

## 난반사체를 이용한 다이오드 횡여기 Nd:YAG 레이저의 최적화 설계 및 분석

이성만<sup>†</sup> · 윤미정 · 김선국 · 김현수 · 차병현

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

⑨ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 105호

### 문회종

세종대학교 광공학과

⑨ 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98

(2001년 4월 24일 받음, 2001년 10월 17일 수정본 받음)

난반사체를 이용한 다이오드 횡여기 Nd:YAG 레이저 헤드의 설계코드를 개발하여 레이저 결정 내 흡수된 빔의 균일성과 최대 레이저 출력을 갖는 설계요소의 조건에 관해 분석하고, 수치해석 방법으로 열렌즈 효과를 고려한 레이저 공진기의 레이저 출력을 계산하고 실험치와 비교 분석하였다. 1,080 W의 여기광 출력에서 측정된 약 504 W의 레이저 출력은 열렌즈 효과를 고려하여 수치 해석적으로 계산된 레이저 출력과 레이저 공진기의 안정영역에서 거의 일치함을 확인하였다.

분류코드 : LO.080.

### I. 서 론

지금까지 금도금 반사체,<sup>[1]</sup> cusp형 반사체,<sup>[2]</sup> 복합포물반사체(Complex Parabolic Concentrator),<sup>[3]</sup> 난반사 공동체<sup>[4]</sup> 등 다양한 형태의 반사체가 횡여기를 이용한 Nd:YAG 레이저 헤드의 여기 빔 전송광학계로 사용되었다. 특히, 수백 W급의 Nd:YAG 레이저 전송광학계로는 수 개의 다이오드 어레이 빔들을 실린더형의 금도금 반사체 혹은 난반사 공동체에 입사시켜 레이저 결정을 여기하는 방식이 효과적인 전송 방식으로 보고되어 있다. 이러한 방식은 고출력의 레이저 개발을 위해서는 많은 수의 다이오드 어레이가 필요하고, 여기레이저의 충분한 흡수율을 위해서 여기레이저 파장을 레이저 결정 흡수 파장대의 피아크에 일치시켜야하는 문제가 있지만, 고반사율을 갖는 난반사 공동체를 사용하여 상대적으로 균일한 여기와 고효율의 레이저 제작이 가능하다.

난반사 공동체를 이용한 여기구조에서 Nd:YAG 레이저의 특성은 사용된 다이오드 어레이의 구조 및 발산각, 레이저의 파장, 반사체의 내부직경 및 반사율, 레이저 결정의 직경 및 흡수율, 냉각수의 온도에 의한 효과 등과 레이저의 공진기 구성에 의해서 변화된다. 따라서 최적의 레이저 헤드를 설계하기 위해서는 각 설계 변수에 따른 레이저 결정내의 여기빔의 흡수분포와 그것에 따른 레이저 출력의 최적화 과정이 필요로 된다. 본 연구에서는 수백 W 급의 횡여기 Nd:YAG 레이저를 개발할 목적으로 광여기 공동으로 사용된 난반사 공동체의 내부직경과 레이저 매질인 Nd:YAG 결정의 흡수계수 등을 매개변수로 하여 흡수분포를 광선추적법을 이용하여 계산하였으며, 계산된 최적 매개변수들을 갖는 레이저 여기구조에서 수치해

석적 방법으로 열렌즈 효과를 고려하여 레이저 출력을 계산하였으며, 계산 결과는 멀티모드에 대하여 실험에서 얻은 결과와 안정공진기 영역에서 잘 일치함을 보였다.

### II. 광선추적방법을 이용한 레이저 헤드의 최적설계

난반사체를 이용한 다이오드 횡여기 Nd:YAG 레이저 헤드의 설계코드가 개발되었으며, 설계코드는 레이저 여기원, 난반사 광공동, 냉각수 계통, 그리고 레이저 결정의 형태 변화에 따른 레이저 결정 내 여기광의 분포와 레이저 출력에 관한 정보를 제공한다. 광선추적방법<sup>[5]</sup>을 사용하여 그림 1에 나타낸 Nd:YAG 레이저 헤드의 여기 구조에 대하여, 레이저 헤드 설계 요소의 변화에 따른 레이저 결정 내 흡수된 빔의 균일성과 최대 레이저 출력을 갖는 조건에 관한 분석이 수행되었다.

#### 2.1. 레이저 결정내의 여기광의 흡수분포 계산

레이저 헤드는 3개의 360 W급 선형 다이오드 어레이로 구성되어 있으며, 발진파장 808 nm에서 총 1,080 W의 여기출력을 가진다. 선형 다이오드 어레이를 구성하는 단일 다이오드 셀은 급축과 완축 방향에서 서로 다른 방출면의 폭을 갖고 있어, 급축과 완축 방향으로 발생된 레이저빔의 발산각이 서로 다른 형태를 띤다. 본 레이저 헤드 설계에 있어서 급축 방향은 레이저 결정의 축에 수직인 방향이며, 급축 방향에서 발산각은 40° (FWHM), 완축 방향에서 발산각은 10° (FWHM)이다. 레이저 결정에 입사된 여기빔의 실질적인 경로는 3차원이지만, ±z-방향으로 진행하는 광선의 수가 평균적으로 동일하므로 z-방향의 광선의 분포는 결과적으로 균일하다. 따라서, 레이저 결정내 흡수된 여기광의 분포는 z-방향에 수직한 급축 방향의 2차원 단면적 내의 광선분포만을 고려한다. 따라서 광

