

원자분광용 고출력 파장가변 색소 레이저 시스템

High Power Tunable Dye Laser System for Atomic Spectroscopy

임 권, 박성희, 김용기, 정의창, 김덕현, 정도영, 차병헌, 김철중

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

근자외선에서부터 근적외선 영역의 파장까지 대단히 넓은 파장영역에서 레이저 발진이 가능한 고출력 파장가변 색소 레이저는 레이저 분광학 연구분야, 고감도 분석분야 및 원격 대기 감시용 LIDAR 시스템 및 의료용 레이저 분야 등에서 널리 활용되고 있다. 특히, 레이저 분광학 분야에서는 광펌핑을 이용한 안정 동위원소 제조기술의 동위원소 분리용 광원으로 사용되고 있다. 본 논문은 이상과 같은 용도의 고출력 파장가변 색소 레이저 시스템의 연구 개발된 내용과 성능에 관하여 보고한다.

Abstract

High power dye lasers of the very wide tunable range from near UV to far IR have been applied for laser spectroscopy, high sensitivity analysis, LIDAR system at the remote-sensing of atmosphere and so on. In particular, they are used for the sources to produce the stable isotope by using the optical pumping mechanism. We report that developed technique and performance about high power dye lasers system in this paper.

1. 서 론

원자분광용으로 사용되는 색소 레이저는 펄스형 레이저로서 여기광원으로 펄스형 레이저를 사용하여 광펌핑한다. 펄스형의 색소 레이저에 경우에는 여기광원의 반복률과 펄스 형태에 따라서 색소 레이저의 출력 특성이 결정되는 데, 반복률이 낮은 플래시 램프 또는 Nd:YAG 레이저의 제 2 조화파와 같이 수 Hz상태에서 펌핑하여 발진시키는 경우도 있으나, 금속증기 레이저는 반복률을 수십 kHz이상으로 높일 수 있기 때문에 평균출력을 높일 수 있다. 이처럼 본 연구내용에서 사용되는 고출력(high power) 레이저라는 용어는 높은 평균출력(high average power)을 갖는 레이저를 의미한다. 그리고 고출력이라 함은 대략적인 출력 범위를 평균출력 수십에서 수백 W정도 또는 그 이상 출력들을 의미하게 된다.

저반복률로서 펄스당 에너지가 수백 mJ이상인 레이저로 펌핑하여 색소 레이저를 동작시키는 경우에는 펄스당 에너지가 상당히 높기 때문에 발생하는 열효과 및 비선형 효과들로 인하여 반복률을 높이기 어렵다. 반면에, 펄스당 에너지는 낮지만 반복률이 수십 kHz정도의 높은 레이저들을 사용할 경우에는 색소 용액을 빠르게 순환시킴으로써 색소 분자의 광 여기와 광 방출 과정을 원활히 하여 주기만 하면, 고반복률에 의해서 평균 출력이 높은 레이저를 얻을 수 있다. 따라서 고출력 레이저의 근본적인 관건은 열 제거(heat dissipation)에 있다. 이를 위하여 초당 수만 펄스의 광 에너지 조사로 인한 누적되는 색소용액의 열 문제를 없애기 위하여 색소 용액의 순환속도(수~수십 m/s)를 빠르게 유지할 필요가 있다. [1-5]

본 논문에서의 연구내용은 색소 레이저의 고출력, 고분해능의 다단 증폭 시스템(MOPA; Master Oscillator Power Amplifier)의 자체 개발에 관한 핵심 기술을 언급한다. 파장가변 고분해능의 색소 레이저를 발진시키기 위하여 설계·제작된 레이저 발진기는 Grazing Incidence 형태의 공진기로 구성되어있다. 레이저 출력을 증폭시키기 위한 증폭기 모듈은 입력 레이저와 증폭된 출력 레이저의 진행 방향이 같은 종펌핑형 증폭기로 설계·제작되었다. 또한 색소 레이저의 색소용액을 순환시키는 색소용액 순환기 모듈은 고순도 여과장치에 고속 순환의 원심력 펌프가 장착된 순환기 시스템을 설계·제작하였다. 이상과 같은 고출력 파장가변 레이저 시스템의 각부 모듈들이 국내 자체 기술로서 완성됨으로써 고분해능의 고출력 파장가변 레이저의 응용분야에 활용될 가능성을 높였다.

2. 본 론

2-1. 파장가변 색소 레이저 발진기

■ 레이저 색소의 특성과 발진파장 영역

가시광 영역에서의 레이저 색소는 종류에 따라서 발진파장영역이 그림 1과 같이 매우 광범위하게 펼쳐져 있다. 따라서 색소용액을 교환하면 근자외선(UV) 영역에서 근적외선(IR) 영역까지 광대역으로 파장을 변화시킬 수 있다. 레이저 색소의 여기용 펌핑 에너지 광원으로는 플래시 램프와 같이 백색 광원 또는 단색성의 레이저 광을 사용할 수 있다. 전자에 비하여 후자의 펌핑 광원은 레이저의 고유한 특성인 단색성, 지향성 및 고휘도성을 가지고 있기 때문에 레이저 색소에 에너지를 효율적으로 전달시킬 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다. 또한 레이저 광 펌핑중에서 고반복률의 레이저는 평균출력이 매우 높기 때문에 이것을 이용하여 펌핑하면 색소 레이저의 출력 또한 대단히 높은 출력을 얻을 수 있게 된다.

