



KR0100930

KAERI/RR-2063/99

다이오드 레이저를 이용한 의료용 펄스형 고체 레이저 기술개발

(최종보고서)

2000. 9.30.

주관기관 : 한국원자력연구소
참여기업 : (주) 금 광
이레약품 (주)

산 업 자 원 부

32 / 48

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

제 출 문

산 업 자 원 부 장 관 귀 하

본 보고서를 "다이오드 레이저를 이용한 의료용 펄스형 고체 레이저 기술개발" (개발기간 : 1997.10.1. ~ 2000. 7. 31.)과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2000年 9 月 30 日

개발사업주관기관명 : 한국원자력연구소

개발사업총괄책임자 : 김 철 중

연 구 원 : 김 민 석

공업기반기술개발사업 보고서 초록

| | |
|--|----------------------------------|
| 관리번호 | C00-971-2206-01-2-2 |
| 과제명 | 다이오드레이저를 이용한 의료용 펄스형 고체레이저 기술 개발 |
| 키워드 | 다이오드/ 레이저/ 의료용/ Er/ Tm |
| 개발목표 및 내용 | |
| <p>1. 최종 개발목표</p> <p style="text-align: center;">다이오드 레이저 펌핑형 의료용 Er/Tm 레이저 개발</p> <p>성능</p> <p>Er:YAG - 출력파장 : 2.9 um - 평균출력 (펄스형발진) : 2W 이상 - 펄스 에너지 : 100mJ</p> <p>Tm:YAG - 출력파장 : 2.0 um - 평균출력 (CW발진) : 2W 이상</p> <p>2. 당해연도 개발내용 및 결과</p> <p>연구내용</p> <p>A. 다이오드 레이저 펌핑형 Er 레이저 발진부 설계 및 제작</p> <p style="padding-left: 20px;">* Er:YLF 및 Er:BYF 레이저 레이저 발진 및 분광 특성 연구</p> <p style="padding-left: 20px;">* 측면여기 펌핑 광학계 설계 및 제작</p> <p>B. 펌핑용 다이오드 레이저(펄스형) 전원 구동장치 설계 및 제작</p> <p style="padding-left: 20px;">* Er 레이저용 다이오드 전원장치 제작</p> <p style="padding-left: 40px;">(low duty, high current)</p> <p style="padding-left: 20px;">* 레이저 동작 변수 microprocessor 제어 장치 개발</p> <p style="padding-left: 20px;">* LCD display 장치 개발</p> | |

C. 다이오드 레이저 펄핑형 Er 레이저 제작

- * 레이저 발진장치 기계적인 구조 제작
- * 전원 및 냉각장치 시제품 제작

연구결과

다이오드 여기 펄스형 Tm:YAG / Er:YFL 레이저
시제품 제작

성능 :

- 평균출력 : 1.2 W

3. 기대효과(기술적 및 경제적 효과)

- 고출력, 고효율 레이저 등장으로 의료용, 산업용, 군용 등에 더 많은 활용으로 긍정적인 면의 경제적 및 기술적인 파급효과 기대.
- 국내 레이저 기술의 발전적인 상승효과 기대
- 부가가치가 높은 다이오드 구동 전원장치의 자체 개발로 전원 장치 부분의 국내기술 향상 효과

4. 적용분야

- Tm 레이저는 광섬유 전송에 의한 정형외과 및 관상동맥 심장 질환 치료에 적용가능하며, Er 레이저는 높은 물의 흡수를 이용하여 피부성형 수술 및 치아의 경조직 치료분야에 적용이 가능하다.

목 차

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 제 1 장 | 서 론 | 5 |
| 제 2 장 | Er 및 Ho/Tm 의료용 레이저 특성 및 시장 전망 | 8 |
| 제 1 절 | 의료용 레이저 시장 동향 및 전망 | 8 |
| 제 2 절 | Er 및 Ho/Tm 레이저 특성 및 치료분야 | 26 |
| 제 3 절 | Er 및 Ho/Tm 레이저 시장 전망 | 29 |
| 제 3 장 | 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 개발 | 31 |
| 제 1 절 | Tm:YAG 특성 연구 및 설계 (1 차년도 수행분) | 31 |
| 제 2 절 | Tm:YAG 레이저 제작 및 성능 시험 (2 차년도 수행분) | 49 |
| 제 4 장 | 다이오드 레이저 여기 Er:YLF 개발 | 60 |
| 제 1 절 | Er:YLF 특성 연구 및 설계 | 60 |
| 제 2 절 | Er:YLF 제작 및 성능 시험 | 63 |
| 제 5 장 | 다이오드 레이저 구동 전원장치 개발 | 66 |
| 제 1 절 | 전원장치 설계 및 제작 (1 차년도 수행분) | 66 |
| 제 2 절 | 전원장치 모듈화 및 성능 시험 (2 차년도 수행분) | 70 |
| 제 6 장 | 결 론 | 74 |
| 부 록 | | 77 |
| | 참고 문헌 및 본 연구에서 발표/게재된 논문 | 77 |

제 1 장 서 론

레이저 발명이후 레이저에 의한 원격 전송 및 광반응 특성을 산업분야에서 가장 먼저 활용된 것이 의료분야로서 1960 연대부터 안과에서 망막의 치료에 Ar 레이저가 사용되어 왔다. 지난 30 년간 의료분야에서 레이저의 종류도 CO₂, Nd:YAG, KTP, diode, Er:YAG, Ho:YAG, dye, Excimer, 등 다양해졌으며, 현재는 안과뿐만 아니라 피부과, 치과, 정형외과, 심장치료, PDT 등의 다양한 의료분야에서 레이저가 활용되고 있다.

레이저의 의료분야에서의 치료 효과는 인체의 2/3 를 구성하고 있는 물과 레이저의 상호작용을 이용하거나, 인체 구성 성분인 멜라닌, 헤모글로빈 등의 레이저 파장에 따른 흡수 차이를 이용하고 있다. 즉, 물의 흡수를 이용하는 경우는 Er:YAG, CO₂ 및 Ho:YAG 이며 흡수율은 Er:YAG, CO₂, Ho:YAG 순서이나 Ho:YAG 는 석영광섬유 전송이 가능하여 인체 내부 등의 치료에 가장 적절하다. 그러나, CO₂ 레이저가 장치가 저렴하고 가장 먼저 의료분야에 적용되어 물의 흡수를 이용하는 피부과 등에서 가장 널리 사용되고 있으나 Er:YAG 및 Ho:YAG 레이저가 특수한 치료 등에서 활용이 증대되고 있다.

인체 구성 성분의 레이저 파장에 따른 흡수차를 이용하는 것은 Ruby 나 dye 레이저를 이용하여 피부의 질환을 치료하거나, 헤모글로빈의 Nd:YAG 레이저 흡수를 이용한 지혈치료 등이 있으며, 최근에는 간경화 치료에 광섬유로 전송된 Nd:YAG 를 이용하여 국부적으로 가열하는 방법도 도입되고 있다. Nd:YAG 는 인체의 2/3를 구성하는 물의 투과성이 좋으며 간을 구성하는 헤모글로빈 등에 흡수가 잘되어 간의 국부적인 가열치료에는 가장 적절하다.

이와 같이 레이저는 다양한 의료분야에서 여러 종류의 레이저가 사용되어 왔으나, 일반적으로 Nd:YAG, Er:YAG, Ho:YAG 등의 고체레이저의 입력 전

력 대비 레이저 출력의 비가 매우 낮아서, 많은 출력을 내기 위해서는 냉각이 필요하게 되었으며, 의료용 고체레이저는 대부분 물을 이용한 냉각장치를 수반하게 되었고, 고체 레이저 발전에 사용되는 lamp 도 자주 교체하여야 되는 어려움이 발생되었다.

그러나, 최근에 산업용 diode 레이저가 본격적으로 개발되며, 가격도 저렴해 짐에 따라, 기존의 lamp 여기형 고체레이저를 대신하여 diode 레이저 여기형 고체레이저의 산업 및 의료분야 적용 가능성이 커지게 되었다. Diode 레이저 여기형은 효율이 lamp 여기형에 비해 5 배 이상이나 좋아서, 물에 의한 냉각을 공냉식으로 전환시킬 수 있으며, diode 레이저의 수명도 10,000 시간 정도나 되어, 유지 보수가 용이하고 사용이 편리한 diode 레이저 여기형 레이저의 활용이 의료 및 산업분야에서 증대되고 있다. 그림 1-1 은 의료용 레이저의 시장동향을 보여주고 있으며, diode 여기형 고체레이저의(DPSSL : Diode Pumped Solid-state Laser) 신장세와 lamp 여기형 고체레이저의 축소가 돌보인다.

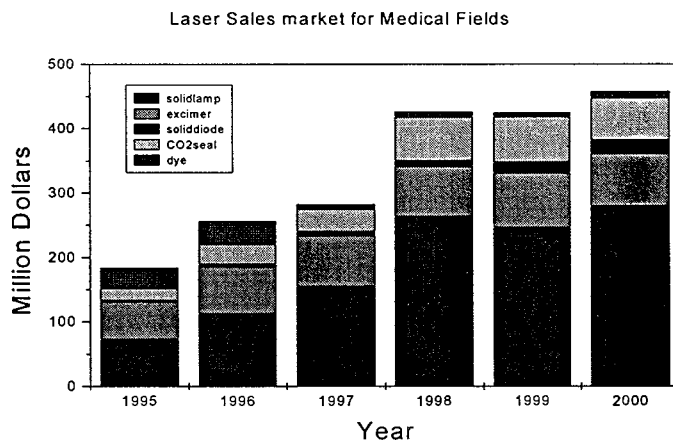


그림 1-1 의료용 레이저의 시장 동향 (Laser Focus, Jan. 2000)

이러한 시대적 추세에 맞추어 본 과제에서는 물의 흡수가 가장 좋은 Er:YAG 와 물의 흡수도 좋고 광섬유 전송도 가능한 Ho:YAG 레이저를 diode 레이저 여기형으로 개발하는 것을 목표로 하였다. Diode 레이저 형 개발에서는 출력 파장이 Er:YAG 와 Ho:YAG 와 같으나 diode 레이저의 흡수가 유리한 Er:YLF 와 Tm:YAG 를 개발하게 되었다. 그러나, diode 레이저 여기형 Er 및 Tm 레이저는 세계적으로 아직 개발단계이어서 정보 부족, 관련 광학 부품의 성능 미달 또는 특성 차이, 그리고 설계상의 실수 등에 따라 어려움이 많았으나, 공동연구기관인 폴란드의 MUT 와 같이 정보를 교환하며 국내에서 처음으로 diode 레이저 여기형 Er 및 Tm 레이저를 개발하게 되었다.

제 2 장에서는 상품화를 위한 의료용 레이저의 시장 동향 및 전망을 조사 분석하였으며, 특히, 2.9 μm 및 2.0 μm Er 및 Ho(Tm) 레이저의 시장 동향 및 전망을 집중적으로 조사하여 향후 상품화에 대비하였다. 제 3 장에서는 1 차 및 2 차 연도에 걸쳐 수행한 diode 레이저 여기형 Tm:YAG 레이저 개발에 대하여 기술하였으며, 제 4 장에서는 2 차 연도에 수행한 diode 레이저 여기형 Er:YLF 개발에 대하여 기술하였다. 제 5 장에서는 diode 레이저 구동용 전원장치의 개발 및 성능시험에 대하여 기술하였으며, 제 6 장 결론에서는 상품화 전략에 대하여 기술하였다.

제 2 장 Er 및 Ho/Tm 의료용 레이저 특성 및 시장 전망

제 1 절 의료용 레이저 시장 동향 및 전망

1. 의료용 레이저 시장 동향 및 전망

현재 국내의 의료용 레이저는 대부분 수입되고 있으므로, 의료용 레이저 개발에 있어 상품화를 대비하고 외국제품과 경쟁하기 위해서는 의료용 레이저의 시장 동향 및 전망 조사와 외국 경쟁회사에 대한 분석이 필수적이다. 따라서, 전문 의료분야의 시장조사기관인 Medical Data International Inc. 의 1998년 최신판 “ Worldwide Markets for Medical and Dental Lasers ”를 이용하여 레이저 시장 동향 및 전망을 조사하고 외국 경쟁회사에 대하여 분석하였다.

의료용 레이저는 진료분야별 치료용 레이저, 일반수술용 레이저, 기타 레이저로 구분되며, 일반수술용 레이저는 주로 일반 수술시 절단 및 응고용 레이저를 말하며, 기타 레이저는 결석 제거용 레이저, 혈류 측정레이저를 비롯한 각종 진단 및 검사용 레이저를 포함하나, 의료용 레이저 시장동향의 조사 및 분석에서는 시장 규모의 대부분을 차지하며, 또한, 성장 속도가 빠른 진료분야별 치료용 레이저 기기에 한정하였다. 진료분야별 치료용 레이저는 치과용, 안과용, 피부과용, 심장치료용, 암치료용, 생리적 자극치료용 등이 있으나, 시장 규모의 대부분을 차지하고, 성장 속도가 빠른 치과용, 안과용, 피부과용, 심장치료용에 한정하여 시장동향을 조사, 분석하였다.

가. 치과용 레이저

치과용 레이저의 연도별 세계 시장 규모는 그림 2-1 과 같으며

1997-2002 년동안 평균 37 % 의 성장이 예상되고 있으나 Er:YAG 레이저가 평균 86 % 로 성장을 주도하고 있다. 이는 초기에는 치과용 레이저가 Soft Tissue 치료에만 FDA 승인을 받았었으나, Hard Tissue 치료에 주로 사용되는 Er:YAG 레이저가 1997 년 5 월에 미국 FDA 의 승인을 얻게 됨에 따라 Er:YAG 레이저의 비중이 증대될 것으로 전망되고 있다. 미국의 연도별 Hard Tissue 와 Soft Tissue 의 치료 전망은 그림 2-2와 같으며 Hard Tissue 치료 가 약 3 배로 전망되고 있어 Er:YAG 레이저의 신장세를 전망할 수 있다.

치과용 레이저는 Ion Laser Technology, Lares Research, Aesculap-Meditec (AM), HGM Medical, American Dental Technologies, Premier Laser Systems (PLS), ESC Medical Systems, Biolase Technology (BT) 8 개사가 세계 시장의 반 이상을 차지하고 있으며, 향후 8 개사의 비중 이 더욱 커질 것으로 전망되며, 특히, Hard Tissue 치료용 Er:YAG 를 생산하 는 PLS, BT, AM 3 개사의 비중이 확대될 것으로 전망된다.

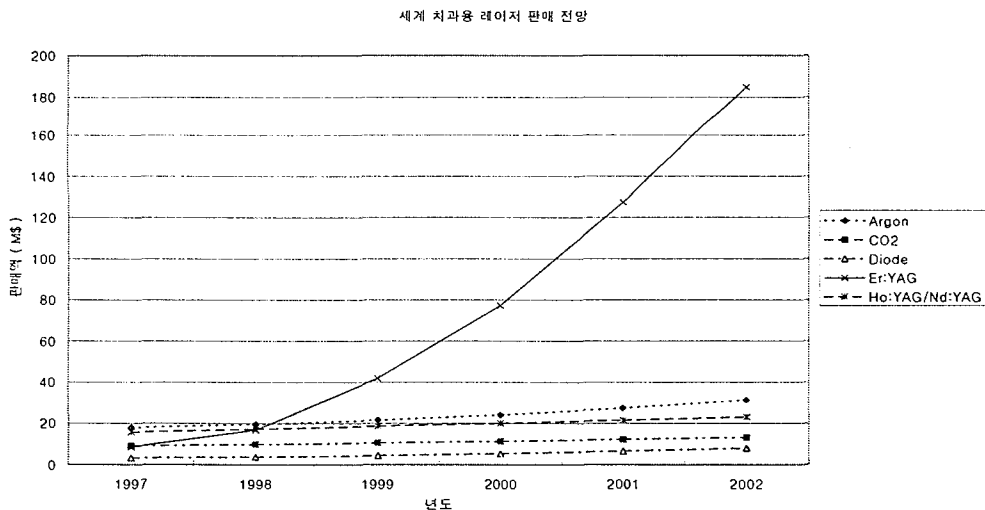


그림 2-1 세계 치과용 레이저 판매 전망

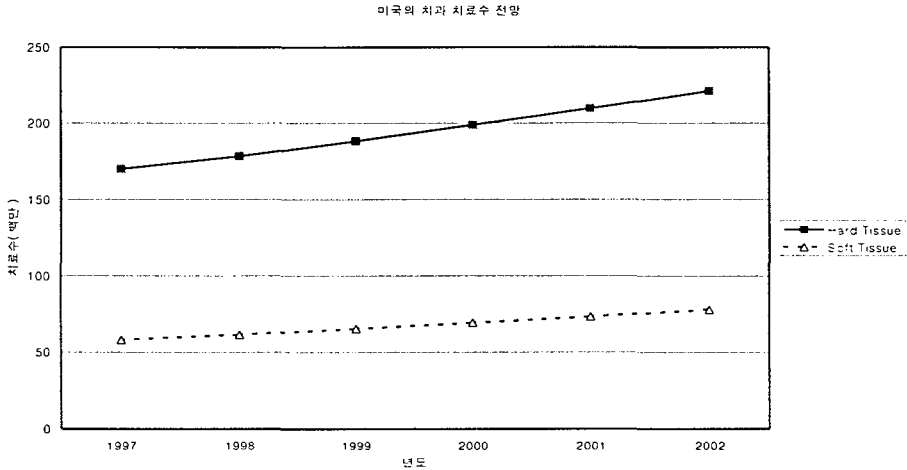


그림 2-2 미국의 치과 치료수 전망

나. 피부과용 레이저

피부과용 레이저의 연도별 세계 시장 규모는 그림 2-3 과 같으며 1997-2002 년동안 평균 47 % 의 급성장이 예상되고 있으나, Er:YAG 레이저의 급속한 신장세가 돋보인다. 대표적인 피부과 레이저 치료인 Blepharoplasty (안검성형: 눈주위 성형), Vascular Lesion Removal (혈관이상 등의 치료), Laser Skin Resurfacing (피부 재생) 중 노년층의 인구 증가에 따른 피부재생 수요 증대에 따라 Er:YAG 레이저의 급성장이 전망된다. 초기에는 피부재생에 주로 CO2 레이저가 사용되었으나, 1996 년 Er:YAG 레이저가 FDA 승인을 받으면서 비중이 증대되고 있다.

피부과용 레이저는 ESC Medical, Coherent Medical, Candelar, Aesculap-Meditec, HGM Medical, Iridex, Iris Medical, Parlomar Medical, Cynosure 8 개사가 세계 시장의 반을 차지하고 있으며, 앞으로는 8 개사의 비중이 더욱 커질 것으로 전망된다.

세계 피부과용 레이저 판매 전망

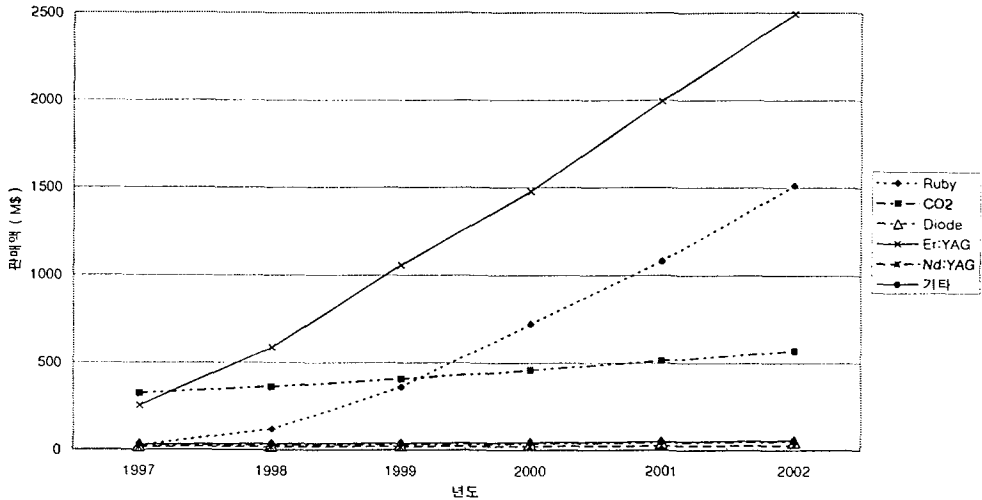


그림 2-3 세계 피부과용 레이저 판매 전망

다. 안과용 레이저

안과용 레이저의 연도별 세계 시장 규모는 그림 2-4 와 같으며 1997-2002 년동안 평균 10 % 의 꾸준한 성장이 예상되고 있으며 시력 교정 용 ArF Excimer 와 Ho:YAG 의 전체 시장의 약 50 %를 점유하고 있다. 의료 분야에서 가장먼저 적용된 레이저가 안과용이며 이는 레이저를 이용하여 눈속 의 원격 치료가 가능하기 때문이며, 특히, 다른 방법으로는 불가능한 치료가 가능하여 기존의 외과적인 수술을 대체할 수 있어 안과에서의 레이저 활용은 매우 광범위하다. 레이저 치료에는 고가의 장비를 필요로 하나 레이저 수술의 간단함, 레이저 수술의 신속성, 및 환자의 빠른 회복이 고가의 비용을 보상하고 있다.

현재, 대표적인 안과용 레이저 치료는 녹내장 치료인 laser trabeculoplasty, 당뇨병에 의해 출혈에 의한 각막 손상을 치료하는 diabetic

retinopathy, 초음파에 의한 백내장 제거보다 주변에 손상이 적은 백내장 치료인 cataract removal, 당뇨병 또는 다른 물리적인 상해에 의한 망막의 격리를 치료하는 retinal detachment, 시력 교정을 위한 photorefractive surgery 가 있다. 최근에 photorefractive surgery 에서 Excimer 레이저를 이용하는 LASIK (Laser-Assisted In Situ Keratomileusis) 과 Ho:YAG를 이용하는 LTK (Laser Thermal Keratoplasty) 가 FDA 의 승인을 얻음에 따라 안과용 레이저의 활용이 증대되고 있다. 녹내장의 치료에는 주로 Ar 레이저가 이용되며 Ho:YAG 도 같이 사용되고 있고, 당뇨 치료에는 Ar 레이저가 효과적이며, 백내장 치료에는 최근에 초음파 대신에 Er:YAG 로 제거하는 방법이 FDA 의 승인을 득하여 Er:YAG 레이저의 안과치료 활용의 증대가 예상되고 있다.

안과용 레이저 시장은 크게 일반 안과용 레이저와 시력교정용 레이저로 나눌 수 있으며, VISX, Summit Technology, LaserSight Technology, Autonomous Technologies 와 Bausch & Lomb Surgical Division 의 5 개사는 시력교정용 레이저만 생산하며, Iridix, Carl Zeiss 과 HGM Medical 의 3 개사는 일반 안과용 레이저만 생산하고, Nidex, Aesculap-Meditec 과 Coherent Medical 3 개사는 모든 안과용 레이저를 생산하고 있다. 시력교정 및 일반 안과용에 있어 세계시장의 대부분을 10 개 미만의 전문회사가 독점하고 있으며, 치열한 경쟁에 따라 초기에 성공적이던 Sharplan, Alcon Laboratories, 및 Keeler Instruments 사 등이 수년 전에 안과용 Ar, diode 및 Q-switched Nd:YAG 레이저 사업을 포기하였고, 따라서, 국내에서 당장 개발하여 따라가기는 어려운 분야이다. Sunrise Technologies 의 LTK 용 Ho:YAG 가 2000.6.30. FDA 의 승인을 받음에 따라 원시치료에 활용이 확대될 것으로 전망된다.

세계 안과용 레이저 판매 전망

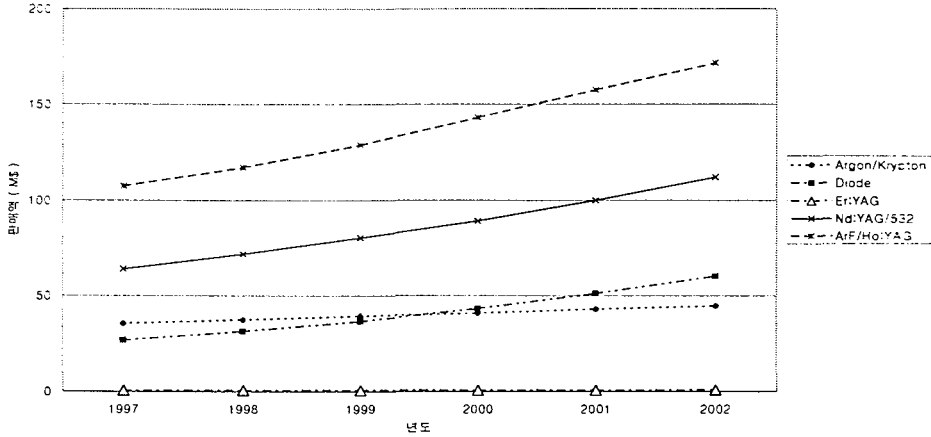


그림 2-4 세계 안과용 레이저 판매 전망

라. 심장수술용 레이저

심장수술용 레이저의 연도별 세계시장 규모는 그림 2-5 와 같으며 1997-2002 년동안 평균 150 % 의 급속한 성장이 예상된다. 1994 연도 미국의 관상동맥의 질환 환자수는 14 백만명에 달하며 이중 1995 연도에 75 만명이 사망하여 관상동맥의 막힘에 의한 사망률은 매우 높다. 관상 동맥의 막힘을 치료하는 방법은 balloon을 이용하는 PTCA (Percutaneous transluminal Coronary Angioplasty), 혈관내의 막힌 것을 긁아 내는 Atherectomy, 혈관 이식 방법인 CABG (Coronary Artery Bypass Graft), 심장 이식법 등이 있으며, 레이저를 이용한 TMR (Transmyocardial Revascularization) 은 CO₂, Excimer 나 Ho:YAG 를 이용하여 심장벽에 레이저로 구멍을 뚫어서 심장내부에서 바로 심장벽으로 혈관을 만들어 주는 방법으로 현재 다른 방법으로 치료가 불가능한 환자에게 적용하고 있다. 1997 연도에 세계적으로 180 만명이 관상 혈관 수술을 받았으며, 100 만명은 PTCA, 65 만명은 CABG, 15 만명은

Atherectomy 치료를 받았으며 PTCA 및 Atherectomy 치료 환자중 55 만명이 stent (혈관의 재수축을 방지하는 기구물)를 사용하고 있다. 재발 방지를 위한 stent 의 시장만 해도 1997 연도에 12 억불에 달하고 있어 심장병 치료시장의 규모를 알 수 있다.

레이저 심장 혈관 재생술인 TMR 에 있어 CO2 와 Excimer 레이저는 가슴을 절개하고 심장 밖에서 내부로 구멍을 뚫으나, Ho:YAG 레이저는 광섬유 전송이 가능하여 심장 내부로 전달되는 광섬유를 통하여 가슴을 절개하지 않고도 심장 치료가 가능하여 가장 혁신적인 심장치료 기술이다. 1999년에 TMR 이 FDA 의 승인을 얻고 Medicare에서 보상해 주게 되어 앞으로 TMR 에 의한 심장 치료는 급속히 증가할 것으로 전망되고 있다.

