기의 길이를 변화시키면서 공진 모드를 계산한 결과이다. 이 때, 레이저 rod에서 발생하는 총 열량  $Q_T$  값은 400 W로 하였으며, rod에서 거울까지의 거리 L1, L2는 같게 유지하였다. 그림 9의 결과에서 예측할 수 있듯이 공진기의 길이가 짧을 때는 전체적인 공진 모드가 작아지므로 다중 모드가 발생할 가능성이 높아서 빔 특성이 나빠질 것으로 예상되며, 공진기의 길이가 길어지면서 공진 모드가 커지므로 빔 특성이 좋아질 것이다. 특히, 공진기 길이가 더욱 길어져서 L1, L2 값이 300 mm 정도 되면, Nd:YAG 레이저 rod에서의 공진 모드가 급격히 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 공진기가 안정조건을 벗어나기 직전에 일어나는 현상으로서, 레이저 빔 특성은 좋아질 수 있으나 레이저 출력은 감소할 것으로 예상되며, 안정조건을 벗어날 만큼 커지므로 공진기의 정렬등에 레이저 출력이 민감하게 반응하여 출력 안정성이 떨어질 것으로 예상할 수 있다.

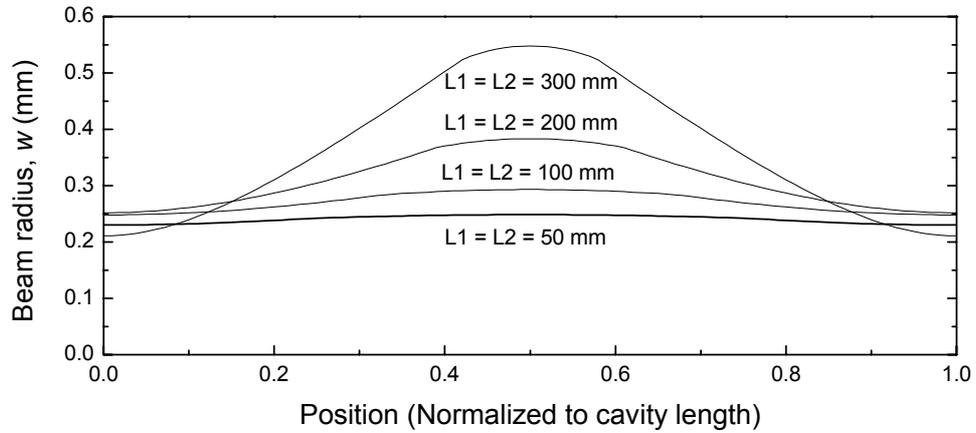


그림 12. Nd:YAG 레이저 rod의 열 렌즈 효과를 고려한 공진기 길이에 따른 공진 모드.

이상의 공진 모드 분석으로부터 일반적인 열 렌즈 효과가 공진 모드에 미치는 영향과 공진기의 빔 특성이 좋은 공진기 조건 등을 예측할 수 있었다. 그러나, 지금까지는 식 (9), (10)에 나타난 radial 방향과 tangential 방향으로의 편광에 대한 열 렌즈 효과가 다르게 나타나는 열 복굴절 현상에 대해서는 고려하지 않았다. 열 복굴절 현상은 편광에 따라 공진 모드의 특성이 다르게 나타나도록 하기 때문에 레이저 빔 특성에 큰 영향을 끼친다. 따라서, 열 복굴절 현상을 고려한 공진 모드 분석이 필요하다. 특히, 레이저 rod와 같이 원형 대칭성을 갖는 매질의 경우에는 radial 방향과 tangential 방향의 편광에 따른 복굴절이 나타나

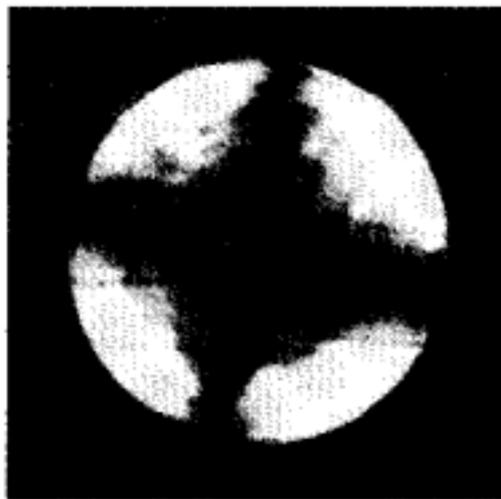


그림 13. 열 복굴절 효과에 의한 편광 모드 변화의 예.

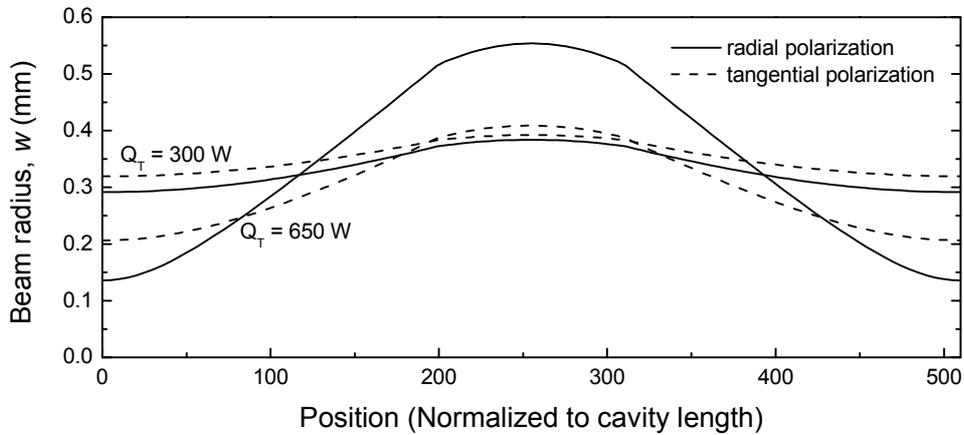


그림 14. 열 복굴절 효과를 고려한 레이저 공진기의 모드 변화.

기 때문에, 일반적으로 많이 나타나는 수직한 두 선형 편광에 따른 복굴절 현상과는 특성이 많이 다르다. 예를 들어, 열 복굴절 효과가 있는 레이저 rod를 포함한 공진기에 선형 편광기를 삽입하여 특정한 방향의 선형 편광만 발진하도록 하면, 그림 13과 같이 열 복굴절 현상에 의해 rod의 특정한 위치에서는 편광이 변하지 않아서 모드가 생성되지만, 다른 부분에서는 편광 상태가 바뀌어 빔 분포가 불균일해지는 문제점이 있다. 이러한 문제점 때문에 대부분의 고풍력 Nd:YAG 레이저는 편광의 방향성이 없도록 발진시킨다.

열 복굴절 현상을 고려하여 한 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 포함한 공진기의 공진 모드를 계산하여 그림 14에 나타내었다. 레이저 rod의 끝과 평면거울과의 거리는 각각 200 mm로 하여 전체 공진기 길이는 510 mm로 하였으며, radial 방향 편광에 대한 모드는 실선으로, tangential 방향 편광에 대한 모드는 점선으로 나타내었다. 레이저 rod에서 발생하는 총 열량  $Q_T$  값은 400 W, 650 W로 조정하였다. 편광 방향에 따라 열 렌즈 효과가 약간 다르기 때문에 그림에서 볼 수 있듯이 편광에 따라 공진 모드의 크기가 서로 다르게 나타났다. 두 편광의 공진모드가 겹치는 곳에서는 모든 편광에 대해 발진이 가능하지만 한 개의 편광에 대해서만 공진 모드가 있는 부분에서는 편광된 모드가 발진할 수 있기 때문에, 빔 특성이 나빠질 수 있다. 특히, 제 2차 조화파 발생과 같은 비선형 효과는 편광 특성에 따라 공간적인 빔 특성이 바뀌기 때문에 이러한 문제가 더욱 심각하게 나타난다.  $Q_T$  값이 650 W로 증가하여 공진기의 안정조건 경계부근에 가까워지면 편광에 따른 공진 모드 차이가 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 한 편광

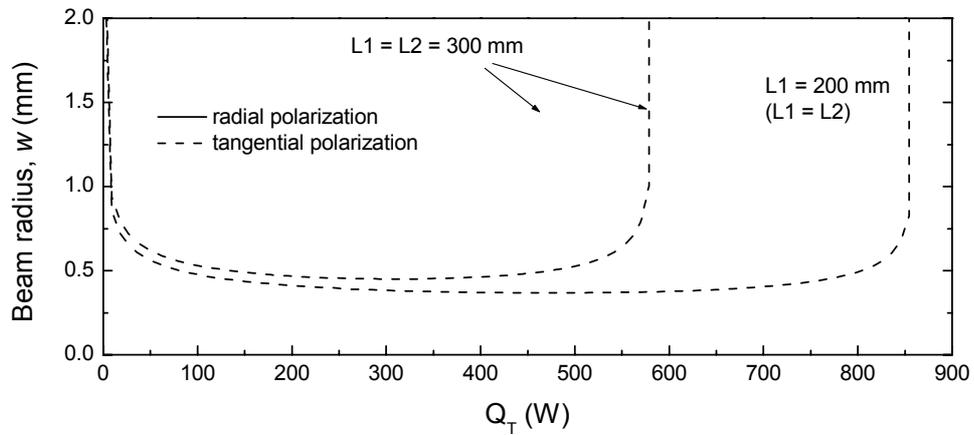


그림 15. Nd:YAG 레이저에서 발생하는 열량에 따른 두 편광 모드의 안정조건 영역.

에 대해서는 공진 모드가 커져서 다중 모드 발진 가능성이 줄어들지만, 다른 편광은 그렇지 못하여 전체적인 빔 특성이 나빠질 수 있다.  $Q_T$  값이 더욱 커져서 700 W 정도 되면 이러한 현상이 더욱 심각해져서 radial 방향 편광에 대해서는 공진기가 안정조건을 벗어나서 공진 모드가 형성되지 않으나, tangential 방향 편광에 대해서는 공진 모드가 형성되어 빔 특성이 나빠질 수 있다.

열 복굴절 효과에 의해 편광에 따라 공진 모드가 달라져서 특정한 편광만 발진하는 현상을 보다 자세히 조사하기 위해서 그림 15와 같이  $Q_T$  값에 따라 공진기의 특정 위치에서 공진 모드 크기를 조사하였다. 공진 모드는 Nd:YAG 레이저 rod의 한 끝에서 계산하였으며, rod와 평면거울 까지의 거리  $L_1$ ,  $L_2$ 를 조정하면서 모드를 계산하였다. 그림에서 공진모드가 급격히 커지는 것은 공진기가 안정조건에서 벗어난다는 것을 의미한다. 공진기의 길이가 짧은 경우( $L_1 = L_2 = 300$ )에는  $Q_T$  값이 650 W 정도로 증가할 때까지 두 편광이 모드 크기가 비슷하게 같이 발진하다가 700 W를 넘어서면 tangential 방향의 편광 모드만 발진하며, 850 W를 넘어서면 tangential 방향의 편광 모드로 안정조건에서 벗어나서 레이저 공진 모드가 완전히 없어짐을 알 수 있다. 공진기의 길이가 길어지면 전체적으로 두 개의 편광 모드가 같이 발진하는 영역이 좁아지는 것을 볼 수 있다. Nd:YAG 레이저 rod에서 발생하는 열 렌즈 효과의 정도는 rod의 크기 펌핑 레이저의 출력 등에 달라지므로, 사용하는 펌핑 레이저의 출력을 최대로 하여도 두 개의 편광 모드가 같이 발진하도록 하려면 공진기 길이를 충분히 짧게 해야 한다. 반면에 레이저의 빔 특성을 좋게 하려면 앞에서 조사한 바와 같이 공진기의

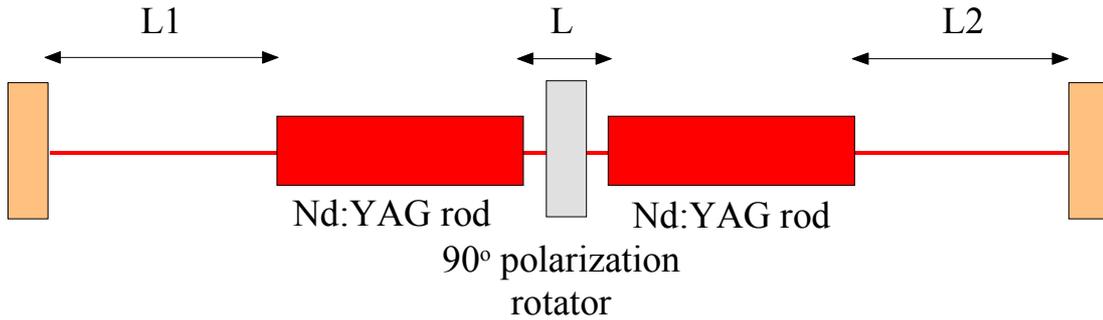


그림 16. 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 이용하는 공진기.

길이를 길게 하는 것이 유리하므로 두 조건을 모드 만족하도록 공진기 길이를 잘 조정해야 한다. 그러나, 그림 15와 같이 한 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 사용하는 경우에는 두 편광 모드에 대한 안정조건 영역이 많이 다르기 때문에 두 편광의 빔 특성을 동시에 좋게 하기가 어려운 문제점이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 Nd:YAG 레이저 rod에서 발생하는 열 렌즈 효과와 열 복굴절 효과는 공진기의 길이, rod에서 발생하는 열량 등에 따라 민감하게 달라지기 때문에 레이저의 출력과 빔 특성을 동시에 향상시키는 것이 상당히 어렵다. 이러한 열 렌즈, 열 복굴절 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 방법이 고안되었지만 어느 것도 완전히 문제를 해결하지는 못하였다. 현재, 고출력 레이저의 열 복굴절 문제 해결을 위해 가장 많이 사용되는 방법은 그림 16과 같이 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 사용하는 것이다. 두 개의 레이저 rod의 특성과 펌핑 출력이 같아서 열 렌즈와 열 복굴절 효과가 완전히 같다고 하면, 두 rod 사이에 90도 편광 회전판을 놓음으로써 열 복굴절 효과를 서로 상쇄시킬 수 있다. 본 연구에서는 고출력 Nd:YAG 레이저를 개선하기 위하여 이와 같이 특성이 거의 같은 두 개의 레이저 rod를 사용하는 방식을 채택하였다.

