

碩士學位論文

LIF 플라즈마 진단을 위한  
고체 색소레이저 제작 및 발진특성 연구

濟州大學校 大學院



金 志 勳

2002年 12月

# LIF 플라즈마 진단을 위한 고체 색소레이저 제작 및 발진 특성 연구

指導教授 李 憲 周

金 志 勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金志勳의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

Study on the Characteristics and Fabrication of  
Solid-state Dye Laser  
for LIF Plasma Diagnostics

Ji-Hun Kim

(supervised by Professor Heon-Ju Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY  
ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2002. 12

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vi
SUMMARY .....	vii
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. 레이저 유발 형광 분석(LIF) .....	3
2. 고체 색소레이저 (Solid state dye laser) .....	4
3. 고체 색소레이저를 이용한 LIF 플라즈마 진단 .....	6
4. 고체 색소 썬의 제작 방법 .....	7
1) Copolex NK-55를 이용한 고체 색소 썬 제작 .....	7
2) Sol-gel glass를 이용한 방법 .....	7
3) PMMA를 이용한 고체 색소 썬 제작 방법 .....	10
III. 실험장치 및 실험방법 .....	13
1. 고체 색소 썬 제작 .....	13
1) MMA의 중합반응(Polymerization) .....	15
2) 주 경화 단계 .....	19
3) 최종 경화 단계 .....	19
2. 고체 색소레이저의 특성 조사 .....	20

1) 흡광도(Absorbance) 측정 .....	20
2) 간섭광 측정에 의한 고체 색소 켈의 품질 조사 실험 .....	21
3) 고체 색소레이저의 발진 특성 실험 I (Tuning 전) .....	22
4) 고체 색소레이저의 발진 특성 실험 II (Tuning 후) .....	22
5) 고체 색소레이저의 Pulse 특성 실험 .....	23
6) 고체 색소레이저의 Power 측정 실험 .....	25
7) 펌핑레이저에 의한 고체 색소 켈의 손상 실험 .....	26

#### IV. 실험결과 및 고찰 .....

<b>1. 고체 색소 켈의 제작</b> .....	27
<b>2. 고체 색소레이저의 특성 조사</b> .....	28
1) 흡광도(Absorbance) 측정 .....	28
2) 간섭광 측정에 의한 고체 색소 켈의 품질 조사 실험 .....	37
3) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험 I (Tuning 전) .....	39
4) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험 II (Tuning 후) .....	41
5) 고체 색소레이저의 Pulse 특성 실험 .....	45
6) 고체 색소레이저의 Power 측정 실험 .....	46
7) 펌핑레이저에 의한 고체 색소 켈의 손상 실험 .....	48

#### VI. 결 론 .....

#### 참 고 문 헌 .....

# LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	States of matter plotted in coordinates of temperature T and density n. ....	1
Fig. 2-1	Schematic diagram of an apparatus for laser Raman spectroscopy. ....	3
Fig. 2-2	Arrangement for LIF spectroscopy .....	4
Fig. 2-3	Concept of LIF plasma diagnostics using a solid-state dye laser. ....	6
Fig. 2-4	Method of Copolex NK-55. ....	8
Fig. 2-5	Hydrolysis of TMOS and water. ....	9
Fig. 2-6	Condensation reaction of Si(OH) <sub>4</sub> . ....	9
Fig. 2-7	Poly-condensation reaction of Si(OH) <sub>4</sub> . ....	10
Fig. 2-8(a), (b)	Free radical reaction process of PMMA. ....	11
Fig. 2-8(c)	Free radical reaction process of PMMA. ....	12
Fig. 3-1	Schematic of a caster for solid-state dye cell fabrication. ....	14
Fig. 3-2	A thermostat. ....	16
Fig. 3-3	MMA polymerization in a thermostat. ....	16
Fig. 3-4	Fabrication process of solid-state dye cell by PMMA method. ....	18
Fig. 3-5	Main hardening process of solid-state dye solution. ....	19
Fig. 3-6	Principle of absorbance measurement. ....	20
Fig. 3-7	Experimental concept of homogeneity by scattering and interference. ....	21
Fig. 3-8	Emitting of a solid-state dye lasers. ....	22
Fig. 3-9	Littman oscillator type of longitudinal pumping. ....	23
Fig. 3-10	Measurement of lasing power using a pulse-meter. ....	24
Fig. 3-11	Emitting power measurement of the solid-state dye laser. ....	24

Fig. 3-12	Emitting pulse measurement of the solid-state dye laser. ....	25
Fig. 3-13	Concept of solid-state dye cell's measuring damage. ....	26
Fig. 4-1	Solid-state dye cell of fabricate a using various dyes. ....	27
Fig. 4-2	Measurement of DCM's absorbance classified by thickness. ....	30
Fig. 4-3	Measurement of DCM's absorbance classified by concentration. ..	30
Fig. 4-4	Measurement of DODC Iodide's absorbance classified by thickness. ....	31
Fig. 4-5	Measurement of DODC Iodide's absorbance classified by concentration. ....	31
Fig. 4-6	Measurement of LDS 698's absorbance classified by thickness. ...	32
Fig. 4-7	Measurement of LDS 698's absorbance classified by concentration. ....	32
Fig. 4-8	Measurement of Rhodamine 640 Perchlorate's absorbance classified by thickness. ....	33
Fig. 4-9	Measurement of Rhodamine 640 Perchlorate's absorbance classified by concentrations. ....	33
Fig. 4-10	Measurement of Cresyl Violet Perchlorate's absorbance classified by thickness. ....	34
Fig. 4-11	Measurement of Cresyl Violet Perchlorate's absorbance classified by concentration. ....	34
Fig. 4-12	Measurement of Oxasine 720's absorbance classified by thickness. ....	35
Fig. 4-13	Measurement of Oxasine 720's absorbance classified by concentration. ....	35
Fig. 4-14	Space distribution after He-Ne laser permeate solid-state dye cell due to scattering and interference (Rhodamine 640). ....	37
Fig. 4-15	Space distribution after He-Ne laser permeated solid-state dye cell due to scattering and interference (DODC Iodide). ....	38

Fig. 4-16	Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic (Cresyl Violet Perchlorate). .....	39
Fig. 4-17	Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic (DCM Mutagenic). .....	40
Fig. 4-18	Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic (LDS 698). .....	40
Fig. 4-19	Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic (Rhodamine 640 Perchlorate). .....	41
Fig. 4-20	Emitting spectrum measurement of Solid-state dye laser. ....	42
Fig. 4-21	Comparison of solid-state dye laser's characteristics with and without oscillator (LDS 698). .....	42
Fig. 4-22	Comparison of solid-state dye laser's characteristic with and without oscillator (DCM). .....	43
Fig. 4-23	Comparison of solid-state dye laser's characteristics with and without oscillator (Rhodamine 640 Perchlorate). .....	43
Fig. 4-24	Emitting of a solid-state dye lasers in a oscillator I. ....	44
Fig. 4-25	Emitting of a solid-state dye lasers in a oscillator II. ....	44
Fig. 4-26	Emitting pulse measurement of the solid-state dye laser. ....	45
Fig. 4-27	Pulse measurement of solid-state dye laser by pumping laser. ...	45
Fig. 4-28	Emitting power measurement of the solid-state dye laser. ....	46
Fig. 4-29	Power measurement of solid-state dye laser by pumping laser. ..	46
Fig. 4-30	Damaged part of solid-dye cell by pumping laser. ....	48



## LIST OF TABLES

Table 3-1	Data of liquid-state dye cell. ....	13
Table 4-1	Measurement results of each dye's absorbance at 532nm. ....	29
Table 4-2	Wavelength measurement results at peak of intensity. ....	36
Table 4-3	Data of solid-state dye laser's power measurement. ....	47
Table 4-4	LDS 698 Solid-state dye laser's power measurement and efficiency. ....	47



## SUMMARY

Plasma diagnostics is very important for plasma control. As Langmuir probe of classical method is difficult to apply to the high temperature plasma, method of spectroscopy particle beam in high temperature plasma is employed. Spectroscopy is a method of plasma diagnostics that measured radiation spectrum emitted from plasma.

LIF(Laser Induced Fluorescence) plasma diagnostics uses spectroscopy method. This technique employs a laser (usually a tunable dye laser) to excite a resonance between a lower and an excited electronic state. Continuously tunable dye lasers are pumped by  $N_2$  lasers, Nd-YAG lasers, excimer lasers, and flash lamp for pulsed output. In this study, dye lasers are pumped by Nd-YAG laser which constitutes the most common tunable pulsed sources.

The most widely used tunable lasers are dye lasers based on liquid solutions which can offer wide tuning range and high efficiency. However, due to the dye degradation, heating, and triplet-state formation, dye laser solutions have to be flowed through the laser cavity to maintain constant gain and beam quality. This requires bulky dye-flow system and reservoirs, which requires large quantities of often flammable and toxic solvent to dissolve dye. So liquid-state dye laser is very huge and expensive.

Thus a solid-state dye cell was fabricated with PMMA by free radical initiation process, free radical propagation process, and termination of chain reaction. In fabrication process, water bath temperature is kept constant. Cells of different thicknesses, concentration are moulded. The solid-dye laser is very compact, handy, and versatile. Absorbance measurements were made for the solid-state dye cells such as LDS 698, DODC Iodide, Oxasine 720, Cresyl Violet, Rhodamine 640, and DCM. Most dyes show high degree of absorbances. Especially LDS 698, DCM,

Rhodamine 640 have shown higher absorbance than the others. Various kinds of solid-dye laser oscillators have been designed and constructed for tuning. The solid-state dye cell pumped by laser emits a tuned laser. In these experiments, most of dyes emit the lasers with wavelength of 590–660nm. Rhodamine 640, DCM, LDS 698, Cresyl Violet emit the lasers whose respective wavelengths are 610–630nm, 590–610nm, 635–660nm, and 635–650nm. The power of solid-state dye lasers with an oscillator is higher than that without an oscillator. It ranges about between 0.5mW and 4mW, and the solid-state dye laser's conversion efficiency is between 0.25% and 1.43%. Results of pulse measurement for solid-state dye laser show its band-width of 10ns, and its amplitude of about 4 Volts. LDS 698 deems appropriate for the LIF plasma diagnostics for H- $\alpha$  line (656.3nm).

The goal of this study is to develop a new tunable laser system for LIF plasma diagnostics. It could be reached by employing more sophisticated fabrication technologies of solid-state dye laser.



# I. 서론

현재 전 세계적으로 에너지 문제가 이슈화되고 있다. 기존에 사용하던 화석연료는 지구 온난화 등의 많은 문제점이 노출되어 사용을 규제하고 있고, 핵분열을 이용한 원자력 에너지는 방사성 폐기물 등으로 인해 반핵 단체로부터 압력을 받고 있는 실정이다. 이런 에너지원들에 대한 대체에너지로 연구되어지고 있는 태양열, 풍력, 연료전지 등은 밀도가 낮아 인류가 사용할 만한 에너지원으로 제공되지 못하고 있다. 이런 여러 상황에서 핵융합 발전은 "꿈의 에너지"라 할 수 있을 것이다. 지금의 기술 수준이 경제성을 뛰어넘지는 못하고 있지만 수 십 년 내에 인류의 주 에너지원이 될 것이라고 확언한다. 이에 발맞춰 유럽, 일본, 미국 등 여러 나라에서 많은 재원을 쏟아 붓고 있으며 우리나라에서도 기초과학지원연구원에 한빛 토카막 장치를 만들어 핵융합을 실현하기 위한 연구가 한창 진행 중에 있다.

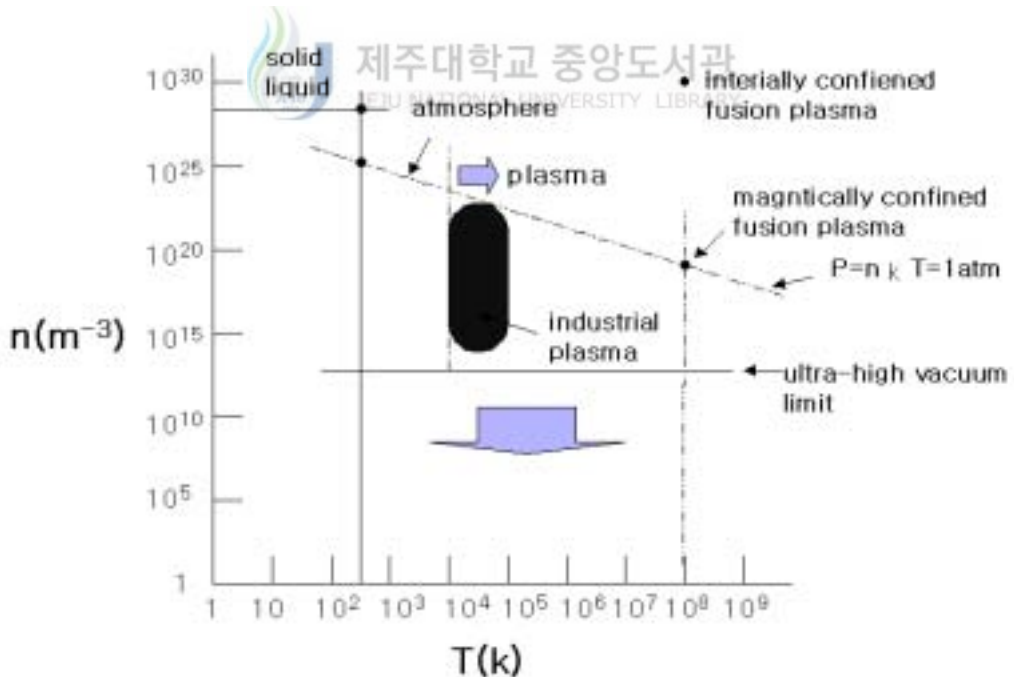


Fig. 1-1 States of matter plotted in coordinate of temperature  $T$  and density  $n$ .

핵융합에서 플라즈마의 진단은 아주 중요한 문제이고 핵융합장치를 만들어 운영하기 위해서는 플라즈마의 진단이 필수적이다. 물론 반도체 공정 등의 산업공정에서도 플라즈마의 밀도, 온도 등이 생산성과 품질에 지대한 영향을 미치므로 플라즈마를 진단한다는 것은 아주 중요한 일일뿐만 아니라, 밀도, 온도 등 플라즈마의 특성 조사는 플라즈마의 안정성, 제어 등에 필수적이다.

플라즈마의 진단에는 탐침법과 분광분석법 등이 있다. 그런데 고온 플라즈마에 있어서는 전통적인 탐침법을 적용하기 힘들어 분광학적인 방법이나 입자 빔을 이용한 진단이 이루어지고 있다. 분광학적 방법은 플라즈마에서 방출되는 방사선들의 분광 분석에 의하여 플라즈마의 특성을 측정하는 방법인데, 이 가운데 레이저 유발 형광(Laser Induced Fluorescence : LIF) 분석은 여러 종류의 이온 뿐만 아니라 중성종들의 밀도와 온도 그리고 여기상태의 특성을 알 수 있다는 장점을 지니고 있어 활발한 연구의 대상이 되고 있다. LIF를 수행하기 위해서는 각 이온이나 중성종의 흡수스펙트럼에 해당하는 파장의 레이저가 필요하다. 특히 넓은 파장가변영역을 갖는 것이 요구되는데, 색소 레이저가 일반적으로 쓰이고 있다. 그러나 색소 레이저는 순환장치와 냉각장치 등이 필요하여 장치가 복잡하고 대형화하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Ti:Sapphire 등 파장 가변 고체 색소 레이저가 개발되어 장치의 소형화를 이루었다. 최근 미국 등에서 플라스틱 등 고체에 색소를 첨가하여 고체색소를 만드는 연구가 이루어지고 있다. 고체 색소는 기존의 색소가 가지는 넓은 파장 가변영역을 지니고 있으면서 장치가 간편하고 저렴하게 제작할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 파장가변형인 고체 색소 셀을 제작하고, 제작한 고체 색소레이저를 발진하여 발진특성을 조사하여 LIF 플라즈마 진단 연구에 필요한 지식을 습득하고자 하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 레이저 유발 형광분석(LIF)

레이저 유발 형광분석(LIF)은 플라즈마의 주요 파라미터인 밀도, 온도, 핵종의 종류 등을 알 수 있는 간접적인 플라즈마 진단법으로, 직접 측정하는 Langmuir probe에 비해 고온 플라즈마에 적용이 가능한 장점이 있다. 이 방법은 플라즈마 안에 레이저를 입사시켜 핵종이 여기상태에서 기저 상태로 떨어지면서 발생하는 형광을 분광하여 측정하는 방법이다.

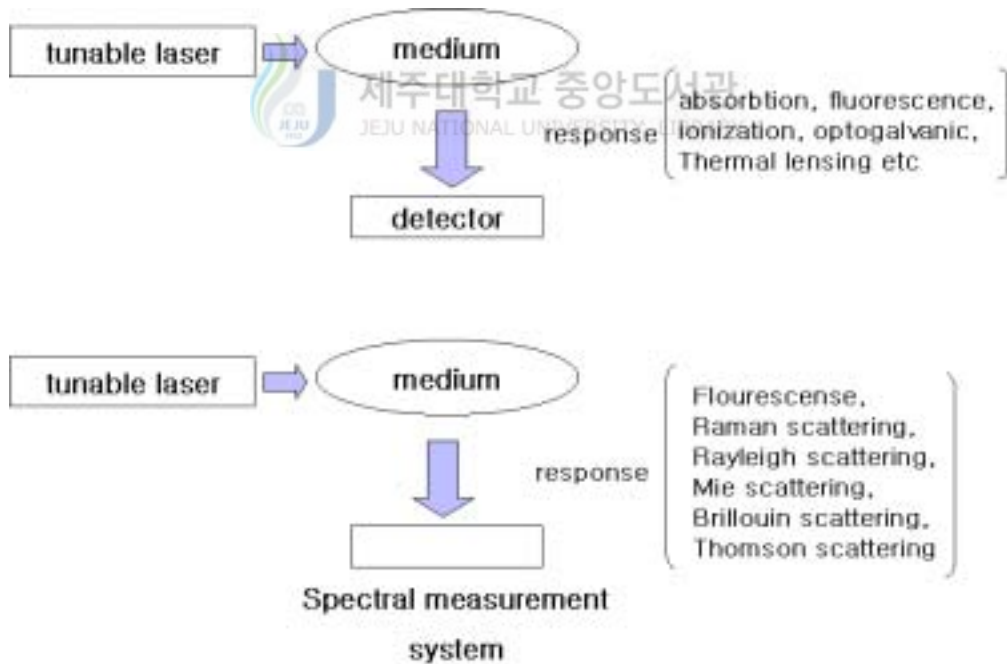


Fig. 2-1 Schematic diagram of an apparatus for laser Raman spectroscopy.