심장수술용 레이저 시장은 Ho:YAG를 판매하는 Eclipse, CardioGenisis, CorMedica, Trimedyn e 와 ESC Medical Systems 와 Excimer 레이저를 판매하는 AccuLase 와 US Surgical Corporation 과 CO2 레이저를 판매하는 PLC Systems 의 8 개사가 세계 시장을 독점할 것이며 Ho:YAG 의 시장 규모가 커질 것으로 전망된다.

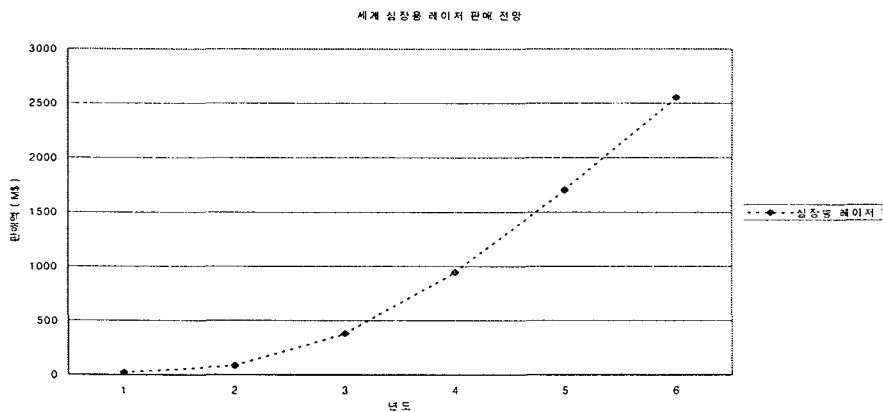


그림 2-5 세계 심장수술용 레이저 판매 전망

2. 최근의 의료용 레이저 활용 동향

최근의 의료용 레이저 활용에 대한 조사는 지난 7.4-7.8 일간 네델란드에서 열린 의료용 레이저 치료학회인 EBios 2000 의 발표 내용을 요약 정리하였다.

가. 피부과 레이저 치료

피부과의 빛을 이용한 치료는 1903 년에 PDT(Photo-dynamic Therapy)가 시도되었으며, 레이저 수술은 1964 년부터 시작되어 현재는 보편화되었다. 주로 피부를 구성하는 물, hemoglobin, melanin 의 레이저 흡수를 이용하고 있으며 주름제거, 쌍꺼풀, 문신 및 점제거, 혈관성 질환, 털 제거 및 털 이식 등의 치료에 매우 중요한 의료기기가 되었다. 새로운 레이저가 처음에 의료에 적용되면 임상실험 부족 및 사용상의 교육부족 등에 의해 레이저 제작자와 의사와의 사이에 레이저 장치의 성능에 대하여 상호 오해가 발생하는 문제가 있으며, 레이저 시술이 증대됨에 따라 문제가 해결되고 있으나 일부의 경우에는 수년간의 치료에도 치유가 안되는 경우도 있다. 레이저 치료후에 피부의 색깔이 주변보다 색상이 더 세지거나 약해지기도 한다. 레이저 주름살 제거는 피부 표면을 레이저로 일종에 화상을 입히고 피부의 재생 효과를 이용하는 것으로 매우 큰 수술이며 회복기에서 매우 주의가 필요하다. 그러나, 레이저 피부 치료에 있어 일반적으로 환자의 기대가 매우 커서 문제를 야기시키는 경우도 있어 레이저 치료의 성능 및 문제점 등에 대하여 사전 홍보가 필요하다.

피부과의 레이저 치료에는 주로 CO2 레이저와 Er:YAG 레이저가 이용되고 있다. 10.6 um 파장의 CO2 레이저는 물의 흡수가 매우 높아 피부의 물을 가열시켜 피부 표면을 제거시킬 수가 있어, 절개나 주름살 제거 등에 이용되고 있다. 주로 연속발진형이 사용되며 scanner 와 지시용 레이저가 장착

피부과외 레이저 치료에 있어 피부의 70% 나 되는 물의 흡수가 높은 CO₂ 와 Er:YAG를 주로 사용하여 순간적인 물의 기화에 따라 피부를 탄력화시키는 ablation에 의한 시술이 많이 이루어졌으나, 회복에 있어 여러 문제점을 발생시켜 최근에는 물의 흡수가 적절이 큰 1320 nm 의 Nd:YAG 레이저와 1.45 um diode 레이저를 이용한 치료도 시도되고 있다. 이 방법은

피부과외에의 이용이 늘고 있다.

이용되고 있으며, 사용이 편리하고 자기가이며 파장이 다양한 diode 레이저도 flashlamp 와 색린터를 이용하여 여러 대역별로 파장에 따라 치료하는 장치들이 이용되고 있으나, 여러개의 레이저 확보에 고비용이 요구되므로 강력한 Photo Thermolysis)에 의해 제거되며, 점의 증발에 따라 Ruby, 색소 레이저 피부의 점제거는 레이저의 파장별 흡수차이에 따라 SPTL (Selective 레이저도 상용화되고 있다.

레이저도 상용화되고 있다. 할 수는 없으며 산호 모란적이며, Er:YAG 와 CO₂ 를 같이 장착한 피부과외 다. 따라서, Er:YAG 나 CO₂ 중의 한가지 레이저가 피부과 치료에 더 좋다고 스형이지만 scanner 와 지시용 레이저로 한번에 넓은 부위를 시술할 수도 있 부에 3-4 번 반복 조사하는 것이 한계인 것으로 알려져 있다. Er:YAG 도 린 이자가 침투할 수가 없어서 깊은 부위의 수술은 어렵다. Er:YAG 의 경우 피 그러나 반면에 Er:YAG 는 수술시 피부 표면의 물을 제거하여 피부 깊숙히 레 수 열영양 손상층의 두께가 100 um 에 달하나 Er:YAG 는 수 um 로 작다. 게 수를 할 수가 있어 피부과외의 활용이 증대되고 있다. CO₂ 레이저의 경 배에 탄하며 고휘력의 펄스형 레이저로 피부의 열영양 손상부위층이 매우 작 2.9 um 의 Er:YAG 레이저는 수분의 흡수가 최대로 커서 CO₂ 레이저의 20 되어 있어, 수술 전에 레이저가 조사될 부위를 미리 보며 수술할 수가 있다.

non-ablation 에 의한 레이저 치료를 이용하며 장점은 피부 표면을 유지하며 피부 내층을 개조하는 정도로 위험성이 거의 없다.

폴란드의 Silesian Medical University 에서는 10 % ALA (δ -amino-levulinic acid, 독일 Medac GmbH)를 이용한 PDT를 Ar 레이저 여기 색소 레이저로 구강내 피부의 질환에 적용하여 25 명중 23 명이 완치 되었으며, 2 명이 부분치료 되었으며, 6 개월내에 2 명만이 재발되었다. 이와 같은 높은 치료율은 다른 병원에서도 보고되고 있어 구강내의 피부 질환에의 새로운 방법으로 제시되고 있다.

나. 심장 레이저 치료

관상동맥의 질환에 있어 약물치료, 풍선이용 확장 등의 시술 후에 최후의 방법으로 레이저로 심장벽에 구멍을 뚫어서 심장내부에서 심장근육으로 perfusion 에 의해 직접 혈관을 만드는 transmyocardial laser revascularization 이 이용되고 있다. 네델란드에서는 주로 CO₂, Ho:YAG 과 XeCl excimer 레이저가 이용되고 있으며, CO₂ 의 경우는 단일 펄스로 구멍을 뚫어서 구멍이 직선형태이며 Ho:YAG 와 XeCl 은 여러 펄스로 뚫어서 구멍이 다소 zigzag 형태를 가진다. 레이저로 심장에 구멍을 뚫어도 지혈효과에 따라 심장벽의 외부는 곧 막히게 되고 심장벽 내부에 혈관이 형성되게 된다. 시술 결과 환자의 통증은 크게 개선되나 사망률에서는 커다란 개선이 없었다고 한다. 개복수술 없이 보다 개선된 방법이 2 um 의 광섬유 전송이 가능한 Ho:YAG 로 심장내부에서 심장벽을 관통시키지 않고 구멍을 파내는 방법이 이용되나 구멍내는 위치를 제어하기 위한 복잡한 장치를 필요로 한다. 그러나, 이 방법은 아직 시술수가 충분하지는 않지만 사망환자가 발생하지 않고 있어 사망률에서 개선된 듯 하다.

체코의 Czech Technical University 에서도 2.0 um 의 Tm:YAG, 2.1 um 의 CTH:YAG 와 2.9 um 의 Er:YAG를 이용하여 심장벽 관통하는 효율이 3 mm/J (Tm:YAG), 0.03 mm/J (CTH:YAG) 와 10.5 mm/J(Er:YAG) 임을 실험 하여 밝혔으며 Er:YAG 의 경우 가장 열영향이 작음도 확인하였으며 Er:YAG 도 hollow tube 로 전송시켜 Er:YAG를 이용한 심장병 치료의 가능성도 제시 하였다.

다. 정형외과 레이저 치료

척추 휘는 것을 교정하기 위하여 광섬유 전송된 Ho:YAG 로 인위적으로 척추의 성장부위를 절단하여 동물이 성장시 척추가 휘게 되는 연구가 University of Heidelberg 에서 수행되었으며 교정이 가능한 것이 확인 되었다.

라. 비뇨기과 레이저 치료

전립선암은 미국의 남자에서 가장 흔한 암이며 사망률로는 2 번째이다. 전립선암의 치료에는 광섬유 전송된 레이저가 사용되고 있으나, 수술에 의한 치료를 대신하기 위하여 PDT 에 의한 시술이 미국 덴버의 Health ONE에서 630 nm 레이저로 수행되었으며 결과는 가능성을 보여 주었다. 다만, 투과효율을 높이고, 손상을 줄이기 위하여 보다 긴 파장에서 동작하는 sensititizer 에 대한 연구가 앞으로 필요하며 과도한 레이저 조사를 막기 위한 실시간 감시체계도 필요하다.

캐나다의 Alberta Cancer Research Center 에서는 전립선암의 PDT 치료 등에 사용할 새로운 photosensitizer 에 대한 연구를 수행하고 있으며 sensititizer 로 사용할 물질은 많이 있지만 독성 등에 대한 임상실험이 필요하여 새로운 안전한 sensititizer 개발의 어려움이 있다고 한다.

폴란드의 Silesian medical University 에서는 방광암을 635 nm 레이저와 ALA sensitizer 로 12 명을 시술하여 9 명에서 암이 퇴행되었으며 나머지 3 명에서도 신생물의 형성을 볼 수 있었으며 형광신호를 이용한 진단에 있어서는 방광암을 거의 100 % 검출할 수 있었다.

다. 안과 레이저 치료

러시아 Pavlov State medical University에서 Ar 레이저로 photo-coagulation 에 의해 당뇨 환자의 macular edema를 치료한 결과 레이저 치료 후 1 년 후에 시력 저하가 레이저 치료 안 한 것에 비해 1/2 로 줄어들어 효과적이었다. 망막의 정밀한 영상을 눈에서 발생하는 파면 왜곡을 보정하는 adaptive optics 기술을 이용하여 획득하는 연구가 Univ. of California San Diego 에서도 수행되고 있다. 안과 수술에 femtosecond 레이저 적용을 위한 연구를 독일의 Laser Zentrum Hannover 에서 토끼를 이용하여 수행하여 최적화한 결과, 열손상 부위가 1 um 이하이며, 압력은 수백 milibar 이하이었으나 물의 광분해와 같은 부작용도 발생하였다. 앞으로 안과에의 적용시에 부작용도 고려되어야 할 것이다.

바. 위장 레이저 치료

독일의 University of Heidelberg 에서는 복부의 암 진단 상태를 진단하기 위하여 복강경과 ALA 여기 형광신호를 이용하여 진단 상태를 진단하는 기술을 개발하였으며 ALA 의 함량과 ALA 투입후의 시간 등을 최적화하고 있어 복강경 형광신호 측정 방법이 새로운 복부의 암진단 상태 진단에 이용될 수 있다. 영국의 University Hospital Aintree 에서는 4 명의 식도암 환자를 mTHPC sensitizer 를 사용하여 652 nm 색소 레이저와 652 nm filtered

Xenon arc lamp 로 치료한 결과 오히려 Xenon lamp 가 더 낫은 결과를 보여 filtered Xenon lamp 의 PDT 사용 가능성을 보여 주고 있다.

사. 부인과 레이저 치료

자궁암 검사에 있어서도 5-ALA 에 의한 형광 신호를 분석하여 기존의 검사 방법보다 우수한 결과를 University of Munchen에서 얻었으며 1 % 5-ALA 와 60-90 분 의 지연시간에서 최적의 신호를 얻을 수 있었다. 스위스 Federal Institute of Technology 에서는 부인과의 형광신호 분석시에 형광신호 크기의 변화보다 lifetime 의 변화를 측정하는 방법을 개발하여 영상의 각부위 별로 lifetime 의 변화를 보여주는 장치를 개발하여 부인과에 적용하고 있다.

아. 신경외과 레이저 치료

일본의 Iwamizawa Municipal general Hospital 에서는 뇌종양 치료에서 HPE sensitizer 와 Ar 여기 색소레이저를 이용하여 완치율 65 % 의 성과를 보였으며, 가장 큰 종양크기는 4.6 cc 이었다. Sensitizer 주입후 2 일 후에 200 mW 레이저를 15 분간 조사하여 치료하였으며 종양의 크기가 크면 레이저를 반복하여 조사하였으며, 광섬유의 위치를 제어하기 위하여 3 차원 제어 장치를 사용하였다.

자. Photodynamic Therapy 레이저 치료

방광암의 PDT 치료에는 ALA에 의해 Protoporphyrin IX (PPIX) 가 축적 되어 이것이 광분해 (405 nm) 되어 산소를 발생시키는 데, 스위스의 Federal Institute of Technology 에서는 PPIX 의 축적되는 상태를 형광신호 분석에 의해 monitoring 하여 전 과정을 분석하였으며 또한, hexyl-ALA 가

ALA 보다 빠르고 효과적임을 밝혔고, 405 nm에서 0.5 J/cm² 정도로 치료할 수 있음을 보였으며, 유사한 연구가 독일의 University of Regensburg 에서도 Xenon light (400 - 700 nm)를 이용하여 수행중이다.

신생아의 황달치료에 있어 자외선이 이용되고 있으나 이집트의 Tabarak Children's Hospital 에서는 Ar 레이저의 자외선 파장을 이용하여 황달을 치유하기도 하고, 최근에는 소형의 477 nm 고체레이저로 치료하고 있으며, diode 여기 고체레이저를 이용하여 황달을 야기시키는 bilirubin 의 피부를 통한 간접적인 측정이 가능하게 하였다.

자. 내시경에 의한 레이저 전송

내시경 광섬유 가닥의 직경이 최소한 4 um 정도로 제한되므로 직경이 수 mm 이하의 작은 내시경은 분해능과 측정 범위가 제한을 받게 되며 이를 해소하기 위하여 미국 Univ. of Washington 에서는 단일 광섬유에 scanner를 붙여서 해결하는 기술을 개발중이며 가능성을 실증하였다. 광섬유의 직경을 제한하는 것은 광섬유가 가늘어지면 광섬유간에 cross-talk 가 발생하여 영상의 품질을 저하하게 되고 이를 개선하기 위한 연구가 폴란드의 Institute of Electronic Materials technology에서 수행되고 있다.

최근의 minimally invasive 의료용 진단과 시술에 있어 내시경은 필수이며 정밀한 수술을 위해서는 작은 구경의 내시경이 필요하다. 예로 눈도 1 mm 이하의 내시경으로 시술하면 자생으로 회복되는 등 1 mm 이하의 내시경의 개발이 요구되고 있다. 기존의 광섬유 방식은 0.5 mm 직경에서 10,000 pixel 정도의 분해능만 가능하여 의료용 진단 및 시술에는 분해능이 부족하여 스위스의 Fedral Institute of Technology 에서는 0.5 mm gradient index 렌즈에 의한 영상 전송을 이용하여 조명과 레이저 전송용 광섬유를 포함하여 0.89 mm

직경의 내시경을 개발하여 Ho:YAG 를 이용한 녹내장수술인 goniotomy 에 사용할 계획이다. 또한, 내시경을 high-definition TV 에 연결하는 연구도 수행중이며 1024 x 1024 pixels, 30 full frames/sec, 와 24 bit true-color 에 의한 정밀한 내시경 수술도 가능하게 될 것이다.

레이저 치료를 위한 광섬유 전송시 Q-switched 된 고출력의 레이저는 광섬유를 손상시켜 이용상의 제한을 받고 있으나 일본 Tohoku 대학에서 개발된 hollow tube를 이용하여 Czech Technical University 에서는 내경 540 um, 700 um, 1000 um hollow tube로 1.06 um 파장을 각각 397 GW/cm², 331 GW/cm², 과 185 GW/cm²를 전송시켰으며 0.532um 는 1000 um에서 48 GW/cm² 의 전송을 실증하여 고출력 레이저의 의료용 적용도 가능하게 되었다. 미국 FDA 에서는 레이저와 광섬유의 접촉을 렌즈를 이용하지 않고 hollow taper를 이용하여 355nm, 632nm 및 2.94 um 의 UV, VIS 및 IR 영역 전반에 걸쳐 고효율의 접촉을 가능케 하였으며 레이저 빔의 분포도 Gaussian mode 로 전환되어 안과의 망막 수술과 같은 정밀 수술에의 활용이 가능하게 되었다.

일반적인 석영유리를 이용한 광섬유는 2 um 이상의 전송이 불가능하나 2,94 um 의 Er:YAG 의 의료용 활용이 커지며 또한 형광신호에 의한 직장세포의 진단에서도 2 um 이상 적외선의 분석이 필요하여 체코의 Lab. of Inorganic Materials 에서는 2 um 이상의 적외선 파장의 전송이 가능한 광섬유를 개발하고 있다.

감상선암 치료에 LITT (Laser Induced Thermotheraph) 가 805 nm 와 980 nm diode 레이저를 2-3 W를 2-10 분간 광섬유로 조사하여 Chelyabinsk State medical Academy에서 성공적으로 시술되었다. 간의 metastates 치료에

있어 광섬유로 전송된 레이저를 이용하여 국부적으로 가열하여 치료하는 Laser Induced Thermotherapy (LITT) 가 Free University Berlin에서 수행되었으며 간의 내부에서 물과 hemoglobin 의 투과가 가장 좋은 레이저인 Nd:YAG 레이저를 광섬유 전송하여 사용하고 있으며, 온도 측정결과 약 30-40 도의 온도의 상승에 따라 치료가 수행된다.

차. 레이저 진단

독일 LMTB (Laser-und Medizin Technologie Berlin) 에서는 FTIR 분광측정을 이용한 3 X 3 mm 의 생체조직 검사에서 2 % 의 오차로 방광암 조직과 정상 조직을 판별할 수 있었으며 앞으로 암의 조기 진단에 기여가 예상된다. 위장의 진단에서 레이저 여기 형광을 측정하여 종양을 조기에 검출할 수 있으며, 직장 내시경에도 레이저 형광 신호를 이용하여 기존의 백색광 조명보다 더 민감하게 종양을 검출할 수 있어 종양의 조기 검출 및 진단에 레이저 형광기술의 활용이 기대된다. 암의 조기 진단에 Raman spectroscopy, FRIR 형광분석 신호가 이용되고, 반사 신호 측정 등의 다양한 방법이 동원되고 있으며 동시에 여러 방법을 사용하여 신뢰성을 높이고 있다.

카. 레이저와 생체 세포의 상호 작용 연구

세계적으로 약 5 백만명의 맹인이 녹내장에 기인하며 녹내장의 수술시에 표층의 세포에 손상을 주어 실패하는 경우가 있으나, 미국 University of Michigan 의 Center for Ultrafast Optical Science 에서는 femtosecond 레이저를 피부나 눈의 속에 집속시켜 photodisruption에 의해 초점부위에서 긴 펄스의 레이저와는 달리 열영향에 의한 손상을 주지 않고 정밀한 수술을 시행하는 방법을 발표하였으며, 특히 산란이 심하여 투과가 안되는 경우에도 1.7 um 과

2.2 um 의 적외선 파장을 이용하여 10 um 정밀도의 수술을 시행할 수 있으며, 775 nm 의 가시영역에서는 2.6 uJ, 150 fs, 1 khz 의 레이저와 산란을 줄이기 위한 피부에 탈수제를 같이 사용하는 방법도 성공적이었다.

3. 의료용 레이저 활용 전망

의료용 레이저는 피부과 및 심장 수술 등에 있어 주로 노년층에의 적용이 많으며 세계적으로 노년층의 비율이 점점 증대되는 추세에 따라 의료용 레이저 산업 전망을 분석하는 기관마다 의료용 레이저 산업의 급속한 성장을 예상되고 있다. 또한, 의료용 레이저 기기중 안과용과 피부과용이 가장 급성장할 분야로 예상되고 있는 데, 이는 안과의 시력 보정과 피부과의 주름 제거 등은 다른 경쟁기술이 없는 유일한 방법인데 반해, 치과용, 암치료용 등의 레이저 치료는 다른 기존 기술과 경쟁하여야 하므로 성장성이 다소 낮게 예상되고 있다. 미국의 2025 년의 65 세 이후의 노년층은 1990 년의 6 배에 달할 것으로 전망되며 이와 관련된 안과, 심장병, 피부과 등의 의료용 레이저의 성장이 전망된다.

치과용 레이저 시장에도 Diode 레이저의 견고성, 편의성, 고효율, 저가격 등의 잇점이 있어 Diode 레이저의 성장이 예상되나, 다른 레이저에 비해 매우 저렴하여 전체적인 판매는 크지 않다. 치아의 표백, 각종 레진 고화에 사용되는 Argon 레이저나, Soft Tissue 치료에 사용되는 CO2 및 Nd:YAG 레이저는 이미 포화상태로서 교체용 수요정도만 예상되며, 치과용 레이저중에서 Er:YAG 만 유일하게 급성장이 예상된다.

피부과용 레이저 시장은 최근 털 이식 및 제거의 시장규모가 괄목하게

성장하고 있으며 일부 투자회사의 전망에 의하면 30 억불 시장까지 예상하고 있다. 피부과용 레이저의 특징은 피부 재생 등에 있어 유일한 치료방법으로서 다른 선택의 여지가 없기 때문에 노년층의 인구 증가에 따라 시장 규모가 급성장할 것으로 전망되고 최근에는 여성뿐만 아니라 남성의 수요도 늘어나는 추세이다. 앞으로의 피부과용 레이저는 CO₂, Er:YAG, Ruby 레이저가 주도할 것으로 전망되며 대형 피부과용 레이저 회사는 여러 가지 피부과용 레이저를 함께 판매하며 시장 점유율을 높이고 있다.

안과용레이저는 시력교정용에 있어 PRK (Photorefractive Keratectomy), LASIK 및 LTK 등의 다양한 레이저 치료기술이 증상에 따라 원시, 근시 및 난시 치료에 활용이 가능하여 시력 교정용 레이저의 괄목할 만한 성장이 예상된다. 일반 안과에 있어서도 레이저 치료의 간단함, 신속성 및 빠른 회복에 따라 활용이 지속적으로 증대될 것으로 전망된다. 안과용 레이저는 고도의 기술을 요구하며, 치명적인 치료이기 때문에 세계적으로 몇 개의 전문회사가 독점할 것으로 전망되나, 장치 가격이 \$300,000 - \$500,000 로 매우 고가이어서 향후에 기술이 정착되면 국내외의 군소 회사가 가격경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 전망된다.

심장수술용 레이저는 CO₂ 레이저를 이용하는 PLC 가 FDA 로부터 최초로 승인을 받았지만 광섬유 전송에 의한 Ho:YAG 나 Excimer 레이저가 치료에 용이하고 회복이 빨라서 시장 규모면에서 커 질 것으로 예상된다. TMR 관련 레이저는 주로 미국에서 개발되고 있으며, 심장 혈관이 작아서 기존 치료에 어려움이 있는 아시아인에게 적합하여 향후 아시아 지역에서의 활용 확대가 예상된다.

제 2 절 Er 및 Ho/Tm 레이저 특성 및 치료분야

최근 의료분야에서 다이오드 레이저 여기 고체레이저를 활용하여 여러 질환 치료에 적용하는 치료기술이 급속도로 개발되고 있으며 점차 그 활용 분야를 넓혀가고 있다. 특히 $2.01\ \mu\text{m}$ (Tm:YAG) 및 $2.8\ \mu\text{m}$ [Er:YLF(LiYF₄)] 레이저는 발진파장이 그림 2-6 에서 볼 수 있듯이 물의 최대 흡수대역과 정확히 일치하므로 최근 의료분야에서 커다란 관심을 불러 일으키고 있다.

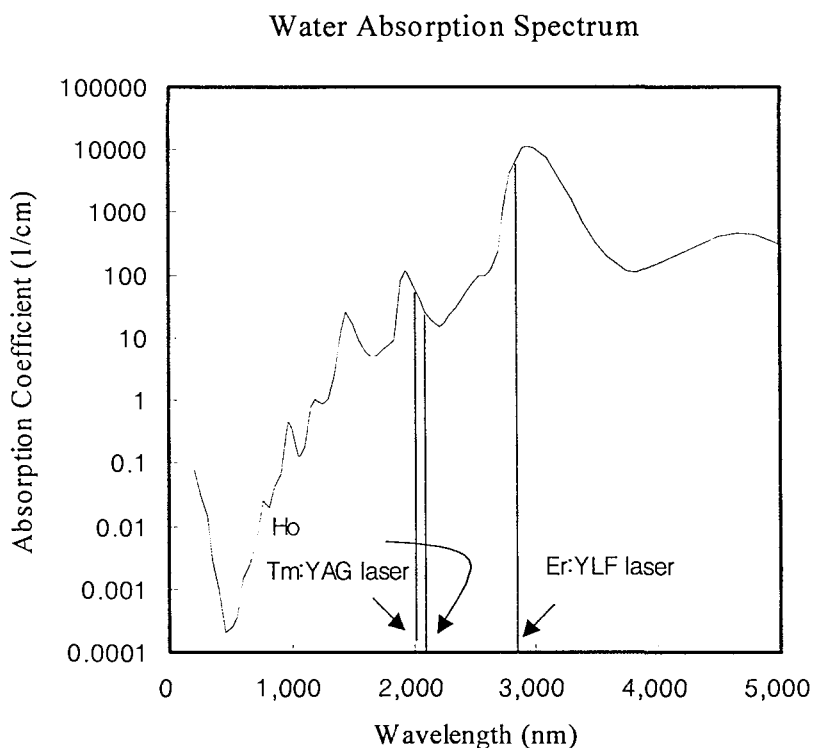


그림 2-6. 물에서의 레이저의 흡수

그림 2-6 에서 볼 수 있듯이 2.8 μm 파장에서 발진하는 Er:YLF 레이저의 경우 흡수계수가 $\alpha=5000\text{ cm}^{-1}$ 정도이며, Tm:YAG 레이저(2.01 μm)의 경우 흡수 계수가 $\alpha=60\text{ cm}^{-1}$ 이므로, 기존의 Nd:YAG 레이저 (1.06 μm , $\alpha=1\text{ cm}^{-1}$)에 비해 60배(Tm:YAG)에서 5000배(Er:YLF)이상 흡수가 탁월하다. Ho:YAG 레이저는 발진파장이 2.1 μm 로서 Tm:YAG 의 2.01 μm 와 비슷하나 그림 2-6 에서 알 수 있듯이 근처의 파장에서 흡수계수가 급격히 변화하여 흡수계수가 $\alpha=28\text{ cm}^{-1}$ 정도이므로 Tm:YAG 레이저에 비해 두 배 이상 물의 흡수가 작다. 따라서, 본 연구에서는 Tm:YAG 레이저 및 Er:YLF 레이저를 개발하여 활용하려고 하며 이러한 레이저들은 피부의 국부적인 증발(ablation)에 유리하여 endoscope를 이용한 미세 치료에 효과적이다. 일례를 들면 최근 미국에서는 심근경색을 치료하기 위해 그림 2-7 에서 볼 수 있듯이 광섬유 전송 2 μm 레이저를 사용하여 심장 내부에서 심장에 1mm 정도의 깊이로 구멍을 내어 산소공급을 원활히 해주는 연구가 진행되고 있다. 이 것은 기존의 CO₂ 레이저를 활용한 심장의 외부에서 천공(1999년에 FDA승인예정)하는 방법보다 효과적인 것으로 알려져 있다.

