

광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 열렌즈 효과의 보상

김덕래[†] · 김영식

단국대학교 의학레이저의료기기연구센터
④ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

김병태

청주대학교 레이저광정보공학과
④ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2007년 5월 21일 받음, 2007년 6월 11일 수정본 받음)

광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 열렌즈를 보상하기 위한 공진기를 구성하였다. 초점거리 30 mm, 유효직경 22 mm인 보상렌즈를 레이저 매질의 단면으로부터 25 mm 떨어진 곳에 위치시켜 열렌즈 효과를 보상하였다. 보상렌즈가 없는 경우 레이저 출력은 열렌즈 효과에 의해 여기파워 6 W 이상에서 급격히 감소하기 시작하였으며, 12 W에 이르러서는 레이저가 거의 발진되지 않았다. 열렌즈 효과가 보상되었을 경우 레이저 출력은 선형적으로 증가하였으며, 여기파워 12 W에서 M^2 값은 2.4로 좋은 범질을 나타내었다.

주제어 : Ceramic Nd:YAG, Diode-pumped, Thermal lensing effect, Compensation

I 서 론

레이저가 재료 가공, 박막 제작, 리소그래피 등의 산업적 응용과 더불어 다양한 과학적 연구에 널리 사용되고 있다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 레이저를 응용한 분야가 넓어질수록 고효율의 고출력 레이저에 대한 필요성이 부각되고 있다. 고출력 고체레이저 개발 시 발생하는 레이저 매질에서의 열영향은 레이저 출력 및 범질에 큰 영향을 미쳐 레이저의 응용성을 떨어뜨린다. 이에 따라 고체레이저에서의 열영향을 해결하기 위한 여러 방법들이 모색되고 있다.

여기광이 레이저 매질에 입사되면 매질에 흡수된 여기광의 에너지 중 레이저 출력과 공진기 손실을 제외한 값이 대부분 열로 변환된다. 변환된 열은 열확산과 매질 표면으로부터 냉각이 진행되어 매질 내부에서는 불균일한 온도 분포가 발생한다. 매질 표면과 중심에서의 온도차는 열렌즈, 열복구절 및 매질 파괴를 일으킨다.^[1] 열렌즈 효과는 온도에 따른 굴절률 변화와 열응력에 의해 발생하며, 이는 공진하는 레이저빔을 발산 또는 수렴시켜 광경로를 바꾸어 레이저 출력 및 범질을 저하시킨다.^[2,3] 높은 열응력은 빠르게 가열 또는 냉각되는 매질에서 불균일한 온도 분포에 의해 균열의 확장을 초래한다. 여기강도에 따라 증가하는 열응력이 매질의 파괴 인성에 이르게 되면 매질은 결국 파괴된다.^[4] 열영향에 의한 굴절률 변화는 자기 접속 현상을 발생시킨다. 레이저에서의 열영향을 줄이기 위한 방법은 다음과 같다. 열복구절은 공진기 내에 $\lambda/4$ 판이나 Faraday 회전판을 삽입하여 줄일 수 있고^[5], 열렌즈는 공진기 내에 보상용 렌즈를 삽입하거나 레이

저 매질의 균일한 냉각, 지그재그 슬랩형 공진기 또는 불안정 공진기를 구성하여 보상할 수 있다.^[6,7] 고체레이저를 폭넓게 응용하기 위해서는 열렌즈 효과를 보상하여 높은 출력을 얻는 것뿐만 아니라 좋은 범질도 요구된다.

최근 세라믹 Nd:YAG는 다양한 크기로 쉽게 만들 수 있고, 결정체보다 짧은 제작 시간 내에 고품질의 매질을 얻을 수 있어 고체레이저 개발에서 차세대 레이저 매질로 주목받고 있다.^[8-10] 세라믹 Nd:YAG는 Al_2O_3 , Y_2O_3 및 Nd_2O_3 의 분말 원료를 고온·고압의 진공상태에서 소결시켜 제작한다. 이는 단결정과는 기본적인 특성이 동일하면서 발진 효율이 높고, 매질 내부의 세공과 기포가 없어 투명도가 좋아 산란 손실도 작은 장점을 갖는다. 결정인 Nd:YAG와는 달리 활성이 온을 최대 8 at.%까지도 첨가시킬 수 있어 여기 에너지의 흡수율을 크게 높일 수 있다. Nd^{3+} 이 첨가된 다른 레이저 매질과 마찬가지로 808 nm를 중심으로 강한 흡수 영역을 가지고 있다. 이는 GaAlAs계 반도체레이저의 중심 발진 파장과 잘 일치하기 때문에 높은 여기효율과 양자효율을 갖는다. 주 발진 파장인 1064 nm에서 좁은 발광 스펙트럼 선폭을 가지며, 첨가율이 2 at.%인 경우 흡수계수는 20.8 cm^{-1} 로 고출력 레이저에 사용되는 YAG에 비해 4배 이상 높고, 마이크로칩 레이저에 많이 사용되고 있는 YVO₄와 비교해도 2/3에 해당되는 큰 값이다. 세라믹 Nd:YAG의 열전도도와 열팽창률은 Nd:YAG 결정과 거의 동일하나, 열충격 파라미터(thermal shock parameter)는 3배, 곡강도(flexural strength)는 1.3배, 빅커스 경도(Vickers hardness)는 1.1배, 그리고 파괴인성(fracture toughness)은 최대 5배 크다.^[11,12] 높은 열충격 파라미터는 고출력 레이저에 적용이 가능하다는 것을 시사한다. 이와 같은 특성을 가지고 있는 세라믹 Nd:YAG는 고효율의 고체레이저 개

[†] E-mail: duckiboy@hanmail.net

발에 적합한 레이저 매질로 평가받고 있다.

