

높은 정렬 안정성을 갖는 레이저 공진기 구성에 관한 연구

차혁진

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

주 흥 · 전영민 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

현재경

경희대학교 물리학과

(2000년 1월 25일 받음, 2000년 7월 26일 수정본 받음)

다양한 종류의 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기를 구성하여 출력경의 각도변화에 따른 레이저 출력에너지의 변화를 최대 출력에너지가 반으로 줄어드는 점의 각도변위인 반치폭(FWHM)을 측정하여 비교하였다. 출력경의 기울어짐에 대하여 높은 반치폭을 갖고 반사경의 각도변화에 대해서도 덜 민감하게 반응하는 안정적인 펄스형 고체 레이저의 새로운 공진기를 구성하였다. ABCD 광선 전파 행렬식을 이용하여 이러한 공진기의 전파행렬식이 단위행렬이 됨을 해석함으로써 높은 정렬 안정성을 가지고 있음을 증명하였다.

OCIS codes : 140.3410, 140.4780, 140.3530.

I. 서 론

레이저 시스템을 개발할 때 레이저 출력 빔 매개변수의 안정화에 관한 문제가 대단히 중요하다. 높은 평균 펄스전력으로 여기된 고체 레이저의 경우에 있어서 1~10 Hz 정도의 낮은 반복률에서 레이저출력의 불안정성에 영향을 미치는 매개변수중 가장 중요한 것은 레이저 활성매질에서 나타나는 열렌즈의 요동이다.^[1] 정상상태 또는 연속으로 발전하는 고체 레이저 매질은 열을 얼마간 소산시켜야만 하고 이러한 열은 매질에서 비복사 천이로부터 발생한다. 일반적으로 원기둥 구조에서 발생된 열은 원기둥의 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 온도 기울기가 생기게 된다. 레이저 붕 내부에서의 온도 변화는 온도와 스트레스에 크게 영향을 받는 굴절을 변화에 따른 레이저 빔의 열 찌그러짐을 일으키고, 더 나아가 발생된 스트레스는 복굴절을 유도한다. 레이저 붕에 의해서 소산된 열을 알게 되면 지름방향의 온도 기울기를 계산할 수 있고 더 나아가 붕에서의 스트레스와 변형, 굴절률의 변화, 열렌즈 효과, 복굴절을 계산할 수 있다.^[2]

플래시 램프에 의한 활성매질의 가열과 냉각에 의한 불안정성은 열렌즈의 위치와 굴절능을 변하게 한다. 열렌즈의 중심 위치가 붕의 지름방향으로 요동하는 것은 공진기에서 광축의 위치를 변화하게 하고, 이는 출력 빔의 진행방향과 출력에너지(제한구경이 존재)를 변화시키게 한다. 또한 열렌즈에 의한 굴절능의 요동은 레이저 출력 빔의 공간적인 매개변수를 변화시킨다. 따라서 최적의 공진기 구조를 적절하게 선택함으로써 초면(caustic)을 안정시키는 문제가 많은 관심을 불러 일으키게 되었다.

공진기 내부 렌즈의 굴절능의 요동이 존재하는 공진기에서

공진기 초면의 안정도는 plano-spherical,^[3] concave-convex^[4] 등 여러가지 다른 형태의 공진기에 대해서 발표되었다. 공진기 축의 안정화에 관한 연구^[3]가 진행되어져 왔고, 또한 최대의 안정성을 갖는 공진기를 설계하고자 할 때 필요한 공진기 조건과 임의의 공진기에서 비정렬감도(misalignment sensitivity)를 평가하는 방법^[4]이 제시되었다. 비정렬감도는 레이저 공진기를 설계할 때 아주 중요한 매개변수가 되며, 특히 레이저 모드의 단면적이 큰 경우에는 더욱 중요하다. 레이저 거울의 비정렬에 따른 공진기의 감도는 공진기의 제한구경 평면상의 mode field pattern의 변위에 관련되며, 이 변위는 거울의 기울어짐에 따라 변하게 된다.^[5] 비정렬에 의한 공진기의 내부 손실량은 공진기의 구조에 의존하며 레이저의 출력을 감쇄시킨다. 또한 거울면상에 조리개가 있는 공진기의 비정렬감도는 이론적, 실험적으로 많이 분석되어져 왔다.^[6-10]

이제까지의 연구는 주로 연속으로 발전하는 고체 레이저에 대한 이론과 실험이 대부분이었으나, 본 논문에서는 O.O. Silichev^[11]에 의해 제안된 공진기를 수정하여 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기를 설계, 제작하는데 응용하였다. 출력경의 각도변화에 따른 레이저의 출력에너지를 측정하여 온도의 변화나 불균일한 펄핑에 따른 레이저 매질 속의 열렌즈의 변화 또는 기계적인 진동에 의한 정렬방해요인에 대해 기존의 공진기보다 훨씬 더 높은 안정성을 갖는 구조의 공진기 구성에 관하여 연구하였다.

II. 이 론

2.1. 공진기 초면의 안정화

먼저 일반적인 공진기 내부에 초점거리가 f 인 불안정한 렌

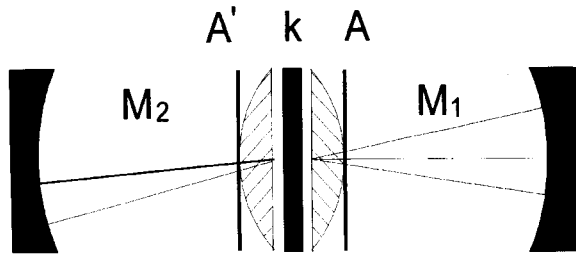


그림 1. 공진기 내부에 불안정한 렌즈가 있다고 가정한 경우 오른쪽과 왼쪽에서 진행하는 빔을 보여주는 그림.

스가 있다고 가정하면(그림 1), 오른쪽과 왼쪽에서 진행하는 빔을 광선전파행렬 M_1 과 M_2 로 각각 나타낼수 있다. 또한 공진기 양쪽 부분은 거울로 되어 있기 때문에 각각의 행렬의 대각요소들은 같게 된다. 여기서 공진기 내부의 가우시안 빔을 고려하면, 그림 1의 A면 상에서의 빔을 나타내는 복소 매개변수 μ (또는 q)는

$$\mu = x + iy \tag{1}$$

$$\left(\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2}\right)$$

로 표현되며, 여기서 $x = 1/R$, $y = -\lambda/\pi\omega^2$, R 은 위상면의 곡률반경, ω 는 평면 A에 집중된 빔 허리(beam waist)를 나타낸다. 따라서 각각의 가우시안 빔은 복소평면 상의 X, Y 좌표 상의 한점으로 나타낼 수 있다. 만일 주어진 빔이 공진기 모드라면, 오른쪽 거울에서 반사되어 평면 A로 되돌아 왔을 때 같은 지점에서의 빔 크기는 변하지 않으며, 이때의 빔 매개변수는 다음과 같게 된다.

$$\mu_1 = -x + iy = -\mu^*, (\mu_3 = -x' + iy' = -\mu_2^*) \tag{2}$$

따라서 점 μ_1 와 μ 는 복소평면 상의 Y축에 대해서 서로 대칭임을 알 수 있으며, ABCD 행렬^[11]을 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_1 = \frac{Aq+B}{Cq+D}$$

또한 거울에서의 행렬은 $A=D$ 이므로 식 (1)의 관계를 이용하면,

$$\mu_1 = \frac{C+A\mu}{A+B\mu}, \left(\mu_3 = \frac{C+A\mu_2}{A+B\mu_2}\right) \tag{3}$$

와 같이 나타내어 진다. 식 (3)에 μ_1 과 μ 를 각각 대입하여 풀면,

$$y^2 + \left(x + \frac{A}{B}\right)^2 + \frac{C}{B} - \frac{A^2}{B^2} = 0 \tag{4}$$

의 결과를 얻게 된다.