각 핵종마다 흡수하는 Spectrum이 다르고 핵종마다 나오는 에너지도 다르다. 핵종마다 흡수 Spectrum이 다르기 때문에 파장 가변형인 Dye laser를 이용해야한다. 그러므로 방출하는 Radiation의 Spectrum이 다른 점을 이용하면 플라즈마를 구성하는 핵종의 종류를 알 수 있는 장점이 있다.

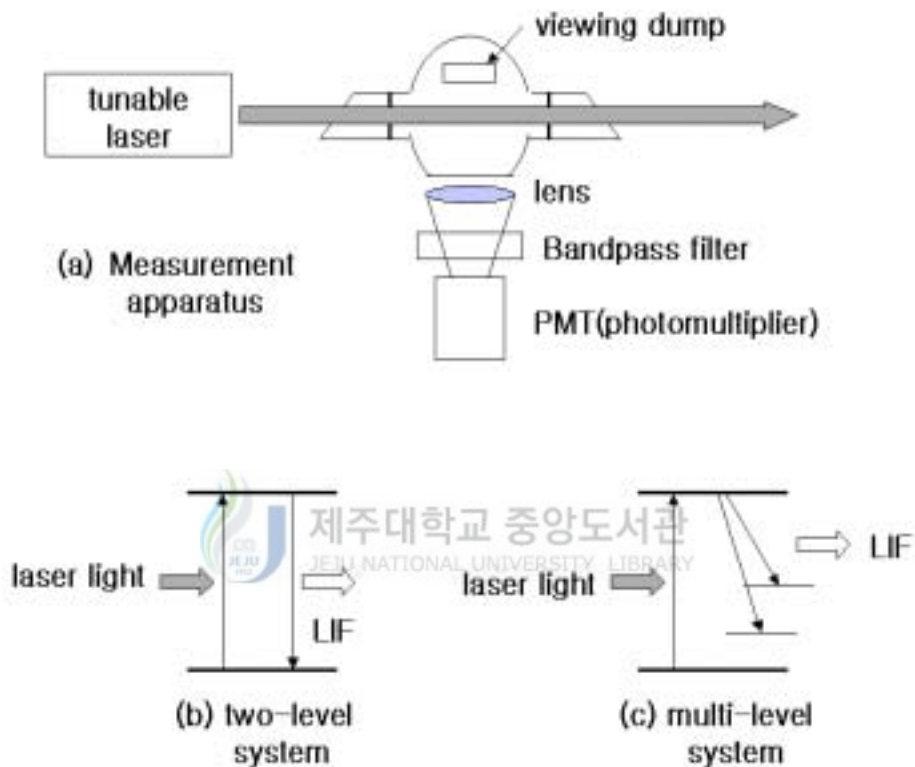


Fig. 2-2 Arrangement for LIF spectroscopy.

## 2. 고체 색소레이저 (Solid-state dye laser)

1960년에 개발된 레이저는 40년의 역사동안 실로 다양한 분야에 파급되어 현재는 가정과 산업전분야에 걸쳐 이용되고 있다. 이런 레이저는 단일 파장만을 얻을 수 있는 반면, 고체 색소레이저의 개발은 기존의 레이저가 단일 파장만을 얻을 수 있었던 단점을 극복하여 가변파장 레이저로 분광학 연구를 비롯한 과학 기술의 많은 분야의 발전에

큰 기여를 하였다. 파장 가변의 색소레이저는 자외선 영역에서 근적외선 영역까지 매우 광범위하여 원자 분광학 연구, 원격 대기오염, 환경감시용으로 사용되는 LIDAR 시스템, 암 치료 등의 의료용 레이저 치료기 등에도 사용되고 있다. 파장 가변형의 색소레이저를 이용한 LIF 플라즈마 진단법 등에도 많은 매력이 있다.

일반적으로 하나의 색소에서 얻을 수 있는 파장가변영역은 약 수십 nm 정도이다. 따라서 이 영역을 벗어난 다른 영역의 파장을 필요로 할 경우에는 그에 적당한 색소를 교환하여 사용하게 된다. 현재까지 일반적으로 사용되고 있는 색소 레이저에서는 알콜과 같은 용매에 색소를 녹이고 색소 순환기를 이용하여 색소 용액을 색소 셀에 흐르게 하여 사용하고 있다. 이와 같은 액체 색소레이저에는 순환방식에서 색소를 교환해야 할 경우 색소용기, 필터, 순환펌프, 튜브 및 색소 셀 등을 세척하여 사용하여야하므로 많은 불편을 가지게 되고, 액체의 순환으로 발생할 수 있는 진동 및 유체의 불균일한 흐름은 안정적인 레이저 발진의 장애요소가 된다. 또한 시스템을 구성할 때 광학 부품 외에도 순환기 시스템이 첨가됨으로써 시스템의 소형화도 이를 수 있는 장점이 있다.

고체 색소레이저의 연구는 1967년 B. H. Soffer와 B. B. McFarland에 의해 처음 시도되었다. Polymethylmethacrylate(PMMA)에 Rh-6G 색소를 첨가하여 고체 상태의 이득 매질에서 Nd 레이저의 제2조화파로 펄핑하여 반사경으로서 회절격자를 이용하여 레이저 발진 실험을 하였다. 이는 액체 상태의 색소 레이저에서와 같은 결과를 보여주었다. 1968년 O. G. Peterson과 B. B. Snavelys는 PMMA에 Rhodamine 색소를 첨가하여 레이저 봉(laser rod)형식으로 만들고 Flash lamp로 pumping하여 발진 시켰다. 1985년 D. A. Gromov는 Xanthene 계열 색소(Rhodamine 6G chloride, Rhodamine 6G perchlorate, dye 11B)들을 MPMMA(Modified PMMA) 고분자 임자(Polymer host)에 첨가하였다. 거기서 MMA와 에탄올의 혼합 비율에 따른 변화효율(Conversion efficiency), 레이저 손상 문턱(Laser damage threshold)과 광표백(Photobleaching)에 관한 메카니즘을 설명하였다.



### 3. 고체 색소레이저를 이용한 LIF 플라즈마 진단

LIF(Laser Induced Fluorescence)를 수행하기 위해서 각 이온이나 중성종의 흡수 Spectrum에 해당하는 파장의 레이저가 필요하다. 그래서 LIF 플라즈마 진단에서 가장 중요한 것은 각 핵종이 갖는 흡수 Spectrum을 갖는 레이저를 얻기 위해 Tunable laser 인 고체 색소레이저를 이용하게 된다. 이러한 레이저로는 넓은 파장 가변영역을 갖는 파장가변형의 것이 요구되는데, 색소 레이저가 일반적으로 쓰이고 있다. 그러나 일반 액체 색소 레이저는 순환장치와 냉각장치 등이 필요하여 장치가 복잡하고 대형화하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 고체 색소레이저에 대한 연구가 진행되어 왔다. 고체 색소레이저는 자체적으로 레이저 발진이 되지 않기 때문에 Pumping Laser를 이용하여 레이저 발진을 시킬 수가 있다. 그러므로 고체 색소 썬의 제작에는 펌핑레이저의 파장에서 높은 흡광도를 갖는 것이 중요하며 발진된 레이저의 파장이 LIF 플라즈마 진단에 필요한 파장에서 높은 값을 갖는 것이 중요하다. 그 이유는 플라즈마를 구성하는 이온이나 중성종이 레이저의 에너지를 흡수하여 여기 상태에 갔다가 기저 상태로 떨어 지면서 방출하는 여러 파장대의 Photon을 분석하여 진단하는 방법이기 때문이다. 그러나 플라즈마를 구성하는 이온이나 중성 종의 흡수하는 spectrum이 다르기 때문에 가변 파장을 갖는 레이저가 필요하다.

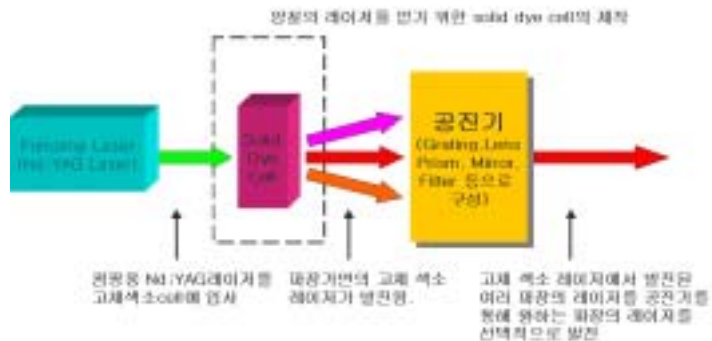


Fig. 2-3 Concept of LIF plasma diagnostics using a solid-state dye laser.

#### 4. 고체 색소 썬의 제작 방법

고체 색소레이저의 제작방법에는 여러 가지가 있다. 이런 대부분의 방법은 용매에 dye를 혼합하여 증탕하고 경화 단계를 거치는 방법으로서 Copolex NK-55를 이용한 제작, PMMA를 이용한 제작, Sol-gel glass를 이용한 제작 등이 있다.

##### 1) Copolex NK-55를 이용한 고체 색소 썬 제작

Copolex NK-55는 플라스틱 렌즈의 원료로 사용되는 열 경화성 플라스틱의 원료가 되는 물질이다. 초기에는 액체 상태로 존재하지만 열이 가해지면 중합반응을 통해 고체 상태가 된다.

고굴절 Copolex NK-55는 플라스틱 렌즈의 원료이다. 고체로 변환되는 제작 과정은 그림과 같이 촉매제 IPP 27%와 순수 단위체(Monomer) 63%인 소 중합체(Oligomer) 액체를 준비하고 이를 순수 단위체 액체에 3.2%정도 섞어 골고루 희석한 뒤 UV 차단체를 첨가하여 촉매제의 농도가 낮은 소 중합체를 준비한다. 40℃에서 10~20분 정도 가열하고 난 뒤 다시 28℃로 온도를 내려준다. 이렇게 하면 약간의 점도가 있는 액체 상태로 변화하여 기본적인 소중합체 액체의 준비가 이루어지고 여기에 레이저 색소를 희석하는 과정이 첨가되면 고체 색소 썬을 제작하는 원료준비가 된 것이다. 레이저 색소는 분말 형태로 되어있어서 소량의 알콜에 녹여 소중합체 액체와 희석하게 된다.

##### 2) Sol-gel glass를 이용한 방법

고체 상태 색소레이저를 만드는 두 번째 방법으로는 무기물질을 고체화 임자 물질로 사용하는 경우이다. 무기물질로서 투명성을 지니면서 단단한 경도를 유지하는 대표적인 것이 유리(Glass)인데 유리의 주재료는 규소라는 실리콘 계열의 무기물질이다. 이처럼 유리와 같은 광학적 특성이 좋은 물질을 이용하여 레이저 이득 매질로서 사용하면 레이저 발진 시 우수한 광특성을 지니게 된다. 그러나 유리의 제작에서 사용되는 방법을 이용하여 고체 색소 썬을 제작할 수는 없다. 왜냐하면 무기물질을 고체화하려면 무기물질의 원재료를 용융(Fusion)시켜야 하는데 이런 경우에 용융 온도가 매우 높다. 이러한

경우에 무기 물질에 색소 레이저 색소를 첨가하여 고체화하려면 용융 온도보다 훨씬 낮은 온도에서 제작 되어야한다. 이를 위하여 사용되는 기술이 졸-겔 기술(sol-gel technique)이고 이렇게 하여 제작되는 시편들로서는 졸-겔 유리(sol-gel glass) 등이 있다.

무기물질이 졸-겔이 되는 메카니즘은 가수분해(hydrolysis)와 다중축합반응(Polycondensation reaction)으로 설명될 수 있다. 이러한 메카니즘으로 졸-겔이 되는 선구물질(Precursor)로서 Tetrameth-oxysilane과 Tetraethoxysilane 등이 있다. TMOS와 TEOS는 그림에서와 같이 분자 구조식으로 보면 Silicon 원자 주위에 메틸기 또는 에틸기가 결합되어 있는 구조이다.

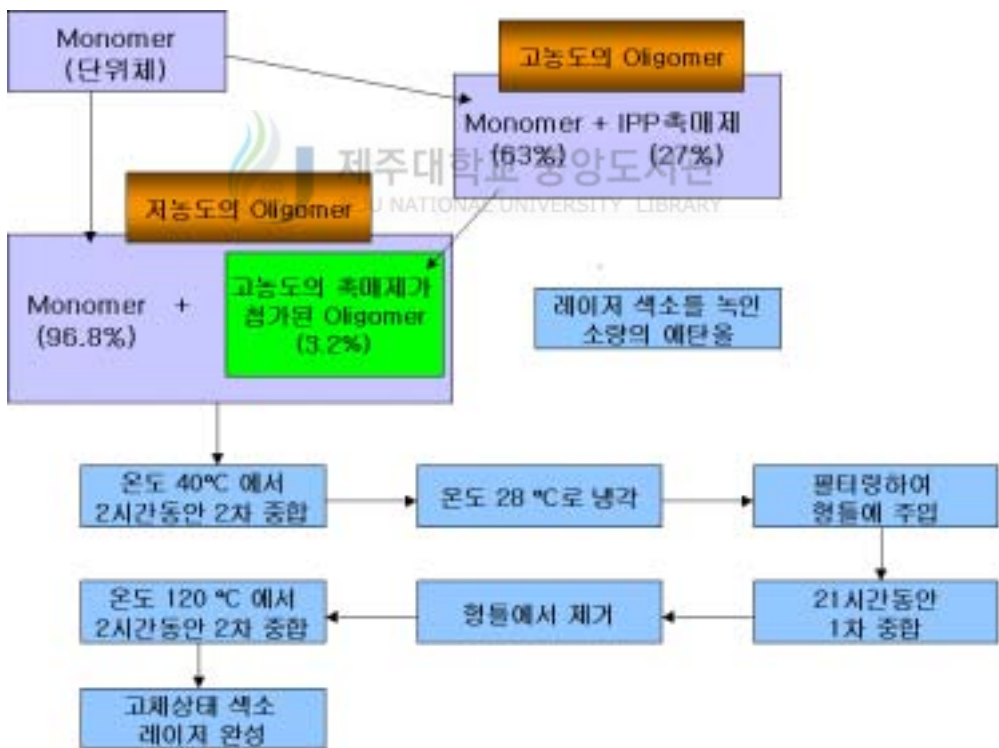


Fig. 2-4 Method of Coplex NK-55.

이들 중에 TMOS의 경우에 대하여 설명하면 그림과 같이 이루어져 또 하나의 물을 첨가하여 가수분해 반응을 일으키면 4( CH<sub>3</sub>OH )를 생성한다. 이때 두 개의 Si(OH)<sub>4</sub> 분자의 축합 반응처럼 축합 반응이 다중으로 반응하게 되면 그림과 같이 네트워크 구조를 갖게 된다. 졸-겔이 되는 분위기 온도는 대개 60℃ 정도에서 유지되며 조건에 따라서 다소 변화가 있다. 이렇게 고체화된 비 결정 물질은 아주 고운 입자의 모공(Pore)을 갖는 고체 색소 쉘로 완성되며 이를 광학적으로 면 가공을 하여 사용한다. 실리카 겔의 입자 물질을 사용하면 광 안정성(Photostability)면에서 PMMA보다 좋은 것으로 보고되고 있다.

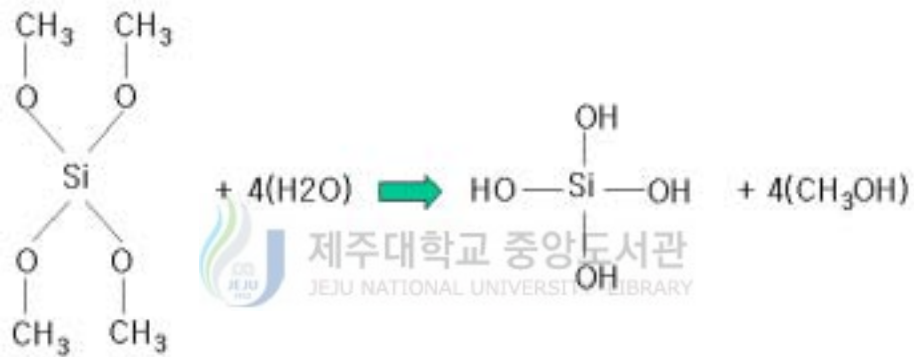


Fig. 2-5 Hydrolysis of TMOS and water.

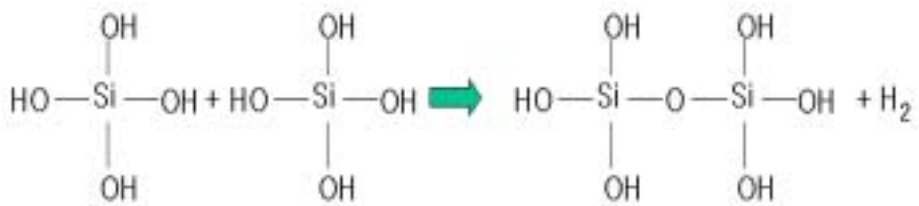


Fig. 2-6 Condensation reaction of Si(OH)<sub>4</sub>.