그림 17은 그림 16의 레이저 공진기에 대해  $Q_T$  값에 따라 공진모드를 나타낸 것이다. Nd:YAG 레이저 rod는 모두 길이 110 mm로 하였으며, 똑 같은 양의 열이 발생한다고 가정하였다. 좌우 대칭형의 공진기를 구성할 경우 두 레이저 rod를 중앙으로 모아 놓는 경우와 양 끝으로 나누어 놓는 경우를 생각할 수 있으므로 이 두 경우에 대해서 공진모드를 계산하였다. 두 rod를 중앙으로 모아 놓는 경우에는 레이저 rod의 끝과 평면거울과의 거리  $L_1$ ,  $L_2$ 를 150 mm, 두 rod 사이의 거리  $L$ 은 100 mm로 하였으며, 양 끝으로 레이저 rod를 놓을 경우에는  $L_1$ ,  $L_2$ 를 50 mm,  $L$ 을 300 mm로 하여 총 공진기의 길이는 같게 하였다. 이 때, 열 복굴절이 보상되지 않은 경우를 먼저 고려하기 위해서 두 rod 사이에 편광

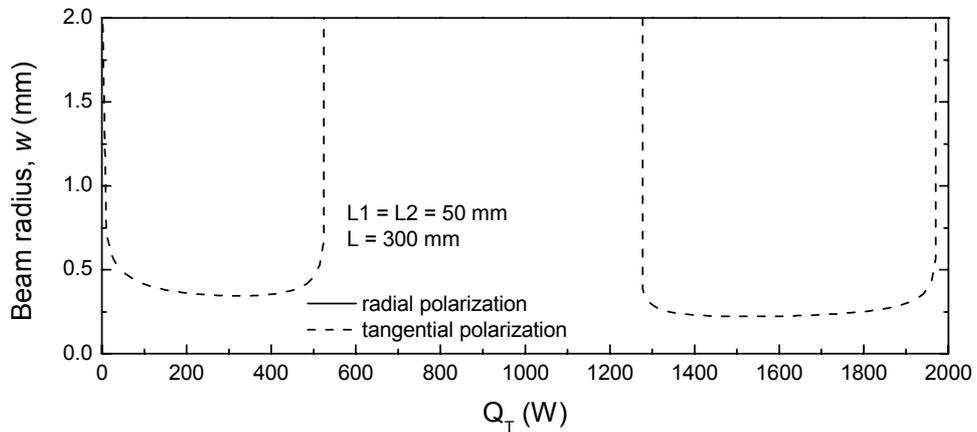
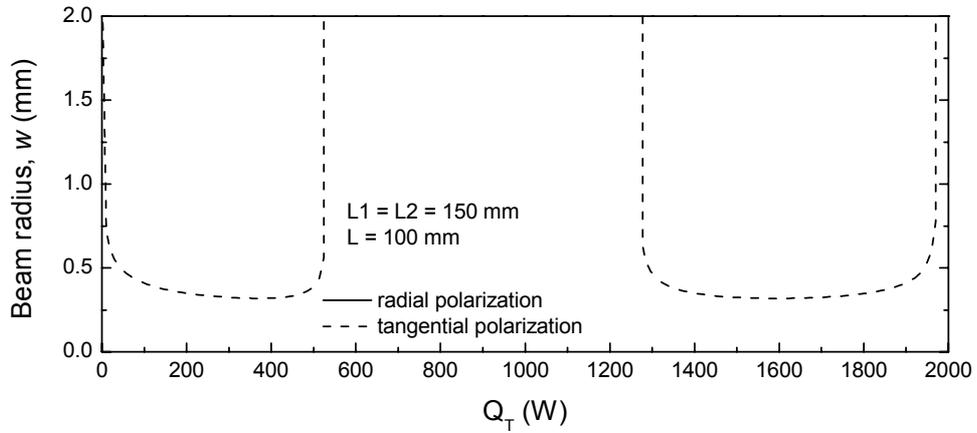


그림 17. 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod로 구성된 공진기의  $Q_T$ 에 따른 공진 모드.

회전판은 설치하지 않았다. 공진 모드 크기는 평면 거울 쪽의 레이저 rod 끝에서 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 한 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 사용하는 경우와는 달리 공진기가 안정조건을 만족하는 영역이 두 부분으로 나뉘어 나타남을 알 수 있다. 즉,  $Q_T$  값이 400 W 정도로 증가할 때 까지는 공진 모드가 존재하다가 500 - 1000 W 영역에서는 어떤 편광에 대해서도 공진 모드가 존재하지 않으며,  $Q_T$  값이 더욱 증가하면 다시 공진 모드가 생기는 영역이 radial 방향의 편광에 대해 다시 존재한다. 공진기 내의 복굴절이 보상되지 않은 상태이기 때문에 radial 방향과 tangential 방향의 편광에 대해 공진 모드가 상당히 다르게 나타나는 것도 확인하였다. 또한, 두 레이저 rod가 공진기 중앙에 있는 경우와 양 끝에 있는 경우가  $Q_T$  값에 따라 거의 비슷한 공진 모드 특성을 보이는 것도 알 수 있다.

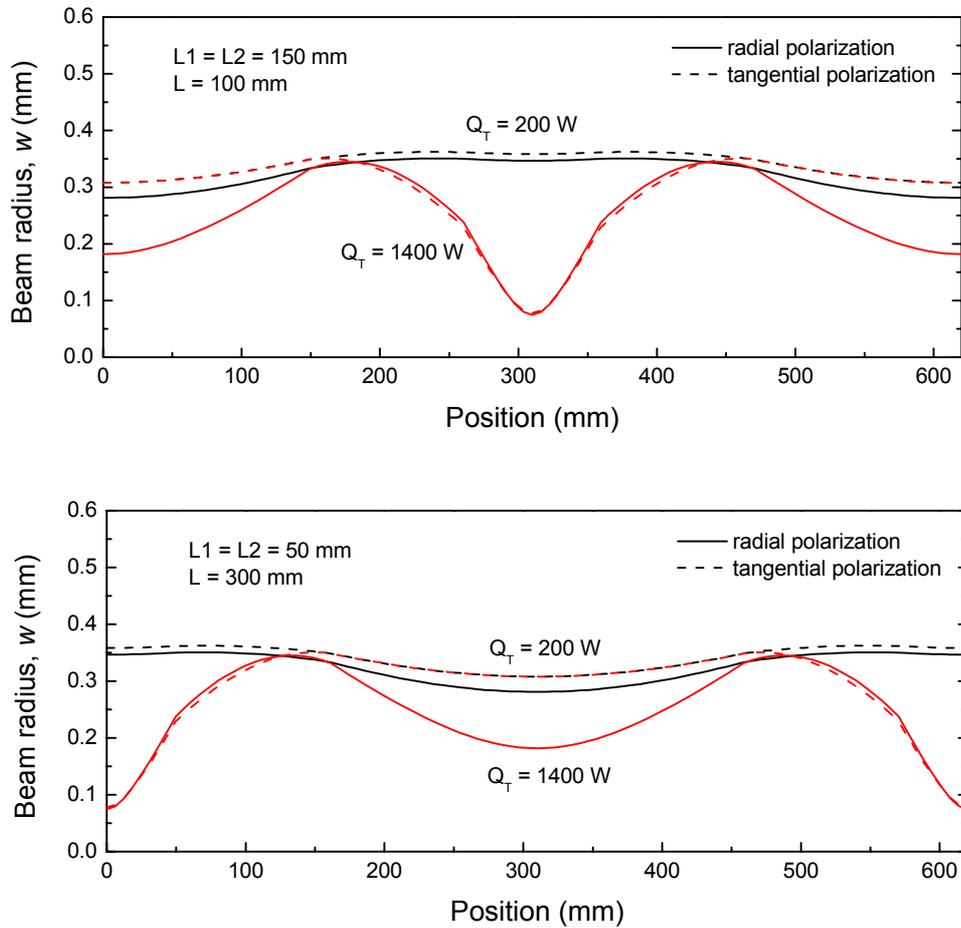


그림 18. 두 Nd:YAG 레이저 rod가 중앙에 있는 경우와 양 끝에 있는 경우의 공진 모드.

Nd:YAG 레이저가 중앙에 있는 경우와 양 끝에 있는 경우에 대해 공진기의 모드를 계산하여 그림 18에 나타내었다. 그림 17에서 조사한 바와 같이 공진기의 안정조건 영역이 rod에서 발생하는 열량에 따라 두 부분으로 나뉘어 나타나므로 각 영역에 대해서 공진 모드를 계산하였다. 이 때,  $Q_T$  값은 각각 200 W와 1400 W로 하였다. 공진기의 길이는 그림 17의 경우와 마찬가지로  $L1 = L2 = 150 \text{ mm}$ ,  $L = 100 \text{ mm}$ 의 경우와  $L1 = L2 = 50 \text{ mm}$ ,  $L = 300 \text{ mm}$ 인 두 경우로 나누었다.  $Q_T$  값이 작은 경우에는, 레이저 rod의 열 렌즈 효과 때문에 전체적으로 rod 위치에서 공진 모드 크기가 제일 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 레이저 rod가 중앙에 있는 경우에는 공진기의 중앙 부분의 모드가 크며, rod가 공진기 양 끝쪽에 있는 경우에는 공진기의 끝 부분에서 공진 모드가 커진다. 반면에,  $Q_T$  값이

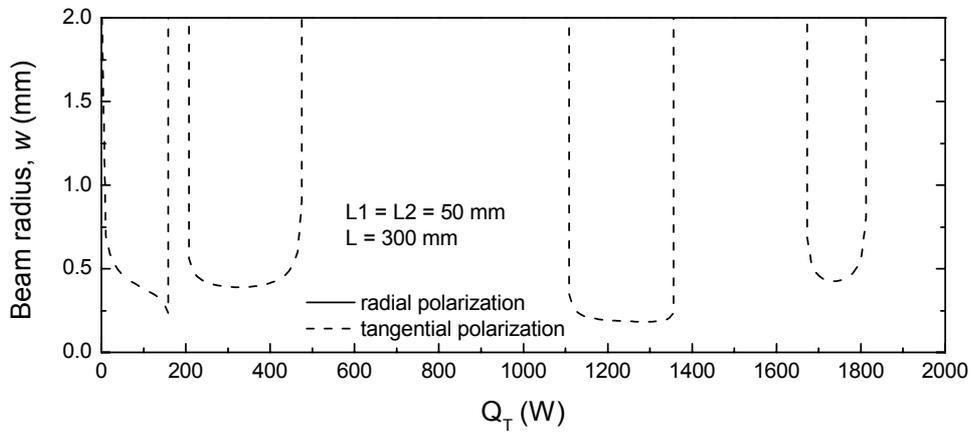
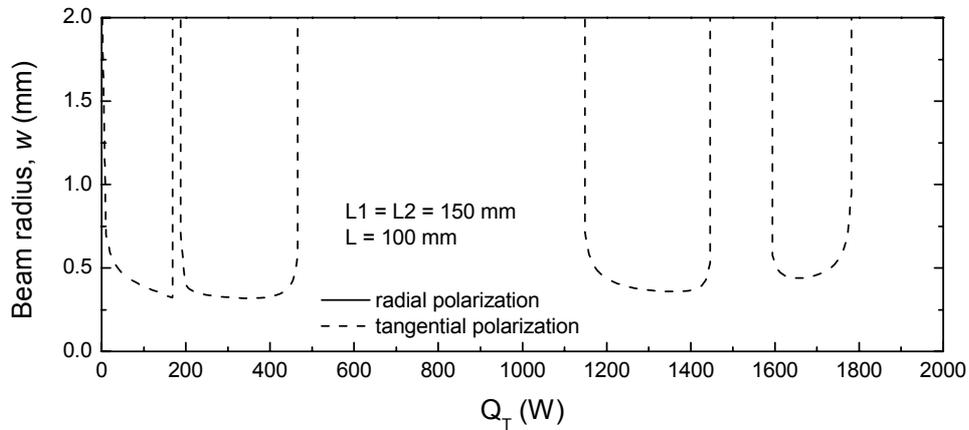


그림 19. 두 Nd:YAG 레이저 rod 사이에 90도 편광 회전판을 설치한 공진기의  $Q_T$ 에 따른 공진 모드.

1400 W로 큰 경우에는 열 렌즈 효과가 너무 커져서 공진기의 모드가 심하게 왜곡되며, radial 방향과 tangential 방향의 편광 모드의 차이도 심한 것을 볼 수 있다.

두 Nd:YAG 레이저 rod에서 생기는 열 복굴절 현상을 감소시키기 위해서는 그림 16과 같이 두 rod 사이에 90도 편광 회전판을 설치해야한다. 이렇게 하면 한쪽 레이저 rod를 통과한 radial 방향의 편광 모드가 다른 쪽 rod를 통과할 때는 tangential 방향으로 바뀌고, 마찬가지로 tangential 방향의 편광 모드는 radial 방향으로 바뀌기 때문에 두 편광 모드는 모두 radial 방향과 tangential 방향의 열 렌즈효과를 한번씩 겪게되어 복굴절 효과가 상쇄된다. 따라서 편광의 방향에 상관없이 공진 조건이 같아진다. 이러한 효과는 그림 19에서 확인할 수 있다. 공

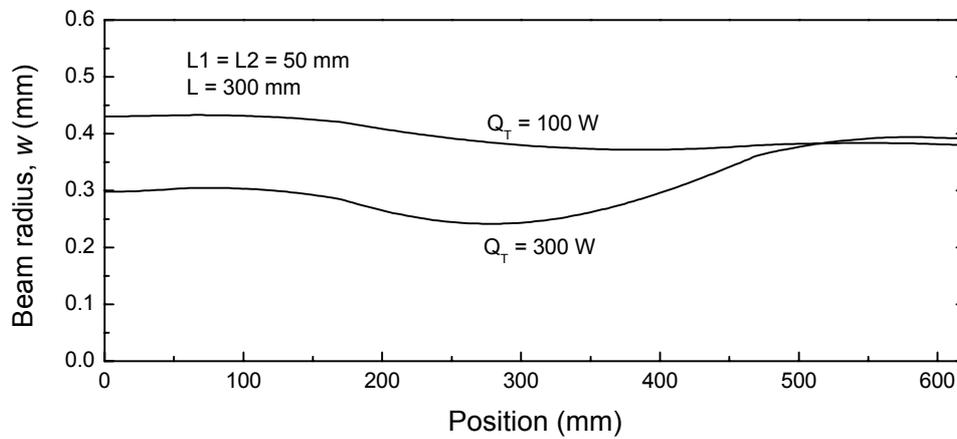
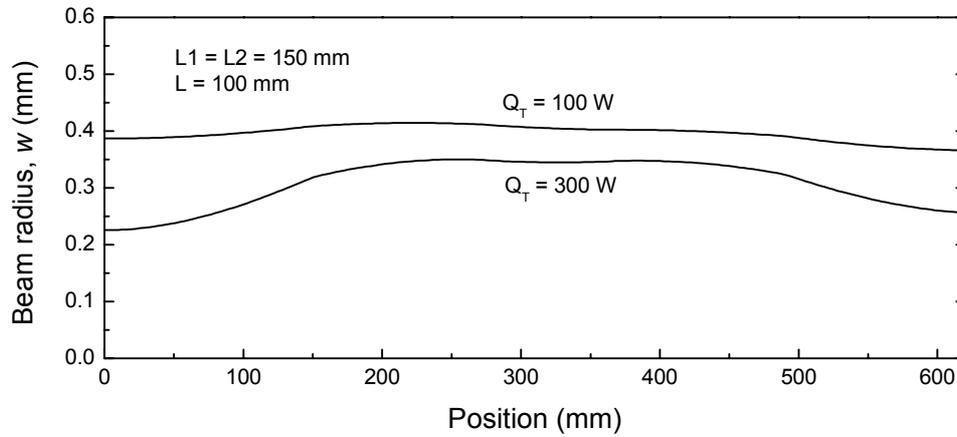


그림 20. 두 Nd:YAG 레이저 rod에 90도 편광 회전판을 설치한 경우의 공진 모드 분포.

진기는 그림 17의 경우처럼 두 레이저 rod가 공진기 중앙에 있을 때와 양 끝에 있을 경우에 대해서 모드 계산을 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 두 편광 모드는  $Q_T$  값에 상관없이 레이저의 안정조건 영역이 정확히 일치하였다. 따라서, 하나의 편광 모드만 발진함으로써 레이저의 빔 특성이 나빠질 가능성이 줄었음을 알 수 있었다. 그림 17에서는 안정조건 영역이  $Q_T$  값이 변함에 따라 두 부분으로 나뉘었으나, 편광 회전판이 있는 경우에는 각 안정조건 영역이 다시 두 부분으로 나뉘어 총 4개의 안정조건이 존재하였다. 이 중  $Q_T$  값이 1000 W 이상 되어야만 만족하는 공진기 안정조건은 펌핑 출력이나 Nd:YAG의 stress에 의한 파손 한계 등으로 실질적으로 사용하기 어렵기 때문에 본 연구에서는  $Q_T$  값이 낮은 경우에 생성되는 두 안정조건 영역에 대해서만 열 복굴절이 보상된 공진기의 모드 분포를 조사하였다.