<sup>†</sup>E-mail: smlee3@kaeri.re.kr

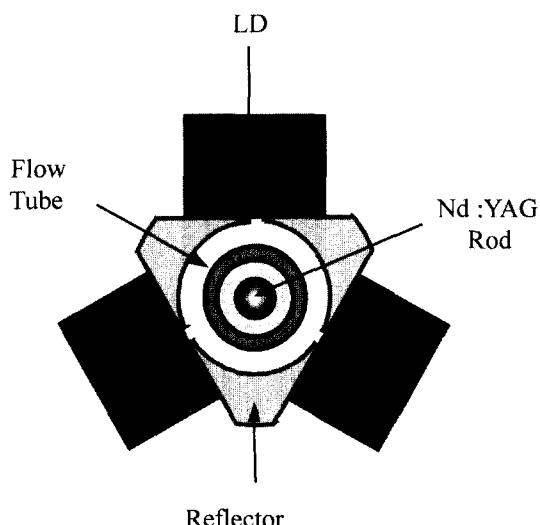


그림 1. 원통형의 난반사체 광공동을 이용한 DPSSL의 예구조.

선 추적 방법을 이용한 설계코드에서 여기빔의 분포는  $\sigma$ 가  $17^\circ$ 인 가우스 분포로 기술될 수 있고, Monte-Carlo 방법이 가우스분포를 갖는 무작위 각 방향 광선분포(random angular ray distribution)의 생성을 위해서 사용되었다. 그림 2는 다이오드 여기원에서 임의 방향으로 발생된 광선이 난반사체 광공동 내에서 진행하는 경로를 보여주는 광선추적의 예이다. 다이오드 여기원에서 발생한 광선이 냉각수 흐름 투브와 Nd:YAG 결정을 굴절의 법칙에 따라 통과한 후, 광공동의 난반사체 면에서는 Lambertian 형태, 즉,  $P(\theta)d\theta = (1/2)\cos\theta d\theta$ 로 반사되어 임의의 방향으로 진행하는 4가지의 경우를 보여주고 있다. 이때, 냉각수 흐름용 투브의 투과율은 99.5%, 굴절율은 1.33, 직경은 9 mm이며, Nd:YAG 결정의 굴절율은

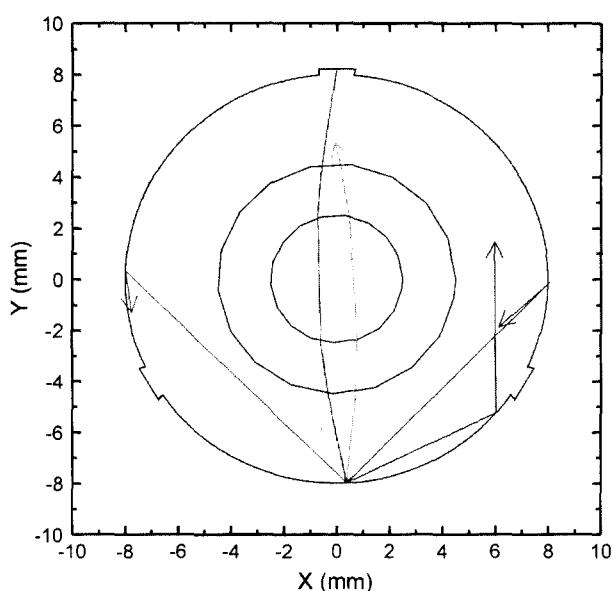


그림 2. 레이저 광공동 내에서 광선의 진행을 보여주는 광선추적의 예.

1.826, 투과율은 약 90%이며, 직경은 5 mm로 계산하였다. 난반사 공동체의 반사율은 95.7%이며, 내부 직경은 16 mm, 그리고 여기빔의 입사를 위한 슬릿의 폭은 1.3 mm이다.

레이저 결정의 단면적은 방사 방향과 각 방향에서 각각 100개로 나누어진 총 10,000개의 영역들로 구성된다. 각각의 영역에 흡수된 총 흡수 여기출력은 그 영역에서의 개별 광선의 기여의 합으로 얻어진다. 개별 광선의 기여는 다음의 과정을 통하여 계산된다. 각각의 영역은 4개의 모서리 부분에 각각 도식을 위한 데이터 점이 있고, 데이터의 수집은 광선의 경로가  $20 \mu\text{m}$ 를 광선의 진로를 나아갈 때마다 이루어진다. 어떤 영역 내부의 한 개의 지점에서 데이터 수집이 되면, 수집된 데이터에 대한 그 영역에서의 흡수된 여기 레이저의 출력은 1개의 데이터 수집 거리 내에서 흡수된 출력을 나타낸다. 흡수된 출력의 도식적 표현을 위해서 1개의 영역은 두 개의 계속된 데이터 수집 지점의 중앙에서 4개의 셀로 나누어진다. 그리고 나서 4개의 규격화된 셀영역의 면적들은 각각 셀의 반대편 모서리에 위치한 도식을 위한 데이터 지점에 곱해진다. 영역  $(i,j)$ 를 통과하는 광선에 대해서 1단계 데이터 수집거리  $\Delta d$ 를 진행하는 동안 흡수된 여기레이저의 출력,  $P_{abs,i,j}$ 는 Beer의 법칙에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{abs,i,j} = P_{0,i,j} (1 - \exp(-\alpha\Delta d)) \quad (1)$$

여기서,  $P_{0,i,j}$ 는 1개의 데이터 수집거리를 진행하기 전의 여기출력이며, 수식  $P_{0,i,j} = P_0 \exp(-\alpha d)$ 에 의해 레이저 결정을 입사하기 전의 초기 출력  $P_0$ 에 관련된다.  $\alpha$ 는 Nd:YAG 레이저의 흡수계수이며,  $d$ 는 레이저 결정 내에서 처음부터 현재 지점까지 진행한 광선의 총 진행거리에 해당한다.

