

Nd:YAG 레이저 붕의 열렌즈 효과를 고려한 열복굴절에 의한 레이저 빔 편광 왜곡의 수치 계산

박종락 · 신윤섭

한국과학기술원 물리학과

윤태현

한국표준과학연구원

(1999년 3월 9일 받음, 1999년 5월 6일 수정본 받음)

레이저 붕의 열렌즈 효과를 고려하여 열복굴절에 의해 발생된 레이저 빔의 편광 왜곡을 계산할 수 있는 모델이 제안되었고 수치 계산이 수행되었다. 계산에 사용된 모델은 근축광선 이론을 바탕으로 광학적 경로를 고려하고 있다. 계산 결과를 존스 행렬을 사용한 것과 비교하였고, 수치 모델의 타당성을 검증하기 위해 최근 수행된 실험에 적용하여 계산 결과가 실험결과와 일치하는 경향을 보임을 확인하였다.

I. 서 론

펄프광의 흡수에 의한 레이저 매질 내부의 열 생성과 매질 측면을 따라 일어나는 냉각은 결국 레이저 매질에 불균일한 온도 분포를 만들어 낸다. 연속 동작 또는 고반복 동작되는 레이저 붕의 경우 포물선 형태의 온도분포를 갖게 된다.^[1] 굴절률의 온도 의존성에 의해 열렌즈 효과가 발생하게 되며, 광탄성 효과에 의한 굴절률의 응력 의존성 때문에 열복초점(thermal bifocusing)과 열복굴절 효과가 발생하게 된다.^[1,2] 열렌즈와 열복굴절 효과에 의해 발생하는 광의 왜곡은 빔의 발산도, 편광 상태 등과 같은 레이저 빔의 성질에 매우 큰 영향을 준다.^[3-8]

열복굴절에 의한 편광 왜곡은 지금까지 존스 행렬을 사용하여 계산되었고, 이 방법은 열복굴절 보상법의 분석과^[9] 빔 quality의 계산에도^[10] 사용되어 왔다. 열복굴절의 보상은 레이저 붕을 통과한 반지를 방향으로 편광된 광과 방위각 방향으로 편광된 광이 붕 단면의 각 지점에서 똑같은 위상 지연을 경험하도록 하여 이루어진다. 두 개의 동일한 레이저 붕 사이에 90° 편광회전기를 삽입하거나 하나의 레이저 붕과 거울 사이에 45° 편광회전기를 삽입하여 두 편광이 서로 바뀌게 만들어 주어 동일한 위상지연을 실현할 수가 있다. 이 방법은 낮은 펄핑 파워 영역에서는 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나 펄핑 파워가 증가함에 따라 열렌즈 효과 때문에 광선은 광축에 평행하게 진행하지 못하고 두 레이저 붕에서 다른 경로를 경험하게 되어 열복굴절 보상은 불완전하게 된다.^[11] 존스 행렬을 이용하는 방법은 열렌즈 효과를 고려하지 못하므로 위의 사실을 분석할 수가 없다.

본 논문에서는 레이저 붕의 열렌즈 효과를 고려하여 열복굴절에 의해 발생된 레이저 빔의 편광 왜곡을 계산할 수 있는 수치 모델에 대해 기술하였다. 제안된 모델에서는 근축광선 이론을 바탕으로 광학적 경로를 고려하고 있다. 본 논문의 모델

을 사용한 계산과 존스 행렬법 계산의 결과를 비교하였다. 최근 편광회전기와 광학계를 동시에 사용하여 열복굴절을 보상할 수 있는 방법이 제안되었는데,^[11] 그 문헌에서 수행된 실험에 본 논문의 모델을 적용하여 계산을 수행하였다.

II. 수치 모델

레이저 붕 내부의 균일한 열 생성과 무한히 긴 레이저 붕의 원통형 측면을 따라 일어나는 냉각을 가정하면, 반경 r 방향의 온도 분포를 다음과 같이 구할 수 있다.^[1]

$$T(r) = T(R) + \Delta T [1 - (r/R)^2] \quad (1)$$

여기서, R 은 레이저 붕의 반경이며, ΔT 는 레이저 붕의 중심과 표면의 온도차인데 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta T = P_a / 4\pi LK \quad (3)$$