그림 20은 90도 편광 회전판을 Nd:YAG 레이저 rod 사이에 설치하여 열 복굴절 효과가 서로 상쇄되었을 때, 공진기 내부에서의 공진 모드를 계산한 결과이다.  $Q_T$  값은 100 W, 300 W으로 하였으며, 그림 18과 같이 두 레이저 rod가 중앙에 있는 경우와 양 끝에 있는 경우에 대해 공진 모드를 조사하였다. 공진 모드는 radial 방향의 편광에 대해서만 계산하였으며, tangential 방향의 편광은 레이저 공진기가 좌우 대칭이기 때문에 radial 방향과 대칭형으로 나타난다.  $Q_T$  값이 100 W인 경우에는 전체적으로 공진 모드가 크며, 모드 크기도 비교적 균일하지만,  $Q_T$  값이 300 W가 되어 두 번째 안정조건 영역으로 넘어가면 모드 크기 변화가 심해져서 빔 크기가 작아지는 영역이 생긴다. 레이저 rod가 중앙에 있는 경우에는 양 평면거울 위치에서, 레이저 rod가 양 끝에 있는 경우에는 공진기 중앙에 빔이 집중되는 영역이 생긴다.

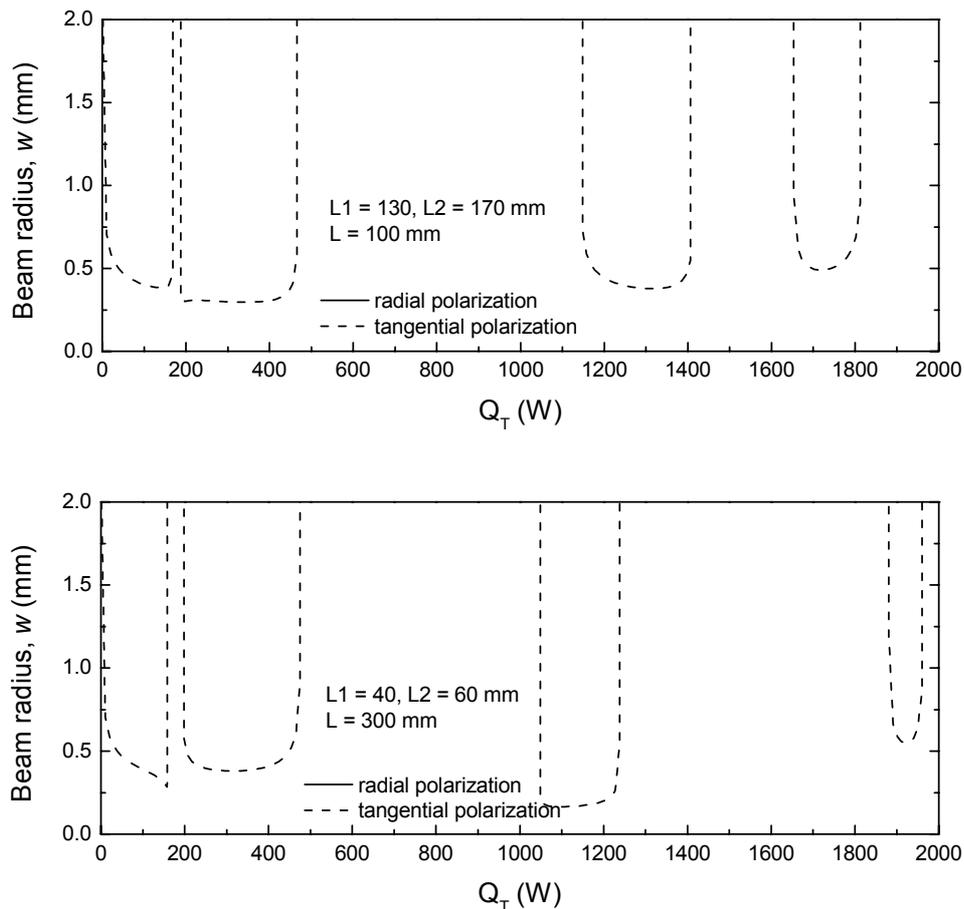


그림 21. 공진기의 비대칭성이 복굴절 상쇄에 미치는 영향.

두 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 사용하는 공진기가 완전한 좌우 대칭일 경우에는 그림 19와 같이 열 복굴절 현상이 보상되지만, 좌우 대칭에서 벗어날 경우에는 열 복굴절 상쇄 효과가 감소한다. 이러한 현상은 그림 21에서 확인할 수 있다. 그림 21은 공진기가 좌우 대칭에서 벗어나도록 L1과 L2 값을 서로 다르게 조정하였을 때,  $Q_T$  값에 따른 공진기의 안정조건 영역을 나타내는 것이다. Nd:YAG 레이저 rod를 중앙에 놓는 경우에는 L1 = 130 mm, L2 = 170 mm로 하였고, rod를 양 끝에 놓는 경우에는 L1 = 40 mm, L2 = 60 mm로 하였다. 이때 전체 공진기 길이는 그림 19의 경우와 같게 하였다. 두 레이저 rod 사이에 90도 편광 회전판을 설치하여 복굴절이 서로 상쇄되도록 하였음에도 불구하고 그림에서 볼 수 있듯이 편광에 따라 공진기 안정조건 영역이 서로 조금씩 벗어나 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제를 최소화하려면 공진기를 최대한 대칭형으로 제작해야 함을 알 수 있다.

##### 5. 열효과를 고려한 DPSSL의 개선

이상의 열 렌즈 효과, 열 복굴절 효과 등을 고려하여 그림 22와 같이 Nd:YAG 레이저를 개선하였다. 그림 2에서 설명한 Nd:YAG 레이저 head를 두 개 사용하고, 앞에서 설명한 바와 같이 두 head 사이에 90도 편광 회전판(CVI)을 설치하여 열 복굴절 효과를 상쇄하도록 하였다. 두 개의 Nd:YAG 레이저 rod를 공진기 끝에 설치하는 것보다는 공진기 중앙에 설치하는 것이 전체적인 정렬이 쉽고, 공진기의 길이 조정이 용이하며, 음향 광학변조기나 비선형 결정과 같은 다른 광학부품을 설치하기 쉽기 때문에, 두 레이저 head를 공진기 중앙에 놓는 구조를 선택하였다. 두 레이저 head의 정렬을 보다 용이하게 하기 위해서 레이저 head를 광학 레일 위에 설치하였으며, autocollimator를 사용하여 head의 위치를 미세조정하였다. 각 레이저 head는 사진에서 볼 수 있듯이 튜브를 통해 공급되는 냉각수로 냉각하였다. 공진기의 한쪽 끝에는 1064 nm에 대한 출력거울을 설치하였으며, 반대쪽 끝에는 Nd:YAG 레이저의 기본 파장(1064 nm)과 2차 조화파 파장(532 nm)에 대해서 모두 반사하는 평면거울(한국전광, HM-1037-0)을 설치하였다. Nd:YAG 레이저의 Q-switching을 위한 음향광학 변조기와 2차 조화파 발생을 위한 비선형 결정(KTP)도 그림과 같이 설치하였다. 2차 조화파 발생시 비선형 결정을 레이저 빔이 두 번 지나면서 파장 변환이 일어나도록 하기 위해서, 그림과 같이 1064 nm는 반사하고, 532 nm는 투과하는 평면거울(한국전광, SWP-R1064-T532)을 사용하여 L자 형태로 접힌 공진기를 구성하였다.

Nd:YAG 레이저 rod에서 발생하는 열 렌즈 효과는 펄핑 출력에 따라 달라지

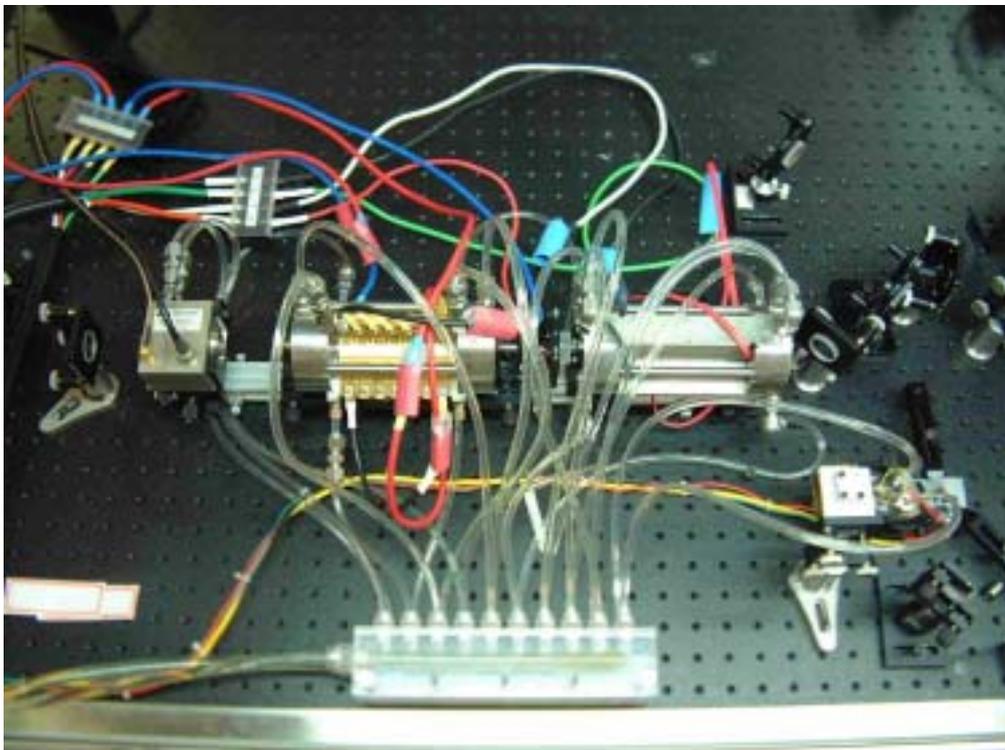
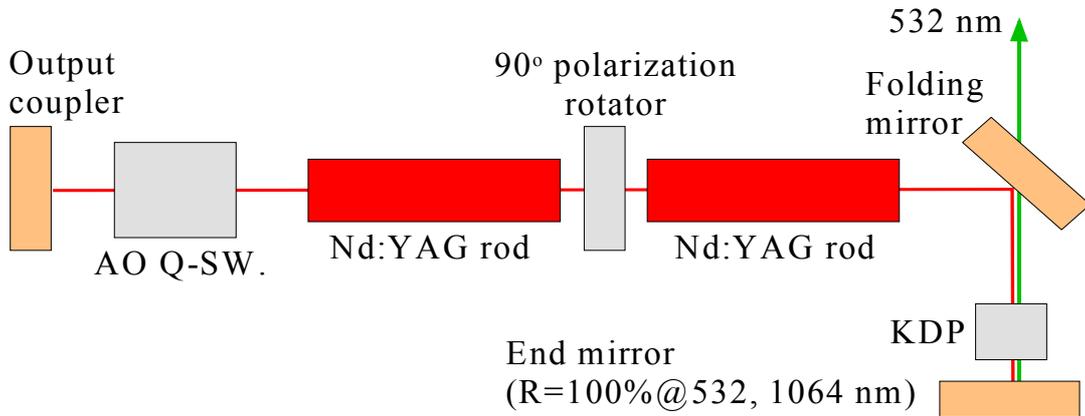


그림 22. 제작한 Nd:YAG 레이저.

고, 열 렌즈 효과가 공진 모드에 미치는 영향도 공진기의 길이, 레이저 rod의 위치 등에 따라 달라지기 때문에 이론적으로 계산한 공진 모드와 실제 제작한 레이저와 직접적인 비교는 어렵다. 따라서, 정성적으로 이론적인 공진 모드 분석결과와 비교하며서 레이저 rod와 평면거울까지의 거리, 두 rod 사이의 거리 등과 같은 공진기의 조건을 조정하였다. 제작한 레이저의 Nd:YAG 레이저 head와 출력거울 사이의 거리는 약 170 mm, 두 번째 head와 반대쪽 평면거울까지의 거리는 약 160 mm로 하였다. 출력거울 쪽에는 음향광학 변조기가 설치되어 광학거

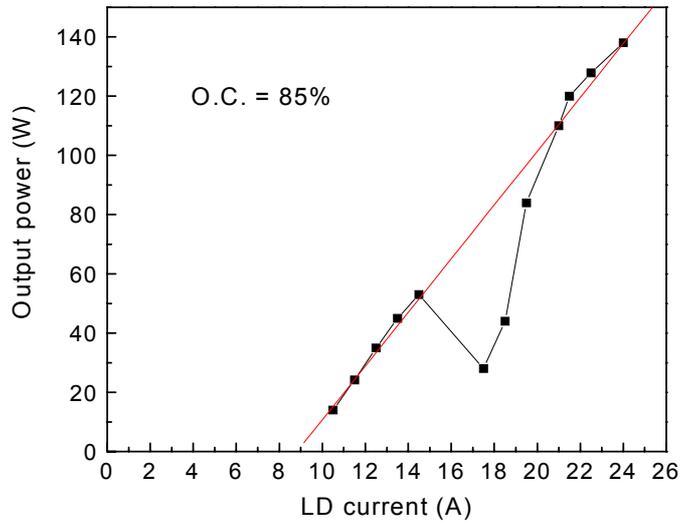


그림 23. 제작한 Nd:YAG 레이저의 연속발진 출력 특성.

리가 약간 짧기 때문에 이를 고려하여 head와 거울까지의 거리를 약간 다르게 하였다. 두 head 사이의 거리는 약 60 mm로 하였다.

이와 같이 제작한 Nd:YAG 레이저의 연속발진 출력을 조사하였다(그림 23). 연속발진으로 동작시키기 위해서 Q-switching은 하지 않았으나 음향광학 변조기는 공진기 내에 그대로 설치하였다. 2차 조화파 발생용 비선형 결정은 연속발진 동작시 제거하였다. 출력거울의 반사율은 85%였으며, 그림과 같이 레이저 다이오드(laser diode, LD) 전류를 증가시키면서 레이저 출력을 측정하였다. 약 9 A의 LD 전류에서부터 레이저 발진이 시작되었으며, 24 A에서 최대 135 W의 출력을 얻을 수 있었다. 그림에서 대략 16 - 20 A 영역에서는 레이저 출력이 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이는 그림 19에서와 같이 펌핑 출력이 증가함에 따라 열 렌즈 효과가 커지면서 공진기가 안정조건 영역을 벗어나기 때문이다. 즉 LD 전류가 15 A 이하일 때는 공진기가 첫번째 안정조건 영역에 있는 것이고, 20 A 이상일 때는 두번째 안정조건 영역에 있는 것이다. 따라서, 그 사이에서는 공진기가 불안정조건에 있기 때문에 레이저 출력이 감소하는 것이다. 이로부터 제작한 레이저와 이론적인 공진 모드 분석이 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

레이저를 펄스형으로 동작시켜 첨두 출력을 증가시켜야만 비선형 효과가 커져서 2차 조화파 발생에 유리하다. 펄스형 동작을 위해서 본 연구에서는 그림 24와 같은 음향광학 변조기(Gooch&Housego, QS27-6.5S-S)를 사용하였다. 음향광학 변조기는 fused silica로 구성되었고, 직경 6.5 mm의 구경을 가지며 양면이

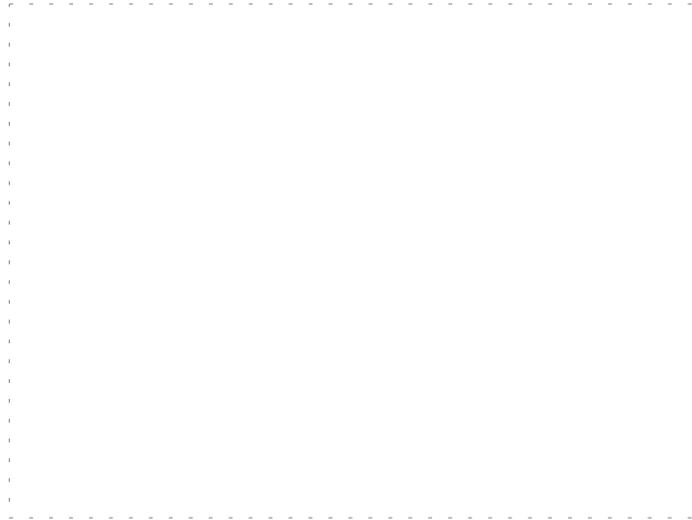


그림 24. 레이저에 사용된 음향광학 변조기.