여기서 $A^2 - BC = 1$ 이므로 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$y^2 + \left(x + \frac{A}{B}\right)^2 = \frac{1}{B^2} : \text{공진기 모드} \tag{5}$$

식 (5)는 XY평면 상의 점 $(-A/B, 0)$ 을 중심으로 반경이 $1/|B|$

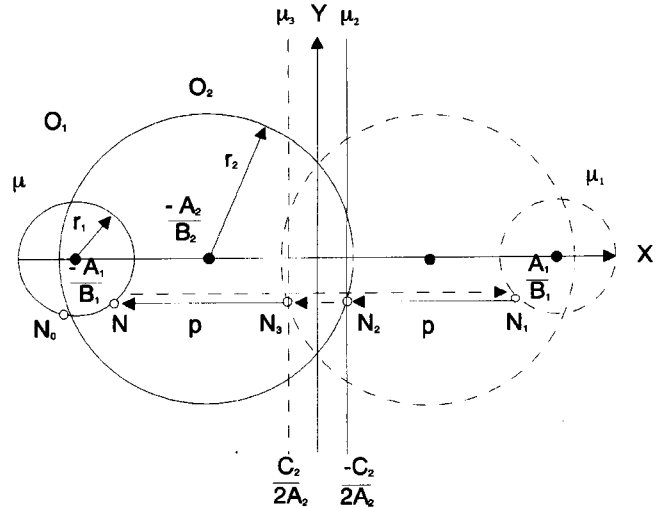


그림 2. 공진기 모드를 나타내는 빔 매개변수와 일치하는 점들을 원주상에 표현한 그림.

인 원에 대한 방정식이 된다. 따라서 평면 A에서 공진기 모드를 나타내는 빔 매개변수 μ 와 일치하는 점 x, y 는 식 (5)를 만족해야 하며, 따라서 이 점들은 원주 O_1 상에 존재해야만 한다. 또한 비슷한 방법으로 공진기 왼쪽에 대한 원주 O_2 도 만들 수 있다(그림 2).

공진기 모드가 A면에서 원주 O_1 상에 있는 점 $N(x, y)$ 에 의해 표현되어 진다고 가정하고, 빛이 공진기 내부를 왕복했을 때 점 $N(x, y)$ 의 위치가 어떻게 변하는지를 알아보자. 공진기 중심의 오른쪽 부분을 통과한 빔은 점 N 에서 N_1 으로의 변위와 일치하며, 이는 식 (2)와 같이 Y축에 대해 대칭인 지점에 위치하게 된다. 빔이 렌즈를 통과하면 점 N_1 은 N_2 로 이동된다. 여기서 이 두 점간의 거리는 $p(=1/f)$ 이고, 점 N_2 는 원주 O_2 상에 있어야만 한다. 이는 점 N_2 가 공진기 모드를 나타내지 않기 때문이다. 따라서 왼쪽을 통과한 후에는 점 N_2 는 N_3 로 이동되고, X축을 따라 $-p$ 만큼 더 이동된 후에는 최초의 점 N 으로 돌아오게 된다.

$$q_2 = q_1 + d, \frac{1}{\mu_2} = \frac{1}{\mu_1} + d$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} - \frac{1}{f}, \mu_2 = \mu_1 - p \tag{6}$$

이러한 해석으로부터 N 은 원주 O_1 과 O_2 '의 교점이고, O_2 '은 Y축에 대해서 원주 O_2 를 반사시키고 X축으로 $-p$ 만큼 중심을 이동시킴으로써 얻어진다. 따라서 평면 A상에서의 모드 매개변수 (x, y) 는 다음 방정식의 해가 된다.

$$y^2 + \left(x + \frac{A_1}{B_1}\right)^2 = \frac{1}{B_1^2}$$

$$y^2 + \left[x - \left(\frac{A_2}{B_2} - p\right)\right]^2 = \frac{1}{B_2^2} \tag{7}$$

따라서 렌즈의 굴절능 p 가 변화하면 원주 O_1 상의 점 N 의 위

치가 원주를 따라 바뀌게 됨을 알 수 있다. 또한, 점 N이 좌표 $(-A_1/B_1, -r_1)$ (그림 2에서는 N_0 로 표시)을 갖게 될 때 열렌즈의 굴절능 p 의 요동에 의한 y 의 변화량 Δy 는 최소값을 갖게 되며, 평면 A상에서 모드의 가로 크기 ω 는 열렌즈의 조그만 요동에는 영향을 받지않게 된다.

$|B_2| < |B_1|$ 인 특별한 경우에 대해서 초면이 불안정해지는 원인을 식 (7)을 풀어서 자세히 알아보면 다음과 같다. 먼저 두 식에서 y 항을 소거하면,

$$\left[x - \left(\frac{A_2}{B_2} - p \right) \right]^2 - \left(x + \frac{A_1}{B_1} \right)^2 = \frac{1}{B_2^2} - \frac{1}{B_1^2} \equiv m > 0 \quad (8)$$

이다. 따라서 $|B_2| < |B_1|$ 인 조건과 $m > 0$ 인 조건은 빔의 경로를 결정하게 된다. 뒷식을 전개하면,

$$2 \left(p - \frac{A_1}{B_1} - \frac{A_2}{B_2} \right) x + p^2 - 2 \left(\frac{A_2}{B_2} \right) p - \frac{A_1^2}{B_1^2} + \frac{A_2^2}{B_2^2} = m$$

이고, 뒷식에서 $n \equiv p - \frac{A_1}{B_1} - \frac{A_2}{B_2}$ 으로 놓으면,

$$2nx + n^2 + 2 \frac{A_1}{B_1} n = m \quad (9)$$

이고 이로부터,

$$x = \frac{m}{2n} - \frac{n}{2} - \frac{A_1}{B_1},$$

$$y = -\frac{1}{|B_1|} \left[1 - B_1^2 \left(\frac{m}{2n} - \frac{n}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} < 0 \quad (10)$$

를 얻는다.

