

# 광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 열렌즈 효과에 의한 출력특성

옥창민<sup>†</sup> · 김병태

청주대학교 레이저광정보공학과  
Ⓣ 360-764 충청북도 청주시 상당구 내덕동 36번지

김덕래

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

(2006년 8월 29일 받음, 2006년 10월 13일 수정본 받음)

광섬유 연결 반도체레이저를 여기원으로 하는 단면여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 특성과 레이저 출력에 영향을 미치는 열영향에 대하여 연구하였다. 반사율이 90.4 %인 출력거울을 사용하였을 경우 약 33.8 %의 최대 출력 효율을 얻었고, 기울기 효율은 39.3 %를 나타내었다. 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 효과에 의해 여기 파워 6 W 이상에서 출력 감소 현상이 나타났으며, 12 W 부근에서 레이저가 발진되지 않았다.

주제어 : Ceramic Nd:YAG, Diode-pumped, Thermal lensing.

## I 서 론

반도체레이저를 여기원으로 이용하는 고체레이저는 고품질 레이저 매질에서의 에너지 축적, 단일 주파수 발진 및 좁은 레이저 선폭 등의 장점을 가지며, 고효율, 장수명, 소형 및 경량화 등의 특징을 가지고 있다.<sup>[1]</sup> 최근 들어 고출력, 고효율의 반도체레이저가 개발됨에 따라 반도체레이저 여기 고체레이저는 고효율과 낮은 발진 문턱값을 가지며, 반도체레이저 여기에 적합한 흡수 파장영역을 갖는 레이저 매질이 필요하게 되었다.

현재 널리 사용되고 있는 단결정은 초크라스키(Czochraski) 방법<sup>[2]</sup>으로 제작되어 매질 크기는 제한적이고, 제작 시간과 비용이 많이 소요되어 새로운 제작 방법이 요구되었다. 세라믹 Nd:YAG<sup>[3-5]</sup>는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 분말 원료를 고온·고압의 진공상태에서 소결시켜 매질을 제작한다. 이는 비결정체이기 때문에 다양한 크기로 쉽게 만들 수 있고, 제작 시간은 Nd:YAG보다 짧으며, 제작 비용도 저렴한 고품질의 레이저 매질을 얻을 수 있게 되었다. 단결정과는 기본적인 특성이 동일하면서 발진 효율이 높고, 매질 내부의 세공과 기포가 없어 투명도가 좋아 산란 손실도 작은 장점을 갖는다. Nd:YAG와는 달리 활성이온을 1 at.% 이상도 첨가할 수 있으며, 첨가율이 최대 8 at.%인 세라믹 Nd:YAG도 나와 있다.<sup>[4]</sup>

세라믹 Nd:YAG는 Nd<sup>3+</sup>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 파

장인 1064 nm에서 좁은 발광 스펙트럼 선폭을 가지며, 첨가율이 2 at.%인 세라믹 Nd:YAG의 경우 흡수계수는 20.8 cm<sup>-1</sup>로 고출력 레이저에 사용되는 YAG에 비해 4 배 이상 높고, 마이크로칩 레이저에 많이 사용되고 있는 YVO<sub>4</sub>와 비교해도 2/3에 해당되는 큰값이다.<sup>[5]</sup> 열전도도와 열팽창계수는 열적 특성이 좋은 Nd:YAG와 유사하다. 이와 같은 특징을 가지고 있는 세라믹 Nd:YAG는 고효율의 고체레이저 개발에 적합한 매질로 평가 받고 있다.

고체레이저 개발 시 저출력에서 고출력으로 이동함에 따라 발생하는 가장 큰 문제는 레이저 매질에서의 열영향이다. 레이저 매질에 여기광이 입사되면 흡수된 여기광의 에너지 중 레이저 출력과 공진기 손실을 제외한 값이 열로 변환된다. 변환된 열은 열확산과 매질 표면으로부터 냉각이 진행되어 매질 내부에서는 불균일한 온도분포를 유발시킨다. 온도에 따른 굴절률 변화는 열렌즈 효과를 발생시킨다.<sup>[6]</sup> 열렌즈 현상은 공진하는 레이저광을 발산 또는 수렴시켜 레이저광의 경로를 바꾸어 레이저 출력의 손실과 빔질의 저하를 나타낸다. 열응력은 여기 강도가 증가할수록 커지며, 최대인장응력이 재료의 인장강도 이상이 되면 매질은 결국 파손된다.<sup>[7]</sup> 열영향에 의한 굴절률 변화는 자기 집속 현상을 발생시키며, 열응력으로 인한 활성이온 분포의 비균질성은 레이저광 증폭에 영향을 주어 출력에 영향을 미친다.<sup>[8]</sup> 열영향을 줄이기 위한 방법 중에서 열복굴절 현상은 공진기 내에 λ/4 판이나 Faraday 회전판을 삽입하여 줄일 수 있고<sup>[9]</sup>, 열렌즈 현상은 공진기 내에 보상용 렌즈를 삽입하거나 레이저 매질의 균일한 냉각, 지그재그 슬랩형 공진기 또는 불안정 공진기를 구성하여 보상할 수 있다.<sup>[10]</sup>