여기서, P_a 는 레이저 붕에 흡수되어 열로 변환된 단위 시간당 에너지, L 은 레이저 붕의 길이, K 는 레이저 붕의 열전도도를 뜻한다. 반지를 방향으로 편광된 광에 대한 굴절률 $n_r(r)$ 과 방위각 방향으로 편광된 광에 대한 굴절률 $n_\theta(r)$ 은 다음과 같이 주어지는데, 렌즈 유사 매질(lens-like medium)과 동일한 굴절률 분포를 갖고 있음을 알 수 있다.

$$n_r(r) = n_0 - \frac{n_{2r}}{2} r^2 \quad (3-1)$$

$$n_\theta(r) = n_0 - \frac{n_{2\theta}}{2} r^2 \quad (3-2)$$

Nd:YAG의 경우 n_{2r} 과 $n_{2\theta}$ 는 다음과 같다.

$$n_{2r} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_r \right) \quad (4-1)$$

$$n_{2\theta} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_\theta \right) \quad (4-2)$$

여기서, n_0 는 중심의 굴절률, dn/dT 는 굴절률의 온도 변화 계수, α 는 열팽창 계수, $C_{r,\theta}$ 는 r 편광과 θ 편광에 대한 광탄성 효과를 나타내는 계수이다.

본 논문에서 제안된 수치 계산 방법에서는 레이저 붐의 열렌즈 효과를 고려하기 위해 레이저 붐 입사면의 각 지점에서 r 편광(반지름 방향으로의 편광)과 θ 편광(방위각 방향으로의 편광)의 광선 각각에 대해 광선 추적을 수행하며 광학적 경로를 계산하는 방식을 사용한다. 앞에서 지적한 바와 같이 반지름 방향에 대해 포물선 형태의 온도 분포를 갖고 있는 레이저 붐은 r 편광된 광과 θ 편광된 광 각각에 대해 렌즈 유사 매질과 같이 작용하므로 렌즈 유사 매질에서의 광선 추적에 사용될 광선 전달 행렬과 광학적 경로에 대한 표현식을 아래에 기술한다. 렌즈 유사 매질의 ABCD 광선 전달 행렬 M_{LLM} 은 식(5)와 같이 주어지며,^[12] 광축 z 방향으로 거리 L 을 통과했을 경우의 광학적 경로 O_{LLM} 은 식(6)으로부터 구할 수 있다.

$$M_{LLM} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma z & (n_0 \Gamma)^{-1} \sin \Gamma z \\ -(n_0 \Gamma) \sin \Gamma z & \cos \Gamma z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $\Gamma \equiv (n_2/n_0)^{1/2}$ 이고, 굴절률 분포는 $n(r) = n_0 - (n_2/2)r^2$ 이다.

$$O_{LLM} = \int n dl = \int n \sqrt{dr^2 + dz^2} = \int_0^L n(z) \sqrt{\left(\frac{dr}{dz}\right)^2 + 1} dz \quad (6)$$

광선의 초기 위치 $r(0) = r_0$ 와 초기 기울기 $r'(0) = r'_0$ 로 $n(z)$ 와 dr/dz 를 표현하면 식(5)로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$n(z) = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \Gamma^2 (r_0 \cos \Gamma z + r'_0 (n_0 \Gamma)^{-1} \sin \Gamma z)^2 \right] \quad (7)$$

$$\frac{dr}{dz} = -r_0 \Gamma \sin \Gamma z + r'_0 n_0^{-1} \cos \Gamma z \quad (8)$$

다음 장에서 수치 계산이 수행될 몇 가지의 열부굴절 보상법은 두 개의 레이저 붐 사이에 자유 공간과 90°편광회전기만이 삽입되어 있거나 이에 더하여 한 개 혹은 두 개의 얇은 렌즈가 삽입되어 있는 구조를 갖고 있는데, 이러한 구조에 대한 계산을 수행하기 위해 자유 공간과 얇은 렌즈에 대한 광선 전달 행렬과 광학적 경로에 대한 표현식을 아래에 기술한다. 자유 공간의 ABCD 광선 전달 행렬 M_{FS} ^[12]와 광축 z 방향으로 거리 d 를 진행했을 경우의 광학적 경로 O_{FS} 는 다음과 같다.

$$M_{FS} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$O_{FS} = \sqrt{(r(d) - r_0)^2 + d^2} = \sqrt{(r'_0 d)^2 + d^2} = d \sqrt{r_0'^2 + 1} \quad (10)$$

중심의 두께가 t , 굴절률이 n 이고 초점거리가 f 인 얇은 렌즈의 경우 ABCD 광선 전달 행렬 M_{TL} ^[12]과 렌즈의 각 위치를 지나는 광선들이 겪게 되는 광학적 경로 O_{TL} ^[13]은 다음과 같다.

$$M_{TL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$O_{TL} = nt - \frac{r^2}{2f} \quad (12)$$

렌즈의 중심을 지나지 않는 광선과 렌즈의 중심을 지나는 광선 사이의 광학적 경로 차이는 $-r^2/2f$ 임을 알 수 있다. 지금까지의 결과를 정리하면 표 1과 같다.

