

고출력 색소 레이저의 다단 증폭 시스템의 최적설계에 관한 수치해석

고도경 · 김성호 · 이병철 · 김종복* · 이종민

한국원자력연구소 원자분광학연구실

임 권 · 조재홍 · 장 수

한남대학교 물리학과

(1993년 6월 3일 받음)

고출력 Rhodamine 6G 색소 레이저의 다단 증폭 시스템의 출력 특성 및 최적조건을 수치해석을 통하여 조사하였다. 올 방정식과 전송 방정식에서 펌프광의 에너지가 주어진 경우에 레이저 광의 직경, 색소셀의 크기, 색소의 농도, 증폭단의 갯수 및 각 증폭단의 펌프 에너지의 비율 등을 변수로 하였다. 그 결과 펌프에너지가 25 mJ이고 색소 레이저의 입력에너지가 0.01 mJ일 때, 2단 증폭 시스템의 최적조건에서 출력 에너지 10 mJ과 변환 효율 40%를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

I. 서 론

색소레이저는 발진파장을 가변시킬 수 있는 탁월한 특성을 가지고 있기 때문에 원자 분자 분광연구, 추적자 분석(Trace element analysis), 미량원소 검출, 반도체 연구 및 의료용 등 많은 분야에 이용되고 있다.¹⁾ 고분해능의 레이저를 얻기 위해서 공진기 내에 회절격자와 에탈론 등을 사용하는데, 이들에 의한 에너지 손실이 커져 공진기의 변환효율은 매우 낮다. 따라서 공진기로부터 얻어진 고분해능의 레이저를 고출력의 에너지와 높은 변환효율을 갖는 레이저를 얻기 위해서 증폭기 시스템을 부착한다. 본 연구는 증폭기 시스템에서 펌프광이 주어졌을 때, 색소셀의 크기, 색소의 농도, 증폭기로 입력되는 레이저 광의 직경, 그리고 각 증폭단으로의 펌프에너지 배분과 증폭단의 갯수 등을 변수로 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션하므로써 고출력 색소레이저 제작에 앞서 실험적 시행오차를 줄이고 에너지 변환효율에 있어서 최적조건을 예측할 수 있었다.

색소 레이저 시스템은 그림 1과 같다. 색소 레이저를 펌핑하는 광원은 flashlamp, Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파, 질소 레이저, 엑시머 레이저 등 여러 종류가 있지만 고출력의 레이저를 얻기 위하여는 가시광영역에서 고효

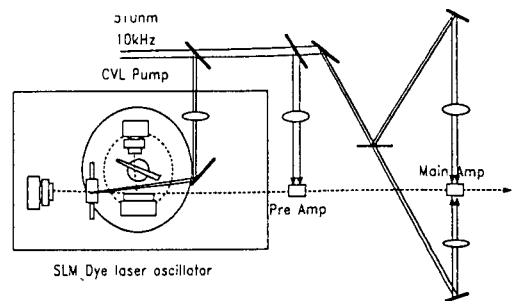


그림 1. 색소레이저 시스템 개략도.

율, 고출력, 고반복(10 kHz) 발진 특성을 지닌 구리증기 레이저(Cu-vapor laser)를 많이 사용한다.²⁾ 본 연구에서는 10 kHz의 반복율을 가진 구리증기 레이저를 펌프광원으로 하고 두 개의 발진 파장중 510 nm 파장의 출력광만을 사용하는 경우에 대하여 조사하였다. 공진기는 구면렌즈를 이용하여 색소셀에 집속시키는 종단형 Littman 공진기로서 홀로그래픽 회절격자, trning mirror, 얇은 프리즘형 wedge 등으로 구성되어 있으며 단일 종모드로 발진한다.³⁾ 이 색소레이저는 횡편광되는 증폭 시스템을 통하여 증폭된다.

각 증폭단의 색소셀의 모형은 그림 2와 같다. 원통형

* 현주소 : 한국교원대학교 물리교육과, 충북 363-791

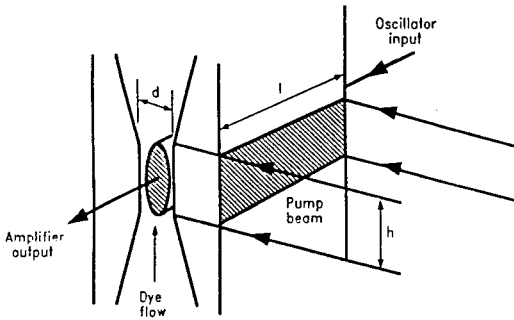


그림 2. 링펌평할 경우의 증폭기의 기하학적 구조.