본 논문에서는 출력 20 W의 반도체레이저를 여기원으로

<sup>†</sup> E-mail: okmin@hanmail.net

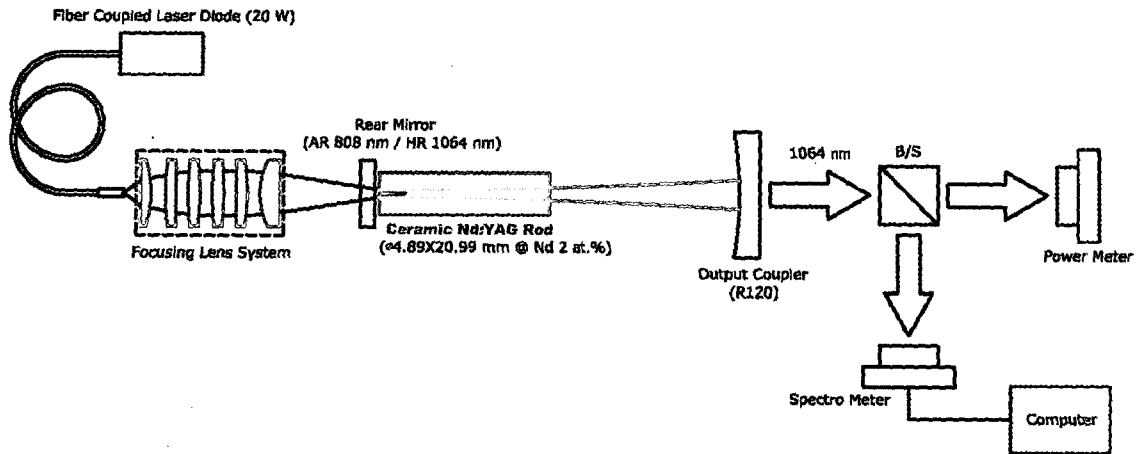


그림 1. 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 개략도.

하는 단면여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 특성과 레이저 출력에 영향을 미치는 열영향에 대하여 분석하였다.

## II. 실험장치

그림 1에 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 전체 개략도를 나타내었다. 여기원은 광섬유 코어 직경 400  $\mu\text{m}$ , 수치 구경 0.22 NA인 광섬유 연결 반도체레이저(TH-C1720-F4)로 39 A에서 최대 20 W까지 출력된다. 동작온도 25  $^{\circ}\text{C}$ 에서 중심 발진파장은 808.8 nm, 발진 스펙트럼 반치폭은 2.2 nm이다. 발진파장의 온도 의존성은 0.26~0.3 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 이고, 내부에 온도를 측정할 수 있는 센서와 열전소자가 장착되어 있어 반도체레이저의 온도를 제어할 수 있다. 반도체레이저 구동원(Origin Laser Inc.)은 과도 현상을 억제하고 반도체레이저를 보호하기 위한 회로와 구동전류 및 동작온도를 제어할 수 있다. 구동원은 0.1 A 단위로 조절하여 최대 40 A까지 가변시킬 수 있다.

광섬유 연결 반도체레이저에서 출사된 광속을 세라믹 Nd:YAG에 효과적으로 집속시키기 위해 상용화된 렌즈 설계 프로그램인 Zemax를 이용하여 집속광학계를 설계하였다. 설계된 렌즈 데이터를 바탕으로 집속광학계를 제작한 후 성능을 평가하였다. 초기 설계 목표값은 초점거리와 초점심도를 길게 하고, 빔직경이 300  $\mu\text{m}$ 가 되도록 설정하였다. 광섬유 연결 반도체레이저의 코어와 개구가 크기 때문에 집속광학계의 렌즈 매수가 적을 경우 초점거리 10 mm 이상에서는 빔직경이 매우 커져 레이저 출력 효율이 작게 나타났다. 최초 구면렌즈 3 개로 구성된 집속광학계부터 렌즈 매수를 변화시켜가면서 광학계 설계 및 측정된 결과 구면렌즈 6 개로 구성된 경우 가장 효율적으로 여기광을 레이저 매질에 집속시킬 수 있었다. 설계 제작된 집속광학계는 유효초점거리 10.9 mm에서 빔직경 380  $\mu\text{m}$ 이며, 투과율은 91.6 %로 측정되었다. 집속광학계를 투과한 여기광은 39 A에서 15.3 W의 출력을