III. 수치 계산 결과 및 분석

아래에 기술된 모든 수치 계산은 길이 150 mm, 반경 5

표 1. Ray transfer matrices and optical path lengths

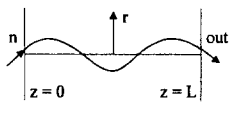
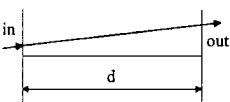
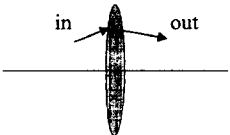
| Optical Element | Ray Transfer Matrix | Optical Path Length |
|--|---|--|
| Lens-Like Medium  | $\begin{bmatrix} \cos \Gamma z & (n_0 \Gamma)^{-1} \sin \Gamma z \\ -(n_0 \Gamma) \sin \Gamma z & \cos \Gamma z \end{bmatrix}$ <p>refractive index : $n(r) = n_0 - (n_2/2)r^2$ $\Gamma \equiv (n_2/n_0)^{1/2}$</p> | $\int_0^L n(z) \sqrt{\left(\frac{dr}{dz}\right)^2 + 1} dz$ $n(z) = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \Gamma^2 (r_0 \cos \Gamma z + r'_0 (n_0 \Gamma)^{-1} \sin \Gamma z)^2 \right]$ $\frac{dr}{dz} = -r_0 \Gamma \sin \Gamma z + r'_0 n_0^{-1} \cos \Gamma z$ |
| Free Space  | $\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ <p>distance : d</p> | $d \sqrt{r_0'^2 + 1}$ |
| Thin Lens  | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$ <p>focal length : f center thickness : t refractive index : n</p> | $nt - \frac{r^2}{2f}$ |

표 2. Physical parameters of Nd:YAG used for numerical investigations^[1]

| Parameter | Value |
|--|----------------------|
| Refractive index n_0 | 1.82 |
| Thermal conductivity K [$Wcm^{-1}K^{-1}$] | 0.14 |
| Thermal expansion coefficient α [K^{-1}] | 7.5×10^{-6} |
| Temperature coefficient of refractive index dn/dt [K^{-1}] | 7.3×10^{-6} |
| Photoelastic coefficient for radial polarization C_r | 0.017 |
| Photoelastic coefficient for tangential polarization C_θ | -0.0025 |

mm의 Nd:YAG 레이저 봉에 대해 수행되었으며, 4 mm의 반지름을 갖는 평평한 모양(top hat shape)의 공간 강도 분포를 갖는 입력빔을 가정하였다. 입력빔의 강도는 1로 하였다. 계산에 사용된 Nd:YAG에 대한 물리적 파라미터는 표 2에 정리하였다. 입사면(첫번째 레이저 봉의 입사면)을 동일한 면적을 갖는 작은 정사각형 셀들로 분할한다. 입력빔의 강도와 편광이 결정되면 입사면의 분할된 각 지점에서 r 편광과 θ 편광의 최초 광강도가 각각 결정된다. 입사면의 각 지점에서 r 편광과 θ 편광 각각에 대해 출사면(첫번째 혹은 두 번째 레이저 봉의 출사면)까지 놓여 있는 모든 광학 소자에 걸쳐 광선 추적과 광학적 경로 계산을 수행하면, 출사면에서의 r 편광과 θ 편광에 대한 광강도 분포와 위상 분포를 구할 수 있다. 이 결과를 종합하여 편광 왜곡 손실과 편광 왜곡된 빔의 공간 강도 분포를 계산하였다. 실제 계산에서는 반지름 방향의 한 축 위의 점들에서만 광선 추적과 광학적 경로 계산이 수행되었는데, 계산에서 다루고 있는 계가 방위각 방향에 대해 대칭성을 갖고 있기 때문에 이 계산 결과만으로도 출사면의 각 지점에서의 광강도 분포와 위상 분포를 구할 수 있다.