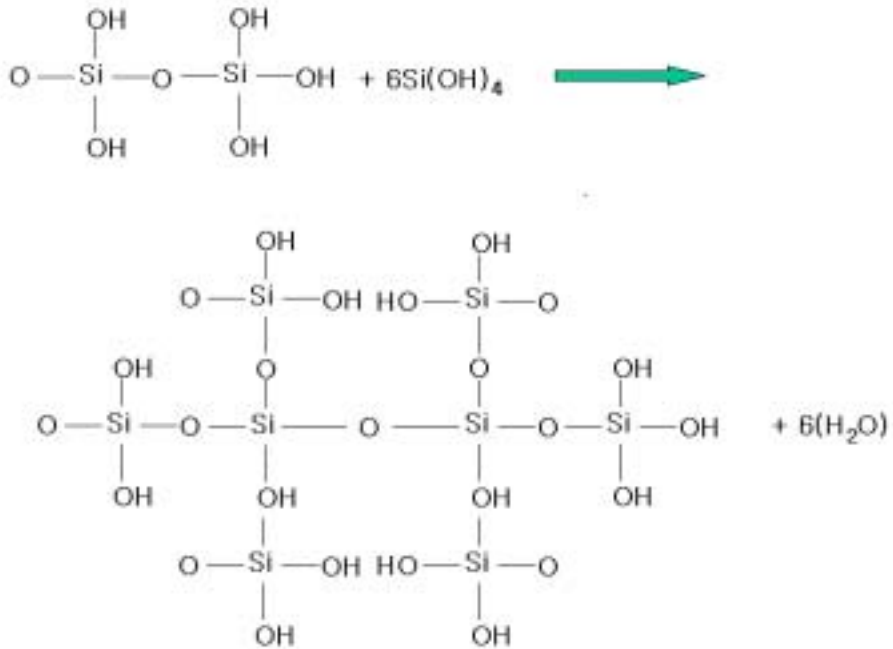


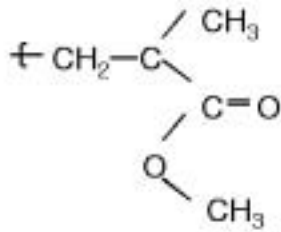
Fig. 2-7 Poly-condensation reaction of Si(OH)4.



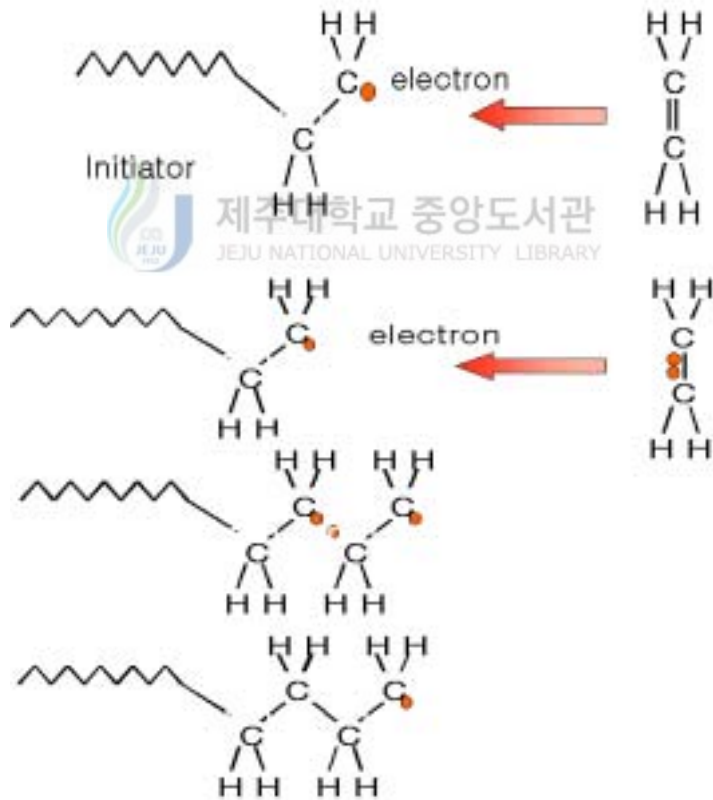
### 3) PMMA를 이용한 고체 색소 셀 제작 방법

레이저 색소가 첨가된 고체 상태 폴리머 호스트 PMMA의 제작과정은 그림과 같이 Free Radical 반응 과정에서 열처리에 의해 진행된다. 기초 경화 단계는 완전한 액체 상태를 점도가 있는 액체 상태의 MMA 모노머를 100℃까지 온도를 올리면서 서서히 교반 하여 준 뒤 다시 소량의 MMA를 주입하여 모노모가 끓는 것을 막고 80℃정도까지 유지한다. 다시 온도를 90-95℃를 유지하면서 점도를 유지한다. 이 과정을 반복하여 제법 점도가 있는 액체 상태를 유지하여준 뒤 60℃까지 온도를 내려주어야 한다. 주의 사항은 공기중의 10%이상 MMA의 가스가 분출될 경우 불꽃 발생 시에 화재의 위험이 있다는 점이다. 따라서 공기의 순환이 잘 이루어지는 곳에서 하여야 한다. 경화제 (AIBN), 이형제 및 색소의 첨가 단계에서 색소 혼합액을 형틀에 주입한다. 중탕하듯이 물 속 수온이 45-50℃를 유지하여준다. 자체 중합과정에서 열이 발생하므로 온도의 유지가 매우 중요하며 이때 표면의 거칠기 미 공기 입자의 발생률이 좌우된다. 48℃이하의 온도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 약 10시간이 지나면 거의 고체 상태로 전환된

다. 그리고 경화 상태는 경도를 높이는 단계로써 PMMA를 95°C에서 2시간 동안 유지하여주는 열처리 과정을 거치면 완전히 고체 색소레이저가 된다.

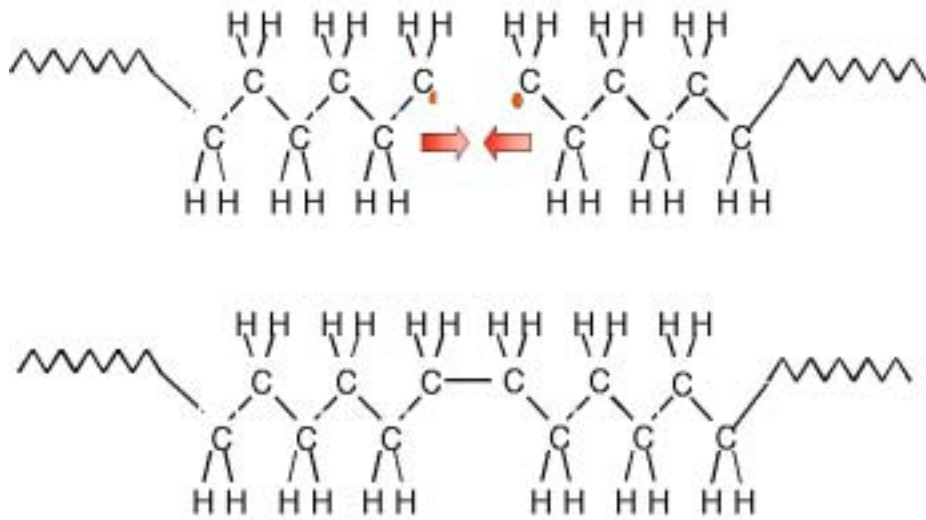


(a) Methyl methacrylate



(b) Free radical propagation

Fig. 2-8 (a), (b) Free radical reaction process in PMMA.



(c) Termination reaction

Fig. 2-8 (a) Free radical reaction process in PMMA.

LIF 플라즈마 진단에서는 우리가 얻고자 하는 파장의 레이저를 얻는 것이 가장 중요하다. 그 이유는 플라즈마를 구성하는 이온이나 중성종이 레이저의 에너지를 흡수하여 여기 상태에 갔다가 기저 상태로 떨어지면서 방출하는 여러 파장대의 Photon을 분석하여 진단하는 방법이기 때문이다. 그러나 플라즈마를 구성하는 이온이나 중성 종의 흡수하는 Spectrum이 다르기 때문에 이에 맞는 파장을 갖는 레이저가 필요하다. 그러기 위해 파장가변인 고체 색소레이저를 Nd:YAG레이저를 이용하여 펌핑하고, 공진기를 설계하여 원하는 파장대의 레이저를 얻고, 얻어진 레이저를 플라즈마에 입사시켜 LIF 플라즈마 진단에 응용이 가능하게 된다.

### III. 실험장치 및 실험방법

#### 1. 고체 색소레이저 제작

본 연구에서는 앞에서 설명했던 방법 중 PMMA법을 이용하여 고체 색소레이저를 제작하였다. 레이저 제작을 위해 Fig. 3-1에서 보여진 Caster를 직접 제작하였다.

Table 3-1 Data of liquid-state dye cell.

Dye (분자량)	Solvents	Pumping Laser	Absorbion Wavelength (nm)	Lasing Wavelength (nm)	Concentration (mol/liter)
Oxasine 720 (431.87)	Ethanol	Nd:YAG 2nd harmonic	620	671(613~708)	$4 \times 10^{-4}$
Cresyl Violet 720 (361.74)	Methanol	Nd:YAG 2nd harmonic	594	637(620~660)	$2 \times 10^{-4}$
DODC Iodide (486.45)	Methanol	Nd:YAG 2nd harmonic	582	648(623~671)	$2 \times 10^{-4}$
DCM (303.37)	Methanol	Nd:YAG 2nd harmonic	481	606(594~630)	$5.5 \times 10^{-4}$
LDS 698 (378.86)	Methanol	Nd:YAG 2nd harmonic	476	671(693~740)	$2 \times 10^{-4}$
Rhodamine 640 (591.05)	Methanol	Nd:YAG 2nd harmonic	576	613(605~630)	$3.6 \times 10^{-4}$



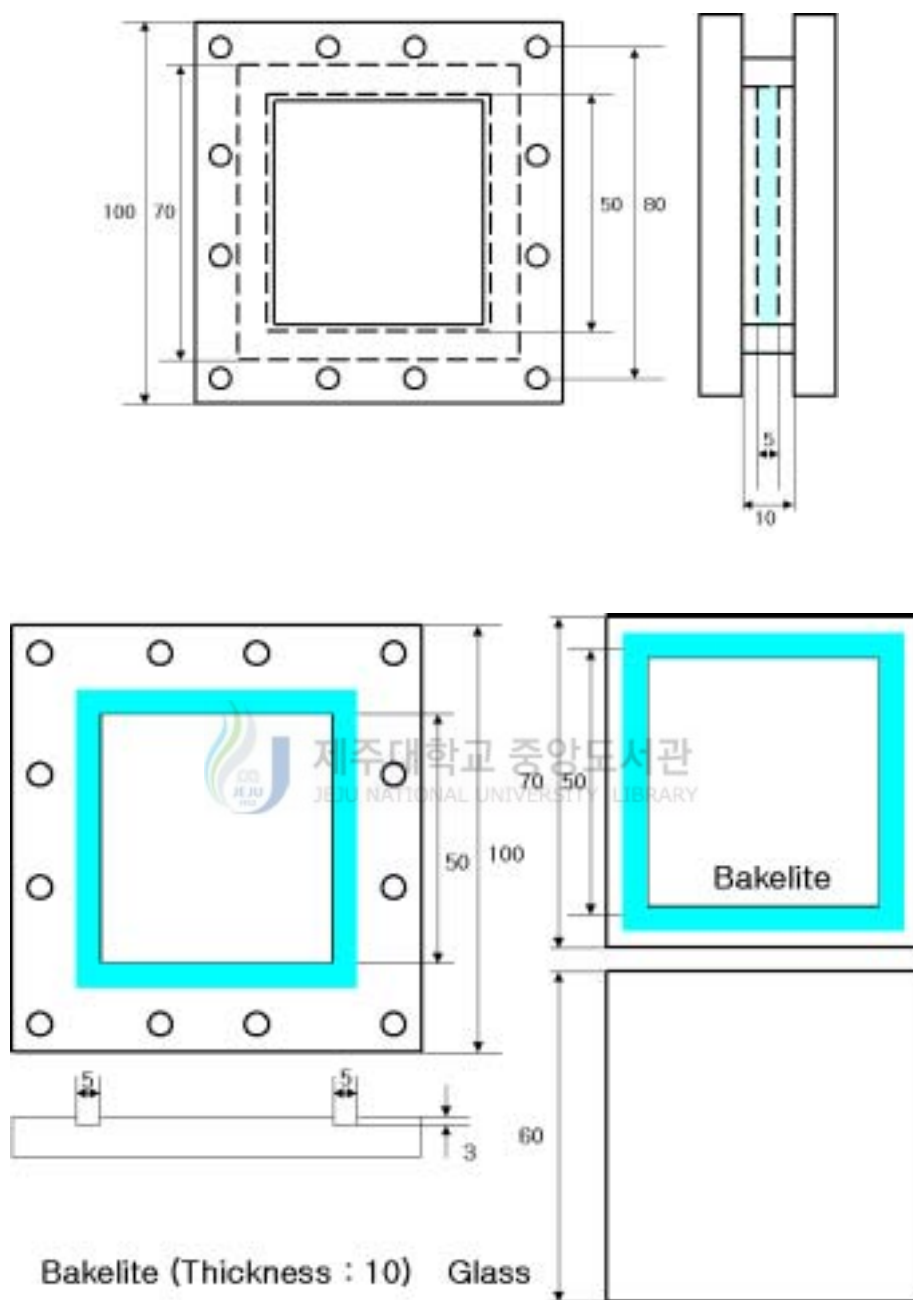


Fig. 3-1 Schematic of a caster for solid-state dye cell fabrication.

## 1) MMA의 중합반응(Polymerization)

고체상태색소(Solid-state dye)를 제작하는 하나의 방법으로서 유기물질(Organic material)을 고체화하여 입자물질(Solidified host material)로 사용하는 경우가 있다. 이러한 경우에는 탄소-탄소의 공유결합(Covalent bond)을 갖는 작은 자유 라디칼(Free radical)분자들로부터 중합체(Polymer)가 형성된다. 여기서 자유 라디칼이란 용어는 다른 전자와 한 쌍을 이루고 있지 않은 전자를 적어도 한 개 이상 가지고 있는 원자나 분자 단위를 말한다. 대부분의 합성 중합체(Synthetic polymer)는 자유 라디칼을 형성하는 화합물들이 합성되는 과정을 통하여 이루어진다. 이 중합체 과정은 액체 상태에서 시작되어 고체로 전환된다.

PMMA(Poly-MethylMethAcrylate)는 MMA의 모노머(Monomer)로부터 자유 라디칼 중합반응을 통하여 중합체가 된 것을 말한다. 모노머란 같은 형태의 다른 분자와 화학적으로 연결하여 결합될 수 있는 하나의 작은 분자를 말한다. 화학식으로는  $C_5H_8O_2$ 인 MMA는 액체 상태로 존재하는 무색의 모노머이다. 몰 당 분자량 M은 100.12g/mol이며 부피로 보면 1 liter = 0.94kg이다. 녹는점과 끓는점의 온도는 각각 섭씨  $-48^{\circ}C$ 와  $100^{\circ}C$ 이다. 섬광온도(flash point)는  $8^{\circ}C$  정도이다. 굴절율은 상온  $20^{\circ}C$ 에서  $n=1.414$ 이다. 이 액체의 특성은 무색이지만 자극성이 있고 고 휘발성으로서 공기중의 분포가 약 10%(Explosive limit : 12.5%)의 함유율 이상일 때 폭발 위험성을 가지고 있다. 그래서 고체 색소 cell을 제작할 때 환풍을 시켜야함을 주의하고 가능한 후드를 사용하여 제작하는 것이 바람직하다.

폴리머가 만들어지는 중합반응의 전과정은 개시제(Initiator)라 하는 분자물질로부터 시작된다. 자유 라디칼 중합반응에 사용되는 개시제는 여러 종류가 있지만 본 연구에서는  $AzO$ 화합물 계열인 AIBN(2'-2'-AzO-bis-isobutyronitrile)를 사용하였다.

AIBN 개시제는 온도  $40^{\circ}C$  이상의 열을 가해주면 Isobutyronitrile 부분에 있는 탄소 공유 결합이 끊어지면서 질소를 발생시키게 되는데 이 때 개시제 AIBN은 두 조각의 라디칼로 변화한다.



Fig. 3-2 The thermostat.



Fig. 3-3 MMA polymerization in a thermostat.

이러한 AIBN의 라디칼들이 액체 상태의 MMA 모노머들과 만나면 중합반응을 일으켜 자유 라디칼 중합반응(Free-Radical Polymerization)의 대부분은 부피가 있는 액상의 체적 상태에서 폴리머로 변화한다. 이런 경우에 중합반응의 초기 단계에서 모노머는 그 자체로서 용매(Solvent)의 역할을 하게 되는데 이때 많이 사용되는 제조방법은 폴리머 캐스팅(Polymer casting) 방법을 사용하는 것이다. 액체상태의 모노머를 캐스터에 담고 중합조건에 따라서 중합되면 고체 상태의 폴리머가 형성된다. 그러나 중합반응이 심하게 일어나게 되면 발열반응이 되고 모노머 사이에서 기포가 발생될 수 있으며, 국부적으로 과열반응이 일어나게 되면 까맣게 변색되는 경우도 있다. 이러한 발열반응 열을 약화시키고 안정적인 반응을 유지시키기 위하여 MMA 모노머가 담긴 캐스터를 물 속에 담그고 물의 온도를 조절하는 중탕방식을 일반적으로 사용한다. MMA 모노머는 소량의 AIBN과 반응시키는데 희석조건은 약 200:1(Weight ratio)정도이다.

중합 반응에 사용되는 캐스터용 형틀(Mould)은 유리 재질을 사용하였고, 그 주변을 감싸는 재질로는 테프론을 사용하였다. 이는 Mold와 고체 색소 쉘을 분리할 때 잘 분리할 수 있도록 하기 위함이고, 유리는 고체 색소레이저의 발진특성에 민감한 표면의 거칠기를 매끈하게 하기 위하여 유리를 사용하였다. 두 장의 유리 사이에 고무 재질의 Gasket으로 분리시켰다.

