

700-W 출력을 갖는 다이오드 여기 Nd:YAG 레이저 개발

Development of a Diode-pumped Nd:YAG Laser with an Output Power of 700-W

이성만, 차병헌, 김철중
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 산업분야에 응용이 가능한 단일모듈형 700-W급의 다이오드 여기 고체레이저(DPSSL) 시스템을 개발하였다. 자체개발된 선추적(ray-tracing)코드를 사용하여 횡여기(diode-side-pumped) Nd:YAG 레이저 모듈을 최적 설계하였으며, 제작된 레이저 모듈로부터 고출력과 고품질의 레이저빔 발생을 위해 공진기의 안정조건을 분석하였다. 개발된 레이저 시스템은 최대 675-W의 연속 레이저 출력을 가지며, 이때 여기빔-레이저 광전환 효율은 약 37.5% 정도이다. 레이저빔의 M^2 빔질인자는 약 40 정도이다.

Abstract

A diode-pumped solid-state laser(DPSSL), which has an output power of 700-W in a single laser module, was developed for applications in nuclear industries. The side-pumped Nd:YAG laser module was designed optimally with a ray-tracing code, and resonator stability conditions for the module was analyzed to get high output power and good beam quality. The developed laser system has a maximum continuous-wave output power of 675-W with an optical-to-optical conversion efficiency of 37.5%. The M^2 beam quality factor was measured as approximately 40.

1. 서 론

다이오드레이저 여기 고체레이저(DPSSL, Diode-Pumped Solid-State Laser)는 반도체 패키징, 전자부품 마운팅과 MEMS, 레이저 마킹, 용접, 절단 등의 산업적 응용분야와 색

소 및 Ti:Sapphire 레이저 여기, 분광학, 플라즈마 발생에 의한 분석 등의 기초과학 응용 분야, 그리고 의료장치 제조에 이르기까지 그 응용 범위가 매우 넓다. 이러한 다양한 첨단 고부가가치를 생산하는 응용분야에 이용되기 위해서 레이저 빔은 고 평균 및 펄스 출력, 고품질, 자외선(UV) 혹은 청록색(Green) 파장 등을 갖는 것이 요구된다. 특히, 용접이나 절단 등의 응용분야에 사용되기 위해서는 약 500-W 이상의 수 kW에 이르는 고출력과 저발산의 고품질을 갖는 레이저빔의 발생이 필요하다.

고출력의 레이저 빔을 이용한 자동차 부품의 용접은 이미 도입기에 들었으며, 자동차 생산라인에의 적용이 연구되고 있다. 또한, 세계적으로 자동차 차체 용접에서 기존의 스폿 용접기가 레이저 용접으로 대체되고 있는 경향을 보이고 있어서 이 분야의 시장은 국내에서도 수년 내에 괄목하게 성장될 것으로 예상되고 있다. 고출력 DPSSL은 자동차 산업 뿐만 아니라 기계, 전기, 조선, 철강 등의 일반산업과 가공, 제염, 유지보수 등과 관련된 미래 원자력 산업분야에도 긴요하게 활용될 수 있기 때문에 관련 연구가 미국, 일본, 독일 등을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.

상기한 응용분야에의 적용을 위해서 멀티모듈형태로 수 kW 급으로 확장이 가능하고 단일모듈로는 700-W 급의 출력을 얻을 수 있는 DPSSL 시스템을 개발하였다. Ray matrix를 사용하여 최대 700-W의 출력을 갖도록 링 여기형의 Nd:YAG 레이저 모듈이 설계 제작되었으며, 또한 고출력, 고빔질, 그리고 고안정성을 갖는 레이저 빔 발생을 위한 공진기가 설계되었다. 마지막으로 설계 제작된 공진기와 레이저 모듈에 대한 레이저 빔의 발진 특성이 조사되었다.

