

비대칭 구조로 이루어진 불안정 공진기형 Nd:YAG 레이저의 빔질 분석

김현수[†]

조선대학교, 광기술공학과

Ⓣ 광주광역시 동구 서석동 375 번지 501-759

(2005년 7월 25일 받음, 2005년 9월 8일 수정본 받음)

제2조화파 발생용으로 사용되는 볼록-평면거울로 구성된 비대칭 불안정 공진기형 Nd:YAG 레이저의 빔질 특성을 수치적으로 분석하였다. 분석은 M^2 , 공진기 내에서의 빔허리 직경, 모드 부피의 계산을 통해서 이루어 졌다. 수치적 계산 결과는 레이저 헤드가 볼록 레이저 거울 근방에 위치한 비대칭 공진기 구조가 될 때 고효율의 제2조화파를 발생할 수 있는 조건이 잘 충족됨을 보였다.

주제어 : Nd:YAG, Thermal birefringence, Resonator, Stability, Mode volume.

I. 서 론

빔질과 공진기 안정도가 좋은 고휘력 고체 레이저는 많은 연구자에 의해 개발되었다.^[1,3] 특히 레이저 헤드를 공진기 내에서 대칭형으로 배열하면 공진기의 안정도가 우수해진다 고 알려져 있다.^[1,2] 산업용 가공기로 많이 활용되는 고휘력 연속 발진 Nd:YAG 고체 레이저의 경우, 대칭형 공진기로 설계된 경우가 많다. 그러나 내부 공진기형으로 2 조화파를 발생하는 레이저의 경우, 대칭형 보다는 비대칭 공진기 구조를 많이 택한다.^[4] 2 조화파를 발생하기 위해 공진기내에 비선형 결정 등을 설치하게 되면 대칭형 공진기 구조에서는 구조적으로 공진기 길이가 많이 증가하게 된다. 길이가 긴 공진기는 레이저의 빔질은 좋지만 펄프광 세기에 대한 공진기 안정구간 폭이 매우 작아 고휘력을 내기는 어렵다. 따라서 긴 공진기 구조를 갖는 레이저를 이용하여 고휘력의 2 조화파를 얻기 힘들다.

일반적으로 제2조화파의 변환 효율은 비선형 결정에 입사하는 단위면적 당 레이저 강도에 의존하기 때문에 결정이 파손되지 않는 범위 내에서 공진기 내의 빔 허리 크기가 충분히 작도록 공진기 설계되어야한다. 따라서 제2조화파 변환 효율을 높이고 출력을 증가시키기 위해서는 공진기 길이가 짧으면서 제2조화파 발생용 결정에서의 빔의 모드 크기가 작아야한다. 이런 조건을 만족하기 위해 대표적으로 많이 사용되는 공진기 구조는 레이저 헤드의 위치가 공진기의 중심에서 벗어난 비대칭형 구조이다. 많은 연구자에 의해 비대칭 공진기를 이용한 실험 결과와 그 실험에 대한 분석, 그리고 근사적 방법인 g-매개변수를 이용한 이론적 분석은 많이 발표되었지만 근사가 없는 ABCD 행렬을 이용한 전반적인 레이저 헤드의 위치에 따른 비대칭 공진기의 빔질, 공진기 안정도 등은 자세히 연구되어지지 않았다.^[1,2]

본 연구에서는 수치적으로 제2조화파 발생용 비대칭 레이

저 공진기에서 레이저 헤드의 위치에 따른 공진기의 빔질 및 안정도를 분석하고자 한다. 특히, 공진기의 한쪽 거울이 볼록형 곡률을 가지고 있을 때의 빔질을 분석하였다. 볼록-평면 구조의 공진기는 불안정형 공진기이지만 레이저 매질의 열 렌즈효과 때문에 안정형 공진기로 된다. 볼록 거울을 이용한 불안정형 공진기 구조는 평면-평면 공진기에 비해 고품질, 고휘력으로 레이저로 발진할 수 있어 많이 연구되어진다.^[1,2] 레이저 빔 모드의 모양은 헤드 위치와 펄프광 세기에 의존하기 때문에 이 두 변수에 대한 빔 특성 분석은 매우 중요하다. 따라서 레이저 헤드의 위치와 펄프광 세기에 따른 레이저의 안정 조건과 빔의 특성을 수치적으로 고찰하고자 한다.