열렌즈의 요동에 의한 초면의 감도는 $dx/dp, dy/dp$ 의 양에 의해 결정되는데, 평면 A에서 모드의 수축에 대한 안정조건은,

$$\frac{dy}{dp} = 0 \quad (11)$$

이며 식 (10)으로부터 이 조건을 구하면 된다.

$$\frac{dy}{dp} = -\frac{1}{2|B_1|} \left[1 - B_1^2 \left(\frac{m}{2n} - \frac{n}{2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} (-2B_1^2) \left(\frac{m}{2n} - \frac{n}{2} \right) \left(-\frac{m}{2n^2} - \frac{1}{2} \right) = 0 \quad (12)$$

따라서 뒷식이 0이 되기 위해서는 $\frac{m}{2n} - \frac{n}{2} = 0$ 이 되어야 하기 때문에, 이로부터 다음의 관계식을 얻게 된다:

$$m = n^2, |n| = \sqrt{m} \quad (13)$$

그러므로

$$y = -\frac{\lambda}{\pi \omega^2} = -\frac{1}{|B_1|}$$

$$x = \frac{1}{R} = -\frac{A_1}{B_1} \quad (14)$$

의 해를 얻게 된다. 따라서, 요구되는 열렌즈 상에서의 빔 허리 값을 이용하여 공진기 오른쪽의 최적 길이 B_1 값을 식 (14)를

이용하여 쉽게 계산할 수 있다. 다음으로 평면 A상에서 열렌즈의 굴절능 변화에 따른 모드 위상면의 곡률반경의 안정도를 고려하면, 식 (10)으로부터 다음의 관계식을 얻게 된다.

$$\frac{dx}{dp} = -\frac{m}{2n^2} - \frac{1}{2} = -1 \quad (15)$$

이 경우에는 공진기 오른쪽에서의 위상면의 곡률반경은 불안정하게 된다. 하지만 A면에서는 위상면의 곡률반경 x' 이 A면에서의 위상면의 곡률반경 x 와 $x' = x + p$ 의 관계로 간단하게 나타낼 수 있으므로,

$$\frac{dx'}{dp} = 0 \quad (16)$$

이 되어 위상면의 곡률반경이 안정하게 된다. 따라서 행렬 M_1 과 M_2 의 행렬소자가 $|m| = \sqrt{m}$ 의 조건을 만족하면, 왼쪽은 ($|B_2| < |B_1|$) 열렌즈에서의 모드 수축 크기와 위상면의 곡률이 안정하게 되고, 공진기의 안정조건은 다음과 같게 된다.

$$-1 < -\frac{B_2}{B_1} < 1 \quad (17)$$

따라서 위의 조건은 $|B_2| < |B_1|$ 인 조건 하에서는 $|B_2| = |B_1|$ 인 경우를 제외하고는 항상 성립하게 된다. 만일 $B_2 = 0$ 이면, 식 (3)으로부터,

$$-A_2 x' = C_2 + A_2 x', \text{ determinant : } A_2^2 = 1, A_2 = \pm 1$$

을 얻게 된다. 따라서

$$x' = -\frac{C_2}{2A_2} \quad (\mu_2)$$

$$x' = \frac{C_2}{2A_2} \quad (\mu_3)$$

이고, 식 (7)로부터 $y^2 + \left(x + \frac{A_1}{B_1} \right)^2 = \frac{1}{B_1^2}$ 이고, $x' = x + p$ 의 관계식을 이용하면,

$$x = \frac{C_2}{2A_2} - p$$

을 얻게 된다. 따라서, $y^2 + \left(\frac{C_2}{2A_2} - p + \frac{A_1}{B_1} \right)^2 = \frac{1}{B_1^2}$ 이고, 이로부터 p 의 변화에 따른 y 의 변화를 구하면,

$$\frac{dy}{dp} = \frac{1}{2y} \frac{dy^2}{dp} = \frac{1}{2y} (-2) \left(\frac{C_2}{2A_2} - p + \frac{A_1}{B_1} \right) (-1)$$

와 같이 되고, 식 (12)에서와 같이 $dy/dp = 0$ 이 되기 위한 조건은 다음과 같게 된다.

$$p = \frac{C_2}{2A_2} + \frac{A_1}{B_1}, A_2 = \pm 1 \quad (18)$$

따라서 $dy/dp = 0$ 이 되기 위한 조건을 종합하면,

$$\textcircled{1} B_2 = 0 \text{이고, } \textcircled{2} p = \frac{C_2}{2A_2} + \frac{A_1}{B_1}, A_2 = \pm 1 \text{인 경우이다.}$$

다음으로 공진기 광축의 안정화 문제를 고려하면, 공진기 광축은 열렌즈 중심 위치의 불안정에 의해 위치가 바뀌게 된다. 따라서 이 문제를 풀기 위해서는 공진기 광축에 해당하고, 각각의 면에서 x 와 α 로 나타내지는 광선을 고려함으로써 광축의 위치를 찾을 수 있게 된다. 여기서 x 와 α 는 각각 공진기 광축으로부터의 거리와 이 축에 대해 기울어진 광선의 각도이다. 만일 열렌즈의 중심이 공진기 광축으로부터 Δ 만큼 이동된다면, 렌즈를 통과하는 모든 광선들은 $-\Delta p \left(= \frac{\Delta}{f} \right)$ 만큼 광축에 대해 기울어지게 된다. 여기서 렌즈를 세 부분으로 나눌 수 있는데, 첫번째와 마지막은 굴절능이 $p/2$ 이고 중심이 변하지 않는 렌즈이고, 두번째 소자는 위상 교정자로서 모든 광선의 각도를 $-\Delta p \left(= \frac{\Delta}{f} \right)$ 만큼 바꿔준다. 따라서 교정자의 오른쪽에 있는 K면에서 시작하여 공진기를 횡단하는 경우를 생각하면, 오른쪽에 대한 행렬 M_1' 은 다음과 같으며, 왼쪽에 대한 행렬 표현도 이와 유사하다.

$$M_1' = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{p}{2} & 1 \end{pmatrix} M_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{p}{2} & 1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} A_1' & B_1' \\ C_1' & D_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 - \frac{B_1}{2}p & B_1 \\ \frac{B_1}{4}p^2 - A_1p + C_1 & A_1 - \frac{B_1}{2}p \end{pmatrix} \quad (19)$$

식 (19)에서 알 수 있듯이 $B_1' = B_1$ ($B_2' = B_2$)가 된다. 만일 광선이 K면에서 좌표 (x, y) 를 갖고 있고, 이것이 공진기의 광축과 일치한다면, 오른쪽을 진행한 후 좌표는 $(x, -\alpha)$ 로 된다. 따라서 식 (19)를 이용하면 x 와 α 간의 관계를 찾을 수 있게 된다. 즉,

$$\begin{pmatrix} A_1' & B_1' \\ C_1' & A_1' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ -\alpha \end{pmatrix} \quad (20)$$

이므로,

$$\begin{pmatrix} A_1' - 1 & B_1' \\ C_1' & A_1' + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \alpha \end{pmatrix} = 0 \quad (21)$$

이 되고, 따라서 행렬식은 0이 됨을 쉽게 알 수 있다. 이는 식 (20)을 만족하는 식은 선형 의존성을 갖게 되며, 이 식에 대한 일반해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (A_1' - 1)x + B_1' \alpha &= 0 \\ C_1'x + (A_1' + 1) \alpha &= 0 \\ \therefore \alpha &= \frac{(1 - A_1')}{B_1'} x \end{aligned} \quad (22)$$

위상 교정자를 통과한 후 광선의 좌표는 식 (23)과 같이 바뀌게 된다. 즉 이는 식 (20)에 위상 교정자에 해당하는 행렬을 취한 것과 같게 된다.

$$x' = x, \quad \alpha' = -\alpha + \Delta p \quad (23)$$

만일 광선이 공진기의 나머지 부분을 통과한 후, 광선의 최종 좌표가 최초의 좌표와 같아야만 한다는 것을 상기한다면, x 와 α 에 연관된 두 개의 식을 식 (24)와 식 (20)을 통하여 얻을 수 있으며, 이 식의 해는 식 (26)과 같게 된다. 즉 x' , α' 에 행렬 M_2' 을 취하면 식 (20)에서의 α 를 식 (24)로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} A_2' & B_2' \\ C_2' & A_2' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ \alpha' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ -\alpha' \end{pmatrix} \quad (24)$$