2. 레이저 모듈의 구조 및 여기 빔의 흡수분포

DPSSL 모듈은 그림 1에 보여진 것과 같이 세 개의 레이저 다이오드(LD)로 이루어졌으며, 각각의 LD 모듈은 15 개의 다이오드 칩으로 구성되어있다. 다이오드 칩은 1 cm 폭을 갖는 선형 다이오드 바(bar)로서 파장 808 nm에서 평균출력 40 W(cw)를 갖는다. 따라서 한개 LD 모듈의 출력은 600 W 이며, 한개의 DPSSL 모듈은 총 여기출력 1.8-kW를 갖는다. Nd:YAG 레이저봉은 직경이 5 mm이고, 길이는 200 mm이며, 도핑농도는 0.6 at. % 이다. Nd:YAG 레이저봉의 전체길이 200 mm 중에서 여기되는 길이는 153 mm이고, 양쪽 끝부분의 23.5 mm는 여기되지 않았다. 사용된 난반사체(diffusive reflector)의 내부직경은 16 mm이다. 내부 직경과 LD이 발광면 사이의 간격은 1 mm이다. 레이저 결정의 냉각수 흐름을 위해서 사용된 흐름관(flow tube)은 내부직경이 9 mm 이고 외부 직경은 11 mm 이다. Pyrex 혹은 석영관으로 제작이 가능하며, 표면은 808 nm에서 AR 코팅되어 있다.

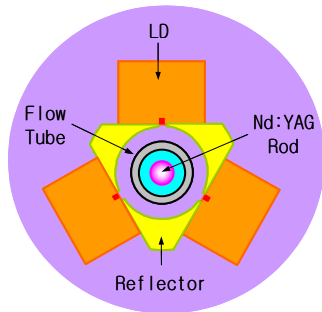


그림 1. DPSSL 모듈의 여기 구조도.

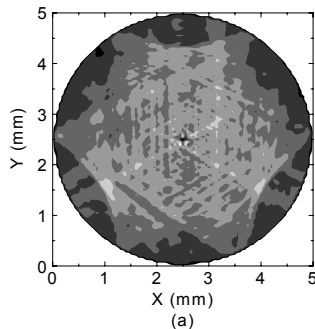


그림 2. 흡수강도분포 계산결과.

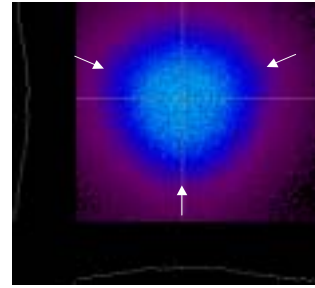


그림 3. I=18A에서 측정된 레이저 결정 중심부의 형광강도분포 측정결과.

난반사체 직경변화에 따른 흡수분포가 계산되었으며, 그림 2는 최적조건인 난반사체의 직경이 16 mm인 경우에 계산된 레이저 결정 내에 흡수된 여기 빔의 흡수강도분포를 보여주고 있다. 비교적 직경이 큰 난반사체를 사용함으로써 비교적 균일한 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 3은 레이저 결정 길이의 중앙부근에서 여기 빔을 흡수하여 실제로 발생하는 형광의 분포를 측정한 결과이며, 그림 2의 계산에서 예측된 것처럼 등방의 형광강도분포를 갖는 것을 알 수 있다. 그림에서 화살로 표시된 방향이 레이저 다이오드의 여기 빔이 레이저 결정에 입사하는 방향이다.

3. 공진기의 안정성 분석

고체레이저의 경우 여기빔의 출력이 증가함에 따라 레이저 결정의 열렌즈현상에 의해서 열초점의 길이가 변화하게 된다. 공진기의 안정조건은 열초점의 길이에 의존하므로 레이저 결정의 반경방향(r -)과 이에 수직한 방위각 방향(θ -)에서 열렌즈의 길이를 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 열렌즈를 측정하기 위하여 그림4와 같이 He-Ne 레이저빔을 확대한 다음, 다이오드 레이저에 의하여 여기되고 있는 레이저결정 봉에 보낸다. 다이오드 출력이 입사되기 전에는 He-Ne 레이저빔은 크기의 변화가 없이 진행하나, 입사 출력이 증가하면서 점점 집중된다. 집중된 빔의 직경을 CCD 카메라로 측정하면서 빔 직경이 최소가 되는 위치를 측정하여 반경방향의 편광에 대한 열초점거리 f_r 과 방위각방향의 편광에 대한 열초점거리 f_θ 를 측정하였다. 여기서 열초점거리 f_r 과 f_θ 는 여기된 레이저 봉의 끝에서 열초점까지의 거리를 측정한 값이다. 그림 5에 측정한 열초점거리와 다이오드 출력의 그래프와 열초점 거리의 역수인 역열초점거리와 다이오드 출력의 그래프를 나타내었다.