한편 Er 레이저는 탁월한 물흡수 특성으로 안과, 피부과, 치과등에서 활용 분야를 급격히 넓혀가고 있다. 현재 이 Er:YAG 레이저의 활용에 가장 큰 장애 요인은 레이저 빔 전송문제이다. 일반적으로 치료분야에서 사용되는 광섬유의 재질이 0.3 μm - 2.3 μm 까지만 투과도가 좋은 quartz로 되어 있으므로 Tm:YAG 는 광섬유 전송이 가능하나 Er:YLF 는 광섬유 전송이 불가능하다. 따라서, 최근에 ZrF, Sapphire fiber 등을 사용한 전송장치가 등장하고 있으나 강한 레이저 펄스에 취약한 면을 보이거나 전송손실이 거의 30-40% 이상이어서 앞으로 지속적인 연구과제로 남아 있다.

에 백내장 치료에도 효과적이다. Ho 빛 레이저는 물의 흡수도 매우 높으며 광섬유 전송이 가능하여 정형외과나 심장수술에서 매우 효과적이며, 최근에는 시력교정에 LASIK 방법과 탐리 각막의 빛이 통과하는 부위를 간드리지 않고 국동자 주변을 2 um 레이저로 조사시켜 수축시켜서 원시를 교정하는 LTK 방식이 미국에서 FDA에서 승인을 받았으며 녹내장의 치료에서도 광섬유 전송 특성이 매우 효과적이다.

Ho 레이저는 물의 흡수가 가장 높아서 레이저 치료시 ablation에 의해 치료부위에만 작용하고 주변 세포에의 열영향이 가장 작아서 피부과 및 치료 분야의 치료에서 다른 레이저에 비해 효과가 우수하다. 또한, 백내장 치료에 있어서도, 기존의 초음파 방식이 기계적인 충격에 의해 주변에 손상을 줄 수 있는데 반해 Ho 레이저에 의한 백내장 제거는 주변에 영향을 주지 않기 때문

(Laser Focus World p 55, November 1998)

그림 2-7 광섬유전송 Ho 레이저를 활용하여 심장내벽에 전공을 하는 모습도



↑

내부에서 심장벽의 일부가 전공된 모습

제 3 절 Er 및 Ho/Tm 레이저 시장 전망

제 1 절의 의료용 레이저의 시장 동향 및 전망에서와 같이 Er 레이저는 피부과의 피부 재생 및 머리털이식과 치과의 Hard Tissue 치료에서 급속한 신장세가 전망되고, 안과에서도 백내장 치료의 시장의 성장이 전망되고 있으며, Ho 및 Tm 레이저는 심장 수술 및 시력교정에서 급속한 신장세가 전망되고 안과의 녹내장 치료에서도 성장이 전망된다.

현재까지의 의료용 Er 및 Ho 레이저는 거의 lamp 여기에 의한 방법을 사용하고 있으나, 그림 1-1 에서와 같이 lamp 여기형 의료용 Nd:YAG 레이저가 diode 레이저 여기형으로 바뀌는 추세에 따라 Er 및 Ho 레이저도 diode 레이저 여기형으로 바뀔 것으로 전망된다.

그러나, 의료용 Nd:YAG 레이저가 lamp 여기형에서 diode 레이저 여기형으로 바뀌게 된 것은, 일반 산업용 레이저분야에서도 lamp 여기형 Nd:YAG 레이저가 diode 레이저로 바뀌는 데 많은 도움을 받고 있다. 산업용 Nd:YAG 레이저가 diode 레이저 여기형으로 바뀌면서 대량생산에 따라 Nd:YAG 여기용 805 nm diode 레이저의 수명이 10,000 시간까지 보장되게 되었으며, diode 레이저의 파장특성 등의 품질이 일관성을 유지하게 된 것이 의료용 Nd:YAG 레이저가 diode 레이저 여기형으로 바뀌는 것을 촉진하고 있다. 그러나, 아직도 805 nm diode 레이저가 대량생산되고 있으나 당초 기대만큼 가격이 급속히 하락하지 않아서, diode 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저가 현재 가격면에서 lamp 여기형에 비해 2 배 이상의 고가인 상태이다.

이에 반해, Er 및 Ho(Tm) 레이저는 산업용도가 거의 없고 의료용이 대부분이어서 여기에 필요한 785 nm 와 970 nm diode 레이저가 아직 대량 생

산되지 않고 있어 고가이며, 수명이나 파장의 안정성 등에서 아직은 의료용 diode 레이저 여기형 Er 및 Ho(Tm) 레이저의 상품화가 어려운 상황이다. 다만, 레이저 핵융합의 연구에 diode 레이저 여기형 Yb:YAG 와 Tm:YAG 레이저가 연구되고 있으며, 이들의 높은 전기적 효율을 이용한 산업적 활용이 기대되고 있어 의료용 diode 레이저 여기형 Tm:YAG 의 상품화가 기대되고 있으며, Er 레이저 시장의 급속한 성장에 따라 사용이 편리하고 성능이 우수한 diode 레이저 여기형의 상품화도 기대된다.

결론적으로 Er 및 Ho(Tm) 레이저는 현재 의료분야에서 레이저가 가장 많이 이용되고 있는 안과, 피부과, 치과 및 심장수술의 모든 분야에서 가장 높은 성장이 기대되고 있어 Er 및 Ho(Tm) 레이저의 시장 전망은 매우 밝으며, 이에 따라 앞으로 기존의 lamp 여기 방식에 비해 전기효율이 우수하고, 따라서 별도의 물에 의한 냉각장치가 필요 없으며, 장치가 소형이며, 고체레이저의 문제점인 열렌즈 효과가 작아서 레이저의 집속 품질이 우수한, diode 레이저 여기형 의료용 Er 및 Ho(Tm) 레이저의 성장이 기대된다.

제 3 장 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 개발

제 1 절 Tm:YAG 특성 연구 및 설계 (1 차년도 수행분)

1. 2 μm Tm:YAG 레이저 host material의 열 및 분광특성 연구

Tm:YAG[1-3] 레이저의 2.01 μm 레이저 파장은 그림 3-1 에서와 같이 Tm³⁺ion의 ³F₄(상준위)와 ³H₆ (하준위) 상태 사이에서의 에너지 전이에 따라 발생한다. Tm:YAG 레이저는 에너지 준위상으로 볼 때 3-level 레이저 형태를 띠고 있으므로 하준위에 분포된 많은 Tm³⁺ 이온이 밀도 반전을 얻기 힘들게 할 뿐 아니라 레이저 발진시 재흡수(reabsorption)도 일어나게 한다. 따라서 매질의 온도가 레이저 발진문턱을 낮추는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. Tm:YAG 레이저에서 레이저 발생에 관여하는 에너지 준위는 그림 3-1 과 같다.

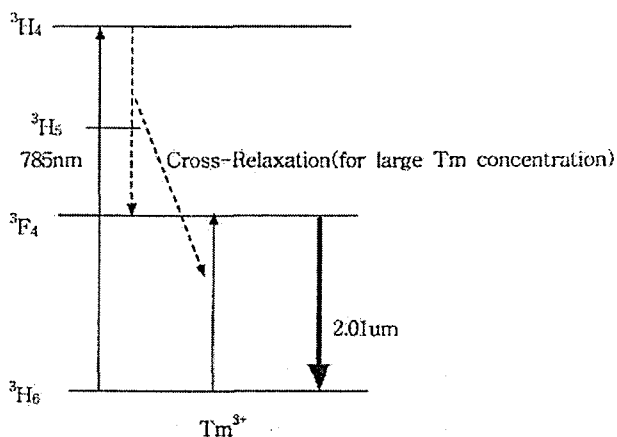


그림 3-1 Tm³⁺:YAG 레이저 에너지 준위

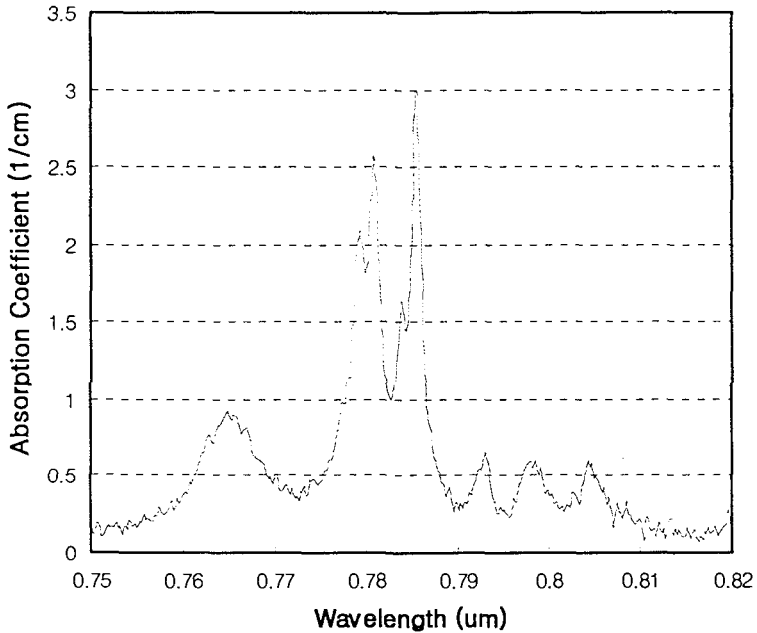


그림 3-2 Tm:YAG 레이저의 광 흡수 분포

주 여기과정은 그림 3-2의 흡수 분광 분포에서도 분명히 알 수 있듯이 785 nm 파장의 빛을 이용하여 바닥준위(3H_6)의 Tm^{+3} 이온들을 3H_4 고준위로 여기 시키는 과정이다. 그러나 흡수계수는 785 nm에서 $3cm^{-1}$ 정도이므로 808 nm 근처의 Nd:YAG, ($\alpha = 8 cm^{-1}$) 등과 비교할 때 그리 크지 않다. 따라서 3 level 이라는 점과 흡수도가 크지 않다는 점을 고려 할 때 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 레이저의 여기 방법은 여기강도(pumping intensity)를 높일 수 있는 단면여기(end-pumping) 방식이 효과적이다.

한편 3H_4 상태로 여기된 Tm^{+3} 이온은 상준위 3F_4 로 fast decay 한다. 이 때 그림 3-1에서 볼 수 있듯이 바닥준위 (3H_6) Tm 이온을 상준위 3F_4 로 동시에 여기시킨다. 따라서 하준위 이온들을 효과적으로 제거하여 밀도 반전을 쉽게

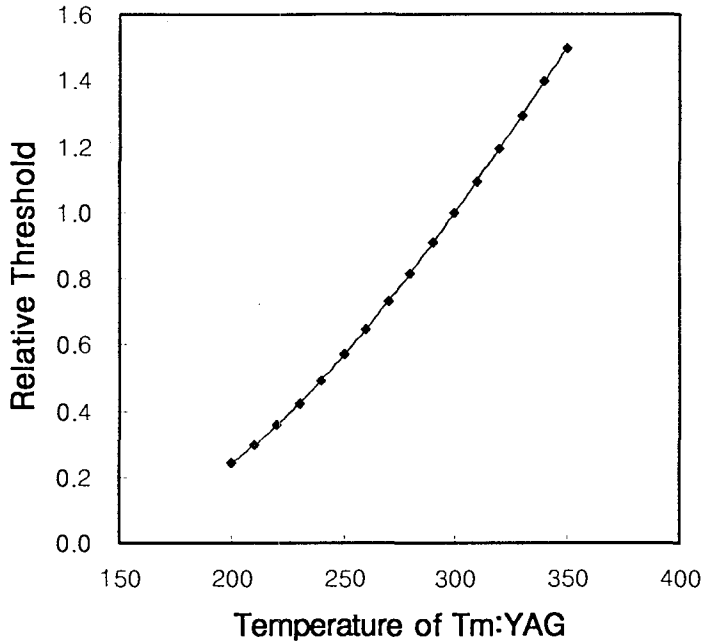


그림 3-3 Tm:YAG 레이저 봉 온도에 따른 문턱조건의 변화 (기준 300 °K)

게하는데 이러한 것을 "cross-relaxation" 여기 과정이라고 부른다. 이러한 과정은 Tm 이온의 농도가 약 $4 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 이상(doping concentration 약 2.2%에 해당)일 때[4] 일어난다고 한다. 그러나 Tm doping 이 정도 이상이면 심한 cross-relaxation 이 일어나며 이것은 매우 짧은 흡수거리와 이에 수반되는 많은 열이 국부적으로 발생하게 된다. 열 발생은 두 가지 면에서 좋지 않은 영향을 주는데 한가지는 열 파손이고 다른 것은 바닥준위의 Boltzmann 열분포에 의한 population 증가와 재 흡수도를 증가시키는 결과를 초래한다. 이러한 온도 상승에 의한 population의 증가는 그림 3-3와 같이 레이저의 문턱에너지를 증가시키는 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 일차적으로 cross-relaxation을 일으키는 범위(2% doping rod를 사용)안에서 여기 파장을 흡수 중심파장(785nm)에서 떨어뜨려 열문제를 완화하고 재흡수를 제어 할 수 있도록 798 nm ($\alpha=0.61\text{cm}^{-1}$)나 804.4 nm($\alpha=0.6\text{cm}^{-1}$) 근처의 여기파장을 사용하는 소위 "wing-pumping" 방법을 사용하였으며 아울러 여기파장을 흡수 중심파장에 맞추고 6% doping 된 rod를 사용하는 실험을 병행하여 추진하였다.

본 연구의 Tm:YAG 개발에서 추진하려는 단면여기 방식은 소형의 고효율 레이저에 적당하므로, 이미 많은 연구가 수행된 Nd:YAG 레이저를 기초적인 기술 축적 대상으로 단면여기 방식을 실험한 다음, 이 기술을 활용하여 Tm:YAG 레이저 실험을 수행하였다. 따라서 Tm:YAG 실험이전에 Nd:YAG 단면여기 레이저 실험을 예비로 수행하였다.

2. 다이오드 레이저 단면여기 출력실험

가. 단면여기 Nd:YAG 레이저 실험

본 국제 공동연구 개발 과제(공업기반 기술 과제)인 "다이오드 레이저를 이용한 의료용 펄스형 고체 레이저 개발" 연구의 일환으로 폴란드 MUT (Military University Technology)에서 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 실험을 공동으로 수행하였다. 주요 연구 내용은 다이오드 레이저를 이용한 단면여기 실험과 과 수동형 Q-switch 실험, 제 2 고조파 발생 연구로 구분되어 진행되었다.

(1) 다이오드 레이저 특성 분석

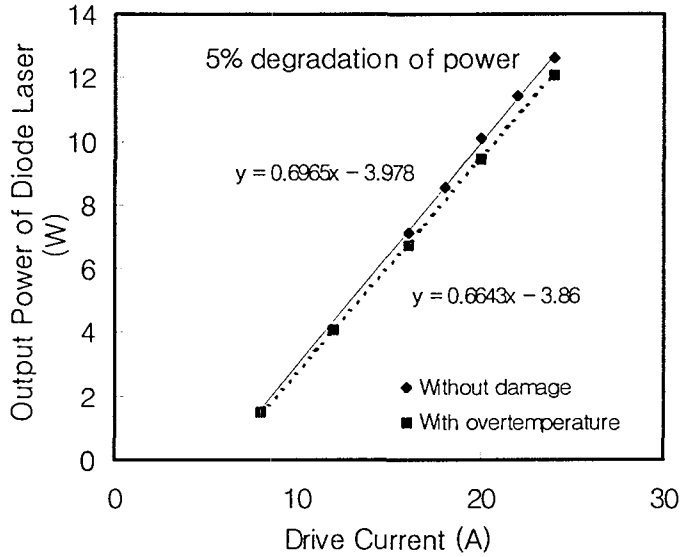


그림 3-4. 다이오드 레이저 출력

제일 먼저 여기용 다이오드 레이저의 특성을 분석하였다. 여기용 다이오드 레이저는 Thomson CSF 사의 광섬유 결합된 15W 레이저 (모델 TH-C1315F, SN:1141) 로 25℃에서 중심파장 804.6 nm에서 최대 15W(27.4A) 로 발진한다. 그림 3-4 은 측정된 다이오드 레이저의 출력 결과이다. 실험중 다이오드 냉각이 충분치 않은 경우가 있었으며 약 5% 정도의 출력 감소가 일어났다.

한편 end-pumping 다이오드 레이저 고체레이저 개발에서는 활성물질의 흡수 파장과 여기 레이저의 발광파장이 잘 일치해야 하므로 먼저 분광기를 이용하여 발광스펙트럼을 측정하였다. 그림 3-5 는 측정된 발광 스펙트럼이다. 발광 스펙트럼의 분포가 두 개의 peak로 나누어져 있어 좋은 분광 분포는 못 되었다.

Emission Spectrum of Laser Diode

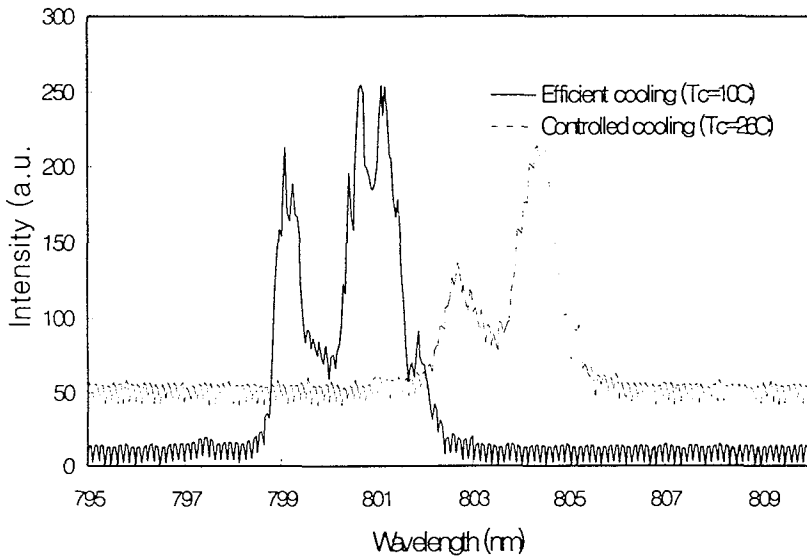


그림 3-5 레이저 다이오드 발광 스펙트럼

실선은 충분한 냉각을 해주었을 때의 스펙트럼으로 Nd:YLF의 흡수 대역에 잘 맞는다. 점선은 차가운 냉각수의 유량을 조절하였을 때 측정된 분광 분포로 완전하지는 않지만 Nd:YAG의 흡수 대역에 잘 일치한다. 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 중심으로 연구하였으므로 냉각수의 유량을 조절하며 온도를 조정하여 실험하였다. 여기 실험 결과 냉각수 온도에 따라 흡수도가 현저히 변화하였다. 수돗물 냉각을 조절하여 LD 금속표면 온도가 약 28도 정도 되었을 때 가장 흡수가 좋았으나 이는 Nd:YAG 붕의 805nm 근처의 sub peak에서 흡수가 일어난 것으로 흡수도가 가장 큰 807.7nm 에 파장을 일치시키는 것보다 효율적이지 못한 결과이었다. 냉각에 따라 Nd:YAG에 흡수되는 여기광

의 흡수도가 60-90% 정도로 크게 차이가 났으며 추후 실험시 레이저 crystal 과 LD를 별도로 cooling(TE cooling 등)해주어야 할 것으로 판단되었다.

(2) 레이저 붕의 열 렌즈 거리 측정

펌프광과 기본모드 volume의 효과적인 일치 및 제 2 고조파 레이저 발생을 위하여 레이저붕의 열렌즈 거리를 측정하였다. 열렌즈 거리측정은 선형 공진기를 구성하여 레이저를 동작시키면서(아주 높은 반사율을 갖는 거울 사용 : 약 95% 이상) 출력이 떨어지는 여기 power 나 혹은 threshold를 관측하여 측정하였다. 그림 3-6은 측정된 열렌즈 거리 결과를 나타내 주고 있다.

측정된 열렌즈 거리는 230 dpt/kW 정도였으며 측면 여기(약 15dpt/kW)에 비해 15배 이상 강한 열렌즈 현상을 보여 주었다. 이 결과를 이용하여 그림 3-7와 같은 레이저 공진기 내의 거울에 형성되는 기본 모드 빔의 반경(W_1 , W_2)을 계산하였다.

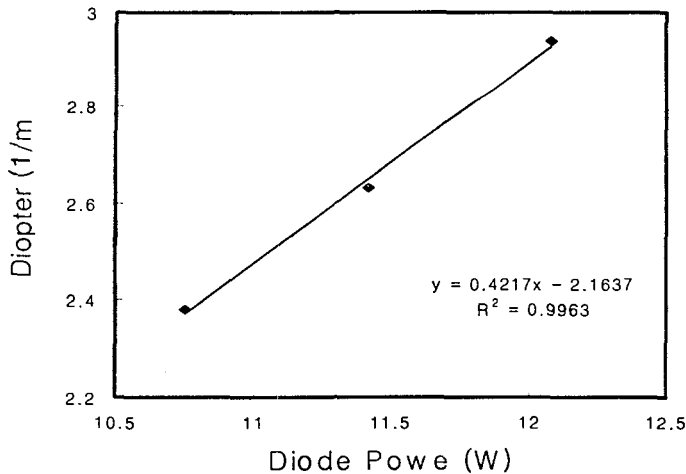


그림 3-6 측정된 Nd:YAG 레이저 붕의 열렌즈 거리

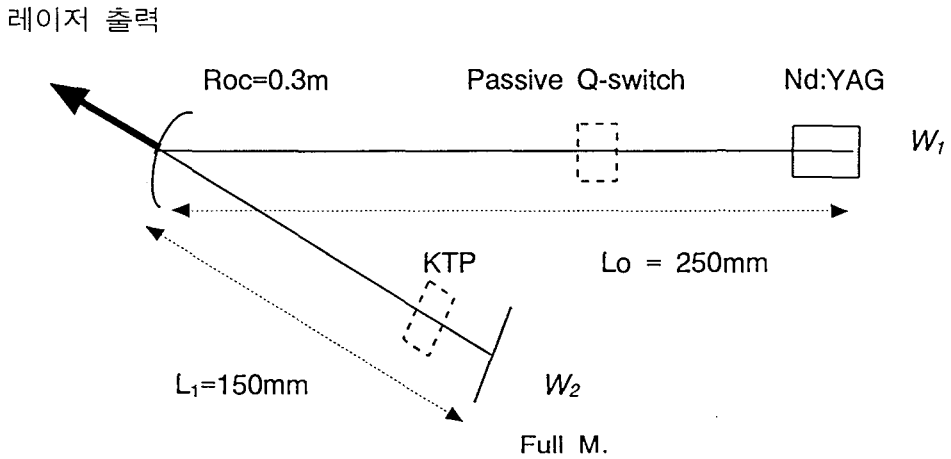


그림 3-7 공진기 기본모드 빔 반경 계산에 활용된 공진기 구조

그림 3-8 는 그림 3-6의 결과로 얻은 열렌즈 거리를 이용하여 계산한 공진기 거울에 형성된 기본 모드(TEM₀₀)의 반경을 나타낸 것이다. 그림의 결과를 분석하면 그림 3-7의 공진기에서 Nd:YAG 에 형성되는 기본 모드 빔의 구경은 입력 다이오드 power에 따라 1 mm에서 0.5 mm 정도로 작아지며 제 2 고조파 발생을 위한 접힌 공진기의 전반사경에서의 spot size는 0.9 mm 에서 0.09 mm 로 작아지는 것을 알 수 있다. End-pumping DPSSL 레이저의 pumping의 일반적인 방법은 pump-mode와 laser mode를 일치시키는 것이 매우 중요하며 펌프광의 Rayleigh 길이와 pump에 의한 흡수 길이의 1/2 에 해당되는 길이가 같아야 효율적인 여기가 이루어진다. 최대의 12 W 펌핑시 레이저 붕에 형성된 spot radius는 약 0.28 mm 였고 그림 3-7의 folding mirror와 full mirror사이에 위치한 KTP에서의 spot radius는 약 0.17mm 정도로 계산되었다.

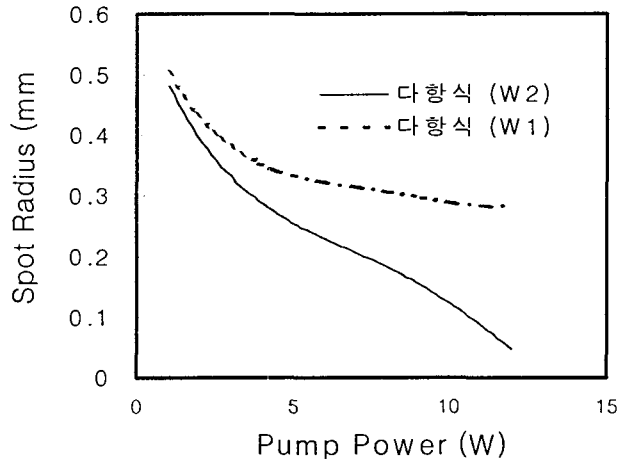


그림 3-8 기본모드 반경 크기 계산 결과

따라서 본 실험에서 효과적인 기본 모드 발진을 위해서는 pump 광의 최소 spot 크기(diameter)가 500 um 정도되어야 하며 Nd:YAG의 흡수 길이가 4 cm⁻¹정도이므로 펌프광의 Rayleigh range, $Z_R = \frac{\pi W^2}{\lambda M^2}$ 는 약 1.25 mm 정도 되어야 한다. 이때 최소한의 펌프광 M^2 는 약 185 정도이며 펌프광의 수렴각도는 약 21도(Full angle) 정도로 계산되었다. 실험에 사용된 fiber coupled diode 레이저의 M^2 는 금번 실험에서 측정하지 못하였고 광섬유 다발 구경이 900 um 이고 펌핑 광학계의 배율이 1.3 이므로 최소 펌핑 크기(구경)가 약 700 um 정도였다. 따라서 최대 입력에서는 기본 모드의 크기보다 더 크게 펌핑되므로 모드 matching 효율이 다소간 떨어질 것으로 예상되었다.