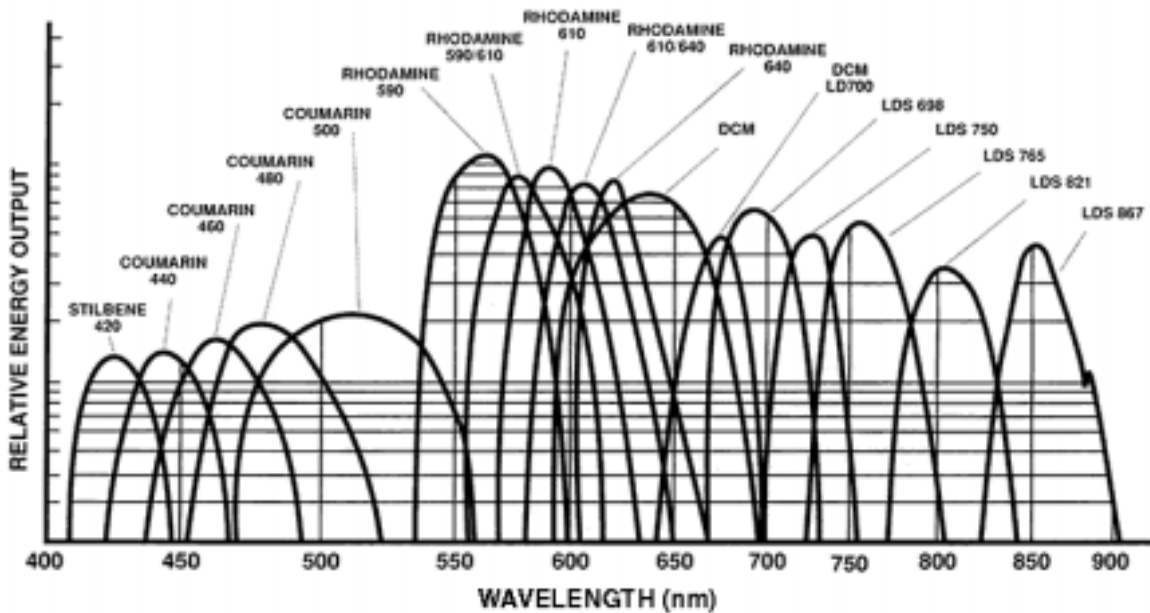


그림 1. 레이저 색소의 종류에 따른 파장가변영역.

■ 레이저 발진기의 구조

색소 레이저 발진기는 그림 2와 같이 반사형 회절격자(grating)에 레이저 광이 비스듬히 입사하는 공진 구조를 갖고 있다고 해서 grazing incidence 형 공진기라고 부른다. [6-7] 빛의 분산(dispersion) 기능이 있는 회절격자는 1차 회절된 빔이 과장가변 거울에서 되반사되어 출력경으로 공진되고 몇 번의 round trip을 통하여 출력 gain을 얻게되면 문턱 에너지를 넘어서 출력경을 통하여 방출된다.

색소용액을 흐르게 해주는 색소 셀은 Quartz 재질로 제작되었으며 광학적으로 투명하고 표면이 정밀하게 가공되어있다. 또한 펌핑 레이저 광이 색소용액에 광 손실없이 집속되도록 하기 위하여 셀 표면에 무반사 코팅을 하여 사용한다. 광 펌핑이 되면 레이저 색소로부터 방출되는 형광은 프리즘 빔 확대기를 통하여 선형으로 확대되어 회절격자로 입사됨으로써 회절격자에 넓게 비추어진다. 이것은 분해능을 높이기 위한 것으로서 확대 배율이 30배인 4개의 프리즘으로 구성되어 있다.

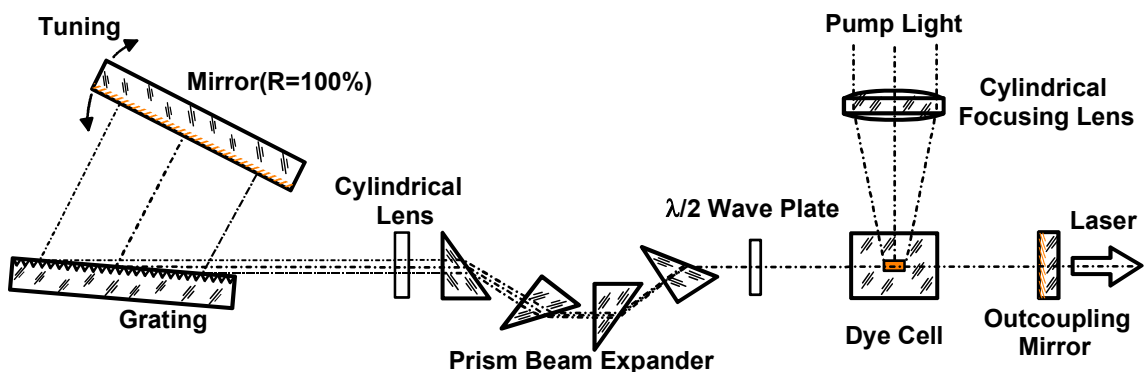


그림 2. Grazing incidence 형태 발진기 모듈의 광학적 구성도.

이와 같은 발진기로부터 출력된 레이저의 선폭은 약 1.5 GHz 정도이며 연속적으로 파장을 변화시킬 수 있다. 펄스 폭 30 ns의 금속증기레이저인 펌핑광 CVL(Copper Vapor laser)로 펌프하였을 때 레이저의 펄스 폭은 약 15 ns 정도이다. 레이저 빔의 형태는 그림 3과 같이 회절현상에 의해서 (a)와 같은 형태로 나타나지만 양질의 빔만을 공간적으로 필터링하면 Gaussian 형태의 빔을 얻을 수 있다. 평균출력은 펌핑 에너지에 따라서 다르지만 10 W 정도의 펌프 출력에서 약 500 mW의 출력을 얻을 수 있는 것으로서 변환효율 약 5% 정도를 유지한다. 발진 파장의 선택은 레이저 색소의 종류에 따라서 변화하는 데 Rhodamine 6G(또는 PM-597)와 Rhodamine 640과 같은 색소들을 사용하면 그림 4, 5와 같이 560 nm에서 650 nm까지 다양하게 변화시킬 수 있다.

