

## 분할디스크형 글라스레이저 증폭기의 온도분포특성에 관한 연구\*

김 병 태

청주대학교 이공대학 물리광학과

(1992년 9월 29일 받음)

분할디스크형 글라스레이저 증폭기를 개발하기 위하여 이를 해석 설계할 수 있는 시뮬레이션 코드를 작성했다. 레이저매질에서의 열부하를 감소시키고, 플래시램프의 방사스펙트럼과 레이저글라스의 흡수 스펙트럼 간의 결합효율을 높이기 위해서는 전류밀도를 2000~4000 A/cm<sup>2</sup>로 유지하여 단파장에서의 방사에너지를 줄여야 한다. 디스크 증폭기에서 같은 부피를 갖는 매질을 3등분하여 냉각표면적을 3배로 늘렸을 때 온도상승치는 30% 정도로 떨어졌다. 단면펌핑 분할디스크형 증폭기의 설계에서는 각 글라스 간의 Nd<sup>3+</sup> 도핑율에 차등을 주어야 하고, 플래시램프 앞에 있는 매질의 흡수계수  $\alpha$ 와 두께  $d$ 의 곱인  $\alpha d$ 가 0.26 전후가 적절하다는 것을 알았다.

### I. 서 론

고출력 레이저는 높은 에너지밀도를 갖는 광으로 물질과의 상호작용은 지금까지 발견하지 못했던 고차원의 비선형현상을 나타내므로 많은 연구 대상이 되고 있다.

고출력 Nd:Glass레이저 시스템은 관성핵융합(inertial confinement fusion) 연구 및 고밀도 중성자 발생 실험 장치를 실현시키는데 가장 발전된 에너지 드라이버로서 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 모든 고출력 Nd:Glass레이저 시스템은 전자증폭단에 로드형 증폭기, 주증폭단에 로드형 및 디스크형 증폭기로 구성된다.

대구경을 갖는 디스크형 레이저증폭기<sup>[2,6]</sup>는, 로드형 증폭기와 비교하여, 빠른 열 완화시간, 펌핑의 균일성, 단펄스에서 높은 광학적 손상문턱치, 낮은 B(beam break-up) 계수, 제조의 용이성 및 신뢰성 등 고강도의 단펄스 증폭에 있어서 많은 장점을 갖고 있다. 디스크형 레이저증폭기 개발의 주목적은 펌핑의 균일성 개선, 에너지 축적효율 개선 및 고반복동작화이다. 고반복동작율은 레이저매질에서의 열부하를 경감시키고, 레이저매질에 축적되는 열에너지를 외부로 발산시키기 위해 냉각율을 높이므로서 얻을 수 있다. 또, 레이저매질에 축적되는 열에너지를 분산시키는 것은 매질이 받는 열 및

스트레스의 영향을 제거하는데 보다 효과적이다. 분할 디스크형 증폭기<sup>[7-11]</sup>란 이런 기본적인 이유에서 냉각효율을 개선하기 위하여 전형적인 디스크형 증폭기에 사용하는 한 장의 매질을 몇장의 얇은 판 모양으로 쪼개고 이를 재 구성하여 만든 것이다. 이 개념은 표면에 가까운 곳에서 펌핑광을 거의 흡수하게 되는 고농도의 Cr<sup>3+</sup>과 Nd<sup>3+</sup>가 첨가된 GGG 및 GSGG 같은 레이저매질의 펌핑효율을 높이는데도 유효한 구조가 된다.<sup>[12]</sup>

고출력 레이저 시스템이 인류의 에너지 해결책이라고 할 수 있는 핵융합발전 및 최첨단 산업기술인 반도체 제조공정의 X-선 리소그래피 등 레이저응용에 실제 사용되기 위해서는 최소 1~10 pps 정도의 반복동작율이 필요하다.<sup>[13]</sup> Nd:Glass레이저의 경우는 우수한 레이저특성을 갖고 있으면서도 레이저매질인 Nd:Glass의 낮은 열전도율<sup>[14,15]</sup>로 인해 산업응용을 위한 연구 개발에 자주 사용되지 못하였다. 그러나 글라스의 낮은 열전도율은 슬랩<sup>[7,16,17]</sup>이란 형태의 구조적인 개선으로 현재 극복되어져 가고 있다. 이와 같은 구조적인 개선의 한 방법으로 분할디스크형 증폭기가 연구 개발된다면, 고출력 Nd:Glass레이저 시스템의 고반복동작화가 진척되어 글라스레이저의 응용분야는 한층 더 넓혀질 것이 분명하다.