(3) 연속 발진 레이저 실험

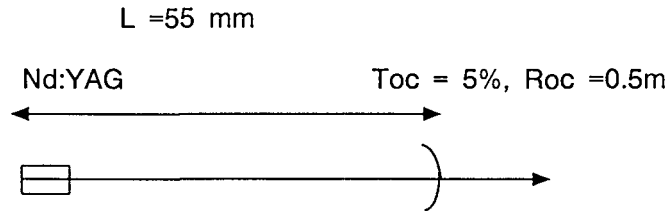


그림 3-9 선형 공진기 구조

연속발진 레이저는 그림 3-7 와 같은 접힌 공진기와 그림 3-9과 같은 선형 공진기 두가지 구조에서 실험하였으며 그 결과는 그림 3-10과 같다. 마름모 결과는 최대 효율을 높이기 위하여 공진기를 선형으로 짧게하고 온도를 최적으로 맞추어 실험한 결과이다. 출력 실험후 레이저 봉의 한쪽 단면인 전 반사 경의 품질을 현미경을 이용하여 관찰한 결과 그동안의 실험에 의해 생성된 아주 많은 작은 결함을 관측할 수 있었다. 따라서 상태가 더 좋은 coating 과 레이저봉 품질이 보장된다면 60%의 optical to optical efficiency에 해당하는 최대 7-8Watt의 출력도 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 그림 3-10에서 볼 수 있는 낮은 출력은 그림 3-7와 같은 접힌 공진기에서 측정한 결과로 온도 최적화가 되어 있지 않고 공진기 길이(41cm)가 길기 때문으로 판단된다. 한편 연속발진 레이저의 relaxation oscillation을 측정한 결과 펄스폭은 약 5 마이크로톤 정도였으며 펄스 반복률은 약 17 kHz 정도되었다.

(4) 수동형 Q-switch 실험 결과

수동형 Q-switch 실험은 그림 3-7과 같은 접힌 공진기에서 실험하였다. 실험 결과는 표 3-1에 요약되어 있다.

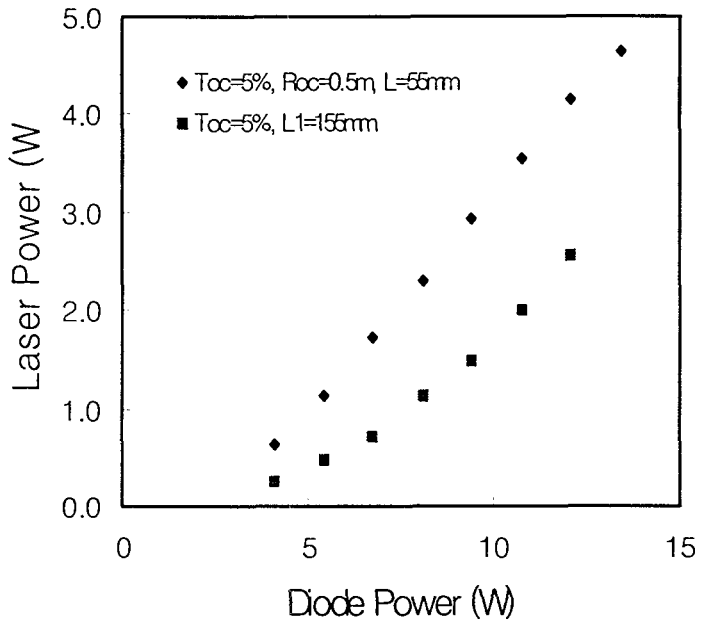


그림 3-10 연속 발진 레이저 출력 실험 결과

표 3-1. Cr⁴⁺:YAG 수동형 Q-switch 출력 실험(12W 입력시)

| 항 목 | Tini=81.8%, Lo=200mm, L1=165mm, Toc= 15% | Tini=86.6%, Lo=200mm, L1=165mm, Toc= 15% | Tini=86.6%, Lo=200mm, L1=155mm, Toc= 15% | Tini=86.6%, Lo=200mm, L1=155mm, Toc= 20% |
|--------------------------------------|---|---|---|---|
| 평균출력 | 0.56W | 0.73W | 0.76W | 0.67 |
| 펄스 반복률 | 3.3 kHz | 5.3 kHz | 5.7 kHz | 5.2 kHz |
| 펄스 폭 | 300 ns | 200 ns | 200 ns | 180 ns |
| 참고 : 펄스 반복률 및 펄스폭 jitter : +- 20% 정도 | | | | |

표 3-1을 참고하면 공진기 길이가 전반적으로 길어서 펄스폭도 길며, Cr:YAG 의 최적 초기투과율과 출력경의 최적 투과율은 은 86% 및 15% 정도로 나타났다. 한편 MUT에서 제작한 V:YAG 수동형 Q-switch를 이용하여 실험하였다. 실험 초기 Q-switch 레이저 출력은 1.3Watt 까지 올라가나 곧이어 열 흡수 등에 의해 출력이 저하되었으며 AR/AR 이 되어 있지 않아 더 이상 실험은 하지 못하였다. 초기 출력 결과는 Cr:YAG보다 더 좋은 출력을 보여 주었으나 정확한 원인은 규명하지 못하였다. 한편 수동 Q-switch를 pump source 로 부터 멀리 떨어뜨리니 열문제가 많이 개선되었으며 안정도도 증가하였다.

(5) 제 2 고조파 실험 결과

제 2 고조파 레이저 실험은 그림 3-7와 같은 접힌 공진기와 그림 3-11과 같은 선형 공진기를 이용하여 실험하였다. 접힌 공진기에서 연속발전 SHG 실험을 한 결과 최대 100mW 532 nm 출력을 얻었다. 수동형 Q-switch를 사용하여 실험한 결과 최대 460mW의 SHG 빔을 얻었다. (81% initial transmission Cr:YAG 사용할 경우) 출력빔의 펄스폭은 약 200 ns 였으며 침두 출력과 펄스 반복률의 안정도가 매우 좋지 않았다. 침두출력의 안정도가 나쁜 것은 이른바 "green problem"이 아닌가 생각하고 있으며 공진기내에서 편광된 빔을 스스로 만드는 Nd:YVO4 의 경우에는 이러한 불안정이 얼마나 개선될 것인지 확인한 필요가 있으며 기본적으로는 단일 종모드 발진이 필수적이다. 표 3-2는 접힌공진기에서의 제 2 고조파 출력 결과를 요약한 것이다.

한편 그림 3-11 과 같은 선형공진기를 이용하여 제 2 고조파 발생 실험을 수행하였다. 선형공진기에서도 24 A 로 여기할 때 약 420 mW의 SHG 출력을 얻었으며 만일 KTP 한쪽면에 532nm 전반사 코팅을 하였을 경우 이보다

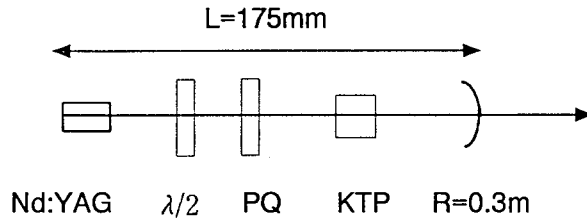


그림 3-11 제 2 고조파 발생에 사용한 선형공진기 구조

표 3-2 접힌 공진기에서의 제 2 고조파 출력 결과

| 항 목 | Tini=86.6%, Lo=260mm, L1=150mm, | Tini=79.4%, Lo=260mm, L1=125mm, |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 평균출력 | 0.28W | 0.46W |
| 펄스 반복률 | 11.5 kHz | 5.26 kHz |
| 펄스 폭 | 150 ns | 80 ns |
| 참고 : 펄스 반복률 및 펄스폭 jitter : +- 20% 정도 | | |

훨씬 큰 SHG를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 이때 사용한 Cr:YAG 수동 Q-switch는 82%의 초기 투과율을 가지고 있다. 한편 그림 3-11 에서와 같이 halfwave plate를 삽입하였을 경우 10% 이상의 출력향상을 보였다. 이는 부분적으로 레이저봉의 복굴절이 보상되는 것 때문으로 보인다.

(6) 국제 공동연구 결과

국제 공동연구 상대측 기관인 Poland 의 MUT에서 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 실험을 공동으로 수행하였으며 다이오드 레이저를 이용한 단면여기 기술과 수동형 Q-switch실험 및 접힌 공진기 및 선형 공진기에서의 제 2 고조파 발생 실험을 수행하였다.

나. 단면여기 Wing 펌핑 Tm:YAG 설계, 제작

본 연구에서 개발하는 Tm:YAG 레이저의 pumping은 단면여기 방식으로 하였다. 먼저 wing pumping 방식의 Tm:YAG 레이저 실험을 추진하였다.

(1) 단면여기 Tm:YAG 레이저 설계

레이저 결정은 구경 2mm, 길이 30mm인 2% doping된 Tm:YAG 레이저 결정을 사용하였다. 특히 원주상으로 측면 polishing한 다음 금도금하여 광섬유와 마찬가지로 발산되는 상태에서 입사하는 여기광이 레이저 결정내에서 전반사를 일으켜 지속적으로 흡수되게 하였다. 그리고 여기 파장을 중심에서 떨어진 파장으로 여기시키는 wing-pumping 방식을 취했으므로 전체적인 냉각이 중요하다. 따라서 그림 3-12과 같은 구조의 냉각장치를 제작하였다.

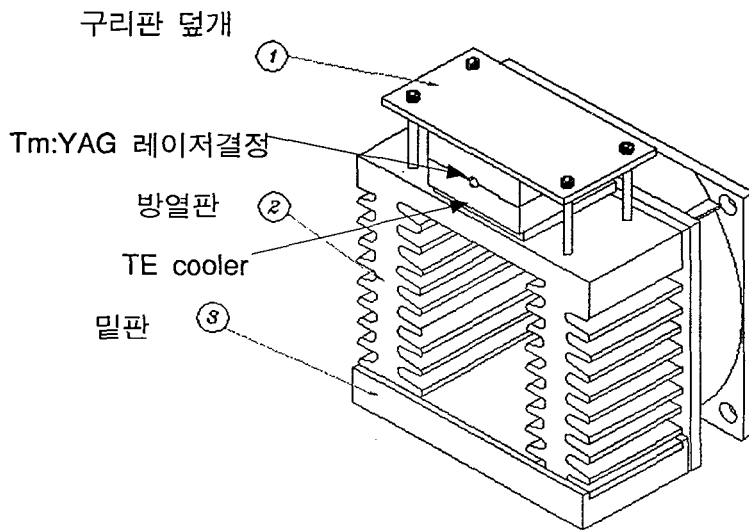


그림 3-12 Tm:YAG 레이저 결정 냉각구조

냉각은 열전소자(Thermo-electric cooler)를 사용하여 구리판 사이에 금속으로 둘러싸인 Tm:YAG 레이저 결정을 냉각시킨다. 열전소자의 발열부를 냉각시키기 위하여 그림 3-12과 같이 방열판을 사용하였고 냉각 fan을 가동시켰다. 한편 열전소자의 온도를 제어하는 열전소자 구동장치를 사진 3-1 과 같이 제작하였다.

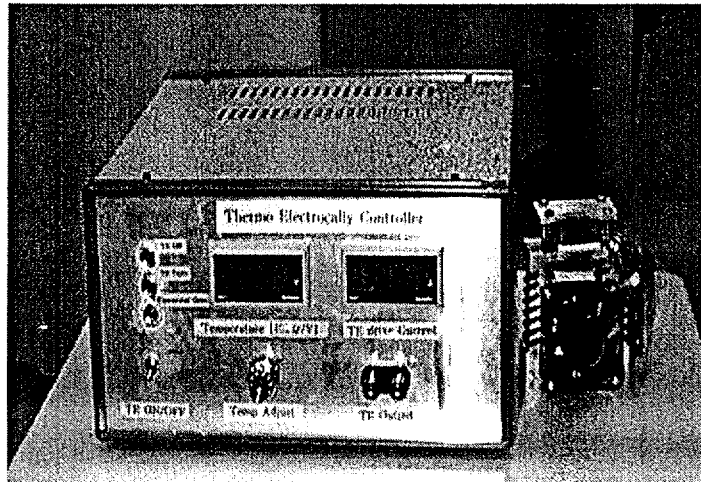


사진 3-1 제작된 열전소자 구동장치

(2) 단면여기 Tm:YAG 레이저 제작

Tm:YAG 레이저 실험을 위해 그림 3-13 와 같은 구조의 발진장치를 구성하여 실험하였다. 사용한 레이저 다이오드는 SLI 사 제품으로 제조사에서의 사양은 16A 구동시 연속출력이 약 70W 이며 발진 중심 파장은 802nm 이다.

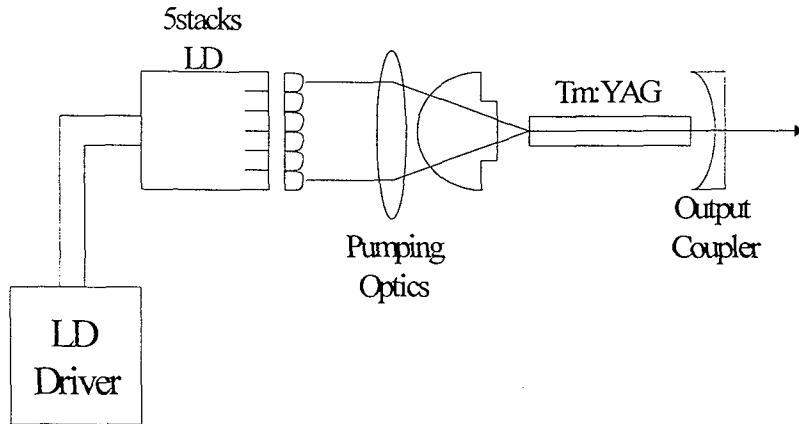


그림 3-13 Tm:YAG 레이저 발진 장치 구조

본 연구에서는 보다 정밀한 실험을 하기 위하여 출력 파장의 온도 의존성을 분광기를 이용하여 측정하였다. 그림 3-14 은 분광기를 이용하여 측정한 출력파장의 온도 의존성이다. Linear fitting을 한 결과 레이저 출력 파장은 $794.4 + 0.24 \cdot \text{냉각수온도}$ 라는 실험식을 얻을 수 있었으며 그림 3-5에서 볼 수 있는 sub peak 798 nm, 804.4 nm에서 발진하는 냉각수 온도는 각각 15도 및 41.6도 였다. 따라서 본 연구에서는 냉각수 온도를 15도에 맞추어 실험하였다.

발진된 diode 레이저를 Tm:YAG 레이저 단면에 입사시키기 위한 입사광학계를 그림 3-13과 같이 구성하였다. 특히 구면수차를 줄이고 광학계의 크기를 줄이기 위하여 반구형 렌즈를 사용하였다. 한편 입사광학계의 출사빔의 발산각이 매우 크므로 Tm:YAG 레이저 결정을 반구형 렌즈에 밀착시켰다. 한편 Tm:YAG 레이저봉은 측면이 금도금되어 있어 입사된 다이오드 레이저 빛이 광섬유 전송과 같은 경로를 가지고 레이저 봉에 흡수된다.

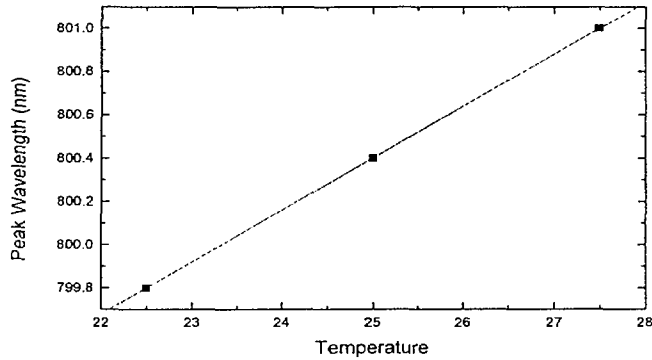
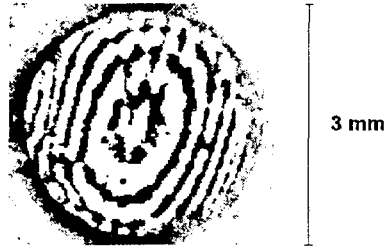


그림 3-14 레이저 출력 파장의 온도 의존성

(3) 레이저봉 열효과 및 출력 실험

레이저 공진기 설계에 중요한 변수의 하나인 레이저 봉의 온도를 측정하였다. 레이저 봉에 입사한 다이오드 레이저의 에너지중 상당한 양은 열로 변환된다. 본 연구에서는 간단한 간섭계를 구성하여 레이저 봉내에서 열로 변환되어 상승하는 온도를 측정하였다. 그림 3-15 은 측정된 간섭무늬를 보여준다.

그림에 따르면 약 60W 의 출력으로 펌핑하였을 경우 구경 3mm Tm:YAG 봉의 온도 상승은 약 20도에 달하는 것을 알 수 있었다. 이때의 열 렌즈 거리는 약 80cm 에 달하는 것을 알 수 있었다. 한편 레이저 출력 실험을 위한 출력경의 반사율은 97%로 하였고 현재 hemispherical 공진기를 구성하여 출력 실험을 하였으나 wing-pumping으로 인한 레이저 문턱에너지 도달에 미흡하였으며 사진 3-2 와 같이 코팅의 손상에 의해 1 차년도에는 레이저 출력을 얻지 못하였다.



**Fig. Interferogram from a laser diode pumped Tm:YAG crystal.
Pumping power : 60 W, Temperature Increment : 20 K,
Thermal focal length : 800 mm.**

그림 3-15 측정된 간섭무늬

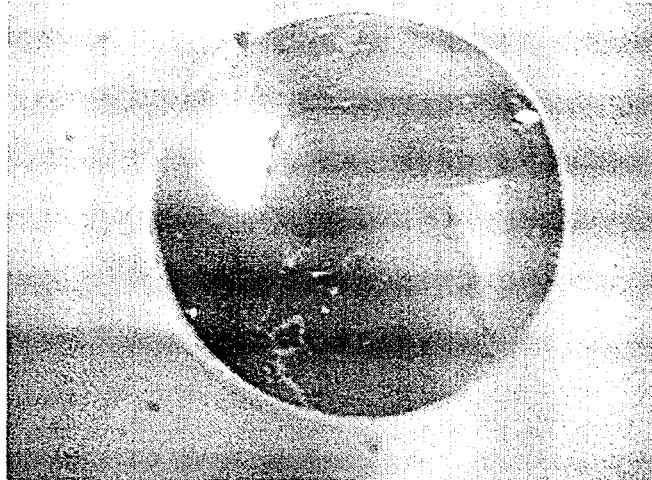


사진 3-2 손상된 코팅면

제 2 절 Tm:YAG 레이저 제작 및 성능 시험 (2 차년도 수행분)

1 차년도의 wing pumping 방식의 실험에서 보유하고 있는 다이오드 레이저의 출력이 충분하지 않고 또한 고출력 다이오드 레이저에 의해 코팅이 손상되어 2 차년도에는 중심파장 pumping 방식으로 연구를 수행하였다. 1 차년도와 같이 레이저 다이오드 뒷면 여기 방식을 이용하여 발진 파장이 $2.02 \mu\text{m}$ 인 중적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 출력 특성을 조사하였다. 레이저의 출력은 Tm:YAG 결정의 온도에 민감하게 변화하였으며, 레이저의 출력경이 곡면경인 경우에 평면경인 경우보다 더 큰 출력을 얻을 수 있었다. 곡면경을 사용하고 Tm:YAG 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 6°C 로 낮추었을 때, 최고 1.2 W 의 출력을 얻을 수 있었다. 이 때, 문턱 여기 출력은 약 1.6 W 이었고, 기울기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 29%과 20%이었다. 본 중심파장 pumping Tm:YAG 레이저 연구에서는 785 nm 를 첨두 파장으로 갖으며 광섬유에 연결된 최대 연속 출력 7.5 W 인 레이저 다이오드를 이용하여, Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저 결정을 여기하여 중적외선 영역인 파장 $2.02 \mu\text{m}$ 를 갖는 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 그 출력 특성을 조사하였다. 또한, 레이저 여기 구조의 성능 평가에 중요한 변수가 되는 들뜸 효율을 측정하였다.

1. 중심파장 pumping Tm:YAG 레이저 연구

가. 중심파장 pumping Tm:YAG 레이저 설계 및 제작

제작된 레이저 다이오드로 여기되는 Tm:YAG 레이저의 장치도는 그림

3-16과 같다. 레이저 다이오드로 여기되는 Tm:YAG 레이저는 여기용 레이저 다이오드, 여기 광학계, Tm:YAG 결정 및 출력경으로 구성된다. Tm:YAG 결정은 직경 3 mm 길이 5 mm의 봉으로, 한 면이 여기 파장인 785 nm에서 HT(High Transmission) 코팅과 발진 파장인 2.02 μm 에서 HR(High Reflection) 코팅이 되어있고, 다른 면은 발진 파장에 대해서 무반사 코팅되어 있다. 출력경으로는 투과율이 3.7%인 평면경과 투과율이 3%이고 곡률 반경이 50 mm인 곡면경 두가지 종류를 사용하였다.

그림 3-17은 본 연구에 사용된 Tm:YAG 결정의 코팅 상태를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 한 면은 발진 파장인 2 μm 이상에서 거의 전반사가 일어나고 여기 파장인 785 nm에서 약 95%이상의 투과율을 갖고, 다른 면은 발진 파장 근처에서 반사율이 0.2%이하임을 알 수 있다. Tm:YAG 이득

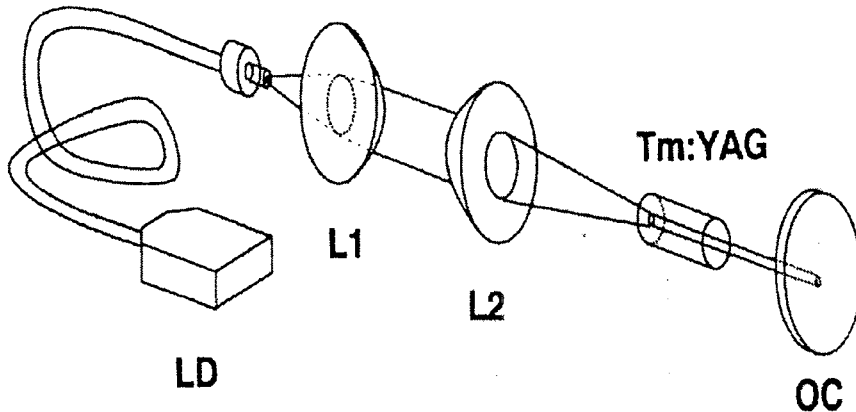


그림 3-16 레이저 다이오드 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 장치도
LD: 레이저 다이오드, L1: 평볼록 시준 렌즈,
L2: 비구면 집속 렌즈, OC: 출력경

매질은 인듐 박막으로 감싸 구리 지지대와 열적 접촉을 시켰고, 열전 냉각기 (Thermo-Electric Cooler)로 구리 지지대를 냉각시켰다. 출력경은 레이저 발진 파장인 2 μm 파장에서 흡수를 방지하기 위해서 Infrasil을 재질로 사용하였으며, 전체 공진기의 길이는 약 15에서 20 mm였다.

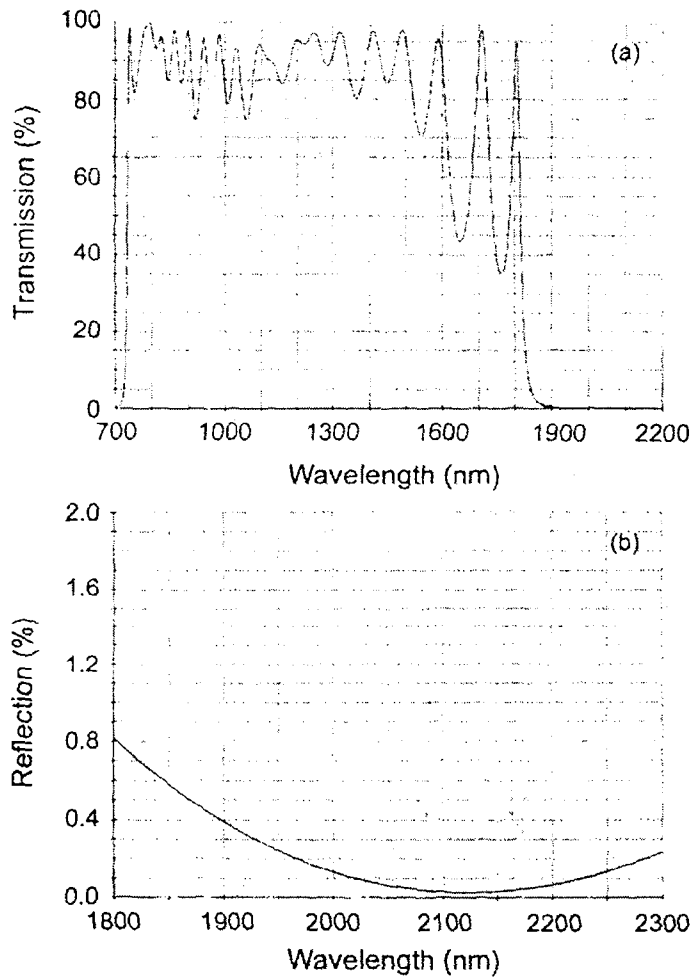


그림 3-17 Tm:YAG 결정의 코팅 상태
(a) 거울면의 코팅 상태, (b) 거울 반대면의 코팅 상태

여기용 레이저 다이오드는 SLI(Semiconductor Laser International corp.) 사 제품으로 코아 직경이 0.63 mm인 길이 1 m 광섬유에 연결되어 있으며, 첨두 파장은 785 nm, 개구수(Numerical Aperture) 0.22로 연속 출력으로 최대 7.5 W가 가능하다. 레이저 다이오드의 파장 가변 및 온도 안정화를 위하여 레이저 다이오드를 열전 냉각기에 부착시켰다. 광섬유를 통해서 나오는 레이저 다이오드 출력을 초점거리가 50.5 mm인 평면 볼록 렌즈를 통해 시준하고, 초점거리가 23.5 mm인 비구면 렌즈를 이용하여 이득 매질인 레이저 결정에 집속하였다. 따라서 집속된 여기광의 크기는 직경 약 0.3 mm로 계산되었다.