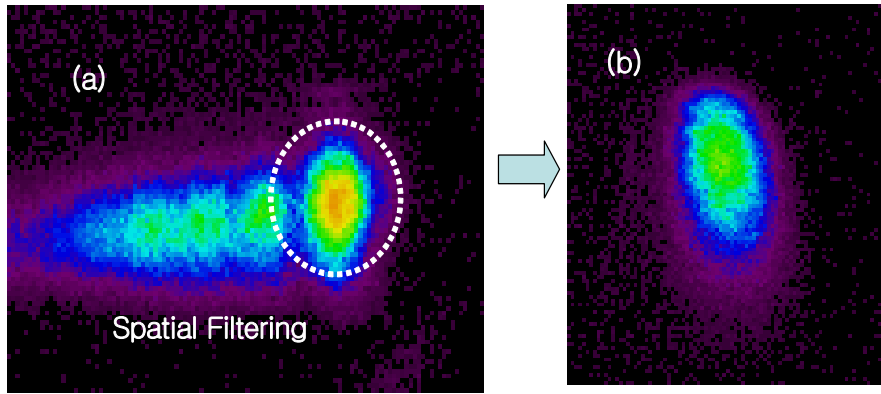


그림 3. 색소 레이저 발진기 빔의 공간적 형태.

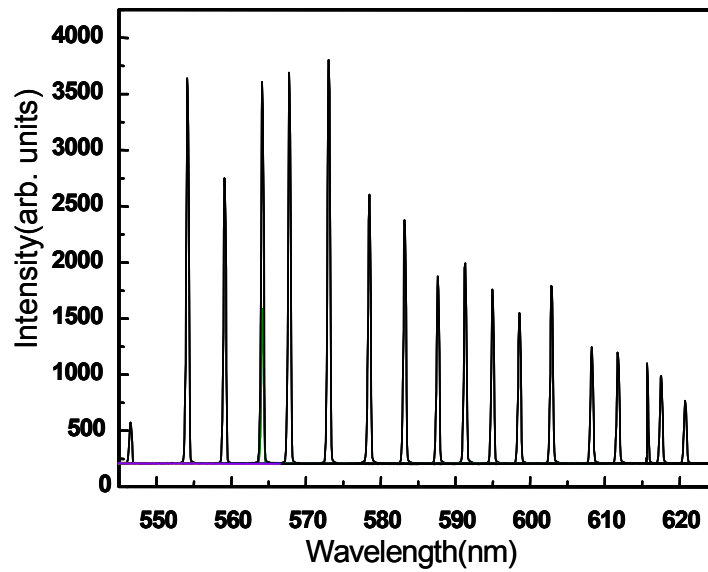


그림 4. PM-597 색소를 이용한 레이저 발진파장영역.

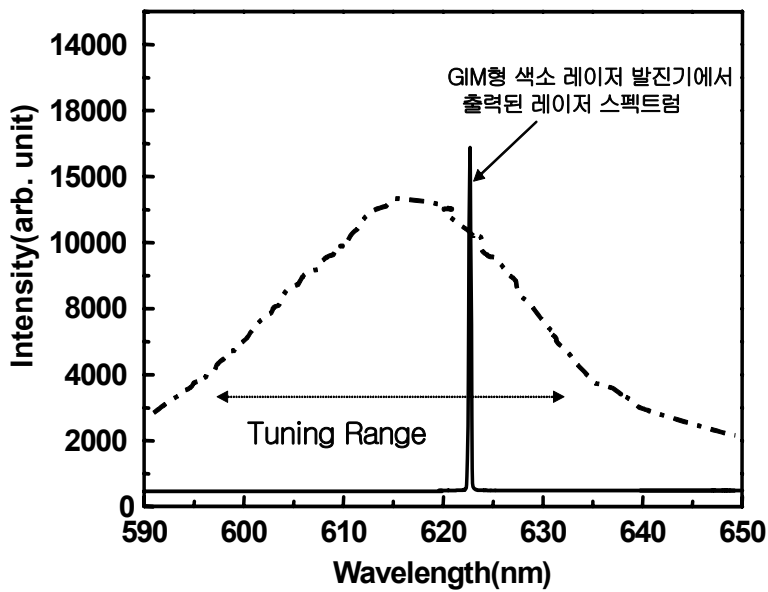


그림 5. Rhodamine 640 색소를 이용한 레이저 발진파장영역.

■ 정밀 파장가변 구동장치

파장가변거울의 각도 회전은 식 $\lambda = \frac{x}{m} (\sin \theta + \sin \phi)$ 에 의하여 파장 변화를 계산할 수 있다. 1차 회절 빔의 경우 $m=1$ 이고, 회절격자 groove 간격 $x=1/2400$ 과 grazing incidence 입사각 $\theta \sim 90^\circ$ 로 계산해보면, $\sin \phi = \frac{\lambda}{x} - 1$ 이다. 여기서 회절 각 ϕ 가 미세하면 $\phi \sim \frac{\lambda}{x} - 1$ 과 같으므로 결과적으로 각도의 변화가 파장 변화값과 같다. 따라서 회절 빔에 대한 되반사되는 각도를 매우 세밀하게 움직일 경우 파장변화량을 정밀하게 움직일 수 있다.

그림 6와 같이 미세 구동장치는 설계되었다. (a)의 5상 스텝 모터 이용하여 스텝 펄스당 0.36° 움직이고, 모터의 shaft와 감속기(c) 및 엔코더(b)의 shaft를 펜벨트로 연결하여 구동시키면, 감속기에서 100:1 회전비 감속을 한다. 그리고 동시에 엔코더에서 구동된 스텝 펄스 수를 파장제어장치로 전달해준다. (d)의 커플링을 거쳐 (e)의 나사를 회전시킨다. 나사의 회전당 진행 거리는 1 mm이다. 그리고 이처럼 직선운동을 Sine-Bar의 원호 운동으로 전환하기 위한 연결이 (g)와 (h)에서 이루어진다. 그리고 (i) Sine-Bar의 길이는 300 mm 이다. 이렇게 전달된 미세한 움직임을 계산해보면 약 10^{-8} radian 정도가 된다.

파장가변 구조의 기하학적 정밀도는 매우 높지만 실제 나사산에 의한 backlash가 발생할 수 있기 때문에 그림의 (j)와 같이 한쪽 방향으로 스프링을 이용하여 힘을 주면 이를 보완할 수 있다. 그리고 기계적인 보호를 위하여 (f)와 같은 근접센서를 부착하여 왼쪽과 오른쪽의 리미트 스위치로서 사용하였다. 또한, 중앙부에 원점 센서를 두어 레이저 파장가변시 물리적 홈 위치를 기억하도록 하였다. 이와 같은 파장가변 구동장치는 레이저 헤드의 하단부에 장착되어 구동된다. 이러한 미세한 파장가변의 하드웨어적인 기능은 스텝 모터의 스텝 펄스 제어가 가능한 소프트웨어와 함께 맞물려 동작함으로써 보다 정밀한 구동을 하게 된다.