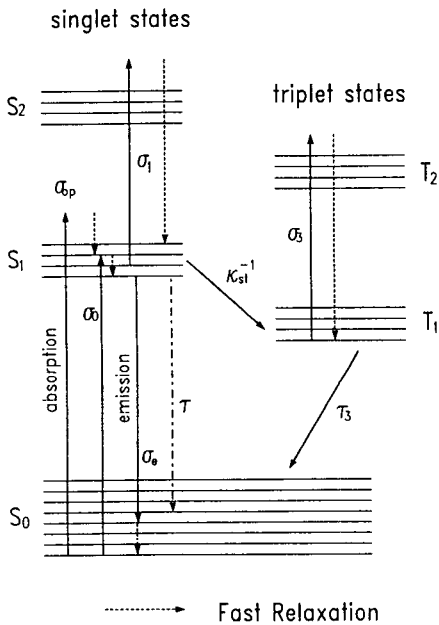


그림 3. 색소의 energy level diagram.

렌즈를 사용하여 펌프광을 집중시켜 색소셀을 링펌핑하게 된다. 펌프광과 색소레이저의 진행 방향과 색소용액의 흐르는 방향은 서로 수직하며 펌프광에 의하여 펌프되는 색소의 면적 $l \times h$ 이고 색소레이저 광의 직경은 d 로 나타내었다. 색소는 Rhodamine 6G로 에탄올에 녹여서 사용한다. 색소의 에너지 준위는 그림 3과 같이 일중항 상태와 삼중항 상태로 구성되며 레이저 발진 및 증폭은 일중항 상태에서 이루어지며 삼중항 상태는 교착율 k_{si} 로 일중항 상태에서 천이되며 레이저 발진 및 증폭을 방해하는 손실로 작용한다. 그리고 일중항 및 삼중항의 첫번째 여기준위에서 더 높은 상태로의 여기상태 흡수

표 1. Rhodamine 6G의 흡수 및 방출단면적과 천이시간

σ_{0p}	$1.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	k_{si}^{-1}	$0.33 \times 10^{-6} \text{ s}$
σ_{1p}	$4.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$		
σ_e	$1.92 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	τ	$3.5 \times 10^{-9} \text{ s}$
σ_0	$1.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$		
σ_1	$3.05 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	τ_i	$2.67 \times 10^{-7} \text{ s}$
σ_3	$5.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$		

(excited state absorption, ESA) 역시 손실로 작용하며 비복사 천이를 통하여 첫번째 여기준위로 다시 떨어지는데, 비복사 천이의 완화시간은 수 pico초로 매우 빠르다. 색소분자의 각 준위에 대하여 파장에 따른 흡수 및 방출 단면적은 표 1에 정리하였으며, 이 값들은 Aristov,^[4] Hammond,^[5] Magde^[6] 등의 여러 실험치를 평균한 M. Maeda의 값을 채택하였다.^[7]

II. 증폭기의 이론

레이저 광이 이들 매질에 입사할 경우 증폭특성은 1차원 광자전송방정식(photon transport equation)과 율방정식(rate equation)을 이용하여 구할 수 있으며 레이저 광의 진행 방향이 z 방향이고 증폭기에 펌프광이 횡으로 입사되는 경우 증폭기 내부에서 다음과 같은 방정식이 성립한다.

$$\frac{dI_l}{dz} = \frac{1}{c} \frac{\partial I_l}{\partial t} + \frac{\partial I_l}{\partial z} = (\sigma_e n_1 - \sigma_0 n_0 - \sigma_1 n_1 - \sigma_3 n_3) I_l \quad (1)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{\sigma_{0p} n_0}{h\nu_p} I_p - \frac{\sigma_e n_1 - \sigma_0 n_0}{h\nu_l} I_l - k_{si} n_1 - \frac{n_1}{\tau_1} \quad (2)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = k_{si} n_1 - \frac{n_3}{\tau_3} \quad (3)$$

$$\frac{dI_p}{dt} = W(t) - (\sigma_{0p} n_0 + \sigma_{1p} n_1) c I_p \quad (4)$$

$$N = n_0 + n_1 + n_3 \quad (5)$$

식(1)~(5)에서 $I_l(z, t)$, $I_p(z, t)$, $W(t)$ 는 각각 레이저와 펌프광의 강도 및 펌프광 power이다. N , $n_0(z, t)$, $n_1(z, t)$, $n_3(z, t)$ 는 각각 색소분자의 밀도, 기저 준위의 분자밀도, 여기일중항 준위의 분자밀도, 여기삼중항 준위의 분자밀도이다. σ_e , σ_0 , σ_{0p} , σ_1 , σ_{1p} , σ_3 는 각각 색소분자의 유도방출, 일중항 재흡수, 펌프광에 대한 흡수, 레이저 광에