내었고, 이때의 단위면적당 파워는 13.4 kW/ $\text{cm}^2$ 이다. 여기 방법은 가장 간단하면서도 여기 효율을 높일 수 있는 단면여기를 사용하였다. 레이저 매질 단면에 집속된 여기광과 레이저 발진모드를 일치시켜 발진이 쉽게 될 수 있도록 하였다.

공진기는 모드정렬의 어려움이 거의 없는 안정된 반구면 공진기로 808 nm에서 무반사, 1064 nm에서 전반사의 이색성 코팅을 한 10 $\times$ 20 $\times$ 2"인 평면거울과 곡률반경이 120 mm인 출력거울을 사용하였다. 세라믹 Nd:YAG는 5.0 $\phi$  $\times$ 20.9 mm 크기에 Nd<sup>3+</sup>이 2 at.% 첨가된 것으로 매질 단면에는 기본파에 대하여 무반사 코팅을 하였다. 반구면 공진기는 구면거울과 구면거울의 곡률 중심에 위치한 평면거울로 구성되며, 모드는 구면거울에서 반사되어 평면거울에 집속되어진다.

레이저 매질 홀더는 세라믹 Nd:YAG에서 발생된 열을 효율적으로 냉각시킬 수 있도록 열전도도가 좋은 구리를 이용하여 제작하였고, 레이저 매질은 열전도도가 좋은 인듐 포일로 둘러싸서 홀더 중심에 장착하였다. 매질에서의 온도는 온도 컨트롤러(Newport : Model 350)에 연결된 써미스터(thermistor)를 홀더에 부착하여 측정하였고, 홀더 아래에 열전소자를 부착하여 매질 온도가 26  $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되도록 조절하였다. 열전소자에 부가된 열은 아래에 부착된 수냉식 방열판으로 회수하였다. 홀더, 열전소자 및 수냉식 방열판이 접촉되는 부분에 thermal grease를 고르게 발라 레이저 매질에서 발생한 열을 잘 방출시킬 수 있게 하였다.

세라믹 Nd:YAG 레이저의 발진 스펙트럼은 분해능이 0.2 nm인 스펙트로미터(CVI : SM240)를 컴퓨터에 연결하여 측정하였고, 레이저 출력은 파워 미터(Melles Griot : 13PEM003)를 사용하였다.

## III. 실험결과 및 해석

그림 2에 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력특성을 나타내었다. 출력거울의 반사율을 81.7 %, 86.1 %.

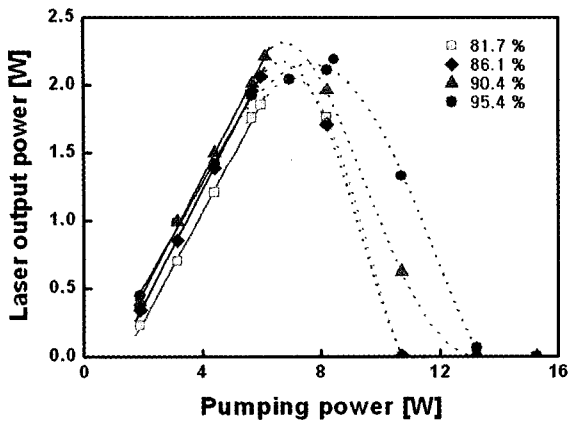


그림 2. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력특성.

90.4 % 및 95.4 %로 교환해 가면서 측정한 결과 각각의 최대 출력은 1.85 W, 2.06 W, 2.21 W 및 2.19 W로 나타났다. 반사율이 90.4 %인 출력거울을 사용하였을 경우 6.54 W의 여기 파워에서 2.21 W의 출력 파워가 측정되어 약 33.8 %의 최대 출력 효율을 얻었고, 레이저 출력이 감소하기 전까지의 기울기 효율은 39.3 %를 나타내었다. 이 때의 발진문턱값은 0.92 W이다. 레이저 발진 스펙트럼의 반치폭은 2.22 nm이며, 중심파장은 1063 nm로 측정되었다. 일반적으로 출력거울의 반사율에 따라 발진문턱값과 레이저 출력의 변화가 크게 나타나지만, 실험결과에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 세라믹 Nd:YAG의 높은 첨가율 때문에 형광 수명이 짧아져서 출력거울의 반사율에 대한 발진문턱값의 변화도 작아지고, 출력거울의 반사율에 따른 공진기 내부의 손실에너지 변화가 작기 때문에 레이저 출력 변화가 작은 것으로 판단된다. 여기 파워가 6 W 이상 되면 출력거울의 반사율에 관계 없이 출력 감소 현상이 나타났으며, 12 W 부근에서 레이저가 발진되지 않은 것으로 생각된다. 이와 같은 현상을 규명하기 위하여 여기 파워에 따른 레이저광의 횡모드와 공진기 길이에 따른 레이저 출력을 측정하였다.