그림 5의 역 열초점거리와 다이오드 출력의 그래프로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

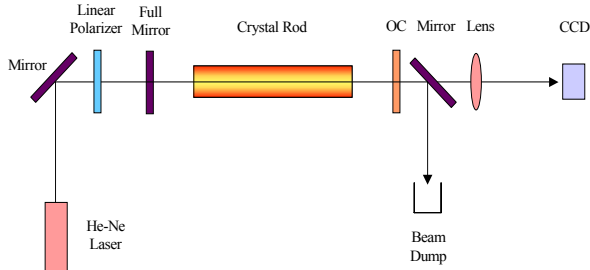


그림 4. 레이저 결정의 열초점 거리를 측정하기 위한 장치.

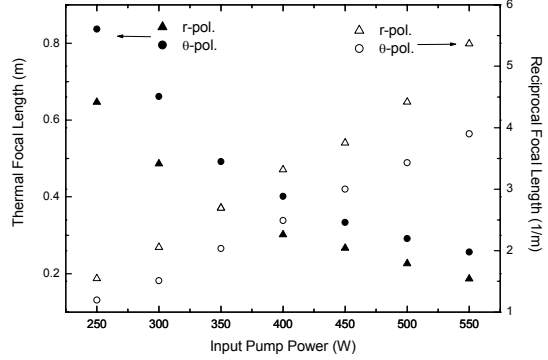


그림 5. 레이저 미 발진 상태에서의 열초점거리 및 역 열초점거리.

$$\begin{aligned} 1/f_r &= 12.33(D/kW)(P_{in} - 0.1324) \\ 1/f_\theta &= 9.01(D/kW)(P_{in} - 0.1173) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서, 반지름방향의 편광에 대한 역 열초점거리의 기울기는 12.33 D/kW이고 방위각방향의 편광에 대한 역 열초점거리의 기울기는 9.01 D/kW이다. 역 열초점거리의 기울기의 평균값은 약 10.67 D/kW이다. 평균 역 열초점거리의 기울기로 표현하면 다음과 같다.

$$1/f = 10.67(D/kW)(P_{in} - 0.1248) \quad (2)$$

식 (2)로부터 f_r 과 f_θ 와의 비는 $f_\theta/f_r \approx 1.37$ 이다. 일반적으로 실험치는 대략 1.35에서 1.5 의 범위에 있는 것을 고려해볼 때, r 편광과 θ 편광의 열초점거리의 비가 작은 것으로 보아 설계된 레이저 모듈의 경우 열복절의 정도가 그리 심하지 않음을 알 수 있다. 위 식 (2)로부터 다이오드의 최대 출력 1.8 kW 에서 열초점거리는 5.6 cm 로 계산되었다.

열렌즈 효과는 레이저가 발진하는 조건에서 측정된 값과 발진하지 않는 경우에 측정된 값이 다르다. 발진하는 경우는 여기된 레이저 이득매질에서 레이저 출력으로 여기에너지가 유출되므로 열렌즈 효과가 감소한다. 따라서 열초점거리는 출력경의 반사율에 따라 변화하게 된다. 본 연구에서는 반사율 70%의 출력경을 사용하여 실험하므로 역열초점거리의 기울기를 레이저가 발진하지 않는 경우의 값인 10.67 D/kW의 70%인 7.5 D/kW로 사용하였다.

1개의 레이저 모듈을 포함하고 있는 대칭 공진기의 round trip 에 대한 광선 전달 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} M_{tot} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \\ &= L_1 Q_{r,\theta} L_1 L_1 Q_{r,\theta} L_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, L_1 은 출력경 또는 전반사경에서 레이저 봉 끝면까지의 거리(l_1)을 나타내는 광선전달행렬이고, $Q_{r,\theta}$ 는 레이저 봉의 광선전달행렬이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{r,\theta} = CL_2 M_{r,\theta} L_2 C \quad (5)$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 1 & l_2/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)/|R| & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$M_{r,\theta}$ 는 레이저 봉 내에 포물선형 온도분포가 형성되어 레이저 봉을 렌즈 유사 매질이라고 가정한 경우의 렌즈 유사 매질에 대한 반지름 방향의 편광과 방위각 방향의 편광에 따른 광선 전달 행렬이다. L_2 는 레이저 봉의 여기되지 않은 부분(l_2)의 광선전달행렬이고, C 는 레이저 봉의 끝면에서의 곡률반경에 의한 광선전달 행렬이고, n 은 레이저 봉의 굴절률이며, R 은 레이저 봉 끝면의 곡률반경을 나타낸다. 따라서 출력경 또는 전 반사경에서 여기된 레이저 봉의 끝면까지의 광선거리는 다음의 식으로 표현된다.

$$d = l_1 + l_2/n \quad (8)$$

공진기 안정조건은 식 (3)으로 부터 얻을 수 있으며, 다음과 같이 주어진다.