본 논문에서는 분할디스크형 레이저증폭기의 고반복동작을 위하여 레이저매질에서의 Nd<sup>3+</sup> 도핑율과 온도

\* 본 연구는 '91년도 한국과학재단 연구비지원(913-0207-011-2)으로 수행된 것임.

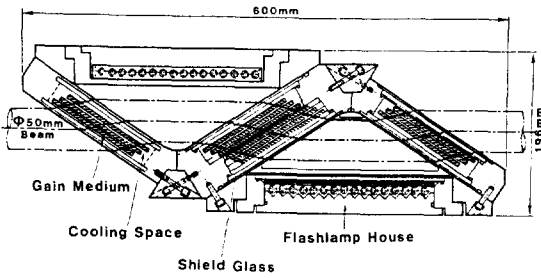


그림 1. Schematic diagram of a split-disk geometry amplifier head as a simulation model.

분포 및 분할디스크형 증폭기 설계시의 문제점 등에 대해서 시뮬레이션한 연구 결과를 기술한다. 시뮬레이션의 기준 모델은 일본 오사카대학 레이저핵융합 연구소에 설치되어 있는 분할디스크형 레이저증폭기 그림 1에 그 내부구조도를 나타낸다.

## II. 본 론

분할디스크형 글라스레이저 증폭기를 개발하기 위하여 이를 해석 설계할 수 있는 시뮬레이션 코드를 작성했다. 시뮬레이션 코드는 플래시램프의 발광에너지 및 스펙트럼분포, 레이저매질인 Nd:Glass에서의 흡수에너지와 흡수된 에너지에 의해 레이저매질에서 발생하는 온도분포 특성 등을 포함하고 있다.

### 1. 플래시램프의 발광에너지

레이저 여기원은 레이저매질이 흡수할 수 있는 스펙트럼영역에서 최대 발광에너지를 내야한다. 전원은 333 μH의 인덕터에 8개의 플래시램프를 직렬로 연결하고, 이들이 4대의 30 μF 캐패시터에 병렬로 연결되어 최대 8.5 kV의 충전전압을 인가할 수 있게 된 것을 모델로 한다. 플래시램프의 발광에너지는 시간, 전류밀도 및 파장의 함수로 계산한다. 플래시램프의 발광에너지 E<sup>[5]</sup>는

$$E = \int_0^t K |i(t)|^{3/2} dt \quad (1)$$

으로부터 구할 수 있다. 여기서  $i(t)$ 는 플래시램프의 시간에 따른 전류변화,  $K$ 는 플래시램프의 비선형 전류-전압특성<sup>[18, 19]</sup>으로

$$K = 1.27 \left(\frac{l}{D}\right) \left(\frac{p}{450}\right)^{0.2} \quad (2)$$

의 관계에서 구하고,  $l, D$  및  $p$ 는 플래시램프의 제원으로

아크길이, 내경 및 Xe가스의 봉입압력이다. 계산은 시간에 대해서 1 μs 간격으로 하고, 플래시램프에서의 방사스펙트럼은 공간적으로 균일한 흡수-방사계수와 균일한 온도분포를 갖는 원통형 플라즈마 발광원으로 가정했다. 스펙트럼 방사출력  $R(\lambda, T)$ <sup>[18]</sup>은 흑체방사  $B(\lambda, T)$ 와 흡수-방사계수  $\alpha(\lambda)$ 의 곱

$$R(\lambda, T) = B(\lambda, T) [1 - \exp\{-\alpha(\lambda)d\}] \quad (3)$$

에서 구하고,  $T$ 는 플라즈마의 온도,  $d$ 는 플래시램프의 플라즈마 직경을 의미한다. 파장  $\lambda$ 에서 흑체방사는 플랑크 법칙으로 구한다.

$$B(\lambda, T) = \frac{8\pi h}{\lambda^3 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (4)$$

여기서  $c$ 는 광속,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $h$ 는 플랑크 상수이다. 플래시램프의 플라즈마 직경  $d$ <sup>[5]</sup>는 플래시램프의 내경을  $D$ 라 하면

$$d = \frac{D}{\left(1 + \frac{0.08}{D}\right)} \quad (5)$$

로부터 구할 수 있다. 플라즈마 온도  $T$ <sup>[18, 20]</sup>는 플래시램프의 전류밀도  $J$ 를 이용한 다음의 식으로부터 구한다.