대한 여기일중항흡수, 펌프광에 대한 여기일중항흡수, 삼중항흡수 단면적을 나타낸다. 또한 k_{st} 는 여기일중항의 준위에서 삼중항으로 천이되는 비율이며, τ_1 과, τ_3 는 여기일중항과 여기삼중항의 형광 수명시간이다.

(1)식은 단일 종모드 공진기로부터 얻어진 색소레이저가 증폭기 셀을 투과하면서 시간과 공간적으로 변화하는 율을 나타낸 것으로 유도방출에 의해서 증폭된 광자수를 나타내는 이득항과 입력되는 레이저에 의한 기저, 여기일중항, 여기삼중항의 흡수되는 광자수를 나타내는 손실항들을 계산한 것이다. (2)식은 여기일중항의 색소분자 밀도의 시간에 대한 변화를 나타내며 펌프광에 의해 증가하고, 유도방출과 삼중항으로의 천이, 그리고 자발방출에 의해 감소한다. (3)식은 여기삼중항에서 색소분자밀도의 시간에 대한 변화를 나타내며, 여기일중항으로부터 교착율 k_{st} 을 가지고 증가하며 삼중항의 자발방출량 만큼 감소한다. (4)식은 펌프광의 시간에 따른 변화율을 보여주며 펌프광 자체의 시간에 대한 변화와 기저준위의 색소분자의 흡수와 여기일중항 상태 분자의 여기상태 흡수(excited state absorption, ESA)에 의하여 감소하게 된다. (5)식은 각각의 시간에서 항상 바닥 상태와 여기일중항 및 삼중항의 색소 분자 밀도의 합이 보존됨을 나타내는데, 이는 여기상태 흡수에 의하여 더 높은 준위로 올라갔다가 완화되는 시간이 picosecond 정도로 매우 짧기 때문에 우리가 고려하는 시간내에서는 여기상태의 분자밀도가 변하지 않기 때문이다.

III. Computer Simulation

레이저가 증폭되는 과정에서 펄스가 존재하는 시간 즉, 펄스폭(FWHM)이 매질의 완화시간(relaxation time)보다 충분히 좁은 경우와^[8] 펄스폭이 매질의 완화시간보다 충분히 길어서 정상상태로 근사가 성립하는 경우로^[9] 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 펌프광과 색소레이저의 펄스폭이 50 ns인 경우를 가정하였으며 색소분자의 여기일중항의 형광수명은 3.5 ns이고 여기삼중항의 형광수명은 267 ns이며 여기일중항에서 여기삼중항으로의 교착시간은 $T_{st} = 1/k_{st} \approx 300$ ns이어서, 레이저 증폭에 이용되는 여기일중항의 완화시간이 펄스폭에 비하여 비교적 짧으므로 정상상태로 근사시킬 수 있다. 그러나 여기삼중항으로 천이된 색소분자는 삼중항의 수명이 레이저 펄스폭에 비해 크기 때문에 삼중항의 상태는 준안정상태(metastable state)라 할 수 있으며 증폭과정에서 손실로 작용하므로 정상근사의 오차가 커질 수 있으며 정상상태를 가정할 수 없는 경우도 발생하므로 식(1)~

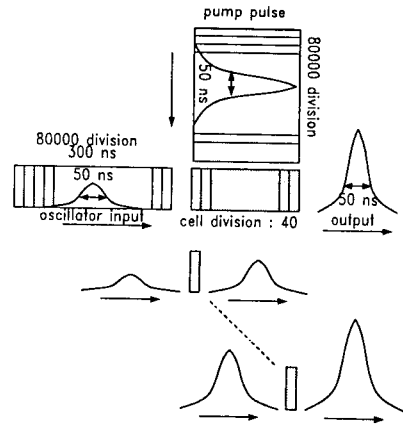


그림 4. 증폭기 수치해석 방법.

(5)에 대하여 수치계산을 통해서 증폭기의 특성을 분석하였으며 정상상태인 경우와 비교하여 보았다.