여기서 α' 에 대해 전개하면,

$$\alpha' = \frac{(1 - A_2')}{B_2'} x' \quad (25)$$

이고, 식 (22)와 식 (23)을 이용하여 식 (25)를 풀면,

$$-\alpha + \Delta p = \frac{(1 - A_2')}{B_2'} x$$

$$x = \frac{\Delta p}{\left(\frac{A_1' - 1}{B_1} - 1 + \frac{A_2' - 1}{B_2} \right)} \quad (26)$$

가 된다. 식 (22)와 (26)은 공진기 오른쪽 부분의 축의 위치를 결정하게 되며, 왼쪽 부분의 축의 좌표는 식 (23)에 의해 주어진다. 따라서, 식 (24)의 $(x', -\alpha')$ 에 위상 교정자에 해당하는 행렬을 취하면 (x, α) 인 원점으로 돌아오게 된다. 즉,

$$-\alpha' + \Delta p = -(-\alpha + \Delta p) + \Delta p = \alpha \quad (27)$$

가 된다. 식 (26)에서,

$$B_2' = 0, \quad A_2' = -1 \quad (28)$$

이면, $|B_2| < |B_1|$ 인 경우, 식 (26)의 분모가 무한대가 되기 때문에,

$$\frac{dx}{d\Delta} = 0 \quad (29)$$

이 되며, 이로부터

$$\frac{d\alpha}{d\Delta} = 0, \quad \frac{d\alpha'}{d\Delta} = p \quad (30)$$

를 얻게 된다. 따라서 식 (29)의 조건이 만족되어 질 때, 공진기 축의 위치가 공진기 오른쪽에서는 완전히 안정화되지만 즉, 축의 변화가 없지만, 반면에 공진기 왼쪽에서는 렌즈 중심 위치의 변화가 공진기 축의 경사 각도를 변하게 한다. 따라서 앞에서 언급한 사항을 모두 종합하면, 내부 열렌즈의 굴절능과 중심위치가 변할 때 공진기 초면의 최대 안정도는 다음의 조건, 즉 식 (18)과 식 (28)을 동시에 만족하도록 공진기의 양쪽 부분을 선택하는 것이 필요하다. 즉,

$$B_2 = 0, \quad A_2 = -1, \quad p - \frac{A_1}{B_2} = -\frac{C_2}{2} \quad (31)$$

따라서 위의 조건을 만족하면, 공진기의 왼쪽 부분 ($|B_2| < |B_1|$)에서는 거울상에서의 field의 공간적 분포는 안정하게 되지만,

축의 위치는 변하게 되어 불안정하게 된다. 만일 공진기 왼쪽의 거울을 출력경으로 사용하면, 출력되는 빔의 경로가 바뀌게 된다. 반면에 공진기의 오른쪽에서는 광축의 위치는 변하지 않으나, A면에서 파면의 곡률반경이 변하게 된다. 따라서, 출력빔의 가로 분포는 시간에 따라 변하게 된다. 하지만, 기존에 사용되어온 공진기에서는 광축 위치의 안정화와 가로구조의 안정화가 불가능하다. 또한, 공진기가 식 (13)의 조건을 만족하는 경우에는, 렌즈에서의 field의 가로크기가 식 (14)에 의해 주어지며, $B_2=0$ 인 경우는 식 $g_1g_2=1/2$ 로 나타내는 안정도 그림내의 곡선에 해당한다. 여기서 g_1, g_2 는 공진기의 안정도 매개변수^[12]이다.

2.2. 열렌즈를 가진 고체 레이저 공진기의 비정렬감도

연속발전 혹은 높은 반복률에서 동작하는 고체 레이저에서 봉은 내부온도 기울기^[2,13] 때문에 렌즈의 성질을 갖는 매질로 작용한다. 봉의 초점거리 f 는 펄핑출력의 역에 비례하고 2개의 주평면은 봉의 중심으로부터 $l(n-1)/2n$ 거리에 펄핑출력과 무관하게 대칭적으로 위치해 있다. 여기서 l 은 봉의 길이, n 은 굴절률을 나타낸다. L_1, L_2 를 각각 봉의 주평면으로부터 곡률반경 R_1, R_2 를 갖는 두 거울까지의 거리라 하자. 여기서 봉을 변화하는 초점거리를 갖는 얇은 렌즈로 생각하고, 렌즈로부터 거리 L_1, L_2 에 거울이 놓여진 공진기를 생각한다. g_1, g_2 매개변수를 정의함으로써, 내부 렌즈를 가진 공진기에 대한 안정조건이 일반적인 공진기에 대해서 $0 < g_1g_2 < 1$ 로 표현될 수 있다.^[12] g_1, g_2 가 봉의 굴절능 $1/f$ 의 선형 함수이기 때문에 열렌즈의 굴절능으로서 직선을 따라 움직이는 (g_1, g_2) 평면에서 공진기를 표시하는 점이 변화한다. 쌍곡선 $g_1g_2=1$ 과 직선의 교점이 영역 1과 영역 2로 명명된 굴절능의 향으로 같은 쪽을 갖는 2개의 안정영역을 형성한다. $|L_1(1-L_1/R_1)| > |L_2(1-L_2/R_2)|$ 의 조건에서 2개의 안정영역의 경계가 다음과 같이 표현된다.

영역 1.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \tag{32}$$

$$= \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_1 - R_1} \tag{33}$$

영역 2.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1 - R_1} + \frac{1}{L_2 - R_2} \tag{34}$$

$$= \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2 - R_2} \tag{35}$$

부등식 $|L_1(1-L_1/R_1)| > |L_2(1-L_2/R_2)|$ 이 만족되지 못한다면 식 (33)과 (35)는 서로 바뀌어야 한다.

가우시안 모드에 대해서 굴절능 $1/f$ 의 함수로서 렌즈상의 TEM₀₀ 모드의 빔의 크기 (spot size) ω 가 각각의 안정영역 경계에서 발산하고, 2개의 안정 영역에서 최소값 ω_0 를 갖는다는 것을 증명할 수 있다. 내부 렌즈를 가진 공진기의 비정렬감도를 계산하기 위해서 거울이 무한히 크고 공진기에서 제한 구

경이 봉으로 표시된다고 가정하자. 거울의 비정렬에 따른 출력손실은 기하학적 모드 축에서의 변위와 렌즈상의 field intensity pattern의 변위에서 비롯된다. 따라서 2개의 비정렬감도 인자를 가정하게 된다.