본 논문에서는 광섬유 연결 반도체레이저를 여기원으로 하는 단면여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 보상렌즈에 의한 열렌즈 효과의 보상특성에 대해 기술하였다.

II. 실험장치

그림 1은 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 전체 개략도이다. 여기원은 광섬유 코어 직경이 400 μm , 수치 구경이 0.22 NA인 광섬유 연결 반도체레이저(Apollo Ins.: F25-808-4P)로 45 A에서 최대 25 W까지 출력된다. 동작온도 27°C에서 중심 발진 파장은 808.5 nm, 발진 스펙트럼의 반치폭은 3.2 nm이다. 발진 파장의 온도의존성은 0.27 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 이고, 반도체레이저 내부에 온도를 측정할 수 있는 센서가 장착되어 있다. 온도 조절기(Newport: Model 350)에 연결된 열전소자와 수냉식 냉각판을 반도체레이저 아래에 설치하여 온도를 제어하였다. 반도체레이저의 구동 장치(Avtech: AVO-8B-C-M-P)는 최대 100 A까지 인가할 수 있으며, 펄스 모드와 연속 모드로 사용이 가능하다. 구동 전류원(HP: 6011A)은 0.01 %의 전압·전류 변동률을 가져 안정적으로 반도체레이저를 구동할 수 있으며, 최대 100 A에 20 V까지 제공할 수 있다. 반도체레이저와 구동 장치로 구성된 회로에서 일어나는 과도 현상을 억제하며, 역전류로부터 반도체레이저를 보호하기 위하여 구동 장치와 반도체레이저 사이에 안전회로를 설치하였다.

광섬유 연결 반도체레이저에서 출사된 광속을 세라믹 Nd:YAG에 효과적으로 집속시키기 위하여 상용화된 렌즈 설계 프로그램인 Zemax를 이용해서 집속광학계를 설계하였다.^[13] 집속광학계는 설계된 렌즈 데이터를 바탕으로 제작한 후 그 성능을 평가하였다. 초기 설계 목표값은 초점거리와 초점심도를 길게 하고, 빔직경이 300 μm 가 되도록 설정하였다. 광

섬유 연결 반도체레이저의 코어와 개구가 크기 때문에 렌즈 매수가 적을 경우 초점거리 10 mm 이상에서는 빔직경이 매우 커져 레이저 출력효율이 작게 나타났다. 구면렌즈 6 개로 구성된 경우 가장 효율적으로 여기광을 레이저 매질에 집속시킬 수 있었다. 설계·제작된 집속광학계는 유효초점거리 10.9 mm에서 집속여기광의 빔직경은 380 μm 이며, 투과율은 91.6 %로 측정되었다. 실측 빔직경은 초기 설계 목표값보다 80 μm 정도 커지만, 레이저 출력효율과 레이저 장치 구성을 고려하였을 때 가장 적당하다고 판단되어 이를 이용하여 실험을 진행하였다.

세라믹 Nd:YAG는 5.00×10 mm 크기에 Nd³⁺이 2 at.% 첨가된 것이다. 여기광의 입사면에는 808 nm와 1064 nm에 대해 무반사 코팅, 반대면에는 1064 nm에 대해 무반사 코팅이 되어 있다. 매질 홀더는 세라믹 Nd:YAG에서 발생된 열을 효율적으로 냉각될 수 있도록 구리를 이용하여 제작하였다. 레이저 매질은 열전도가 좋은 인듐 포일로 둘러싸서 홀더 중심에 장착하였다. 레이저 매질에서 발생한 열은 홀더 아래에 부착된 수냉식 방열판으로 회수하였다. 홀더와 수냉식 방열판이 접촉되는 부분에 thermal grease를 고르게 발라 열이 잘 전달되게 하였다.

공진기는 모드정렬의 어려움이 거의 없는 안정된 반구면 공진기로 구면거울과 구면거울의 곡률 중심에 위치한 평면 거울로 구성하였다. 모드는 구면거울에서 반사되어 평면거울에 집속되어진다. 평면거울의 크기는 10×20×2 mm로 808 nm에서 무반사, 1064 nm에서 전반사의 이색성 코팅을 하였다. 출력거울은 1064 nm에서 반사율이 90 %이며, 곡률 반경은 120 mm이다.

열렌즈 효과는 양볼록인 보상렌즈를 공진기 내부에 삽입하여 보상하였다. 열렌즈 효과를 보상할 수 있는 최적 조건을 파악하기 위하여 보상렌즈의 초점거리를 26 mm에서 52 mm, 유효직경을 5 mm에서 30 mm로 초점거리 또는 유효직경이