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (9)$$

식(9)를 사용하여 flat end 레이저 봉($R=\infty$) 인 경우의 대칭공진기의 안정조건을 먼저 분석하였으며, 다이오드 출력에 따른 공진기 안정조건 그래프를 그림 6에 나타내었다. 실선은 반경방향의 편광에 대한 공진기 안정영역을 나타내고 점선은 방위각방향의 편광에 대한 공진기 안정영역을 나타낸다. 그래프의 앞부분에 나타난 선들은 각각 반경방향 편광과 방위각방향 편광에서 $\frac{A+D}{2} = 1$ 인 지점을 나타내고, 뒷부분에 나타난 색칠한 부분은 공진기의 불안정 영역이다. 반지름 방향(r-) 편광이 방위각 방향(θ -) 편광보다 먼저 불안정해짐을 알 수 있다. 공진기가 반경방향의 편광과 방위각방향의 편광에 대하여 동시에 안정한 영역에 있을 때 최대 레이저 출력을 얻을 수 있고, 두 편광이 모두 불안정하면 레이저가 발진하지 않게 된다.

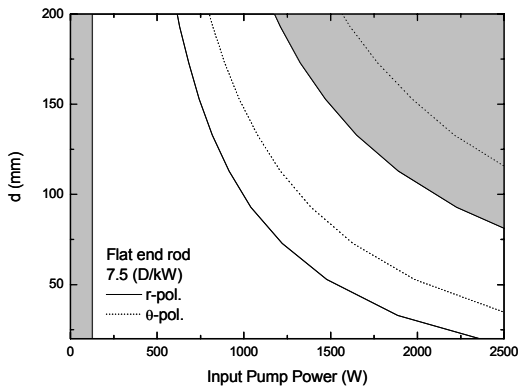


그림 6. 곡률반경 $R=\infty$ 인 레이저 봉을 사용한 경우의 평면-평행 대칭 공진기의 안정조건.

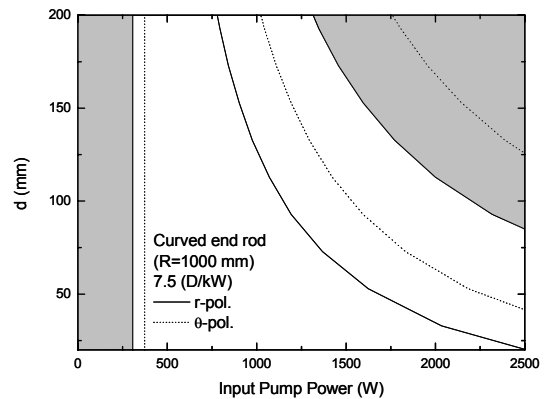


그림 7. 레이저 결정의 곡률반경 $R=1000$ mm인 경우의 평면-평행 대칭 공진기 안정조건.

Nd:YAG rod 레이저는 열렌즈 효과와 열복굴절에 의해 공진기 안정영역에 제한을 받게 된다. 레이저 봉 끝면(rod-end)에 오목곡률(concave curvature)을 줌으로써 열렌즈 효과를 완화하고 끝면 중심부에서의 팽창으로 인한 렌즈효과를 줄일 수 있다. 레이저 봉 끝면의 곡률반경(R)이 공진기 안정 영역에 미치는 영향을 알아보기 위하여 곡률반경이 1000 mm인 경우에 대하여 공진기 안정영역을 조사해 보았다.

그림 7은 레이저 봉 끝면의 곡률반경이 1000 mm인 경우에 대한 공진기 안정조건 그래프이다. Flat end 레이저 봉인 경우에 비하여 공진기 안정 영역이 고출력 쪽으로 이동하였음을 확인할 수 있다. 따라서 고출력 여기의 경우 오목곡률을 갖는 레이저 봉을 사용함으로써 안정조건 영역을 확대할 수 있다.