수치해석의 알고리즘은 그림 4와 같으며 다음과 같은 가정을 하였다. 즉 레이저와 펌프광의 펄스폭은 50 ns 이고 시간에 대한 강도분포는 가우시안형 함수로서 가정하였으며 펄스의 wing부분의 에너지도 증폭되는 것을 고려하기 위하여 펄스의 에너지가 존재하는 시간범위를 펄스폭의 6배, 즉 300 ns까지 고려하였다. 펄스의 미소 시간에 대한 변화를 보기 위하여 입사광과 펌프광을 80000등분하였으며 셀의 길이가 2 cm인 경우 미소 펄스 하나가 미소 시간 동안 매질에서의 광속으로 진행한 거리로 셀의 길이를 나누면 셀의 길이는 40등분 된다. 미소 펄스의 미소 시간동안의 강도는 일정하고 레이저 펄스가 미소셀을 통과하며 약간 증폭되어 다음 셀로의 입력되는 레이저가 된다고 가정할 때 각각의 미소셀을 지나서 증폭된 광의 시간적 강도 분포(temporal profile)와 펄스폭의 변화는 거의 없었다. 또한 50 ns의 레이저와 펌프광은 매질속에서 광속으로 진행하므로 2 cm 길이의 셀을 투과하는 동안의 두 펄스의 시간 지연은 무시하였으며 두 펄스는 공간적으로 균일한 강도분포를 가지고 셀에 입사되는 것으로 가정하였다. 색소의 순환속도는 수 m/s이고 입사 레이저와 펌프광의 색소셀의 진행속도에 비하여 작은 속도로 진행하므로 증폭 과정 동안에 색소의 흐름은 정지한 것으로 가정하였다. 펌프광의 흡수는 색소셀 내부를 지나면서 지수적으로 감소하므로 펌프광의 에너지는 공간에 대하여 평균값을 취하였다. 이와 같은 가정하에 여러변수에 대하여 효율 및 출력에 대한 계산을 하였으며 컴퓨터는 IBM PC를 사용하였고 유한요소법으로 프로그램되었다.

IV. Steady state solution

색소레이저와 펌프광의 펄스에 의해서 색소분자의 각각 에너지 준위에서 단위 체적당 분자밀도가 펄스 존재 시간동안에 시간에 대하여 변화하지 않고, 여기일중항과 여기삼중항의 흡수천이는 없는 것($\sigma_1=0, \sigma_3=0$)으로 가정하면 정상상태(steady state)가 되어 앞의 율 방정식과 전송 방정식이 해석적으로 풀리게 된다.^[10] 수치 해석적인 방법에 의한 결과를 정상상태에 의한 결과와 비교하기 위하여 정상해를 구하여 보았다. 이 경우 광자전송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{I_l} \frac{dI_l}{dz} = \frac{a_0}{1+I_l/I_s} \tag{6}$$

여기서, 이득계수 G_0 와 색소레이저의 포화상태 강도 I_s 는 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{N\sigma_e \left[\sigma_{op} \tau_1 I_p - \frac{\sigma_0}{\sigma_c} (1+k_{st} \tau_1) \right]}{(1+k_{st} \tau_1) + \sigma_{op} \tau_1 I_p (1+k_{st} \tau_3)} \tag{7}$$

$$I_s = \frac{(1+k_{st} \tau_1) + (1+k_{st} \tau_3) \sigma_{op} \tau_1 I_p}{\sigma_c \tau_1 \left[1 + (1+k_{st} \tau_3) \frac{\sigma_0}{\sigma_c} \right]} \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)은 펌프광이 주어지면 상수가 되므로 식 (6)에 대입하고 경계조건을 사용하면 증폭기를 통과한 후의 레이저 광의 세기 및 효율, 이득 등을 모두 계산할 수 있다.

V. 수치해석 결과 및 분석

그림 5는 펌프광이 16 mJ, 셀의 길이 2 cm, 농도 2.5×10^{-4} mol/l에서 레이저 입력에너지의 변화에 따른 증폭된 출력에너지의 그래프이며 정상해와 수치해석적 방법에 의하여 계산한 값이다. 두 그래프는 비슷한 증폭특성을 보여주고 있으나 레이저 입력에너지가 낮을 경우 정상해에 의한 출력은 수치해석적인 방법에 의한 출력보다 높고 높은 입력에너지에 대하여는 두 값이 거의 일치하고 있다.