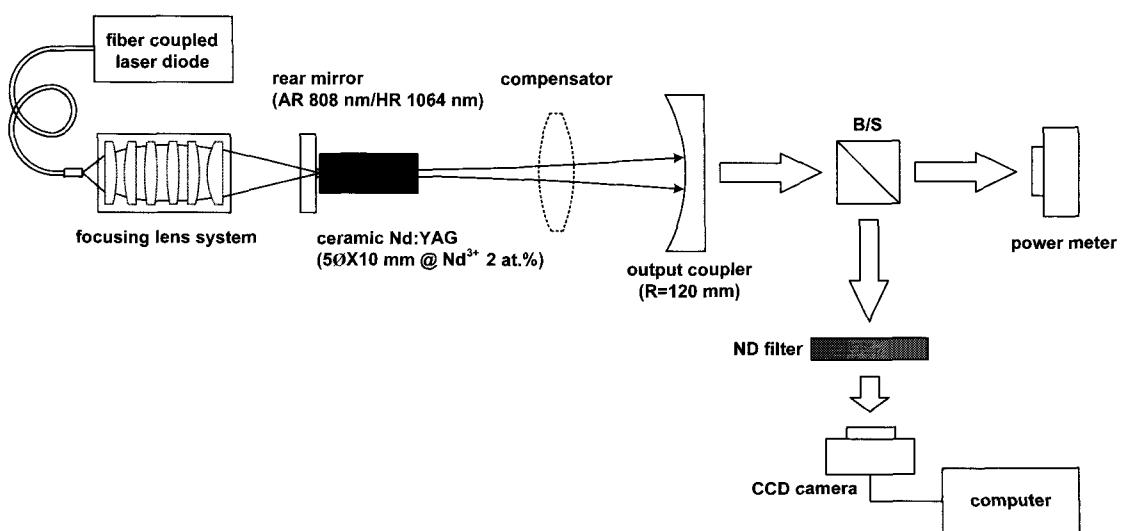


그림 1. 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 개략도.

서로 다른 보상렌즈를 교체해 가면서 측정하였다. 보상렌즈의 위치는 레이저 매질 단면으로부터 25 mm에서 45 mm까지 이동해 가면서 레이저 출력특성을 파악하였다. 보상렌즈는 1064 nm에 대해 무반사 코팅을 하였으며, 투과율은 99.6 %로 측정되었다. 열렌즈 효과의 보상에 따른 세라믹 Nd:YAG 레이저빔의 횡모드 변화는 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였고, 레이저 출력은 파워 미터(Melles Griot: 13PEM003)를 사용하여 측정하였다.

III. 실험결과 및 해석

세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 초점거리를 ABCD 행렬에 적용하여 열렌즈 효과가 레이저 출력에 미치는 영향 및 열렌즈 효과의 보상특성을 해석하였다. 열렌즈 초점거리는 공진기가 구성되지 않은 상태에서 측정하였다. 레이저에서의 열영향을 정확히 해석하기 위해서는 레이저가 발진되는 상태에서 측정된 열렌즈 초점거리를 이용하여야 한다. 그러나 문현값을 계산식에 대입하여^[13,14] 레이저 발진 유무에 따른 열렌즈 초점거리를 계산한 결과 그 차이는 약 20 %로 이는 열렌즈 효과에 의한 레이저 출력특성을 파악하는데는 큰 영향을 미치지 않기 때문에 레이저가 발진하지 않는 상태에서 측정한 열렌즈 초점거리는 레이저에서의 열영향을 해석하는데 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단되었다. 실험에서는 탐침광으로 He-Ne 레이저를 이용하였으며, 탐침광은 공간필터를 이용하여 확대 및 평행광으로 만든 후 집속광학계와 평면거울 사이에 빛살 가르개를 설치하여 레이저 매질에 통과시켰다. 열렌즈 초점거리는 컴퓨터에 연결된 CCD 카메라를 이용하여 여기파워에 따라 탐침광의 범크기가 가장 작은 지점을 확인한 후 이 지점으로부터 매질 단면까지의 거리를 측정하여 구하였다. 실험에서 사용된 반구형 공진기의 경우 열렌즈 초점거리가 공진기 길이 120 mm보다 짧아지면 공진 모드가 형성되지 않아 레이저가 발진되지 않기 때문에^[15] 공진기 길이를 기준으로 레이저 동작 여부를 구분할 수 있다. 레이저가 발진하지 않는 상태에서 열렌즈 현상에 의한 초점거리는 여기파워 3.2 W, 5.7 W, 12.2 W 및 15.3 W에서 각각 900 mm, 480 mm, 150 mm 및 80 mm로 측정되었다. 여기파워 약 13 W 이상에서는 열렌즈 초점거리가 공진기 길이인 120 mm보다 짧아져 레이저가 발진되지 않을 것으로 예상된다.

측정된 열렌즈 초점거리를 바탕으로 G-parameter를 계산하여 세라믹 Nd:YAG 레이저의 열영향을 이론적으로 해석하는데 활용하였다. G-parameter의 계산식^[8]은 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & L^* \\ (G_1 G_2 - 1)/L^* & G_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ [0 \ 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ [0 \ 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ [0 \ 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/R_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 R_1 과 R_2 는 전반사 거울과 출력거울의 곡률반경, d_1 과 d_m 은 세라믹 Nd:YAG로부터 전반사 거울과 보상렌즈 사이의 거리, d_2 는 보상렌즈와 출력거울 사이의 거리, D_1 과 D_2 는 레이저 매질과 보상렌즈의 굴절능이다. G_1 과 G_2 는 공진기 내에서의 열영향을 해석하기 위한 G-parameter이다. 레이저 동작 조건은 $0 \leq G_1 G_2 \leq 1$ 을 만족하여야 한다.