1064 nm에 대해 무반사 코팅이 되어있다. 변조기는 최대 50 W의 27 MHz RF를 출력하는 RF driver(Gooch&Housego)에 의해 구동되었으며, RF driver는 과형발생기(Hewlett Packard, 8116A)에 의해 반복률과 펄스폭이 조절되었다. 고출력의 RF로 구동되는 음향광학 변조기에서 발생하는 열을 제거하기 위해서 그림과 같이 냉각수로 냉각하였다.

그림 25는 음향광학 변조기를 이용하여 Q-switching된 Nd:YAG 레이저의

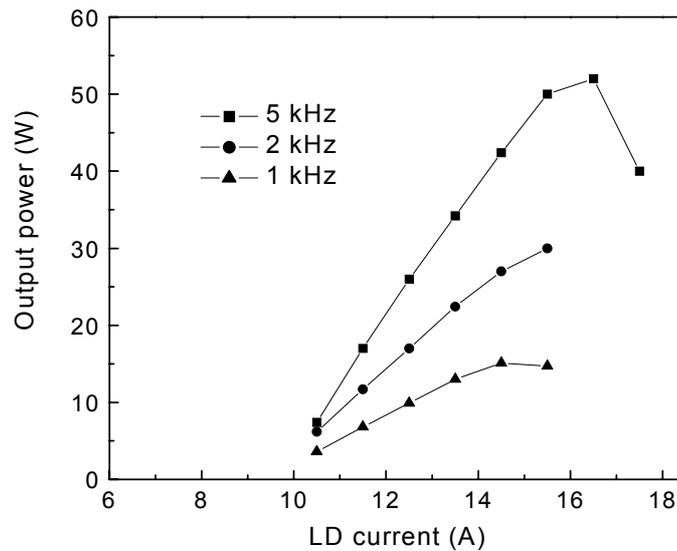


그림 25. Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 출력.

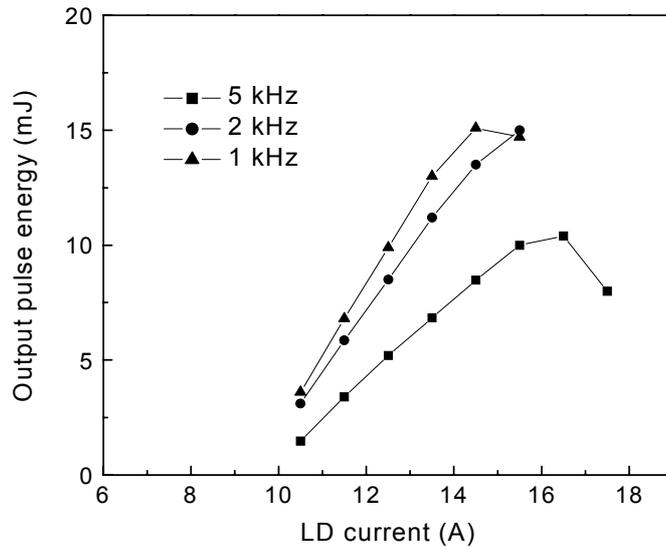


그림 26. Q-switching된 Nd:YAG 레이저의 펄스 에너지.

출력을 조사한 것이다. 2차 조화파 발생용 비선형 결정은 연복발진의 경우와 마찬가지로 설치하지 않았으며, 레이저의 반복률은 파형발생기를 사용하여 1, 2, 5 kHz로 조정하였다. 그림과 같이 반복률이 증가할수록 전체적인 출력이 증가하였으며, 5 kHz에서 최대 50 W의 출력을 얻을 수 있었다. LD 전류가 18 A 정도로 증가하면 출력이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 연속발진의 경우와 마찬가지로 열 렌즈 효과가 증가하여 공진기가 안정조건 영역을 벗어나기 때문이다. LD 전류를 더욱 증가시키면 공진기가 다시 안정조건을 만족하게 되어 출력이 증가할 것으로 예상되나, 실험결과 공진기의 거울이 높은 출력에 의해 손상되어 출력을 측정하기가 어려웠다. 이러한 공진기 거울의 손상은 펄스형의 레이저가 연속발진에 비해서 침투출력이 훨씬 높기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 그림 20의 첫번째 안정조건 영역과 두번째 안정조건 영역에서의 공진 모드를 분석해 보면, 두번째 안정조건에서 거울에서의 공진 모드가 많이 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서, LD 전류를 증가시켜 두번째 안정조건으로 넘어갈 때, 공진기의 거울이 손상될 가능성이 더욱 높아짐을 알 수 있다. 그림 26은 레이저의 반복률에 따라 레이저 펄스의 에너지 변화를 나타낸 것이다. 그림 25의 레이저 평균출력과는 달리 반복률이 낮아질수록 펄스 에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 최대 펄스 에너지는 반복률 1 kHz에서 약 15 mJ이었다. 레이저의 펄스폭은 150 - 250 ns 정도였다.

1064 nm의 Nd:YAG 레이저를 2차 조화파 발생을 통해 532 nm로 변환하기

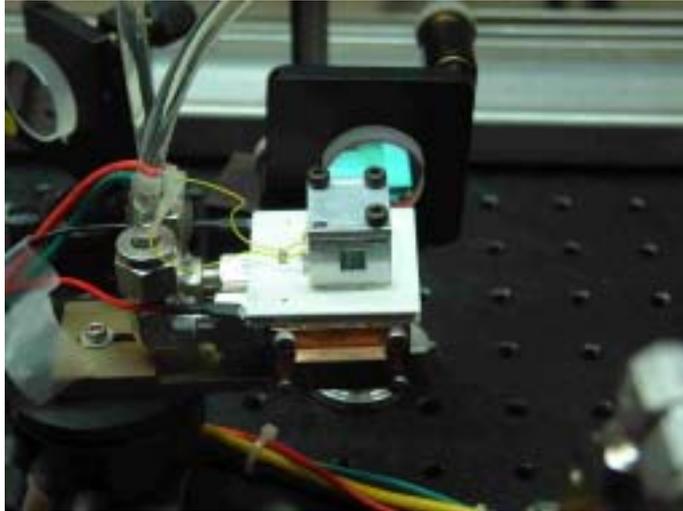


그림 27. 2차 조화파 발생을 위한 KDP 결정이 설치된 모습.

위해서는 비선형 결정을 사용해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 KDP 결정 (Litton)을 사용하였다. 고출력 Nd:YAG 레이저는 편광의 방향성이 없기 때문에, type II의 2차 조화파 발생을 사용하였고, 변환효율을 높이기 위해 레이저의 세기가 높은 공진기 내부에 KDP를 설치하였다. 사용한 KDP의 크기는  $5 \times 5 \times 5$  mm 였으며, 그림 27과 같이 알루미늄 case에 인듐 박막으로 감싸 설치한 후,

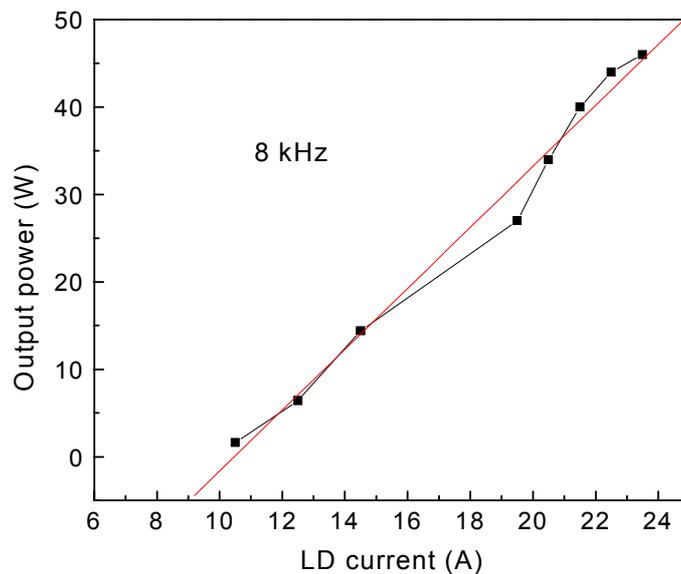


그림 28. Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력 특성.

case를 TE cooler와 냉각수를 사용하여 일정한 온도로 냉각하였다. 또한, 2차 조화파 발생을 위한 위상정합 각도를 조정하기 위해서, 각도 조절 mount위에 KDP 결정을 설치하였다.

그림 28은 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력을 측정된 결과이다. 공진기의 반복률은 8 kHz였으며, 공진기의 첫 번째 안정조건과 두 번째 안정조건 영역 사이에서는 레이저의 출력이 불안정하여 출력을 측정하지 않았다. LD 전류를 증가시켜 공진기 불안정조건 영역으로부터 두 번째 안정조건으로 넘어가는 경계부근에서는 레이저 출력과 모드가 불안정하여 KDP 결정이 손상될 가능성이 있기 때문에, 공진기 내부를 차단하여 레이저 발진을 멈춘 후, LD 전류를 증가시켜 두 번째 안정조건으로 완전히 넘어간 다음, 공진기의 차단을 서서히 제거하여 레이저 발진이 다시 시작되도록 하였다. 2차 조화파를 발생시키지 않았을 때와는 달리, LD 전류를 충분히 증가시켜도 공진기의 거울이 손상되지 않았다. 이는 Nd:YAG 레이저 출력이 출력거울 외에 2차 조화파로도 변환되어 나가서, 공진기 내부의 출력이 낮아지기 때문인 것으로 생각된다. 발생된 2차 조화파(532 nm)의 최대 출력은 약 45 W였으며, 이 때 펄스 에너지는 약 5 mJ이었다.

본 연구에서 제작한 Nd:YAG 레이저는 Ti:sapphire 레이저 펌핑용으로 사용될 것이므로 1064 nm의 출력보다는 532 nm의 출력이 우선적으로 최적화되어야 한다. 공진기 내부에서 2차 조화파를 발생시킬 경우에는 내부의 레이저 출력을 높이기 위해서 출력거울의 반사율을 되도록 높이는 것이 좋다. 반면에 펄스형으

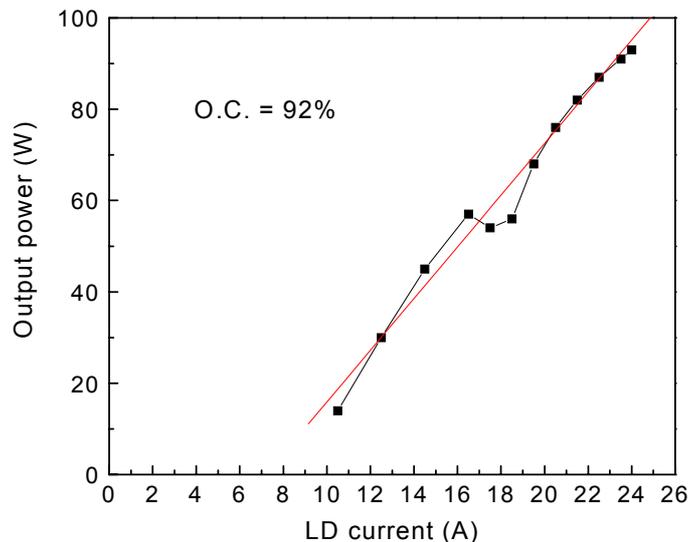


그림 29. Nd:YAG 레이저의 연속발진 출력 특성.

로 동작하는 레이저의 내부 출력이 너무 높아지면 레이저 공진기에 사용되는 광학부품이 손상될 수 있기 때문에 출력거울의 반사율을 잘 선택해야 한다. 이러한 점을 고려하여 Nd:YAG 레이저의 출력거울 반사율을 85%에서 92%로 증가시켜 레이저 출력 특성을 조사하였다.

그림 29는 출력거울을 교체한 후 측정된 Nd:YAG 레이저의 연속발진 출력이다. 출력거울의 반사율이 증가하여 공진기의 손실이 줄었기 때문에 레이저 발진 문턱 LD 전류가 약 8 A 정도로 약간 감소하였으며, 최대 출력은 90 W 였다. 따라서, 공진기의 내부 출력은 출력거울 교체 전에 비해 최대 출력에서 약 1.3 배 증가하였다. 그림 23에 비해 첫 번째 공진기 안정조건과 두 번째 안정조건 사이에서 레이저 출력이 감소하는 현상이 심하지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 공진기 내부의 손실이 감소하여 불안정한 공진기 영역에서도 충분한 레이저 발진이 가능했기 때문인 것으로 생각된다.

그림 30은 출력거울을 교체한 후, 음향광학 변조기로 Q-switching되어 펄스 형태로 동작하는 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이저의 반복률이 증가할수록 레이저 평균출력이 증가하였으며, 반복률 1, 2, 4, 8 kHz에서 각각 최대 10, 14, 29, 60 W의 출력을 얻을 수 있었다. 반복률 8 kHz의 경우 출력거울을 교체하기 전보다 최대 출력이 1.3 배 정도 증가하였음을 알 수 있다. 반복률 4 kHz 이하에서는 평균 출력이 증가함에 따라 펄스당 에너지가 급격히 높아져서 공진기의 광학부품이 손상될 위험이 있

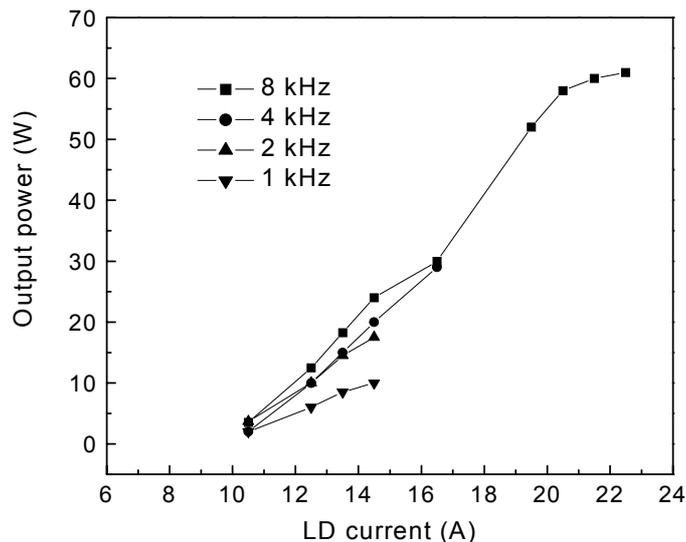


그림 30. Nd:YAG 레이저의 2차 조화파 출력 특성.

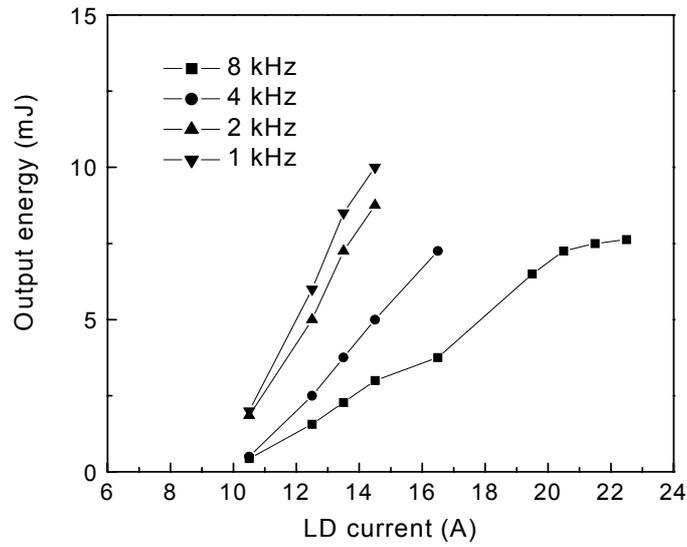


그림 31. Nd:YAG 레이저 2차 조화파의 펄스 에너지 특성.