$$S_i = \frac{d_i}{\omega_0 \alpha_i}, \quad i=1, 2 \tag{36}$$

여기서 ω_0 는 빔 허리를, α_i 는 i 번째 거울의 기울어진 각도를, 그리고 d_i 는 기울어진 각 α_i 에 따르는 렌즈상의 모드 축의 변위를 각각 나타낸다. 빔 허리 ω_0 가 영역 1과 영역 2에서 같다는 것과 $\omega_0^2 = (2\lambda/\pi) \Delta(1/f)$ ^[14]의 관계식으로 2개의 안정영역 폭 $\Delta(1/f)$ 와 단순하게 관련되어 있다는 것을 증명할 수 있다. 또한 안정영역 경계에서 멀리 떨어진 곳에서는 렌즈상의 빔의 크기는 약간의 변화만 있으므로 ω_0 로 근사될 수 있다. 거울의 기울어짐에 의한 회절손실의 증가와 이에 따른 외부출력의 감소가 비정렬감도 S_i , 구경의 크기와 관련된다. 이러한 추가적인 공진기 손실의 정확한 값은 공진기 모드에 대한 적분방정식^[6,7,9]을 풀어 얻어볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 S_i 는 공진기의 역학적 안정도를 구하는데 유용한 매개변수이고, 특별히 다른 종류의 공진기 구조를 비교하는 데에 유용하다. 공진기 매개변수의 향으로 S_i 를 표현하기 위해서 공진기 내의 모드 축이 결정되어야만 한다. 모드 축은 양쪽 거울 표면에 수직하고 거울의 곡률중심 C_1, C_2 를 지나간다. 더욱이 렌즈의 한쪽에서 모드 축은 다른 한쪽의 모드 축과 공액되고, 또한 렌즈에 의해서 생겨난 C_1, C_2 의 허상 C'_1, C'_2 을 지나가야만 한다. 이 4개의 점들이 하나의 모드 축을 결정한다. 그림 3에 거울 1이 비정렬된 공진기가 나타나 있고, 렌즈 공식과 작은 각 근사화를 이용하여 다음의 결과를 얻는다.

$$S_1 = \frac{1}{\omega_0 L_1 - R_1} \left(\frac{1}{L_1 - R_1} + \frac{1}{L_2 - R_2} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \tag{37}$$

S_2 에 대한 표현은 식 (37)에서 지수 1과 2를 교환하면 된다. 굴절능의 함수로서 S_i 에 대한 그림이 대응하는 (g_1, g_2) 그림과 함께 공진기 매개변수를 임의로 선택함으로써 그림 4에 보여진다. 그림 4와 식 (37)로부터, 굴절능이 식 (34)에서 주어진 값으로 근접해 갈 때 비정렬감도가 발산하고 그것은 영역 2의 2개의 안정경계 중의 하나와 일치한다는 것을 보일 수 있다. 이것은 굴절능의 값에 대해서 두 거울의 곡률중심이 서로

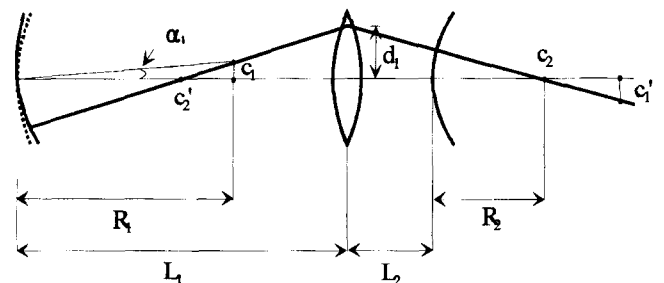


그림 3. 정렬되지 않은 공진기의 모드축. 모드축이 거울의 곡률 중심 C_1, C_2 와 렌즈에 의해 생긴 허상 C'_1, C'_2 을 통과한다.

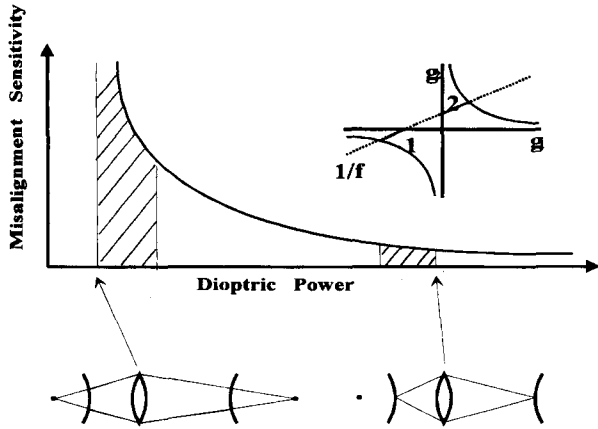


그림 4. 열렌즈 굴절능의 함수로서 비정렬감도를 나타낸 그림. 빗금 친 부분이 2개의 안정영역이다. 밑의 작은 공진기가 영역 1과 영역 2의 한쪽 끝에서 모드 구성을 보여준다. (g_1 , g_2) 그림 역시 볼 수 있다.

를 향하여 붐에 의해서 형상화된다는 것을 살펴보면 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 거울이 약간 기울어지기만 해도 모드 축은 90° 회전을 하여 매우 높은 정렬의 손실을 유발하게 된다. S_1 의 발산은 영역 2의 한 가장자리에서 곡률중심이 렌즈를 통하여 공액된다는 가정 하에서 영역 1로부터 영역 2를 구별하는데 이용된 기준이다. 그것은 영역 1의 한 가장자리에서 두 거울이 공액된 평면상에 있다는 것을 의미한다(그림 4). 따라서, 특별히 2개의 안정범위가 멀리 떨어져 있을 때 영역 1이 일반적으로 영역 2보다 비정렬에 훨씬 덜 민감하다는 것이 분명하다. 대조적으로 두 영역이 더 가까워진다면 이러한 차이는 덜하게 되고 특별한 경우에 있어서 두 영역이 합쳐진다면 차이가 없어질 수도 있다. 두 영역은 어떤 공진기 구조에 대하여 존재하고 굴절능을 변화시키기에 의해서 얻어진다고 볼 수 있다. 이러한 생각으로부터 역학적 안정성을 높이기 위해서 열렌즈를 가진 고체 레이저 공진기가 펄출력의 범위를 통하여 영역 1에서 동작 가능하도록 설계되어야 한다. 비정렬감도의 대략적인 평가가 식 (32)~(35)와 (37)의 경계에서 S_1 의 값을 계산함으로써 얻어질 수 있다. 공진기의 전체 비정렬감

도는 $S = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$ 로 정의되어진다.^[14]

III. 실험

3.1. 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기의 구성 요소

Nd:YAG 붐은 Laser Modules 사의 제품을 사용하였는데 길이가 3.5 inch (~8.9 cm), 직경이 5 mm이고, 일반적인 것과 붐 한쪽 끝에 곡률이 있는 것 ($f=2.7$ cm)의 두가지 종류를 사용하여 서로 비교해 보았다. Nd:YAG 붐을 밀도반전^[15] 상태를 증가시켜 발생한 광자들을 유도방출^[16] 과정에 참여시켜 발진이 일어나게 하기 위해서는 광 펌핑^[16]을 해야 하는데 이를 위하여 여기용 광원으로 Laser Modules 사의 Xe 플래시 램프를 사용하였다. 또한 Nd:YAG 레이저($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$)를 발진시키기 위한 전원공급장치 및 펄스형성회로로 Analog Modules 사의 model 8800 laser controller를 사용하였다. 레이저를 장시간 작동시키거나 반복률이 높은 경우에는 입력에너지의 상당한 양이 열로 바뀌어 펌핑 챔버 내에 남아있게 된다. 실제로 입력에너지의 90% 정도가 열로 바뀌는데, 이 열은 YAG 붐의 온도분포에 영향을 주어 굴절률의 공간적 변화를 일으키기 때문에 출력펄스 형태가 바뀌며, 심할 경우 붐에 손상이 가며 발진이 일어나지 않을 수도 있게 된다. 이러한 이유로 펌핑 챔버 내부를 냉각된 증류수를 통과시켜 붐과 플래시 램프를 냉각시키기 위하여 Bay Voltex 사의 냉각장치를 설치하였다. 공진기의 출력경으로는 재질이 BK-7이고 반사율이 1.064 μm 에 대해서 50%인 평면거울을 사용하였고, 반사경으로는 평면거울, 오목거울, 렌즈, 삼면프리즘^[17] 등의 다양한 종류의 광학계를 구성하여 서로 비교해 보았다.