개시제와 반응 온도 조건과는 서로 상관관계가 있다. 개시제의 양을 증가시키면 반응이 빠르게 일어나므로 반응열이 많아지게 되므로 증가되는 반응열을 제거해주기 위하여 온도를 낮게 유지시켜주는 것이 좋다. 반면에 개시제를 적게 넣으면 온도를 높여주어도 좋다. 그리고 성형된 고체 상태의 폴리머 플라스틱이 형틀로부터 잘 이탈되도록 하기 위하여 이형제로 Stearic Acid ( $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ )를 소량 첨가한다.

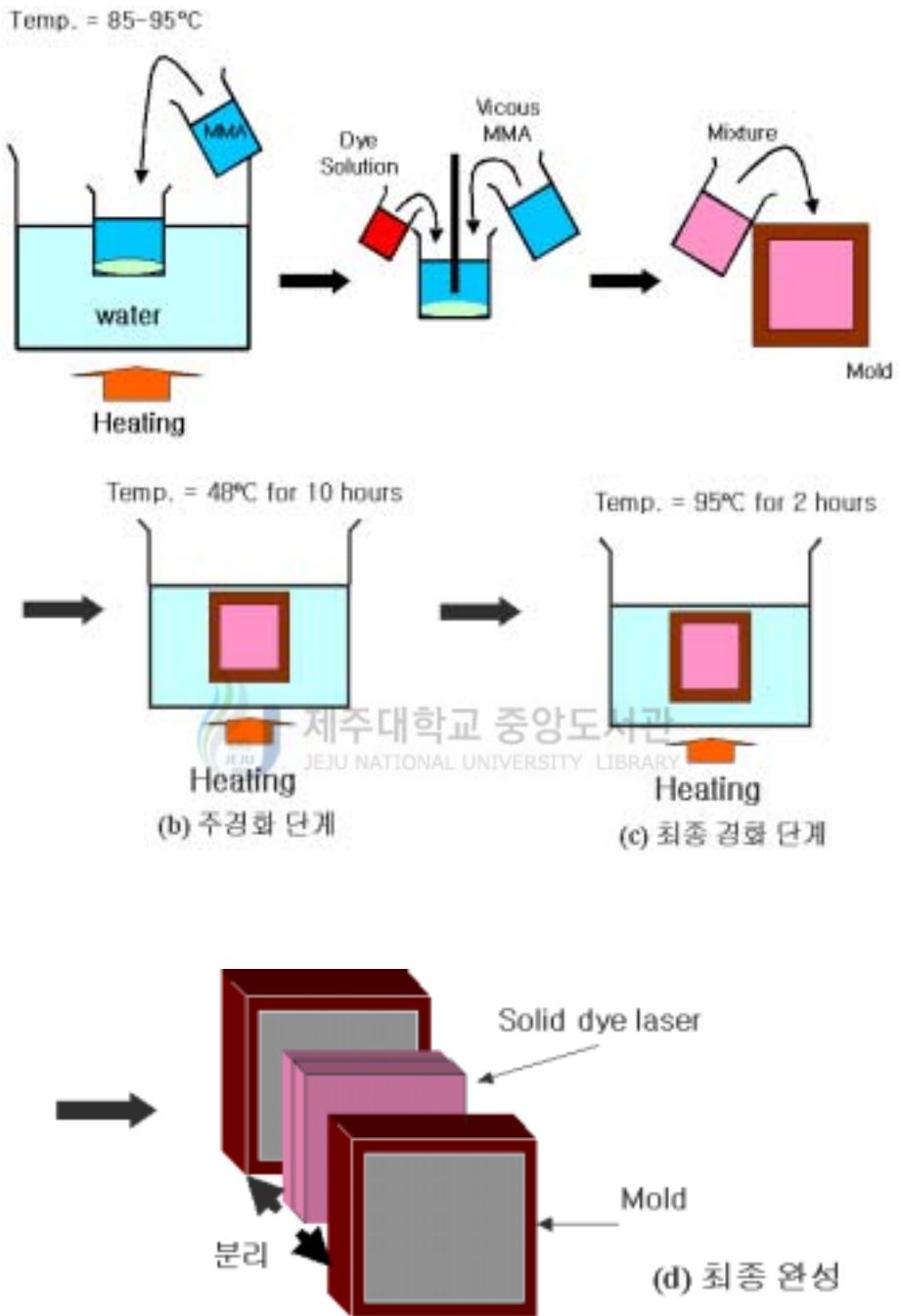


Fig. 3-4 Fabricating process of solid-state dye cell by PMMA method.

## 2) 주 경화 단계

MMA의 중합 단계가 끝나면 중합된 Solid-state dye solution을 캐스터에 넣고 항온조에서 약 10시간 동안 45-50℃로 경화를 시작하게 된다. 이 설정 온도는 개시제의 양에 따라 달라지는데 개시제가 40℃부터 반응을 하게 되는 것을 고려한 것으로 개시제의 양이 많으면 온도를 낮춰줘야 하고, 개시제의 양이 적으면 반응 온도를 올려주는데 실험을 통해 기준 온도는 48℃가 적당하였다. 48℃를 기준으로 온도가 낮으면 경화 과정이 더디고, 온도가 높으면 MMA의 발열반응으로 인한 경화반응이 과열로 Bubble이 생기게 된다. 개시제의 양이 적은지 많은지 구분하기 어려울 때는 48℃를 기준으로 경화를 시작하다가 Bubble이 생기기 시작하는 것이 보이면 온도를 1℃씩 낮춰주고, 경화되지 않는 경우는 반대로 올려주어야 한다. 물론 온도는 45-50℃를 벗어나지 않아야 한다.



Fig. 3-5 Main hardening process of solid-state dye solution.

## 3) 최종 경화 단계

주 경화단계가 끝나면 고체 색소 썬의 경도를 증가시키기 위해 최종 경화단계를 거치게 되는데 90-95℃에서 약 2시간 동안 마지막 경화를 해주게 된다. 그리고 Caster에서 고체 색소 썬을 분리해 내면 된다.

## 2. 고체 색소 레이저의 특성 조사

### 1) 흡광도(Absorbance) 측정

흡광도(Absorbance)는 광학 밀도라고 한다. 용액의 흡수 Spectrum을 측정하는 경우 입사광의 세기를  $I_0$ , 물체의 흡수 층을 투과한 빛의 세기를  $I$ 라고 하면

$$(Absorbance) = \log_{10}(I_0/I) \text{ 이고,}$$

람베르트의 법칙에 의하면  $\log_{10}(I_0/I) = \epsilon cd$

( $\epsilon$ : 몰 흡광 계수,  $c$ : 몰농도,  $d$ : 흡수 층의 두께) 이다.

위 식에서 몰농도와 두께는 몰농도와 두께에 비례함을 알 수 있다.

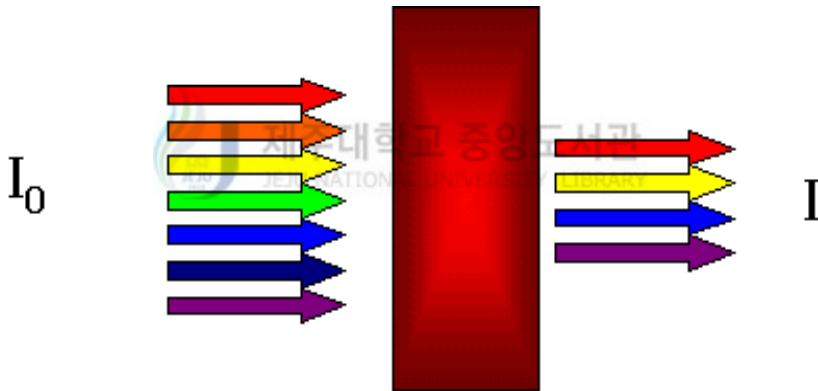


Fig. 3-6 Principle of absorbance measurement.

본 논문에서는 각각 Dye, 농도, 두께 별로 제작된 고체 색소 레이저를 가지고 Spectrophotometer를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 이는 고체 색소 레이저가 레이저 펄핑을 통해 레이징 되기 때문에 Nd:YAG 레이저의 제 2조화파에 해당하는 파장대에서 흡수 Spectrum을 얻는 것이 중요하다.

## 2) 간섭광 측정에 의한 고체 색소 켈의 품질 조사 실험

고체 색소 켈을 레이저 이득 매질로 사용하기 위해서는 이득매질을 통과한 후에도 광 축이 잘 유지 되어야하며 켈 내부의 산란에 의해 손실이 발생되지 않아야 한다. 결국 고체 색소 켈의 표면 편평도가 우수하여야 하며 고체상태 색소의 내부에 기포 등의 불순물이 없어야한다. 본 연구에서는 He-Ne 레이저를 사용하여 고체 색소 켈의 투명성을 조사하였다. 그림을 보면 He-Ne 레이저빔을 초점거리가 100mm인 렌즈를 이용하여 고체 상태 색소에 집속 하였고 이때 렌즈로 입사되는 레이저빔의 직경이 25mm이었다. 그림과 같이 고체 상태 색소 시편에 투과된 빔을 측정하였는데 색소 시편의 거리를 25mm마다 이동시켜 각각의 레이저빔의 직경을 다르게 하였다.

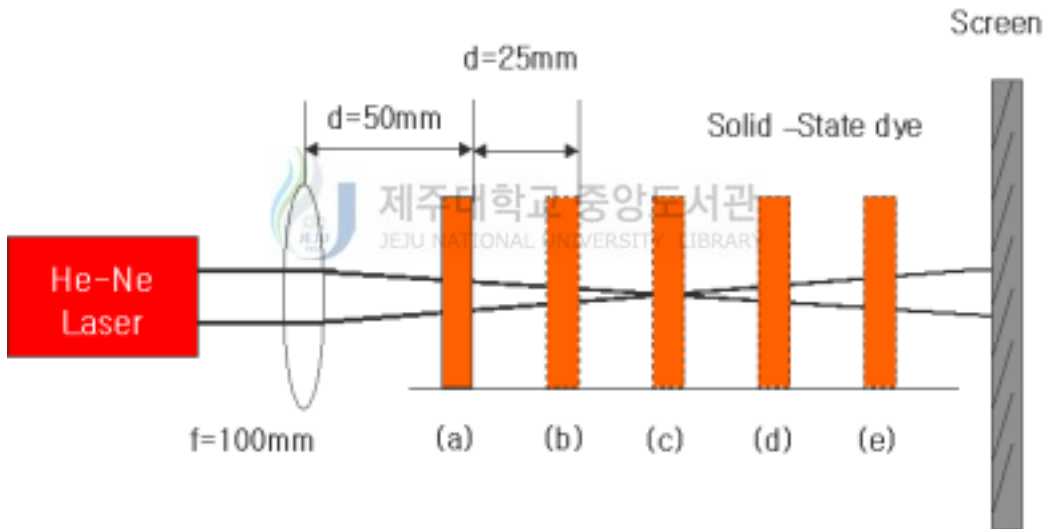


Fig. 3-7 Experimental concept of homogeneity by scattering and interference.



### 3) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험 I (Tuning 하지 않음)

제작된 solid-state dye cell을 가지고 Nd:YAG laser의 제2조화파(532nm)를 펌핑 레이저로 이용하여 고체 색소레이저를 발진하여 발진되는 파장을 조사하였다. Nd:YAG laser의 에너지는 2mJ이고, 발진된 레이저는 focal length가 100mm인 렌즈에서 집속하여 집속된 레이저를 고체 색소 셀에 입사시켜 발진된 레이저를 Spectrometer에서 측정하였다.

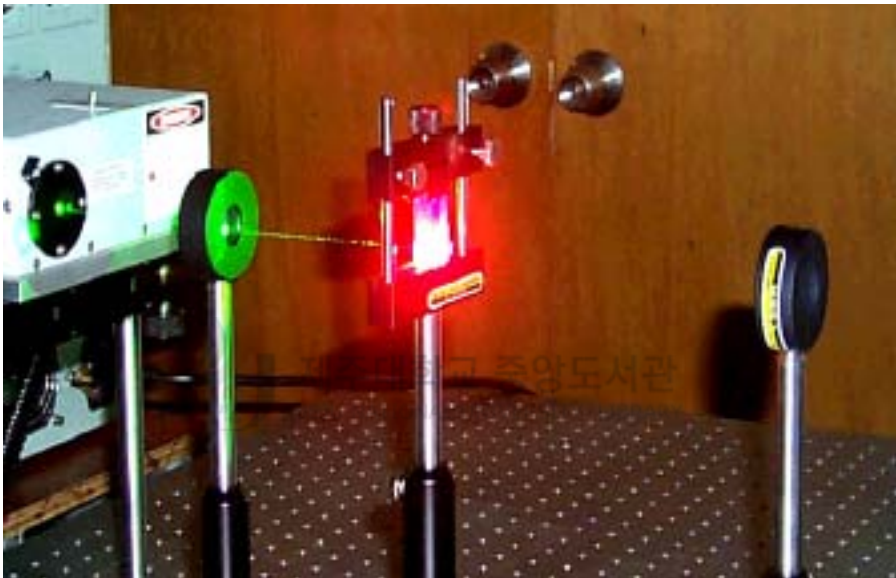


Fig 3-8 Emitting of a solid-state dye laser

### 4) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험(tuning 후)

Fig. 3-4에서도 알 수 있듯이 Nd:YAG laser의 제2조화파(532nm)에 의해 펌핑된 고체 색소레이저는 Isotropic하게 발진하게 된다. 그래서 공진기를 이용하여 분산된 레이저 빔을 모아 같은 방향으로 발진하게 할 필요성이 있다. 그리고 파장가변의 고체 색소 레이저를 원하는 파장의 레이저만 선택할 수 있는 역할도 한다.

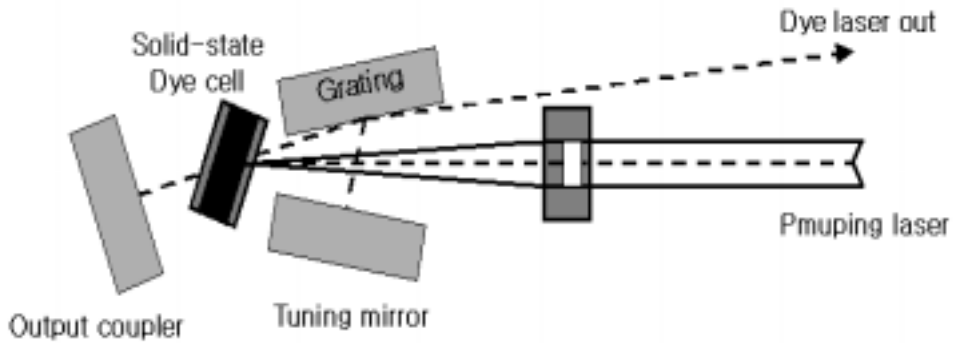


Fig. 3-9 Littman oscillator type of longitudinal pumping.

펌핑 레이저에서 발진한 레이저는 focal length 200mm인 볼록렌즈에서 집속하고 고체 색소 셀에서 흡수하게 된다. 고체 색소 셀에서 레이저는 그림의 회절격자(Grating) 방향과 Output coupler 방향으로 발진하게 되는데 회절격자에 입사한 고체 색소 레이저는 색소레이저 out 방향(1st order)과 Tuning mirror 방향(2nd order)으로 나뉘어 발진한다. 2nd order 방향으로 발진된 레이저는 Tuning mirror에서 반사를 하여 결국에는 색소레이저 out 방향으로 발진하게 된다. 여기서 회절격자는 색소레이저를 파장별로 나누주는 역할을 하고 Output coupler와 Tuning mirror는 발진된 색소레이저를 모아주어 고출력의 레이저를 얻기 위해 사용되어졌다.

본 실험에서 사용된 회절격자는 Oriel 社의 1800G/mm의 것을 사용하였고, 렌즈는 OWIS 社의 Focal length 200mm, Diameter 22.2mm인 Bicx-lens를 사용하였으며, Tuning mirror와 Output coupler 역시 OWIS 社의 Al을 코팅한 flat mirror를 사용하였다.

##### 5) 고체 색소레이저의 Pulse 특성 실험

펌핑 레이저로 사용한 Nd:YAG 레이저는 10Hz로 발진하며 Power가 Pulse로 발진하여 고체 색소 레이저의 경우에도 같은 형태로 발진하게 된다.

앞의 실험에서는 Spectrometer에서 각 파장에서 얼마나 어떻게 발진되는가에 대한 실험을 하였다. 본 실험에서는 펌핑 레이저의 에너지에 따른 고체 색소 레이저의 출력변화를 알아보았다.

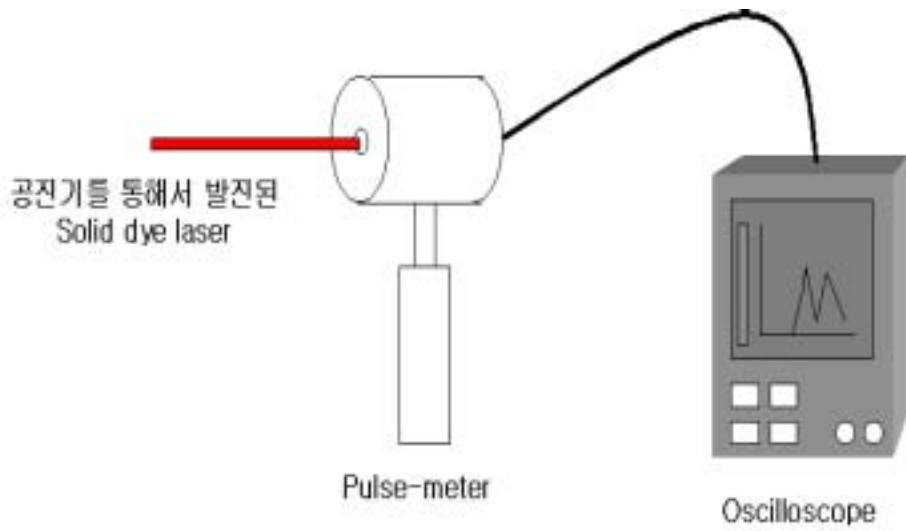


Fig. 3-10 Picture of experiments using a pulse-meter.