II. ABCD 광선 전달 행렬을 이용한 안정조건과 빔질 분석

공진기내의 빔의 모드 형태와 안정도는 ABCD 광선 전달 행렬을 이용하여 계산할 수 있다. 분석 방법은 빛이 공진기 내를 한번 왕복했을 때 빛이 지나간 각 광학소자의 ABCD를 행렬을 곱해서 구한 최종 행렬을 이용하여 분석하는 것이다. 대부분의 광학소자의 ABCD 행렬은 잘 알려져 있다. 다만 레이저 막대에 대한 광선 전달행렬은 온도의 함수로 형태가 복잡한 함수로 되어있다. 다음은 레이저 막대의 ABCD 광선 전달 행렬 ($M_{r,\phi}$)이다.^[5,6]

$$M_{r,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma_{r,\phi} L_0 & (n_0 \Gamma_{r,\phi})^{-1} \sin \Gamma_{r,\phi} L_0 \\ -(n_0 \Gamma_{r,\phi}) \sin \Gamma_{r,\phi} L_0 & \cos \Gamma_{r,\phi} L_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, L_0 는 레이저 막대의 길이, $\Gamma_{r,\phi} \equiv (\Delta n_{r,\phi} / n_0)^{1/2}$ 이며 $\Delta n_{r,\phi}$ 는 다음과 같이 가정하고 막대의 끝면의 효과는 무시했다.

[†] E-mail: hskim21@chosun.ac.kr

$$\Delta n_{r,\phi} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 a C_{r,\phi} \right) \quad (2)$$

여기서, n_0 는 중심의 굴절률, dn/dT 는 굴절율의 온도 변화 계수, a 는 열 팽창계수, R 는 레이저 막대의 반경, $C_{r,\phi}$ 는 r 편광과 ϕ 편광에 대한 광탄성 효과를 나타내는 계수이다. ΔT 는 레이저 막대의 중심과 가장자리와의 온도차이며 레이저 막대의 열 렌즈 초점거리를 측정함으로써 구할 수 있다. 계산에 사용한 Nd:YAG에 대한 물리 상수 값은 표 1과 같다.

레이저 막대에 대한 광선 전달 행렬이 r 편광과 ϕ 편광에 대해 분리한 이유는 레이저 막대가 펌핑광을 흡수 후 열에 의한 스트레스가 r 방향과 ϕ 방향에서 각기 다르기 때문이다. 이로 인해 r 편광과 ϕ 편광에 대한 굴절률의 변화가 각각 달라 각 편광에 대한 ABCD 행렬이 다르게 된다.

그림 1과 같이 구성된 불안정형 공진기의 안정조건을 구하기 위해 다음과 같은 행렬 곱을 구하였다.

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [l][M_{r,\phi}][d][FM][d][M_{r,\phi}][l] \quad (3)$$

여기서 $[l]$ 와 $[d]$ 는 거리 l 과 d 에 대한 ABCD 행렬이고 $[FM]$ 는 $-R_{cur}$ 의 곡률 반경을 가지는 반사경에 대한 ABCD 행렬이다. 이 행렬 곱 M_{tot} 을 이용하여 공진기 안정 조건과