4. 적외선 DPSSL의 발진 특성

가. 실험장치

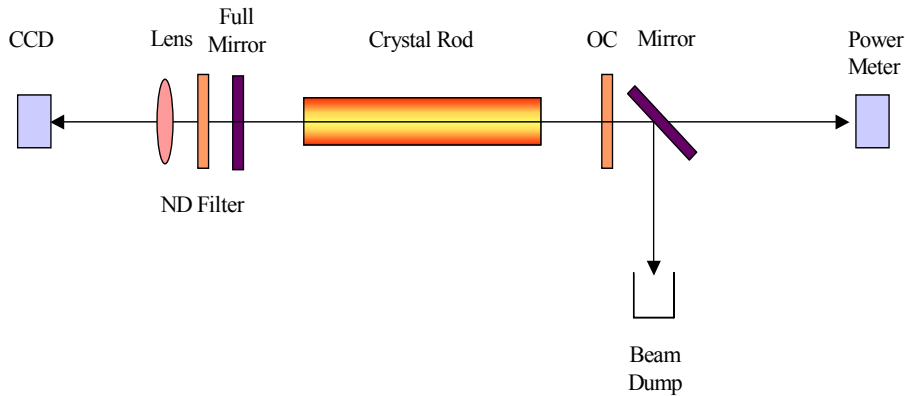


그림 8. DPSSL의 빔질 및 출력측정을 위한 실험장치.

그림 8은 600 W 급 DPSSL 장치의 출력과 M^2 빔질인자, 그리고 레이저 빔 공간분포를 측정하기 위한 실험장치를 보여 주고 있다. 레이저 결정으로는 5 mm x 200 mmL의 직경과 길이를 갖는 Nd:YAG 봉이 사용되었으며, Nd^{3+} 의 도핑농도는 0.6 at. % 이다. 전반사경(full mirror)의 반사율은 99.5% 이며, 출력경(OC, output coupler)의 반사율은 70%가 사용되었다. 출력경을 통해 방출되는 고출력의 레이저 빔은 85%의 반사율을 갖는 거울에 의해서 반사되어 beam dump에 보내지고 15%의 출력만 투과되어 레이저 출력을 측정하게 된다. 고출력의 레이저 빔을 출력경쪽에서 CCD를 사용하여 빔질을 측정하는데는 어려움이 있으므로 전반경 쪽에서 누설되는 1 W 미만의 출력을 ND 필터를 사용하여 강도를 조절하면 CCD를 사용하여 M^2 빔질인자와 빔공간분포를 쉽게 측정할 수 있다. M^2 빔질인자를 측정하기 위해서 사용된 볼록렌즈의 초점거리는 15 cm 이다. 고출력의 레이저 빔을 측정하는데 특히 유의할 사항은 반드시 빔덤프(beam dump)를 사용하여 산란 등에 의해서 방출되는 레이저 빔의 출력을 최소화 시켜 안전에 만전을 기해야 한다는 점이다.

나. 레이저 결정의 끝면이 평면-평면인 경우 DPSSL 발진 특성

그림 9는 레이저 결정의 끝면이 plat-end 일 경우의 인가 여기출력의 증가에 대한 레이저 출력의 변화를 보여 주는 실험결과이다. 평면-평행 대칭공진기의 출력경의 반사율은 $R=70\%$ 일 경우이며, 레이저 활동매질 끝면과 레이저 거울사이의 광학적 경로는 $d=d_1=d_2=136$ mm 이다. 레이저 출력은 약 100 W의 여기 출력에서 발진을 시작하여 여기 출력이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기 출력과 레이트 출력과의 상관 관계를 좀더 세밀하게 살펴보면, 여기 출력 약 1 kW 이하의 안정 영역에서는

레이저 출력이 거의 선형적으로 증가하다가 여기 출력 1 kW 근처에서 레이저 출력의 증가세가 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 그림 6의 $R=\infty$ 인 경우의 레이저 결정에 대한 평면-평행 공진기의 안정조건 분석에서 보여진 바와 같이 여기출력 1 kW, $d=136$ mm는 r-와 θ -편광에 대한 임계 불안정 영역(critical unstable region)에 속하기 때문이다. 그 이후의 1.6 kW의 이하의 여기 출력에서 다시 선형적으로 레이저 출력이 증가하고 있는데 그 이유는 다시 안정영역에서 레이저가 동작하고 있기 때문이다. 1.6 kW 이후에 다소 불안정한 레이저 출력은 이 영역의 여기출력은 r-편광에 대해서 불안정한 영역에 진입하기 때문이다. 약 1.9 kW의 최대 여기 출력에서 약 675 W의 최대 레이저 출력을 얻었다.