Fig. 3-11 Emitting pulse measurement of the solid-state dye laser.

#### 6) 고체 색소레이저의 Power 측정 실험

실제 플라즈마 진단에서는 고출력의 레이저를 필요로 하지 않는다. 그러나 수 mW 급의 레이저는 발진이 되어야 플라즈마 진단에 응용이 가능하다. 이를 위해 이 실험에서 펄핑 레이저의 출력에 대한 고체 색소레이저의 출력을 실험하여 그 값을 알아보았으며, 효율을 계산해보았다.



Fig. 3-12 Emitting pulse measurement of the solid-state dye laser.

### 7) 펌핑레이저에 의한 고체 색소 cell의 손상 실험

PMMA로 제작한 고체 색소레이저의 단점은 펌핑 레이저에 의해 손상을 입어 발진 특성이 일정하지 않다는 점이다. 이에 대해 본 실험에서는 고체 색소 셀이 펌핑 레이저에 대해 얼마만큼의 손상을 입는가를 알아보는 실험으로 펌핑 레이저의 출력, 거리에 따른 차이를 알아보았다. 실험을 위해 펌핑 레이저의 출력은 4mJ의 Nd:YAG 레이저로 발진시켰으며 Focal length가 200mm인 렌즈를 사용하여 렌즈로부터 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm, 300mm, 350mm, 400mm의 거리를 두고 각각 1분간 실험을 하였다.

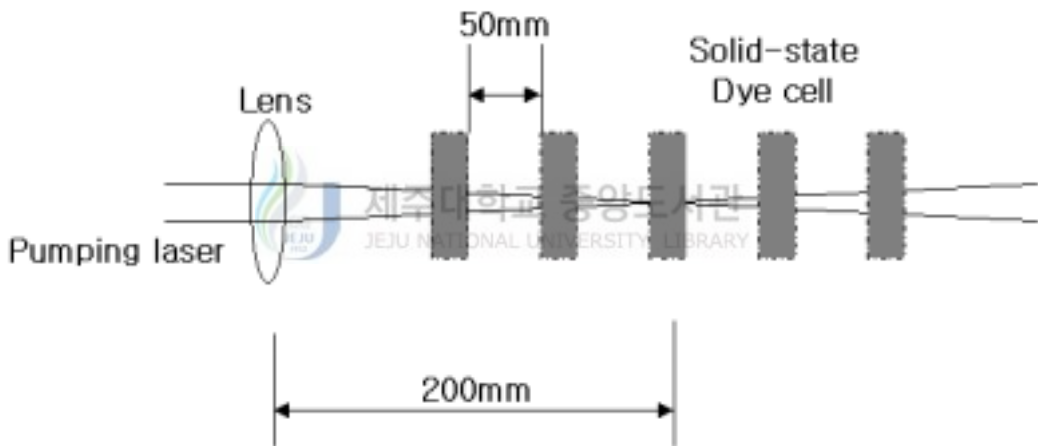


Fig. 3-13 Concept of solid-state dye cell's measurement damage.

## IV. 실험결과 및 고찰

### 1. 고체 색소레이저 제작

고체 색소 셀을 제작하기 위해서는 PMMA법을 이용하였다. 실험 결과 많은 시행 착오를 거쳐 600-700nm의 레이저를 발진하는 색소를 선택하고 문헌에 나와있는 내용을 바탕으로 농도, 두께 별로 각각의 색소를 사용하여 고체 색소 셀을 제작하였다.

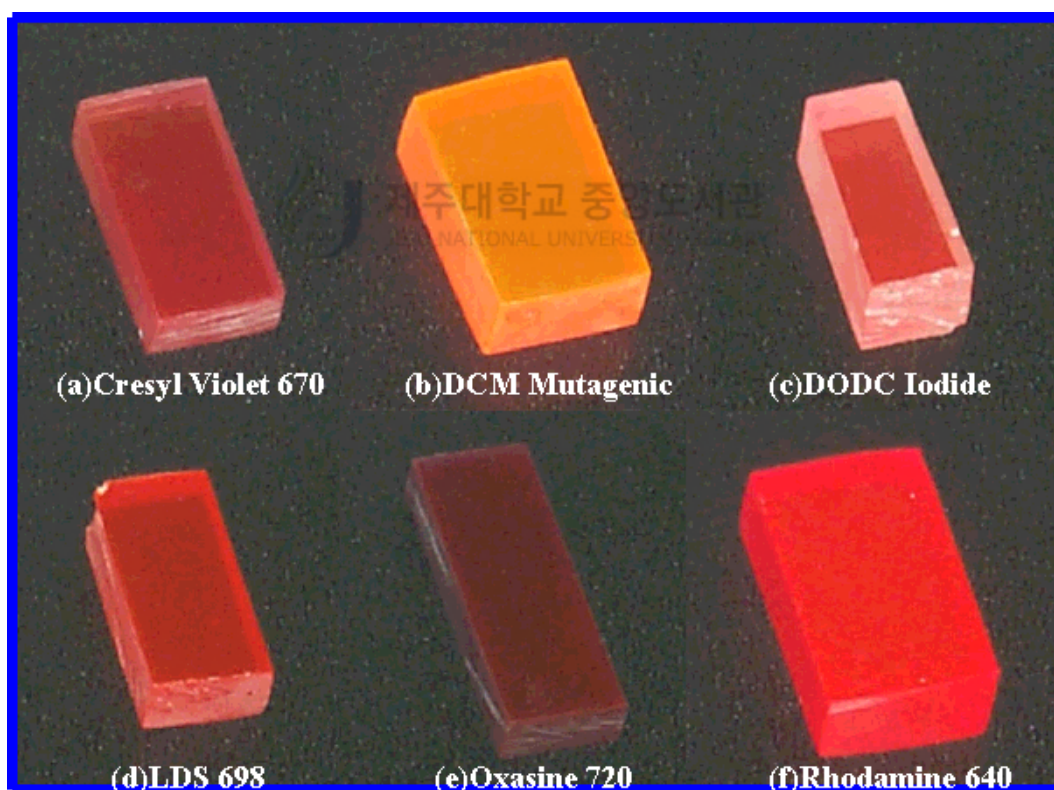


Fig. 4-1 Solid-state dye cell that fabricate using a various dyes.

고체 색소 cell을 제작하면서 중합반응에서 촉매 역할을 하는 개시제의 발열반응으로 인한 온도의 상승으로 인한 과열 반응으로 Bubble이 생겨 많은 어려움이 있었다. 그래서 온도를 설정온도에서 2-3℃ 정도의 여유를 두어 경화가 더딜 경우 온도를 낮춰주었고, Bubble이 생기는 것이 보이면 온도를 낮춰주었다. 그리고 몰농도  $10^{-4}mol/l$  이상이 되지 않도록 제작하였으며, 두께는 10mm 이상이 되지 않게 제작을 하였다.

## 2. 고체 색소 레이저의 특성 조사

### 1) 흡광도(Absorbance) 측정 결과

흡광도는 휴렛패커드社의 Spectrophotometer를 사용하여 측정하였다. Wavelength range는 가시광역 영역인 190-820nm로 하였다. 측정된 Absorbance는 다음에 나와있다.

측정된 결과를 살펴보면, 색소의 농도와 고체 색소 셀의 두께에 따른 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 고체 색소 셀이 펄핑 레이저에 의해 고체 색소레이저가 발진될 때 발진 특성이 많이 달라질 것이다. 흡광도와 발진되는 고체 색소레이저의 출력에는 어떤 상관 관계가 있을 것이고, 아마 흡광도와 발진 출력은 비례할 것이다. 그리고 액체 색소레이저의 결과를 문헌에서 살펴보았지만, 농도에 따라 미세하나마 발진 파장이 변하는 것을 알 수 있었다. 고체 색소 레이저에서도 같은 결과가 예상이 된다.

Table 4-1 Measurement results of each dye's absorbance at 532nm.

Dye	Concentration (mol/liter)	Thickness (mm)	Absorbance at 532nm
DCM Mutagenic	3	9	3.30
	3	5	2.78
	5	5	<b>4.02</b>
DODC Iodide	2	7	2.54
	2	9	<b>3.83</b>
	1	9	0.29
LDS 698	3	7	3.48
	3	9	3.83
	2	7	1.36
	4	7	<b>4.08</b>
Rhodamine 640 Perchlorate	3	5	2.24
	3	9	<b>4.02</b>
	4	5	3.56
Cresyl Violet 670 Perchlorate	2	5	0.48
	2	7	<b>3.06</b>
	4	7	2.23
Oxasine 720 Perchlorate	3	7	1.26
	3	9	3.13
	4	7	1.30
	8	7	<b>4.06</b>



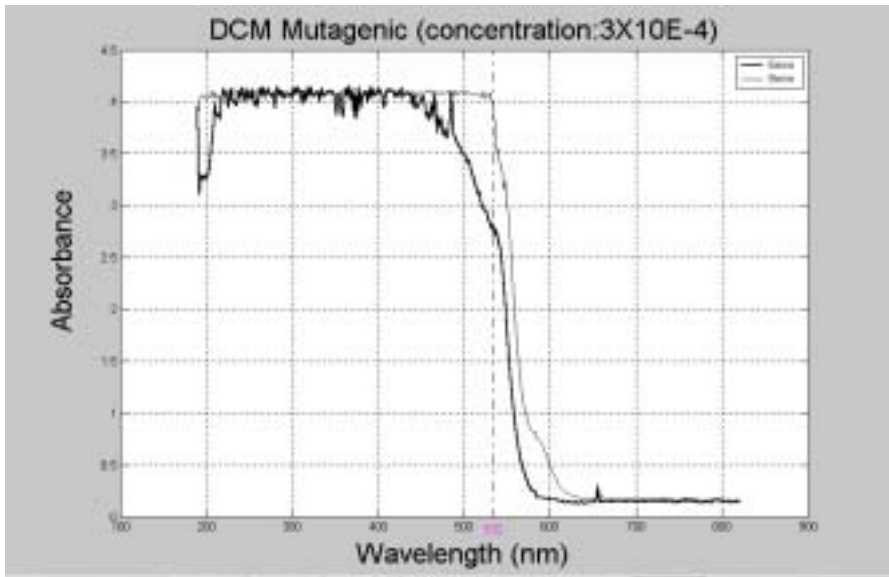


Fig. 4-2 Measurement of DCM's absorbance classified by thickness.

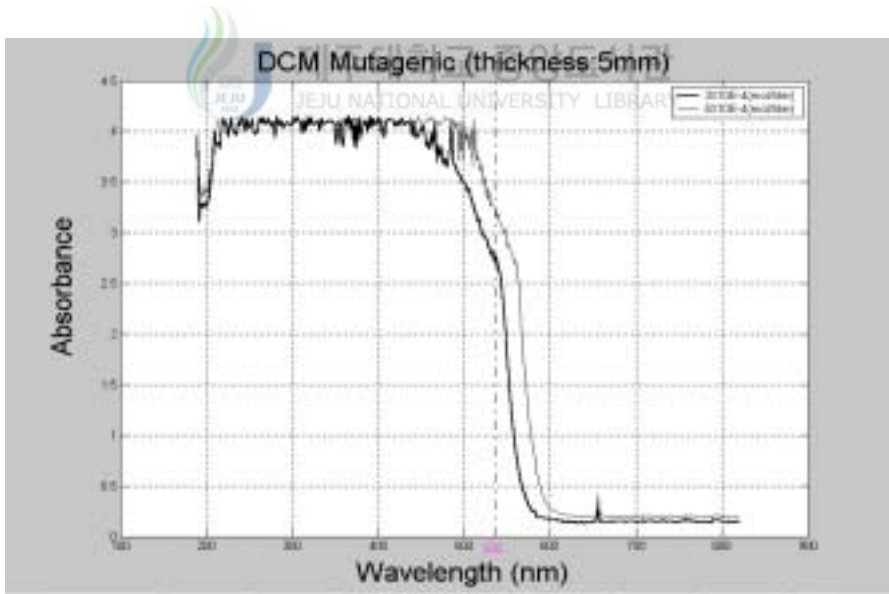


Fig. 4-3 Measurement of DCM's absorbance classified by concentration.

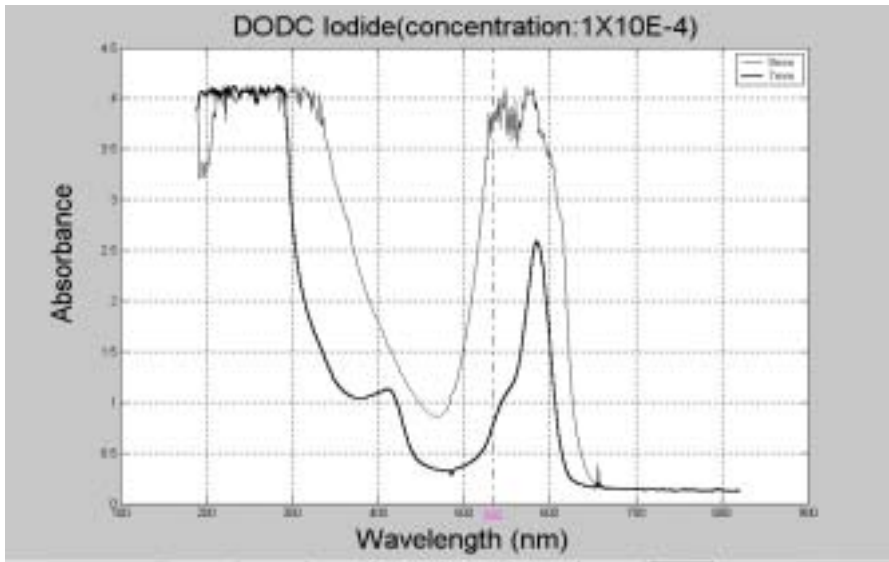


Fig. 4-4 Measurement of DODC Iodide's absorbance classified by thickness.

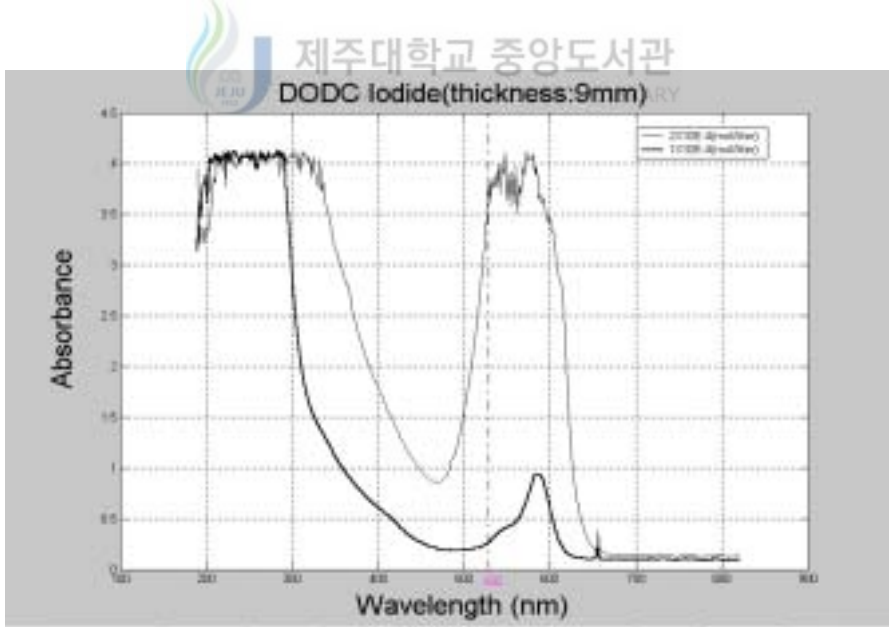


Fig. 4-5 Measurement of DODC Iodide's absorbance classified by concentration.

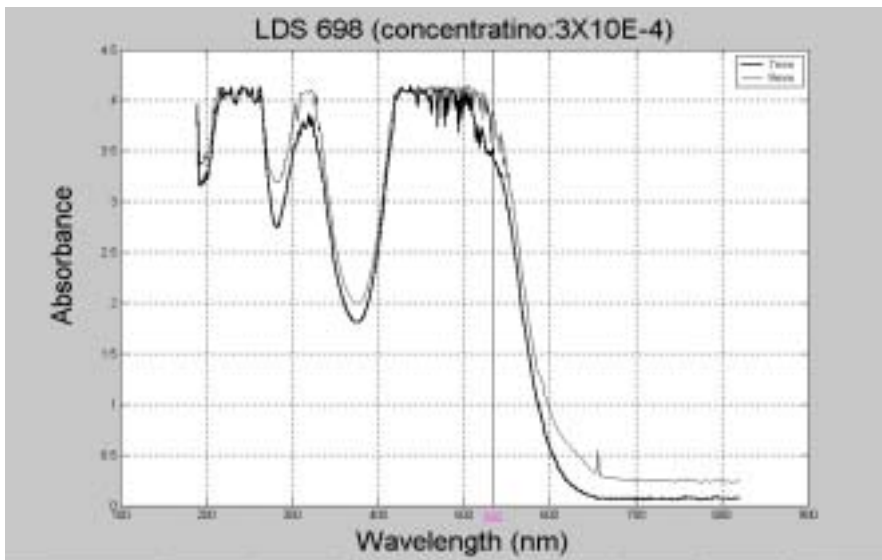


Fig. 4-6 Measurement of LDS 698's absorbance classified by thickness.