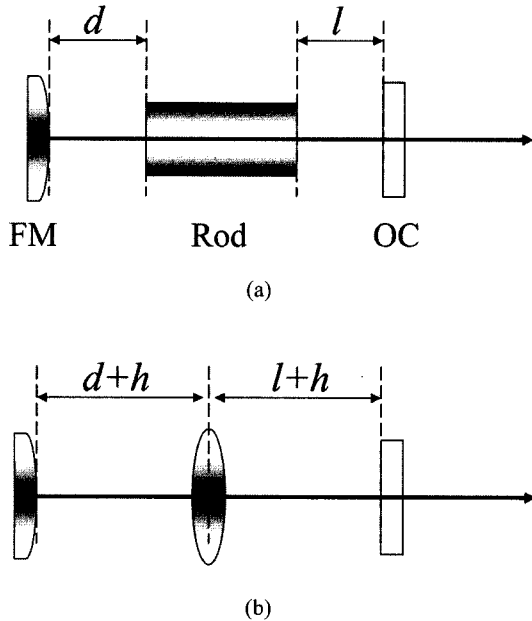


그림 1. 블록 평면 거울로 구성된 불안정형 Nd:YAG 레이저 구성도 (a), 불안정 공진기의 등가 구성도(b). (FM: Full Mirror, Rod: Nd:YAG Rod, OC: Output Coupler, h : 레이저 막대의 끝면에서 주점까지의 거리)

표 1. Nd:YAG 결정의 물리 상수 값⁶⁾

물리 상수	값
$K(W/cm \text{ } ^\circ C)$	0.14
$a(cm^{-1})$	7.5×10^{-6}
n_0	1.82 at 1.064 μm
$dn/dT(^\circ C^{-1})$	7.3×10^{-6}
$C_{r,\phi}$	0.017, -0.0025

빔질을 구할 수 있다. 식(3)을 이용한 공진기의 안정 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$-1 \leq \frac{A+D}{2} \leq 1 \quad (4)$$

레이저의 빔질 요소(M^2)는 레이저의 빔 허리에서의 직경(2 ω)과 빔의 발산각(2 θ)의 곱으로 이루어져있으며 다음과 같이 정의된다.

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \omega \cdot \theta \quad (5)$$

이 값은 레이저 성능의 척도로 1990 년 이후 많은 사람들이 사용해왔다. 식(5)에서와 같이 M^2 를 구하기 위해서는 레이저 출력경에서의 빔의 크기와 발산각을 구해야한다. Gaussian 기본 모드에 대한 빔의 크기와 발산각은 식 (3)의 행렬과 복소수 빔 매개변수(q_i)의 고유값으로부터 구할 수 있다. 출력경 내부 면에서의 q_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{q_i} = \frac{(D-A) - j\sqrt{4-(A+D)^2}^{1/2}}{2B} = \frac{1}{\rho_i} - j \frac{\lambda}{\omega_0^2} \quad (6)$$

여기서, ρ_i 는 출력경에서의 파면의 곡률 반경, ω_0 는 출력경에서의 Gaussian 빔의 반경이고 λ 는 레이저의 파장이다. 식 (6)식으로부터 Gaussian 기본 모드에 대한 빔 반경(ω_0)과 발산각(2 θ)은 다음과 같이 주어진다.^[7]

$$\omega_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{2B}{[4-(A+D)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

$$\theta^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{(D-A)^2 + [4-(A+D)^2]^{1/2}}{2B[4-(A+D)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

Hermite-Gauss 다중 모드에 대한 빔 반경(ω_m)과 발산각 (θ_m)은 식(7),식(8)과 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.^[7]

$$\omega_m = \left(m + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \omega_0, \quad (9)$$

$$\theta_m = \left(m + \frac{1}{2}\right)^{1/2} \theta \quad (10)$$

여기서 m 는 모드의 차수이다. 공진기 내에서 발진할 수 있는 모드의 최고 차수는 공진기 내에 구경(aperture)이나 레이저 매질의 크기에 의해 결정된다. 구경이 없고 레이저 매질의 반경이 R 인 공진기에서 발진할 수 있는 모드의 최고 차수는 식(9)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$m = R^2/\omega_R^2 - 1/2 \quad (11)$$