그림 3은 여기 파워에 따라 출력되는 레이저의 횡모드 변화이다. 횡모드는 컴퓨터에 장착된 프레임 그래버에 CCD (Sony:ST-50)를 연결하여 측정하였다. 여기 파워가 3.16 W, 5.69 W, 8.22 W 및 10.75 W로 증가할수록 레이저광의 빔크기가 점점 커지면서 횡모드가 깨끗하지 못한 것을 볼 수 있다. 이는 여기 파워가 증가 되면 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 현상이 서서히 발생하다가 여기 파워 6 W 이상에서 급격하게 나타나기 때문에 출력되는 레이저광이 크게 발산되어 횡모드가 커진 것으로 판단된다.

열렌즈 효과를 확인하기 위해 최대 출력 효율을 나타낸 반사율 90.4 %의 출력거울을 사용하여 공진기 길이에 따른 레이저 출력을 측정하였다. 그림 4는 공진기 길이 120 mm, 55 mm 및 35 mm에서 측정한 레이저 출력의 변화이다. 레이저 매질이 열렌즈 효과를 나타내지 않는다면 공진기 길이를 120 mm에서 35 mm로 줄더라도 레이저 출력에는 영향을 미치지 않는다. 실험결과 여기 파워가 증가함에 따라 레이저 출력이

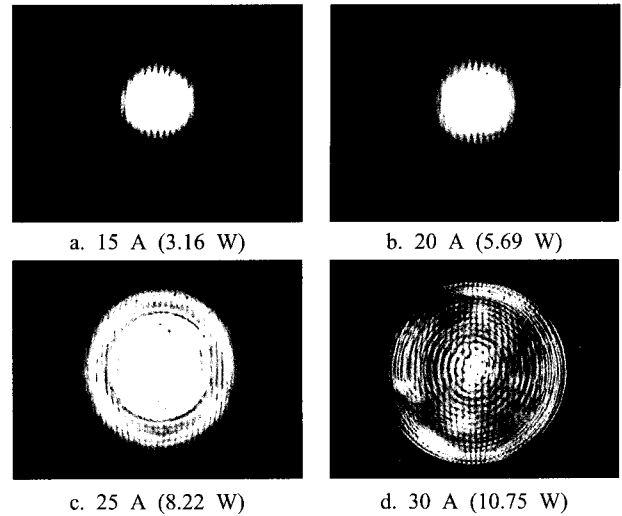


그림 3. 여기 파워에 따른 발진되는 레이저광의 횡모드.

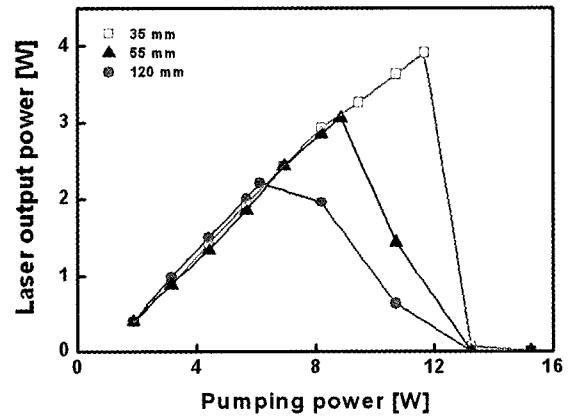


그림 4. 공진기 길이에 따른 레이저 출력특성.