그림 2는 여기파워에 따른 G-parameter이다. 그림에서 ■는 보상렌즈가 없는 상태이며, ●는 초점거리 30 mm인 보상렌즈를 레이저 매질로부터 25 mm 떨어진 위치에서 계산한 값이다. 흰색 영역은 G_1 과 G_2 의 곱이 0 이상으로 레이저 동작 조건을 만족하는 부분이며, 0 이하인 회색 영역에서는 레이저 동작 조건을 만족하지 못한다. 그리고 레이저는 0 이상과 1 이하의 범위 내에서만 발진하며, 1을 넘어서게 되면 동작 조건을 벗어나게 되어 레이저가 발진되지 않는다. 보상렌즈가 없을 경우 여기파워가 3.2 W, 5.7 W, 12.2 W 및 15.3 W로 증가할수록 G-parameter는 0.032, 0.028, 0.009 및 -0.016으로 감소하였다. 여기파워 약 13 W 이상에서는 레이저 매질의 굴절능이 8.3 m^{-1} 보다 커지게 되어 레이저 동작 조건을 벗어난다. 실험에서는 여기파워에 따른 G-parameter가 0 또는 1 근처로 이동하게 되면 선형적으로 증가하면 레이저 출력력이 감소하게 되고, 0 이하 또는 1 이상이 되면 레이저 발진이 전혀 되지 않을 것으로 예상된다. 이에 대한 내용을 확인할 수 있는 열렌즈 효과에 의한 레이저 출력특성은 그림 6에서 언급할 것이다. 보상렌즈를 사용하였을 경우 여기파워 3.2 W, 5.7 W, 12.2 W 및 15.3 W에서 G-parameter는 0.48, 0.49, 0.52 및 0.57로 서서히 증가하지만 모든 값이 레이저 동작 조건을 만족한다. 이는 보상렌즈에 의해 열렌즈 효과가 보상되는 것을 이론적으로 규명한 결과이다. 이와 같은 결과는 보상렌즈가 없을 때보다 여기파워를 약 2.5배 더 입사시킬 수 있는 보상렌즈의 효과를 나타내고 있다. 그러나 그림 2에는 표시되어 있지 않지만 보상렌즈를 사용하더라도 여기파워 약 33 W 이상에서는 G-parameter가 1을 넘어가게 되어 레이저가 동작하지 않을 것이다.

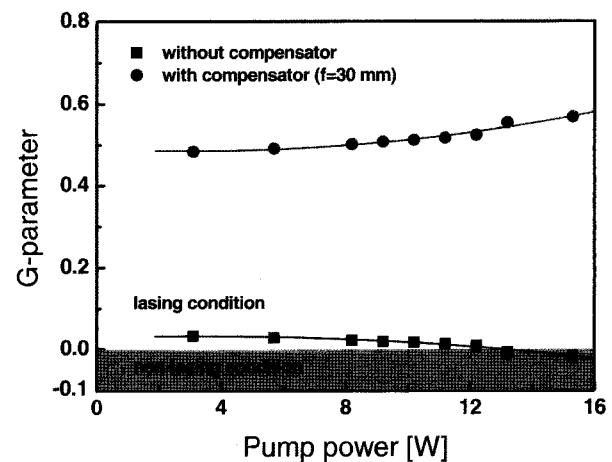


그림 2. 여기파워에 따른 G-parameter.

보상렌즈의 초점거리 및 위치에 따른 세라믹 Nd:YAG 레이저의 열렌즈 보상특성을 식(1)을 이용하여 계산하였다. 그림 3에서 초점거리가 서로 다른 보상렌즈에 대한 레이저 동작 조건을 볼 수 있다. 흰색 영역에서는 레이저 동작 조건을 만족하며, 검은색 영역에서는 만족하지 않는다. 그림 3(a)는 초점거리가 10 mm인 보상렌즈의 계산 결과로 레이저 매질 단면으로부터 16 mm 이내에서만 열렌즈 효과가 보상된다. 이 경우는 레이저 동작 조건이 매우 제한적이기 때문에 실험에 적용하기에는 적당하지 않은 것으로 판단된다. 그림 3(b), 3(c) 및 3(d)는 보상렌즈의 초점거리 30 mm, 50 mm 및 80 mm에 대한 결과이다. 레이저 동작 조건은 30 mm에서 가장 넓으며, 80 mm로 길어질수록 열렌즈 초점거리가 긴 영역에서 동작 조건이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 초점거리가 80 mm 이상으로 긴 보상렌즈의 경우 열렌즈 초점거리가 긴 영역에서는 레이저 동작 범위가 좁기 때문에 오히려 낮은 여기파워에서 공진하는 레이저빔이 보상렌즈에 의해 발산되어 레이저 출력에 영향을 미칠 것이다. 위에서 계산한 결과를 실험에 적용하면 초점거리가 30 mm에서 40 mm 사이인 보상렌즈를 레이저 매질에 최대한 가까이 위치시켰을 경우 열렌즈 효과가 효과적으로 보상될 것으로 예상된다.

열렌즈 효과를 보상하는 최적 조건을 파악하기 위하여 보상렌즈의 위치에 따른 레이저 출력특성을 알아본 후 최적의 위치에서 보상렌즈의 초점거리와 유효직경에 따른 레이저 출력효율을 측정하였다.

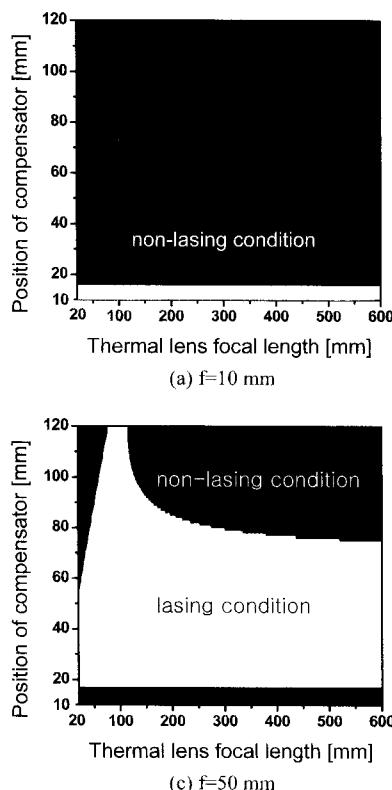


그림 3. 보상렌즈의 초점거리 및 위치에 따른 레이저 동작 조건.