여기서 ω_R 는 레이저 매질 내에서 기본 모드의 최대 반경이다. 식(11)으로부터 출력경을 통과한 레이저 빔의 직경과 발산각은 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_m = \omega_0(R/\omega_R), \quad R > \omega_R \quad (12)$$

$$\theta_m = \theta(R/W_R) \quad (13)$$

공진기 내의 빔 허리에서 파면은 무한대의 곡률 반경을 가지고 있기 때문에 ABCD 행렬의 A와 D성분은 같고 $\omega_0\theta = \lambda/\pi$ 를 만족한다. 따라서 공진기에서 발진할 수 있는 다중모드에 대한 빔질 요소는 식(7), 식(8), 식(9), 식(10)에 의해 다음과 같이 간단한 형태로 주어진다.^[8]

$$M^2 = \frac{R^2}{\omega_R^2} \quad (14)$$

식 (14)의 M^2 값은 주어진 공진기 조건에서 최대 발진 가능한 공진기 모드 수를 의미한다. 실제 실험에서는 공진기 내부의 모드들 간에 경쟁의 의해 이보다 작은 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 식(14)을 이용해 불안정형 공진기에 대한 안정영역에서의 빔질 요소를 분석해 보았다.

III. 비 대칭 구조에서의 레이저의 안정 조건과 빔질 요소(M^2) 분석

그림 1의 레이저 구조에서 여러 가지 레이저 거울(FM)의 곡률에 대해 레이저 헤드의 위치를 한 쪽 거울에서 다른 쪽 거울로 연속적으로 이동시키면서 안정 조건과 빔질 요소를 분석하였다.

단일 레이저 공진기에서 얻을 수 있는 TEM₀₀ 모드의 최대 반경은 약 1.1 mm 이기 때문에 일반적으로 고품위, 고풍출력 레이저를 얻기 위해서 레이저 막대의 직경을 3~4 mm로 선택한다.^[9] 본 연구에서는 레이저 막대의 직경을 3 mm로 선택하였다. 레이저 막대의 길이(L_0)는 5 cm인 경우에 대해 조사하였다.

대칭 구조에서의 식 (3)은 두 편광(r 편광, ϕ 편광)에 대해 다음과 같이 된다.

$$M_{tot} = [l[M_r][d][FM][d][M_r][l], r\text{-편광} \quad (15a)$$

$$= [l[M_\phi][d][FM][d][M_\phi][l], \phi\text{-편광} \quad (15b)$$

행렬 $[M_{r,\phi}]$ 를 두꺼운 렌즈로 등가 할 경우 레이저 막대는 다음과 같은 초점거리를 가지게 된다.^[6]

$$f_{r,\phi} = \frac{R^2}{4L_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi}\right)} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (16)$$

따라서 식 (15)의 두 행렬에 의해 정의되는 공진기는 물리적 관점에서 보았을 때 ΔT 에 대한 비례 계수가 약간 서로 다른 렌즈가 삽입된 같은 종류의 공진기들이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 한 개의 편광(r 편광)에 대한 비대칭 공진기 특성을 분석하였다.

그림 2는 빔질을 나타내는 M^2 값과 안정영역을 ΔT 와 l 의 함수로 그린 것이다. 그림에서 회색 영역 부분이 레이저가 발진하지 않는 불안정 영역이다. 그림 2의 왼쪽 그림들은 레이저 막대 길이를 제외한 공진기 길이(L)가 20 cm인 경우이고 오른쪽 그림은 30 cm인 경우이다. 공진기 길이가 길면 안