기때문에 두 번째 안정조건 영역까지 LD 전류를 증가시키지 못하였다. 그림 31은 2차 조화파의 펄스당 에너지를 나타낸 것이다. 레이저 반복률이 작을수록 높은 펄스 에너지가 생성되었으며, 1 kHz에서 최대 10 mJ의 펄스 에너지를 얻을 수 있었다.

## 제 2 절 Ti:sapphire 레이저 설계 및 제작

현재 원자력 산업과 응용분야, 원자분광학 분야에서 사용되고 있는 공명 광이온화 분광은 주로 가시광 영역의 색소 레이저에 의해 이루어지고 있다. 색소 레이저는 다양한 파장의 레이저 출력을 생성할 수 있는 장점이 있지만 수명이 짧아 유지 보수가 어렵고, 형광수명이 ns영역으로 매우 짧아 효율적인 펌핑이 어려우며, 자외선 영역의 파장 생성이 어려운 단점이 있다. 이러한 색소 레이저를 보다 수명이 길고 안정성이 뛰어난 고체 레이저로 대체하려는 연구와 함께 많은 고체 레이저 매질이 분광용 레이저 매질로서 개발되어왔다. 그 중에서도 Ti:sapphire는 800 nm 영역에서 100 nm 이상의 넓은 발진대역을 가지면서도 물리적 특성이 우수하여 파장가변형 레이저로 주목받아 왔다. 특히, 기존에 Ti:sapphire의 펌핑광원으로 사용되던 아르곤 이온 레이저 등을 교체할 수 있는 우수한 청색 고체 레이저들이 등장하면서 Ti:sapphire를 이용한 완전고체 파장가변 레이저를 개발하려는 노력이 계속되었다. 또한 Ti:sapphire 레이저 파장의 2차 조화파는 350 - 450 nm의 청색 및 근자외선 영역이기 때문에 자외선 영역의 파장가변 레이저로도 주목받고 있다. 이러한 자외선 영역의 레이저를 이용하게 되면 광자의 에너지가 크기 때문에 이온화 단계를 줄일 수 있어 사용되는 레이저를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 안정성이 향상되는 장점이 있을 것이라고 많은 분광학 연구자들은 예측하고 있다. 본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 Ti:sapphire 레이저를 개발하여 원자력 산업에의 응용 가능성을 타진하고자 한다.

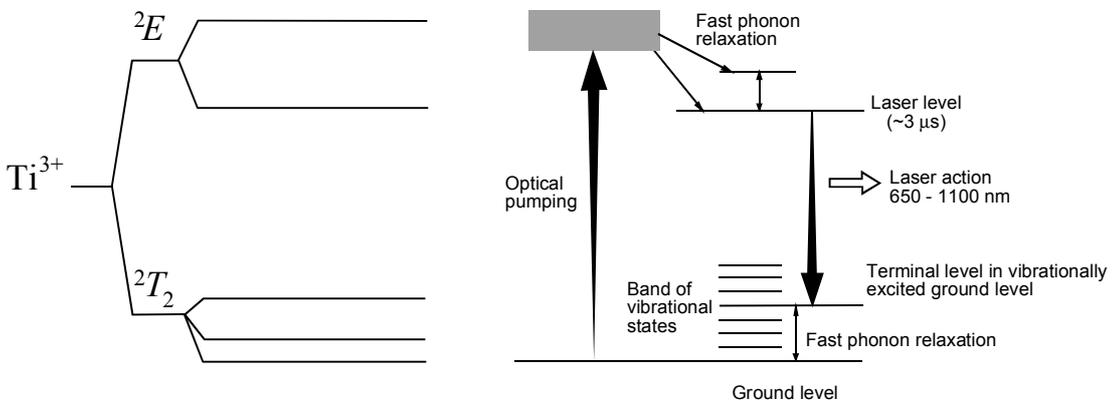


그림 32. Ti:sapphire 이득 매질의 에너지 준위.

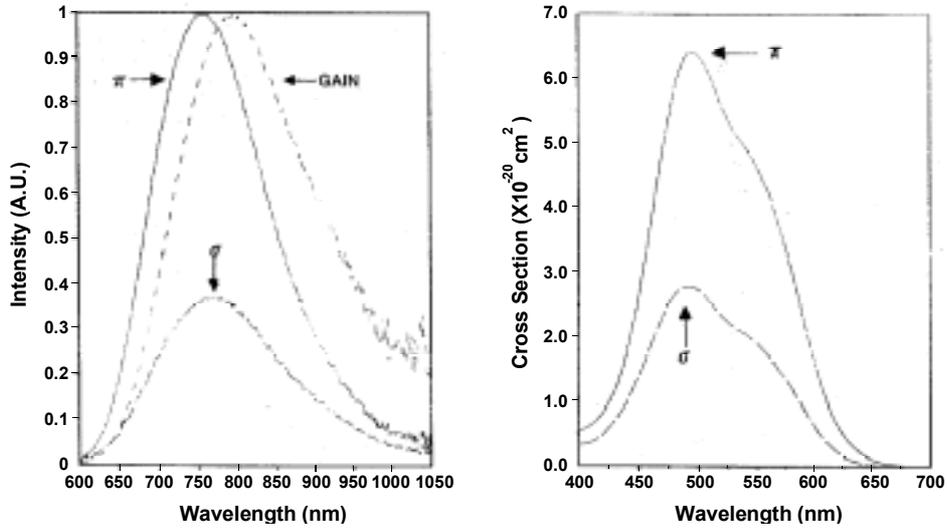


그림 33. Ti:sapphire의 파장에 따른 흡수 단면적과 형광 스펙트럼.

### 1. Ti:sapphire 레이저의 특성

Ti:sapphire는  $Ti^{3+}$ 가 사파이어( $Al_2O_3$ )에 도핑된 육면체 구조이며, 그림 32와 같이 4준위 레이저로 동작하는 이득 매질이다.  $Ti^{3+}$ 는 최외각에 한개의 3d 전자를 가지며, 사파이어 결정내에서 결정의 전자장에 의해 5중 축퇴된 d 전자의 에너지 준위가 분리된다. 결정내의 전자장은 cubic symmetry 성분과 trigonal symmetry 성분의 합으로 나타나며, cubic 성분의 전자장에 의해 3d 전자의 에너지가 3중 축퇴된  ${}^2T_2$  바닥 준위와, 2중 축퇴된  ${}^2E$  여기 준위로 분리된다. trigonal 성분의 전자장은  ${}^2T_2$  바닥 준위를 두 준위로 분리하고, 그 중 낮은 준위는 spin-orbit interaction에 의해 다시 분리되며,  ${}^2E$  여기 준위는 John-Teller 효과에 의해 두 준위로 분리된다.  $Ti^{3+}$ 의 에너지 준위는 사파이어의 진동 에너지와의 강한 결합작용을 통해 진동 밴드 구조가 형성되어, 넓은 흡수 대역과 방출 대역을 갖게 된다.

그림 33은 Ti:sapphire의 파장에 따른  ${}^2T_2 \rightarrow {}^2E$  흡수 단면적과,  ${}^2E \rightarrow {}^2T_2$  천이시 방출되는 형광 스펙트럼을  $\sigma$  편광과  $\pi$  편광에 대해 나타낸 것이다. 그림과 같이 티타늄 사파이어는 400 - 600 nm의 흡수 대역과, 650 - 1100 nm의 넓은 방출 대역을 가지며,  $\sigma$  편광에 비해  $\pi$  편광이 흡수 및 방출 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 티타늄 사파이어의 형광 수명은 상온에서 3.2  $\mu s$ 로, Nd:YAG, Nd:glass 등의 다른 고체 레이저에 비해 형광 수명이 짧아 섬광등에 의한 펌핑이 어렵기 때문에, 아르곤 이온 레이저나 Nd:YAG 레이저의 2차 조

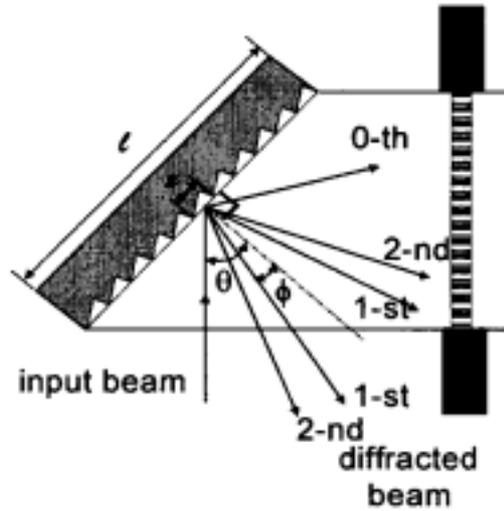


그림 34. 회절격자의 입사각과 회절각.

화파를 펌핑광원으로 사용한다. 그 밖에, Ti:sapphire는 경도가 9 mohs로 상당히 높고, 열 전도율도 상온에서 46 W/mK로 우수하며, 포화 fluence 값도  $0.9 \text{ J/cm}^2$ 로 높아서 증폭 매질로서도 유리한 장점을 가진다.

## 2. Ti:sapphire 레이저의 공진기

우수한 파장가변 레이저를 제작하기 위해서는 원하는 파장을 선택하여 발진시키고 발진된 레이저의 선폭을 최소한으로 유지해야한다. 이를 위해 사용하는 대표적인 광학부품이 그림 34와 같은 회절격자이다. 회절격자에 대한 빔의 입사각을  $\theta$ , 빔의 회절각을  $\phi$ 라고 하면, 입사각과 회절각은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\sin \theta + \sin \phi = \frac{m}{x} \lambda \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 회절차수,  $x$ 는 격자 상수,  $\lambda$ 는 파장이다. 회절격자를 사용하는 파장가변 레이저의 선폭을 예측하기 위해서는 회절격자의 분해능(resolving power)을 구해야 한다. 이를 위해 식 (1)을 미분하면 다음과 같다.

$$\cos \theta d\theta + \cos \phi d\phi = \frac{m}{x} d\lambda \quad (2)$$

이 때, 입사각이 일정한 경우에 대해 고려하면,  $\theta$ 에 대한 미분값은 0이므로 다음과 같이 회절빔에 대한 파장 분산식으로 표현된다.

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{m}{x} \frac{1}{\cos \phi} \quad (3)$$

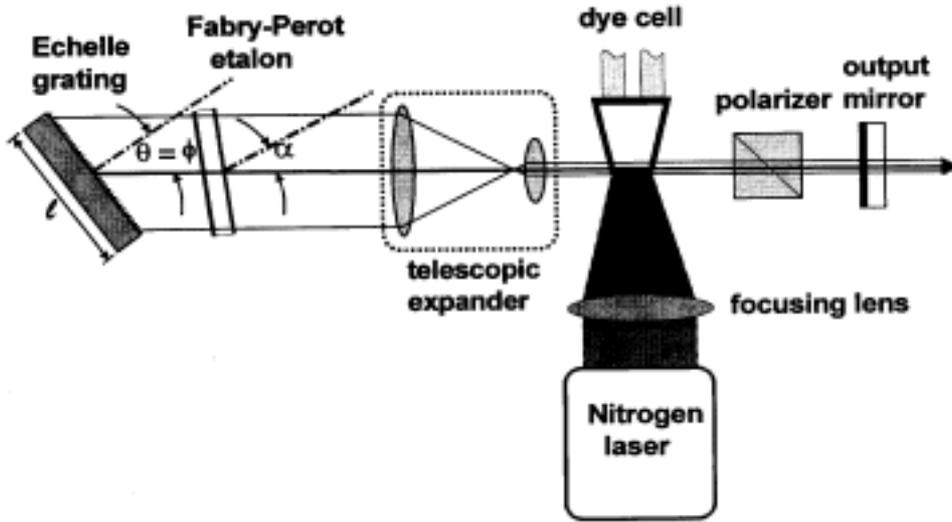


그림 35. Littrow 형 레이저 공진기의 구조.

회절각과 입사각이 같은 경우를 특별히 Littrow 형태라고 하며, 이 경우 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$2\sin\phi = \frac{m}{x}\lambda \quad (4)$$

위 식을 식 (3)에 대입하면 다음의 분산식이 얻어진다.

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{2\tan\phi}{\lambda} \quad (5)$$

회절각과 입사각이 같지 않은 경우에는 분산식이 다음과 같다.

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{\left(\frac{-\sin\theta}{\cos\phi}\right) + \tan\phi}{\lambda} \quad (6)$$

회절격자 표면상에 길이  $l$ 만큼 조사된 빔에 대해서는 다음의 식이 만족된다.

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{l\cos\phi} \quad (7)$$

이를 식 (6)에 대입하면 다음과 같이 분해능을 얻을 수 있다.

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2l\sin\phi}{\lambda} \quad (8)$$

회절격자를 사용하는 파장가변 레이저는 크게 Littrow 형 레이저 공진기와 grazing incidence mirror (GIM) 레이저 공진기로 나뉜다. Littrow 형 레이저 공진기는 1972년 T. W. Hansch가 고안한 공진기 형태로서 그림 35와 같은 구조를 가진다. 그림과 같이 입사각과 회절각이 같은 Littrow 형태의 회절격자와 회절격자의 분해능을 높이기 위해 레이저 빔의 크기를 확대하는 빔 확대기 등으로

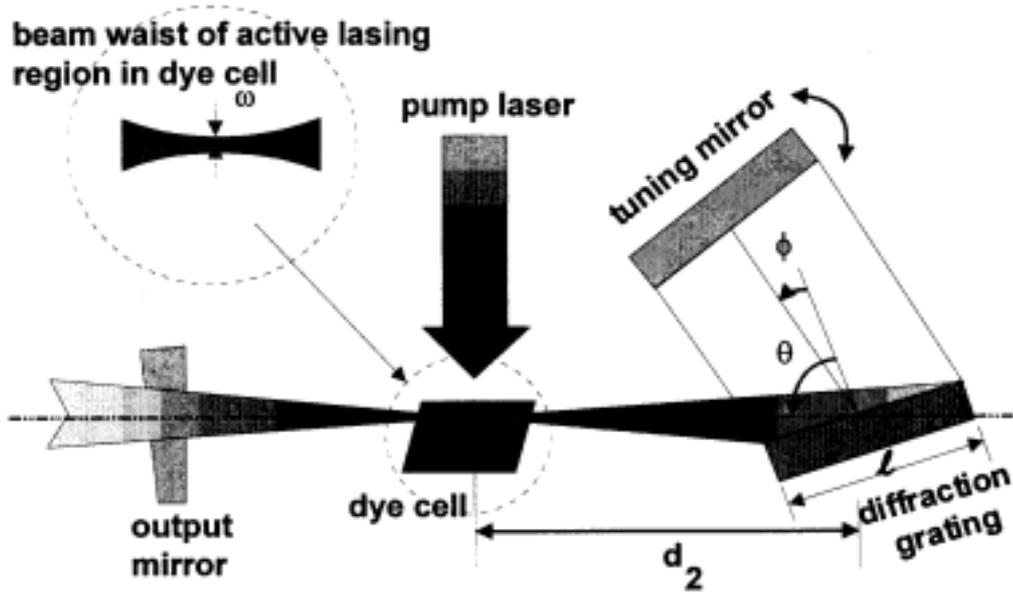


그림 36. GIM 레이저 공진기의 구조.

구성된다. Littrow 형 레이저의 선폭  $\Delta\lambda$ 는 다음과 같이 결정된다[5].

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi l \sin \theta} \quad (9)$$

여기서  $l$ 은 회절격자 표면에 레이저 빔이 조사된 길이이며,  $\lambda$ 는 레이저 파장,  $\theta$ 는 레이저 빔의 입사각이다. 이러한 Littrow 형 레이저는 선폭을 충분히 개선할 수 있는 장점이 있으나, 빔 확대기와 같은 광학부품이 추가되어 공진기의 구조가 복잡해지는 단점이 있다.