그림 4는 여기파워 12 W에서 보상렌즈의 초점거리와 위치에 따른 레이저 출력특성이다. 레이저 출력은 매질 단면으로부터 25 mm, 35 mm 및 45 mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 보상렌즈의 위치가 45 mm에서 25 mm로 이동함에 따라 레이저 출력이 증가한 것은 보상렌즈가 레이저 매질에 가까워질수록 공진기 내에서 크게 발산하는 레이저빔을 모을 수 있었기 때문인 것으로 판단된다. 레이저 출력은 보상렌즈의 위치가 25 mm일 때 크게 나타났다. 초점거리가 26 mm인 보

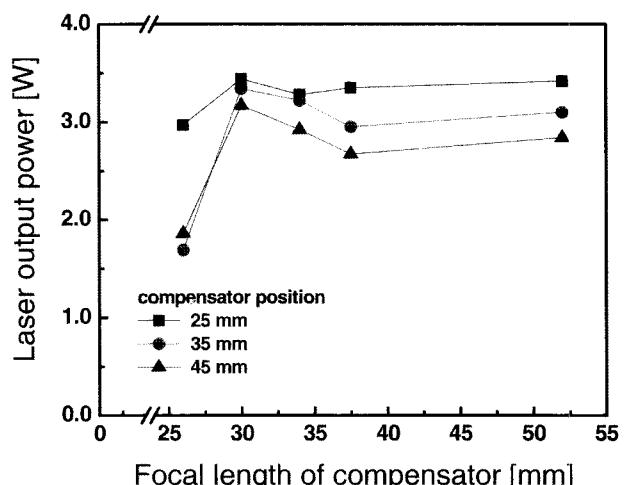
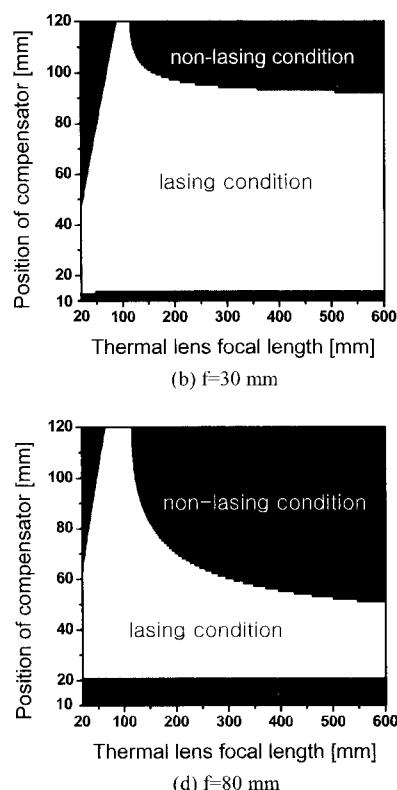


그림 4. 보상렌즈의 초점거리와 위치에 따른 레이저 출력특성.



상렌즈의 경우 설치 위치에 따른 레이저 출력은 최대 2.97 W와 최소 1.69 W로 약 40 %의 큰 변화율을 나타내었고, 보상렌즈의 위치 35 mm 및 45 mm에서의 출력은 초점거리 30 mm, 설치위치 25 mm에서 측정된 최대 출력에 약 50 %밖에 미치지 못하였다. 초점거리가 30 mm인 보상렌즈에서는 각 위치에 따른 출력 변화율이 약 17 %로 가장 안정되게 나타났으며, 25 mm 위치에서 3.44 W의 최대 출력값을 나타내었다. 초점거리 52 mm에서 출력이 감소할 것으로 예상하였으나, 초점거리 38 mm에서의 측정값보다 조금 상승하였다. 이는 보상렌즈의 유효직경이 다른 것보다 2.5배 커서 공진기 내에서 발산하는 레이저빔을 더 효과적으로 보을 수 있었기 때문인 것으로 판단된다. 열렌즈 효과는 초점거리 30 mm인 보상렌즈를 매질로부터 25 mm 떨어진 위치에 설치하였을 때 가장 잘 보상되었다. 이와 같은 실험 결과는 계산값을 바탕으로 예상한 내용과 잘 부합한다.

레이저 출력은 동일한 유효직경을 갖는 보상렌즈를 세라믹 Nd:YAG로부터 25 mm 떨어진 위치에서 초점거리에 따라 측정하였다. 그림 5는 보상렌즈의 초점거리와 유효직경에 따른 레이저 출력효율이다. 레이저 출력효율은 여기파워 12 W에서 측정하였다. 레이저 출력효율은 유효직경이 12 mm인 보상렌즈를 사용한 경우 초점거리 26 mm에서 24 %를 나타내었고, 30 mm에서 28 %의 높은 값을 나타낸 후 초점거리가 더 길어질수록 서서히 감소하였다. 이는 그림 3에서 기술한 내용과 일치하고, 초점거리 30 mm에서 유효직경에 따른 출력효율은 5 mm와 22 mm에서 각각 24 %와 29 %를 나타내었다. 유효직경 12 mm에 비해 약 1/2로 좁아진 경우 출력효율이 4 % 감소하였고, 약 2 배 증가한 경우 1 %밖에 향상되지 않았다. 이와 같은 결과를 미루어보아 유효직경을 22 mm 이상으로 증가시켜도 출력효율은 크게 향상되지 않을 것으로 판단되었다. 결과적으로 열렌즈 효과는 유효직경 22 mm, 초점거리 30 mm인 보상렌즈를 레이저 매질로부터 25 mm 떨어진 위치에 설치하였을 때 가장 잘 보상되어 29 %의 최대 출력효율을 나타내었다.