$$T = [(9460 D^{0.03} J^{0.01})^6 + (93 D^{0.27} J^{0.34})^6]^{1/6} \quad (6)$$

흡수-방사계수는 연속스펙트럼 흡수와 각 선스펙트럼 흡수에 의해 구해진다. 연속스펙트럼에서의 흡수는 전류밀도를 1000 A/cm<sup>2</sup>로 규격화한 흡수관계식<sup>[18, 20]</sup>

$$C(\lambda) = 0.15 \exp[-8(\lambda - 0.7)^2] + 0.01 \quad (7)$$

에서 구할 수 있으며, 각 선스펙트럼에서의 흡수는 Lorentzian을 이용한 식<sup>[20]</sup>

$$L(\lambda) = \sum_{u=1}^n \frac{A_u}{4 \left\{ \frac{(\lambda_u - \lambda_m)^2}{W_u} \right\} + 1} \quad (8)$$

의 관계에서 구한다. 여기서  $A_u$ 는 주된 흡수파장영역에서의 최대 흡수계수,  $W_u$ 는 주된 흡수파장영역의 반치폭 그리고  $\lambda_m$ 는 주된 흡수파장을 나타내며 그 관계를 표 1<sup>[18]</sup>에 나타낸다. 흡수-방사계수는 규격화된 전류밀도와 의 관계<sup>[20]</sup>를 정리하면 최종적으로

$$\alpha(\lambda) = [C(\lambda) + L(\lambda)] \left(\frac{J}{10^3}\right)^2 \quad (9)$$

표 1. Emission lines and linewidths in a Xenon flash-lamp.

No.	Wavelength [nm]	FWHM [nm]	Abs. Coeff. [/cm]
1	418	1.4	0.089
2	420	2.6	0.090
3	425	3.2	0.092
4	433	2.4	0.095
5	437	3.8	0.096
6	445	1.8	0.099
7	458	1.4	0.055
8	484.5	2.2	0.046
9	487.5	2.2	0.045
10	492	1.6	0.043
11	519	1.4	0.277
12	529	1.2	0.031
13	534	2.0	0.029
14	542	1.4	0.026
15	597.5	1.4	0.011
16	605	1.4	0.010
17	609.5	1.4	0.522
18	699	1.4	0.001
19	823	6.0	3.750
20	828	3.0	3.000
21	835	4.0	2.250
22	882	9.0	3.750

에서 구할 수 있다.

그림 2에 플래시램프의 전류밀도에 따른 방사스펙트럼과 인산염 레이저글라스의 흡수스펙트럼을 나타낸다. 플래시램프의 내경을 5 mm, Xe 봉입압력을 350 Torr로 하여 펌핑에너지 4 kJ(6650 A/cm<sup>2</sup>)과 2 kJ(2720 A/cm<sup>2</sup>)에 대해 파장 간격을 1 nm로 계산한 것이다. 고전류밀도의 경우 플래시램프의 에너지가 청록색영역 아래에서 주로 방사되어, 즉 단파장영역에서 강력한 발광원이 되어 레이저글라스의 흡수스펙트럼대와 맞는 파장영역에서의 발광효율이 낮아지게 된다. 단파장대에서 많은 에너지를 방출할수록 레이저글라스의 흡수스펙트럼대와 펌핑원의 방사스펙트럼의 상이 때문에 여기에너지와 레이징 원자 사이의 결합효율이 떨어짐을 쉽게 알 수 있다. 그리고 단파장대의 방사에너지가 레이저매질에 다량 흡수되어 열원으로서 작용하여 결국에는 그 열영향에 의해 레이저비임 및 레이저매질이 치명적인 손상을 입게 된다. 따라서 글라스레이저 설계시에는 플래시램프가 가장 효율적인 스펙트럼대에서 에너지를 방사하는 2000~4000 A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 유지할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

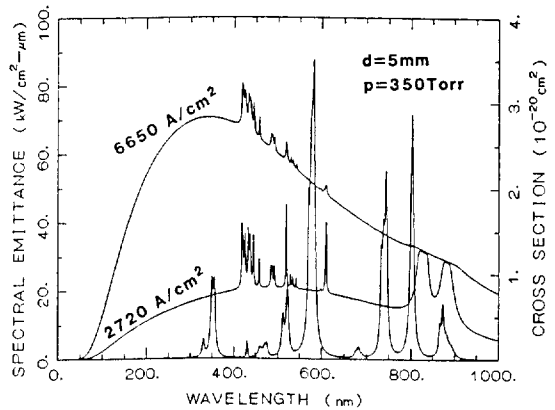


그림 2. Spectral emittance calculated for a Xenon flashlamp with a bore diameter of 5 mm and an absorption cross section of a phosphate laser glass.