GIM 레이저 공진기는 그림 36과 같이 회절격자에 레이저 빔이 매우 큰 입사각으로 입사해, 빔 확대기를 사용하지 않아도 회절격자에 조사된 레이저 빔 길이가 충분히 긴 구조를 가진다. 이러한 GIM 레이저 공진기는 빔 확대기를 사용하지 않기 때문에 공진기 구조가 간단하고, 소형으로 제작할 수 있는 장점이 있으나, 회절격자에서 손실이 크기 때문에 레이저 효율면에서 불리한 단점이 있다. GIM 레이저의 선폭은 그림 37을 참조하여 구할 수 있다. 그림에서 회절격자와 파장가변 거울의 정렬에서 레이저 빔이 한번 왕복하는 경로를 고려하면 회절빔의 입사각과 회절각 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$m\lambda = x(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (10)$$

$$m'\lambda = x(\sin \theta_3 + \sin \theta_4) \quad (11)$$

여기서,  $m$ ,  $m'$ 은 회절차수,  $x$ 는 격자상수이다. 회절격자 표면에서 레이저 빔이

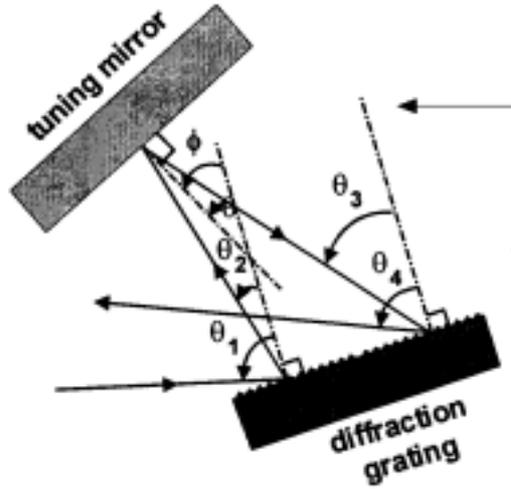


그림 37. GIM 레이저의 회절격자와  
파장가변 거울.

조사된 길이 안에서 공진되는 파장이 회절격자상의 위치에 따라 다르지 않고, 회절차수가 같다고 하면,

$$\theta_2 + \theta_3 = 2\phi \quad (12)$$

의 관계가 유도되고,  $\theta_1 = \theta_4 = \theta$ ,  $m = m'$ 이므로  $\theta_2 = \theta_3 = \phi$ 가 되어, 레이저의 파장은 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda = \frac{x}{m} (\sin \theta + \sin \phi) \quad (13)$$

즉, 공진되는 레이저 파장의 빔이 회절격자로  $\theta$ 의 입사각으로 입사하고,  $\phi$ 의 각도로 회절되는 식이 된다. 이득매질에서 발진되는 레이저 빔의 크기를  $w$ 라고 하면, 레이저의 선폭  $\Delta\lambda$ 는 회절격자의 입사각과  $w$ 에 의해서 결정된다. 따라서 GIM 공진기 시스템의 선폭을 분광기와 같이 고려하면, 각분산과 입사슬릿, 출사슬릿의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= [(\Delta\lambda_{\text{입사각}})^2 + (\Delta\lambda_{\text{출사각}})^2]^{1/2} \\ &= \left[ \left( \frac{\partial\lambda}{\partial\theta_1} \Delta\theta_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial\lambda}{\partial\theta_4} \Delta\theta_4 \right)^2 \right]^{1/2} \Big|_{\theta_1 = \theta_2 = \theta_0} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (12)와 같이 회절격자와 파장가변 거울에서의 위치에 따라 빔분산이 없다고 가정하면, 단지 이득 매질과 회절격자 사이의 각분산이 공진기의 분해능을 좌우할 것이며, 이 때의 각분산은  $\Delta\theta_1 = \frac{l \cos \theta_0}{2d_2}$ ,  $\Delta\theta_4 = \frac{w}{d_2}$  이 된다. 여기서  $d_2$ 는 이

이득매질과 회절격자 사이의 거리이다.  $\left(\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_1}\right)$ ,  $\left(\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_4}\right)$ 는 각각  $\theta_4$ ,  $\theta_1$ 를 상수로 하고 식 (10), (11)을 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_1} = \left(\frac{\lambda \cos \theta_1}{\sin \theta_3 + \sin \theta_4}\right) + \left(\frac{\cos \theta_3}{\cos \theta_2 + \cos \theta_3}\right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_4} = \left(\frac{\lambda \cos \theta_4}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}\right) + \left(\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_2 + \cos \theta_3}\right) \quad (16)$$

위 식을 식 (14)에 대입하면 레이저의 선폭은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda \cos \theta}{2(\sin \theta_1 + \sin \phi)} \left[ \left(\frac{l \cos \theta}{2d_2}\right)^2 + \left(\frac{w}{d_2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

여기서, 이득매질과 회절격자 사이의 거리  $d_2$ 가 Rayleigh 길이  $L_R$ 보다 크다고 하면,  $L_R \cong \pi w^2/\lambda$ 이므로, 각분산은  $\Delta\theta_{diff} = \lambda/\pi w$ 이며, 이 각분산이 이득매질과 회절격자 사이에서 이루어진다고 할 때, 각분산을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\frac{l \cos \theta}{2d_2} = \Delta\theta_{diff} \cong \frac{\lambda}{\pi w} \quad (18)$$

위 식을 식 (26)에 대입하면 다음의 식이 얻어진다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi l (\sin \theta + \sin \phi)} \left[ \left(\frac{d_2}{L_R}\right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (19)$$

반대로, 이득매질과 회절격자 사이의 거리  $d_2$ 가 Rayleigh 길이  $L_R$ 보다 작다고 하면,  $(l/2) \cos \theta = w$ 가 되므로 다음의 식이 주어진다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi l (\sin \theta + \sin \phi)} \left( \frac{\sqrt{2} L_R}{d_2} \right) \quad (20)$$

$d_2$ 가  $L_R$ 과 같은 경우에는 레이저 선폭이 최소가 되며 다음과 같이 선폭이 주어진다

$$\Delta\lambda \cong \frac{\lambda^2 \sqrt{2}}{\pi l (\sin \theta + \sin \phi)} \quad (21)$$

Littrow 형 레이저 공진기는 구조가 복잡하여 Ti:sapphire 레이저에는 잘 사용되지 않았으며, GIM 레이저 공진기는 1989년 K. W. Kangas 등에 의해 개발되었다[7]. 이 공진기는 소형이면서도 단일 종모드로 동작하여 선폭이 좁은 장점이 있었으나 효율이 낮아 40 mJ 정도의 펄핑 에너지에서 2 mJ의 낮은 출력 에너지가 생성되었다. 이러한 낮은 레이저 효율 문제를 해결하기 위하여, 그림 38과 같이 GIM 형 레이저 공진기를 변형한 자기 과종형(self-seeding) 레이저 공진기가 개발되어 Ti:sapphire 레이저에 적용되었다[8, 9]. 그림과 같이 GIM 형 레

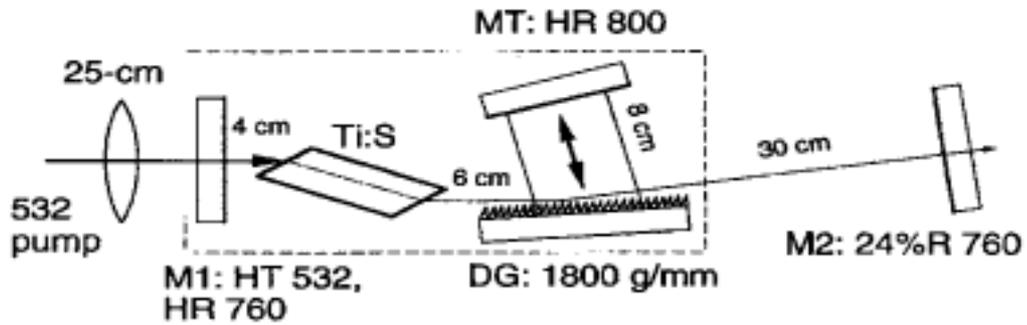


그림 38. 자기 과증형 Ti:sapphire 레이저.

이러한 공진기의 회절격자에서 zero 차수로 출력되는 레이저를 다시 feedback 시킴으로써 공진기의 효율을 높일 수 있었으며, 40 mJ 펌핑 에너지에서 8 mJ의 출력을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 이처럼 자기 과증형 레이저 공진기를 사용하여 과장 가변형 Ti:sapphire 레이저를 설계, 제작하였다.

### 3. 자기 과증형 Ti:sapphire 레이저

자기 과장 가변형 Ti:sapphire 레이저를 제작하기 위한 기초 작업으로서 먼저 그림 39와 같이 Ti:sapphire 레이저 결정, 후면거울, 그리고 출력거울로만 이루어진 간단한 공진기를 제작하여 출력 특성을 조사하였다. 출력거울(한국전광, PR1-800-80-1037-0)의 반사율은 800 nm 과장 대역에서 80%였으며, 후면거울(Newfocus, 5102)은 800 nm 영역에서 전반사 코팅된 것을 사용하였다. 공진기의 길이는 약 20 cm로 하였다. Ti:sapphire 결정은 양면이 Brewster 각도로 연마되어 있고, 길이 20 mm, 532 nm에서의 흡수 계수가  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ 인 것을 사용하였으며, 그림 40과 같이 황동 지지대에 인듐 박막으로 감싸 설치한 후, 냉각수로 냉각하였다. 펌핑 레이저로는 앞에서 설명한 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파를 사용하였으며, 초점거리 30 cm의 렌즈를 사용하여 펌핑 레이저를 Ti:sapphire 결정에

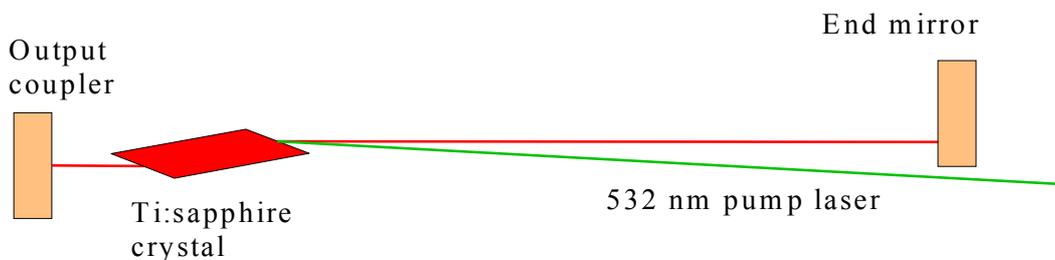


그림 39. 기본 발진 실험을 위한 Ti:sapphire 레이저 공진기.

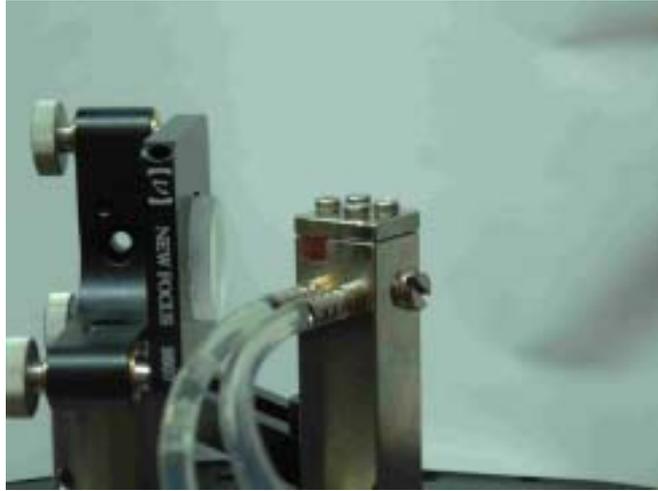


그림 40. Ti:sapphire 레이저 결정이 설치된 모습.

집속하였다. 레이저를 정렬하기 위해서, 별도의 He-Ne 레이저를 출력거울을 통해 입사시켜, 이 레이저 빔을 기준으로 정렬하였다.

그림 41은 이러한 Ti:sapphire 레이저의 출력 특성을 측정한 결과이다. Ti:sapphire 레이저가 쉽게 발진하기 위해서는 펌핑 레이저의 평균출력보다는 펄스당 에너지가 중요하기 때문에, 펌핑 레이저는 1 kHz의 반복률로 동작시켜서 펄스당 에너지를 최적화하였다. 그림과 같이 Ti:sapphire 레이저 출력은 5 W의 펌핑 출력에서 최대 1.4 W였으며, 기울기 효율은 46% 정도였다. 펌핑 출력을 더

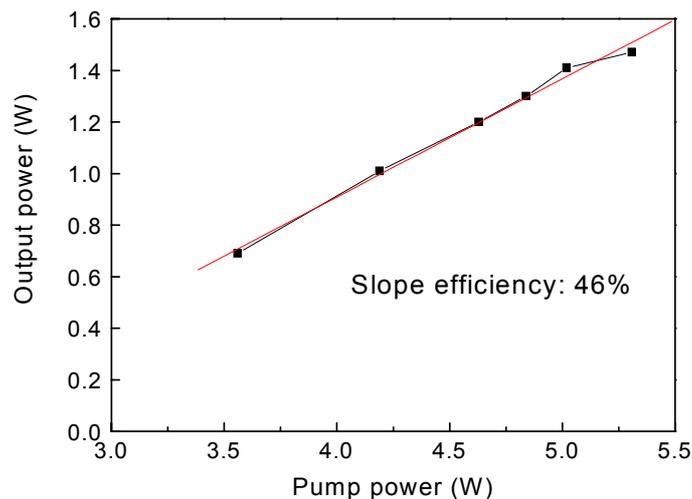


그림 41. 기본 Ti:sapphire 레이저의 출력 특성.

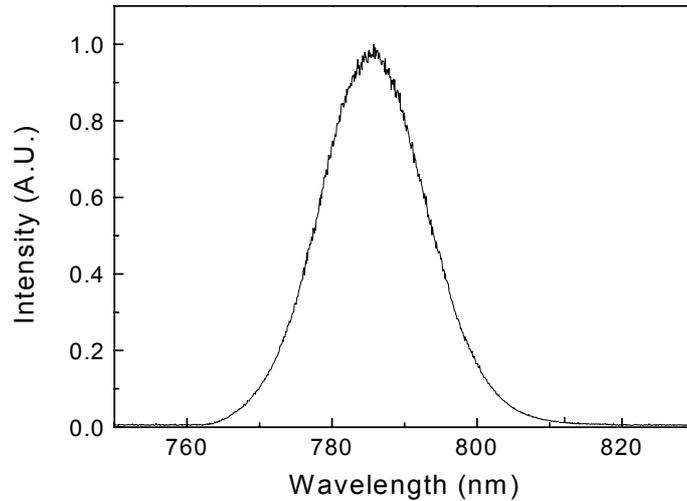


그림 42. 기본 Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼 특성.

속 증가시켜서 7 - 8 W 이상 되면, Ti:sapphire 레이저 결정에서 발생하는 열 문제 때문에, 레이저의 출력 모드가 이상해지고 출력도 약간 감소하는 문제점이 있었다.

그림 42는 Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼이다. 레이저 공진기 내부에 파장 선택을 위한 광학 부품을 설치하지 않았기 때문에 그림과 같이 상당히 넓은 스펙트럼이 생성되었다. 스펙트럼의 피크 파장은 Ti:sapphire의 이득 중심 파장과 거의 일치하는 785 nm였으며, 스펙트럼 폭은 약 20 nm 였다.