## 2.2. 흡수분포와 난반사 공동체 직경과의 상관관계

난반사 공동체의 내부 직경을 10 mm에서 20 mm까지 2 mm 간격으로 변화시켜 본 결과 공동체의 내부 직경이 증가할수록 흡수효율은 감소하지만, 반면 빔의 중앙 집중현상과 비동방성이 해소됨을 알 수 있었다. 그림 3에 난반사 공동체의 내부 직경에 따른 흡수효율을 나타내었다. 난반사 공동체에서 반사

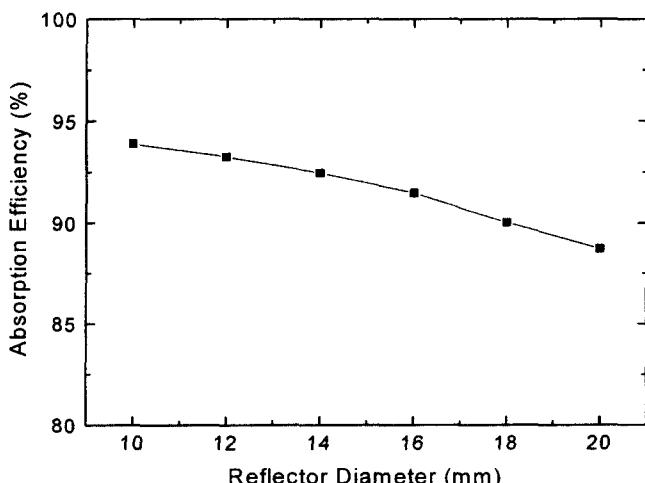


그림 3. 광공동 직경에 따른 흡수효율의 변화.

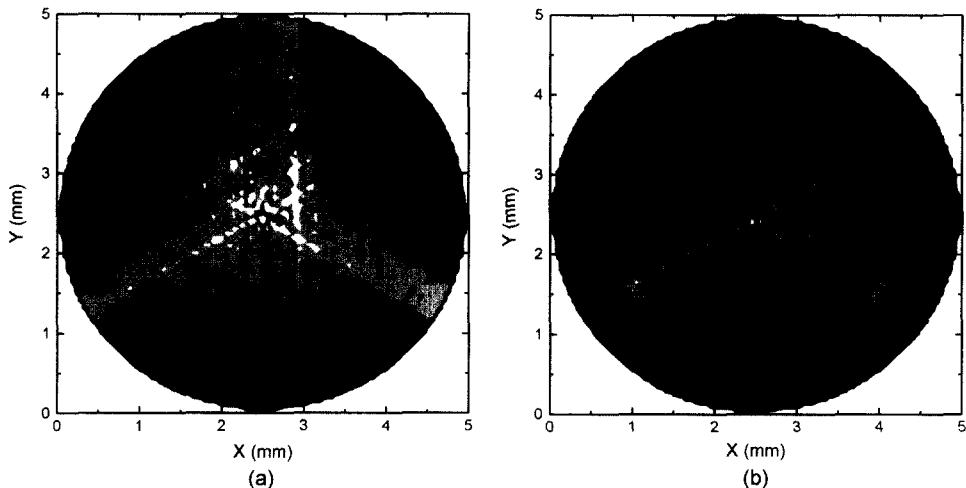


그림 4. 광공동 직경이 (a) 10 mm와 (b) 16 mm일 경우의 흡수분포.

된 광선이 레이저 결정을 통과할 확률은 Lambertian 분포를 적분하면 얻을 수 있다.

$$P = \int_{-\theta'}^{+\theta'} P(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \int_{-\theta'}^{+\theta'} \cos \theta d\theta = \frac{a}{l} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 레이저 결정의 반경을  $l$ 는 난반사면으로부터 레이저 결정 중심까지의 거리를 나타낸다. 흡수효율은 난반사 공동체에서 반사된 광선이 레이저 결정을 통과할 확률( $P$ )에 비례하므로, (2)식으로부터 흡수효율은 거리  $l$ 에 반비례함을 알 수 있다. 그림 4(a)와 (b)는 공동체의 내부 직경이 각각 10 mm일 때와 16 mm일 때 광선추적방법을 통해 얻은 여기빔의 레이저 결정내 흡수분포를 나타낸 것이다. 그림 4(a)과 같은 빔의 중앙 집중 현상은 열렌즈 현상을 초래한다. 흡수효율과 빔의 중앙집중현상을 모두 고려하면 난반사 공동체의 내부 직경이 16 mm일 때 흡수분포의 최적화가 가능할 것으로 생각된다.