## 2. 레이저매질에서의 흡수

펌핑원에서 방사된 에너지는 펌핑원의 플라즈마에 의한 재흡수 및 캐비티 내부에서의 반사 등의 경로를 거쳐 레이저매질에 전달된다. 전달된 에너지는 레이저매질의 흡수특성에 따라 흡수되어 약 5% 내외가 레이저발진에 기인하는 축적에너지가 되고, 나머지는 열에너지로 되어 레이저매질에 치명적인 손상요인이 되기도 한다.<sup>[21]</sup>

일반적으로 인산염 레이저글라스는 규산염 레이저글라스보다 커다란 유도방출단면적을 갖고 있어 증폭이득이 크다. 분할디스크형 레이저증폭기에서는 Nd<sup>3+</sup> 8 wt.% 도핑된 5 mm 두께의 인산염 레이저글라스 3장이 15 mm의 것 1장을 대체하여 구성된 것으로 하여 시물레이션 한다. 레이저매질에 흡수되는 에너지는 레이저디스크의 Nd<sup>3+</sup> 도핑율과 두께에 의존한다. Nd<sup>3+</sup> 도핑율과 레이저매질의 두께에 의한 총흡수에너지는 그림 2에서와 같이 캐비티 내에서 플래시램프의 방사스펙트럼과 레이저매질의 흡수스펙트럼 사이의 조화에 의존한다.

레이저글라스에서의 흡수계수 α(λ)는 표 2<sup>[22]</sup>의 인산염 레이저글라스의 흡수특성과

$$\alpha(\lambda) = 1 - \exp[-L(\lambda)Nd] \quad (10)$$

의 관계에서 구할 수 있다. 여기서 L(λ)는 식 (8)이 그대로 사용되고, N은 Nd<sup>3+</sup>의 이온밀도 그리고 d는 디스크글라스의 두께를 나타낸다. 레이저글라스를 3장으로 분할 구성한 경우 파장에 따른 흡수에너지 비를 나타내면 그림 3과 같다. 이 계산에 사용된 레이저글라스는 Nd<sup>3+</sup>을 8 wt%로 고도핑시킨 것으로 첫번째 매질에서 레이저발진에 효과적인 흡수파장대를 주축으로 흡수되는 에너지

표 2. Absorption lines and linewidths in a phosphate laser glass.

No.	Wavelength [nm]	FWHM [nm]	Abs. Coeff. [/cm]
1	330	0.20	3.0
2	349	0.80	3.0
3	355	0.80	3.0
4	430	0.17	1.0
5	432	0.12	1.0
6	460	0.12	4.0
7	465	0.04	2.0
8	470	0.10	2.0
9	475	0.16	3.0
10	512	0.45	3.5
11	522	0.85	3.0
12	570	0.90	1.0
13	576	2.30	5.0
14	582	2.55	3.1
15	675	0.05	3.0
16	682	0.12	4.0
17	690	0.03	2.0
18	733	0.87	2.3
19	738	1.10	3.3
20	744	1.90	3.0
21	802	2.85	4.0
22	866	0.30	3.0
23	873	0.50	3.0
24	881	0.20	7.0
25	893	0.10	8.0

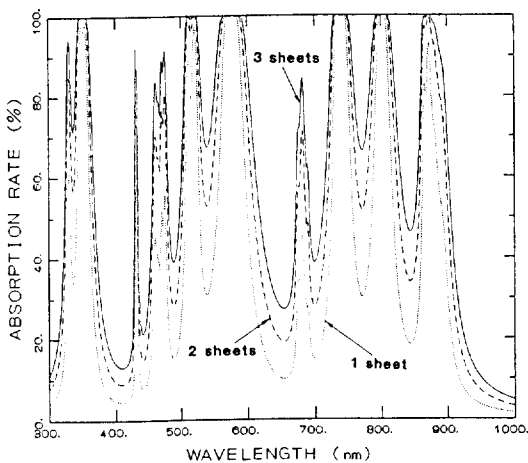


그림 3. Absorption rate for three laser glass stacks with 8 wt.% Nd<sup>3+</sup> doping rate, which was calculated by using the data of Table 2, eq.(8), and eq (10).