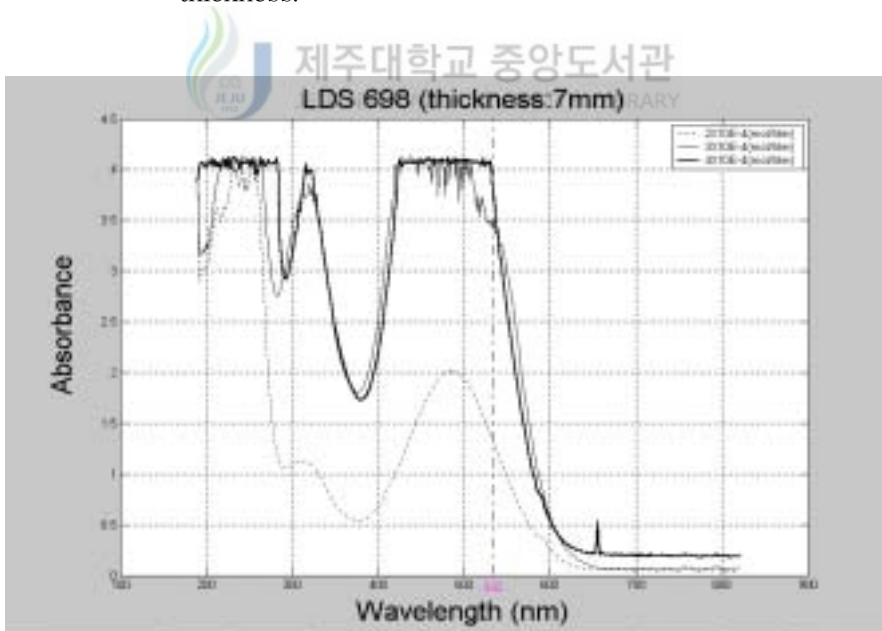


Fig. 4-7 Measurement of LDS 698's absorbance classified by concentration.

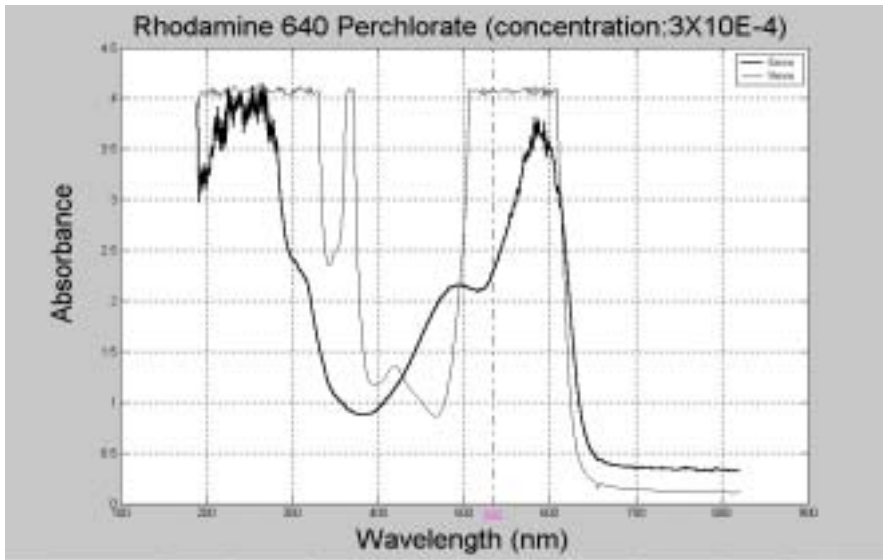


Fig. 4-8 Measurement of Rhodamine 640 Perchlorate's absorbance classified by thickness.

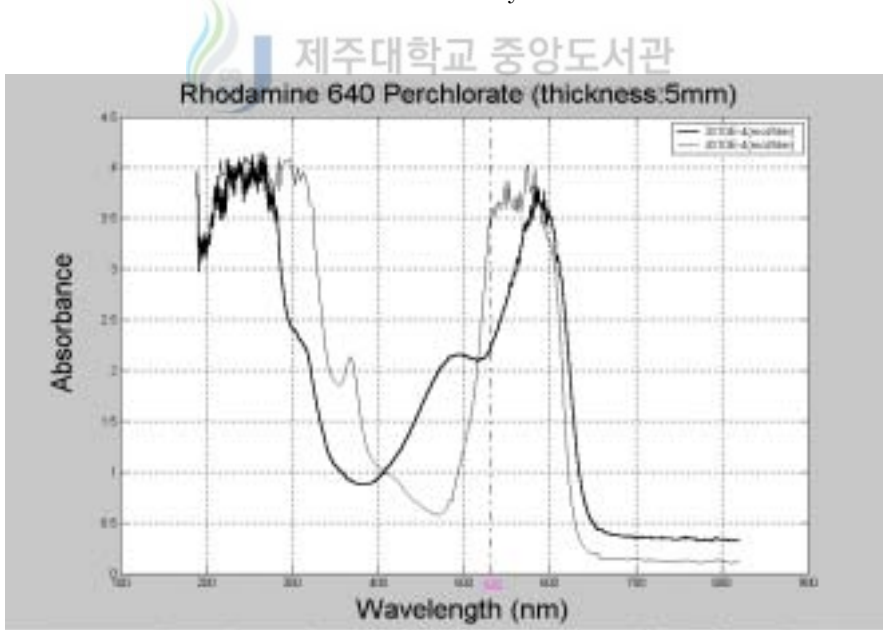


Fig. 4-9 Measurement of Rhodamine 640 Perchlorate's absorbance classified by concentrations.

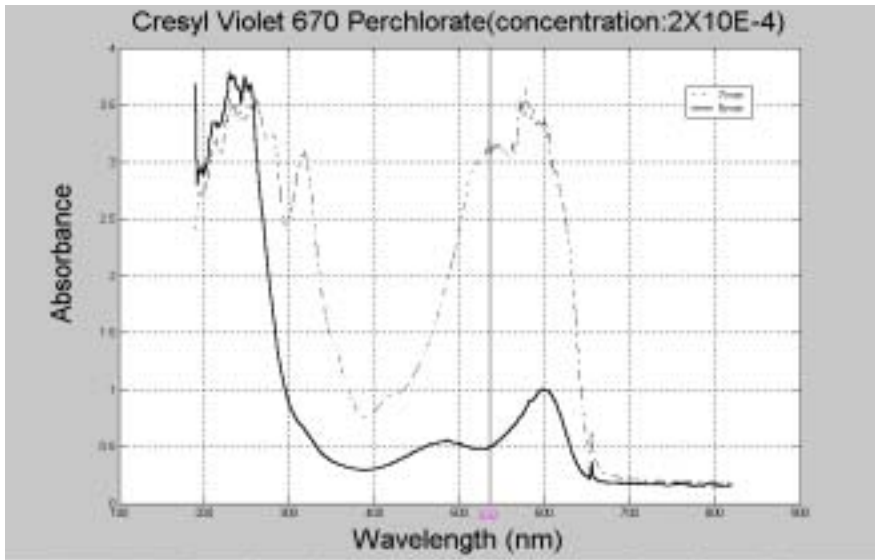


Fig. 4-10 Measurement of Cresyl Violet Perchlorate's absorbance classified by thickness.

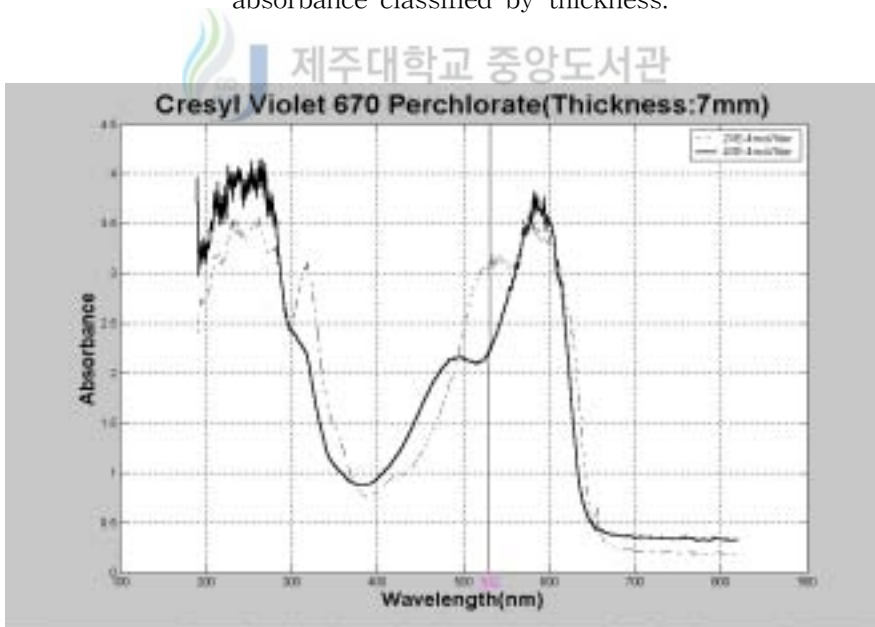


Fig. 4-11 Measurement of Cresyl Violet Perchlorate's absorbance classified by concentration.

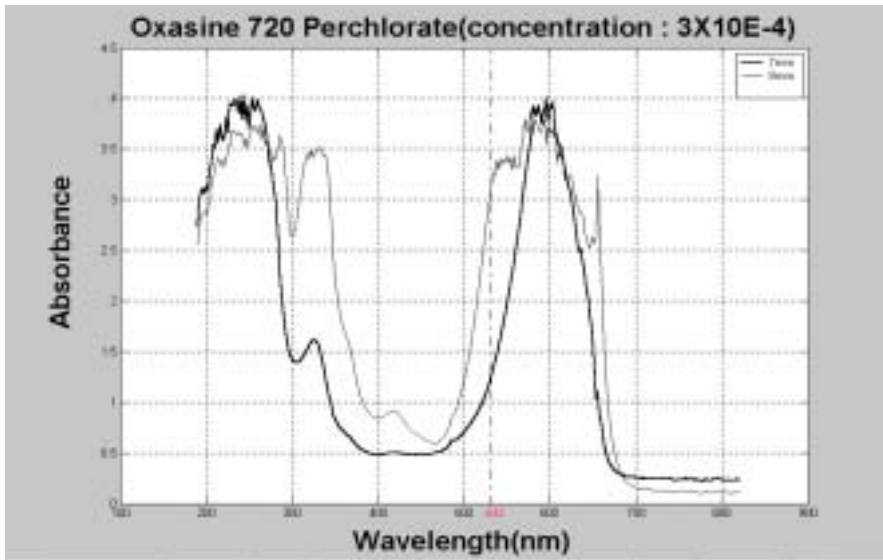


Fig. 4-12 Measurement of Oxasine 720's absorbance classified by thickness.

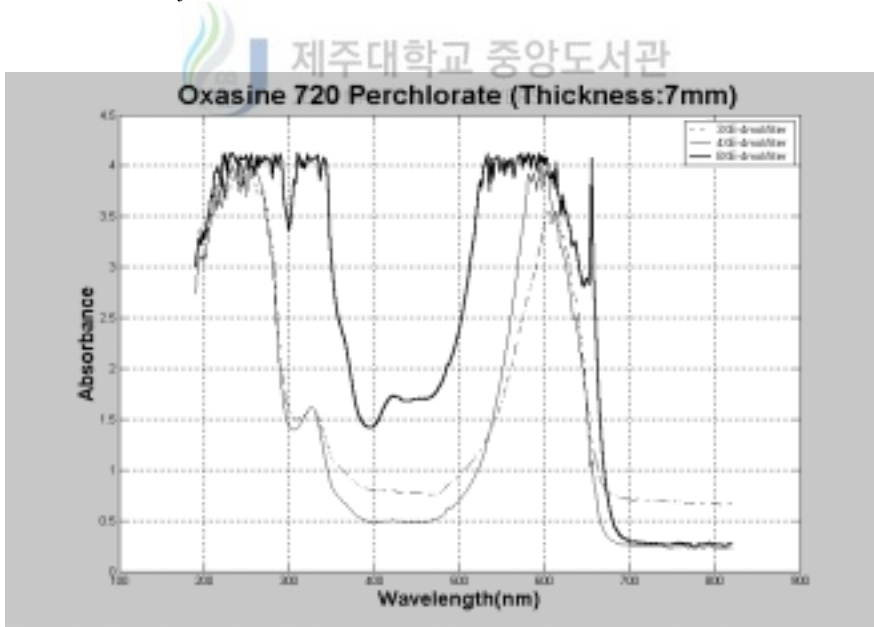


Fig. 4-13 Measurement of Oxasine 720's absorbance classified by concentration.

실험 결과를 살펴보면 색소 농도와 고체 색소 썬의 두께에 따라 Absorbance는 많은 변화를 보였다. 532nm의 파장에서 DCM Mutagenic은 농도 5mol/liter, 두께는 9mm에서 가장 좋은 Absorbance를 얻을 수 있었고, DODC Iodide 농도는 2mol/liter, 두께는 9mm에서, LDS 698에서는 농도는 4mol/liter, 두께는 7mm에서, Rhodamine 640 perchlorate에서는 3mol/liter. 9mm, Cresyl violet 670 Perchlorate는 2mol/liter, 7mm, Oxasine 720 Perchlorate에서는 8mol/liter, 7mm에서 가장 좋은 Absorbance를 얻을 수 있었다.



2) 간섭광 측정에 의한 고체 색소 cell의 품질 조사 실험

산란광이나 간섭광 측정으로는 고체 색소 cell의 특징 중 dye가 MMA에 균질하게 녹아있는지 여부와, 고체 색소 cell의 면이 부드러운지를 알 수 있다. 본 실험에서는 He-Ne 레이저를 고체 색소레이저에 입사하여 스크린에 맺힌 그림을 디지털 카메라로 촬영을 하였다.

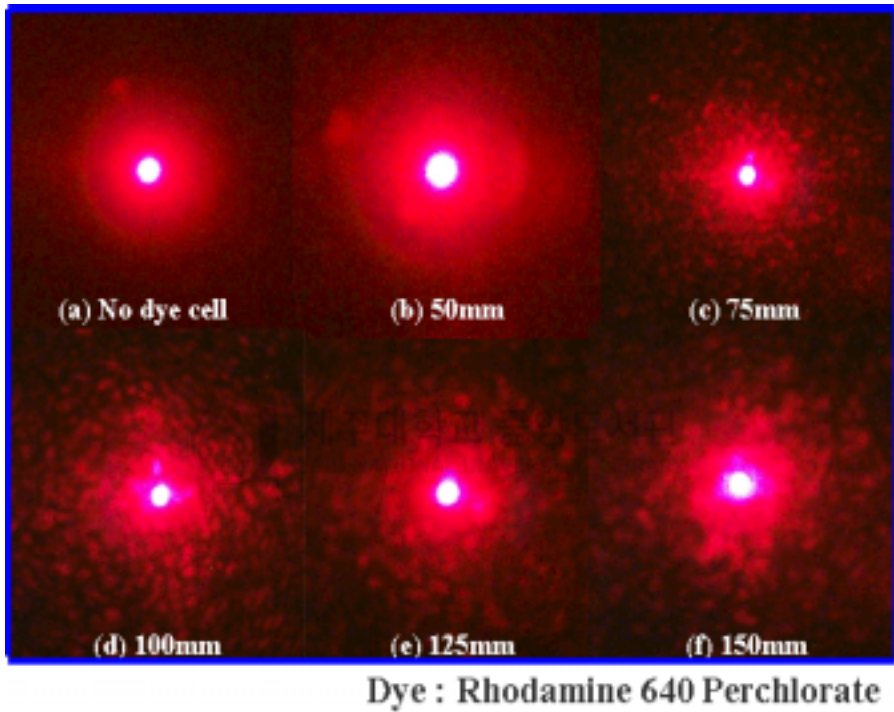


Fig. 4-14 Space distribution after He-Ne laser permeated solid-state dye cell due to scattering and interference (Rhodamine 640).



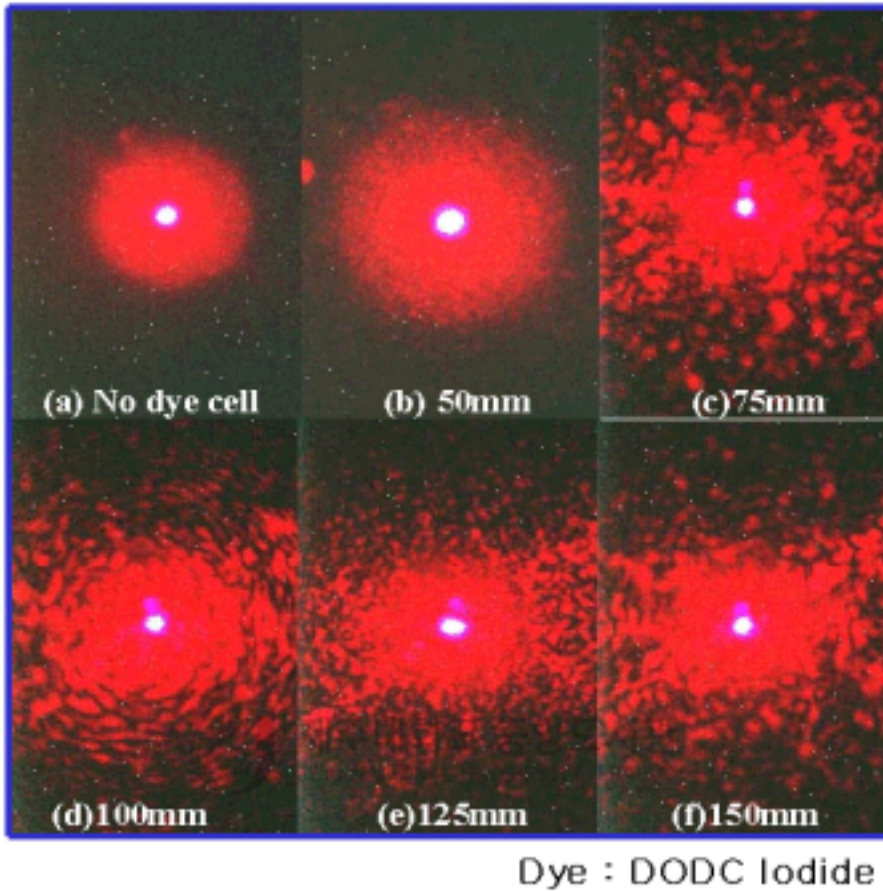


Fig. 4-15 Space distribution after He-Ne laser permeated solid-state dye cell due to scattering and interference (DODC Iodide).