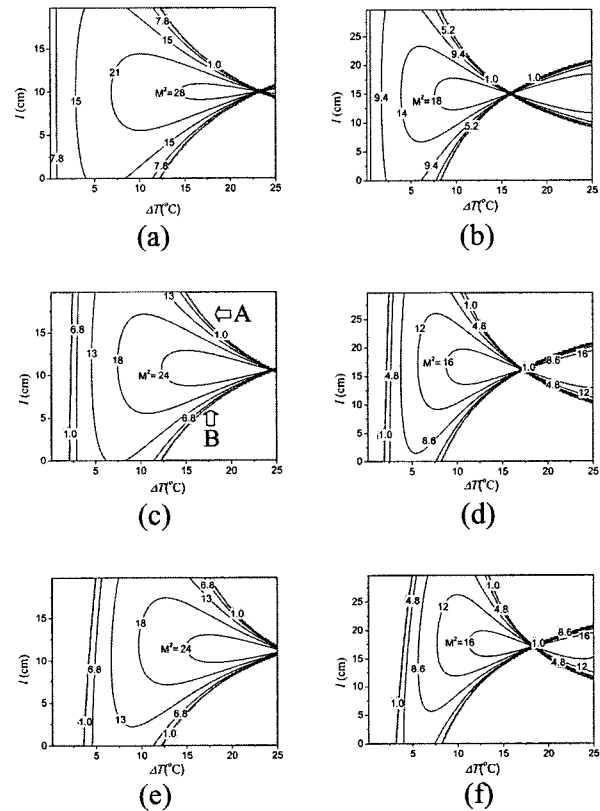


그림 2. 레이저 공진기의 M^2 의 계산 값. (a) $R_{curv} = \infty$ cm와 $L = 20$ cm 인 경우, (b) $R_{curv} = \infty$ cm와 $L = 30$ cm 인 경우, (c) $R_{curv} = 100$ cm와 $L = 20$ cm 인 경우, (d) $R_{curv} = 100$ cm와 $L = 30$ cm 인 경우, (e) $R_{curv} = 50$ cm와 $L = 20$ cm 인 경우, (f) $R_{curv} = 50$ cm와 $L = 30$ cm 인 경우.

정영역은 줄어드는 반면 M^2 값이 감소함을 알 수 있다. 그림 2의 윗 그림((a), (b)), 중간 그림 ((c), (d)) 아랫 그림 ((e), (f)) 은 레이저 거울(FM)의 곡률 반경($-R_{curv}$)이 각각 ∞ cm, -100 cm, -50 cm에 해당한다. 그림 2(a), 그림 2(b)에서 알 수 있듯이 안정하게 발진하는 온도 변화 영역은 레이저 막대가 공진기의 중심에 있을 때 가장 넓었다. 그러나 이 영역은 식 (14)을 이용해서 구한 M^2 가 다른 안정영역 구간보다 큰 값을 가졌다. 비록 안정영역 구간은 짧지만 보다 좋은 빔질의 제2 조화파를 발생시키기 위해서는 공진기 내의 레이저 막대가 비대칭적으로 위치해 있어야 함을 알 수 있다. 그러나 비대칭 공진기는 안정 영역 구간이 상대적으로 작아지게 되어 펌프 광을 계속해서 공급할 수가 없다. 이런 문제를 해결할 수 있는 방법이 레이저 공진기의 한쪽 거울을 볼록형 거울로 대처하는 것이다. 그림 2(c)-(f)에서 알 수 있듯이 레이저 거울의 곡률이 감소할수록 상단 부분의 안정영역 구간이 크기변화 없이 우측으로 이동함을 알 수 있다. 반면에 그림 2(c)-(f)의 하단 부분의 안정영역 구간은 우측으로 이동했지만 크기가 감소하였다. ΔT 는 레이저 막대에 공급되는 펌프광 세기에 비례하기 때문에 안정영역이 우측으로 이동하였다는 것은 레이저 막대에 공급하는 펌프 광의 세기를 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다. 레이저 막대가 레이저 거울 (FM)와 거의 밀착되어있는 그림 2(c)-(f)의 상단 부분은 안정영역 구간에서는 고출력으로 동작할 수 있으며 전기적으로 레이저의 출력을 넓은 영역 까지 가변 할 수 있음을 말한다.