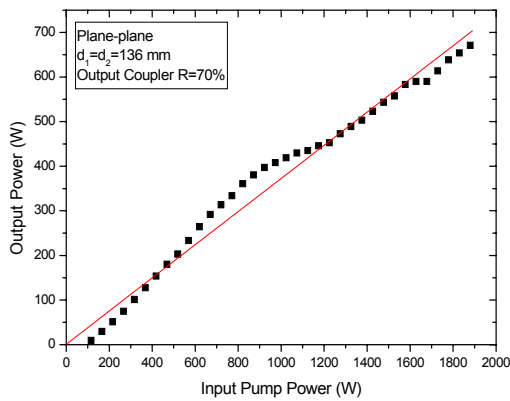


그림 9. 여기출력의 변화에 따른 레이저 출력 변화. $R=\infty$

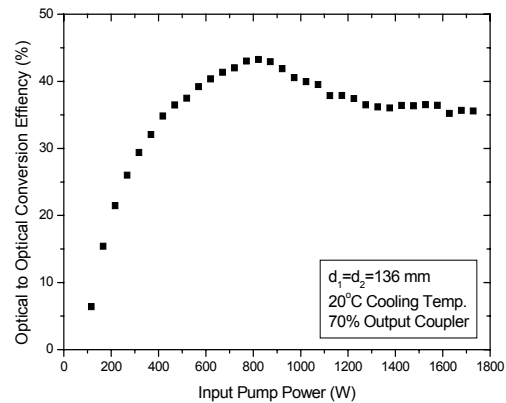
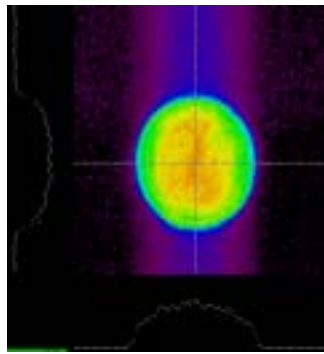


그림 10. 여기출력의 변화에 따른 레이저 출력의 광전환효율의 변화. $R=\infty$

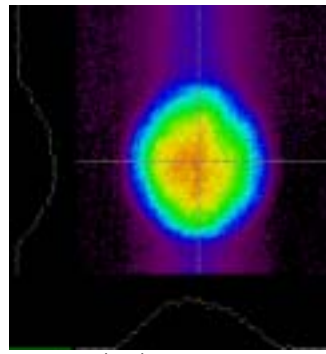
그림 10은 여기 출력의 변화에 따른 레이저 출력의 광전환 효율(optical-to-optical conversion efficiency)의 변화를 보여주고 있다. 최대 광전환 효율은 여기 출력 약 800 W 근처에서 측정되었으며 약 45 % 정도이다. 여기 출력 1.8 kW 내외에서의 최대 여기 출력 근처에서도 여전히 36%에 이르는 고효율을 보여주고 있다.

그림 11은 여기출력(인가 전류)의 증가에 따른 레이저 빔의 변화를 보여주고 있다. 여기서 인가전류 50 A는 여기 출력 1.8 kW에 해당한다. 약 1050 W에 해당하는 35 A 근처에서 불안정 공진기 조건에 의해서 레이저 빔이 다소 왜곡된 분포를 보이거나 특이한 점은 발견되지 않았다.

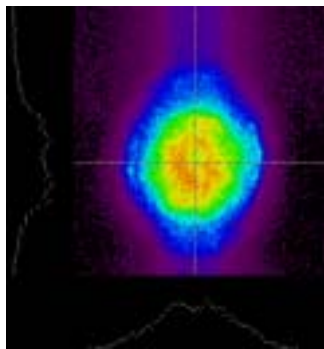
횡여기 레이저 구조에서 레이저 헤드의 중심에 위치한 봉형의 레이저 결정은 측면에서 입사하는 여기빔에 의해서 결정의 내부가 가열되고 결정의 표면(barrel)은 냉각수에 의해서 냉각되므로 한 개의 비구면(aspheric)을 갖는 볼록렌즈의 형태가 되며, 렌즈의 초점