가 39% 이상 되고, 두번째, 세번째 매질에서 흡수되는 에너지는 주로 비효과적인 파장대를 포함하여 14.8%, 8.8% 이하에 지나지 않아 이들이 고도핑 레이저매질로서의 작용을 충분히 할 수 없고, 전체적인 양자효율도 저하된다. 또, 흡수된 에너지의 차로 인한 온도차가 생겨 각 매질에서의 레이저비임의 왜곡현상이 일어날 수 있다는 것을 예견할 수 있다. 그림 4에는 3장의 레이저 글라스를 각각 3 wt.%, 5 wt.% 및 8 wt.%로 Nd<sup>3+</sup> 도핑한 것으로 하여 계산한 결과이다. 이 경우에는 22.3%, 17% 및 14.5%를 흡수하여 전체적인 에너지 흡수량은 적으나 양면 펌핑을 고려할 경우 레이저매질로서의 역할을 충분히 할 수 있으며 온도분포특성도 균일하게 되어 레이저비임의 왜곡현상도 현저하게 줄어들 것이다. 즉 분할디스크형의 경우에는 레이저글라스 간의 Nd<sup>3+</sup> 도핑율을 조정해야만 보다 효율적인 증폭기 역할을 하게 될 것이다. 이들 글라스의 흡수효율은 8 wt.%로 고도핑된 레이저글라스에서의 실험치의 평균인 36%, 13.1% 및 7.2%와 87.5% 정도의 정확도로 계산되어진 것이 확인되었다.<sup>[22]</sup> 여기서 첫번째 매질에서보다 세번째 매질에서 오차가 커진 것은 각 매질 표면에서의 반사 혹은 산란의 영향을 시뮬레이션에서는 무시했기 때문으로 생각된다.

### 3. 레이저글라스에서의 온도분포특성

레이저글라스에서의 열영향은 펌핑에너지의 흡수에 의한 열발생과 냉각과정에 의한 열회수 및 열흐름의 관계에 의해서 나타난다. 레이저매질에서의 발열과 냉각은 매질에서의 불균일한 온도분포를 야기시켜 매질의

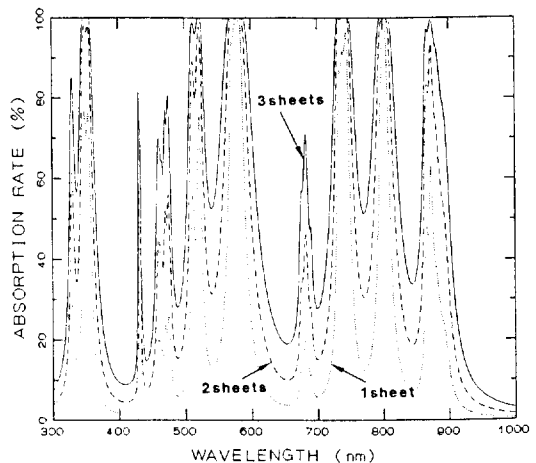


그림 4. Absorption rate for three laser glass stacks with 3 wt.%, 5 wt.%, and 8 wt.% Nd<sup>3+</sup> doping rate.

손상을 유발하고, 불균일한 온도분포와 굴절율변화에 의한 스트레스는 레이저비임을 왜곡시키게 된다.

레이저매질에서의 온도분포 계산은 다음의 2차원 열전달함수<sup>[23]</sup>에 의해서 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{\rho c}{\kappa}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \nabla^2 T + \frac{Q(x,y,t)}{\kappa} \quad (11)$$

여기서  $Q(x,y,t)$ 는 단위 부피당 레이저매질에 축적되는 열에너지,  $\kappa$ 는 열전도율,  $c$ 는 비열,  $\rho$ 는 매질의 질량 그리고  $T$ 는 온도를 의미한다. 식 (11)을 시불변상태에서 단면펄핑 분할디스크를 가정하고, 열에너지가 매질의 두께방향으로 축적되는 것으로 하면 열축적에너지는

$$Q = \chi \alpha P_o \exp[-\alpha(y+d)] \quad (12)$$

로 표현할 수 있다. 여기서  $\chi$ 는 흡수된 에너지가 열에너지로 바뀌는 비,  $\alpha$ 는 매질의 흡수계수,  $P_o$ 는 펌핑파워 그리고  $d$ 는 매질의 두께를 의미한다. 두께방향에 대한 경계조건은

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = C_s [T_c - T(y=0)] \quad (13a)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=t} = C_s [T_c - T(y=t)] \quad (13b)$$