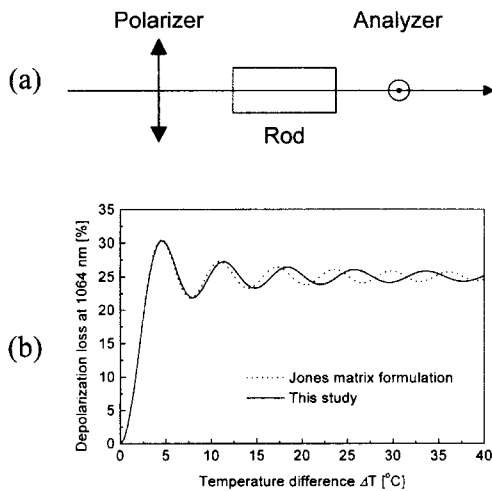


그림 1. Numerically investigated a one laser rod scheme: (a) a laser rod is placed between two polarizers which are orthogonal; (b) calculated depolarization losses using Jones matrix formulation and the numerical model proposed in this paper.

먼저 그림 1(a)와 같이 선편광된 레이저 빔이 레이저 증폭기를 단일 경로로 통과하는 경우에 대하여 존스 행렬을 사용한 방법과 본 논문에서 제안한 방법으로 수치 계산을 수행하였다. 편광 왜곡 손실에 대한 계산 결과는 그림 1(b)와 같다. 이 경우에 대한 존스 행렬 방법을 살펴보자. 직교좌표계 (x, y) 에서 복굴절을 지닌 레이저 봉의 존스 행렬 B 는 다음과 같다.^[10]

$$B = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta e^{-ikL_n(r)} + \sin^2 \theta e^{-ikL_n(\theta)} & \sin \theta \cos \theta (e^{-ikL_n(\theta)} - e^{-ikL_n(r)}) \\ \sin \theta \cos \theta (e^{-ikL_n(\theta)} - e^{-ikL_n(r)}) & \cos^2 \theta e^{-ikL_n(\theta)} + \sin^2 \theta e^{-ikL_n(r)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 k 는 입사 레이저의 진공 중에서의 전파 상수이다. 따라서 x 축 방향으로 편광된 빔 I_{in} 이 입사되었을 경우, 편광이 왜곡되어 y 축 방향으로 편광된 출력 빔의 강도 I_{depol} 은 다음과 같다.

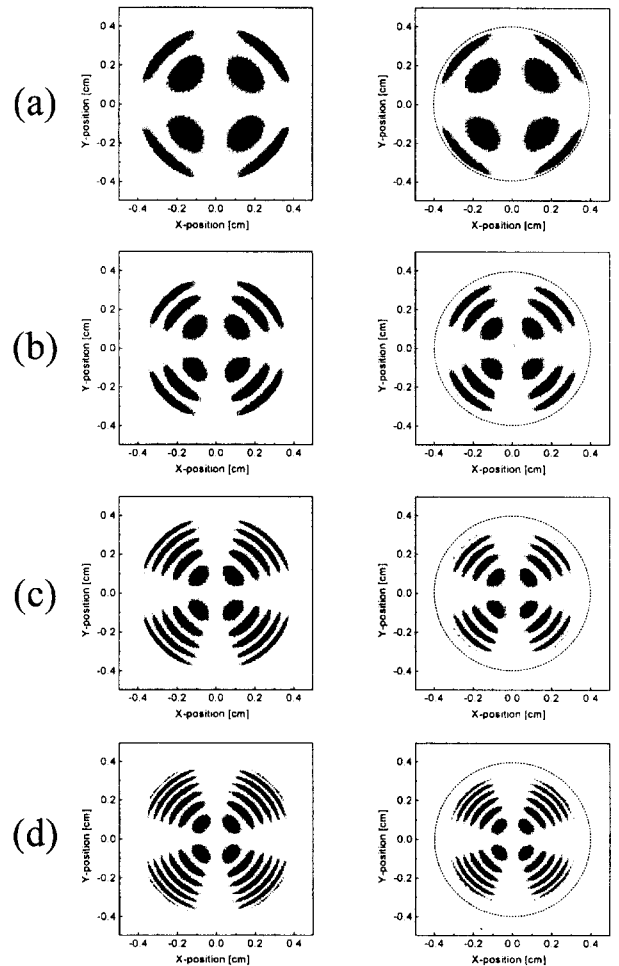


그림 2. Spatial intensity profiles of depolarized beams for the laser scheme of Fig. 1(a) with the temperature differences $\Delta T = 10^\circ C$ for (a), $20^\circ C$ for (b), $30^\circ C$ for (c) and $40^\circ C$ for (d). The left and right column show the spatial intensity profiles calculated using Jones matrix formulation and the numerical model proposed in this paper, respectively. The dotted circles in the right column indicate the initial beam size.