레이저 막대를 식(16)식과 같은 초점거리를 갖는 두꺼운 렌즈로 근사하면 안정영역에 대한 경계 (ΔT_{max})은 다음과 같이 간단한 형태로 주어진다.

$$\Delta T_{max} = \frac{R^2}{4L_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi}\right)} \cdot \begin{cases} \frac{1}{R+d+h} + \frac{1}{l+h} & , \text{ if } l \geq d + \frac{(d+h)^2}{R} \quad (A) \\ \frac{1}{d+h} & , \text{ if } l \leq d + \frac{(d+h)^2}{R} \quad (B) \end{cases} \quad (17)$$

여기서 h 는 레이저 막대의 끝면에서 주점까지의 거리이며 $L_0/2n_0$ 로 주어진다. 식(17)은 r 편광과 ϕ 편광에 대해서 구한 것이다. 앞서서도 언급했듯이 물리적으로 차이가 없고 경계 값이 약간의 상수배 만큼 차이가 남을 알 수 있다. 그리고 안정영역의 하한값 (ΔT_{min})은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta T_{min} = \frac{R^2}{4L_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi}\right)} \cdot \frac{1}{R+d+h} \quad (18)$$

식(17)과 식(18)로부터 그림 2의 각 상단 부분의 안정영역 구간의 폭은 볼록거울의 곡률에 무관하고 $l+h$ 에 반비례함을 알 수 있다.

보통 볼록-평면 거울 공진기에서 제2조화파 발생을 위한

비선형 결정은 평면 거울에 근접해서 설치한다. 그 이유는 평면 거울에서 모드의 빔 허리가 형성되기 때문이다. 따라서 평면 거울 위치에서의 빔의 크기는 2 조화 발생 효율에 중요한 요소가 된다. 본 연구에서도 출력경(OC)에서의 빔 반경을 여러 가지 경우에 대해서 그림 3과 같이 수치 계산하였다. 전반적으로 레이저 헤드가 FM에 근접해 있을 때 OC에서의 빔 반경이 최소가 됨을 알 수 있다. 제2조화파 발생을 위한 비선형 결정은 Nd:YAG 막대보다 레이저 강도에 대한 파손 문턱 값이 작기 때문에 빔의 강도에 의해 비선형 결정이 쉽게 파손될 수 있다. 따라서 실제 레이저를 제작할 때는 레이저 헤드의 위치를 조절하여 결정에 집중되는 레이저 강도가 비선형 결정의 파손 문턱을 넘지 않도록 해야 한다.

또한 제2조화파 발생 효율은 공진기 내의 저차모드의 세기가 클수록 증가한다. 저차모드가 레이저 매질에서 어느 정도의 부피(모드 부피)를 점유하고 있는 가는 제2조화파 발생에 있어서 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 식(19)과 같이 레이저 매질 내에서 모드 부피(V_m)를 정의하고 계산하였다. 결과는 그림 4에 나타내었다.

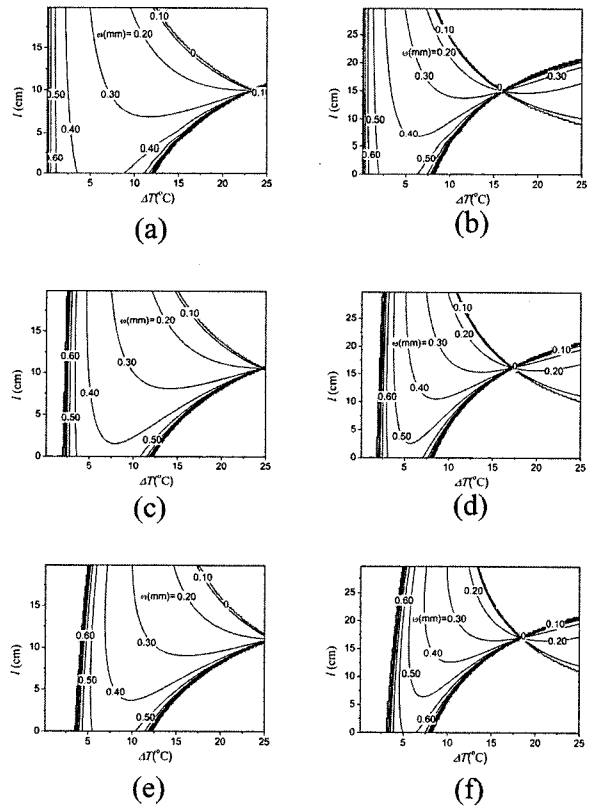


그림 3. 레이저 출력경에서 TEM₀₀ 모드 빔반경 계산 결과. (a) $R_{curv}=\infty$ cm와 $L=20$ cm 인 경우, (b) $R_{curv}=\infty$ cm와 $L=30$ cm 인 경우, (c) $R_{curv}=100$ cm와 $L=20$ cm 인 경우, (d) $R_{curv}=100$ cm와 $L=30$ cm 인 경우, (e) $R_{curv}=50$ cm와 $L=20$ cm 인 경우, (f) $R_{curv}=50$ cm와 $L=30$ cm 인 경우.