로 하며,  $T_c$ 는 냉각매체의 초기온도이다. 층류(laminar flow) 상태에서 표면 열전달계수  $C_s$ <sup>[23]</sup>는

$$C_s = 0.664 \left(\frac{\kappa_c}{L_c}\right) \left(\frac{U_o L_c}{\nu}\right)^{1/2} P_r^{1/3} \quad (14)$$

의 관계에서 구하고,  $\kappa_c$ 는 냉각매질의 열전도율,  $L_c$ 는 레이저매질에서 냉각매체가 통과하는 길이,  $\nu$ 는 동점성계수,  $U_o$ 는 캐비티 내에서 냉각매질의 속도 그리고  $P_r$ 은 Prandtl 수이다. 레이저매질에서는 흡수된 에너지의 95% 이상이 열에너지로 변하므로 위의 식들에서  $\chi=1$ 이라 가정하였고, 레이저매질의 두께방향에서 온도분포는

$$T(y) = T_a + T'(y) \quad (15)$$

$$T_a = T_c - A + \left\{ \frac{(2\kappa + C_s d)}{2C_s d} \right\} B - \left( \frac{P_o d}{2\kappa + C_s d} \right) \left( 1 - \frac{C_s}{\alpha \kappa} \right) \exp(-2\alpha d) \quad (16)$$

$$T'(y) = A + B \left( \frac{d}{2} - y \right) - \left( \frac{P_o}{\alpha \kappa} \right) \exp[-\alpha(y+d)] \quad (17)$$

$$A = \left( \frac{P_o}{\alpha^2 \kappa d} \right) \{ \exp(-\alpha d) - \exp(-2\alpha d) \} \quad (18)$$

$$B = \left( \frac{P_o}{2\kappa + C_s d} \right) \left\{ \left( 1 + \frac{C_s}{\alpha \kappa} \right) \exp(-\alpha d) - \left( 1 - \frac{C_s}{\alpha \kappa} \right) \exp(-2\alpha d) \right\} \quad (19)$$

의 관계에서 구할 수 있다. 본 계산에서는 실험결과<sup>[22]</sup>를 토대로 한 표면 열전달계수  $C_s$ 의 데이터를 입력시켜 계산 결과가 실상황에 90% 이상 맞도록 되었다.

그림 5에 1 kW(250 W×4)의 펌핑광에 냉각가스 N<sub>2</sub>를 300 l/min로 흘릴 때를 가정하고, 15 mm 두께의 디스크글라스를 1장으로 사용했을 때와 이를 5 mm 3장으로 분할했을 때, 레이저매질에서 Nd<sup>3+</sup> 도핑율 변화에 따른 온도변화를 비교하였다. Nd<sup>3+</sup> 8 wt. %에 15 mm 두께의 글라스를 1장 사용하였을 때 레이저매질의 표면과 중심간의 온도차  $\Delta T_o$ 가 4.1°C에 달했다. 그러나 이것을 5 mm, 3장으로 분할하였을 때는 최고치가 1.2°C에 지나지 않았다. 즉 같은 부피를 갖는 레이저매질에서 냉각표면적을 3배 넓혀 온도상승치를 30% 정도로 경감시키는 효과를 보게 된 것이다. 더욱이 Nd<sup>3+</sup> 도핑율에 차등을 주었을 경우에는 최고치가 0.6°C에 불과하고, 최저치는 0.4°C로 균일한 온도분포를 유지하게 된다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 레이저매질의 분할화는 냉각효율의 개선을 충분히 유도하였고, 더욱이 Nd<sup>3+</sup> 도핑율의 변화는 온도분포를 균일하게 만들어 열영향에 의한 레이저비임의 왜곡을 보다 경감시키게 될 것이다.

그림 6에는 그림 5와 같은 펌핑조건과 냉각조건하에서 첫번째 레이저매질의 흡수계수  $\alpha$ 와 두께  $d$ 의 곱에 따른

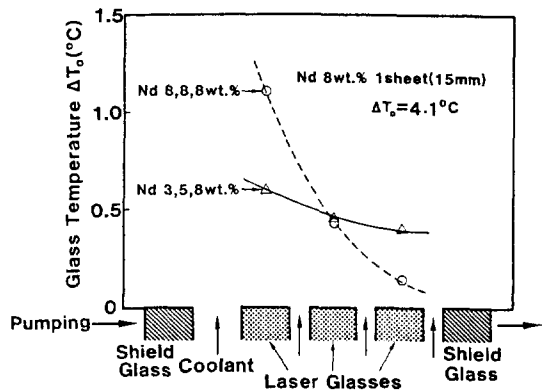


그림 5. Temperature rise inside the slab by the Nd<sup>3+</sup> doping rate and the slab thickness.