제작된 고체 색소 셀의 균질도나 편평도의 특징을 자세히 알기 위해서는 기준이 되는 시료가 있어서 비교해야 정확한 판단을 할 수 있으나 본 논문에서는 그러지 못한 것이 아쉽다. 그러나 대체적으로 볼 때 균질도는 좋은 것 같고, 편평도는 더 연구를 해야 할 것 같다. 대안으로 캐스터에서 사용된 유리를 편평도가 더 좋은 유리를 사용하는지, 제작된 고체 색소 셀을 다른 광학적인 연마를 통해 좋게 할 수 있을 것이라고 본다.

### 3) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험(Tuning 전)

제작되어진 6개의 색소들 중에 가장 좋은 Absorbance를 가지는 것으로 발진특성 실험을 하여 발진되는지의 여부와 발진 스펙트럼의 분포를 얻을 수 있었다. 그 결과 Rhodamine 640, DCM, LDS 698, Cresyl Violet이 발진을 하였고, Oxasine 720, DODC Iodide는 발진을 하지 않았다. Oxasine은 농도가 너무 높았고, DODC Iodide는 농도가 너무 낮았다. 발진 결과는 아래에 나타내었다.

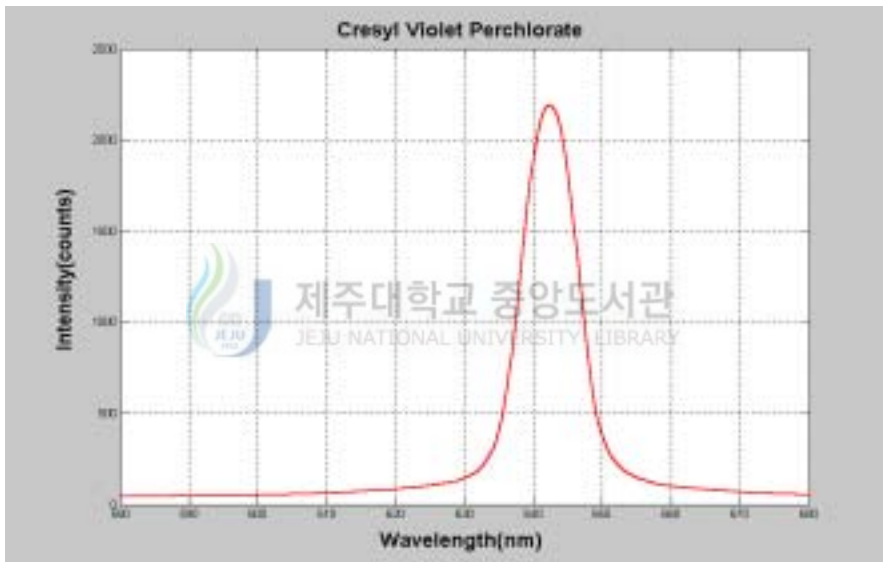


Fig. 4-16 Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic. (Cresyl Violet Perchlorate).

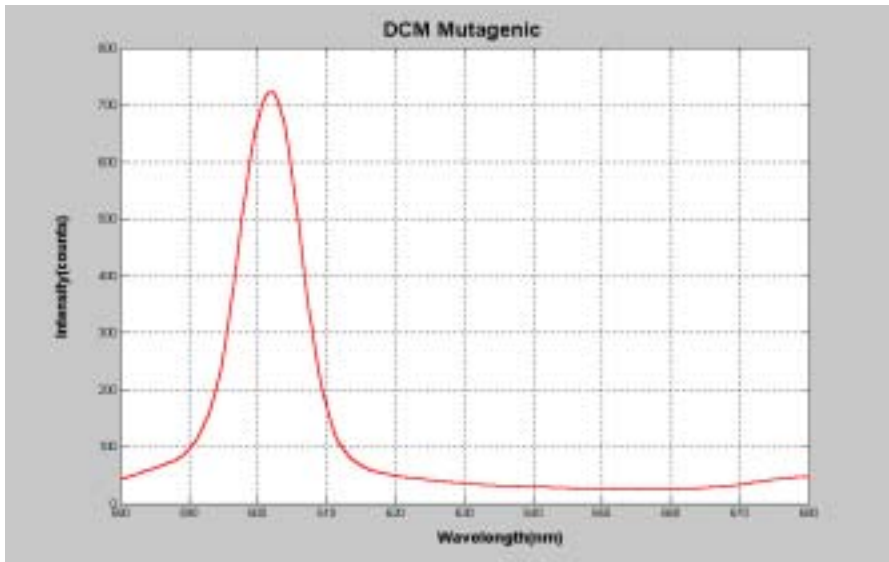


Fig. 4-17 Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic. (DCM Mutagenic)

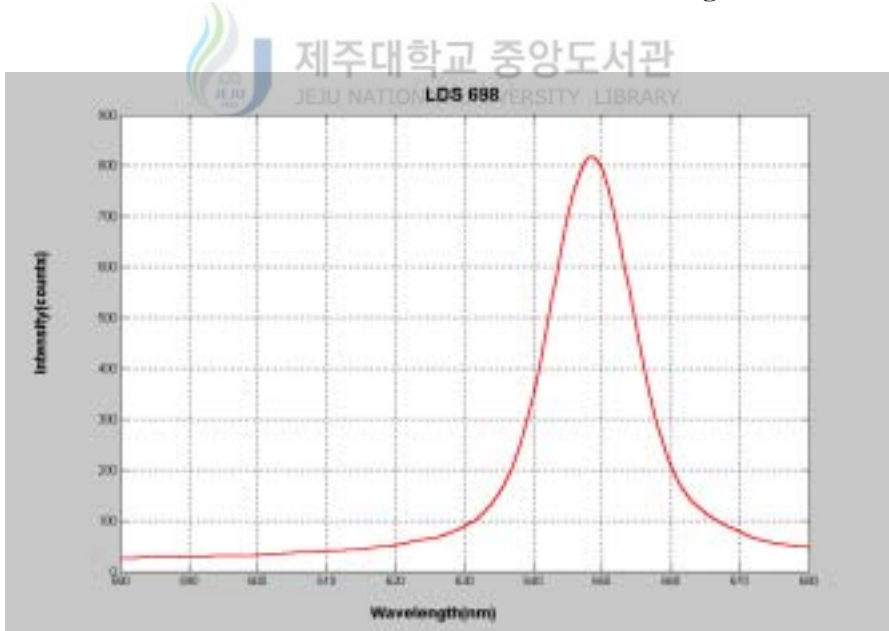


Fig. 4-18 Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic. (LDS 698)

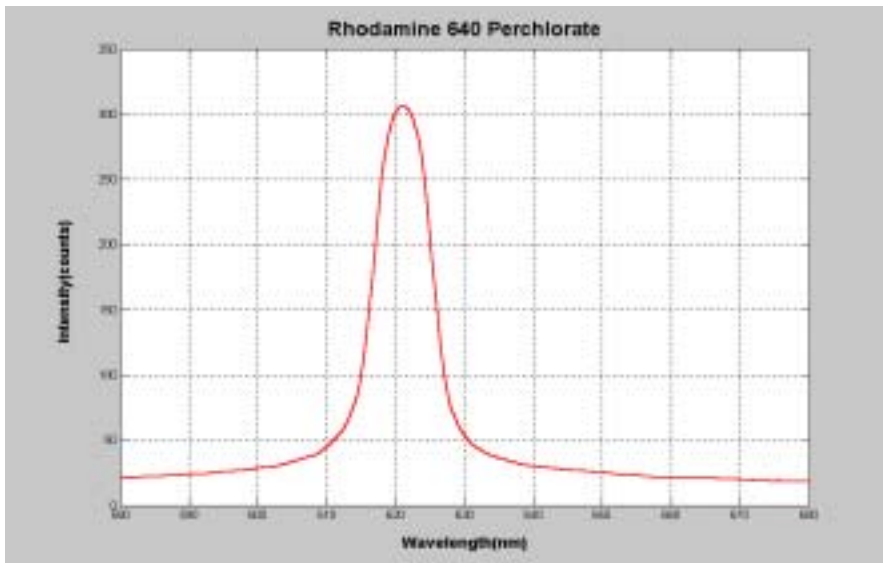


Fig. 4-19 Lasing spectrum of solid-state dye lasers pumped by Nd:YAG laser's 2nd harmonic. (Rhodamine 640 Perchlorate)



Table. 4-2 Wavelength measurement results at peak of intensity

dye	Rhodamine 640	DCM Mutagenic	LDS 698	Cresyl Violet
Peak일 때의 wavelength(nm)	621.064	601.787	648.727	642.452

#### 4) 고체 색소 레이저의 발진 특성 실험(tuning 후)

본 실험에서는 공진기를 사용하고 발진 특성을 실험하여 공진기를 이용하여 발진하지 않은 것과 공진기를 사용하여 발진된 특성을 비교하여 공진기가 많은 레이저 빔을 모으는데 도움을 주었고, Band-width는 기대했던 결과를 얻지 못했다. 그 이유를 분석한 결과 펌핑 레이저의 경우도 Band-width가 기대했던 결과를 얻지 못한 것으로 미루

어 본다면 Spectrometer의 Resolution에 문제가 있는 것으로 생각이 된다.

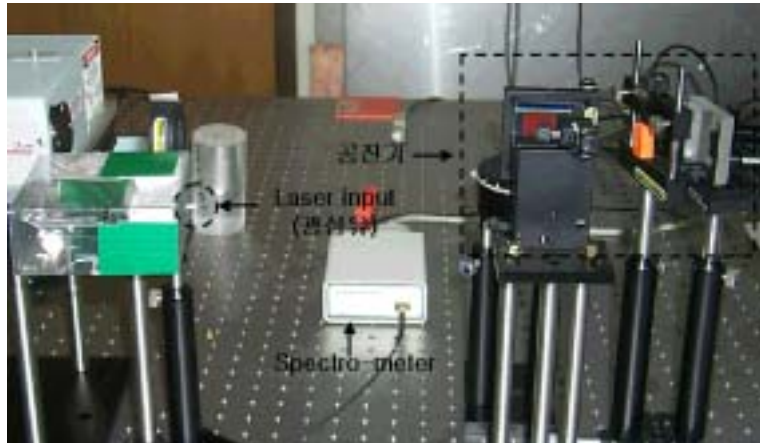


Fig. 4-20 Emitting spectrum measurement of Solid-state dye laser.

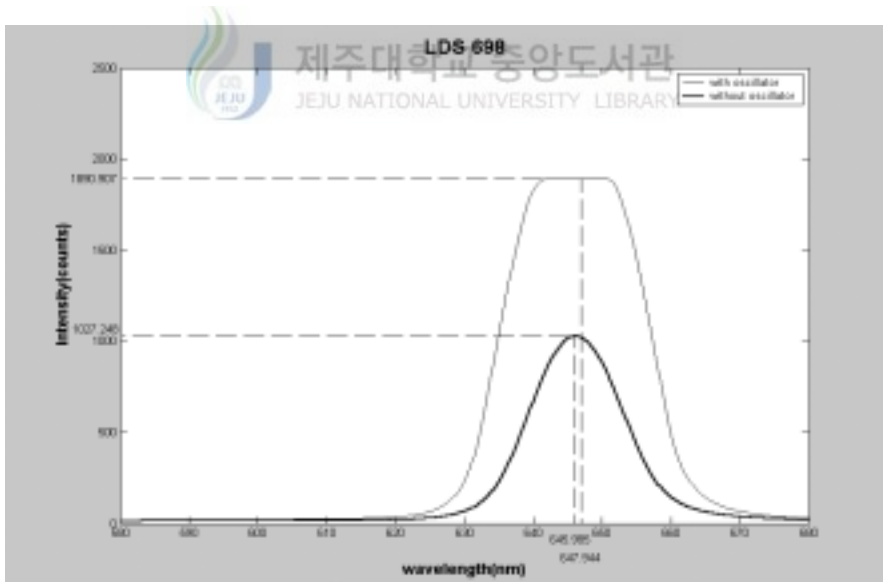


Fig. 4-21 Comparison of solid-state dye laser's characteristics with and without oscillator (LDS 698).

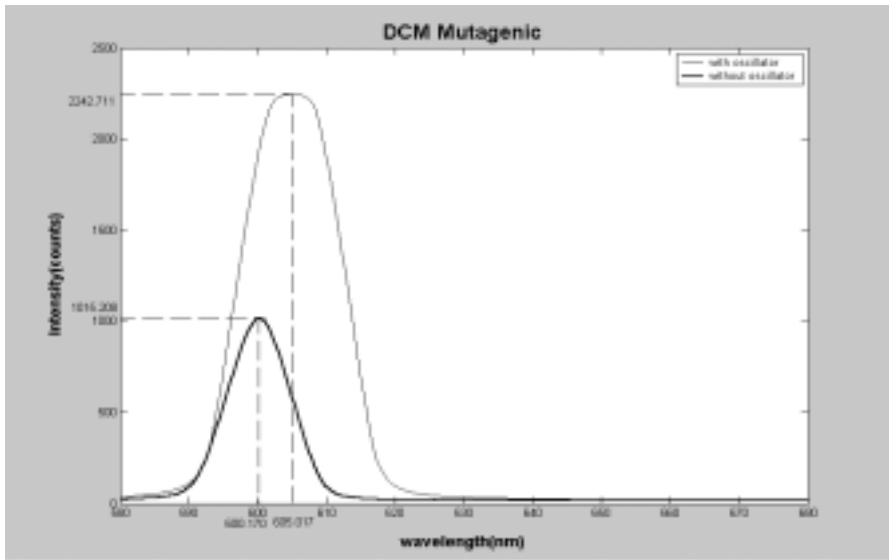


Fig. 4-22 Comparison of solid-state dye laser's characteristics with and without oscillator (DCM).

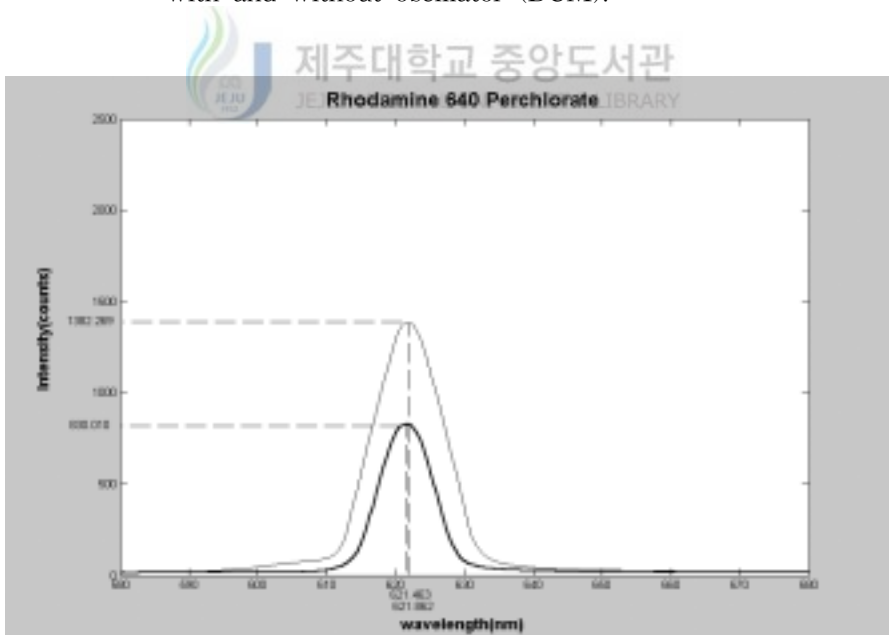


Fig. 4-23 Comparison of solid-state dye laser's characteristics with and without oscillator(Rhodamine 640 Perchlorate).

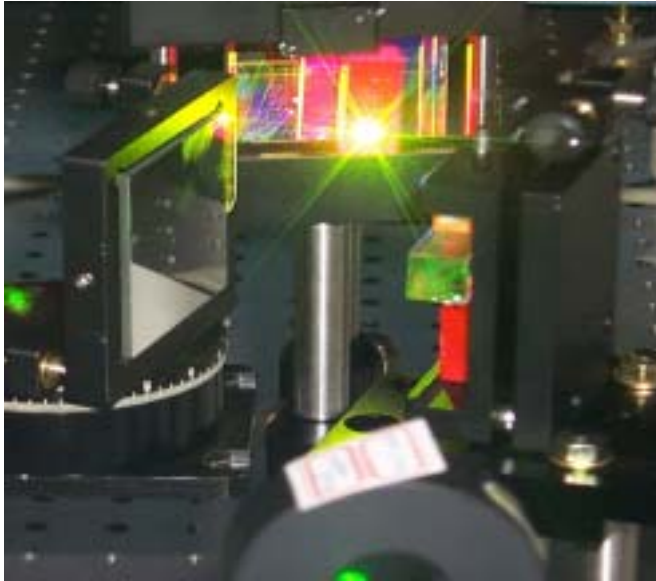


Fig. 4-24 Emitting of a solid-state dye lasers in a oscillator I .

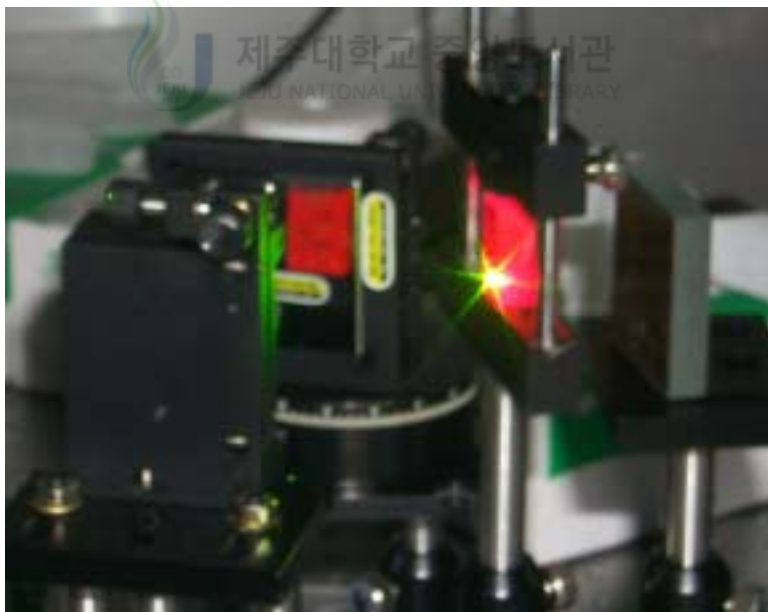


Fig. 4-25 Emitting of a solid-state dye lasers in a oscillator II .