3.2. 실험 장치 및 방법

다양한 종류로 구성된 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기에서 출력경이 기울어짐에 따라 레이저의 출력에너지가 얼마나 변하는가를 관측하기 위하여 그림 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험한 공진기 종류에 대한 자세한 설명은 IV. 실험결과 및 논의에서 다루기로 한다. 실험의 순서는 다음과 같다.

① He-Ne 레이저 빔($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)을 계수기 scaler) 중앙의

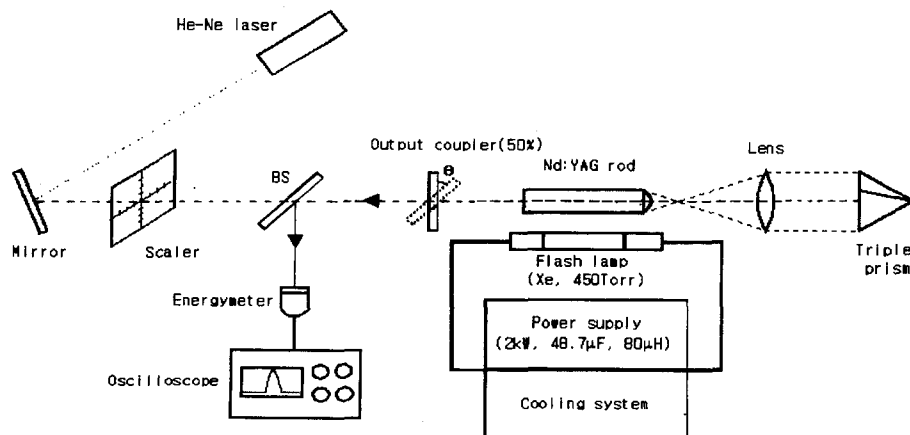


그림 5. 비정렬감도를 측정하기 위한 실험장치.

구멍을 통과 시키고 최대 출력에너지를 얻기 위하여 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기를 정렬한다.

- ② 레이저 공진기의 출력경의 각도를 좌우로 변화시켜 출력경에서 반사된 He-Ne 레이저 빔이 계수기의 눈금에 맞히도록 한다.
- ③ 계수기 상에 반사된 He-Ne 빔을 중앙의 구멍으로부터 거리를 측정하여 이를 각도 단위계(mrad)로 환산한다.
- ④ Nd:YAG 레이저를 발진시켜(펄스 에너지: 10 J, 펄스 반복률: 10 Hz) 출력경의 각도변화가 있는 후의 빔을 에너지측정기와 오실로스코프를 통하여 전압을 측정한다.
- ⑤ 측정된 전압을 에너지 단위계(mJ)로 환산한다.
- ⑥ ②~⑤의 과정을 계수기 상의 변위를 달리하여 반복한다.
- ⑦ 측정한 결과를 가로축은 각도(mrad), 세로축은 출력경의 각도변화가 있을 때의 출력에너지 값을 최대 출력에너지, 즉 출력경의 각도변화가 없을 때의 값으로 나눈 규격화된 출력에너지로 하여 그린다.
- ⑧ 그림에서 최대 출력에너지가 반으로 줄어드는 점의 각도 변위, 즉 반치폭을 계산한다.

IV. 실험 결과 및 논의

4.1. 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기의 여러 가지 유형

먼저 그림 6에 보이는 다른 종류의 공진기에 대하여 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지의 그림에서 반치폭을 구해 보았다. A는 일반적인 붕을 사용하였고 반사경으로 반사율이 99.5%, 곡률 반경이 1m인 오목거울을 이용하였다. 공진기 길이 D 는 34cm로 다음 식과 같은 공진기 안정화 조건^[16]을 만족시킨다.

$$0 < \left(1 - \frac{D}{r_1}\right) \left(1 - \frac{D}{r_2}\right) < 1 \quad (38)$$

여기서 r_1, r_2 는 출력경과 반사경의 곡률반경을 나타내고 평면거울의 곡률반경은 무한대로 생각한다. 이러한 구조의 공진기

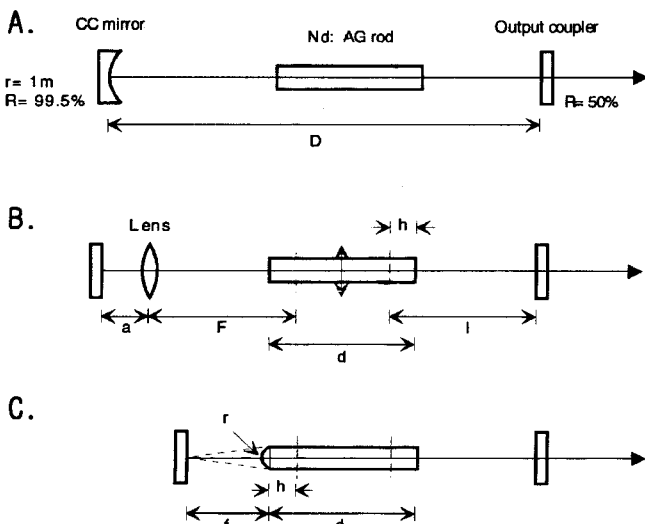


그림 6. 다른 종류의 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기.

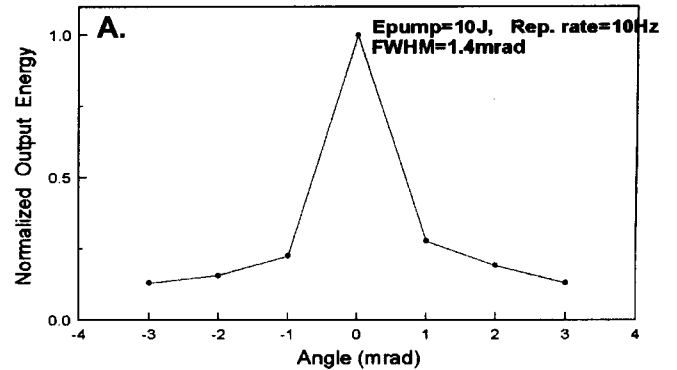


그림 7. A 공진기에서 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지 특성.

의 각도 반치폭은 그림 7에 나타난 것처럼 1.4 mrad으로 대단히 작은 값을 보여 레이저의 출력에너지가 출력경의 각도변화에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다.