이것은 식 (2)로부터 정상적으로 설명할 수 있는데 입력 에너지 I_l 이 큰 경우에는 식 (2)의 첫째항과 둘째항의 크기가 비슷해져서 밀도의 변화가 작아져서 정상상태로 근사가 성립하게 되지만 입력에너지가 작은 경우에는 여기 일중항 상태로 분자가 충분히 여기되더라도

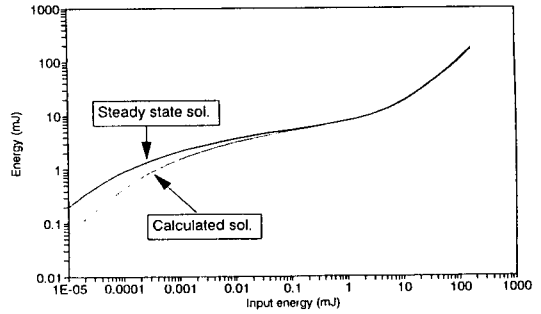


그림 5. 수치해석적 방법과 정상근사 방법의 수치분석 비교.

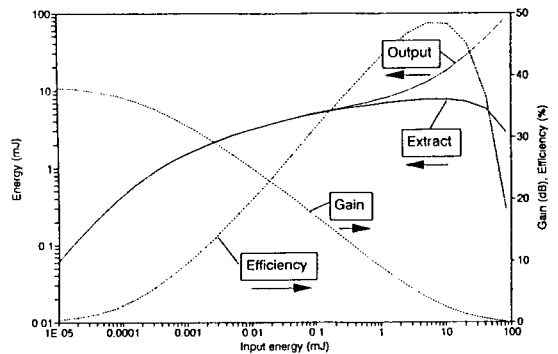


그림 6. 입력레이저의 에너지변화에 대한 증폭특성 분석.

펌프에너지와 입력에너지의 차이가 커서 둘째항이 첫째항보다 훨씬 작으므로 밀도 변화가 없는 정상상태로 근사시킬 수 없다. 결국 낮은 입력 에너지에서는 정상상태의 근사가 성립하지 않음을 알 수 있고 낮은 입력 에너지에서의 증폭현상도 설명할 수 있는 수치해석적 방법이 더욱 정확한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 다음의 결과들은 수치해석적 방법에 의한 증폭특성 분석 결과들이다. 또한, 색소레이저 공진기로부터 얻어지는 레이저는 낮은 출력을 가지므로 그래프에서 레이저의 입력 에너지의 범위가 수십 mJ 이상에서는 증폭 특성이 의미를 갖지 않는다.

그림 6은 그림 5와 같은 증폭조건하에서 입력에너지를 증가시키기에 따른 증폭특성의 결과로 입력에너지가 증가함에 따라 변환효율과 출력은 증가하였고 이득율은 감소하였다. 여기서, 입력에 대한 출력의 효율 η , 이득율 G 와 extraction 강도는 다음과 같다.

$$\text{Efficiency: } \eta = \frac{I_l(\text{out}) - I_l(\text{in})}{I_p} \times 100 (\%) \tag{9}$$

$$\text{Gain: } G = 10 \times \log \frac{I_{\text{(out)}}}{I_{\text{(in)}}} \quad (\text{dB}), \quad (10)$$

$$\text{Extraction intensity: } I_{\text{ext}} = I_{\text{(out)}} - I_{\text{(in)}} \quad (\text{W/cm}^2). \quad (11)$$

그림 7은 증폭기에 입사되는 레이저 광의 세기에 따른 에너지 흐름의 변화를 보여주고 있다. 색소레이저의 입력에너지가 증가함에 따라 색소레이저에 의한 색소분자의 여기일중항과 여기삼중항에서 윗 준위로의 흡수에너지는 증가하고, 펌프광에 의한 여기일중항의 흡수에너지는 감소하여 여기일중항과 여기삼중항의 자발방출 에너지는 감소함을 알 수 있다. 여기일중항의 자발방출 에너지는 여기삼중항에 비해 크며 여기 일중항에 의한 에너지의 흡수가 레이저 증폭에 상당한 손실을 주게 됨을 알 수 있다. 특히 레이저의 입력에너지가 낮을 때 더욱 크기 때문에 정상근사법에 의한 출력에너지가 수치해석

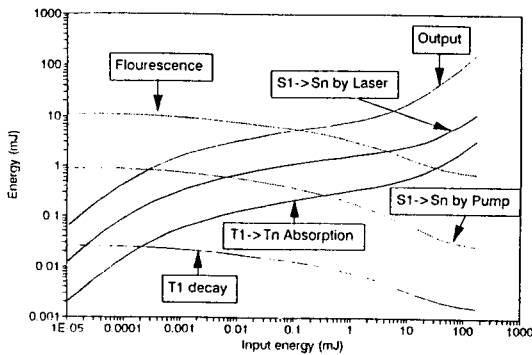


그림 7. 입력레이저의 에너지변화에 대한 증폭기의 에너지 flow.