5) 고체 색소레이저의 pulse 특성 실험

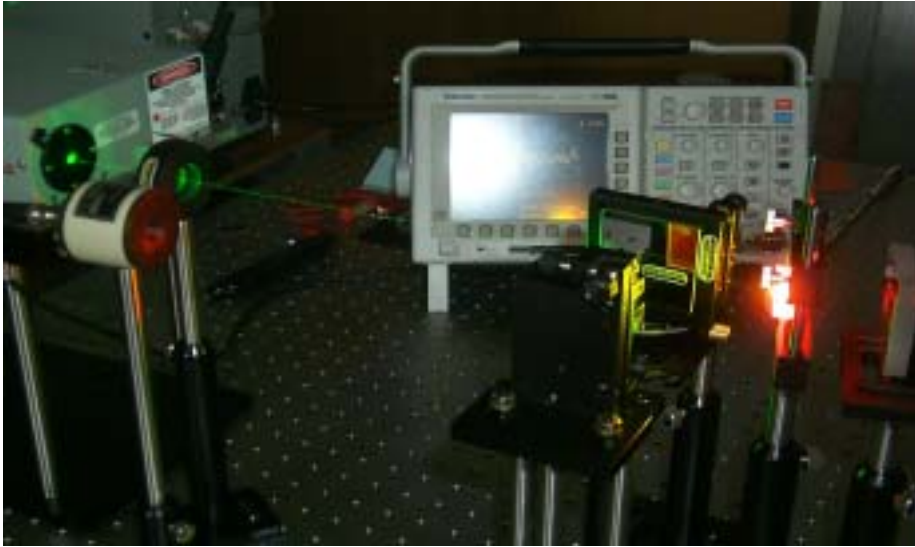


Fig. 4-26 Emitting pulse measurement of the solid-state dye laser.

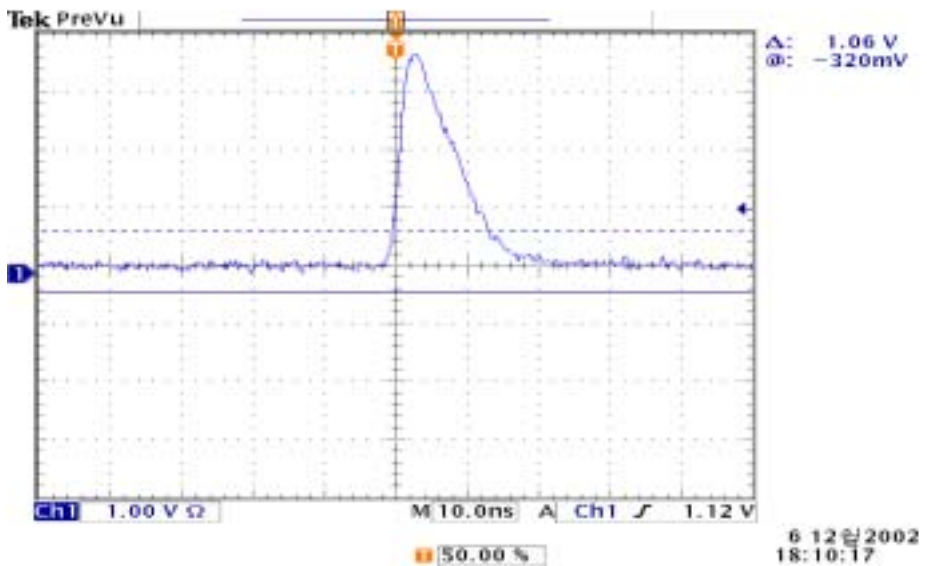


Fig. 4-27 Pulse measurement of solid-state dye laser by pumping laser.



6) 고체 색소레이저의 출력 Power 측정 실험



.Fig. 4-28 Emitting power measurement of the solid-state dye laser

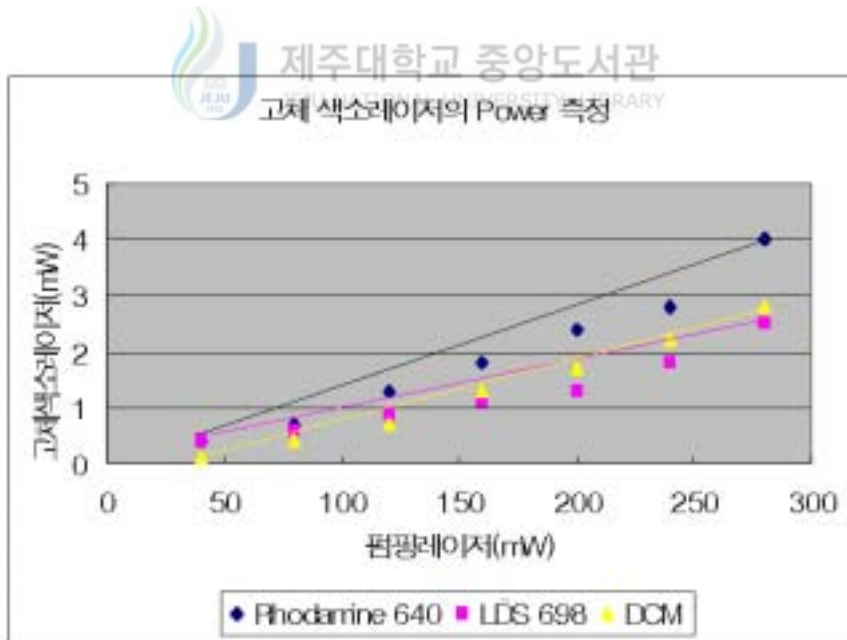


Fig. 4-29 Power measurement of solid-state dye laser by pumping laser.

Table. 4-3 Data of solid-state dye laser's power measurement.

LDS 698		DCM		Rhodamine 640	
Pumping laser(Input)	Dye laser (Output)	Pumping laser(Input)	Dye laser (Output)	Pumping laser(Input)	Dye laser (Output)
40mW	0.4mW	40mW	0.1mW	40mW	0.4mW
80mW	0.6mW	80mW	0.4mW	80mW	0.7mW
120mW	0.9mW	120mW	0.7mW	120mW	1.3mW
160mW	1.1mW	160mW	1.3mW	160mW	1.8mW
200mW	1.3mW	200mW	1.7mW	200mW	2.4mW
240mW	1.8mW	240mW	2.2mW	240mW	2.8mW
280mW	2.5mW	280mW	2.8mW	280mW	4.0mW

Table 4-4 LDS 698 Solid-state dye laser's power measurement and efficiency

Pumping laser(Input,mW)	40	80	120	160	200	240	240
Dye laser (Output,mW)	0.4	0.6	0.9	1.1	1.3	1.8	2.5
Efficiency (%)	1.00	0.75	0.75	0.69	0.65	0.75	0.89

위 실험에서 펌핑 레이저의 출력 변화에 따른 고체 색소레이저의 출력을 측정하였다. 측정 결과 Rhodamine 640이 가장 높은 출력 power를 보였고 DCM이 가장 낮은 출력 power를 보였다. 펌핑 레이저에 의한 고체 색소레이저의 변환 효율은 0.25%-1.43% 이었다.

7) 펌핑레이저에 의한 고체 색소 cell의 손상 실험

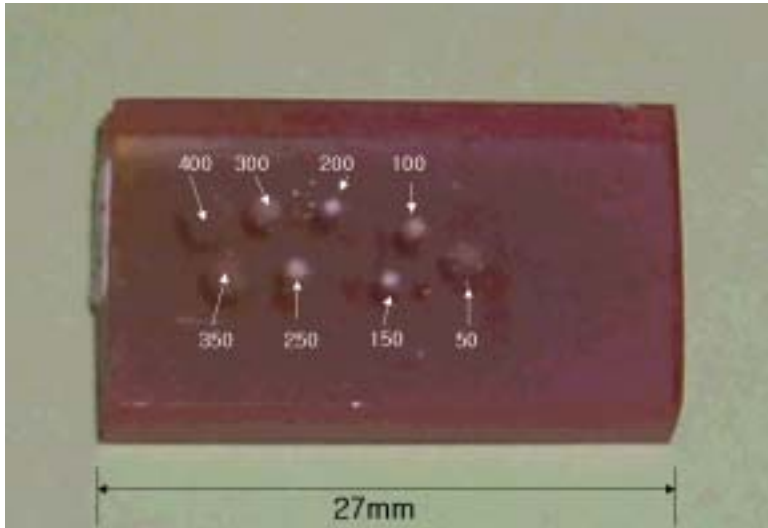


Fig. 4-30 Damaged part of solid-dye cell by pumping laser.

PMMA로 만들어진 고체 색소 cell은 외부의 물리적인 힘에 약한 특징이 있다. 그래서 본 실험에서는 Pumping 레이저에 의한 손상도를 알아보았다.

사진에서 보는 바와 같이 focal length가 200mm인 렌즈를 사용하였다. 200mm에서의 사진이 가장 적은 부위에 손상을 가져왔고, 400mm에서 가장 넓은 범위에 걸쳐 손상을 입었다. 그러나 200mm에서는 손상 범위는 작지만 집중적인 에너지를 받아 PMMA가 열에 의해 녹듯이 찌글어진 습을 보였다. 내부 2mm정도에서 dye들이 손상을 입은 것이 보였고, 이는 대부분에서 같은 결과를 얻을 수가 있었다.

### III. 결 론

LIF 플라즈마 진단을 위해서는 플라즈마를 구성하는 이온이나 중성 종의 흡수 spectrum을 알고 그에 해당하는 Laser를 얻는 것이 가장 중요하다. 이를 위해 고체 색소레이저를 제작하였고 파장 가변인 고체 색소레이저를 공진기를 설치하여 우리가 원하는 파장대의 Laser를 발진하는데 성공을 하였다.

Solid-state dye cell 제에서 처음에는 온도조절에 실패하여 Bubble이 생기는 등 많은 애로 사항이 있었으나 여러 번의 제작 과정에서 습득한 노하우를 바탕으로 나중에는 좋은 solid-state dye laser를 얻을 수가 있었다.

먼저 Spectro-photometer를 이용하여 흡광도를 측정하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 농도, 두께에 따라 값의 큰 차이를 보여 람베르트 ( $Absorbance$ ) =  $\log_{10}(I_0/I)$ 를 어느 정도 만족한다는 것을 알 수 있었다.

He-Ne laser를 써서 균질도와 편평도를 살펴보았다. 실험결과 비교할 상대를 얻지 못하여 직접적인 비교를 하지는 못하였으나 균질도는 좋게 평가되었고, 편평도는 더욱 연구해야할 것으로 결론을 얻었다.

제작된 solid-state dye laser를 가지고 발진 실험을 하였는데 Oxasine 720, DODC Iodide는 발진되는 양이 미진하였다. 그래서 다른 Dye를 가지고 만든 Solid-state dye cell을 가지고 발진 실험을 하였다. 실험 결과 Rhodamine 640, LDS 698, DCM Mutagenic은 특히 발진이 잘 되었다.

그리고 공진 회로를 설계하여 고출력의 Tunable laser를 얻었고 tunable에 대한 특성 실험을 몇 가지 하였다. 그 결과 공진기를 거치지 않은 레이저에 비해 power가 좋은 레이저를 얻을 수 있었고, Spectrometer의 resolution이 나빠 결과를 얻지를 못하여 다른 장비를 이용하여 측정해야할 것으로 보이나 고체 색소레이저를 LIF 플라즈마 진단에 응용이 가능함을 찾을 수가 있었다. 하지만 개선해야할 부분도 몇 가지 발견하였다. pumping 레이저에 의한 고체 색소 쉘의 손상으로 같은 출력의 레이저를 계속적으로 얻을 수 없어 이에 대한 개선이 요구되고 고체 색소레이저의 출력을 높이기 위해 새로

은 공진기를 설계할 필요성이 제기 되었으며, 실제 적용하기 위해서는 시스템을 간소화해야 하겠다. 고체 색소 레이저 제작의 성공은 여러 응용 분야에 이용가능하기 때문에 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 보인다.



## 참 고 문 헌

A. Brockhaus, Y. Yuan, St. Behle, and J. Engemann, "Determination of chemically active species in a novel microwave plasma source by laser-induced fluorescence", American Vacuum Society, May/June 1996, pp 1882-1887

Dhiraj K. Sarbar, Rayion M. Yow, and Michael L. Mayo, "Optical characterization of a laser dye in a solid state host.", Journal of applied physics, vol. 89, 12, pp 7739-7744

D. Lo, S. K. Lam, C. Ye, K. S. Lam, "Narrow linewidth operation of solid state dye laser based on sol-gel silica" Optics Communications, 15 November 1998, pp. 316-320



F. J. Duarte, A. Costela, I. Garcia-Moreno, R. Sastre, J. J Ehrlich, T. S. Taylor, "Dispersive solid-state dye laser oscillators" Optical and Quantum Electronics 29 (1997) pp 461-472

F. J. Duarte, "Tunable lasers handbook", Optics and Photonics, 1995, Academic Press, pp 167-174

F. P. Schafer, "Dye lasers," 1997, Springer-verlag Berlin Heidelberg New York, pp 32- 52

Gwon Lim, Do-Kyeong, Hyun Su Kim, Byung Heon Cha and Jongmin LEE, "Single longitudinal mode operation of a solid-state dye laser oscillator", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 37, No, 5, November 2000, pp. 783-787

Katsunori Muraoka, Mitsuo Maeda, "Laser-Aided Diagnostics of Plasmas and gases.", Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, pp 12-19

Michifumi Nagawa, Musubu Ichikawa, Toshiki Koyama, Hirofusa Shirai, Akihito Hongo, Shinji Tsuji, Yoshiaki Nakano, "Organic solid-state distributed feedback dye laser with a nonmorphological modification grating.", Applied physics letters, vol. 77, 17, pp 2641-2643

Orlando Auciello, Daniel L. Flamm, "Plasma Diagnostics", Vol. 1 Discharge parameter and chemistry, Academic Press INC, pp 19-35

Roberto Sastre and Angel Costela, "Polymeric solid-state dye lasers", Advanced materials, 1995. 7, No. 2

Wentao Hu, Hui Ye, Chuangdong Li, Zhonghong Jiang and Fuzheng Zhou, "All-solid-state tunable DCM dye laser pumped by a diode-pumped Nd:YAG laser", Applied optics, vol. 36, No. 3, pp 579-583

Yigui Li, Minoru Sasaki and Kazuhiro Hance, "Fabrication and testing of solid polymer dye microcavity lasers based on PMMA micromolding", Journal of micromechanics and microengineering, 11(2001), pp 234-238

고도경, 이종민, 차병현, 이종훈, 이강수, 김성호, 임 권, "파장가변 고체색소레이저용 플라스틱 색소셀 개발 및 광특성 연구" 최종보고서, 한국원자력연구소.

## 감사의 글

먼저 이 논문을 완성하기까지 많은 귀지람과 채찍으로 저를 이끌어주신 이현주 교수님께 감사의 말을 전합니다. 평소에 웃으시다가도 실험에 임할 때는 호되게 저를 채찍질해주셨기에 조그마한 결실을 맺은 것 같습니다. 이현주 교수님 정말 감사합니다. 그리고, 학과에서 많은 가르침을 주셨던 이윤준 교수님, 박재우 교수님, 바쁘신 와중에도 이 논문을 심사해주신 천원기 교수님, 정범진 교수님, 항상 큰 형님같은 김신 교수님께도 진심으로 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 실험을 위해 많은 조언을 아끼지 않은 한국원자력연구소 레이저공학팀의 고도경 박사님께 감사의 말을 전합니다. 그리고 학과 사무실에서 항상 저를 도와주신 현종관 선생님, 박숙희 선생님께도 감사의 말을 전합니다.

7년여 동안 같이 공부하고 같이 고민했고, 항상 내가 힘들어 할 때 옆에서 용기를 주었던 준호형과 상범이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 실험할 때 많은 조언을 해주셨던 경진이형, 항상 옆에서 나를 도와주었던 계홍이, 그리고 실험실에서 나를 도와준 실험실 식구인 경현이, 은재, 곤성이에게도 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 지금은 학교에 계시지 않지만, 현식이형, 진석이형, 재광이형, 상훈이형, 영동이형, 성택이형, 보안, 정선, 현조에게도 고마움을 전합니다.

제게 항상 힘이 되어 주셨던 큰 형님 내외분, 작은 형님 내외분, 큰 누님 내외분, 작은 누님 내외분께 감사의 말을 전하고, 사랑하는 여섯 조카들의 커다란 사랑을 기억할 것입니다. 내가 힘들어할 때 항상 저를 지켜봐 주고 용기를 준 은혜에게도 고맙다는 말을 전합니다.

느지막이 저를 낳아 저 때문에 몸 고생, 마음 고생하신 제가 세상에서 가장 존경하는 부모님께 이 논문을 바칩니다. 자신은 힘들어하시면서 자식 뒷바라지에 소홀함이 전혀 없으셨던 두분, 정말 사랑합니다. 어머님께서 하신 말씀이 생각이 불현듯 지나갑니다. 저를 낳으시고 아버님이 간난 저를 보고 “요거 커서 사람 될거냐? 말거냐?” 고 말을 하셨다고 합니다. 그리 훌륭한 자식은 못되지만, 부모님께 항상 감사해하고 항상 존경하는 그런 아들이 되겠습니다.