감소하는 것은 공진기 내에 형성된 공진모드가 조금씩 벗어났기 때문이다. 공진기 길이가 짧아짐에 따라 여기광을 더 공급할 수 있어 레이저의 최대 출력은 2.21 W, 3.06 W 및 3.92 W로 증가하였으며, 공진기 길이 120 mm보다 35 mm일 때 약 1.8 배 향상되었다. 공진기 길이가 짧아질수록 레이저 출력이 증가하는 것은 공진기 내부 손실이 줄어들고 여기 파워에 의한 열렌즈 현상이 크게 나타나더라도 공진기 내에 공진모드가 형성되기 때문이다. 레이저의 출력 저하 현상은 공진기 길이가 짧아질수록 더욱 급격하게 나타났다. 이는 공진기 길이가 짧아지면 공진기 내부 손실이 줄어들어 레이저 출력이 증가하지만, 입사되는 여기 파워가 높아 열렌즈 현상이 더욱 크게 나타난 것으로 판단된다. 레이저 출력이 향상된 공진기 길이 35 mm의 경우에도 여기 파워 13.24 W 이상에서 레이저는 발진되지 않았다. 위의 결과를 미루어 보아 열렌즈 효과가 레이저 출력에 미치는 영향은 YAG 결정체보다 세라믹 Nd:YAG가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 효과를 측정하기 위한 실험 장치도이다. 레이저 매질에서 열영향에 의한 미세한 변화를 측정하기 위하여 탐침광을 레이저 매질에 투과시켰다.

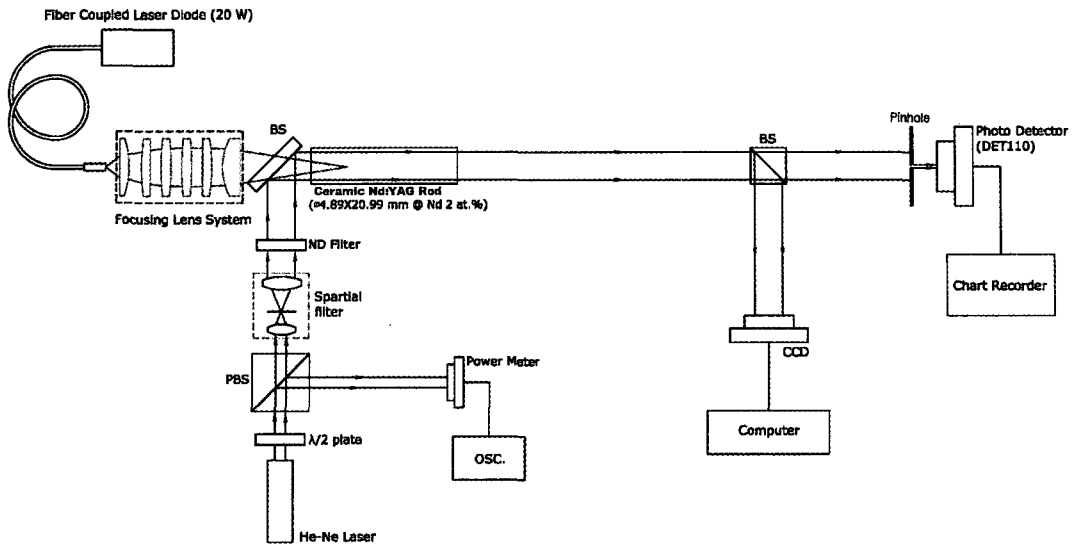


그림 5. 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 효과 측정 장치도.

탐침광은 He-Ne 레이저광을  $\lambda/2$  판과 632.8 nm 파장에 P편광과 S편광의 소광비가 1000:1 이상인 편광 빔살 가르개 (PBS)를 사용하여 P편광으로 만들었다. 빔살 확대기를 사용하여 빔크기를 매질 직경과 유사하게 하였다. 탐침광을 레이저 매질에 입사시키기 위해 집속광학계와 평면거울 사이에 빔살 가르개를 설치하였다. 빔살 가르개의 입사 각도는  $45^\circ$  이고 632.8 nm의 P편광에 대해 HR 96.2 %, 808.0 nm에 대해 AR 97.1 %의 이색성 코팅을 하였다. 탐침광의 강도 변화는 광 검출기(Thorlab : DET110)를 X-Y 기록계에 연결하여 기록하였으며, 횡모드 변화는 컴퓨터에 장착된 프레임 그래버에 CCD를 연결하여 측정하였다.

그림 6은 측정된 탐침광의 횡모드와 강도 분포의 예이다. 레이저 매질에 여기광이 입사되면 온도차에 의한 굴절률 변화가 나타나고, 이에 따른 열렌즈 현상에 의해 매질 중심을 지나는 탐침광은 구면파를 형성하며, 가장자리를 지나는 광은 평행광이기 때문에 간섭무늬가 생긴다. 여기 파워가 커질수록 간섭무늬 개수가 증가하며, 간섭무늬 간격도 더욱 좁아진 것을 볼 수 있다. 이 결과를 토대로 열렌즈 초점거리와 간섭무늬 개수의 변화를 분석하였다.