$$\begin{aligned} \frac{I_{depol}}{I_{in}} &= \left| \sin \theta \cos \theta (e^{-ikL n_{\theta}(r)} - e^{-ikL n_r(r)}) \right|^2 \\ &= \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{kL(n_{\theta}(r) - n_r(r))}{2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

편광 왜곡 손실(I_{depol}/I_{in})_{total}은 위의 식을 반경 R_0 인 빔의 단면에 대해 적분하면 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{I_{depol}}{I_{in}}\right)_{total} &= \frac{1}{2\pi R_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{kL(n_{\theta}(r) - n_r(r))}{2}\right) r dr d\theta \end{aligned} \quad (15)$$

온도 차이 ΔT 가 작은 경우에는 두 결과가 서로 일치하고 있으나, ΔT 가 증가함에 따라 본 논문의 방법으로 계산된 편광 왜곡 손실은 그 진동의 주기가 존스 행렬을 사용한 결과보다 길어지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 열렌즈 효과에 의해 레이저 빔이 상대적으로 열복굴절이 약한 부분인 레이저 봉의 중앙으로 모이고 있기 때문이다. 그림 2는 그림 1(a)의 경우에 대하여 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, 20°C , 30°C , 40°C 에서 계산된 편광 왜곡된 빔의 공간 강도 분포를 보여 준다. 빔의 강도가 0인 곳을 흰색으로 1 이상인 곳을 검은색으로 나타낸 gray scale map으로 도시하였다. 왼쪽 열은 존스 행렬을 사용한 결과이고 오른쪽 열은 본 논문의 방법으로 계산된 결과이다. 오른쪽 열에 표시된 점선 원은 입사된 빔의 최초 크기를 보여 준다. 온도 차이 ΔT 가 증가함에 따라 열렌즈 효과에 의해 레이저 빔이 레이저 봉의 중앙으로 모이고 있음을 확인할 수 있다.

열복굴절 보상을 위해 흔히 사용되는 두 개의 동일한 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기를 삽입하는 방법인 그림 3(a)의 경우에 대해 계산을 수행하였다. 이 경우에 대한 존스 행렬 방법을 살펴보면 다음과 같다.^[9] 90° 편광회전기에 대한 존스 행렬 F 는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

따라서 x 축 방향으로 편광된 빔이 입사했을 때의 출력 빔의 편광 상태는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = BFB \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = e^{-ikL(n_r(r) + n_{\theta}(r))} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

출력 빔은 모두 y 축 방향으로 편광이 되어 편광 왜곡이 전혀 존재하지 않아야 한다. 본 논문의 방법으로 계산된 결과를 그림 3(b)에 도시하였다. 수치 계산에서 두 레이저 봉 사이의 거리 d 는 20.7 cm로 하였다. 온도 차이 ΔT 가 작은 경우 열복굴절 보상이 이루어지고는 있지만 ΔT 가 커짐에 따라 열복굴절 보상이 불완전하게 되고 결국에는 편광회전기를 사용하지 않은 경우와 같은 정도로까지 편광 왜곡이 일어난다. 존스 행렬을 이용한 계산으로는 얻을 수 없는 결과이다.

본 논문에 기술된 수치 모델의 타당성을 검증하기 위해 최근 제안되어 수행된 열복굴절 보상에 관한 실험에^[11] 대하여 수치 계산을 수행하였다. 그림 4에 계산이 수행된 네 가지 경우가 도시되어 있다. 각 경우에 대한 기하학적 파라미터는 참

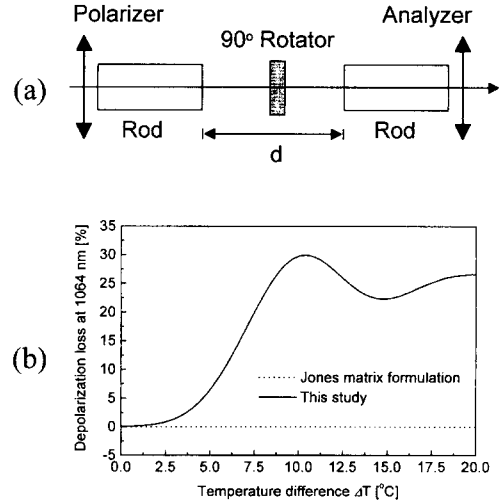


그림 3. Numerically investigated a two laser rod scheme: (a) a 90° polarization rotator is placed between two identical rods ($d = 20.7$ cm); (b) calculated depolarization losses using Jones matrix formulation and the numerical model proposed in this paper.