### 2.3. 흡수분포의 흡수계수 종속성

$Nd^{3+}$ 의 도핑 농도는 레이저 특성에 미치는 영향이 매우 크다. 대개 사용되고 있는  $Nd^{3+}$ 의 도핑 농도는 0.5~1.2 at.% 사이이며, 다이오드 여기광의 출력, 레이저봉의 직경, 다이오드 여기광과 레이저 결정사이의 거리 등을 종합적으로 고려하여 농도를 결정하는 것이 중요하다. 이를 위하여 Nd:YAG 결정의 흡수계수를  $1 \text{ cm}^{-1}$ 에서  $6 \text{ cm}^{-1}$ 까지  $1 \text{ cm}^{-1}$ 의 간격으로 변화시켜본 결과, 그림 5와 같이 흡수계수가 증가할수록 흡수효율이 포화곡선의 형태로 증가함을 알 수 있다. 다이오드 레이저의 파장이 808 nm인 경우 Nd:YAG 결정의 도핑농도가 0.6 at.%와 1.1 at.%일 때 사용된 흡수계수는 각각  $3.3 \text{ cm}^{-1}$ 와  $6 \text{ cm}^{-1}$ 이다. 그림 6의 (a)와 (b)는 흡수계수가  $3.3 \text{ cm}^{-1}$ 와  $6 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 레이저 결정에 분포된 여기빔의 흡수분포도이다. 흡수계수가 작을 때, 즉 Nd:YAG 결정의 도핑농도가 낮을 때는, 여기빔이 결정의 중심부에서 균일하게 분포하지만, 흡수계수가 크면 빔이 결정의 표면에서 흡수되는 비율이 커지기 때문에 빔이 결정의 표면에 불균일하게 집중됨을 볼 수 있다. 흡수분포로부터 효과적인 TEM<sub>00</sub> 모드를 얻기 위해서는 흡수계수를

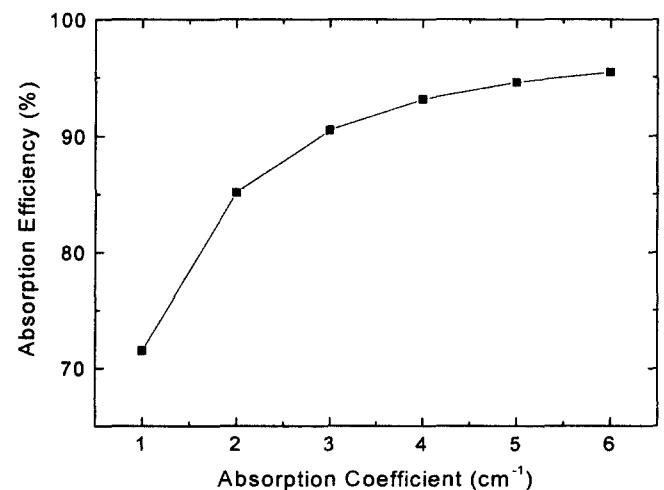


그림 5. 흡수계수에 따른 흡수효율의 변화.

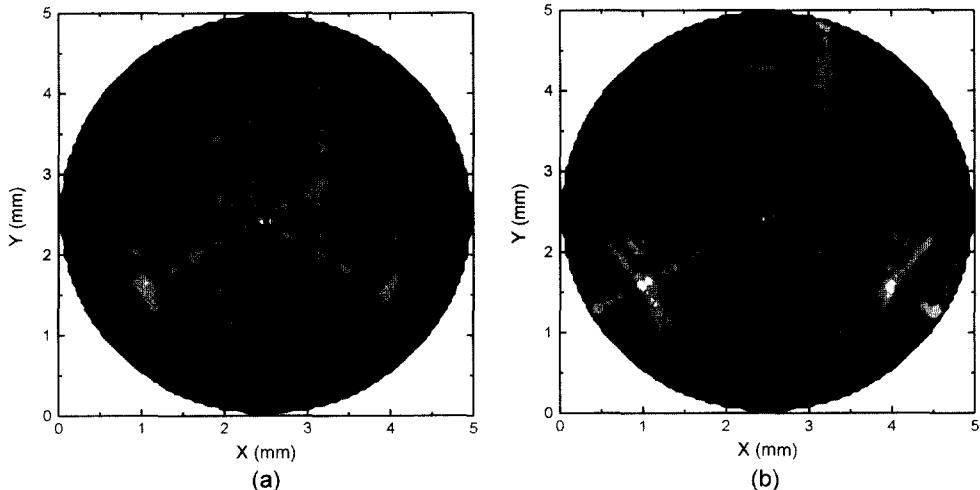
빔의 표면 집중현상이 나타나기 시작하는  $4 \text{ cm}^{-1}$  이하로 선택하는 것이 적합함을 알 수 있다.

### III. 수치 해석적 레이저 출력 계산

광선추적법의 결과로 얻은 최적의 매개변수에 대하여 레이저 출력을 수치 해석적으로 계산<sup>[5]</sup>해 보았다. 본 계산에서는 균질한 이득매질 분포와 저 이득한계(low gain limit)를 가정하였으며, 레이저 상준위(upper-state)로 흡수된 여기 출력과 레이저 출력의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{P_U} = \frac{2}{I_{sat} L'} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\bar{g}_0(r, \theta) f(r, \theta)}{1 + 2P_{out} f(r, \theta)/(T_{oc} I_{sat})} r dr d\theta \quad (3)$$

여기서  $P_U$ 는 레이저 봉 내의 상준위로 흡수된 여기 출력을 나타내고, 흡수된 여기출력에 상준위 효율인 0.722를 곱한 값이다.  $\bar{g}_0(r, \theta)$ 는 규격화된 이득분포로서 광선추적방법을 이용하여 얻은 흡수분포로부터 구할 수 있으며,  $f(r, \theta)$ 는 규격화된 출력 모드분포이다.  $I_{sat}$ 는 포화강도로서 Nd:YAG의 경우 2.32

그림 6. 흡수계수가 (a)  $3.3 \text{ cm}^{-1}$ 와 (b)  $6 \text{ cm}^{-1}$ 일 경우의 흡수분포.