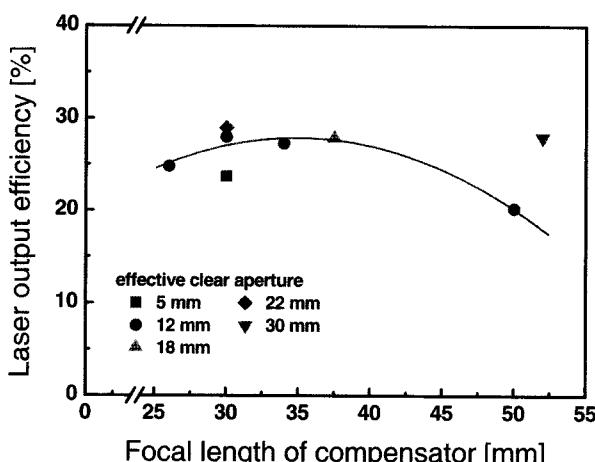


그림 5. 보상렌즈의 초점거리와 유효직경에 따른 레이저 출력효율.

이상의 연구결과들을 종합하여 그림 6에 열렌즈 효과의 보상 유무에 따른 레이저 출력특성을 나타내었다. 그림에서 ■는 보상렌즈가 없는 경우이며, ●는 보상렌즈를 사용하였을 때의 측정값이다. 보상렌즈가 없는 경우 여기파워 약 6 W 이상에서 레이저 출력이 급격히 감소하기 시작하여 13 W가 넘어서면서부터는 출력되지 않는 상태에 도달하였다. 이는 공진기 내에서 공진하는 레이저빔이 열렌즈 효과에 의해 크게 발산하였기 때문이다. 출력 감소 현상은 그림 2를 이용하여 해석할 수 있다. 그림에서와 같이 G-parameter는 낮은 여기파워에서도 약 0.03으로 레이저가 동작되지 않는 영역 근처에 위치해 있기 때문에 레이저 출력은 열렌즈에 의한 영향을 쉽게 받을 것이다. 여기파워가 6 W 이상이 되면 레이저 매질의 열렌즈 효과에 의해 G-parameter가 0.025 이하로 줄어들어 레이저 출력에 영향을 준 것으로 판단된다. 열렌즈 초점거리와 레이저 출력특성을 비교를 하면 열렌즈 초점거리가 여기파워에 따라 크게 짧아져 6 W에서는 공진기 길이의 약 3.8 배에 해당하는 약 450 mm가 되고, 이 이하가 되면 출력 감소 현상이 나타나는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 열렌즈를 보상하지 않은 상태에서 레이저 매질의 열렌즈 초점거리와 공진기 길이의 상관 관계에 의해 출력파워의 선형성이 보장되는 최대 여기파워를 예상할 수 있는 데이터로 활용이 가능하다. 즉, 공진기 길이를 짧게 하면 더 짧은 열렌즈 초점거리에서도 레이저빔이 공진 되기 때문에 레이저 출력파워는 더욱 높아진다. 이에 대한 실험 결과는 기 발표된 논문에서 확인할 수 있다.^[13] 여기파워가 약 13 W 이상에서는 레이저가 발진하지 않는다. 이는 열렌즈 효과에 의해 공진기 내에서의 레이저빔이 크게 발산하여 더 이상 공진 모드를 형성할 수 없었기 때문이다. 그리고 여기파워 13 W 이상에서는 열렌즈 초점거리가 공진기 길이인 120 mm보다 짧아지고, G-parameter가 0 이하가 되어 레이저가 발진하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

보상렌즈를 사용하였을 경우 여기파워에 따른 레이저 출력이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 실험결과는 초

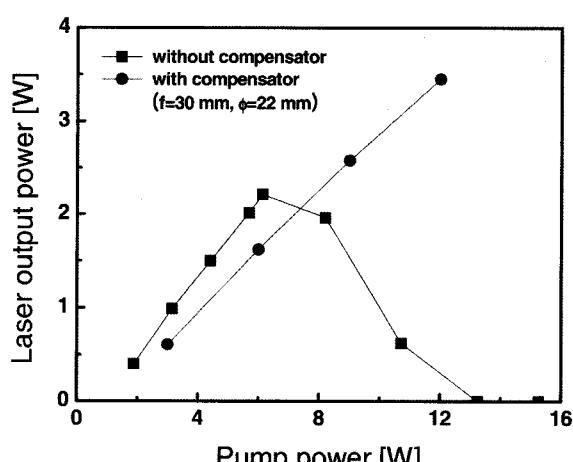


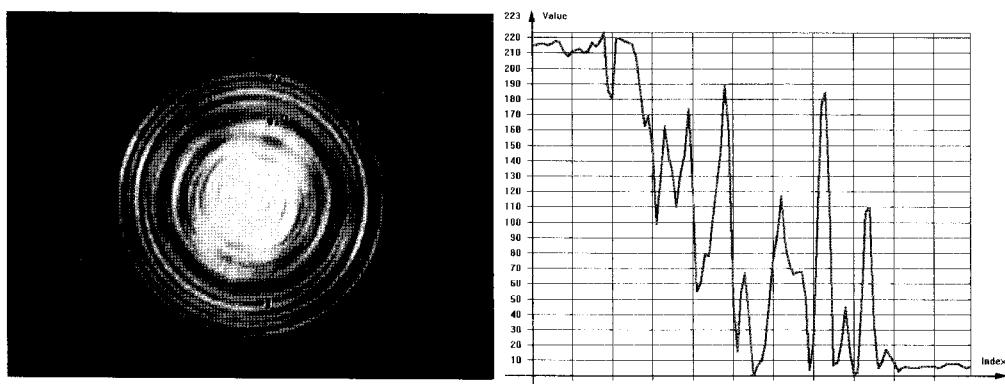
그림 6. 열렌즈 효과의 보상 유무에 따른 레이저 출력특성.