나. 레이저 다이오드의 동작 특성 및 Tm:YAG 결정의 들뜸 효율 측정

레이저 다이오드의 발진 파장은 동작 온도 및 동작 전류에 따라 변화한다. 따라서, 동작 온도 및 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화는 레이저 다이오드 여기 고체 레이저에서 반드시 조사하여야 할 부분이다. 본 연구에서는 동작온도 및 전류에 따른 레이저 다이오드 첨두 파장(peak wavelength)을 측정하였다. 본 레이저 다이오드의 최대 동작 전류는 18 A이고, 본 실험에서는 16.9 A까지 사용하였다. 측정 결과 본 레이저 다이오드는 전류가 1 A증가할 때마다 0.1 nm씩 장파장으로 이동하고, 온도 1℃ 증가할 때마다 0.3 nm씩 장파장 쪽으로 이동하는 것으로 관측되었다. 그림 3-18는 레이저 다이오드의 동작온도가 25℃일 때 동작 전류에 따른 파장을 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 동작 전류가 16.9 A일 때, 첨두 파장이 785 nm인 것을 알 수 있고, 발진 스펙트럼의 반치폭(FWHM)은 약 1.7 nm 정도였다.

레이저 제작시 들뜸 효율(excitation efficiency, η_{excit})은 레이저의 성능을 평가할 수 있는 중요한 요인이다. 특히, Tm:YAG 레이저 결정과 같이 여기

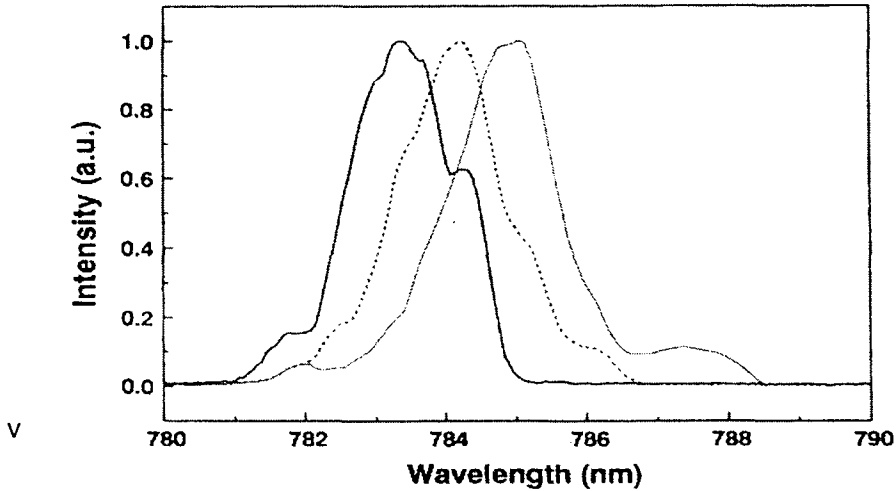


그림 3-18 레이저 다이오드 동작온도에 레이저 다이오드 발진 파장 변화
(실선: 7.3 A(2.1 W), 대시선: 12.2 A(4.8 W), 점선: 16.9 A(6.9 W))

파장과 발진 파장이 상당히 많이 차이가 나는 경우, 흡수된 에너지가 실제 발진에 참여한 에너지와 많이 다를 수 있어 레이저의 성능을 평가하기 위해서 들뜸 효율을 측정하는 것이 유리할 수 있다. 이러한 들뜸 효율은 광여기에 의해 레이저 붐에 전달되는 에너지중 윗준의 상태 밀도에 의해 표현되는 에너지의 비로 계산된다. 뒷면 여기 레이저에서 들뜸 효율의 측정은 다음과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$\eta_{excit} = \frac{\eta_u}{P} \int_V P_{abs}(r, z) dV \quad (1)$$

여기서, η_u 는 양자효율(quantum efficiency, η_q)과 스톡스 인자(stokes factor, η_s)의 곱으로 주어지는 윗준위 효율(upper state efficiency), P 는 여기 출력이고, P_{abs} 는 단위 부피당 레이저 붐에 흡수되는 출력이다. 따라서, 레이저 다이

오드로 레이저 붕의 뒷면을 여기할 경우, 여기광이 레이저 붕에서 흡수된 양만을 측정하면 들뜸 효율을 간단히 측정할 수 있다.

윗준위 효율을 계산하기 위해서는 양자 효율을 계산하여야 한다. 일반적으로 양자 효율은 결정의 활성 이온(active ion) 첨가율에 따라 다르게 나타나고 Tm:YAG 결정을 785 nm로 광여기 할 경우, 일반적인 고체 레이저 결정과 달리 cross relaxation 현상에 의해 양자 효율이 1이 넘는다. 활성 이온의 첨가율에 따른 양자효율은 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\eta_{QV} = \frac{1 + 2\left(\frac{C_{Tm}}{C_0}\right)^2 - \frac{\tau_0}{\tau_r}(1 - \beta)}{1 + \left(\frac{C_{Tm}}{C_0}\right)^2} \quad (2)$$

여기서, β 는 3H_4 준위에서 복사 천이중 3F_4 준위로 천이하는 비율로 0.16인 것으로 알려져 있는 값이다. τ_0 는 고유 형광 완화 시간(intrinsic relaxation lifetime)이고 C_0 는 고유 완화 시간이 절반이 되는 Tm 이온의 첨가율이다. 또한, C_{Tm} 및 τ_r 은 사용된 결정의 Tm 이온의 첨가율과 이 때의 형광 완화 시간이다. Tm 이온의 첨가율에 따른 형광 완화 시간은 Armagan 등이 이미 조사하였고,[5] 본 연구에서는 양자효율을 계산하기 위해서 Armagan의 결과를 인용하였다. Armagan의 결과를 인용하였을 때, 양자효율은 약 1.95인 것으로 계산되었다.

여기서는 레이저 다이오드 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 들뜸 효율을 측정하였다. 785 nm로 여기하고 2.02 μ m로 발진하는 경우 Tm:YAG의 스톡스 인자는 0.39이고 본 연구에서 사용된 Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저의 경우 양자 효율이 1.95 이므로, 윗준위 효율은 0.76으로 계산되었다. 본 실험에서는 각각의 여기 출력에서 흡수된 여기광을 측정함으로써 들뜸 효율을

측정하였다. 레이저 다이오드의 동작 온도는 25℃였다. 그림 3-19에 측정된 들뜸 효율이 나타나있다. 여기광 출력은 레이저 다이오드 동작 전류에 따라서 약 87에서 89%까지 Tm:YAG 결정에서 흡수되었으며, 레이저 다이오드의 동작 전류가 14 A일 때 흡수가 최대가 되었고 이 때 첨두 파장은 784.6 nm 여기 출력은 4.9 W였다. 따라서 들뜸 효율은 그림에서 보는 바와 같이 약 66에서 68%까지 변화하였다. 이와 같은 들뜸 효율은 Nd 이온이 1. at.% 첨가된 Nd:YAG 레이저에서 얻어진 60%와 비교하여 볼 때 같거나 우수한 수준임을 알 수 있다.[6]

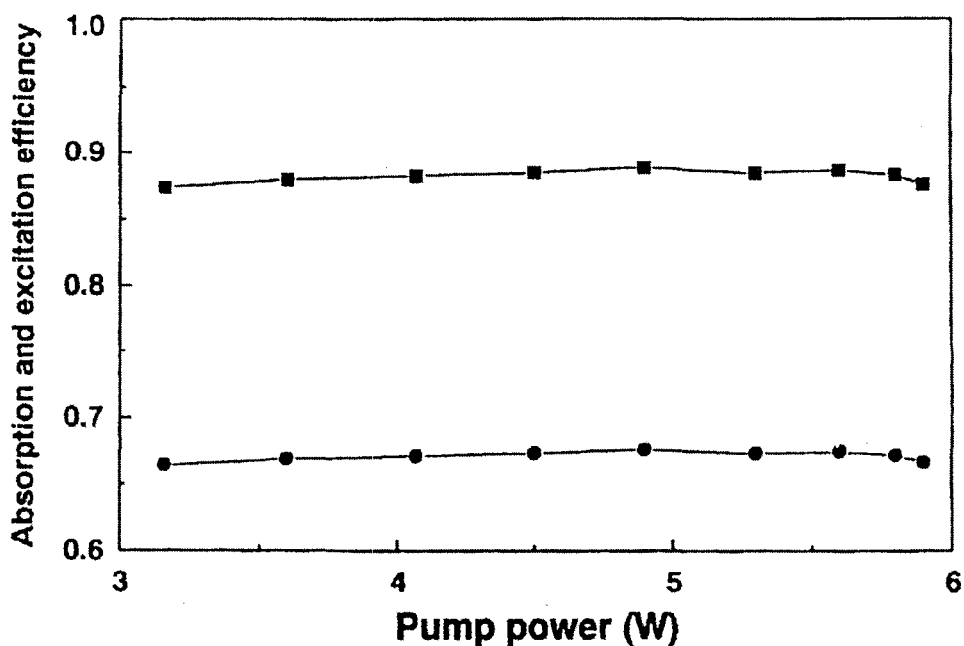


그림 3-19 레이저 다이오드로 여기된 Tm:YAG 결정의 흡수율 및 들뜸 효율
(■: 흡수효율, ●: 들뜸 효율)

2. 중심파장 pumping Tm:YAG 레이저 출력 특성 조사

그림 3-20은 레이저 다이오드 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이저 출력을 보여준다. Tm:YAG 결정 지지대의 온도는 23°C를 고정하였으며 레이저 다이오드의 동작 온도를 각각 15, 20, 25°C로 설정하여 실험하였다. 레이저 다이오드의 온도가 25°C 일 때, 가장 큰 Tm:YAG 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 앞서 살펴본 바와 같이 일반적으로 레이저 다이오드의 동작온도를 낮추어주면 레이저 다이오드의 출력이 증가하고 발진 파장이 단파장쪽으로 이동한다. 또한, 동작 전류에 의한 첨두 파장의 변화가 온도에 의한 첨두 파장의 변화보다 덜 민감하고 25°C에서 최대 흡수가 일어나는 785 nm에 더 근접하게 발진되는 것으로 보아 레이저 다이오드의 온도를 25°C로 유지하는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

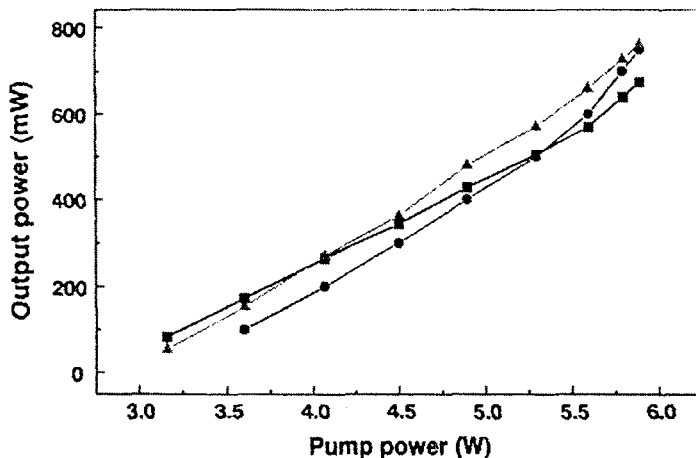


그림 3-20 레이저 다이오드 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성
(■: 레이저 다이오드 온도 15°C, ●: 20°C, ▲: 25°C)

그림 3-21은 공진기의 길이를 약 18 mm로 하고 투과율이 3.7%인 평면경을 사용하였을 때, 여기 출력에 따른 발진 출력을 측정한 결과이다. 앞에서 언급한 것처럼 Tm:YAG와 같은 준 삼준위 레이저는 레이저 결정의 온도가 레이저 출력에 민감한 영향을 미치므로, 레이저 결정의 온도를 변화시켜가면서 출력을 측정하였다. 레이저 다이오드의 동작온도는 25℃로 고정시켰고, 레이저 결정 지지대의 온도를 각각 6, 15, 23℃로 변화시켜 출력을 측정하였다. 레이저 결정 지지대의 온도가 낮아질수록 레이저의 출력은 증가하고 문턱 여기 출력은 감소함을 알 수 있었다. 문턱 여기 출력은 결정 지지대의 온도를 6, 15, 23℃로 증가시킬 때, 각각 2.4, 2.7, 3 W로 증가하였다. 결정 지지대의 온도가 6℃이고 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 900 mW인 것으로 관측되었다. 이 때, 기울기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 26%와 15%인 것으로 계산되었다.

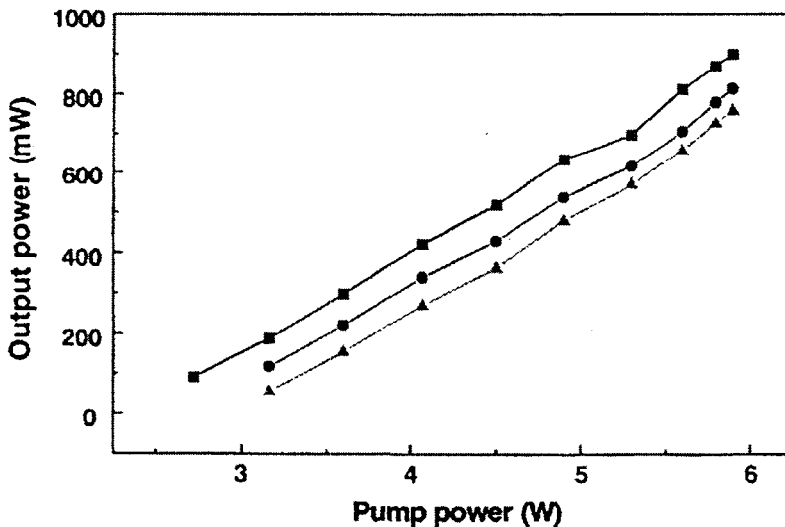


그림 3-21 Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성 (평면경 사용) (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6℃, ●: 15℃, ▲: 23℃)

그림 3-22는 곡률 반경이 50 mm인 곡면경을 출력경으로 이용하였을 때 출력을 측정된 결과이다. 곡면경의 투과율은 3%이었으며, 레이저 공진기의 길이는 약 19 mm로 여기되는 쪽에서 모드 반경은 0.17 mm인 것으로 계산되었다. 곡면경을 사용한 경우 평면경을 출력경으로 사용한 경우보다 출력이 향상되었으며, 이는 곡면경을 사용하였을 때, 레이저 발진 모드가 여기광에 더 잘 일치하기 때문인 것으로 생각된다. 곡면경의 경우 결정 지지대의 온도 6°C에서 문턱 여기 출력은 1.6 W까지 감소하였으며 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 1.2 W였다. 이 때, 기울기 효율은 약 29%, 광학 효율은 약 20%인 것으로 측정되었다.

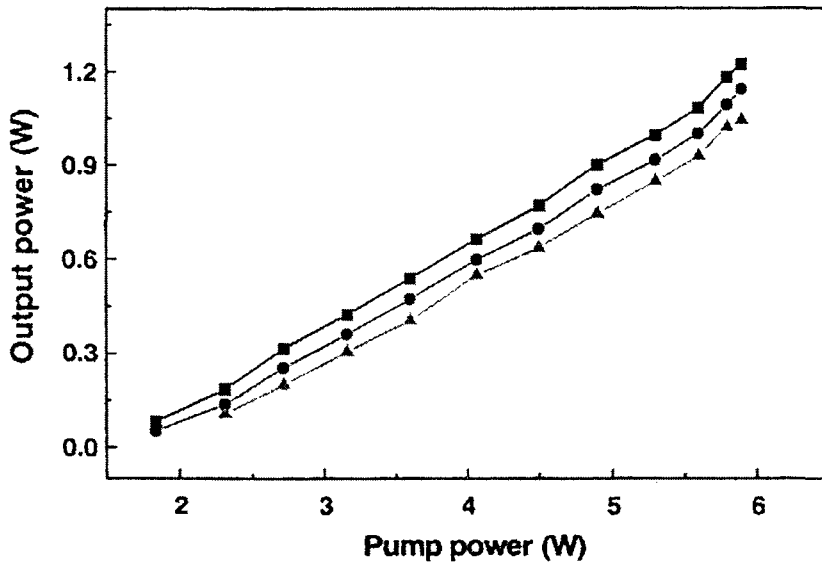


그림 3-22 Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성 (곡면경 사용) (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6°C, ●: 15°C, ▲: 23°C)

그림 3-23은 레이저 출력의 장시간 안정성을 조사한 결과이다. Tm:YAG 레이저 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 15℃로 고정하였으며 레이저의 출력을 200초 동안 감시하였다. 레이저의 출력은 초기에 1 W 이상에서 꾸준히 감소하여 200초 후에는 890 mW 까지 감소하였다. 이는 여기광의 강한 집속으로 인한 국부적인 온도 상승으로 인한 현상으로 보이며, 이를 해결하기 위해서는 순수한 YAG 결정을 여기 방향의 끝면에 diffusion 방법으로 접착시키는 방법으로 해결할 수 있을 것이다.

본 실험에서는 레이저 다이오드 뒷면 여기 중적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, Tm:YAG 레이저의 여기 특성 및 출력 특성을 조사하였다. 본 실험에서 사용된 6%이상의 첨가율을 갖는 Tm:YAG 결정에서 여기광은 약 87% 이상 흡수되어, 들뜸 효율은 약 66% 이상인 것으로 측정되었다. 이 결과는 다른 종류의 뒷면 여기 고체 레이저에 비해도 손색이 없는 결과이다. 레이저 출력은 결정의 온도를 낮출수록 증가하였으며, 레이저 결정 지지대의 온도가 6℃이고, 투과율이 3%인 곡면경을 사용하였을 때 최고 1.2 W의 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 이때, 기울기 효율 및 광학 효율은 각각 29%와 20%였다.

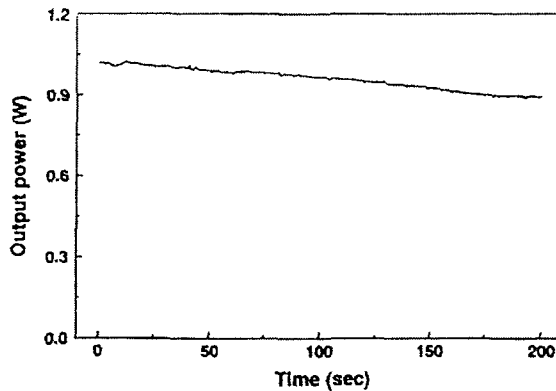


그림 3-23 Tm:YAG 레이저의 장시간 출력 안정성 측정 결과

제 4 장 다이오드 레이저 여기 Er:YLF 레이저 개발

제 1 절 Er:YLF 특성 연구 및 설계

3um 파장의 레이저는 물 흡수가 매우 좋기 때문에 의료분야에 활용도가 크게 증가하고 있다. 특히 다이오드 레이저를 펌핑 레이저로 활용하는 경우는 소형, 고효율의 장점으로 최근 선진 여러나라에서 많은 연구가 진행되고 있다. 대부분의 다이오드 레이저 여기 3 um 레이저는 종펌핑 방법을 사용하고 있으나 본 연구에서는 고출력화에 유리한 측면여기 방식의 레이저를 제작하여 실험하였다. Er:YLF 는 Er:YAG 에 비해 레이저 에너지 준위의 수명(상준위 및 하준위 수명비율)이 레이저 발진에 더욱 유리하게 되어 있어 lasing threshold가 작아 레이저 발진에 유리하다. 그리고 Er:YAG 에 비해서 열 전도도는 작아 아주 고출력에는 불리하나 본 연구에서 목표로하는 중 저출력 레이저에는 적당하다. 따라서 본 연구에서는 Er:YLF 레이저로 한정하여 실험을 수행하였다. 그러나 레이저 하준위의 수명이 길어서 레이저 동작 효율이 좋지 않다. 현재 보고된 단면여기방법을 사용한 레이저 출력은 약 1 W 정도[7] 이고 측면여기 방법으로는 약 48 mJ의 출력을 얻은 보고가 있다.[8]

그림 4-1과 같이 Er 레이저의 에너지 준위중 $^4I_{11/2}$ 준위에서 $^4I_{13/2}$ 준위로의 3 um 파장 전이를 가능하게 하는 펌핑 밴드는 두 가지의 경로가 있다. 한 경로는 $^4I_{9/2}$ 의 pumping 으로 790nm 다이오드 레이저나 Ti:sapphire 레이저로 펌핑하는 경우이고 다른 한 경로는 $^4I_{11/2}$ 로 직접 펌핑하는 경우로 970nm의 레이저 다이오드를 사용한다. 펌핑 효율을 고려 할 때 quantum defect (약 35%)가 작고 cascade decay에 의한 손실이 없는 후자의 970nm pumping 이 좋으므로 본 실험에서도 970nm 다이오드 레이저를 사용하여 실험하였다.

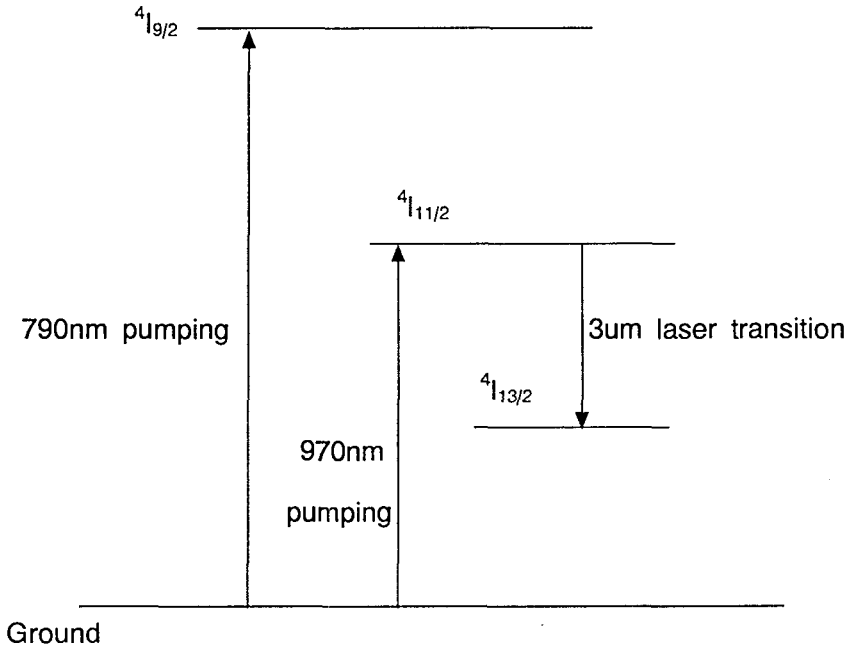


그림 4-1 Er^{3+} 에너지 레벨 다이어그램

Er^{3+} 원소는 상준위 보다 하준위 수명(>10ms)이 길다. 따라서 주변의 Upconversion 이 밀도 반전에 기여한다. 그리고 하준위 수명이 길기 때문에 50-60 Hz 이상으로 동작시키기 힘들다.

본 실험에서는 첨두출력이 300W 인 970nm 레이저 다이오드를 사용하여 Er:YLF 레이저를 발진시켰으며 구입 후 분광 분포를 측정하였으며 그림 4-2 과 같은 결과를 얻었다. 그림 4-2은 동작전류 120A, 펄스폭 250us, 14Hz 로 다이오드 레이저를 구동하였을 때의 분광 분포이다.

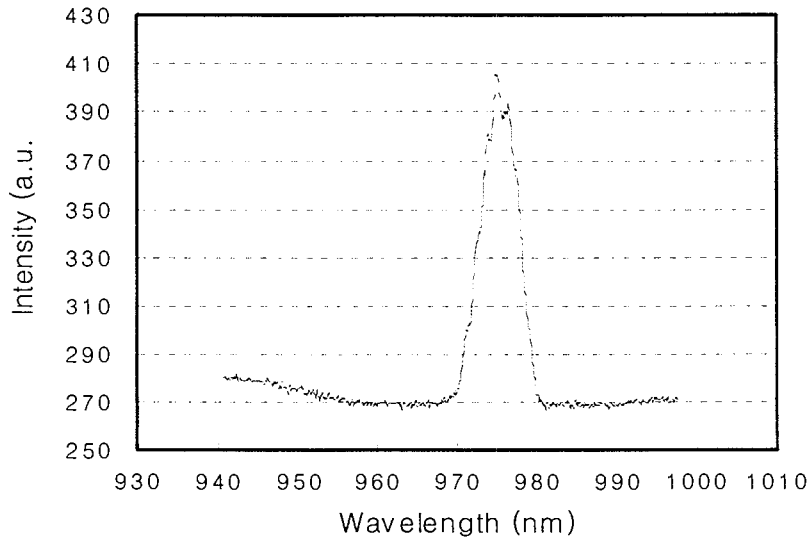


그림 4-2 300 W 970nm 레이저 다이오드 출력의 분광 분포

그림 4-2의 결과에 의하면 중심파장이 약 974-976nm 에 걸쳐 있어 약 간 장파장 이동 되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 냉각수를 사용하여 온도 조절을 함으로서 레이저 발광 파장을 조절하여야 할 것으로 판단되었다.

제 2 절 Er:YLF 제작 및 성능 시험

1. 레이저 발진장치 제작

가. 레이저 펌핑 module 제작

레이저 펌핑 모듈은 사진 4-1과 같이 제작하였다. 300 W 970nm Q-cw 레이저 다이오드 모듈 3 개를 crystal 주위에 120도 간격으로 배열하여 펌핑 시켰다. 다이오드 레이저의 최대 펄스 폭은 400us 이므로 최대로 펌핑할 수 있는 펄스 에너지는 360 mJ 이었다. 레이저 결정의 크기는 3mm dia x 45 mm length 였고 15% Er ion 이 dope 되어있다.

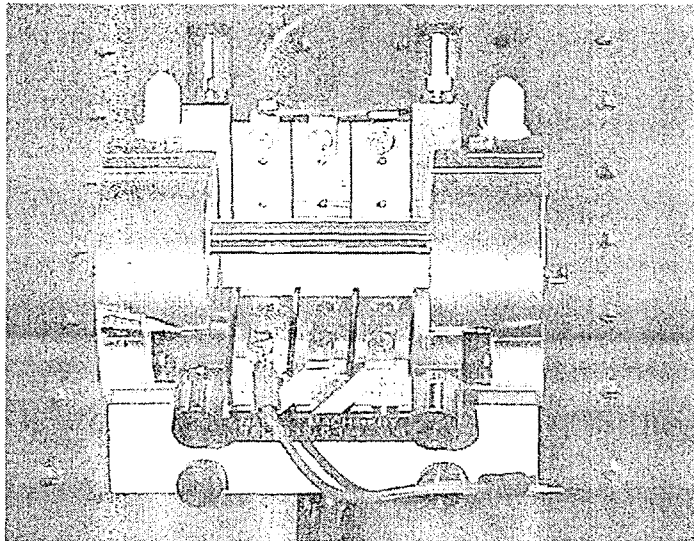


사진 4-1 제작된 공진기에 장착된 레이저 펌프 모듈

레이저 출력거울은 반사율이 97%인 오목거울을 사용하였으며 곡률반경은 150mm 였다. 출력 파장인 2.7 μm 에서 광학부품 결정 내의 OH에 의한 레이저 흡수가 크므로 2.7 μm 의 coating은 매우 어려운 것으로 되어있다. 한편 전반사경은 flat 거울을 사용하였다.

나. 레이저 출력 실험

조립된 펌프 모듈과 전반사경, 출력경을 optical rail 위에 설치하여 길이가 짧은 공진기를 구성하여 출력실험을 실시하였다. 냉각수 온도는 약 10°C 로 하여 실험하였다. 그림 4-3은 130A, 400us, 1 Hz로 동작할 때의 레이저 출력 결과를 도시한 그림이다.