$\text{kW/cm}^2$ 의 값을 가진다.  $T_{oc}$ 는 출력경의 투과율을 나타내고,  $L'$ 은 공진기 내부의 총 손실을 나타내는데 투과손실( $L'_r$ )과 공진기 기타 내부손실을 고려한 값이다.

$$L'_T = -\ln(1 - T_{oc}) \quad (4)$$

출력경의 투과율이 15%일 때, 멀티모드의 경우 16.25%의 투과손실과 0.7%의 기타 내부손실로 인하여 16.95%의 총 손실이 발생한다.  $P_{out}$ 은 궁극적으로 계산하고자하는 레이저 출력을 의미한다.

식 (3)에서 알 수 있듯이 흡수분포와 레이저 모드와의 중첩이 레이저 출력을 결정짓는 관건임을 알 수 있다. 열렌즈 효과에 의한 멀티모드 사이즈의 변화를 고려한 레이저 출력을 계산하기 위해 먼저 레이저봉을 렌즈 유사 매질(lens-like medium)이라고 가정하고 ABCD 광선 전달 행렬(ray transfer matrix)을 이용하여 출력경에서의 TEM<sub>00</sub> 모드의 beam waist를 구하였다. 공진기의 round trip에 대한 전체 광선 전달 행렬은 다음과 같이 표현된다.<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} M_{tot} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \\ &= [d] [M] [d] [d] [M] [d] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $[d]$ 는 거리  $d$ 에 대한 광선 전달 행렬이고,  $[M]$ 은 렌즈 유사 매질에 대한 광선 전달 행렬이다. 평면-평행 공진기의 경우 TEM<sub>00</sub> 모드의 beam waist는 출력경에 위치하게 되며, TEM<sub>00</sub> 모드의 beam waist의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{2B}{(4 - (A + D)^2)^{1/2}} \quad (6)$$

위 식에서  $\lambda$ 는 레이저의 파장을 나타낸다. 레이저봉 끝면에서의 TEM<sub>00</sub> 모드 사이즈는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} w_r^2 &= w_0^2 (1 + d^2/z_R^2) \\ z_R &= \pi w_0^2 / \lambda \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 레이저봉과 전반사경 사이의 거리이며,  $z_R$ 은 Rayleigh range를 나타낸다. 그리고, TEM<sub>00</sub> 모드 사이즈와 멀티모드 사이즈와의 관계식은 다음 식으로 표현된다.

$$w_m \equiv w_0(R/w_r) \quad (8)$$

여기서,  $R$ 은 레이저봉의 반지름을 나타낸다. 레이저봉 끝면에서의 멀티모드 사이즈는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} w_{mr}^2 &= w_m^2 (1 + d^2/z_{mr}^2) \\ z_{mr} &= \pi w_m^2 / \lambda \end{aligned} \quad (9)$$

레이저봉 중심에서의 멀티모드 사이즈를 레이저봉의 반지름이라고 가정하고, 레이저봉 끝면에서의 멀티모드 사이즈와 레이저봉의 반지름의 평균값을 멀티모드 사이즈로 사용하였다.

레이저봉과 전반사경 사이의 거리와 레이저봉과 출력경 사이의 거리가 일치하는 대칭성을 갖는 공진기의 경우 다이오드 입력 파워의 증가에 따른 멀티모드 사이즈의 변화를 그림 7에 나타내었다. 이때, 난반사 공동체의 내부 직경은 16 mm이며, 흡수계수는 도핑농도가 0.6 at.% 경우인  $3.3 \text{ cm}^{-1}$ 가 사용되었다. 레이저 다이오드의 최대 출력은 1,080 W이고 출력경의 반사율은 85%라고 가정하였다. 전체 공진기 길이( $L$ )가 20 cm, 27 cm, 30 cm, 34 cm일 때 계산된 레이저 결정내 멀티모드의 크기는 그림 7에 보여진것과 같이 여기 출력의 증가에 따라서 급격히 감소함을 알 수 있으며, 공진기 길이가 길 경우 감소율이 현저히 커짐을 알 수 있다. 이러한 열렌즈 효과에 의한 멀티모드의 크기를 고려하여 식 (3)를 이용하여 멀티모드 레이저 출력을 계산한 결과를 그림 8에 나타내었다. 여기 출력이 증가함에 따라 고출력 영역에서 열렌즈 효과에 의한 출력 감소가 현저해짐을 알 수 있으며, 공진기의 길이가 긴 경우에 열렌즈 효과에 의한 출력 감소량이 커짐을 보여주고 있다.