그림 7은 여기 파워에 따른 열렌즈 초점거리와 간섭무늬 개수이다. 그림에서 ●는 열렌즈 초점거리의 측정값이며, 실선은 계산값이다. ■는 간섭무늬 개수의 측정값으로 우측 좌표축을 사용한다. 열렌즈 초점거리는 공진기가 구성되지 않은 상태에서 레이저 매질로부터 빔직경이 가장 작게 측정된 지점까지의 거리이다. 열렌즈 초점거리는 여기 파워 3.15 W에서 0.90 m이었으나, 여기 파워가 증가할수록 지수 함수적으로 감소하였다. 특히, 여기 파워 12.2 W, 13.2 W 및 15.3 W에서 각각 0.15 m, 0.09 m 및 0.08 m로 줄어들었다. 열렌즈 초점거리가 공진기 길이보다 짧아지면 공진모드가 형성되지 않아 레이저 발진이 이루어지지 않는다. 즉, 여기 파워가 12 W~13 W 사이에서 레이저 매질의 열렌즈 초점거

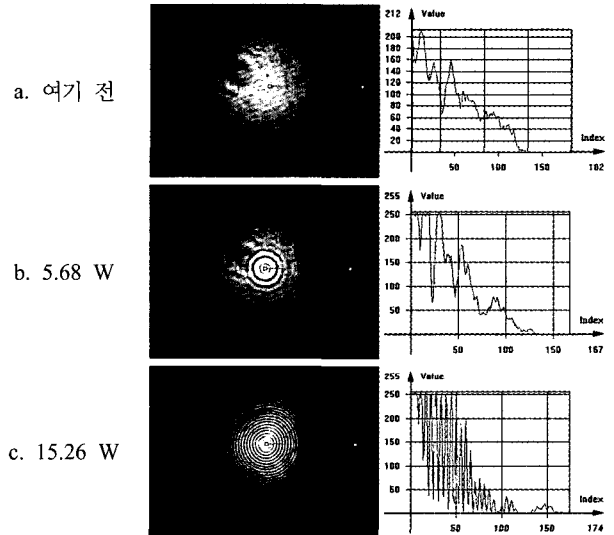


그림 6. 탐침광의 횡모드 및 강도 변화.

리가 120 mm 이하로 짧아져 레이저가 발진되지 않은 것으로 판단된다. 이와 같은 열렌즈 초점거리의 실험결과는 앞에서 기술한 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 감소 현상을 뒷받침해 주고 있다.

$Nd^{3+}$  첨가율이 2 at.%인 세라믹 Nd:YAG의 흡수계수가 크기 때문에 여기 파워를 증가시키면 여기광이 집속되는 매질 앞부분에서 대부분이 흡수되어 열렌즈 초점거리가 짧아지고, 이는 레이저 발진에 큰 영향을 미친다. 열렌즈 초점거리<sup>[6]</sup>는

$$f = \frac{KA}{\eta P} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r0} + n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (1)$$

에 의하여 계산할 수 있다. 여기서 여기 파워에 대한 레이저 매질에서의 열변환 비율  $\eta$ 는 0.3으로 문헌값을 사용하였

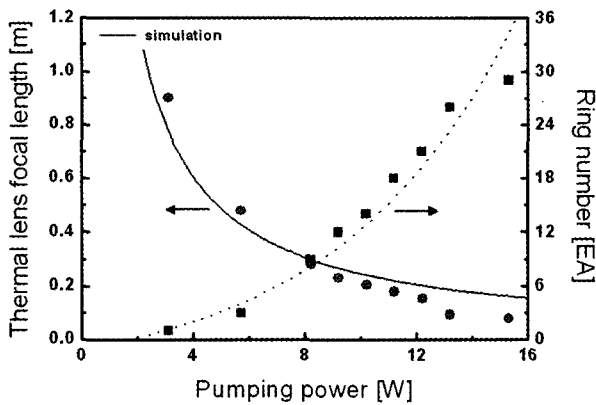


그림 7. 여기 파워에 따른 열렌즈 초점거리와 간섭무늬 개수.

다.<sup>[11]</sup> 이는 레이저가 발진되지 않는 상태에서 여기 파워의 30%가 열로 변환되었다고 가정한 것이다. 표 1에 계산에서 사용된 파라미터를 정리하였다. 계산 결과 여기 파워가 증가할수록 열렌즈 초점거리는 짧아지고 있고, 계산값과 측정값은 유사한 경향을 나타내고 있다. 레이저 발진이 전혀 나타나지 않은 12 W 이상의 여기 파워에서는 계산값과 측정값 사이의 오차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 이론적인 계산과 다르게 실험에서는 레이저 매질에서 발생한 열이 원활하게 냉각되지 못하고, 매질 내에 열이 축적되어 열렌즈 초점거리가 계산값보다 더 짧아진 것으로 판단된다. 이와 같은 무리한 상황이 레이저 매질에 여러번 가해지게 된다면 매질은 파손될 가능성이 높아질 것이다. 그리고 열렌즈 초점거리의 계산값은 레이저 출력을 향상시키기 위한 보상용 렌즈 선정 및 불안정 공진기 구성 시 이용할 수 있다.