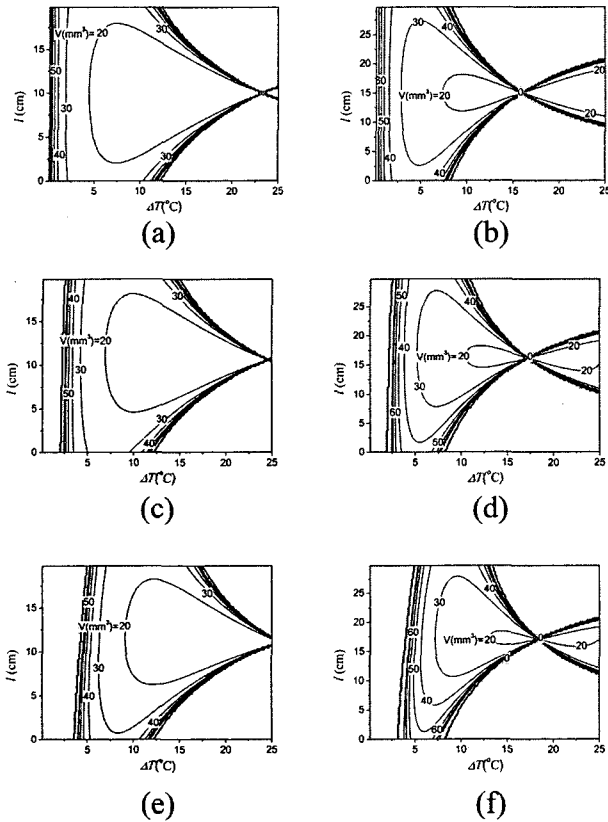


그림 4. 레이저 막대에서의 TEM₀₀ 모드 부피를 계산한 결과. (a) R_{curv}=∞ cm와 L=20 cm 인 경우, (b) R_{curv}=∞ cm와 L=30 cm 인 경우, (c) R_{curv}=100 cm와 L=20 cm 인 경우, (d) R_{curv}=100 cm와 L=30 cm 인 경우, (e) R_{curv}=50 cm와 L=20 cm 인 경우, (f) R_{curv}=50 cm와 L=30 cm 인 경우.

$$V_m = \pi \int_0^L \omega_0^2(z) dz_{rod} \quad (19)$$

여기서 $\omega_0(z)$ 는 레이저 매질 안에서의 TEM₀₀ 모드의 빔 반경이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 모드 부피는 레이저 헤드 가 비대칭적으로 설치될수록 증가하였다. 공진기 길이가 30 cm인 경우는 모드부피가 증가하지만 공진기의 안정구간은 협소해짐을 알 수 있다. 서론에서도 언급했듯이 안정구간이 협소하다는 것은 높은 펄스광 세기로 레이저 헤드에 공급하면 레이저가 발진하지 않는 것을 의미한다. 따라서 높은 펄스광 세기에서 안정된 고출력 저차 모드를 얻기 위해서는 공진기 길이가 짧고 레이저 헤드 가 비대칭적으로 설치되어야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 제2조화파 발생용으로 사용되는 볼록-평면 거울로 이루어진 비대칭 공진기의 레이저빔의 특성을 조사하였다. 레이저 빔질 분석하기 위해 M², 모드 빔 허리에서의