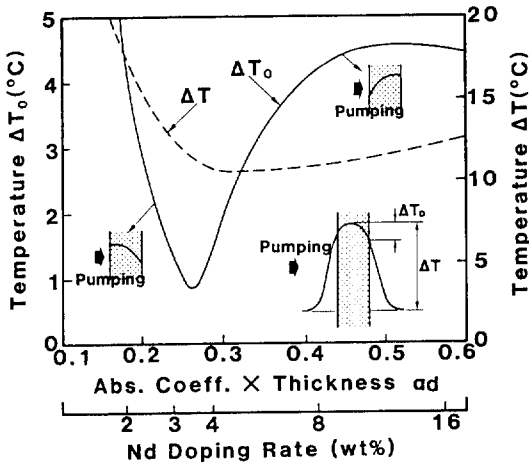


그림 6. Variation of temperature in the split-disk slab and coolant as a function of  $ad$  and  $Nd^{3+}$  doping rate.

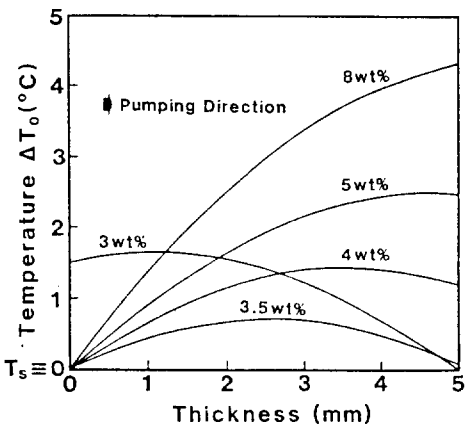


그림 7. Temperature profile in the disk slab with an input power of 1 kW and a  $N_2$  gas of 300 l/min.

온도변화를 나타내었다. 여기서 가로축의  $Nd^{3+}$  도핑율은  $d$ 를 5 mm로 하였을 때를 기준으로 하였다. 그림 7은 레이저매질을 5 mm로 고정하고 매질의  $Nd^{3+}$  도핑율에 차등을 주었을 때 글라스 내부의 온도분포를 나타낸 것이다. 레이저매질의 손상과 레이저비입의 왜곡현상의 주 원인은 레이저매질의 표면과 중심의 온도차  $\Delta T_0$ 에 의한 영향이다. 그림 6과 7의 결과에 따르면 단면펌핑의 분할디스크형 증폭기에서 최저의  $\Delta T_0$ 와  $\Delta T$ 를 유지하기 위해서는  $ad=0.26$  전후가 가장 효과적인 상태임을 보여  $Nd^{3+}$  3.5 wt. % 정도가 가장 낮은 온도차에 균일한 온도분포상태를 유지할 수 있음을 보였다. 두 그림의 결

과에서 볼 수 있듯이 디스크형 증폭기가 고반복동작에서 최저의 온도차에 균일한 온도분포를 유지하기 위해서는 냉각표면적을 넓힐 수 있는 구조의 채택과  $Nd^{3+}$  도핑율을 최적화시켜야 함을 알 수 있다. 특히 고폭출력 글라스레이저에서 고반복동작을 우선 목표로 할 경우에는  $Nd^{3+}$ 의 도핑율을 낮추는 쪽에서 매질을 선정해야 한다는 것도 주목해야 할 만한 결과이다.

### III. 결 론

Nd:Glass레이저의 응용개발에서 걸림돌이 되는 것은 낮은 반복동작율이다. 이를 극복하기 위하여 각종 슬랩형의 구조적인 개선 및 열부하를 경감시킬 수 있는 반도체레이저 펌핑 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 구조적인 개선의 한 방법인 분할디스크형 증폭기를 해석하기 위하여 작성된 시뮬레이션 코드의 계산결과에 대하여 기술했다. 시뮬레이션 결과 플래시램프의 효과적인 에너지활용을 위하여 인가되는 전류밀도가 2000~4000 A/cm<sup>2</sup>로 유지해야 됨을 알았다. 동일 부피를 갖는 레이저매질에서 냉각표면적을 3배로 증가시키므로 해서 온도상승치가 30% 정도로 감소되어 분할디스크형의 열경감효과에 대한 평가를 했다. 분할디스크형 증폭기의 설계시 각 글라스 간의  $Nd^{3+}$  도핑율에 차등을 주어야 하고, 매질의 흡수계수  $\alpha$ 와 두께  $d$ 의 곱인  $ad$ 가 0.26 전후에서 효과적임을 알았다.