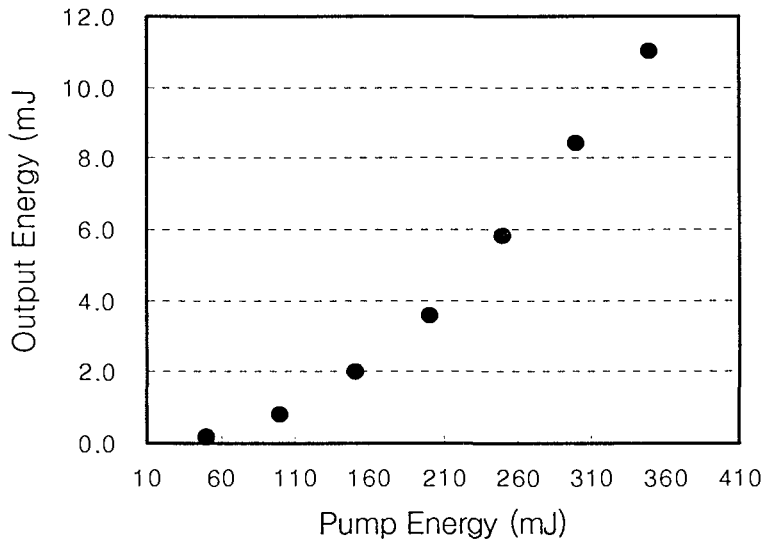


그림 4-3 Er:YLF 레이저 출력

출력을 향상시키기 위하여 pump module을 그림 4-4와 같이 새롭게 구성하여 실험하였다.

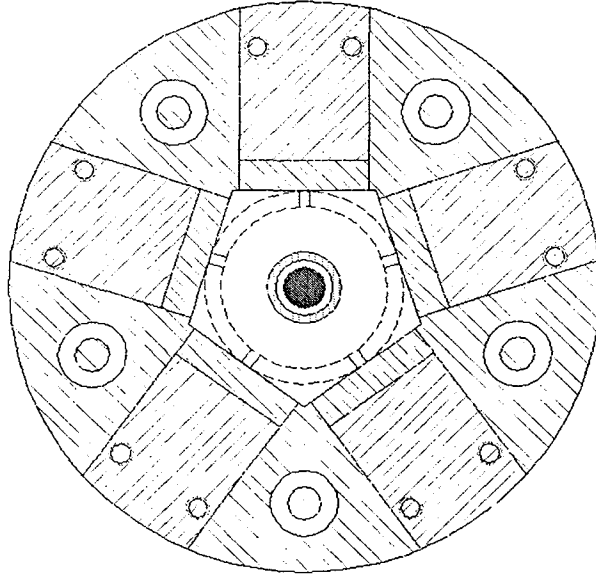


그림 4-4 5개 레이저 모듈을 사용한 측면여기 구조

레이저 다이오드 모듈 5 개를 crystal 주위에 72도 간격으로 배열하여 펌핑시켰다. 다이오드 레이저의 최대 펄스 폭은 400us 이므로 최대로 펌핑할 수 있는 펄스 에너지는 600 mJ 이었다. 최대 60 Hz로 동작시켰을 때 펄스당 출력은 18 mJ 최대 평균출력은 1.1 W 의 출력을 얻었다.

제 5 장 다이오드 레이저 구동 전원장치 개발

제 1 절 전원장치 설계 및 제작 (1 차년도 수행분)

1. 고정도 정전압 전원공급장치 설계

설계된 전원장치는 그림 5-1 과 같이 구성되었다. 각 부분에 대한 기능은 다음과 같다. 그림 5-1 에서 보는 것과 같이 AC 전압은 power trans에서 다수의 저전압으로 변환되어 voltage switching circuit 로 입력된다. Voltage switching circuit 에서는 AC를 DC 로 변환하여 output 전압에 따라 적합한 전압을 선택하여 regulate circuit 로 출력한다. Regulate circuit 에서 지정된 전압으로 제어되어 voltage/current monitor를 통하여 출력된다. 이 출력은 A/D converter 로 디지털신호로 변환되어 microcontroller 로 입력되어 전압과 전류가 제어된다. 전압/전류 지정과 현재 동작상태표시는 number/function keypad 와 LCD display에서 이루어 지며 입력된 데이터는 EEPROM 에 저장되어 현재의 동작상태가 전원 off 후에도 기억유지된다.

2. 다이오드 구동용 전원장치 제작

Microcontroller를 이용하여 사용이 간편하고 현재 동작상태가 문자와 숫자로 표시되게 하였으며, 고출력 제어를 위하여 IGBT 소자를 사용하여 제작하였다. 제작된 장치의 전면부는 그림 5-2 와 같으며 제작된 전원장치의 전면부에는 LCD display 와 숫자/기능키로 구성되어 출력설정 및 동작상태가 표시된다. 각 키에 대한 기능은 표 5-1 과 같다.

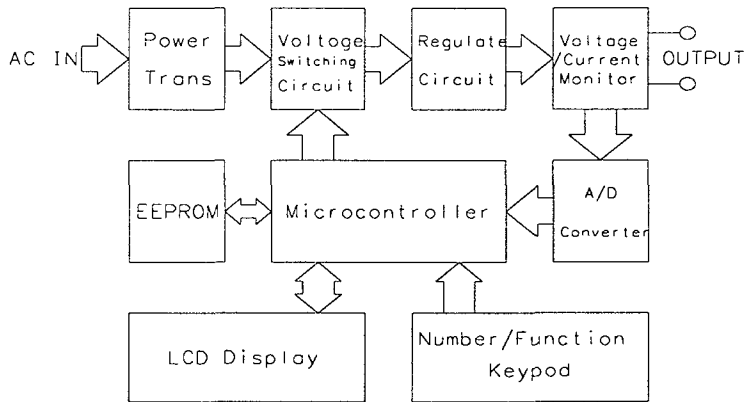


그림 5-1 전원공급장치 구성도

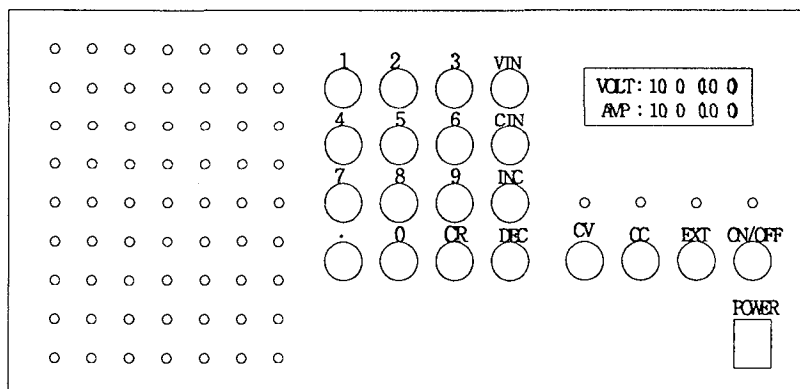


그림 5-2 전원장치 전면부

표 5-1 키 패드와 기능

| 키 | 기능 |
|-----------|--------------------------|
| 0 - 9 & . | 데이터 설정 |
| CR | 데이터 저장 |
| VIN | 전압입력 |
| CIN | 전류입력 |
| INC | 동작중 전압/전류 증가 |
| DEC | 동작중 전압/전류 감소 |
| CV | Constant Voltage mode 지정 |
| CC | Constant Current mode 지정 |
| EXT | External Control mode 지정 |
| ON/OFF | 출력 on/off 제어 |

전압 및 전류는 number 키로 설정하고 설정된 데이터에 의하여 전원출력이 제어된다. 동작은 정전압 혹은 정전류 모드로 작동되며 각 모드는 기능 키에서 제어된다. 장치의 제원은 표 5-2 와 같다.

표 5-2 다이오드 구동 전원장치 제원

| 제 원 | 사 양 |
|----------|--------------------------------------|
| 전 압 | 0 - 12 Volt |
| 전 류 | 0.1 - 25.5 Ampere |
| 전 압 오 차 | ± 0.1 Volt |
| 전 류 오 차 | ± 0.1 Ampere |
| 동 작 mode | Constant Voltage Constant Current |

3. 다이오드 구동 전원장치 특성실험

제작된 전원장치에 다이오드레이저를 접속하여 출력실험을 하였다. 그림 5-3 은 제작된 전원장치를 사용하여 광섬유 결합된 다이오드 레이저를 구동한 결과이다. 출력실험 결과 원산지에서 실험한 결과치와 유사한 출력값을 얻었다. 전류의 ripple은 다이오드 레이저 발진 문턱값 이전에서 약간 발생하였으며 구동 전류치가 높아질수록 안정된 동작을 보여 주었다.

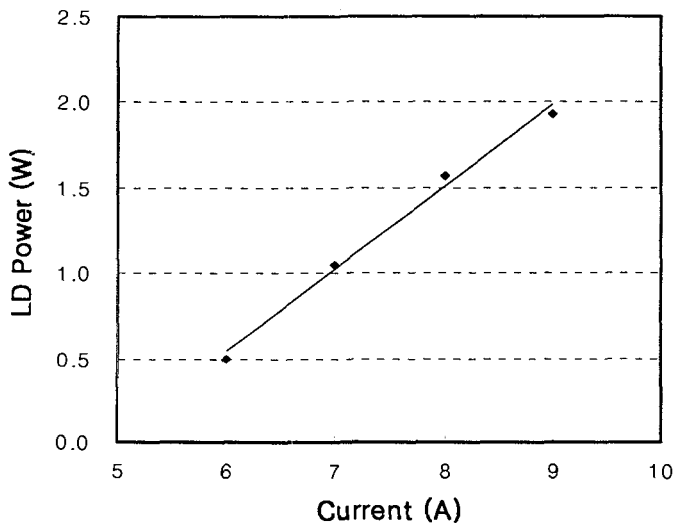


그림 5-3 구동전류에 따른 레이저 다이오드 power

제 2 절 전원장치 모듈화 및 성능 시험 (2 차년도 수행분)

1. 고전류 정전류 전원장치 설계 및 제작

가. 고출력반도체레이저 구동회로 설계

1 차년도에 제작된 장치에서 전류제어시 ripple 레벨을 낮추기 위하여 PWM 방식 전류구동을 forward 방식으로 재 구성하여 설계하였다. 구성된 구동회로는 레이저 전류제어를 위하여 hall sensor와 레귤레이터 IC를 이용하여 그림 5-4 와같이 설계 제작하였다.

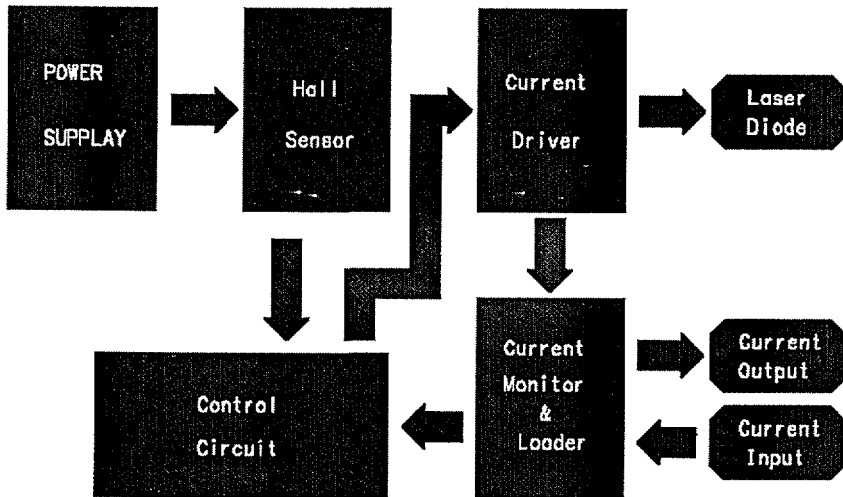


그림 5-4 반도체레이저 구동회로 구성도

그림 5-4 에서 power supply 는 상용전원장치로서 5 V/60 A 전원장치를 사용하였으며, 50 ampere 까지 측정가능한 고속 hall sensor를 사용하여

전류신호를 감지 하였다. Current driver 는 고전력반도체소자를 사용하여 forward 방식의 구동회로로 구성하여 최대 125 ampere 까지 동작하게 하였으며 operational amplifier 를 사용하여 전류 monitoring 과 설정전류 제어를 위한 current monitor & load5를 구성하였다. Control circuit 는 전력제어용 IC 를 사용하여 전체 신호제어를 하였다.

제작된 장치는 사진 5-1 과 같고 제작된 장치의 제원은 다음과 같다.

- 레이저 출력 : 10 W
- 구동전압 : 2 V
- 구동전류 : 40 Ampere

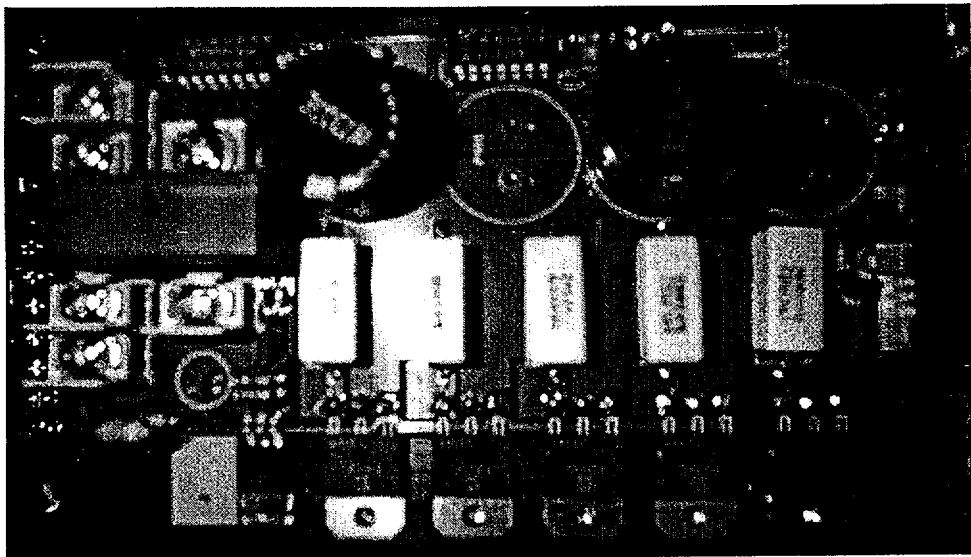


사진 5-1 고출력 반도체레이저 구동 보드

사진 5-1 고출력 반도체레이저 구동보드와 주변장치들을 결합하여 고출력 반도체레이저 구동장치를 구성하였다. 300 watt 전원장치와 장치제어를 위한 보조전원 및 heat sink 와 cooling fan을 이용하여 구성된 장치는 사진 5-2 와 같다.

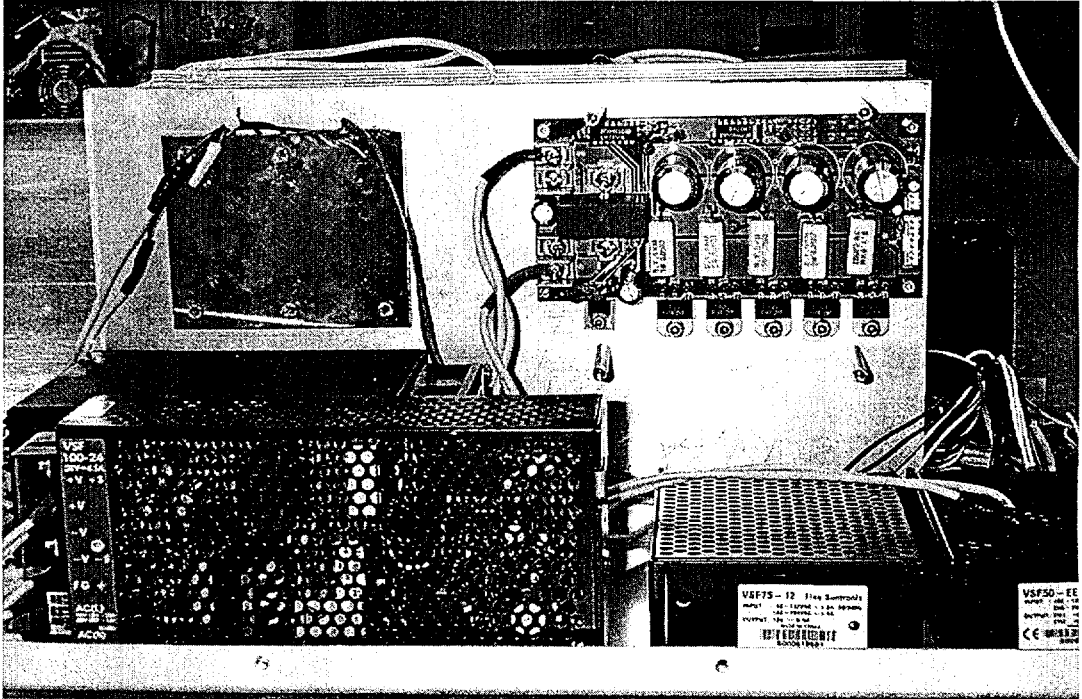


사진 5-2 고출력 반도체레이저 구동장치

사진 5-2 의 장치를 이용하여 실험한 결과 1 차년도에 제작된 장치에서의 리플보다 훨씬 적은 10 mV 이하의 ripple 전압이 발생하는 안정된 동작상태를 나타내었다. 측정된 ripple 전압상태는 사진 5-3 과 같다.

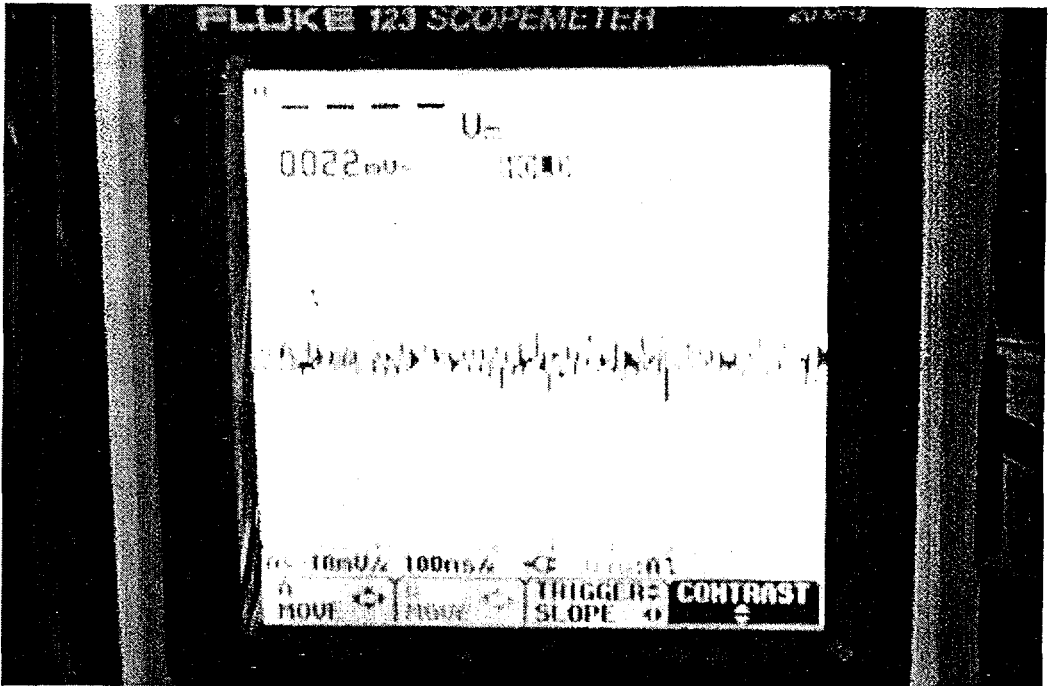


사진 5-3 고출력 반도체레이저 구동회로 ripple 측정파형

나. 레이저 출력 제어 판넬 설계

레이저 출력제어 실험을 위하여 마이크로프로세서와 액정표시장치를 이용하여 설계 제작후 실험하였다. 마이크로 프로세서를 이용하여 S/W 적으로 광센서와 홀센서의 신호를 분석하여 처리하는 프로그램 설계후 출력감지 및 처리 알고리즘 개발하였으며 성능 평가를 위하여 고전류 전자 load를 이용한 실험 장치 구성후 1 - 40 Ampere 전류변화에 대하여 정확도 및 리플 제어정도를 실험할수 있도록 하였다. 실험결과 1 차년도의 PWM 방식구동시에 발생되었던 50 mV ripple 보다 훨씬적은 10 mV 이하의 ripple 상태를 얻을수 있었다.

제 6 장 결 론

본 과제는 97 년 10 월 공업기반과제의 국제공동연구과제로, 군용 다이오드 레이저 여기 Nd:YAG 레이저 개발 경험이 있는 폴란드의 MUT 와 산업용 Nd:YAG 레이저 개발 경험이 있는 한국원자력연구소가 공동으로, 최근 의료분야에서 치과, 피부과, 안과 및 심장 치료분야에서 물의 흡수가 높으며 광섬유 전송이 가능하여 각광을 받고 있는 Er 및 Ho 레이저를, 기존의 lamp 여기형에 비해 유지 보수가 편리하고 장치의 소형화가 가능하여 의료분야의 활용에 보다 적절한 다이오드 레이저 여기형 Er 및 Ho 레이저를 개발하는 것을 목표로 착수하였다. 다이오드 레이저 여기형 Ho 레이저에 대신하여 물의 흡수가 보다 높고 레이저 핵융합 연구와 관련하여 연구가 많이 수행된 다이오드 레이저 여기형 Tm 레이저를 개발하게 되었다.

다이오드 여기형 고체레이저는 산업분야와 의료분야에서 공동으로 활용되는 Nd:YAG 레이저의 경우에는 여기에 이용되는 805 nm 다이오드 레이저가 대량 생산되어 가격도 하락하고, 수명도 10,000 시간 정도로 길어지고, 품질면에서도 안정성을 유지하고 있으나, 다이오드 레이저 여기 Er 및 Ho 레이저는 아직 연구중인 분야로서, Er 및 Ho 레이저 여기에 이용되는 970 nm 와 785 nm 다이오드 레이저의 경우는 아직 매우 고가이며, 내구성이나 품질면에서 아직 안정되지 않고, 또한, 2.0 um 및 2.9 um 의 중적외선 광학부품 박막 코팅의 어려움 등 본 연구 수행에 어려움이 많았으나, 폴란드 공동연구기관과의 협력을 통해 다이오드 레이저 여기형 Tm 및 Er 레이저를 개발하게 되었다

본 연구 착수 바로 후에 닥친 IMF 에 따라 고가의 다이오드 레이저 구입에 어려움을 겪어 5 개월의 연구기간을 연장하게 되었으며, 2 차년도 착수

시에 5 개월의 공백기간이 있었다. 국제공동연구과제로 1 차년도 에는 참여기업없이 착수하였으나, 1 차 연도에 참여한 연구원이 2 차 연도에 본 과제의 연구내용과 같은 분야인 다이오드 레이저 여기형 고체레이저 상품화로 연구원 창업을 하게되어 2 차년도에는 본과제의 참여기업으로 참여하게 되었다.

1 차년도에는 미국의 LLNL에서 수행한 방법을 따라, 다이오드 레이저의 파장을 Tm 의 흡수 peak 에서 다소 벗어나게 여기시키는 wing pumping 방식을 사용하였으나, 국내에서 처음 시도한 2 um 의 중적외선 박막코팅이 집속된 다이오드 레이저의 고출력에 견디지를 못하여 다이오드 레이저 여기형 Tm 레이저 개발에 실패하였으나, 2 차년도에 보다 효율적인 다이오드 레이저의 파장을 Tm 의 흡수 peak 에 맞추어 보다 낮은 출력의 다이오드 레이저를 사용하여 국내 처음으로 다이오드 레이저 여기형 Tm 레이저를 개발하였다.

다이오드 레이저 여기형 Er 레이저 개발에 있어서는 다이오드 여기형 Tm 레이저 개발시 사용한 측면여기 방식보다 대출력 발진에 유리한 측면여기 방식을 이용하여 대출력의 다이오드 여기형 Er 레이저를 개발하게 되었다. 다이오드 레이저 여기형에 유리한 Er:YLF 를 사용함에 따라 파장이 2.7 um 로 이동하였으며, 2.7 um 에서는 광학유리 내부의 물의 OH 흡수가 가장 높아서 2.9 um 의 Er:YAG 광학부품을 사용할 수가 없어서 어려움을 겪었으나 2.7 um 의 거울을 구하여 국내 처음으로 다이오드 여기형 Er 레이저 발진에 성공하였다.

2 차년도에 한편으로는 상품화에 대비하여 의료용 레이저 시장의 동향 및 전망을 분석하였으며, 특히, 의료용 Er 및 Ho(Tm) 레이저의 치료 현황 및 시장 동향/전망에 대하여 분석하였다. 분석 결과 Er 과 Ho(Tm) 레이저는 의료용 레이저를 가장 많이 사용하는 피부과, 치과, 안과 및 심장수술 분야에서 가

장 각광을 받고 시장 전망이 밝은 레이저이다. 그러나, 아직 다이오드 레이저 여기형은 상품화 되지 않고 있으며 lamp 여기형만 이용되고 있다. 그러나, 의료용 Nd:YAG 레이저가 lamp 여기형에서 다이오드 레이저 여기형으로 대체되고 있어 앞으로 Er 및 Ho(Tm) 도 다이오드 레이저 여기형으로 대체될 것으로 전망된다.

따라서, 우선은 본 과제에서 개발된 다이오드 구동용 전원장치를 다이오드 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저에 적용하여 상품화하는 것을 시도하는 것이 적절하다고 판단된다. 특히, 고품질의 단면여기 방식과 대출력의 측면여기 방식 모두를 본 과제에서 수행하였으므로 의료용뿐만 아니라 산업용 ekldhem 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저의 상품화가 가능하다. 그리고, 현재 급속한 성장이 예상되는 Er 및 Ho(Tm) 레이저의 시장 변화에 유의하면서 대처하여 나가야 할 것이다.

의료용 레이저의 상품화와 관련하여 외국의 의료용 레이저 개발을 보면 의료용 레이저 자체의 개발보다는 개발된 의료용 레이저를 이용하여 치료하는 기술의 개발에 보다 많은 시간과 투자가 필요하다. 국내의 중소기업이 레이저 개발과 치료기술을 동시에 개발하고 의료용 레이저의 승인절차를 밟는 것은 현재 매우 어렵다. 따라서, 외국의 개발된 치료기술을 활용할 수 있는 분야에 대하여 상품화를 시도하는 것이 유리하며 다이오드 레이저 여기형의 경우는 lamp 여기형 레이저를 사용한 치료기술이 보편화되어 있어, 치료 기술 개발의 부담이 없으며 승인절차에서도 유리하여 상품화시에 유리하다고 판단된다.

결론적으로 선진국에서도 개발중인 어려운 기술을 시도하여, 많은 어려움을 겪으면서 당초의 목적을 달성하였다고 판단되며, 다이오드 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저의 상품화에 따른 의료 및 산업분야의 기여가 기대된다.