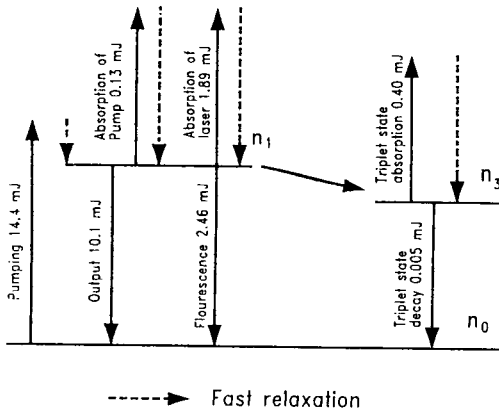


그림 8. 3mJ의 입력 에너지와 16mJ의 펌프 에너지가 주어졌을 경우의 증폭기의 에너지 flow diagram.

에 의한 출력에너지보다 크게 계산된다.

그림 8은 레이저의 입력에너지가 2.6 mJ일 때 펌프광에 의한 색소분자의 각 에너지 준위에서 흡수와 방출하는 에너지의 흐름을 나타낸다. 16 mJ의 펌프 에너지 중에서 손실을 고려하고 90%가 실제 증폭하는데 기여한다면 14.4 mJ이 펌핑된다. 이때 유도방출에 의한 증폭된 레이저의 에너지는 10.1 mJ이며 여기 일중항의 자발방출에너지는 2.46 mJ로서 여기 삼중항의 자발방출에너지 0.005 mJ에 비해서 대단히 큰 비중을 차지한다. 또한, 여기 일중항의 펌프광과 레이저에 의한 흡수에너지는 0.13 mJ과 1.8 mJ이다. 이처럼 레이저 자체의 흡수로 인한 손실도 대략 출력에너지의 1/5을 차지한다. 여기 삼중항에 의한 레이저광의 흡수는 0.40 mJ로서 손실에는 크게 영향을 미치지 않는다.

그림 9는 셀 길이 2 cm, 여기광의 에너지 16 mJ, 입력에너지 3 mJ의 조건에서 레이저 광의 직경을 변화시키면서 각각의 직경에서 색소농도에 따른 효율을 조사한 결과이다. 색소의 농도를 변화시켰을 때 농도의 최적조건은 대략 $2.5 \sim 3.5 \times 10^{-4}$ mol/l이었으며 농도에 따라 효율이 많이 변함을 알 수 있었다. 그리고 레이저 빔의 직경을 줄일수록 효율은 증가함을 나타내지만 빔 직경이 0.1 cm인 경우와 같이 매우 작을 때에는 색소셀의 표면에서 빔의 강도가 너무 높아서 셀의 윈도우에 가까이 있는 색소분자가 타거나 분해되는 손상을 입을 수 있으므로 빔 직경에 의한 효율을 높이는 방법에는 한계가 있음을 주의해야 한다. 한편 입력에너지 3 mJ, 셀 길이 2 cm, 빔 직경 0.15 cm로 고정하고 펌프광의 에너지를 변화시키면서 각각의 펌프 에너지에서 색소의 농도에 따른 출력특성을 조사한 결과 농도의 최적조건은 거의 변함이 없었으며 10 mJ의 펌프 에너지 이상에서는 최적 조건에서 40%의 효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 입력에너지 3 mJ, 농도 2.5×10^{-4} mol/l, 빔 직경

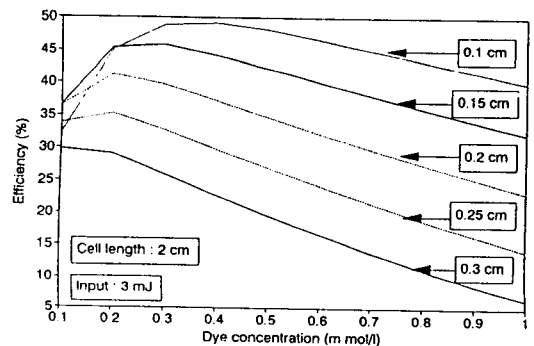


그림 9. 레이저 빔 직경에 따른 효율 변화

표 2. 다단증폭기 시스템에서 각 시스템의 최적조건

Optimize Condition	(1) One Amplifier System		(2) Two Amplifier System	
	Amp A	Amp A	Amp A	Amp B
Cell Size (L×a, mm)	20×1.5	10×1.5	20×1.5	20×1.5
Concentration (mol/l)	2.5×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻³	2.5×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻⁴
Pump Energy (mJ)	25	5	20	20
Input Energy (mJ)	0.01	0.01	1.27	1.27
Output energy(mJ)	6.91	1.27	10.23	10.23
Maximum Gain (dB)	28.4	21.1	9.0	9.0
Efficiency (%)	27.61	25.28	44.76	44.76
Overall Efficiency (%)	27.61	40.80		
Total Gain (dB)	28.4	30.10		