B는 연속발진 레이저에서 시도되었던^[17] 구조로 역시 일반적인 붕에 반사경으로 평면거울과 렌즈로 구성되었는데, 열렌즈 효과를 고려하여 주평면으로부터 붕의 한쪽 끝까지의 거리 h , 렌즈와 반사경 사이의 거리 a 를 각각 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{d}{2n} \quad (39)$$

$$a = F + F^2 \left(\frac{1}{2l} - \frac{1}{f} \right) \quad (40)$$

d 와 n 은 각각 붕의 길이와 굴절률을 나타내고 F 는 렌즈의 초점거리, f 는 열렌즈의 초점거리, l 은 출력경에서 가까운 주평면까지의 거리를 나타낸다. 레이저 빔이 펄스 형태이기 때문에 f 를 거의 무한대라 가정하면 $1/f$ 는 0이되고 출력경에서 주평면까지의 거리 l 을 F 와 같게 놓으면 a 는 $1.5F$ 가 되어 쉽게 배치를 할 수 있다. 그 결과가 그림 8에 나타나있다. 반치폭이 83 mrad으로 가장 큰 허용각을 가졌으나, 이러한 구조의 약점은 $\Phi = 1.27 \lambda / 2\omega_0$ (λ : 레이저의 파장, ω_0 : 빔 허리)로 표현되는 빔 발산각이 ~ 20 mrad 정도로 매우 크다는 것이다.

C 역시 연속발진 레이저에서 시도되었던^[18] 구조이며 한쪽 끝에 곡률($f \sim 2.7$ cm)이 있는 붕과 반사경으로 평면거울을 사용하였다. B와 마찬가지로 주평면으로부터 붕의 한쪽 끝까지의 거리는 $h = d/2n$ 의 식을 이용하여 구할 수 있고, 붕의 곡률의 초점거리 f 는 아래와 같은 식으로 표현되어진다.

$$f = \frac{r}{n-1} \quad (41)$$

여기서 r 은 붕의 곡률반경, n 은 붕의 굴절률을 나타낸다. 이러한 구조로 구성된 공진기는 붕의 곡률의 초점거리에 반사경이 위치해있기 때문에 연속발진의 경우와 달리 펄스 형태의 레이저에서는 펄스에너지가 높은 경우 반사경이 손상을 입게 되고, 또한 반사경의 각도변화에 출력에너지가 대단히 민감하게 반응한다는 단점을 가지고 있다. 그러한 이유로 이 경우에

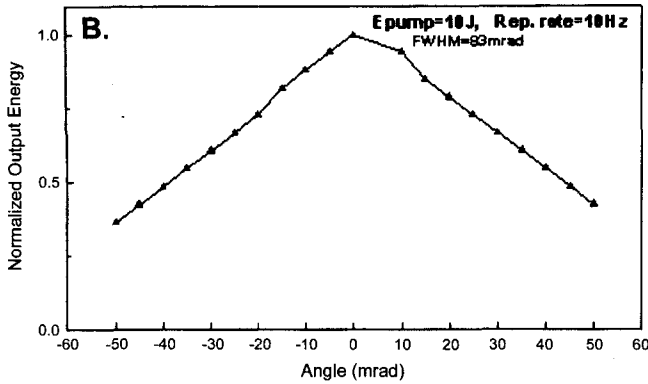


그림 8. B 공진기에서 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지 특성.

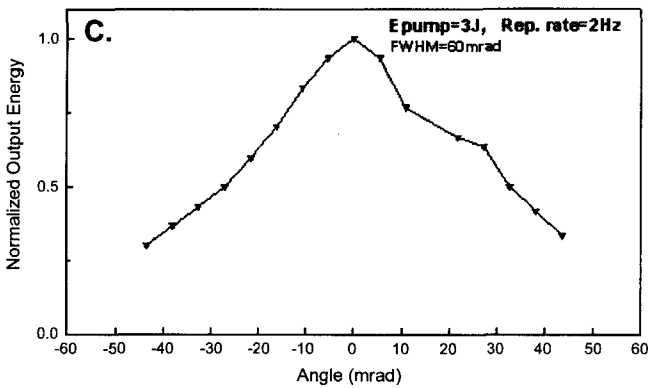


그림 9. C 공진기에서 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지 특성.

는 펌프에너지는 3 J, 반복률은 2 Hz로 낮추어 실험을 해보았고, 그 결과는 반치폭이 60 mrad으로 비교적 큰 허용각을 보였다(그림 9).

4.2. 새로운 구조의 펄스형 Nd:YAG 레이저 공진기

D가 새롭게 시도했던 구조의 공진기 형태로 그림 10에 보이는 것처럼 곡물이 있는 봉과 뒤쪽 광학계는 렌즈와 삼면프리즘으로 구성하였다. 이러한 구조의 공진기가 안정한 이유를 ABCD 전파행렬을 이용하여 설명한다. 어떠한 광학부품을 지나가기 전과 후의 광선의 광축으로부터 높기와 각을 각각 (y_i, α_i) , (y_f, α_f) 라 한다. 그러면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{pmatrix} y_f \\ \alpha_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_i \\ \alpha_i \end{pmatrix} \quad (42)$$

여기서 행렬 ABCD는 광학부품을 지나가는 광선을 의미한다. 만약 행렬 ABCD가 단위행렬이라면 광학부품을 지나가기 전과 후의 광선의 행렬식이 같아지게 되므로 안정된 형태를 취하고 있다고 생각할 수 있다. 각각의 행렬식은 다음과 같다.^[19]

$$\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} : \text{자유공간에서의 전파 } d \quad (43)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix} : \text{렌즈 } F \quad (44)$$

D.

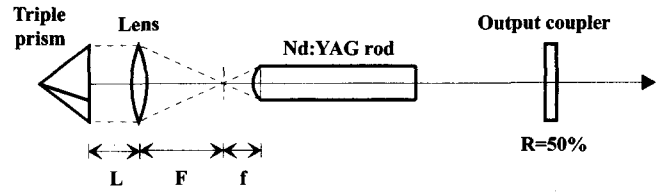


그림 10. 새로운 구조의 공진기 그림.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r} & 1 \end{pmatrix} : \text{거울 } r \quad (45)$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} : \text{삼면프리즘} \quad (46)$$

위의 행렬들을 이용하여 D와 같은 구조의 공진기를 해석해 보면 렌즈의 초점 평면에서 시작하여 렌즈를 지나 삼면프리즘에 투과, 반사되어 다시 렌즈를 지나 원래의 초점평면으로 오는 행렬은 렌즈와 삼면프리즘 사이의 거리 L이 렌즈의 초점거리 F와 같을 때 다음 식처럼 단위행렬이 되어 안정된 구조를 가지고 있다고 생각할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (47)$$

결과가 그림 11에 나타나 있다. 각도 반치폭이 61 mrad으로 큰 허용각을 보였으며 이러한 구조의 공진기는 출력에너지가 렌즈와 삼면프리즘의 기울어짐에도 민감하게 반응하지 않았다.

다음으로 D와 같이 행렬식이 단위행렬인 경우와 단위행렬이 아닌 경우를 비교해 보기 위하여 E와 같은 구조의 공진기를 도입하였다. E는 그림 12에 보이듯 D의 구조에 삼면프리즘 대신 평면거울을 이용한 것인데 역시 렌즈에서 반사경까지의 거리를 렌즈의 초점거리와 같다고 놓고 행렬식을 계산해 보면 $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ 이 되고 반치폭은 7.3 mrad으로 대단히 낮은 허용각을 가짐을 알 수 있다(그림 13). 이것으로 전파행렬이 단위행

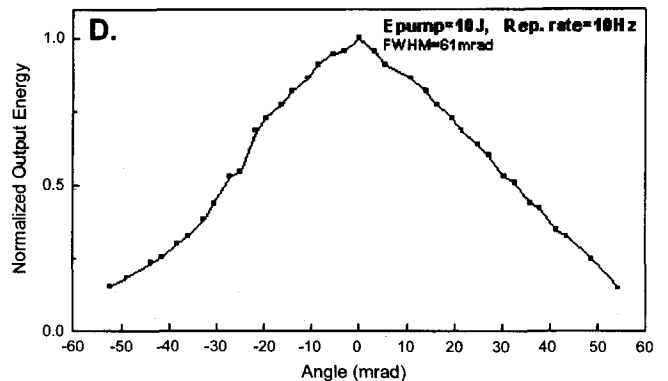


그림 11. D 공진기에서 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지 특성.