부 록

1. 참고 문헌

1. C. Bollig, W.A. Clarkson, R.A. Hayward, and D.C. Hanna, Opt. Commun. **154**, 35 (1998).
2. P.J.M. Suni and S.W. Henderson, Opt. Lett. **16**, 817 (1991).
3. J.E. Pinto, L. Esterowitz, and G.H. Rosenblatt, Opt. Lett. **17**, 731 (1992).
4. L.F. Johnson, J.E. Geusic, and L.G. Van Uitert, Appl. Phys. Lett. **7**, 127 (1965).
5. G. Armagan and A.M. Buoncristiani, OSA Proc. Tunable Solid State Lasers, **6**, 144 (1990).
6. 정태문, 김광석, 문희종, 이종훈, 김철중, 이종민, 한국광학회지, **9**, 231 (1998).
7. T. Jensen et al, Opt. Lett **21**, 585 (1996).
8. T. Jensen et al, Technical Digest CLEO Europe, Hamburg, p132

2. 본 연구에서 발표/게재된 논문

1. Photonics Prague'99 Conference 발표 논문
(SPIE Vol. 4016, pp 336-341)
2. 한국 광학회지 게재 논문

Diode pumped, intracavity frequency doubled, passively Q-switched Nd lasers

J. K. Jabczyński*, K. Kopczyński*, Z. Mierczyk†, W. Żendzian*, Cheol-Jung-Kim**, Kwang-Suk-Kim**

* Institute of Optoelectronics, MUT, Warsaw, Poland

** Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon, Korea

ABSTRACT

The analytical model of intracavity frequency doubled end pumped laser has been worked out and applied to optimize the major components (pump parameters, non linear crystal parameters, cavity geometry) of such laser. The experiments of cw and passively Q-switched intracavity doubled Nd lasers were carried out. About 1 W of averaged green power, with pulse energy of 150 μ J, pulse duration of 40 ns were achieved for 10 W fiber coupled pumping diode. The directions of optimization of such lasers were formulated.

Key words: diode pumped lasers, frequency conversion, passive Q-switching

1. INTRODUCTION

Lasers of high spectral brightness beams and low losses on fundamental frequency are required for efficient intracavity II harmonic conversion (see ¹⁻⁴). Three main methods of frequency conversion were applied namely: external single pass conversion (EC), intracavity conversion (IC) and resonant external cavity conversion (REC). Two first methods were used mainly for Q-switched lasers, although some attempts to intracavity conversions of high power cw lasers were demonstrated as well. The last method required the single frequency work on fundamental wavelength and precise mode matching and frequency tuning of both cavities, thus it did not found practical application till advent of diode pumped lasers. The flashlamp pumped green laser systems, especially of higher average power, require water cooling, complicated high voltage supply and have overall efficiency about 1 %, thus there were seldom not competitive to other green sources (e.g. gas Ar or He-Ne lasers). The advent of efficient, reliable, room temperature laser diode arrays in the middle of 80-ties completely changed the situation. Frequency doubled diode pumped lasers have found strong market position since beginning of 90-ties due to their compactness, high efficiencies, reliability and unique, comparing to other laser sources, properties. It was possible to construct green lasers with output power starting of part of mW ending far beyond 100 W (see Table 1 ⁵⁻¹⁴) with optical efficiencies (with respect to pump power) above 10%.

Table 1. Parameters of frequency doubled diode pumped lasers: IC - intracavity, REC- resonant external cavity, AO - acousto-optic Q-switch, R - ring cavity, μ ch- microchip, F-P.- linear Fabry-Perota cavity, Z - folded cavity of Z-type, L- folded cavity of L- type.

| Pump [W] | Active medium | Type of lasers | Mode transv/long | Nonlinear crystal | Output Power[W] | efficiency [%] | Ref./year/ |
|----------|---------------------|-----------------|------------------|------------------------|-----------------|----------------|------------|
| 0.030 | Nd:YLF | IC-cw-FP | sm/mm | MgO:LiNbO ₃ | 0.0015 | 0.5 | [5]/1986 |
| 1 | Nd:YAG | REC-cw-R | sm/sf | MgO:LiNbO ₃ | 0.2 | 20 | [6]/1991 |
| 4 | Nd:YAG | REC-cw-FP | sm/sf | MgO:LiNbO ₃ | 1.1 | >25 | [7]/1996 |
| 0.62 | Nd:YVO ₄ | IC-cw- μ ch | sm/sf | KTP | 0.016 | 2.6 | [8]/1991 |
| 0.38 | Nd:YVO ₄ | IC-cw- μ ch | sm/sf | KTP | 0.05 | 13 | [9]/1994 |
| 0.88 | Nd:YVO ₄ | IC-cw-FP | sm/sf | KTP | 0.287 | 32.5 | [10]/1998 |
| 10 | Nd:YAG | IC-cw-FP-L | sm/sf | KTP | 0.6 | 6 | [11]/1997 |
| 12.6 | Nd:YVO ₄ | IC-cw-FP | sm/sf | KTP | 3.2 | 25.4 | [12]/1998 |
| 331 | Nd:YAG | IC-cw-Z | mm/mm | KTP | 27 | 8.2 | [13]/1998 |
| 1300 | Nd:YAG | IC-AO-Z | mm/mm | KTP | 315 | 24 | [14]/1998 |

In the simplest, compact pulsed green laser both passive Q-switching and intracavity doubling should be used^{13,15}. The scope of interest of the paper was focused on passively Q-switched, Nd laser with intracavity frequency conversion pumped by 10 W fiber coupled bar. In the 2-nd chapter modeling of intracavity doubled laser was presented. In the 3-rd chapter experiments on passive Q-switching were presented and discussed.

2. MODELING OF INTRACAVITY FREQUENCY DOUBLED LASERS.

From the laser theory fundamentals it is well known (see e.g.¹) that in frequency doubled laser it is possible to extract the same power on II harmonic as on the fundamental frequency if the optimum coupling condition is satisfied. This condition do not depend on pump level directly, for optimum nonlinear coupling it is necessary to determine only total value of internal losses in the cavity. However in practical systems it is very difficult or may be impossible to achieve such high conversion performance because of additional losses introduced by non ideal parameters of elements needed for intracavity doubled lasers. The highest, to our knowledge, second harmonic optical efficiencies of 20 -30% with respect to optical pump power were demonstrated in^{10,12,14}, with more than 50% optical efficiencies of output on fundamental frequency were achieved in the same cavities. The proper cavity scheme, nonlinear crystal parameters and low loss optical elements are crucial in design of efficient intracavity doubled laser.

In the optimization of intracavity doubled end pumped lasers the following effects should be considered: pumping volume parameters, type and length of nonlinear crystal, type, length and thermo-optical parameters of active medium, fundamental mode size in dependence on pump power, possible intracavity lenses including thermal lens, all possible types of losses (including pump power induced losses). Let us assume the following schemes of intracavity doubled passively Q-switched lasers (see Fig 1)

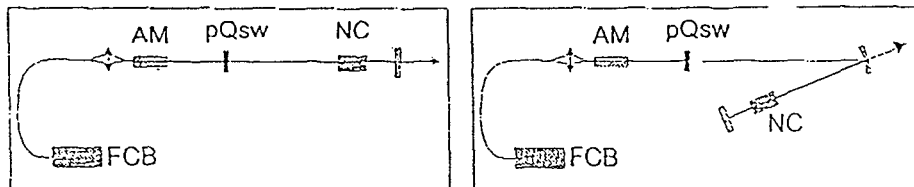


Fig. 1. Schemes of intracavity doubled passively Q-switched lasers left - linear cavity, right - folded cavity case
AM - active medium, pQsw - passive Q-switch made of Cr4+:YAG, NC - KTP frequency doubling crystal

Let us notice that in both cases thermal lensing plays important role in defining the fundamental mode parameters, mode matching efficiency and overall laser efficiency. There were elaborated analytical models for cw and passively Q-switched lasers respectively. The detailed description of both models will be given elsewhere¹⁷. Here we only describe the main characteristics of cw doubled laser namely:

- 1- II harmonic efficiency $\eta_{2\omega}$ defined as ratio of cw II harmonic output power to pump power as a function of: internal losses L , KTP crystal length l_c , walk off angle ρ pump power P , averaged pump beam diameter W_p , cavity configuration parameters, thermal lensing power for given pump power etc.
- 2- merit function β_{merit} as a product of mode matching efficiency walk off efficiency and intracavity mode magnification being a function of pump, cavity geometrical and nonlinear crystal parameters

In the case of second model based on Degnan's approach¹⁸ the following undimensional quantities describing intracavity passively Q laser were introduced namely: N - nonlinear losses, L - internal losses, Q - passive Q-switch initial losses and α - ratio of cross sections of absorbing and active media multiplied by intracavity magnification between nonlinear crystal and active medium. For such 4 parameter set of data the main parameters of output can be calculated from analytical formulas namely:

- 3- pulse energy as a function $E_2(\alpha, N, L, Q)$
- 4- peak power $P_2(\alpha, N, L, Q)$ and resulting pulse duration as a ratio of $E_2(\alpha, N, L, Q)$ to $P_2(\alpha, N, L, Q)$.

Let us notice that these parameters do not depend directly on pump rate. Averaged power and repetition rate depend on initial small signal gain linearly proportional to pump rate. However, due to thermal lensing dependence on pump power

three first parameters α , N , L depend on pump power. Let us see results of modeling of influence of separate factors on the output characteristics of cw intracavity doubled lasers with folded cavity and linear cavity Fig 2,3 respectively.

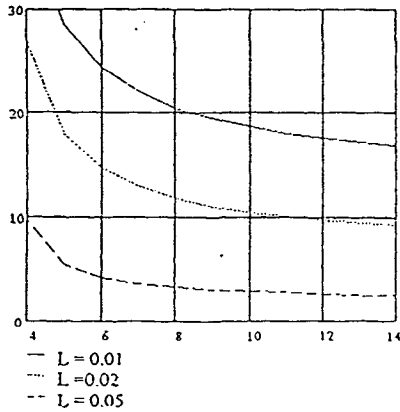


Fig 2a. CW II harmonic efficiency vs pump power for several internal losses L , and constant $lc = 8$, folded cavity case

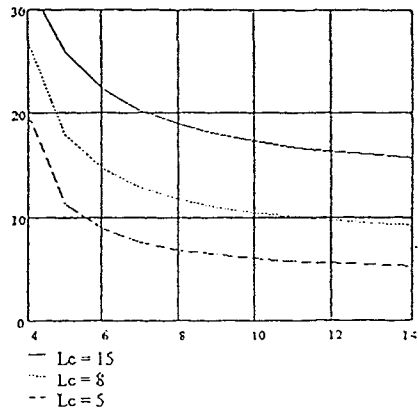


Fig 2b. CW II harmonic efficiency vs pump power for several lc and constant $L = 0.01$ folded cavity case.

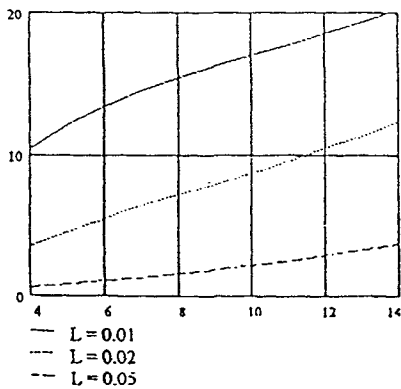


Fig 3a. CW II harmonic efficiency vs pump power for several internal losses L , and constant $lc = 8$; linear cavity case

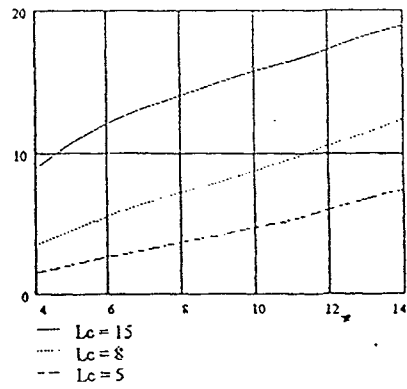


Fig 3b. CW II harmonic efficiency vs pump power for several lc and constant $L = 0.01$ linear cavity case.

After analysis of merit function dependence on pump power we concluded that scheme of folded cavity (i.e. with internal lens) is less efficient comparing to linear one. From the point of output energy extraction the folded mirror should be used, however we showed the best choice in this case is flat mirror. More complicated situation is in case of Q-switched intracavity doubled laser (see Fig 4) because of 4 parameter set of variables.

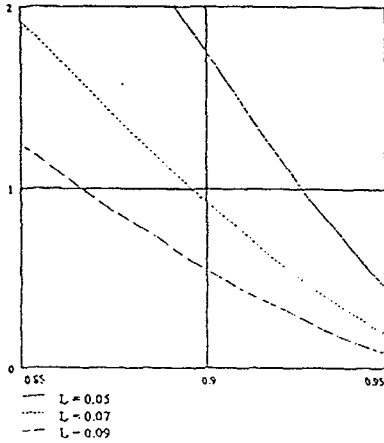


Fig. 4a. Pulse energy vs. initial transmission for several internal losses , cross section ratio, nonlinear losses constant

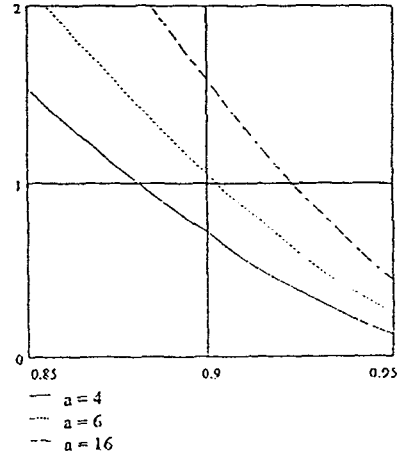


Fig. 4b. Pulse energy vs. initial transmission for several internal losses , cross section ratio , nonlinear losses constant

In this case cross section ratio as well as internal losses are crucial in optimization of such laser. The detailed estimation of several other factors as mode matching efficiency, pump induced losses are beyond scope of such simple model, however the main directions of optimization can be derived with simplicity from it.

3. EXPERIMENTS

The experiments were performed for both schemes and two gain crystals namely: Nd:YAG and Nd:YVO₄. As frequency converter the KTP crystal of 8 mm length mounted on thermo-electrically controlled (TEC) heat sink was applied. We found that, as a result of internal absorption of 1.064 μm radiation, the KTP temperature increases on 10 - 20 K above environment. Such temperature increase, partly compensated by TEC cooling decreases significantly performance of laser because of severe polarization losses. This effect caused by birefringent filter (see ^{10,12}) was examined in folded cavity Nd:YVO₄ laser. It was demonstrated more than 30% depth of modulation in output power as a result of temperature tuning of KTP in range of few K. Thus precise control of nonlinear crystal temperature with 0.5 K accuracy is required to maximize and stabilize green laser output power. However even for such KTP tuning we obtained not more than 0.6 W of output green power for incident 8 W pump which demonstrates the severe internal losses of cavity. The theoretical analysis showed that the role of internal losses is not so important for Q-switching operation, thus we decided to focus only on Q-switching experiments.

The best results of passively Q-switched frequency doubled output were obtained in Nd:YAG laser with linear cavity (Fig 1a) of 130 mm length. high thermal lensing in the Nd:YAG rod ($\sim 20 \text{ m}^{-1}$ for absorbed pump power of 10 W) caused limited pump power range up to 6-7 W for such cavity length. We used three Cr⁴⁺:YAG absorbers with initial transmission of 0.88 , 0.82, 0.76 respectively prepared in the Institute of Optoelectronics ¹⁵. Because of lack of proper intracavity frequency separator more than 50% of green internal power were wasted, thus we present here performance characteristics calculated for internal power assuming 0.45 extraction efficiency.

The results of measurements of averaged internal power pulse energy, repetition and pulse duration are shown in Fig 5,6,7,8 respectively

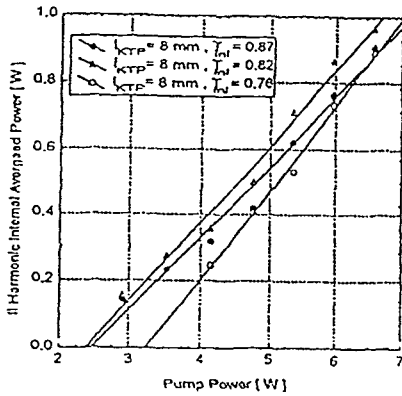


Fig. 5. Average II harmonic power vs pump power for three passive Q-switches

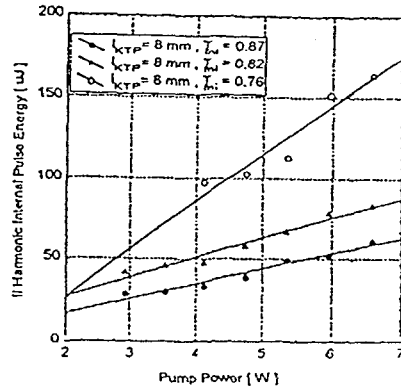


Fig. 6. II harmonic pulse energy vs pump power for three passive Q-switches

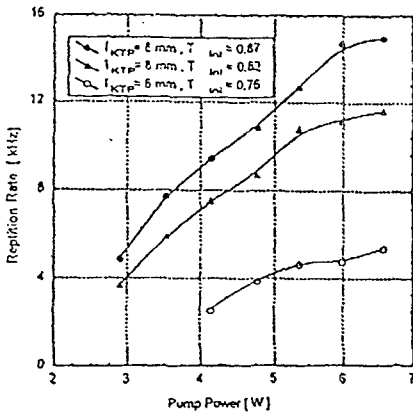


Fig. 7. Repetition rate of II harmonic pulses vs. pump power for three passive Q-switches

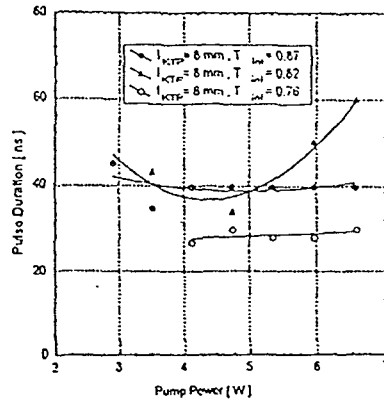


Fig. 8. Pulse duration of II harmonic pulses vs. pump power for three passive Q-switches

Comparing to results of passive Q-switching in the same laser working at 1.064 μm wavelength, the similar output energy and averaged power were obtained, but about two times shorter pulses as a result of nonlinear effect of harmonic converter. Thus, the green peak power of 5 kW was demonstrated with power enhancement factor of 10^3 with respect to pump power. The overall optical efficiency of 15% with respect to pump power is higher than result of A. Agnesi²⁰ obtained for extra cavity frequency doubled passively Q switched laser. The output beam was diffraction limited and single longitudinal mode of each individual pulse. Averaged over long exposition time (consisted of several dozens of pulses) multimode spectrum width is of 50 GHz, indicating that mode hopping between following pulses occurs. Pulse peak power and energy fluctuations were of 20%, temporal jitter of pulses was less than 5%. We suppose that in proper design of cavity with temperature control of nonlinear crystal and active medium the noisy parameters should be significantly improved. We investigated in our experiments several passive Q-switches made of Cr^{4+} :YAG and we

observed also significant heating because of absorption of I, II harmonic as well as pump radiation. Thus we conclude that additional important factor in optimization of such type of laser is quality of passive Q-switch.

4. ACKNOWLEDGMENTS

This work was partly supported by Polish Committee for Science Research under project PBZ.2183/T119710. We would like to thank Z. Frukacz from Institute of Electronic Materials Technology for preparing of Cr⁴⁺:YAG crystal

5. REFERENCES

1. R.G. Smith, „Theory of Intracavity Optical Second Harmonic Generation”, *IEEE J of Quant. Electr.*, 6, pp. 215-226, 1970.
2. D. Eimerl, „High Average Power Harmonic Generation”, *IEEE J of Quant. Electr.*, 23, pp. 575 - 592, 1987.
3. W. Koechner in „*Solid-State Laser Engineering*”, Springer, pp. 562 - 595, 1996.
4. D.W. Anthon, D.L. Supes, T.J. Pier, M.R. Ressler, „Intracavity Doubling of CW Diode-Pumped Lasers with KTP”, *IEEE J of Quant. Electr.*, 28, pp. 1148 - 1157, 1992.
5. T.Y. Fan, G.J. Dixon, R.L. Byer, „Efficient GaAlAs diode-laser-pumped operation of Nd:YLF at 1.047 μm with intracavity doubling to 523.6 nm”, *Opt. Lett.*, 11, pp. 204-206, 1986
6. D.C. Gerstenberger, G.E. Tye, R.W. Wallace, „Efficient second-harmonic conversion of cw single-frequency Nd:YAG laser light by frequency locking to a monolithic ring frequency doubler”, *Opt. Lett.*, 16, pp. 992- 994, 1991.
7. K. Schneider, S. Schüller, J. Mlynek, M. Bode, J. Freitag, „1.1 W single frequency radiation 532 nm by second harmonic generation of a miniature Nd:YAG ring laser”, *Opt. Lett.*, 21, pp. 1999-2001, 1996.
8. T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani, O. Oguri, S. Nakai, „Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers”, *Opt. Lett.*, 21, pp. 1665- 1667, 1991.
9. N. MacKinnon, B.D. Sinclair, „A laser diode array pumped, Nd YVO₄/KTP, composite material microchip laser”, *Opt. Comm.*, 105, pp. 183-187, 1994.
10. D. Shen, A. Liu, J. Song, K. Ueda, „Efficient operation of an intracavity-doubled Nd:YVO₄/KTP laser end pumped by a high-brightness laser diode”, *Appl. Opt.*, 37, pp. 7785-7788, 1998.
11. A. Agnesi, S. Dell'Acqua, G.C. Reali, P.G. Gobbi, D. Ragazzi, Design and characterization of a diode-pumped, single longitudinal and transverse mode, intracavity-doubled cw Nd:YAG laser”, *Appl. Opt.*, 36, pp. 597-601, 1997.
12. Y.F. Chen, T.-M. Huang, Ch.-L. Wang, L.-J. Lee, „Compact and efficient 3.2-W diode pumped Nd:YVO₄/KTP green laser”, *Appl. Opt.*, 37, pp. 597-601, 1997.
13. T. Kojima, S. Fujikawa, K. Yasui, „High Power Performance and Stability Analysis of a Diode-Side-Pumped Intracavity-Frequency-Doubled CW Nd:YAG laser”, in *Trends in Optics and Photonics* vol. XIX eds. W.R. Bosenberg, M.M. Fejer, pp. 314-317, 1998.
14. J.J. Chang, E.P. Dragon, C.A. Ebberts, I.L. Bass, C.W. Cochran, „315 W Pulsed-Green Generation with a Diode-Pumped Nd:YAG laser”, in *Technical Digest of CLEO '98*, paper CPD2-2, (1998)
15. Y.F. Chen, „Passive Q-switching of an Intracavity Doubled Diode-Pumped Nd:YVO₄/KTP Green laser”, *IEEE Photonics Technology Letters*, 9, pp. 1481 - 1483, 1997.
16. T.T. Kajava, A.L. Gaeta, „Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs”, *Opt. Comm.*, 137, pp. 93-97, 1997.
17. J.K. Jabczyński, „Modeling of intracavity frequency doubled lasers” in preparation to press
18. J.J. Degan, „Optimisation of passively Q-switched lasers”, *IEEE J of Quant. Electr.*, 31, pp. 1890 - 1901, 1995.
19. Z. Frukacz, T. Łukasiewicz, M. Malinowski, Z. Mierczyk, „Growth of Cr⁴⁺:YAG crystals for applications in laser technique”, *Proc SPIE*, 2373, pp. 74-80, 1995.
20. A. Agnesi, S. Dell'Acqua, E. Piccinini, G.C. Reali, G. Piccinno, Efficient Wavelength Conversion with High-Power Passively Q-switched Diode-Pumped Neodymium Lasers”, *IEEE J of Quant. Electr.*, 34, pp. 1480 - 1484, 1998.

다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저의 출력 특성 연구

정태문 · 김철중 · 김현수 · 문희중
한국 원자력 연구소 양자광학기술개발팀

김광석
(주) 금광

J. Jabczynski
MUT, Poland

(2000년 4월 4일 받음, 2000년 7월 25일 수정본 받음)

다이오드 레이저 뒷면 여기 방식을 이용하여 발진 파장이 2.02 μm 인 증적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 출력 특성을 조사하였다. 레이저의 출력은 Tm:YAG 결정의 온도에 민감하게 변화하였으며, 레이저의 출력경이 곡면경인 경우에 평면경인 경우보다 더 큰 출력을 얻을 수 있었다. 곡면경을 사용하고 Tm:YAG 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 6°C로 낮추었을 때, 최고 1.2 W의 출력을 얻을 수 있었다. 이 때, 문턱 여기 출력은 약 1.6 W이었고, 기울기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 29%와 20%이었다.

OCIS codes : 140.3480, 143.3410, 140.3380.

I. 서 론

현재 전세계적으로 물에 의한 흡수가 좋고, 눈에 안전해서 (eye-safe) 의료용 및 대기 측정기로 사용될 수 있는 증적외선 영역의 레이저가 활발히 개발되고 있는 실정이다. 이러한 증적외선 영역의 레이저를 개발하는 방법으로 광 매개 발진기(optical parametric oscillator)에 의한 증적외선 발생^{1)이나 증적외선 영역에서 천이 띠를 갖는 레이저 결정을 이용한 증적외선 레이저 발생 등이 있다. 그러나, 증적외선 레이저 개발은 광 매개 발진기에 의한 증적외선 발진보다 비용이 적게 들고, 장치가 간단하며, 효율적으로 증적외선 영역의 파장을 개발하게 하는 장점이 있다. 대표적인 증적외선 발생 레이저 매질로 Tm 이온이 첨가된 YAG(Tm:YAG)^{2)와 YLF(Tm:YLF)^{3)가 있다.}}}

Tm:YAG 및 Tm:YLF 결정을 이용한 레이저의 발진은 1960년대 중반에 이미 이루어졌다.⁴⁾ 그러나, 광 흡수선 영역에서 흡수 계수가 작아 섬광등으로 광여기하는 것이 어려워져서 출력 특성 등에 관한 자세한 연구가 미미하다가, 고출력 반도체 레이저와 Ti:Sapphire 레이저의 등장으로 연속 출력 특성, 펄스형 출력 특성 등에 관한 연구가 광범위하게 이루어졌다. 이와 같은 Tm:YAG 레이저 결정은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 준 삼준위(Quasi-three level) 레이저 결정으로 $^3\text{H}_6$, $^3\text{H}_4$ 천이를 이용하여 광여기하고 $^3\text{F}_4$, $^3\text{H}_6$ 천이에 의해 레이저가 발진된다. 그림 1(b)에 다이오드 레이저 여기 파장에 대한 Tm:YAG 결정의 흡수율이 표현되어 있다. $^3\text{H}_6$, $^3\text{H}_4$ 천이 level에 해당하는 다이오드 레이저 발진 파장 영역은 785 nm로 이 파장에서 흡수율이 가장 크므로 785 nm에서 광여기 하는 것이 유리하다. 그러나, 785 nm에서의 흡수 단면적(absorption

cross section)은 $5.1 \times 10^{-21}\text{cm}^2$ 으로 Nd:YAG와 비교하여 볼 때, 여전히 100배 정도 작으므로 흡수율을 높이기 위해서 보통 수 % 이상 Tm 이온을 YAG 결정에 첨가하여야 한다.