레이저봉과 전반사경 사이의 거리와 레이저봉과 출력경 사이의 거리가 정확히 일치하지 않는 약간의 비대칭 공진기의 경우 다이오드 입력 파워의 증가에 따른 멀티모드 사이즈의

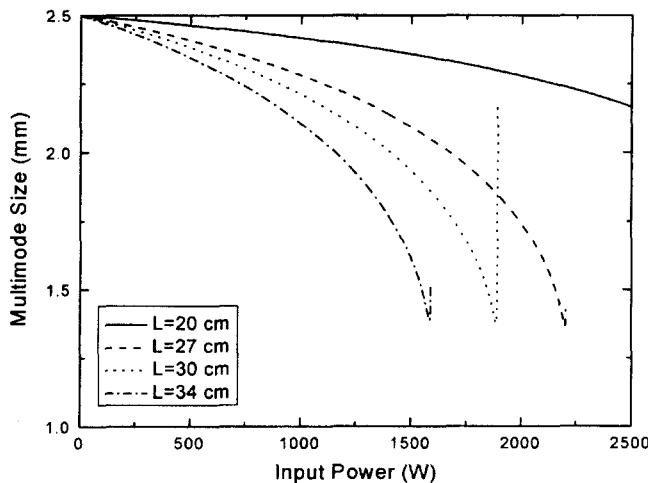


그림 7. 대칭 공진기인 경우, 렌즈 효과에 기인한 여기 출력의 증가에 의한 레이저 결정내 멀티모드 크기 변화.

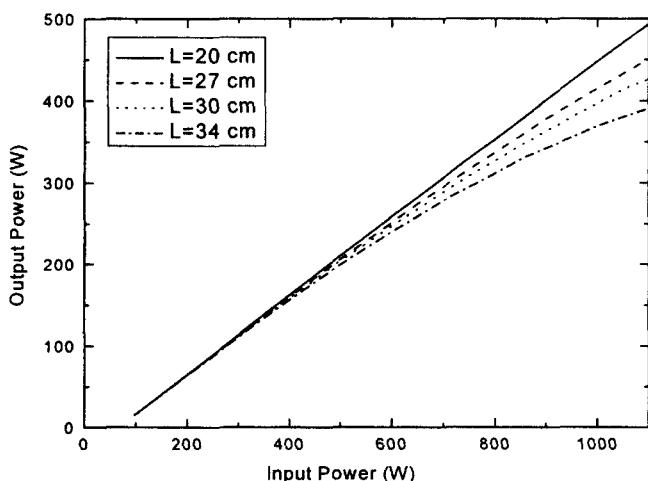


그림 8. 대칭 공진기인 경우, 열렌즈 효과를 고려하여 계산된 여기 출력에 따른 멀티모드 레이저 출력의 변화.

변화를 그림 9에 나타내었다. 공진기의 대칭성이 깨어지는 경우, 열렌즈를 포함하는 공진기의 안정조건에서 불안정한 영역이 발생하게 된다. 공진기 안정조건은 식 (5)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (10)$$

일례로, 공진기 양쪽의 거리 차이가 5 mm인 경우를 가정하고 공진기 길이에 따른 공진기 안정조건을 계산하면 그림 10과 같이 주어진다. 초기 공진기는 안정동작영역에 존재하지만, 여기 출력이 증가함에 따라 그림의 우측상단에 검은 곡선영역으로 표시된 불안정 동작영역으로 접근되고, 그러한 영역의 여기광의 세기에서는 공진기의 불안정 조건이 되어 레이저 동작이 불가능함을 알 수 있다. 또한, 공진기 길이가 증가하면 공진기 안정조건을 만족하는 여기출력의 범위는 급속히 감소함을 알 수 있으며, 공진기의 길이가 20, 30, 34 cm일 때 각각

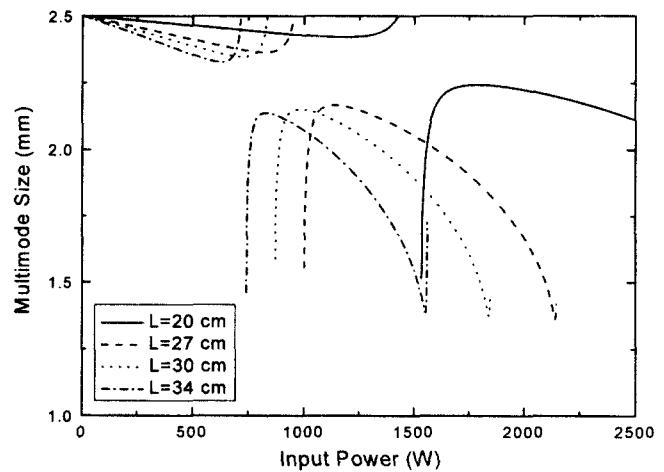


그림 9. 비대칭 공진기인 경우, 렌즈 효과에 기인한 여기 출력의 증가에 의한 레이저 결정내 멀티모드 크기 변화.

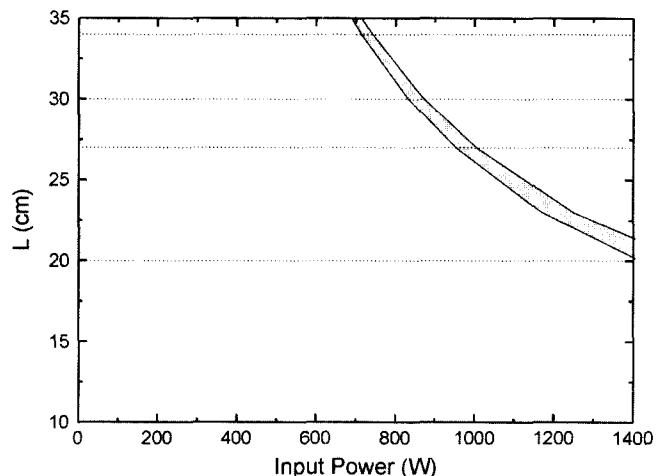


그림 10. 비대칭 공진기인 경우, 여기 출력과 공진기 길이의 변화에 따른 레이저 공진기의 안정조건 계산 결과.