고문헌 [11]의 실험 조건을 따랐다. 즉, 두 레이저 봉에 대한 경우인 그림 4(a)와 두 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기만을 삽입한 경우인 그림 4(b)에 대해서 봉 사이의 거리 d 는 20.7 cm로 하였다. 두 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기와 렌즈 하나를 삽입한 경우인 그림 4(c)에 대해서는 렌즈의 초점거리 f 는 20 cm, 레이저 봉과 렌즈 사이의 거리 d_1 는 35.3 cm로 하였고, 두 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기와 렌즈 둘을 삽입한 경우인 그림 4(d)에 대해서는 두 렌즈의 초점거리 f 는 각각 20 cm, 두 렌즈 사이의 거리 d_2 는 40 cm, 레이저 봉과 렌즈 사이의 거리 d_3 는 15.9 cm로 하였다. 참고문헌 [11]의 이론적 논의는 두 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기와 여러 광학 소자들을 삽입하여 r 편광과 θ 편광 각각에 대한 광선 전달 행렬이 동일한 값을 갖도록 만들어 주면 이 광학계는 임의의 광선에 대해 등방성을 갖는 소자(isotropic element)로 작용하므로 열복굴절에 의한 편광 왜곡이 보상된다는 원리에 기초하고 있다. 참고문헌 [11]에서는 이러한 원리를 기반으로 열복굴절에 의한 편광 왜곡이 보상되는 파라미터들의 해석적 관계식을 유도하였는데, 그림 4(c)와 (d)의 실험에 사용된 파라미터들 f , d , d_1 , d_2 는 그 해석적 관계식으로부터 결정된 것이다. 일반적으로 두 렌즈로 구성된 광학계는 하나의 렌즈로 구성된 등가의 광학계로 대치될 수 있다. 그러나 그림 4(d)의 경우는 두 렌즈 사이의 거리가 두 렌즈의 초점 거리의 합과 같은 망원경 구조로 되어 있어 등가인 그림 4(c)의 경우로 대치할 수 없다. 망원경 구조는 그 등가의 초점 거리는 무한대이지만 상전달(image relay)에 사용될 수 있는데, 그림 4(d)의 경우 두 레이저 봉의 서로 인접한 주평면들(principal planes) 사이에 상전달이 이루어지고 있다.^[11] 한편 그림 4(c)의 경우 주평면들 사이에 상전달 관계는 존재하지 않는다. 참고문헌 [11]에서는 증폭효과를 고려하지 않기 위해 조사빔으로 He-Ne 레이저를 사용하였는데, 수치 계산에서도 He-Ne 레이저 파장

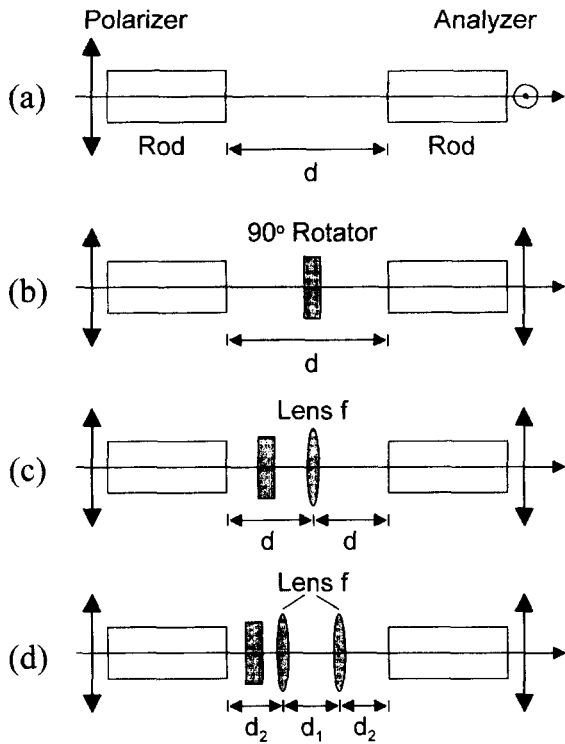


그림 4. Numerically investigated laser schemes: (a) two identical rods separated by a distance of 20.7 cm ($d = 20.7$ cm); (b) a 90° polarization rotator is placed between the rods ($d = 20.7$ cm); (c) a thin lens with 20 cm focal length and a 90° polarization rotator are placed between the rods ($f = 20$ cm, $d = 20.7$ cm); (d) two thin lenses with 20 cm focal length and a 90° polarization rotator are placed between the rods ($f = 20$ cm, $d_1 = 40$ cm, $d_2 = 15.9$ cm).