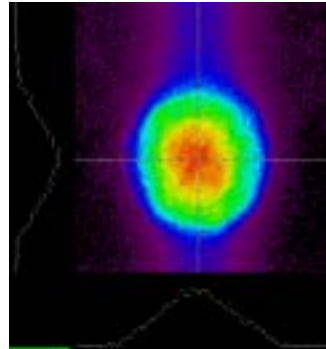
(a) 25 A



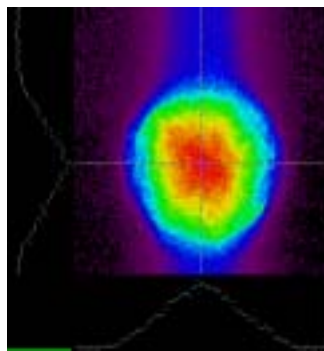
(b) 30 A



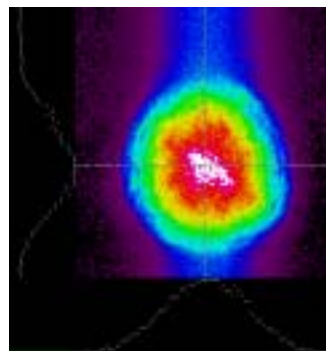
(c) 35 A



(d) 40 A



(e) 45 A



(f) 50 A

그림 11. 레이저 결정이 평면-평면인 경우의
여기출력의 증가에 따른 레이저 빔의 공간분포

거리는 여기출력의 증가에 반비례하여 짧아지게 된다. 이러한 볼록렌즈를 공진기의 중앙에 갖는 좌우대칭형 평면-평행공진기에서 레이저 모드는 레이저 결정의 중앙에서 최대의 직경을 갖고 레이저 거울의 표면에서 최소의 직경을 갖는 형태로 형성되게 된다. 레이저

결정의 중앙에 형성된 모드의 크기는 여기출력의 변화에 따라 직경의 크기가 변화하게 되며, 레이저 결정의 초점거리에 전반사경과 출력경을 각각 좌우에 위치시킬 경우 중앙에 형성된 모드는 그 직경이 최대가 된다. 따라서 레이저 결정의 중앙부의 직경이 멀티모드로 동작하는 레이저 공진기의 개구(aperture)의 역할을 하게 된다. 이 경우 aperture stop 역할을 하는 레이저 결정의 반경과 레이저 결정의 중앙에서의 TEM₀₀ 모드 반경의 비는 측정된 레이저 빔질인자가 m인 경우 \sqrt{m} 에 해당하는 값을 갖는다.

그림 12에 여기 출력의 변화에 따른 M² 빔질인자의 변화를 나타내었다. 인가전류 20-30 A 사이에서 M² 빔질인자는 약 50으로 측정되었으며, 이후 40 A에서 M²=45, 그리고 45 A에서 M²=40 으로 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. M² 빔질인자를 더욱 줄이기 위해서는 레이저 공진기 거울 사이의 거리를 증가시키는 방법, 곡률을 갖는 거울을 사용하여 공진기를 구성하는 방법, 개구를 사용하여 고차 모드의 발전을 제어하는 방법, 두 개의 레이저 모듈을 사용하여 열복굴절(therma birefringence)을 보상하고 동시에 공진기의 길이를 늘이는 방법 등을 생각해 볼 수 있다.

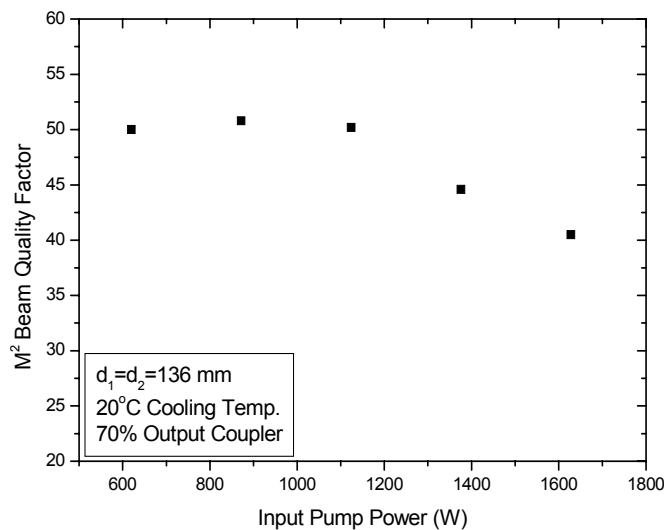


그림 12. 여기 출력의 증가에 따른 M² 빔질인자의 측정 결과.

다. 레이저 결정의 끝면이 오목-오목인 경우 DPSSL 발진 특성

레이저 결정의 양끝면에 곡률반경 R=1000 mm를 가질 경우 평면-평행 대칭공진기의 안

정조건은 그림 7에 계산된 것처럼 첫 번째 불안정영역(unstable region)과 두 번째 불안정 영역이 flat-end를 갖는 레이저 결정을 사용한 경우의 그림 6에 비해서 주어진 공진기 거리 d 에서 높은 여기 출력 영역에 존재한다. 따라서 고출력의 여기빔 하에서 안정적으로 동작할 수 있는 공진기 조건을 얻는 것이 가능하다.