1,418 W, 833 W, 그리고 714 W 근처에서 공진기가 불안정해짐을 알 수 있다. 이러한 공진기의 안정성이 깨어지는 지점은 그림 9에 여기출력이 증가함에 따라 나타나는 레이저 모드의 사이즈가 급격히 변화하여 연속성이 살아지는 지점과 일치하며, 레이저 출력이 급격히 감소하는 원인을 제공한다.

#### IV. 실험 결과

여기원은 40 W 출력을 갖는 레이저 다이오드 소자가 열교환기에 9개가 직렬로 연결된 다이오드 바(IMEC, Industrial Microphotonics Company)로서, 808 nm 파장에서 최대 360 W의 출력을 낸다. 이러한 여기원이 지름이 16 mm인 난반사 광공동의 둘레로 120° 간격으로 나 있는 1.3 mm의 세 개의 좁은 슬릿을 통해 입사하도록 하여 총 1,080 W로 이득매질을 여기하도록 되어있다. 이득매질은 지름 5 mm, 길이 120 mm의 봉 형태이고, Nd<sup>3+</sup>가 0.6 at.% 도핑된 Nd:YAG 결정(Union Carbide사)을 사용하였다. 레이저 봉에서 발생한 열은 냉각수

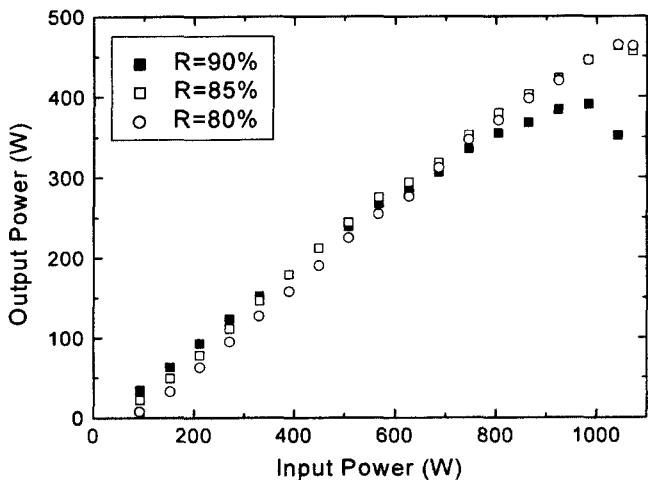
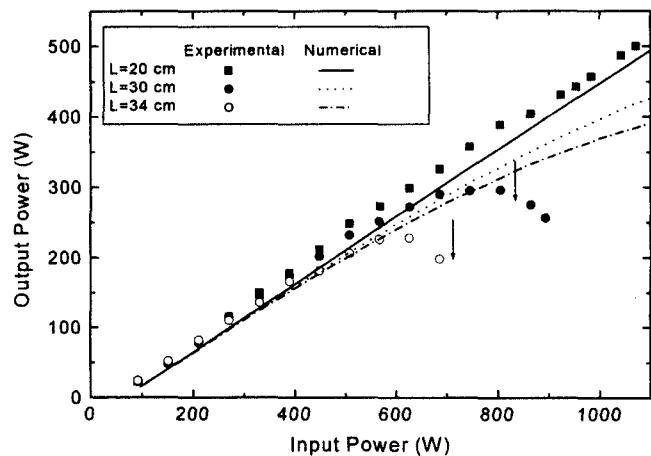


그림 11. 출력경의 반사율에 따른 측정된 레이저 출력의 변화.

흐름 튜브를 통해 냉각수로 냉각되도록 하였다. 냉각수 흐름 튜브의 표면은 무반사 코팅되어 여기빔이 레이저 결정에 도달하는 광경로에서 반사가 최소화되도록 설계되어 있으며, 레이저 결정의 표면은 연마하지 않아 레이저 결정에 분포하는 여기빔의 분포가 가능한 균일화 되도록 하였다.

레이저 공진기는 레이저 발진 파장 1,064 nm에서 반사율이 99.5% 이상인 전반사 평면거울과 출력용의 평면거울을 사용한 선형 공진기로 구성되어 있다. 출력거울의 반사율은 80%, 85%, 90%로 교체하여 최대의 출력을 얻는 조건을 찾을 수 있도록 하였다. 먼저 공진기 길이를 27 cm로 고정하고 출력경의 반사율을 달리하면서 다이오드 여기광의 세기에 따른 레이저 출력을 측정해 보았다.<sup>[7]</sup> 그림 11에 나타나 있는 바와 같이 최대 여기광의 세기에서 최대 레이저 출력을 얻을 수 있는 출력경의 반사율은 약 85% 근처임을 알 수 있다.

출력경의 반사율을 최적 반사율인 85%에 맞추고 공진기의 길이를 변화시키면서 얻은 레이저의 동작 특성을 그림 12에 나타내었다. 공진기 길이를 20 cm로 짧게 하였을 때 그림 10에 나타나 있는 바와 같이 최대 여기 출력에서 최대 레이저 출력을 획득할 수 있는 것을 알 수 있으며 이 경우, 1,070 W 여기광의 세기에서 500 W의 연속 출력을 얻을 수 있었다. 이 때 기울기 효율은 약 49%, 광변환 효율은 46.7%로 매우 높은 값을 얻을 수 있었다. 측정된 레이저 출력은 짧은 공진기의 경우 수치 해석적으로 얻은 그림 8의 결과와 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 증가된 공진기 길이에 대해서 여기광의 세기가 증가함에 따라 최대 레이저 출력이 크게 감소하며, 고 여기출력 영역에서 대칭성을 갖는 공진기 구조에서 열렌즈 효과에 의해 예측되는 출력감소 이상으로 크게 감소한다. 이 결과는 앞장에서 기술한 공진기의 대칭성이 깨어지는 비대칭 공진기의 안정조건과 관련되어 있다. 즉, 실험조건에서 정확한 대칭 공진기의 구성에는 어려움이 있으며, 약간의 비대칭 공진기가 형성될 경우 그림 9와 같이 공진기내의 멀티모드 사이즈의 급격한 변화에 의해서 레이저 출력이 크게 감소하는 원인이 된다. 그림 12에 나타난 출력이 급격히 감소하는 영역은 화살표로 나타난 비대칭 공진기에서 안정 조건이