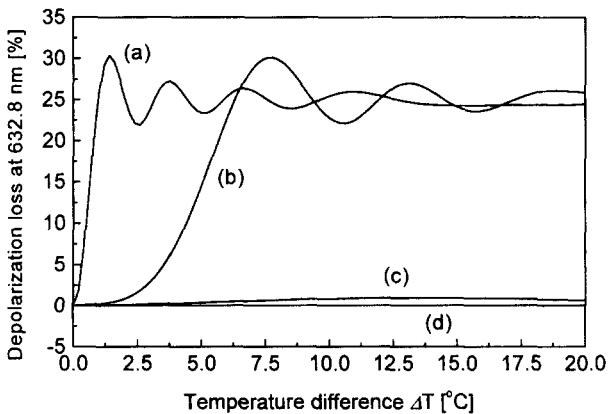


그림 5. Calculated depolarization losses for the laser schemes in Fig. 4.

(632.8 nm)이 사용되었다. 편광 왜곡 손실에 대한 계산 결과는 그림 5와 같다. 참고문헌 [11]의 그림 12와 거의 일치하는 결과를 얻었다. 문헌에서는 편광 왜곡 손실이 펄스 파워의 함수로 측정되었으나, 본 논문에서는 레이저 붕 중심과 표면 온도 차이의 함수로 계산되었다. 레이저 붕 중심과 표면의 온도 차이는 펄스 파워에 대해 power law 의존성을 갖고 있다.^[14] 그 지수는 일반적으로 1 보다 큰 값이며, 레이저 장치에 따라

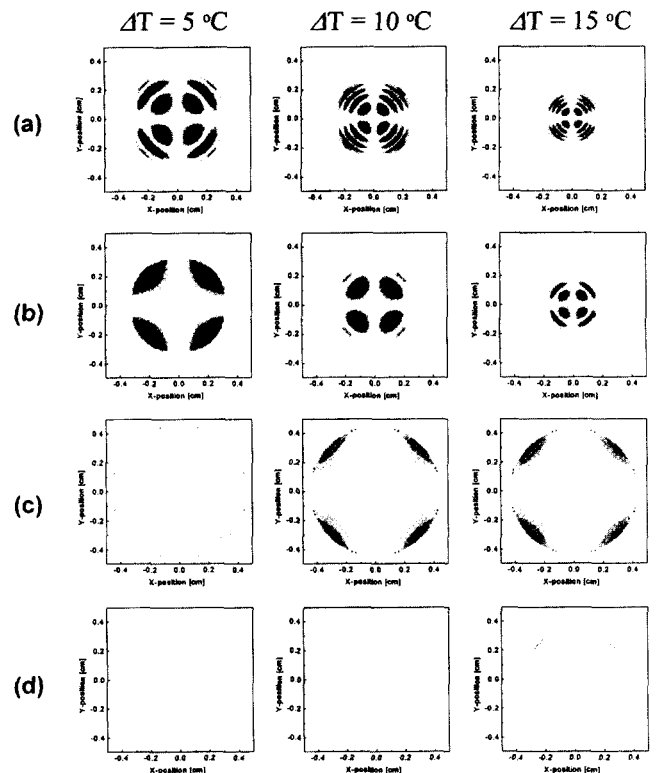


그림 6. Spatial intensity profiles of depolarized beams for the laser schemes of Fig. 4 with the temperature differences $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, 10°C and 15°C .