그림 7은 스텝 모터의 펄스당 주파수 변화량을 측정한 것이다. 정확한 파장 변화량을 측정하기 위해서 Ar 가스가 충전되어있는 Opto-Galvanic Cell에 레이저 파장을 변화시켜가면서 Ar-line의 흡수선에서의 스텝 모터 펄스 수를 측정하여 570 nm에서 590 nm까지 조사한 것이다. 스텝 펄스당 주파수의 변화량은 약 3 MHz/스텝 정도이다. 이렇게 미세한 파장변화가 가능한 것을 이용하여 궤환 신호 처리에 의한 레이저 주파수안정화 장치와 함께 사용함으로써 보다 안정적인 주파

수 안정화를 이룰 수 있다.

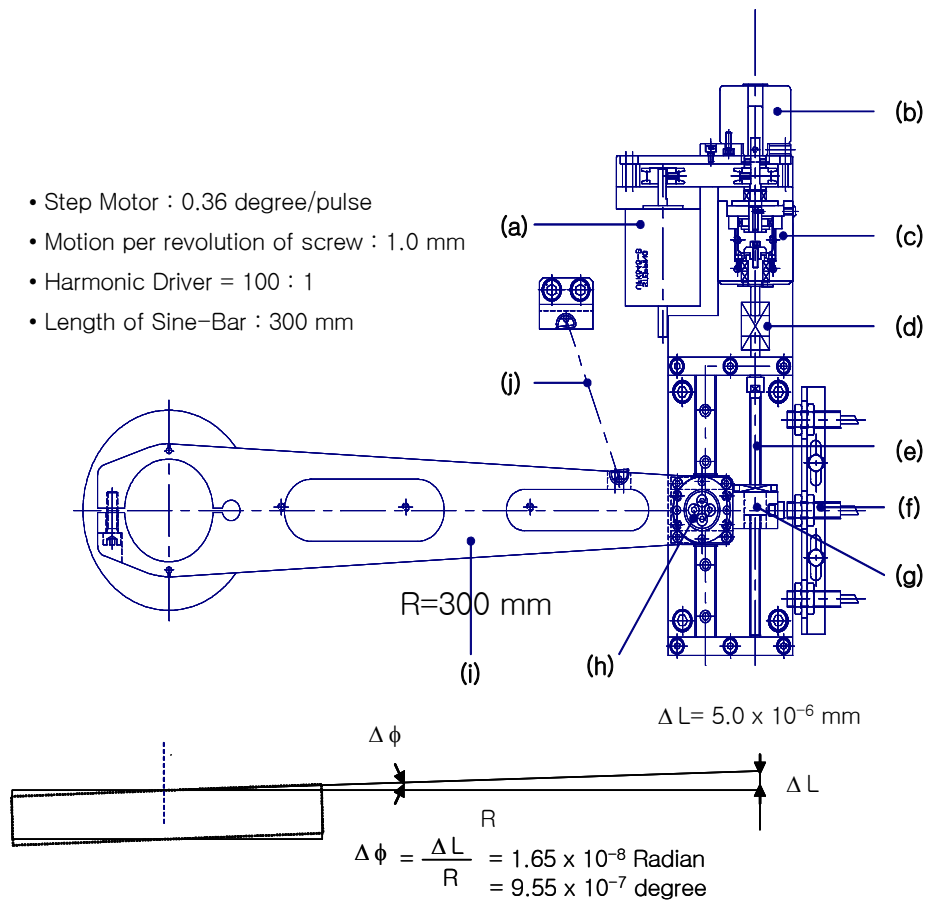


그림 6. 정밀한 스텝 각도 조절에 의한 파장가변 구동장치.

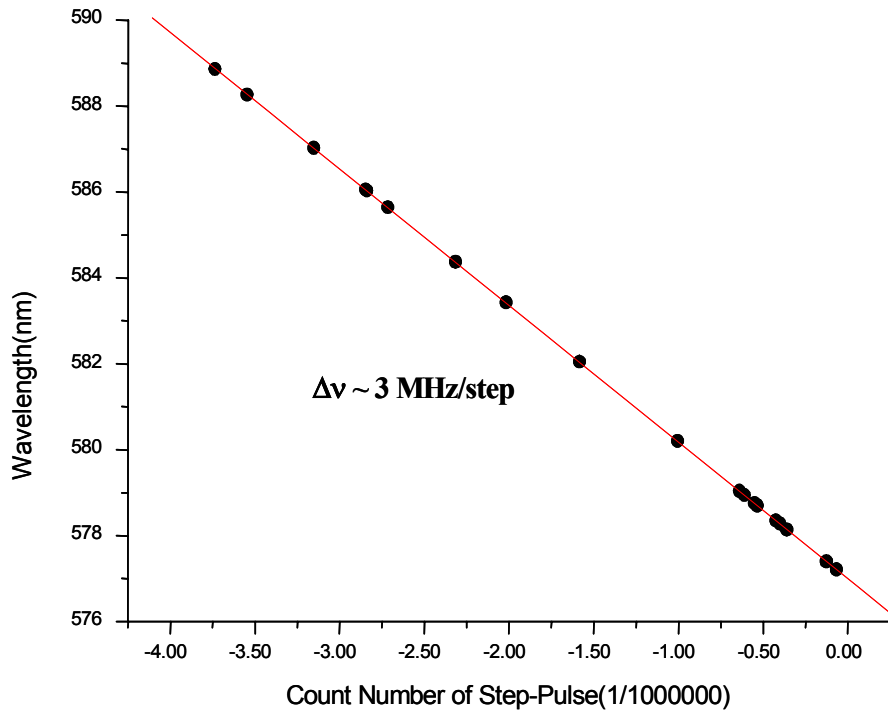


그림 7. 스텝 모터의 변화에 따른 파장의 변화량 측정 그래프.