그림 12. 각기 다른 선형 공진기 길이( $L = 20, 30, 34 \text{ cm}$ )에 대해서 측정된 여기 출력의 증가에 따른 레이저 출력의 변화.

깨어지는 지점과 대체로 일치함을 알 수 있다.

## V. 결 론

난반사체를 이용한 다이오드 횡여기 Nd:YAG 레이저에 대하여 흡수분포와 난반사 공동체의 직경과의 상관관계 및 흡수분포의 흡수계수 종속성을 광선추적법을 이용하여 분석하였다. 난반사 공동체의 직경이 16 mm, 흡수계수  $3.3 \text{ cm}^{-1}$  부근에서 최적 조건으로 분석되었으며, 이 매개변수로 레이저 출력을 열렌즈 효과를 고려한 수치 해석적 방법으로 계산하였다. 열렌즈를 고려하여 계산된 레이저 출력은 최대 여기 출력까지 안정 공진기 조건을 만족하는 짧은 공진기 조건에서 측정된 레이저 출력과 잘 일치함을 보였으며, 1,070 W 여기광의 세기에서 500 W의 연속 출력을 얻을 수 있었다. 이 때 기울기 효율은 약 49%, 광변환 효율은 46.7%에 해당한다. 공진기의 길이가 긴 경우 측정된 레이저 출력은 저출력 영역에서 계산된 결과와는 잘 일치하나, 고출력 부근에서는 열렌즈 효과에 부가하여 비대칭 공진기에 의한 공진기의 불안정조건이 레이저 출력의 감소에 결정적으로 기여함을 알 수 있었다. 따라서, 레이저 설계시 안정적인 레이저 출력의 예측을 위해서는 공진기의 안정조건에 관한 분석이 선행되어야 함을 알 수 있다. 결론적으로, 개발된 광선추적법과 수치 해석적 레이저 출력 계산 방법은 난반사체를 이용한 레이저 여기구조에 대해서 최적 매개변수를 선택하고, 레이저 출력을 예측하는 도구로서 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

## 참고문헌

- [1] J. Lee, H. J. Moon, J. Yi, S. Lee, and B. H. Cha, "Measurement of absorption efficiency by a leakage analysis method from an efficient Nd:YAG rod laser pumped by diode bars," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 5A, pp. 2769-2774, 1999.
- [2] T. Brand, "Compact 170-W continuous-wave diode-pumped Nd:YAG rod laser with a cusp-shaped reflector," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 17, pp. 1776-1779, 1995.

- [3] S. Lee, S. K. Kim, M. Yun, B. H. Cha, and J. Lee, "Design of a stacked diode array pumped Nd:YAG laser with a truncated compound parabolic concentrator and a diffusive optical cavity," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 35, no. 3, pp. 268-274, 1999.
- [4] T. Kojima and K. Yasui, "Efficient diode side-pumping configuration of a Nd:YAG rod laser with a diffusive cavity," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 21, pp. 4981-4984, 1997.
- [5] S. K. Kim, S. Lee, M. Yun, S. M. Nam, B. H. Cha, and J. Lee, "Numerical calculation of laser output power for various Hermite-Gaussian modes in a diode-pumped Nd:YAG laser with a modified reflective compound parabolic concentrator," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 37, no. 5, pp. 774-777, 2000.
- [6] 박종락, 신윤섭, 윤태현, "Nd:YAG 레이저 봉의 열렌즈 효과를 고려한 열복구질에 의한 레이저 빔 편광 왜곡의 수치 계산," *한국광학회지*, vol. 10, no. 3, pp. 237-242, 1999.
- [7] 문희종, 이성만, 김현수, 고도경, 차병현, 이종민, "다이오드 측면 여기 고출력 Nd:YAG 레이저의 발진 특성," *한국광학회지*, vol. 11, no. 6, pp. 434-440, 2000.

## Optimum design and analysis of a diode side-pumped Nd:YAG laser with a diffusive reflector

Sungman Lee<sup>†</sup>, Mijeong Yun, Sun Kook Kim, Hyun Su Kim, and Byungheon Cha

*Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: smlee3@kaeri.re.kr

Hee-Jong Moon

*Department of Optical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, KOREA*

(Received April 24, 2001 ; revised manuscript received October 17, 2001)

We developed a design code for a diode side-pumped Nd:YAG laser with a diffusive reflector to investigate the optimum design conditions resulting in homogeneous absorption distribution and efficient laser output power. By including the thermal lensing effect in the calculation of the laser output power, the calculated output powers were in fairly good agreement with the experimental results within the stable resonator condition. The calculation method can be used effectively for a diode side-pumped Nd:YAG laser in choosing the optimum design parameters and in predicting the laser output power.

*Classification code :* LO.080.