레이저의 선폭과 함께 파장 가변 레이저의 중요한 특성중의 하나는 파장 가변이 가능한 범위이다. Ti:sapphire 레이저의 기본적인 파장 가변 영역을 측정하

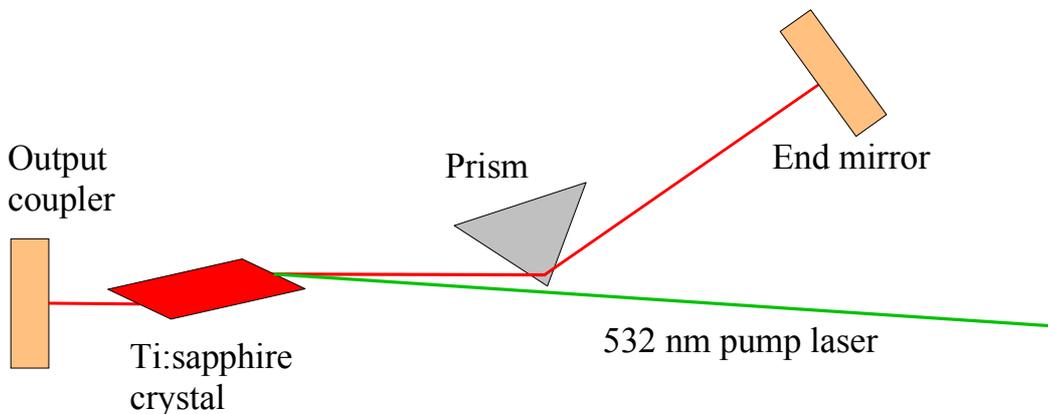


그림 43. 파장 가변 범위 측정을 위한 Ti:sapphire 레이저 공진기.

기 위해서는 자체의 손실이 되도록 적은 파장 선택 광학계를 공진기 내부에 설치해야 한다. 이를 위해서 그림 43과 같이 프리즘을 사용하여 파장 선택을 하는 레이저 공진기를 제작하였다. 전체 공진기 길이는 20 cm 정도로 기본 공진기 구조와 같게 하였으며, 양면에 레이저 빔이 Brewster 각도로 입사 및 굴절하는 fused silica 프리즘을 사용하여 공진기 내에 손실을 최소화하였다. 프리즘을 공진기에 설치하기 위해서 먼저 Ti:sapphire의 기본 공진기를 정렬하여 발진시킨 후, 발진된 레이저 공진기에 프리즘 끝을 조금 삽입하여 공진기 내부의 레이저 빔이 조금 굴절되도록하여 이를 후면거울 정렬에 사용하였다. 후면거울을 정렬한 후에는 프리즘을 완전히 삽입하여 프리즘을 통해서만 레이저 발진이 되도록 하였다. 파장 가변은 후면거울을 회전시킴으로써 쉽게 이루어질 수 있었다.

그림 44는 이와 같은 Ti:sapphire 레이저의 파장 가변 범위를 측정된 결과이다. 이 때, 펌프 출력은 4.6 W였으며, 반복률은 1 kHz였다. 그림과 같이 파장 가변 결과 730 - 850 nm의 넓은 파장 가변이 가능함을 확인하였다. Ti:sapphire의 이득 중심파장인 790 nm 근처에서는 800 mW 이상의 출력이 생성되었으나, 이득 중심파장에서 멀어질수록 출력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서, 그림 33에서 나타난 것과 같이 Ti:sapphire의 넓은 이득 선폭을 최대한 활용하려면, 중심파장에서 많이 벗어난 750 nm이하, 850 nm 이상의 영역에서는 출력거울의 반사율을 낮추고 펌프 레이저를 더욱 강하게 집속하여 발진시키는 것이 유리할 것이다. 프리즘을 사용한 파장 가변의 경우에는 파장 가변 범위는 넓으나 선폭은 1

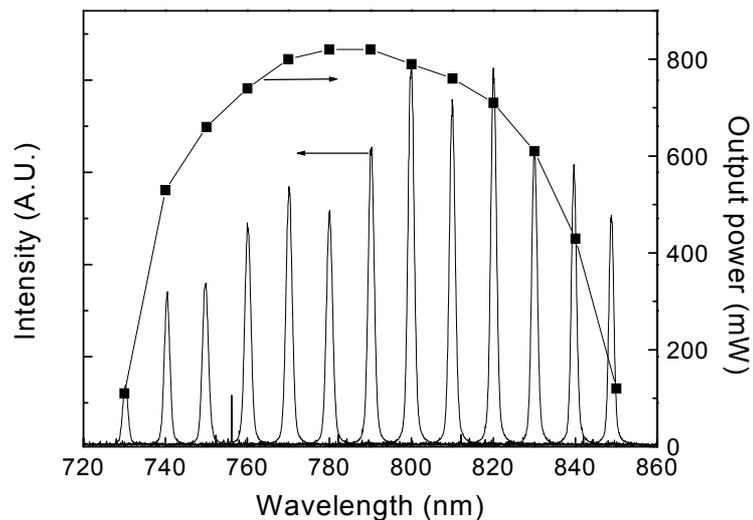


그림 44. Ti:sapphire 레이저의 파장 가변 범위.

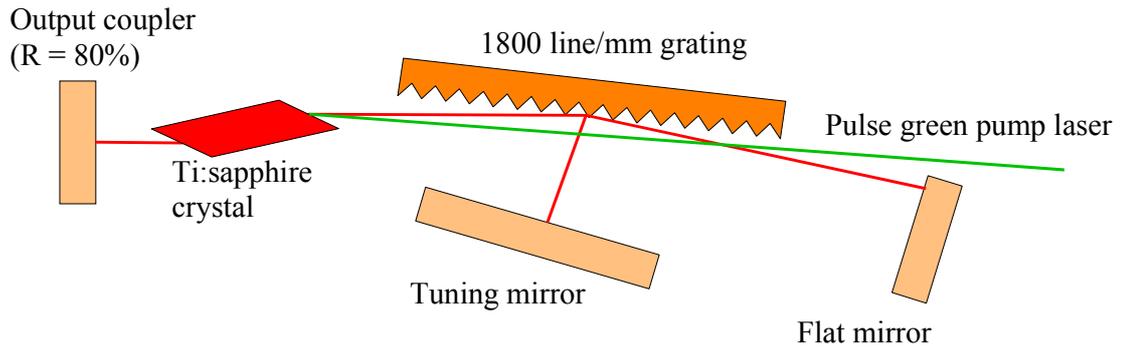


그림 45. 자기 파종형 Ti:sapphire 레이저의 구성도.

- 2 nm로 매우 넓었다.

본 과제에서 제작할 자기 파종형 Ti:sapphire 레이저의 구성도를 그림 45에 나타내었다. 그림과 같이 회절격자의 zero차 회절빔으로 구성된 주 공진기와 1차 회절빔으로 구성된 GIM 형 공진기의 결합형이다. 회절격자는 격자수가 1800 lines/mm인 것을 사용할 예정이며, 식 (1)로부터 입사각이 88도일 때, 1차 회절각은 800 nm에서 약 26도임을 알 수 있다. 자기 파종형 공진기를 제작할 때에는 주 공진기보다 GIM 형 공진기에서 seed 신호가 먼저 생성되어야 하므로, 파장가변 거울을 회절격자에 가깝게 하여, GIM 형 공진기 길이를 짧게해야 한다. 또한, GIM 형 공진기에서 생성된 seed 신호가 효율적으로 주 공진기에 사용되기 위해서는 GIM 형 공진기와 주 공진기 길이 비율이 잘 조절되어야 한다. 이것은 실험적으로 레이저 출력을 관측하면서 조정해야 할 것이다.

### 제 3 절 Yb 원자의 분광학적 특성

본 연구에서는 자외선 영역의 고반복률 펄스형 레이저를 이용하여 공명 광이온화를 실증하는 연구를 하고자 한다. 실험에 사용하는 원소로는 최외각 전자의 배열로 인하여 원자의 에너지 준위가 간단하고, 자외선에 의하여 바닥상태로부터 여기상태로의 전이확률이 높은 Yb를 선택하였다.

Yb는 자연상태에 7개의 안정동위원소가 존재하며 그 중에 Yb-168은 중성자를 조사하여 방사성 동위원소 Yb-169를 만들 수 있으며, Yb-169는 50 - 300 keV의 에너지를 가지는 감마선을 방출하게 되므로, 이 방사선을 이용하여 뇌종양, 간암, 폐암 등을 진단하거나, 5mm 이하의 두께를 가지는 재료의 비파괴 검사도 할 수 있다[10].

#### 1. Yb 원자의 물리적 성질

Yb는 원자번호가 70인 희토류 원소로서  $[Xe]4f^{14}6s^2$ 의 전자배열을 가지고 있기 때문에 최외각 준위에 두 개의 전자가 채워져 있다. 그로 인하여 에너지 준위가 비교적 단순하여 레이저로 이온화시키기 위하여 선택할 수 있는 파장을 쉽게 선택할 수 있다. 1차 이온화 에너지는 6.254 eV로서 가시광선 영역의 광자를 세 개 흡수하면 이온화될 수 있고, 자외선 영역의 광자는 두 개만으로도 이온화가 가능하다.

상온에서는 고체인 금속이지만 녹는점이 824°C, 끓는점이 1194°C이므로 희토류 금속 중에서는 비교적 낮은 온도에서도 쉽게 증기화할 수 있는 이점도 가지고 있다.

Yb 원소는 표 4에서처럼 자연계에 7 개의 안정동위원소를 가지고 있다. 그 중 Yb-168은 구성비가 0.135%로서 아주 작은 양만 자연계에 존재한다.

표 4. Yb 동위원소의 자연상태의 성분비

동위원소 질량수	168	170	171	172	173	174	176
성분비(%)	0.135	3.03	14.31	21.82	16.13	31.38	12.73

## 2. Yb 원자의 에너지 준위와 이온화 경로

Yb의 에너지 구조를 보면 란탄계 원소들 중에서는 보기 드물게 4f 층이 완전히 채워지고 최외각 전자층인 6s 도 두 개의 전자가 채워져 있어 4f 층의 전자가 여기 되는 경우를 제외하면 비교적 간단한 에너지구조를 가지며 알칼리 토 금속과 같은 분광 특성을 보인다[11].

그림 46은 Yb 원자의 주요 에너지 준위도로서 가시광선을 이용한 분광 연구에서는 Yb를 여기시킬 때  $6s6p\ ^3P_1$  ( $\lambda = 555.65\text{ nm}$ )가 유일한 여기준위이다. 그러나 사용 광선의 파장을 자외선까지 영역을 넓히면  $6s6p\ ^1P_1$  ( $\lambda = 398.8\text{ nm}$ )의 준위로도 여기가 가능하게 된다.[12,13] 본 연구에서는 현재까지 주로 이용되던 가시광선 영역을 벗어나 자외선 영역의 레이저광을 이용하여 원자를 공명 이온화하기 위한 연구를 하고자 한다. Yb는 자외선 영역의 광을 이용하여 여기가 가능한 준위가 존재하고 여기된 원자를 이온화할 수 있기 때문에 공명 광 이온화의 실증을 위한 시료로 사용할 예정이다.

현재까지는 원자력 산업에 응용되는 고반복률 레이저의 발전 영역이 가시광선 영역인 관계로 일반적으로 가시광선 영역의 레이저들이 주로 공명이온화에 이용되어 왔다. 가시광선 영역의 레이저를 이용하여 Yb를 공명 이온화시키려면 555.65nm의 광자를 이용하여  $6s6p\ ^3P_1$  준위로 여기시키고 다음에 581.067nm 파장의 광자에 의하여  $4f^{13}6s^26p(7/2,3/2)_2$  준위로 다시 여기시킨 후 마지막으로 582.782nm의 광자로 자동이온화 준위로 전이 및 이온화시키는 과정을 거치게 된다. 즉, 가시광선 영역의 세 개의 광자에 의하여 Yb 원자가 바닥상태에서 이온화가 된다.

최근 들어 다이오드 레이저와 DPSSL 기술의 발달, 그리고 사파이어 레이저의 출현으로 고반복률의 자외선 레이저 발전이 비교적 쉽게 얻을 수 있게 되었다. 자외선 레이저를 이용하게 되면, 398.8nm의 광자로  $6s6p\ ^1P_1$  상태로 여기시킨 후 곧바로 이온화 준위로 전이 및 이온화시킬 수 있게 되어 단지 두 단계에 의해서 바닥상태로부터 이온화가 될 수 있다.

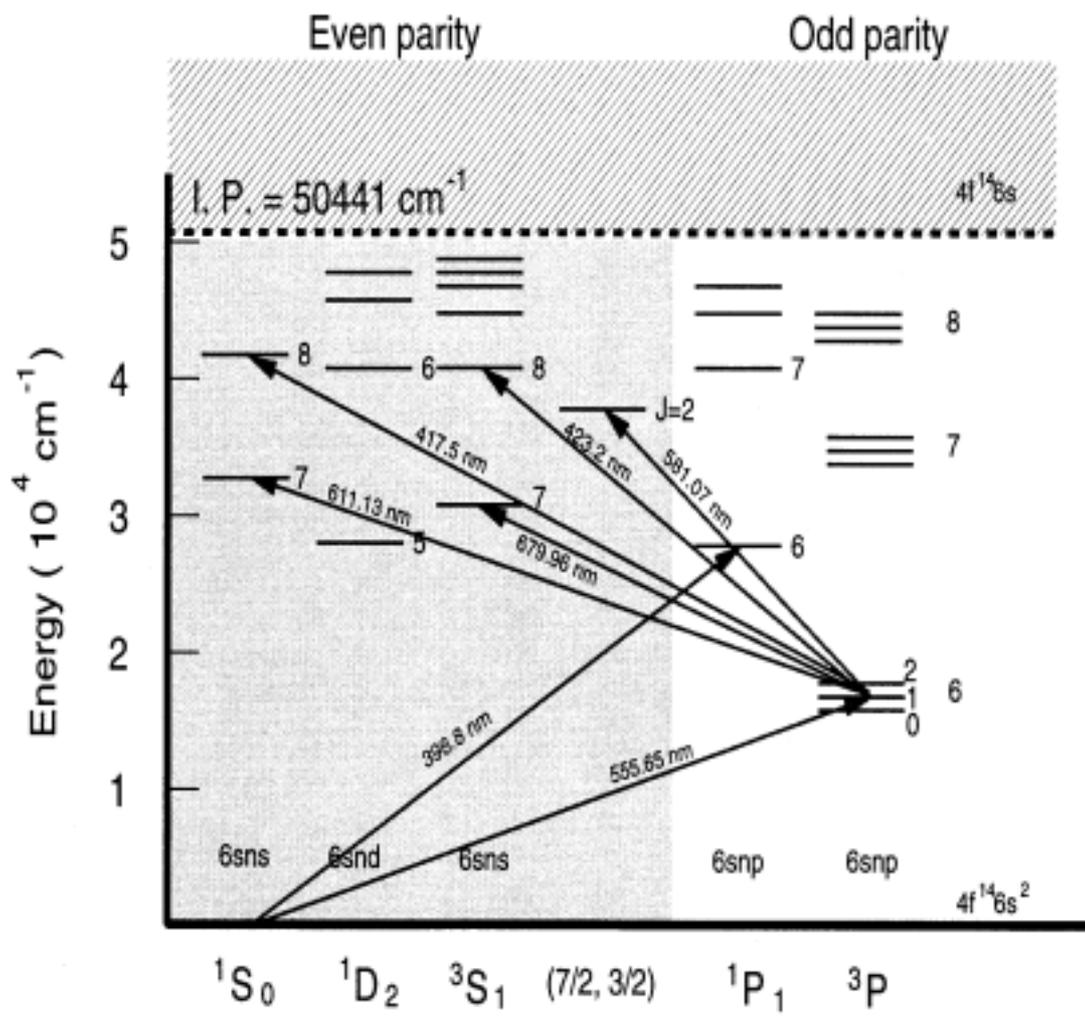


그림 46. Yb 원자의 주요 에너지 준위도

### 3. 공명 이온화 실험 장치

본 연구에서는 이미 앞에서 기술한 것처럼 1차 연도에 다이오드 펌핑 고체레이저 (DPSSL)을 개선하고 사파이어 레이저를 설계 제작하는 연구가 주가 되었다. 차기연도에는 사파이어레이저를 완성하고 여기서 출력되는 레이저빔을 제 2 조화파로 변환하여 자외선 영역의 레이저를 발생시킬 예정이다. 이러한 레이저 시스템이 완료되면 출력되는 자외선 레이저를 이용하여 공명이온화 분광을 실증하기 위한 실험장치를 그림 47과 같이 구성할 예정이다. 실험장치에 대하여 간단히 살펴보면 다음과 같다.