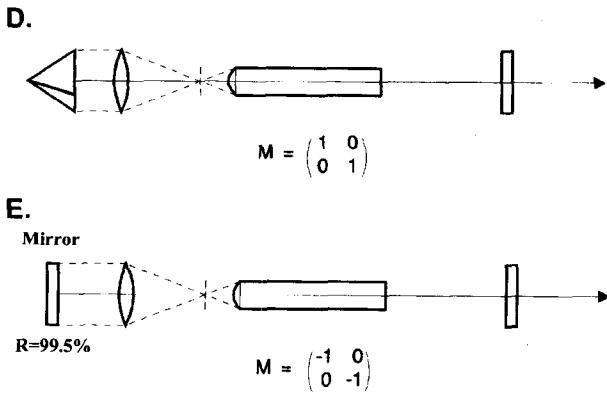


그림 12. 전파행렬이 단위행렬인 경우와 아닌 경우의 비교.

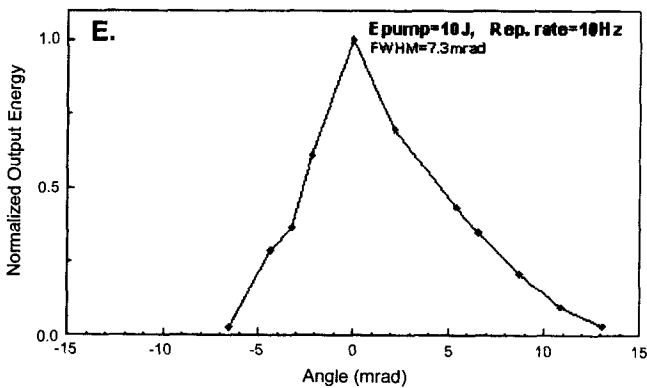


그림 13. E 공진기에서 출력경의 각도변화에 따른 규격화된 출력에너지 특성.

렬인 D의 경우가 출력경의 각도변화에 훨씬 더 안정하다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

다양한 종류로 구성된 펄스형 Nd:YAG 레이저($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$) 공진기에서 출력경의 각도변화에 따라 레이저의 출력에너지가 얼마나 변하는가를 측정하였다. 측정된 자료를 출력경의 각도변화에 대한 규격화된 출력에너지로 그려 최대 출력에너지가 반으로 줄어드는 점의 각도변위인 반치폭(FWHM)을 측정하여 5가지 종류의 공진기에 대하여 비교 분석해 보았다. 실험에 이용한 Nd:YAG 봉은 일반적인 것과 한쪽 끝에 곡률이 있는 것을 사용하였고, 출력경으로는 반사율 50%의 평면거울, 반사경으로는 평면거울, 오목거울, 렌즈, 삼면프리즘 등의 다양한 조합으로 공진기를 구성하였다.

실험하였던 공진기중 각도 반치폭이 가장 컸던 것은 B와 같은 구조를 가진 공진기로서 83 mrad의 허용각을 가졌고 이는 1.4 mrad의 최소 반치폭을 가진 A 공진기에 비하여 약 60배 정도였으나 이러한 구조의 공진기는 빔 발산각이 크다는 단점을 보였다. D구조를 가진 새로운 공진기 구조를 제시하였고, 이것은 61 mrad의 높은 반치폭을 보였으며 반사경의 각도변화에도 덜 민감하였다.

ABCD 전파행렬 방법을 이용하여 이러한 새로운 구조를 가진 공진기의 전파행렬이 단위행렬이 되어 높은 정렬 안정성을 가짐을 증명하였다. 전파행렬이 단위행렬이 아닌 경우와 비교하기 위하여 E구조의 공진기를 도입하였고, 이것은 7.3 mrad의 작은 허용각을 보여 D 공진기의 정렬 안정성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] O. O. Silichev, *Sov. J. Quantum Electron.* **13**, 172 (1983).
- [2] W. Koehner, *Appl. Opt.* **9**, 2548 (1970).
- [3] V. R. Kushnir, *Sov. J. Quantum Electron.* **8**, 711 (1978).
- [4] R. B. Chesler and D. Maydan, *J. Appl. Phys.* **43**, 2254 (1972).
- [5] S. De Silvestri, P. Laporta, and V. Magni, *Optics Comm.* **59**, 43 (1986).
- [6] J. Kotik and M. C. Newstein, *J. Appl. Phys.* **32**, 178 (1961).
- [7] A. G. Fox and T. Li, *Proc. IEEE* **51**, 80 (1963).
- [8] R. J. Freiberg and A. S. Halsted, *Appl. Opt.* **8**, 355 (1969).
- [9] R. L. Sanderson and W. Streifer, *Appl. Opt.* **8**, 2241 (1969).
- [10] R. Hauck, H. P. Kortz, and H. Weber, *Appl. Opt.* **19**, 598 (1980).
- [11] Yu. A. Anan'ev, *Laser Resonators and the Beam Divergence Problem* (Adam Hilger, 1992) p. 11.
- [12] D. C. O'Shea, W. R. Callen, and W. T. Rhodes, *Introduction to Lasers and Their Applications* (Addison-Wesley, 1978) p. 73.
- [13] J. D. Foster and L. N. Osterink, *J. Appl. Phys.* **41**, 3656 (1970).
- [14] V. Magni, *Appl. Opt.* **25**, 107 (1986).
- [15] D. C. O'Shea, W. R. Callen, and W. T. Rhodes, *Introduction to Lasers and Their Applications* (Addison-Wesley, 1978) p. 62.
- [16] O. Svelto, *Principles of Lasers* (Plenum Press, 1982) p. 2, p. 82, p. 132.
- [17] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, 1987) p. 169.
- [18] Russia patent # N1777479.
- [19] A. E. Siegman, *Laser* (Oxford University Press, 1986) p. 585.

A Study on configuraion of a laser resonator with high alignment stability

Hyuk Jin Cha

Lab. for Quantum Optics, KAERI, Taejon 305-353, Korea

Hong Chu, Young Min Jhon, and Sang Sam Choi

Photonics Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

Jae Kyung Hyun

Department of Physics, KyungHee University, Seoul 130-701, Korea

(Received January 25, 2000, Revised manuscript received July 26, 2000)

The variations of output energy due to tilt output coupler for different types of pulsed Nd:YAG laser resonators were compared by measuring FWHM (full width at half maximum) which means the width of angle displacement where maximum output energy decreases to half value. We proposed a new configuration of pulsed solid-state laser resonator which had high FWHM for tilting of output coupler and which was little sensitive for tilting of rear optics. We proved that our laser resonator had high alignment stability using ABCD ray matrix method because the ray matrix of such a resonator corresponded to unit matrix.

OCIS codes : 140.3410, 140.4780, 140.3530.