Optimize Condition	(3) Three Amplifier System		
	Amp A	Amp B	Amp C
Cell Size (L×a, mm)	10×0.5	10×1.0	20×1.5
Concentration (mol/l)	2.0×10 ⁻³	0.7×10 ⁻³	2.5×10 ⁻⁴
Pump Energy (mJ)	1.5	6.5	17.0
Input Energy (mJ)	0.01	0.33	2.91
Output energy(mJ)	0.33	2.91	10.78
Maximum Gain (dB)	15.2	9.45	5.69
Efficiency (%)	21.16	39.75	46.33
Overall Efficiency (%)		43.12	
Total Gain (dB)		30.32	

Optimize Condition	(4) Four Amplifier System			
	Amp A	Amp B	Amp C	Amp D
Cell Size (L×a, mm)	10×0.5	10×0.8	10×1.0	20×1.5
Concentration (mol/l)	2.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	0.5×10 ⁻³	2.5×10 ⁻⁴
Pump Energy (mJ)	1.0	2.0	5.0	17.0
Input Energy (mJ)	0.01	0.15	0.67	2.77
Output energy(mJ)	0.15	0.67	2.77	10.62
Maximum Gain (dB)	11.8	6.50	6.16	5.84
Efficiency (%)	13.76	26.20	42.00	46.20
Overall Efficiency (%)		42.48		
Total Gain (dB)		30.26		

0.15 cm, 여기광 16 mJ에서 셀 길이에 따른 변환효율도 조사하였는데 2~3 cm 정도에서 최적치를 보이지만 셀의 길이에 따라서 변환율에는 큰 영향을 주지는 않는 것으로 나타났다. 이상의 수치분석 결과에서 변환효율을 높이는 데는 색소의 농도와 펄스광의 에너지와 증폭기로 입력되는 레이저 광의 직경이 큰 변수로 작용하며, 셀의 길이는 최적조건이 있으나 큰 영향을 주지는 않는다.

위의 결과들은 증폭단이 하나인 경우에 대하여 변환효율이 최적인 조건을 구한 것이다. 그러나 더욱 높은 변환효율을 얻기 위해서는 다단 증폭기 시스템이 필요하며 본 연구에서는 증폭단이 1단, 2단, 3단, 4단 시스템들에 대하여 각각의 최적조건과 변환효율을 계산하였다. 다단 증폭기 시스템에서 최적조건을 찾아내는 방법은 앞에서 조사된 1단 증폭기 시스템의 최적조건을 구하는