당해연도에 개선 보완된 다이오드 펌핑 고체레이저를 이용하여 두 대의 사파이어 레이저를 발진시킨다. 사파이어레이저는 740 - 850nm 영역에서 발진되며 빔회절기를 이용하여 공명이온화에 필요한 파장만을 선택적으로 출력시킬 수 있다. 여기서 출력된 적외선 영역의 파장은 LBO 결정에 의하여 제 2 조화파 즉 자외선 영역의 파장을 가지는 레이저광으로 변환된다. Yb을 시료로 하는 경우는 398.8nm의 자외선 영역의 레이저빔을 발진시켜야 한다.

챔버 내에는 Yb 시료를 가열하여 원자증기를 발생시키고, 이 원자증기에 레이저빔을 입사시키면 레이저의 파장과 Yb 원자의 공명선이 일치하는 경우 Yb 원자들은 레이저빔을 흡수하게 되어 이온화된다. 생성된 이온들의 종류를 분석하기 위하여 TOF 질량분석장치를 제작 설치한다. 그러면 생성된 이온은 전기장에 의하여 이온을 검지할 수 있는 MCP (Multi-channel Plate)에 도달하게 되고, 검지된 신호를 오실로스코프 및 컴퓨터를 이용하여 신호를 분석하게 된다. TOF 질량분석기에서는 이온의 질량에 따라 그 도달 시간이 각기 다르기 때문에 생성된 이온의 종류와 생성시기를 분석할 수 있게 된다.

이러한 실험 과정을 통하여 제작된 고반복율의 자외선 영역의 레이저를 이용하여 원자의 공명이온화를 실증할 수 있게 되며, 관측된 데이터를 통하여 자외선 영역의 레이저를 이용할 때의 효과 등에 대해서도 분석할 수 있게 된다. 자외선 영역의 레이저를 이용하여 두 단계로 Yb를 이온화시키는 경우 지금까지의 문제는 자동이온화 준위를 알 수 없다는 점이다. 자동이온화 준위는 이온화 효율을 크게 높여주기 때문에 매우 중요하지만, 없다 하더라도 이온화를 실증하는 데는 큰 문제가 없으리라 예측된다. 이온화 실증이 끝나면 이에 대한 연구가 계속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

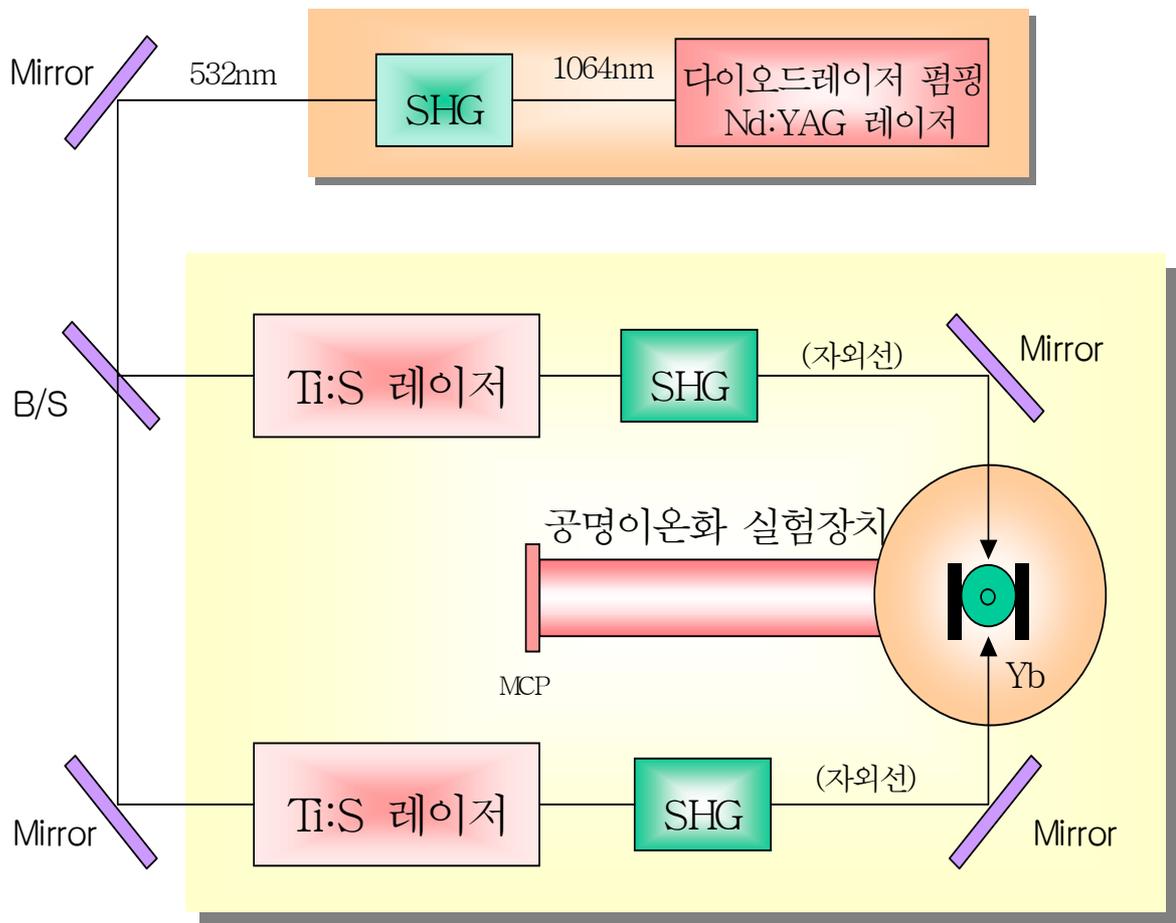


그림 47. 자외선 영역의 레이저를 이용한 공명이온화 실증 실험 장치 구성도

### 제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

본 연구에서는 자외선 영역의 레이저를 개발하고, 개발된 레이저를 이용하여 Yb 원자의 공명 이온화를 실증하는 것이 최종 목표이다. 이를 위하여 당해 연도에는 우리 팀에서 이미 개발되었던 연속 발진형 DPSSL (다이오드 레이저 펌핑 고체레이저)을 본 연구에 맞도록 고반복률의 펄스형으로 개선하는 연구와 개선된 DPSSL로 펌핑되는 사파이어 레이저를 설계 제작하고, Yb 원소에 대한 자료를 수집하는 것을 연구목표로 삼았다.

이러한 연구목표는 계획대로 모두 달성되었으며 연구수행 결과 Nd:YAG 레이저 cavity 개조를 개조하고 빔 quality 개선을 개선하여 반복률이 5kHz일 때 약 30W의 출력을 얻을 수 있었다. 또한 이 레이저로 펌핑되는 적외선 영역의 Ti:S 레이저를 설계 제작하여 free running 실험을 함으로써 730 - 850 nm의 넓은 영역에서 파장가변이 가능함을 확인할 수 있었으며, self-seeding Ti:S 레이저도 설계 제작하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

사파이어레이저의 펌핑용으로 사용되는 Nd:YAG 레이저는 발진파장이 1064 nm로서 2차 조화파 파장인 532 nm가 Ti:sapphire 레이저 펌핑에 적합하고, 현재 많이 생산되고 있는 800 nm 영역의 레이저 다이오드로 효율적인 펌핑이 가능한 장점이 있음. 그러나 고출력 레이저에서는 열 렌즈 효과와 열 복굴절 현상이 발생하기 때문에 이를 효과적으로 조정해야한다. 이러한 열 복굴절 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 두 개의 Nd:YAG rod를 사용하고 그 사이에 90도 편광회전판을 설치하는 방식을 도입하였다. 이러한 방식은 두 rod에서 생기는 복굴절이 서로 상쇄되어, 편광에 따라 공진조건이 달라지는 문제를 해결할 수 있었다. 이와 같은 열 복굴절 보상 방법을 기초하여 두 개의 Nd:YAG rod를 사용하는 레이저 공진기를 구성하였으며, 반사율 92%의 출력거울을 사용하였을 때, 1064 nm에서 최대 100 W의 연속발진 출력을 생성할 수 있었다.

2차 조화파 생성을 위해서는 침투 출력이 높은 것이 유리하기 때문에 레이저 공진기내에 음향광학변조기(AO modulator)를 설치하여 Q-switching을 하였다. 반복률은 1 - 10 kHz내에서 조정하였다. 레이저의 출력거울을 통해서 나오는 레이저 출력보다 레이저 내부의 출력이 세기 때문에 공진기 외부에서 2차 조화파를 발생시키는 것보다는 공진기 내부에서 2차 조화파를 발생시키는 것이 변환효율면에서 유리하였다. 제작한 Nd:YAG 레이저의 532 nm 출력은 반복률 1, 2, 4, 8 kHz에서 각각 최대 8, 14, 29, 60 W였으며, Q-switching된 레이저 펄스

폭은 100 - 200 ns였다.

본 연구에서 개선 보완한 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 Ti:sapphire 레이저의 기본적인 특성을 조사하기 위해 평면거울과 Ti:sapphire 결정으로만 구성된 간단한 공진기를 구성하고 free running 실험을 하였다. 펌프 레이저 출력에 따라 1 kHz 반복률에서 최대 1.4 W까지 얻을 수 있었으며, slope efficiency는 46%였다. Ti:sapphire 레이저의 기본적인 파장가변 영역을 조사하기 위해서 프리즘을 사용하여 파장가변 실험을 하였다. 그 결과 광학부품의 교체없이도 730 - 850 nm의 넓은 영역에서 파장가변이 가능함을 확인할 수 있었다.

Yb의 원자구조는 최외각 전자층이 채워진 상태이기 때문에 원자의 에너지 준위가 다른 원자들에 비해 간단하다. 특히 첫번째 여기준위로 본 연구에서 이용될 수 있는 자외선 영역의 에너지 준위는 유일하게 398nm 파장 만 존재함을 알 수 있었다. 이 준위에 여기된 Yb 원자를 두번째 광자에 의하여 이온화시키려 할때, 자동이온화 준위가 존재하면 이온화율이 높기 때문에 공명이온화를 위하여 매우 유리하게 될 것이다. 그러나, 지금까지의 문헌 조사에 의하면 자동이온화 준위로 알려진 것은 많이 있었지만, 본 연구에서 이용할 수 있는 자동이온화 준위로 알려진 것은 찾을 수 없었다.

이상의 당해연도 연구결과로부터 목표로 설정된 연구내용들이 모두 달성되었음을 알 수 있다. 차기연도에는 이러한 연구결과를 바탕으로 사파이어레이저 두 대를 발진시키고 이로부터 다시 제 2 조화파를 만들어 자외선 영역의 레이저를 발진시킬 예정이며, 여기서 발진된 자외선 레이저를 이용하여 Yb 원자를 공명이온화시키는 연구를 수행할 예정이다.

## 제 4 장 참고문헌

- [1] W. Koechner, *Solid-state Laser Engineering* Fourth ed., Springer, Berlin, 1995.
- [2] J. Lee, H. J. Moon, J. Yi, and B. Cha, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 38, 315 (1999).
- [3] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conductin of Heat in Solids*, Oxford Univ. Press, London, 1948.
- [4] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, Mill Valley.
- [5] T. W. Hansch, *Appl. Opt.* Vol. 11, 895 (1972).
- [6] M. G. Littman and H. J. Metcalf, *Appl. Opt.* Vol 17, 2224 (1978).
- [7] K. W. Kangas, D. D. Lowenthal, and C. H. Muller III, *Opt. Lett.* Vol. 14, 21 (1989).
- [8] D. K. Ko, G. Lim, S. H. Kim, B. H. Cha, and J. Lee, *Opt. Lett.* Vol. 14, 710 (1995).
- [9] A. J. Merriam and G. Y. Yin, *Opt. Lett.* Vol. 14, 1034 (1998).
- [10] *Atoms in Jpn.* 35, October 23 (1991)
- [11] W. C. Martin, R. Zalubas and L. Hagan, *Atomic Energy Levels : the rare Earth elements*, NSRDS-NBS 60 (1978)
- [12] A. A. Radzig, B. M. Smirnov, "Reference Data, on Atoms, Molecules, and Ions", Springer-Verlag, Berlin (1985)
- [13] J. Reader, C. H. Coriiss, W. L. Wiese and G. A. Martin, *Wavelength and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions*, NSRDS-NBS 68 (1980)

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/RR-2174/2001							
제목 / 부제		자외선 영역의 레이저를 이용한 공명 광이온화 분광 연구					
연구책임자 및 부서명		한재민, 양자광학기술개발팀					
연구자 및 부서명		차용호, 이용주, 박현민, 고도경					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소		발행년	2002. 1.	
페이지	66 p.	도표	있음( O ), 없음( )		크기	29.7 Cm.	
참고사항	2001년도 기관 고유 사업						
비밀여부	공개( O ), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류		연구보고서		
연구위탁기관				계약 번호			
초록 (15-20줄내외)							
<p>본 연구에서는 주로 Ti:sapphire 레이저를 펌핑하기 위한 다이오드 펌핑 Nd:YAG 레이저를 개선하고 이 레이저로 펌핑되는 Ti:sapphire 레이저를 설계 제작하였다. AO Q-switch를 이용하여 연속발진 형의 Nd:YAG 레이저를 고반복률의 펄스형으로 만들고, 레이저빔의 quality를 좋게 하기 위하여 cavity 내에 두 개의 헤드를 설치하였다. 레이저빔의 출력과 quality에 큰 영향을 주는 열렌즈 효과, cavity 길이 및 구조를 simulation에 의해 최적화 함으로써 Nd:YAG 레이저의 개선을 완료하였다. 개선 후 5kHz의 반복률에서 30W의 532nm 레이저빔을 발진하는데 성공하였다.</p> <p>또한 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 분광용으로 사용할 Ti:sapphire 레이저를 설계 완료하였다. 레이저 발진을 위한 기초실험으로서 기본적인 파장가변 영역을 조사한 결과 730 - 850 nm의 넓은 영역에서 파장가변이 가능함을 확인할 수 있었다. 분광을 위한 Ti:sapphire 레이저는 선폭이 좁아야 하므로 Grating을 이용한 self-seeding 형식의 파장가변 레이저를 제작할 계획이다.</p>							
주제명키워드 (10단어내외)		Nd:YAG 레이저, AO Q-swth, 열렌즈효과, 사파이어 레이저 공진기, 파장가변레이저, 자기파중, 공명이온화					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No. INIS Subject Code	
KAERI/RR-2174/2001					
Title / Subtitle		Resonance Ionization Spectroscopy using UV (Ultraviolet) laser			
Project Manager and Department		Han, Jae Min (Laboratory for Quatum Optics)			
Researcher and Department		Y.H.Cha, Y.J.Rhee, H.M.Park, D.K.Ko (Lab. for Quatum Optics)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2002. 1.
Page	66 p.	Fig. & Tab.	Yes( O ), No ( )	Size	29.7 Cm.
Note	2001 Institute Basic Project				
Classified	Open( O ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Reserach Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>In this study, Ti:sapphire laser which is pumped by the enhanced Nd:YAG laser using laser diode, was designed and manufactured. The AO Q-switched CW Nd:YAG laser was converted into a high repetition pulse-type laser using the AO Q-switch, and two heads were installed inside the cavity in order to improve the laser beam quality. The Nd:YAG laser enhancement was completed by optimization using a simulation for the cavity length, structure and thermal lens effect that greatly effected the laser beam output and quality. As the result of the enhancement, a 30W laser at 532nm and at 5kHz was successfully made.</p> <p>Also, the Ti:sapphire laser that will be used for atomic spectroscopy which is pumped by the Nd:YAG laser, was completely designed. As a basic experiment for laser oscillation, we measured the tunability of the laser, and it turned out that the wave tunability range was 730 850 nm. A self-seeding type tunable laser using grating for narrow line width, is planned to be designed due to the fact that the Ti:sapphire laser should be of narrow line width for spectroscopy use.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		Nd:YAG Laser, AO Q-switch, Thermal Lens Effect, Ti:Sapphire Laser, Cavity, Tunable Laser, self-seeding, RIS			