분할디스크형 증폭기에서 주 연구목적이 열부하의 경감에 의한 고반복율 달성인 만큼 매질의 구조적인 분할위에 냉각방법의 개선, 펌핑방법의 개선 등에 대한 연구가 요망된다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. C. Brown, J. H. Kelly, and J. A. Abate, IEEE J. Quantum Electron. **QE-17**, 1755 (1981).
- [2] J. L. Emmett, W. F. Krupke, W. R. Sooy, Lawrence Livermore Nat. Lab. UCRL-53571 (1984).
- [3] J. M. McMahon, J. L. Emmett, J. F. Holzrihter, and J. B. Trenholme, IEEE J. Quantum Electron. **QE-9**, 992 (1973).
- [4] J. E. Swain, R. E. Kidder, K. Pettipiece, F. Rainer, E. D. Baird, and B. Loth, J. Appl. Phys. **40**, 3973 (1969).
- [5] D. C. Brown, *High-Peak-Power Nd:Glass Laser Systems* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1981).
- [6] C. Yamanaka, Y. Kato, Y. Izawa, K. Yoshida,

- T. Yamanaka, T. Sasaki, M. Nakatsuka, T. Mochizuki, J. Kuroda and S. Nakai, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17**, 1639 (1981).
- [7] J. M. Emmett, W. F. Krupke, and J. B. Trenholme, Lawrence Livermore Nat. Lab. UCRL-53344, 25 (1982).
- [8] B. T. Kim, M. Nakatsuka, T. Kanabe, and S. Nakai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L1233 (1989).
- [9] G. F. Albrecht, J. Z. Holtz, S. B. Sutton, and W. F. Krupke, *SPIE* **1040**, 56 (1989).
- [10] S. B. Sutton, G. F. Albrecht, and H. R. Robey, Lawrence Livermore Nat. Lab. UCRL-JC-103376 (1990).
- [11] S. B. Sutton and G. F. Albrecht, *J. Appl. Phys.* **69**, 1183 (1991).
- [12] I. A. Scherbakov, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-24**, 979 (1988).
- [13] B. T. Kim, Y. Oishibashi, M. Nakatsuka, T. Kanabe, and S. Nakai, *IEEE Photo. Tech. Lett.* **2**, 27 (1990).
- [14] J. E. Marion, *J. Appl. Phys.* **60**, 69 (1986).
- [15] J. S. Hayden, D. L. Sapak, and H. J. Hoffmann, *SPIE* **1021**, 36 (1988).
- [16] W. S. Martin and J. P. Chernoch, U. S. Patent 3 633 126 (1972).
- [17] B. T. Kim, Ph.D. Thesis, Osaka Univ., Japan 1990.
- [18] J. H. Kelly, D. C. Brown, and K. Teegarden, *Appl. Opt.* **19**, 3817 (1980).
- [19] ILC Technology, An Overview of Flashlamps and cw Arc Lamps, Technical Bulletin 3.
- [20] G. L. Linford, R. A. Saroyan, J. B. Trenholme, and M. J. Weber, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-15**, 510 (1979).
- [21] M. S. Mangir and D. A. Rockwell, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22**, 574 (1986).
- [22] M. Nakatsuka(ILE Osaka Univ.), private communication.
- [23] J. A. Adams, D. F. Rogers, *Computer Aided Heat Transfer Analysis* (McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1973).

### Study on the Properties of Temperature Distribution at the Split-Disk Geometry Glass Laser Amplifier

Byung-Tai Kim

*Dept. of Physics and Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea*

(Received: September 29, 1992)

The simulation code was developed for the development of the split-disk geometry glass amplifier, which could design the laser apparatus and analyze the properties of the laser system. The flashlamp emission energy at the short wavelength region must be reduced, while maintaining a current density between 2000 and 4000 A/cm<sup>2</sup>, in order to reduce the thermal loading in the laser glass and to raise the coupling efficiency between the emission spectrum of the flashlamps and the absorption spectrum of the laser glass. By cutting the laser glass into three equal pieces, the temperature rise in the laser glass dropped by 70% due to the efficient removal of the heat in the laser glass. It was found that the Nd<sup>3+</sup> doping rate of each laser glass should be properly selected and the optimum value of the product of the absorption coefficient  $\alpha$  and the thickness  $d$  of the laser glass is about 0.26 in the split-disk geometry.