2-2. 고출력 종펌핑 구조의 증폭기

고반복률, 고출력 색소 레이저의 증폭기 출력 특성에 관하여 언급하고자 한다. 색소 레이저 증폭계열용 증폭 시스템에 사용되는 증폭기 모듈은 펌핑 방법에 따라서 두 가지 증폭기 시스템으로 나누어진다. 색소 레이저 빔의 진행 방향과 같은 방향으로 펌프 광이 집속되는 종펌핑 방법과 서로 수직을 이루는 횡펌핑 방법이 있다. [8-9]

연구결과, 종펌핑 구조의 증폭기 시스템에서 레이저 빔 특성이 우수함을 확인하였으며, 또한 증폭단의 수를 3 단 혹은 4 단으로 구성함으로써 효과적인 증폭 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다. 반면에, 횡펌핑 구조는 출력 향상에 큰 효과를 주었으나 출력된 레이저 빔의 공간분포가 좋지 않고 빔 퍼짐도가 크기 때문에 원거리까지 전파될 때 많은 문제점을 발생시켰다.

즉, 종펌핑 구조의 증폭기를 선호하는 이유는 출력 빔의 횡모드와 빔 퍼짐도가 우수하기 때문이다. 이러한 장점은 분광학 실험에 적용되는 경우에 레이저 빔을 장거리 전파시킬 필요가 있을 때 레이저 빔의 공간 모드 제어를 용이하게 하기 위함이다.

증폭기 모듈은 그림 8과 같이 색소 레이저의 빔 정렬을 위해 색소 셀의 전·후, 즉, 색소 레이저 입력, 출력 부분에 각각 두 개의 거울이 장착되어 있고, 펌핑용 레이저의 방향 전환 및 빔 정렬을 위해 두 개의 거울과 집속 렌즈 및 직각 프리즘이 장착되어 있다. 직각 프리즘은 펌핑용 레이저를 각도 0.6 mrad 이하로 미세 조정할 수 있는 조절나사가 부착되어 있다.

PM-597 색소를 사용하여 레이저를 증폭시키는 시스템의 경우 레이저 시스템 구성에서 증폭단의 수가 3단으로 구성되었을 때, 각각의 증폭기는 농도 0.3~0.4 mMole 정도의 영역에서 효율적인 동작을 하였다. 그림 9은 PM-597을 이용한 3 단 증폭 시스템의 경우 각각 증폭단에서의 증폭기의 변환효율과 농도 조건을 보여준다. 각각 증폭단에서의 변환효율의 정의는 증폭된 레이저 출력에서 입력 레이저의 출력을 빼낸 값을 펌프 출력으로 나누었을 때의 퍼센트로 나타낸다. 각각 증폭단에서의 펌프 출력에 대한 변환효율이 전치 증폭기에서 20%, 주 증폭기에서 40%로 증가함을 보여주고 있다.

Pyrrromethene과 같은 고효율의 레이저 색소는 변환효율이 높지만 일반적으로 사용되는 Rhodamine 계열의 레이저 색소는 변환효율이 다소 떨어진다. 반면에 고효율의 색소가 수명이 짧은 것으로 조사되었다. 고효율 색소의 수명저하를 개선

하는 방법으로서 색소를 녹이는 용매를 벤젠계열 혹은 Haptane과 같은 것으로 사용하면 수명의 연장에 도움을 줄 수 있다.

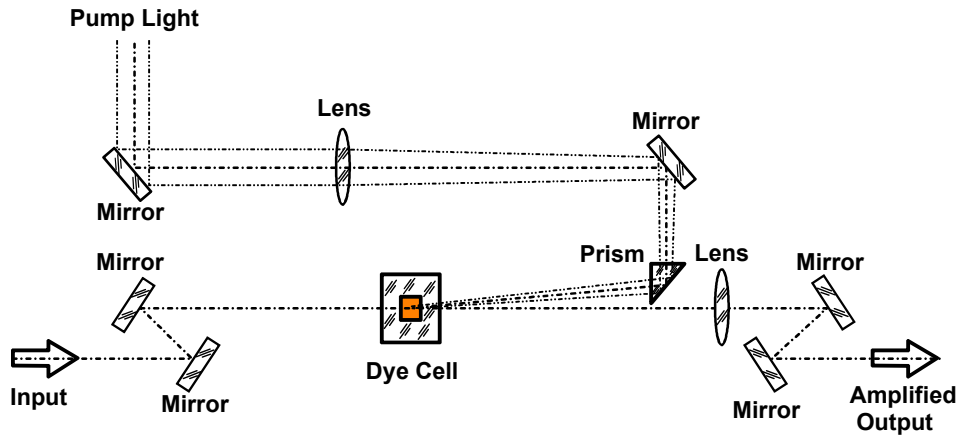


그림 8. 중펌핑 증폭기 모듈의 광학적 구성도.

- Laser Dye : PM-597
- Wavelength of Dye Laser ~ 575 nm, 581 nm
- 각각의 증폭단에서의 변환효율을 측정함

$$\eta_{\text{each}} = \frac{\text{증폭된 DL 출력} - \text{증폭기로의 입력된 DL 출력}}{\text{펌프 광 CVL 출력}}$$