직경, 레이저 매질 내의 모드 부피를 공진기 내의 레이저 헤드의 위치를 변화시키며 계산하였다. 제2조화파가 효율적으로 발생하기 위해서는 공진기 내부의 M²가 작아야 되고, 비선형 결정이 위치한 모드 빔 허리의 직경이 작아야 한다. 또한 저차모드로 높은 출력은 얻기 위해서는 레이저 매질에서의 TEM₀₀ 모드의 모드 부피가 커야 한다. 이러한 조건을 가장 잘 만족할 수 있는 공진기 구조는 앞의 계산 결과로부터 알 수 있듯이 레이저 헤드가 볼록 거울 근방에 위치해 있는 비대칭 구조이어야 함을 알 수 있다. 또한 레이저 펄스광의 세기를 충분히 증가시켜 공진기가 ΔT의 경계영역 근방에서 동작시킬 때 고효율의 제2조화파를 얻을 수 있는 조건이 만족됨을 알 수 있다. 현실적으로 레이저 헤드가 이론과 같이 이상적으로 펌핑이 되도록 설계하기는 어렵기 때문에 ΔT_{max}에서 레이저 발진이 효율적으로 일어나지 않는다. 그러나 레이저 헤드 설계가 어느 정도 잘 되어 있다면 ΔT_{max}보다 약간 낮은 영역에서 계산과 같이 잘 발진될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] N. Hodgson and H. Weber, *Optical resonators* (Springer-Verlag, London, UK,1997), pp. 367-443.
- [2] K.P. driedger, R. M. Infflander, and H. Weber, "Multirod resonators for High-power Solid-state lasers with improved beam quality," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 24, pp. 665-674, 1988.
- [3] Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, and T. Tajime, "208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser," *Opt. Lett.*, Vol. 24, pp. 679-681, 1999.
- [4] S. Konno, T. Kijima, S. Fujikawa, and K. Yasui, "stabilization of a high-power diode-side-pumped intracavity-frequency-doubled CW Nd:YAG laser by compensating for thermal lensing of a KTP crystal and Nd:YAG rods," *Opt. Lett.* Vol. 25, pp. 105-107, 2000.
- [5] J. R. Park, J. Y. Lee, H. S. Kim, K. Y. Um, and H. J. Kong, "Characteristics of a birefringence compensation scheme in Nd³⁺:YAG rods using a polarization rotator and an imaging optics," *Opt. Re.*, vol. 4(1B), pp. 170-175, 1997
- [6] W. Koechner, *Solid-state Laser Engineering 4th ed.* (Springer-Verlag, Berlin, 1996).
- [7] R. Inffländer, H. P. Kortz, and H. Weber, "Beam divergence and refractive power of directly coated solid state lasers" *Opt. Commun.* Vol. 29, pp. 223-226, 1979.
- [8] H. S. Kim, S. Lee, D-K. Ko, and B. H. Cha, "Dependence of the stability and the beam quality on the distance between two rods in a double laser-head resonator," *Opt. Commun.* Vol. 15, pp. 381-389, 2002.
- [9] G. Cerullo, S. D. Silvestri, V. Magni, O. Svelto, "Output power limitations in CW single transverse mode Nd:YAG lasers with a rod of large cross-section," *Opt. & Quantum Electron.* vol. 25, pp. 489-500, 1993.

Analysis of Beam Quality of the Unsymmetric Nd : YAG Laser with Unstable Resonator

Hyun Su Kim[†]

Department of photonic engineering, Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu Gwangju 501-759, Republic of Korea

[†]*E-mail: hskim21@chosun.ac.kr*

(Received July 25, 2005, Revised manuscript September 8, 2005)

We numerically investigate the characteristic of single Nd:YAG rod laser with the convex-plane resonator configuration in order to get the best condition for high efficient intra-cavity second harmonic generation(SHG). The beam quality is analyzed with ABCD matrixes including the thermal lensing characteristic of Nd:YAG rod. The analysis is focused on stability, M2, beam waist and mode-volume of laser beam inside the resonator. The best conditions for SHG is obtained when a laser rod is set near the curved laser mirror.

OCIS Codes : 140.3530, 140.4780, 140.6810.