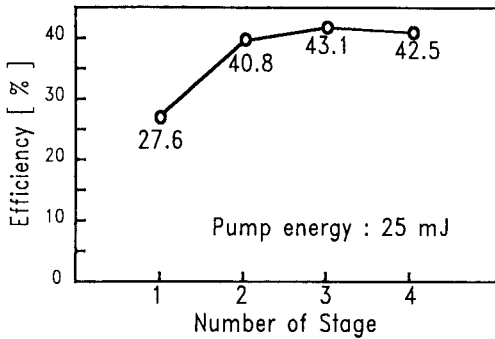


그림 10. 증폭단의 수에 따른 증폭 시스템 종류별 효율 변화

방법으로 계산하고 앞단에서의 출력을 다음 단에서의 입력으로 하여 계산하였고 증폭기 단수별 최적조건 계산결과를 표 2와 같다. 그림 10은 증폭단의 개수에 따른 증폭 시스템 종류별 효율변화를 나타낸다. 여기광이 25 mJ일 때 증폭단의 개수가 3단인 시스템의 경우는 43.1%까지 증가했지만 4단인 시스템의 경우 오히려 42.5%로 줄어들었다. 이것은 증폭단의 수에도 최적조건이 있음을 보여주며 2단 증폭시스템으로도 40% 정도의 효율을 얻을 수 있음을 보여준다. 실제로 증폭기를 제작할 경우에 단수가 증가할 경우에 드는 경제적 손실을 고려하면 2단 증폭 시스템이 적절함을 알 수 있다. 표 1에서 3단 시스템과 4단 시스템을 보면 두 경우 모두 전치증폭부분에 8mJ를 펌핑하며 종단증폭기에 17mJ를 펌핑함을 알 수 있으며 종단 증폭기에 가장 많은 양의 펌프 에너지가 사용되어야 함을 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 입력 에너지가 낮을 때 이득이 높으므로 단수를 많이 늘리지 않고 하나의 증폭단에서 많은 증폭이득을 하여야 하며 변환효율은 종단에서 높여야 한다. 그런데, 4단 시스템의 경우 전치 증폭부분에서 증폭단의 증가로 인해서 펌프광의 에너지가 분할되므로 낮은 입력에너지에 대하여 많은 이득(gain)을 얻지 못한다. 4단 시스템의 종단으로 입력되는 에너지는 3단 시스템의 종단으로 입력되는 레이저의 에너지보다 적어서 같은 17mJ의 종단 펌프에너지를 받을 때 당연히 3단 시스템이 효율과 출력이 더 높다. 이 결과 3단 시스템의 경우에 펌프광의 분배비율은 변환효율을 높이기 위해 전치증폭시스템에는 25 mJ의 펌프광의 32%를 펌핑하고 68%는 종단증폭기에 펌핑하게 된다.

IV. 결 론

이상과 같이 광자전송방정식과 울 방정식에 의하여 Rhodamine 6G 색소레이저 다단증폭 시스템의 출력과 변환효율을 높이기 위해 여러 변수를 변화시켜가면서 수치해석한 결과, 반복율 10 kHz, 에너지 25 mJ인 출력 250 W의 구리 증기 레이저로 펌핑시킨 경우 출력과 변환효율 및 경제성을 고려할 때 2단 증폭시스템을 설계 하므로써 에너지 10 mJ인 약 100 W의 출력을 얻을 수 있는 40% 효율의 고출력, 고효율의 색소레이저를 개발할 수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 펄스광과 레이저광의 공간 기하학적인 강도 분포도 고려하면 더욱 정확한 증폭특성을 알 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] F. J. Duarte and L. W. Hillman, *Dye Laser Principles with applications*, (Academic Press, New York, 1990) Chap. 7, 8, 9 and references therein.
- [2] S. Lavi, M. Amit, G. Bialolanker, E. Miron and L. A. Levin, *Appl. Opt.* **24**(13), 1905 (1985); I. T. McKinne, A. J. Berry and T. A. King, *J. Mod. Phys.* **38**, 1691 (1991).
- [3] M. G. Littman, *Appl. Optics* **23**, 4465 (1984).
- [4] A. V. Aristov and V. S. Shevandin, *Opt. Spectrosc.* **43**, 131 (1977).
- [5] P. R. Hammond, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-16**, 1157 (1980).
- [6] D. Magde, S. T. Gaffney and B. F. Campbell, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17**, 489 (1981).
- [7] M. Maeda and M. Uchiumi, *Rev. Laser Eng.* **18** (7), 474 (1990).
- [8] L. M. Frantz and J. S. Nodvik, *J. Appl. Phys.* **34**, 2346 (1963).
- [9] R. S. Hargrove and T. Kan, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-16**, 1108 (1980).
- [10] C. E. Webb, *High Power Dye Lasers* edited by F. J. Duarte (Springer-Verlag, New York, 1991) Chap. 5.

**A Numerical Analysis for Optimum Design of Multi-Stage
Amplifier System of High Power Dye Laser**

Do-Kyeong Ko, Sung Ho Kim, Byung Cheol Lee, Jung Bog Kim
and Jongmin Lee

Atomic Spectroscopy Dept. Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-606, Korea

Gwon Lim, Jae Heung Jo and Soo Chang
Dept. of Physics, Hannam University, Taejon 300-791, Korea

(Received: June 3, 1993)

We have investigated the output characteristics and optimal conditions of a multi-stage amplifier system of Rhodamine 6G dye laser. The parameters in this simulation work were the beam diameter of the dye laser oscillator, the size of dye cell, the dye concentration, the number of stages in the amplifier system, and the pumping energy ratio of each amplifier at given pump energy. As a result, the output energy 10 mJ and the conversion efficiency of 40% in the two stage amplifier system were obtained with the pumping energy of 25 mJ and the oscillator energy of 0.01 mJ.