C_1, C_2 및 C_3 : 각각 1차, 2차 및 3차 증폭기에서의 색소용액의 농도

P_{IN} : Input Power of Dye Laser Oscillator

P_{PUMP} : Pumping Power with CVL 510 nm

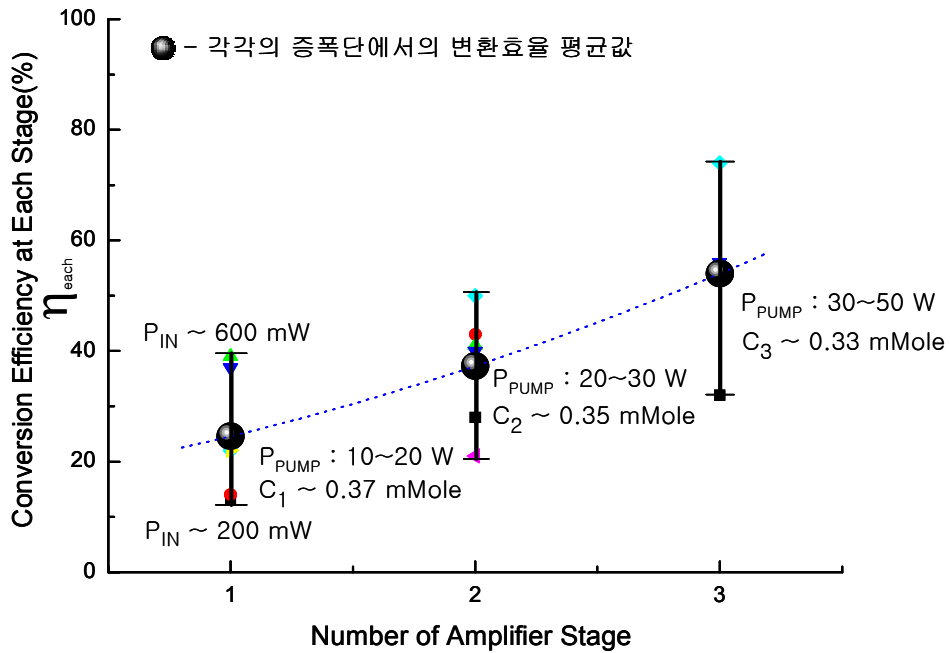
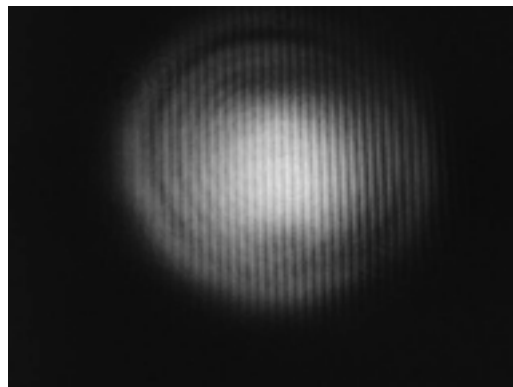


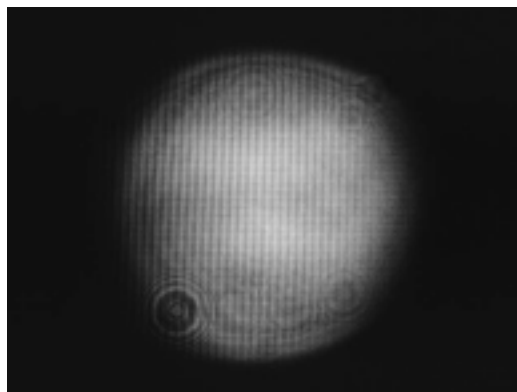
그림 9. PM-597 3단 증폭기에서 각각 증폭단에서의 농도와 변환효율.



그림 10. 3단 증폭기 모듈의 모습.



(A) PM-597 색소를 이용한 색소 레이저 출력 빔의 공간적 세기 분포



(B) Rh-640 색소를 이용한 색소 레이저 출력 빔의 공간적 세기 분포

그림 11. 과장가변 색소 레이저 증폭기 모듈과 출력 빔 형태.

그림 10의 사진과 같은 증폭기 시스템으로부터 얻은 레이저 출력 빔의 형태는 종편평 구조의 특성대로 원형의 빔을 보여준다. 색소 레이저 증폭기에서 펌프 빔과 색소 레이저 빔의 모드매칭이 빔 질을 좋게 만드는 방법인데 이를 최적화하였을 때의 증폭된 레이저 빔은 그림 11의 (a)와(b)처럼 Gaussian 빔 형태를 유지할 수 있었다.

2-3. 고속 순환용 색소 순환기

고출력·고반복률의 파장가변 색소 레이저를 개발하는 데는 여러 가지의 중요한 요소 기술의 기본 선결요건이 있다. 펌핑 에너지에 대하여 레이저 색소가 효율적으로 광 에너지를 전달받고 이를 레이저 출력으로 전환하여야한다. 이를 위해서는 고출력의 펌프 레이저를 여기시킬 때, 수십 ns의 짧은 펄스 존재 시간동안 높은 광 에너지를 갖는 펌프 에너지가 국부적으로 색소 셀에 집속되기 때문에 발생하는 색소 분자의 열적인 문제와 색소 셀 표면에서의 손상(damage)등이 해결되어야 한다. 즉, 발진기 및 증폭기용 광학계의 광학적 손상이 발생하지 않도록 하여야한다.

특히, 색소 레이저의 증폭단에서는 많은 출력의 에너지 전환(high power energy extraction)이 이루어진다. 이때, 액체상태의 색소용액이 색소 셀 내부에서 순환될 때, 발진기의 경우와는 달리 수십 M/cm²이상의 상당히 큰 집속도로 펌핑된다. 이렇게 되면 색소 분자의 광 에너지에 의한 손상 또는 열·화학적 손상으로 타서 색소 셀의 표면에 손상을 주게 된다. 이러한 문제의 해결이 고출력의 색소 레이저의 장시간 동작 및 고효율성을 증대시킬 것이다.

따라서, 발진기 및 전치 및 주 증폭기에 사용되는 색소용액 순환기의 설계와 제작시에 색소 셀의 조건과 펌프 레이저의 조건에 따른 색소용액의 순환속력이 고려되어지고, 고출력 펌프 레이저의 펌핑 출력에 따른 색소의 열적인 문제 해결을 위한 냉각 및 정확한 온도제어 등이 이루어지도록 하여야한다. 또한, 분광용 레이저 시스템의 동작 및 운용의 유효 적절한 시스템 관리적 문제의 해결로서 전체 순환기 시스템의 모니터링을 위한 순환기 모듈의 유속, 유압, 온도등의 동작 조건 등을 데이터 인터페이싱을 통하여 관측할 수 있도록 하는 장치 등을 구축하였다.