점거리가 30 mm이고, 유효직경이 22 mm인 보상렌즈를 세라믹 Nd:YAG의 단면으로부터 25 mm 떨어진 곳에 설치하여 열렌즈 효과가 가장 잘 보상된 것이다. 열렌즈 효과가 보상되었을 때 G-parameter는 그림 2에서와 같이 여기파워 12 W에서 약 0.5로 레이저 동작 조건의 중심 부근에 위치한다. 이는 열렌즈 효과가 효과적으로 보상되어 레이저 출력이 선형적으로 증가한 것을 이론적으로 뒷받침하고 있다. 그리고 보상렌즈를 사용하지 않은 경우 G-parameter가 0.028 이하가 되면 레이저 출력이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이 결과를 보상렌즈를 사용한 경우에 적용하면 레이저 출력이 나타나지 않는 G-parameter값 1에서 0.028을 뺀 0.972 이상이 되면 레이저 출력은 감소할 것으로 예상되며, 0.972와 1이 되는 여기파워는 약 32 W와 33 W이다. 이와 같은 결과에 의하면 보상렌즈를 사용하였을 경우 여기파워에 따라 레이저 출력이 선형적으로 증가하다가 32 W 근처에 도달하게 되면 출력은 매우 급격히 감소하며, 33 W에서는 발진하지 않을 것으로 예상된다. 이는 공진기 길이를 짧게 하였을 경우와 유사한 출력특성^[13]을 나타낼 것이다. 보상렌즈의 유무에 따른 레이저 출력효율을 비교하면 열렌즈 효과가 보상되지 않은 경우에는 여기파워 6 W에서 약 36 %이며, 보상되었을 경우에는 여기파워 6 W와 12 W에서 레이저 출력효율은 각각 27 %와 29 %로 나타났다. 보상렌즈에 의한 손실 때

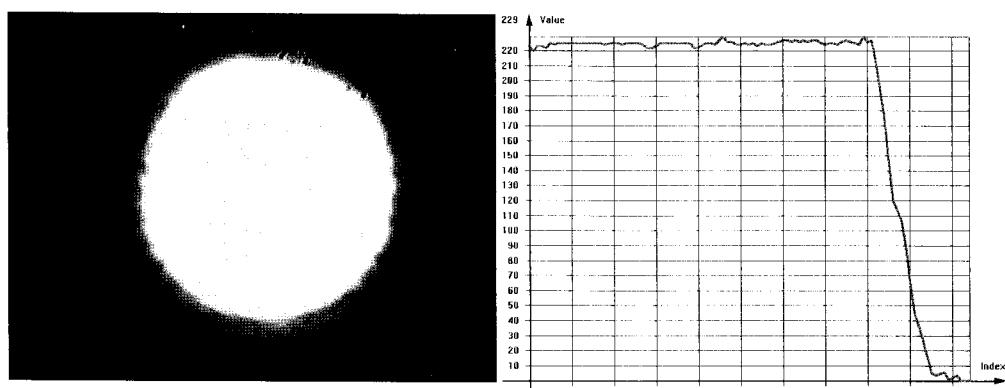
문에 출력효율의 차이가 7 % 정도 발생한 것으로 판단된다.

레이저의 출력이 높더라도 빔질이 좋지 않으면 그 응용성은 많은 제약을 받게 되기 때문에 열렌즈 효과의 보상 유무에 따른 빔질을 파악하였다. 실험에서는 여기파워 12 W에서 최적화된 보상렌즈 사용하였다. 그림 7은 레이저빔의 횡모드와 강도변화이다. 그림 7(a)는 보상렌즈를 사용하지 않은 결과로 낮은 여기파워에서 나타나지 않았던 고주파 성분은 여기파워가 증가하면서 열렌즈 효과에 의해 매우 많이 나타났다. 레이저빔의 고주파 성분은 고출력 레이저 시스템에서 레이저 매질을 파손시킬 수 있기 때문에 최대한 제거되어야 한다. 그림 7(b)는 보상렌즈를 사용한 결과로 열렌즈 효과가 보상되어 고주파 성분이 완전히 제거되었다. 실험 결과 보상렌즈는 레이저 출력과 빔질을 함께 향상시키는 역할을 하였다. 그리고 빔질을 평가하기 위하여 출력빔의 M^2 를 측정하였다. 실험은 출력거울 앞에 초점거리가 75 mm인 렌즈를 설치한 후 렌즈의 초점 위치와 이로부터 100 mm 떨어진 위치에서 출력빔의 빔직경을 측정하여 M^2 값을 구하였다. 열렌즈가 보상되었을 때의 M^2 값은 2.4로 비교적 좋은 빔질을 나타내고 있다.

본 논문의 실험 결과에 의하면 보상렌즈는 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력효율을 조금 떨어뜨리는 단점이 있지만, 기존의 실험장치를 바꾸지 않고도 열렌즈 효과를 효과적으로 보



(a) 열렌즈 효과 보상 전



(b) 열렌즈 효과 보상 후

그림 7. 레이저빔의 횡모드와 강도변화.

상하여 레이저 출력 및 빔질을 크게 향상시킬 수 있는 큰 장점을 나타내었다. 레이저 출력효율을 좀 더 향상시키기 위하여 보상렌즈를 사용하지 않고 공진기 구조를 변화시켜 열렌즈 효과를 보상하는 연구가 진행되고 있다.