Tm 이온을 수% 이상 첨가하게 되면 $^3\text{H}_6$, $^3\text{F}_4$ 천이에 의한 복사광으로 $^3\text{F}_4$, $^3\text{H}_6$ 천이 띠를 재여기하는 것이 가능하며 이러한 재여기 과정을 cross relaxation이라고 부르며,⁵⁾ 하나의 광자로 두 개의 광자를 생성할 수 있다하여 "two for one" 여기라고도 한다. 이러한 여기구조로 인해 Tm:YAG 결정의 양자효율은 2배 이른다. 그러나, 이러한 재여기 과정은 국부적으로 많은 열을 발생시켜 Boltzman 열분포에 의한 하준위의 밀도 증가와 더불어 레이저 발생시 레이저 광의 흡수를 증가시키므로 결과적으로 문턱 여기 출력을 높이는 역할도 하게 된다. 따라서, 레이저 발진 출력이 온도에 민감한 영향을 받게 된다.⁶⁾

본 연구에서는 785 nm를 침투 파장으로 갖는 최대 연속 출력 7.5 W의 다이오드 레이저를 이용하여, Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저 결정을 여기하여 증적외선 영역인 파장 2.02 μm 를 갖는 Tm:YAG 레이저를 제작하고, 그 출력 특성을 조사하였다. 또한, 레이저 여기 구조의 성능 평가에 중요한 변수가 되는 들뜸 효율을 측정하였다.

II. 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 레이저

다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저의 장치도는 그림 2와 같다. 다이오드 레이저로 여기되는 Tm:YAG 레이저는 여기용 다이오드 레이저, 여기 광학계, Tm:YAG 결정 및 출력경으로 구성된다. Tm:YAG 결정은 직경 3 mm 길이 5 mm의 봉으로, 한 면이 여기 파장인 785 nm에서 HT(High

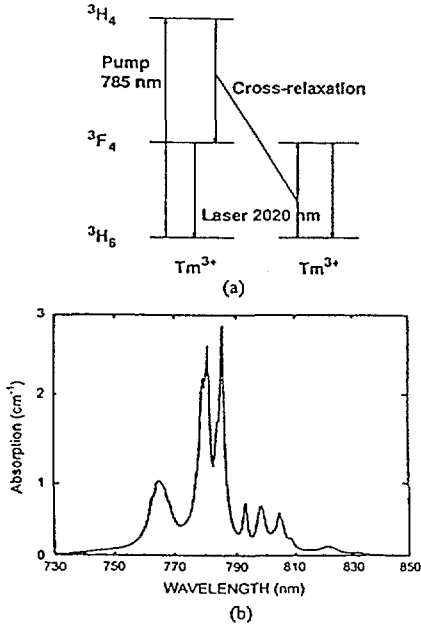


그림 1. Tm:YAG 결정의 에너지 띠 구조 및 흡수 스펙트럼. (a) 에너지 띠 구조, (b) 흡수 스펙트럼.

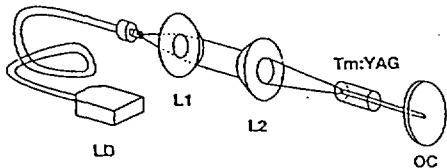


그림 2. 다이오드 레이저 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 장치도. LD: 다이오드 레이저, L1: 평볼록 시준 렌즈, L2: 비구면 집속 렌즈, OC: 출력경.

Transmission) 코팅과 발진 파장인 $2.02 \mu\text{m}$ 에서 HR(High Reflection) 코팅이 되어있고, 다른 면은 발진 파장에 대해서 무반사 코팅되어 있다. 출력경으로는 투과율이 3.7%인 평면경과 투과율이 3%이고 곡률 반경이 50 mm인 곡면경 두가지 종류를 사용하였다.

그림 3은 본 연구에 사용된 Tm:YAG 결정의 코팅 상태를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 한 면은 발진 파장인 $2 \mu\text{m}$ 이상에서 거의 전반사가 일어나고 여기 파장인 785 nm에서 약 95%이상의 투과율을 갖고, 다른 면은 발진 파장 근처에서 반사율이 0.2%이하임을 알 수 있다. Tm:YAG 이득 매질은 인듐 박막으로 감싸 구리 지지대와 열적 접촉을 시켰고, 열전 냉각기(Thermo-Electric Cooler)로 구리 지지대를 냉

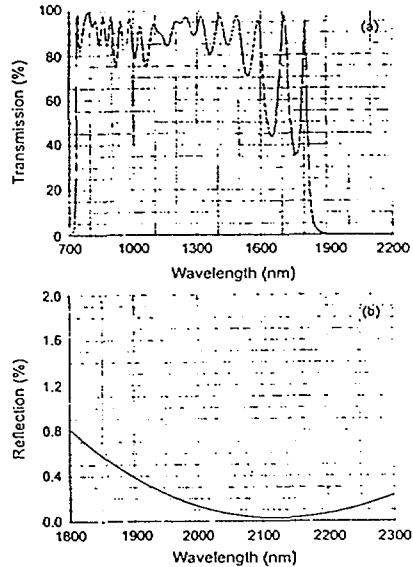


그림 3. Tm:YAG 결정의 코팅 상태. (a) 거울면의 코팅 상태, (b) 거울 반대면의 코팅 상태.

각시켰다. 출력경은 레이저 발진 파장인 $2 \mu\text{m}$ 파장에서 흡수를 방지하기 위해서 Infrasil을 재질로 사용하였으며, 전체 공진기의 길이는 약 15에서 20 mm였다.

여기용 다이오드 레이저는 SLI(Semiconductor Laser International corp.)사 제품으로 코어 직경이 0.63 mm인 길이 1 m 광섬유에 연결되어 있으며, 침투 파장은 785 nm, 개구수(Numerical Aperture) 0.22로 연속 출력으로 최대 7.5 W가 가능하다. 다이오드 레이저의 파장 가변 및 온도 안정화를 위하여 다이오드 레이저를 열전 냉각기에 부착시켰다. 광섬유를 통해서 나오는 다이오드 레이저 출력을 초점거리가 50.5 mm인 평면 볼록 렌즈를 통해 시준하고, 초점거리가 23.5 mm인 비구면 렌즈를 이용하여 이득 매질인 레이저 결정에 집속하였다. 따라서, 집속된 여기광의 크기는 직경 약 0.3 mm로 계산되었다.

III. 다이오드 레이저의 동작 특성 및 Tm:YAG 결정의 들뜸 효율 측정

다이오드 레이저의 발진 파장은 동작 온도 및 동작 전류에 따라 변화한다. 따라서, 동작 온도 및 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화는 다이오드 레이저 여기 고체 레이저에서 반드시 조사하여야 할 부분이다. 본 연구에서는 동작온도 및 전류에 따른 다이오드 레이저 침투 파장(peak wavelength)을 측정하였다. 본 다이오드 레이저의 최대 동작 전류는 18 A이고, 본

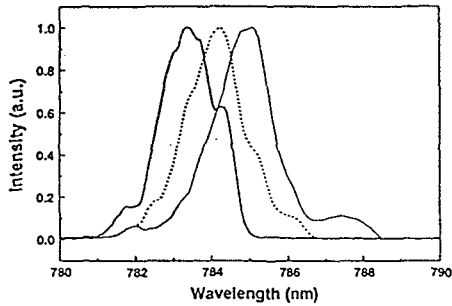


그림 4. 다이오드 레이저 동작 온도에 따른 다이오드 레이저 발진 파장 변화. (실선: 7.3 A(2.1 W), 대시선: 12.2 A(4.8 W), 점선: 16.9 A(6.9 W)).

실험에서는 16.9 A까지 사용하였다. 측정 결과 본 다이오드 레이저는 전류가 1 A 증가할 때마다 0.1 nm씩 장파장으로 이동하고, 온도 1°C 증가할 때마다 0.3 nm씩 장파장 쪽으로 이동하는 것으로 관측되었다. 그림 4는 다이오드 레이저의 동작 온도가 25°C일 때 동작 전류에 따른 파장을 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 동작 전류가 16.9 A일 때, 침두 파장이 785 nm인 것을 알 수 있고, 발진 스펙트럼의 반치폭(FWHM)은 약 1.7 nm 정도였다.

레이저 제작시 들뜸 효율(excitation efficiency, η_{excit})은 레이저의 성능을 평가할 수 있는 중요한 요인이다. 특히, Tm:YAG 레이저 결정과 같이 여기 파장과 발진 파장이 상당히 많이 차이가 나는 경우, 흡수된 에너지가 실제 발진에 참여한 에너지와 많이 다를 수 있어 레이저의 성능을 평가하기 위해서 들뜸 효율을 측정하는 것이 유리할 수 있다. 이러한 들뜸 효율은 광여기에 의해 레이저 붕에 전달되는 에너지중 윗준위의 상태 밀도에 의해 표현되는 에너지의 비로 계산된다. 뒷면 여기 레이저에서 들뜸 효율의 측정은 정태문 등에 의해 연구되어 쉽게 측정할 수 있는 방법이 개발되었으며,^[9] 다음과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$\eta_{excit} = \frac{\eta_u}{P} \int_V P_{abs}(r, z) dV \quad (1)$$

여기서, η_u 는 양자효율(quantum efficiency, η_Q)과 스톡스 인자(stokes factor, η_s)의 곱으로 주어지는 윗준위 효율(upper state efficiency), P 는 여기 출력이고, P_{abs} 는 단위 부피당 레이저 붕에 흡수되는 출력이다. 따라서, 다이오드 레이저로 레이저 붕의 뒷면을 여기할 경우, 여기광이 레이저 붕에서 흡수된 양만을 측정하면 들뜸 효율을 간단히 측정할 수 있다.

윗준위 효율을 계산하기 위해서는 양자 효율을 계산하여야 한다. 일반적으로 양자 효율은 결정의 활성 이온(active ion) 첨가율에 따라 다르게 나타나고 Tm:YAG 결정을 785 nm로 광여기할 경우, 일반적인 고체 레이저 결정과 달리 cross relaxation 현상에 의해 양자 효율이 1이 넘는다. 활성 이온의 첨가율에 따른 양자효율은 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.^[10]

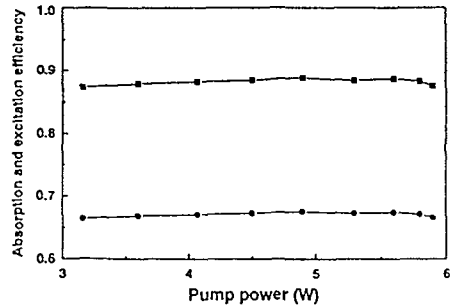


그림 5. 다이오드 레이저로 여기된 Tm:YAG 결정의 흡수율 및 들뜸 효율. (■: 흡수효율, ●: 들뜸 효율).

$$\eta_{QV} = \frac{1 + 2 \left(\frac{C_{Tm}}{C_0} \right)^2 - \frac{\tau_0}{\tau} (1 - \beta)}{1 + \left(\frac{C_{Tm}}{C_0} \right)^2} \quad (2)$$

여기서, β 는 3H_4 준위에서 복사 천이중 3F_4 준위로 천이하는 비율로 0.16인 것으로 알려져 있는 값이다. τ_0 는 고유 형광 완화 시간(intrinsic relaxation lifetime)이고 C_0 는 고유 완화 시간이 절반이 되는 Tm 이온의 첨가율이다. 또한, C_{Tm} 및 τ 은 사용된 결정의 Tm 이온의 첨가율과 이 때의 형광 완화 시간이다. Tm 이온의 첨가율에 따른 형광 완화 시간은 Armagan 등이 이미 조사하였고,^[11] 본 연구에서는 양자효율을 계산하기 위해서 Armagan의 결과를 인용하였다. Armagan의 결과를 인용하였을 때, 양자효율은 약 1.95인 것으로 계산되었다.

본 논문에서는 다이오드 레이저 뒷면 여기 Tm:YAG 레이저의 들뜸 효율을 측정하였다. 785 nm로 여기하고 2.02 μ m로 발진하는 경우 Tm:YAG의 스톡스 인자는 0.39이고 본 연구에서 사용된 Tm 이온이 6% 첨가된 Tm:YAG 레이저의 경우 양자 효율이 1.95이므로, 윗준위 효율은 0.76으로 계산되었다. 본 실험에서는 각각의 여기 출력에서 흡수된 여기광을 측정함으로써 들뜸 효율을 측정하였다. 다이오드 레이저의 동작 온도는 25°C였다. 그림 5에 측정된 들뜸 효율이 나타나있다. 여기광 출력은 다이오드 레이저 동작 전류에 따라서 약 87에서 89%까지 Tm:YAG 결정에서 흡수되었으며, 다이오드 레이저의 동작 전류가 14 A일 때 흡수가 최대가 되었고, 이 때 침두 파장은 784.6 nm 여기 출력은 4.9 W였다. 따라서 들뜸 효율은 그림에서 보는 바와 같이 약 66에서 68%까지 변화하였다. 이와 같은 들뜸 효율은 Nd 이온이 1. at.% 첨가된 Nd:YAG 레이저에서 얻어진 60%와 비교하여 볼 때 같거나 우수한 수준임을 알 수 있다.^[9]

IV. 다이오드 레이저 여기 Tm:YAG 레이저의 출력 특성

그림 6은 다이오드 레이저 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이

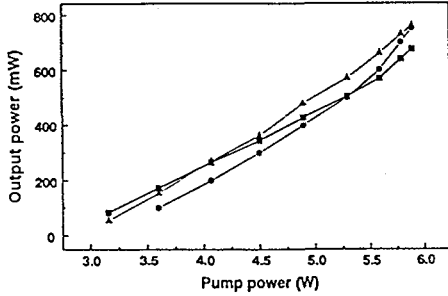


그림 6. 다이오드 레이저 동작 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성. (■: 다이오드 레이저 온도 15°C, ●: 20°C, ▲: 25°C).

저 출력을 보여준다. Tm:YAG 결정 지지대의 온도는 23°C로 고정하였으며 다이오드 레이저의 동작 온도를 각각 15, 20, 25°C로 설정하여 실험하였다. 다이오드 레이저의 온도가 25°C 일 때, 가장 큰 Tm:YAG 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 앞서 살펴본 바와 같이 일반적으로 다이오드 레이저의 동작온도를 낮추어주면 다이오드 레이저의 출력이 증가하고 발진 파장이 단파장쪽으로 이동한다. 또한, 동작 전류에 의한 침투 파장의 변화가 온도에 의한 침투 파장의 변화보다 덜 민감하고 25°C에서 최대 흡수가 일어나는 785 nm에 더 근접하게 발진되는 것으로 보아 다이오드 레이저의 온도를 25°C로 유지하는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

그림 7은 공진기의 길이를 약 18 mm로 하고 투과율이 3.7%인 평면경을 사용하였을 때, 여기 출력에 따른 발진 출력을 측정 한 결과이다. 앞에서 언급한 것처럼 Tm:YAG와 같은 준 삼준위 레이저는 레이저 결정의 온도가 레이저 출력에 민감한 영향을 미치므로, 레이저 결정의 온도를 변화시켜가면서 출력을 측정하였다. 다이오드 레이저의 동작온도는 25°C로 고정시켰고, 레이저 결정 지지대의 온도를 각각 6, 15, 23°C로

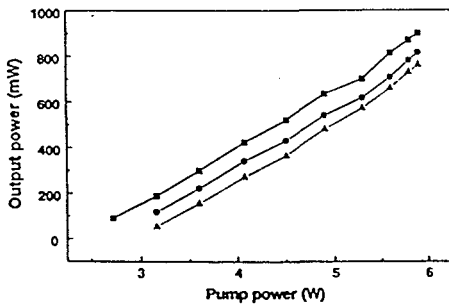


그림 7. Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성. (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6°C, ●: 15°C, ▲: 23°C).

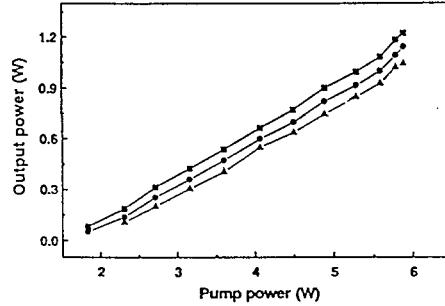


그림 8. Tm:YAG 결정 지지대의 온도에 따른 Tm:YAG 레이저의 출력 특성(곡면경 사용). (■: 레이저 결정 지지대의 온도 6°C, ●: 15°C, ▲: 23°C).

변화시켜 가면서 출력을 측정하였다. 레이저 결정 지지대의 온도가 낮아질수록 레이저의 출력은 증가하고 문턱 여기 출력은 감소함을 알 수 있었다. 문턱 여기 출력은 결정 지지대의 온도를 6, 15, 23°C로 증가시킬 때, 각각 2.4, 2.7, 3 W로 증가하였다. 결정 지지대 온도 6°C이고 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 900 mW인 것으로 관측되었다. 이 때, 기율기 효율(slope efficiency) 및 광학 효율(optical to optical efficiency)은 각각 26%와 15%인 것으로 계산되었다.

그림 8은 곡률 반경이 50 mm인 곡면경을 출력경으로 이용하였을 때 출력을 측정 한 결과이다. 곡면경의 투과율은 3%이었으며, 레이저 공진기의 길이는 약 19 mm로 여기되는 쪽에서 모드 반경은 0.17 mm인 것으로 계산되었다. 곡면경을 사용한 경우 평면경을 출력경으로 사용한 경우보다 출력이 향상되었으며, 이는 곡면경을 사용하였을 때, 레이저 발진 모드가 여기광에 더 잘 일치하기 때문인 것으로 생각된다. 곡면경의 경우 결정 지지대의 온도 6°C에서 문턱 여기 출력은 1.6 W 까지 감소하였으며 여기광의 출력이 5.9 W 일 때, 레이저의 출력은 1.2 W였다. 이 때, 기율기 효율은 약 29%, 광학 효율은 약 20%인 것으로 측정되었다.

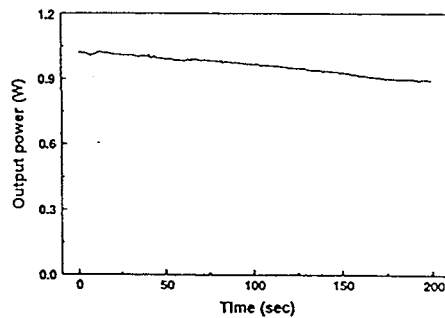


그림 9. Tm:YAG 레이저의 장시간 출력 안정성 측정 결과.

그림 9는 레이저 출력의 장시간 안정성을 조사한 결과이다. Tm:YAG 레이저 결정을 지지하는 구리 지지대의 온도를 15°C로 고정하였으며 레이저의 출력을 200초 동안 감시하였다. 레이저의 출력은 초기에 1 W 이상에서 꾸준히 감소하여 200초 후에는 890 mW 까지 감소하였다. 이는 여기광의 강한 집속으로 인한 극부적인 온도 상승으로 인한 현상으로 보이며, 이를 해결하기 위해서는 순수한 YAG 결정을 여기 방향의 끝면에 접착시키는 방법으로 해결할 수 있을 것이다.¹¹⁾

V. 결 론

본 논문에서는 다이오드 레이저 뒷면 여기 증적외선 Tm:YAG 레이저를 제작하고, Tm:YAG 레이저의 여기 특성 및 출력 특성을 조사하였다. 본 실험에서 사용된 6%의 첨가율을 갖는 Tm:YAG 결정에서 여기광은 약 87% 이상 흡수되어, 들뜸 효율은 약 66% 이상인 것으로 측정되었다. 이 결과는 다른 종류의 뒷면 여기 고체 레이저에 비해 손색이 없는 결과이다. 레이저 출력은 결정의 온도를 낮출수록 증가하였으며, 레이저 결정 지지대의 온도가 6°C이고, 투과율이 3%인 곡면경을 사용하였을 때 최고 1.2 W의 레이저 출력을 얻을 수 있었다. 이 때, 기술기 효율 및 광학 효율은 각각 29%와 20%였다.

감사의 글

다이오드 레이저의 열전냉각기를 제작하는데 도움을 준 (주) 금광의 전원덕씨에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. T. Lin and J. L. Montgomery, *Opt. Commun.* 75, 3151 (1990).
- [2] C. Bollig, W. A. Clarkson, R. A. Hayward, and D. C. Hanna, *Opt. Commun.* 154, 35 (1998).
- [3] P. J. M. Suni and S. W. Henderson, *Opt. Lett.* 16, 817 (1991).
- [4] J. E. Pinto, L. Esterowitz, and G. H. Rosenblatt, *Opt. Lett.* 17, 731 (1992).
- [5] T. Yokozawa, J. Izawa, and H. Hara, *Opt. Commun.* 145, 98 (1998).
- [6] L. F. Johnson, J. E. Geusic, and L. G. Van Uitert, *Appl. Phys. Lett.* 7, 127 (1965).
- [7] R. J. Beach, S. B. Sutton, E. C. Honea, J. A. Skidmore, and M. A. Emanuel, *OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers*, 1, 213 (1996).
- [8] T. S. Kubo and T. J. Kane, *IEEE J. Quantum Electron.* 28, 1033 (1992).
- [9] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, *한국광학회지*, 9, 231 (1998).
- [10] E. C. Honea, R. J. Beach, S. B. Sutton, J. A. Speth, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, and S. A. Payne, *IEEE J. Quantum Electron.* 33, 1592 (1997).
- [11] G. Armagan and A. M. Buoncristiani, *OSA Proc. Tunable Solid State Lasers*, 6, 144 (1990).
- [12] M. Tsunekane, N. Taguchi, and H. Inaba, *Appl. Opt.* 38, 1788 (1999).

Output characteristics of diode-laser-pumped Tm:YAG laser

Tae Moon Jeong, Cheol-Jung Kim, Hyun Su Kim, and Hee Jong Moon

Laboratory for Quantum Optics, KAERI, Taejon 305-600, Korea

Kwang-Suk Kim

Golden Light Co., Ltd, Taejon 305-600, Korea

J. Jabczynski

MUT, Poland

(Received April 4, 2000, Revised manuscript received July 25, 2000)

Diode-laser-pumped Tm:YAG laser of wavelength 2.02 μm has been manufactured and its excitation efficiency and output characteristics have been investigated. The excitation efficiency was varied from 66 to 68% with respect to the pump power, yielding pump power absorption of 87-89%. The output power was sensitively varied with the temperature of Tm:YAG rod. When the concave output coupler with a focal length of 25 mm and a transmittance of 3% was used, the maximum output power reached up to 1.2 W. The slope and optical efficiency of this Tm:YAG laser was 29% and 20% at 6°C, respectively.

OCIS codes : 140.3480, 143.3410, 140.3380.

서 지 정 보 양 식

| | | | |
|---------------------------|---|---------|--------------|
| 수행기관보고서번호 | 위탁기관보고서번호 | 표준보고서번호 | I N I S |
| KAERI/RR-2045/99 | | 호 | 주제코드 |
| 제목 / 부제 | 다이오드레이저를 이용한 의료용 펄스형 고체레이저 기술 개발 | | |
| 연구책임자 및 부서명 | 김철중, 양자광학기술개발팀 | | |
| 연구자 및 부서명 | 김민석, 양자광학기술개발팀 | | |
| 출판지 | 대전 | 발행기관 | 한국원자력연구소 |
| 페이지 | 77 p. | 도표 | 있음(○), 없음() |
| 발행년 | 2000 | 크기 | B5 |
| 참고사항 | | | |
| 비밀여부 | 공개(○), 대외비(), _ 급비밀 | 보고서종류 | 연구보고서 |
| 연구위탁기관 | | 계약번호 | |
| 초록 (15-20줄내외) | <p>의료용 레이저는 인체의 2/3를 구성하는 물과 레이저의 상호작용을 이용하고 있어 물의 흡수율이 가장 높은 Er 레이저는 피부과, 치과 및 안과 등에서 활용이 증대되고 있다. 그러나, 2.9 um 의 Er 레이저는 광섬유 전송이 안되어 광섬유 전송이 가능하며 물의 흡수율이 높은 Tm 레이저는 안과, 심장수술분야에서 활용이 증대되고 있다.</p> <p>지금까지는 lamp 여기방식의 의료용 고체 레이저가 이용되고 있었으나 유지 보수가 용이하고, 장치의 소형화가 가능한 diode 레이저 여기형 고체 레이저로 대체되고 있는 추세이어서 본 과제에서는 diode 레이저 여기형 Er 및 Tm 레이저를 개발하게 되었으며, Tm 레이저는 단면여기방식으로, Er 레이저는 측면여기 방식으로 각각 1 W 급의 평균 출력을 얻었다.</p> | | |
| 주제명키워드 (10단어내외) | | | |
| 다이오드 여기, 의료용, 레이저, Er, Tm | | | |

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

| | | | |
|-----------------------------------|---|------------------------|----------------------|
| Performing Org. Report No. | Sponsoring Org. Report No. | Standard Report No. | INIS Subject Code |
| KAERI/RR-2063/99 | | | |
| Title / Subtitle | Development of Diode-pumped Medical Solid-state Lasers | | |
| Project Manager and Department | Cheol-Jung Kim, Quantum Optics Lab. | | |
| Researcher and Department | Min-Suk Kim, Quantum Optics Lab. | | |
| Publication Place | Taejon | Publisher | KAERI |
| Page | 77 p. | Ill. & Tab. | Yes(O), No () |
| Publication Date | 2000.9 | Size | B5 |
| Note | | | |
| Classified | Open(O), Restricted(), ___ Class Document | Report Type | Research Report |
| Sponsoring Org. | | Contract No. | |
| Abstract (15-20 Lines) | <p>Two thirds of human body consists of water and the absorption of laser by water is an important factor in medical laser treatment. Er medical lasers have been used in the dermatology, ophthalmology and dental treatments due to its highest absorption by water. However, 2.9 um Er laser can not be transmitted through an optical fiber. On the other hand, Tm laser can be transmitted through an fiber and also has very high absorption by water. Therefore, Tm lasers are used in ophthalmology and heart treatment wherein the fiber delivery is very important for the treatment.</p> <p>Until now, mainly lamp-pumped solid-state lasers have been used in medical treatments, but the lamp-pumped solid-state lasers are being replaced with the diode-pumped solid-state lasers because the diode-pumped solid-state lasers are more compact and much easier to maintain. Following this trend, end-pumped Er and side-pumped Tm lasers have been developed and the output power of 1 W was obtained for Er and Tm respectively.</p> | | |
| Subject Keywords (About 10 words) | Diode-pumped, Medical Lasers, Er, Tm | | |

주 의

1. 이 보고서는 산업자원부에서 시행한 산업기반기술 개발사업의 기술개발 보고서이다.
2. 이 기술개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업의 기술개발결과임을 밝혀야 한다.