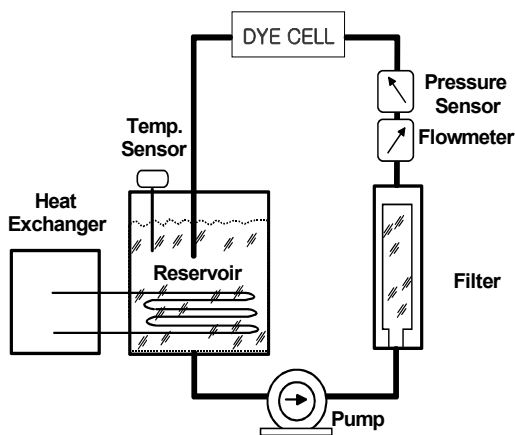


그림 12. 색소용액 순환기의 구성도 및 설치된 순환기 모듈의 모습.

2-4. 궤환 신호에 의한 주파수 안정화장치

펌핑 레이저에 의해 발진되는 색소 레이저들은 펌핑 레이저의 특성변화나 실험실 온도 등 주변 환경에 따라 파장이 요동(fluctuation) 또는 이동(drift)을 한다. 이러한 파장의 변화는 생성되는 동위원소들의 성분에 변화를 가져오며, 고순도의 제품 생산에 한계를 초래한다. 따라서, 실시간 질량분석기를 통해서 모니터링하는 질량성분비의 변화를 색소 레이저의 공진기로 바로 궤환(feedback)시켜서, 동위원소 성분비가 항상 초기 조건과 동일하도록 유지시킨다. 일반적으로 동위원소 분리장치에 여러 대의 색소 레이저가 동시에 사용되므로 다수의 색소 레이저를 제어할 수 있는 하드웨어 시스템과 이를 제어하는 S/W를 자체 개발하였다.

이러한 안정화 장치는 실제 분광실험에서 사용되고 있는데 질량 분석기의 TOF(Time of Flight) 신호를 이용한 주파수 안정화장치를 그림 13과 같이 Gd 동위원소에서 적용하여 사용하였다. 세대의 파장가변 색소 레이저를 사용하는 Gd 동위원소의 선택적 분리를 위해 파장 λ_1 , λ_2 , λ_3 의 순서로 미세하게 조정하여 질량 분석기의 TOF 신호에서 다른 동위원소 라인은 점차 줄어들게 한다. 그리고, 특정 원하는 선택 동위원소의 TOF 신호만을 최대가 되도록 한 뒤에 이 신호를 계속 모니터링하면서 각각의 발진기에 파장가변 구동장치 스텝 모터를 미세하게 구동하여 흐르는 레이저 주파수를 일정하게 고정하는 역할을 한다. 약 0.1 GHz 이내에서 주파수 고정이 이루어지도록 하고있다.

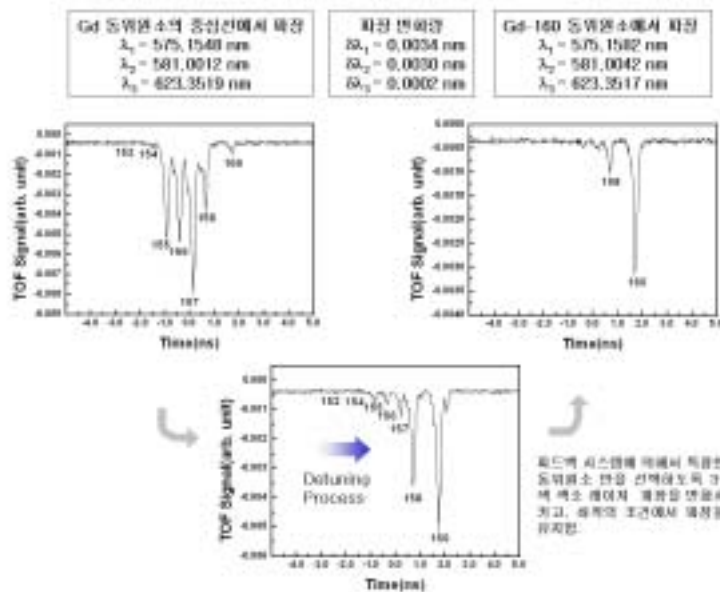


그림 13. 색소 레이저의 주파수 안정화 장치에 의한 동위원소 질량분석 신호.

2-5. 광펌핑을 이용한 안정 동위원소 제조기술의 Tl-203 분리용 광원

한편, 이상과 같이 연구 개발된 파장가변 색소 레이저 발진기, 3단 증폭기 및 색소용액 순환기 등은 의료용 안정동위원소로 사용되는 Tl-203 분리 실험에 사용되고 있다. Tl-203의 동위원소를 광펌핑 방법에 의하여 분리·추출하는 경우에 1차 천이용 UV CW 레이저 광원, 2차 천이용 고반복률 펄스 UV 레이저 광원과 3차 천이용 고반복률 펄스 IR 레이저를 필요로 한다. 이때 2차 천이용 레이저인 고반복률 펄스 UV 레이저를 발생시키기 위하여 그림 14 및 그림 15와 같이 플래시 램프 펌핑 Nd:YAG 레이저의 제 2 조화파 532 nm 광원을 색소 레이저 펌프 레이저로 사용한다. 반복률과 펄스 폭은 각각 6 kHz와 60 ns이며 레이저 출력은 약 50 W 정도이다. 이러한 펌프 레이저로 여기된 색소 레이저는 펄스 폭 40 ns과 1.5 GHz의 선폭을 갖는다. 고효율의 PM-597 레이저 색소를 사용하면 파장가변영역 560 ~ 620 nm에서 파장이 변화시킬 수 있다. 증폭된 색소 레이저 광을 제 2 조화파로 변화시키는 비선형 매질 BBO 결정(SHG crystal)이 그림 16과 같이 설치되어있고, 이로부터 얻은 UV 레이저 광은 그림 17과 같은 공간적 빔 형태를 지닌다. 파장가변 색소 레이저의 출력 특성을 보면, 표 1과 같이 출력과 변환효율이 각각 약 15 W와 약 29%이었으며, 색소 레이저를 UV 레이저로 변화시키는데는 약 20%의 변환효율을 나타냈고, 약 3 W의 출력을 보여주었다.