여기 파워에 따른 간섭무늬 개수 변화는 횡모드의 강도 분포를 분석하여 구하였다. 여기 파워가 증가할수록 간섭무늬 개수는 증가하며, 열렌즈 초점거리는 급격히 줄어든다. 여기 파워가 약 6 W 입사되면 간섭무늬는 3 개 정도 나타났으며, 이 경우 열렌즈 현상이 크게 나타나 레이저 출력이 감소하였다. 여기 파워가 12 W 이상 입사되면 간섭무늬 개수가 21 개 이상으로 크게 증가하였으며, 레이저는 더 이상 발진되지 않았다.

세라믹 Nd:YAG 레이저의 열특성을 더 알아보기 위하여 여기 파워에 따른 탐침광의 발산각을 측정하였다. 탐침광의 발산각은 그림 5에서 보는바와 같이 레이저 매질을 투과한 탐침광을 매질 단면 바로 앞과 빛살 가르개(BS) 사이에 칼날(knife-edge)을 삽입하는 방법을 이용하여 탐침광의 빔직경을 측정 후 발산각을 계산하였다.

그림 8은 열렌즈 현상에 의해 나타난 탐침광의 발산각의 변화로 그림 7에서 링의 개수 변화와 유사한 결과를 나타내고 있다. 탐침광의 초기 발산각은 0.11 mrad, 발산각이 서서히 증가하는 여기 파워 8 W에서는 0.77 mrad, 레이저 발진이 되지 않은 12.23 W에서는 2.39 mrad 그리고 여기광의 최대 파워 15.26 W에서는 6.32 mrad으로 측정되었다. 여기 파

표 1. 열렌즈 초점거리 계산에 사용된 파라미터

Property	Symbol	Value	Units
열전도도	$K$	10.7	W/m °C
매질의 단면적	$A$	0.365	$10^{-6} m^2$
여기광의 열변환 비율	$\eta$	0.3	-
여기광의 파워	$P$	0~20	W
여기광의 스팟 반지름	$w_p$	190	$\mu m$
$dn/dT$	-	8.9	$10^{-6}/^{\circ}C$
굴절률	$n_0$	1.82	-
열팽창계수	$\alpha$	8	$10^{-6}/^{\circ}C$
매질의 반경	$r_0$	341	$\mu m$
매질의 길이	$L$	5	mm
광탄성계수	$C_T$	0.017	-
	$C_\phi$	-0.0025	-

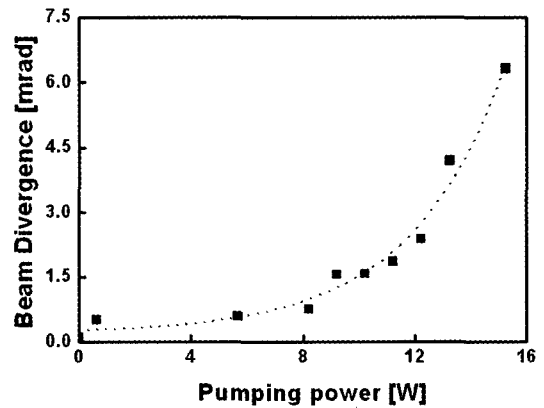


그림 8. 탐침광의 발산각 변화.

워 12.23 W에서 탐침광의 발산각은 열렌즈 현상에 의해 초기 발산각보다 약 23 배로 크게 증가하였으며, 이 때 공진모드가 형성되지 못하여 레이저가 발진되지 않은 것으로 판단된다.

본 논문의 실험 결과에 의하면 열렌즈 효과에 의한 영향이 YAG 결정보다 세라믹 Nd:YAG가 상당히 크며, 이는 레이저 출력에 직접적으로 작용하였다. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력을 향상시키기 위해서는 열렌즈 현상을 보상할 수 있는 보상용 렌즈를 공진기 내에 삽입하거나, 불안정 공진기를 구성하여야 한다.

#### IV. 결 론

광섬유 연결 반도체레이저를 여기원으로 하는 단면여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 특성과 레이저 출력에 영향을 미치는 열영향에 대하여 조사하였다.