IV. 결 론

광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 열렌즈를 보상하기 위한 공진기를 구성하였다. 열렌즈 효과의 보상특성을 이론적으로 분석하고, 실험적으로 확인하였다. 여기파워 약 13 W 이상에서는 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 초점거리가 공진기 길이 120 mm보다 짧아졌으며, 매질의 굴절률은 8.3 m^{-1} 보다 커지게 되어 G-parameter가 레이저 동작 조건을 벗어났다. 초점거리가 30 mm 근처인 보상렌즈를 레이저 매질 최대한 가까이에 위치시켰을 경우 열렌즈 효과가 잘 보상될 것으로 계산되었다. 보상렌즈가 없는 경우 레이저 출력은 열렌즈 효과에 의해 여기파워 6 W 이상에서 급격히 감소하였으며, 13 W 부근에서는 레이저가 발진되지 않았다. 초점거리 30 mm, 유효직경 22 mm인 보상렌즈를 레이저 매질의 단면으로부터 25 mm 떨어진 곳에 위치시켰을 때 레이저 출력은 선형적으로 크게 증가하였으며, M^2 값은 여기파워 12 W에서 2.4로 좋은 빔질을 나타내었다. 열렌즈 보상렌즈는 기존의 실험장치를 바꾸지 않고도 열렌즈 효과를 효과적으로 보상하여 레이저 출력 및 빔질을 크게 향상시킬 수 있는 큰 장점을 나타내었다. 레이저 출력효율을 좀 더 향상시키기 위해서는 보상렌즈 대신 공진기 구조에 따른 열렌즈 보상특성에 대한 연구가 필요하다. 열렌즈 효과가 보상된 세라믹 Nd:YAG 레이저는 그 특성을 충분히 발휘할 수 있게 되어 응용분야도 확대될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 양동옥, 김병태, “반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서의 열영향”, *한국광학회지*, vol. 14, no. 1, pp. 44-50, 2003.
- [2] W.Koechner, *Solid-state Laser Engineering* (Springer-Verlag, Berlin, 1999), pp. 413-419.
- [3] Reinhard Iffländer and S. Weber, *Solid-State Lasers for Materials Processing* (Springer-Verlag, Berlin, 2005), pp. 99-120.
- [4] Dietrich Munz and Theo Fett, *Ceramics* (Springer-Verlag, Berlin, 1999), pp. 201-225.
- [5] Welford, D., Rines, D. M., Dinerman, B. J., Martinsen, R., “Observation of Enhanced Thermal lensing Due to Near-Gaussian Pump Energy deposition in a Laser-Diode Side-Pumped Nd:YAG Laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1075-1080, 1992.
- [6] N. PAVEL, T. DASCALU, and V. LUPEI, “Positive-branch unstable resonators with thermal lens compensation,” *Optics & Laser Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 451-455, 1996.
- [7] M. Ohmi, M. Akatsuka, L. Ishikawa, K. Naito, S. Nakai, Y. Yonezawa, Y. Nishida, Y. Izawa, and M. Yamanaka, “High sensitivity two-dimensional thermal and mechanical-stress-induced birefringence measurement in a Nd:YAG rod,” *Appl. Opt.*, 33, pp. 6368-6372, 1994.
- [8] J. Lu, M. Prabhu, J. Song, C. Li, J. Xu, K. Ueda, A. A. Kaminskii, H. Yagi, and T. Yanagitani, “Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics,” *Appl. Phys.*, B 71, pp. 469-473, 2000.
- [9] J. DONG, J. LU, A. SHIRAKAWA, and K. UEDA, “Optimization of the laser performance in Nd³⁺:YAG ceramic microchip lasers,” *Appl. Phys.*, B 80, pp. 39-43, 2005.
- [10] J. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, “Promising ceramic laser material: Highly transparent Nd³⁺: Lu₂O₃ ceramic,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 23, pp. 4324-4326, 2002.
- [11] Ichiro Shoji, Yoichi Sato, Sunao Kurimura, Voicu Lupei, Takunori Taira, Akio Ikesue, and Kunio Yoshida, “Thermal-birefringence-induced depolarization in Nd:YAG ceramics,” *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 4, pp. 234-236, 2002.
- [12] K. Ueda, “Ytterbium-doped tunable ceramic laser,” Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics Europe, 2005.CLEO/Europe, pp. 1, 2005.
- [13] 옥창민, 김병태, 김덕래, “광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 열렌즈 효과에 의한 출력특성”, *한국광학회지*, vol. 17, no. 5, pp. 455-460, 2006.
- [14] Steve C. Tidwell, Jonathan F. Seamans, Mark S. Bowers, Ananda K. Cousins, “Scaling CW Diode-End-Pumped Nd: YAG Lasers to High Average Powers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 997-1009, 1992.
- [15] Eduard Wyss, Thomas Graf, and Heinz P. Weber, “Solid-State Lasers at the Stability Limit: Constant Beam Properties Over Large Power Ranges,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 5, pp. 671-676, 2005.

Thermal Lens Compensation in a Fiber-Coupled Laser-Diode Pumped Ceramic Nd:YAG Laser

Duck-Lae Kim[†] and Yeong-Sik Kim

Medical Laser and Device Research Center, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

[†]*E-mail: duckiboy@hanmail.net*

Byung-Tai Kim

Department of Laser & Optical Information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received May 21, 2007, Revised manuscript June 11, 2007)

A fiber-coupled laser-diode pumped ceramic Nd:YAG laser for compensating the thermal lensing effect was developed. The thermal lensing effect was compensated using a convex lens, which was 25 mm away from the laser rod, with a focal length of 30 mm and an effective clear aperture of 22 mm. Without a compensator, the laser output power decreased suddenly above a pump power of 6 W. Using a compensator, the laser output power increased linearly according to the pump power. The beam propagation factor M^2 was 2.4 under a pump power of 12 W.

OCIS code : 160.3380, 140.3480, 350.6830.