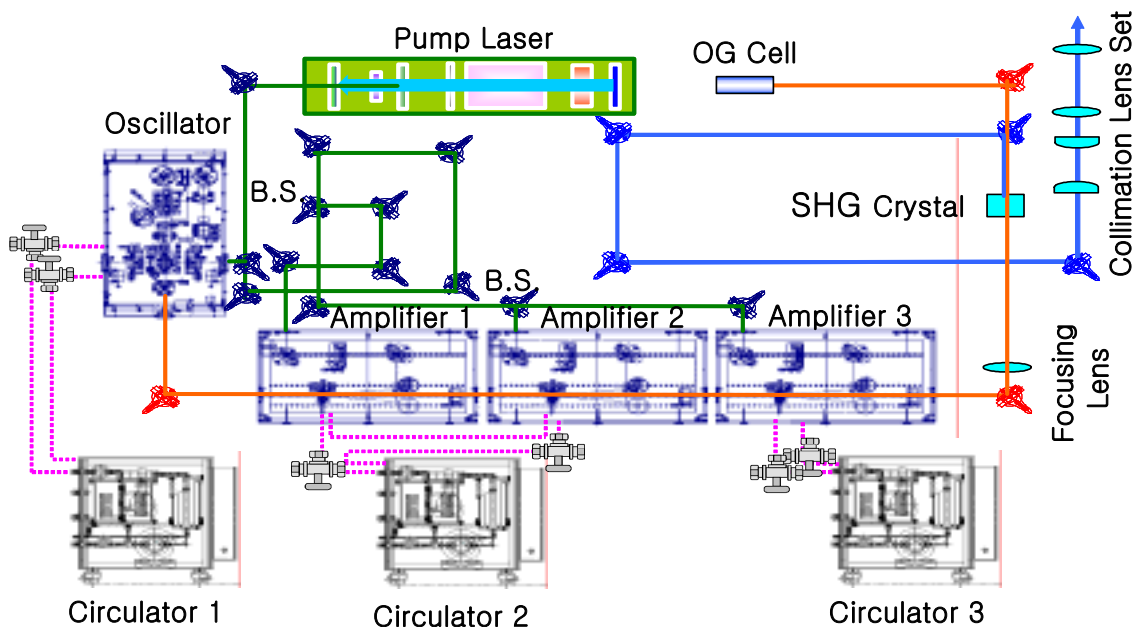


그림 14. 펄스형 색소 레이저 및 UV 레이저 시스템 구성도.



그림 15. 펄스형 색소 레이저 및 UV 레이저 시스템 장치.

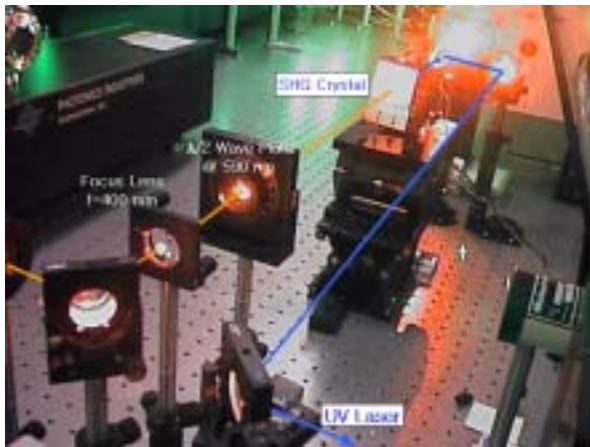


그림 16. BBO 결정을 이용한 SHG 장치. 그림 17. 펄스 UV 레이저 빔 형태.

표 1. 파장가변 색소 레이저 및 UV 레이저 출력 및 변환효율 특성표.

	Laser Power (Watt)		Efficiency (%)		펌프빔 분할율	Power of PL
	DL Output	Pump Laser	at each stage	Overall		52.00 Watt
Oscillator	0.45	8.37	5	5	16.10	
Amplifier 1	4.60	14.20	29	20	27.30	
Amplifier 2	9.50	13.10	37	27	25.20	Power of DL
Amplifier 3	15.00	16.33	34	29	31.40	15.00 Watt
SHG of DL	3.00	Efficiency (%)	20	for DL		Power of UV Laser
		Efficiency (%)	6	for Pump Laser		3.00 Watt

3. 결 론

이상과 같은 시스템에서 고출력 파장가변 색소 레이저 증폭계열용 발진기, 증폭기 및 색소 순환기의 국산화 개발과 함께 모듈화의 한 모델을 제시하였고, 발진기에는 동위원소의 질량신호에 의한 주파수 안정화 케환장치를 부착함으로써 원자분광용 레이저 광원으로로서 사용하는데 주파수의 안정도를 높이는 시스템으로 질적 향상을 가져왔다. 이러한 시스템 개발은 광범위한 가시광 영역의 레이저로서 분광학 레이저 광원을 필요로 하는 분야에 널리 활용될 것으로 기대한다.

참고논문

- [1] F. P. Schäfer, "Dye lasers", Topics in Applied Physics, Springer Verlag Series, Vol. 1(1977).
- [2] F. J. Duarte and L. W. Hillman, "Dye laser principles with applications", published by Academic Press, Inc(1990).
- [3] F. J. Duarte, "Tunable lasers handbook", published by Academic Press, Inc(1995).
- [4] F. J. Duarte, "High power dye lasers", Topics in Applied Physics Springer Verlag Series, Vol. 65(1991).
- [5] F. J. Duarte and L. W. Hillman, "Dye laser principles with applications", published by Academic Press, Inc pp. 148(1990).
- [6] M. G. Littman and H. J. Metcalf, Appl. Opt. 17, pp. 2224(1978).
- [7] M. G. Littman, Opt. Lett. 3, pp. 138(1978).
- [8] R. S. Hargrove, T. Kan : IEEE. J. Quantum Electron. 16, pp. 1108(1980).
- [9] F. J. Duarte, "High power dye lasers", Springer Verlag Series in Optical Sciences, Vol. 65, Chap.5, pp.158(1991).