다른 값을 갖는 파라미터이다. 열복굴절에 의한 편광 왜곡 손실은 레이저 붕의 가장자리에서 가장 크게 나타난다. 본 논문에서는 평평한 모양의 공간 분포를 갖는 입력광을 가정하였는데, 이 때문에 그림 5(a)의 첫 번째 피크의 경우 실험 결과보다 약간 크게 계산 되었다. 그림 6은 그림 4의 네가지 경우에 대하여 세가지 다른 온도 차이 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, 10°C , 15°C 에서 계산된 편광 왜곡된 빔의 공간 강도 분포를 보여준다. 온도차이가 증가할수록 열 렌즈 효과에 의해 레이저 빔의 크기가 작아지는 것과 복초점 효과에 의해 두 편광 성분인 r 편광과 θ 편광이 갈라지는 것을 그림 4(a)와 (b)의 경우에 대한 계산 결과인 그림 6(a)와 (b)를 통해 확인할 수 있다. Nd:YAG의 경우 복초점 효과에 의해 r 편광이 θ 편광보다 레이저 붕의 중심으로 더 모이게 된다. 편광 왜곡된 빔의 공간 강도 분포에 나타나는 무늬는 검광자를 통과한 후 일어나는 r 편광과 θ 편광의 간섭에 의해 결정되는데, 열렌즈 효과에 의해 r 편광은 존재하지 않고 θ 편광만이 존재하는 레이저 빔의 외각에서는 두 편광 간의 간섭이 존재하지 않는다. 이 부분이 그림 6(a)와 (b)의 $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 인 경우 레이저 빔 외각에 부채꼴 모양으로 나타나고 있다.

IV. 결 론

레이저 붕의 열렌즈 효과를 고려하여 열복굴절에 의해 발생된 레이저 빔의 편광 왜곡을 계산할 수 있는 모델이 제안되었

고, 수치 계산이 수행되었다. 계산에 사용된 모델은 근축광선 이론을 바탕으로 광학적 경로 계산 방법을 제시하고 있다. 계산 결과를 존스 행렬을 사용한 것과 비교하였다. 레이저 증폭기를 단일 경로로 통과하는 경우 레이저 봉 중심과 표면의 온도 차이 ΔT 가 커짐에 따라 두 계산 결과가 서로 달라짐을 확인하였고, 열복굴절 보상을 위해 흔히 사용되는 방법인 두 레이저 봉 사이에 90° 편광회전기만을 삽입하는 경우 존스 행렬을 이용한 계산으로는 얻을 수 없었던 큰 펌프 파워에서의 불완전한 열복굴절 보상을 확인할 수 있었다. 이미 수행된 문헌의 실험에 본 논문의 모델을 적용하여 그 결과가 일치하고 있음을 확인하였다. 본 논문에 기술된 편광 왜곡 계산법은 레이저 증폭기 및 발진기의 설계, 제작, 분석에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer, Berlin, 1996) Chap. 7.
 [2] W. C. Scott and M. de Wit, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 3 (1971).
 [3] G. D. Baldwin and E. P. Riedel, *J. Appl. Phys.* **38**, 2726

(1967).
 [4] J. D. Foster and L. M. Osterink, *J. Appl. Phys.* **41**, 3656 (1970).
 [5] W. Koechner and D. K. Rice, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-6**, 557 (1970).
 [6] R. Iffländer, H. P. Körtz and H. Weber, *Opt. Commun.* **29**, 223 (1979).
 [7] G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni and O. Svelto, *Opt. Quantum Electron.* **25**, 489 (1993).
 [8] Q. Lü, S. Dong and H. Weber, *Opt. Quantum Electron.* **27**, 777 (1995).
 [9] K. G. Han and H. J. Kong, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L994 (1995).
 [10] Q. Lü and H. Weber, *Opt. Commun.* **118**, 457 (1995).
 [11] Q. Lü, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Müller and U. Wittrock, *Opt. Quantum Electron.* **28**, 57 (1996).
 [12] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, 1986) Chap. 15.
 [13] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, Singapore, 1996) Chap. 5.
 [14] H. J. Eichler, A. Haase, R. Menzel and A. Siemoneit, *J. Phys.* **D26**, 1884 (1993).

Numerical analysis for depolarization loss of laser beam induced by thermal birefringence considering thermal lensing at Nd:YAG rod

Jong Rak Park and Yun Sup Shin

Department of Physics, KAIST, Taejon 305-701, Korea

Tai Hyun Yoon

KRISS, Taejon 305-600, Korea

(Received March 9, 1999, Revised manuscript received May 6, 1999)

Taking into consideration the thermal lensing effects of laser rods, depolarization losses of laser beams induced by the thermal birefringence were calculated. The numerical model proposed for the calculation, which is based on the paraxial ray optics formulation and provides explicit expressions of optical path lengths for various optical elements, was described in detail. Calculated results were compared with those of Jones matrix formulation and experiments. The calculated results are in good agreement with experimental results.