반사율이 90.4 %인 출력거울을 사용하였을 경우 약 33.8

%의 최대 출력 효율을 얻었고, 기울기 효율은 39.3 %를 나타내었다. 여기 파워가 6 W 이상이 되면 출력 감소 현상이 나타났으며, 12 W 부근에서 레이저가 발진되지 않았다. 여기 파워에 따른 레이저광의 횡모드와 공진기 길이에 따른 레이저 출력을 측정된 결과 세라믹 Nd:YAG의 열렌즈 현상 때문에 출력 감소가 나타난 것으로 판단되었다. 레이저 매질의 열렌즈 초점거리는 여기 파워가 증가할수록 지수 함수적으로 감소하였다. 여기 파워 6 W 이상에서 발생한 열렌즈 현상은 레이저 출력에 영향을 주었으며, 12 W~13 W 사이에서 발생한 열렌즈 초점거리는 공진기 길이보다 짧아졌다. 이때 공진모드가 형성되지 못하여 레이저 발진이 이루어지지 않은 것으로 판단되었다. 탐침광의 횡모드를 분석한 결과 여기 파워 12 W 이상에서는 열렌즈 현상 때문에 간섭무늬 개수가 21 개 이상 증가하였으며, 간섭무늬 간격도 더욱 촘촘해졌다. 탐침광의 발산각은 여기 파워 12.23 W 입사 시 초기 발산각보다 약 23 배로 크게 증가하였다.

열렌즈 효과에 의한 영향이 YAG 결정보다 상당히 크며, 이는 레이저 출력에 크게 작용하였다. 본 연구에서 사용한 실험장치에 열렌즈 효과를 보상할 수 있는 보상용 렌즈를 공진기 내에 삽입하거나, 불안정 공진기를 구성한다면 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력을 향상시킬 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] 김병태, 김태석, “반도체레이저 단면여기 고체레이저에서의 최적 공진조건에 관한 해석,” 한국광학회지, vol. 8, no. 4, pp. 303-307, 1997.
- [2] Xiangyu Bao, Zhongli Lin, Hui Zhang, Prasad, V., Shamash, Y., “Control of the Czochraski Crystal Growth Process,” in American Control Conference, Proc. IEEE, vol. 3, pp. 1530-1534, 1999.
- [3] “Ceramic YAGs set to challenge single crystals,” Opto & Laser Europe, 2001.
- [4] J. Lu, M. Prabhu, J. Song, C. Li, J. Xu, K. Ueda, A.A. Kaminskii, H. Yagi, T. Yanagitani, “Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics,” Appl. Phys., B 71, pp. 469-473, 2000.
- [5] J. DONG, J. LU, A. SHIRAKAWA, K. UEDA, “Optimization of the laser performance in Nd<sup>3+</sup>:YAG ceramic microchip lasers,” Appl. Phys., B 80, pp. 39-43, 2005.
- [6] W.Koehnner, *Solid-state Laser Engineering* (Springer-Verlag, Berlin, 1999), pp. 413-419.
- [7] 양동욱, 김병태, “반도체 레이저 측면 여기 Nd:YAG 매질에서의 열영향,” 한국광학회지, vol. 14, no. 1, pp. 44-50, 2003.
- [8] D. Jaque, U. Caldino, J. J. Romero, J. G. Sole, “Fluorescence dynamics and laser properties of the Nd<sup>3+</sup>:Ca<sub>3</sub>Ca<sub>2</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystal,” J. Lumin., 83-84, pp. 477, 1999.
- [9] M. Ohmi, M. Akatsuka, L. Ishikawa, K.Naito, S. Nakai, Y. Yonezawa, Y. Nishida, Y. Izawa, 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

## The Output Characteristics of a Fiber-Coupled Laser-Diode Pumped Ceramic Nd:YAG Laser Due to Thermal Lensing Effect

Chang-Min Ok<sup>†</sup> and Byung-Tai Kim

Department of Laser & Optical Information Engineering, Cheongju University

<sup>†</sup>E-mail: okmin@hanmail.net

Duck-Lae Kim

Medical Laser and Device Research Center, Dankook University 36 Naedok-dong, Cheongju 360-764, Korea

(Received August 29, 2006, Revised manuscript October 13, 2006)

The output characteristics of a ceramic Nd:YAG laser pumped by a fiber-coupled laser diode was investigated. An efficiency and a slope efficiency of 33.8 % and 39.3 % respectively were obtained, under an output coupler reflectance of 90.4 %. The laser power has decreased suddenly due to the thermal lensing effect more than 6 W pumping powers.