그림 13은 평면-평행 공진기 구조에서 레이저 결정의 양끝면에 곡률반경 $R=1000$ mm인 경우 여기출력의 변화에 따른 cw 적외선 레이저의 출력 변화를 보여 주고 있다. 공진기 거울의 거리 $d=d_1=d_2=136$ mm가 사용되었다. 레이저 발진 문턱 여기출력은 약 200 W이며, 약 1.1 kW이하의 공진기 안정조건에 해당하는 여기출력영역에서는 레이저 출력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 flat-end를 갖는 레이저 결정의 경우에서처럼 첫 번째 불안정 영역에 속하는 여기 출력 약 1.2 kW 근처에서 레이저 출력의 증가세가 감소함을 알 수 있다. 그러나 1.4에서 1.7 kW 이하의 여기 출력의 증가에 대해서는 공진기의 안정조건에 해당하므로 레이저 출력이 다시 증가한다. 약 1.8 kW의 여기 출력에서는 r-편광에 대한 두 번째의 불안정 영역이 시작되므로 레이저의 출력증가가 다소 주춤하는 것을 볼 수 있다. 여기 출력 1.8 kW에서 약 675 W의 레이저 출력을 얻었다. 이러한 레이저 출력은 약 37.5%의 광전환 효율에 해당한다. 레이저 출력면에서 $R=1000$ mm의 곡률을 갖는 레이저 결정의 경우 flat-end를 갖는 레이저 결정에 비해서 다소 광전환 효율이 증가함을 알 수 있다.

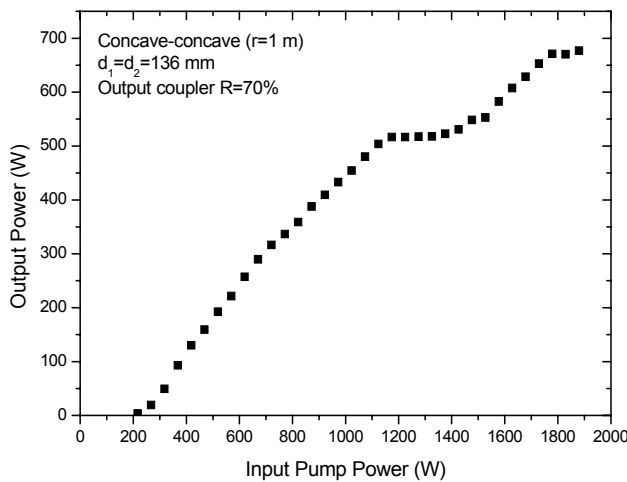


그림 13. $R=1000$ mm인 경우 여기출력의 증가에 따른 레이저 출력의 변화.

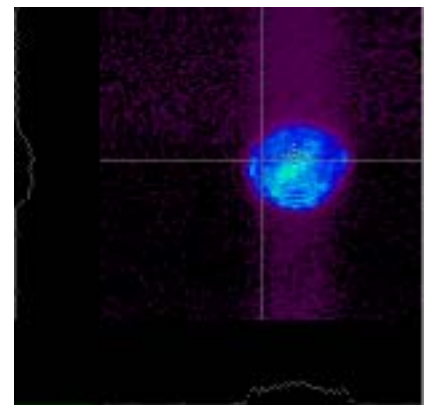


그림 14. 곡률이 있는 레이저 결정 끝면과 공진기의 거울이 정렬되기 전의 레이저 빔의 강도분포. $I=25A$

레이저 결정에 곡률이 있는 경우 자동 시준기(auto collimator)를 사용하여 레이저 공진기를 광학적으로 정렬하는데 다소 어려움이 있으며, 또한 레이저 양끝면의 곡률 중심이 불일치하는 현상도 발생하게 된다. 이 경우 그림 14에 보여진 바와 같이 레이저 빔의 공간분포는 왜곡되게 된다. 이러한 문제는 공진기의 x-y 미동나사를 조절하여 레이저 출력을 최적화하여 왜곡현상을 해소할 수 있다.

그림 15는 R=1000 mm인 곡률을 갖는 레이저 결정을 사용한 경우의 평면-평행공진기에서 여기 출력의 증가에 따른 레이저빔의 강도분포 변화를 측정한 결과이다. 이때 공진기 거울의 거리 $d=d_1=d_2=136$ mm가 사용되었다. 인가 전류가 증가함에 따라 레이저 강도 분포상에 큰 변화는 없으나, flat-end를 갖는 레이저 결정의 경우와 비교해서 레이저빔의 강도분포 중앙에 높은 강도를 갖는 점(spot)이 형성된다는 점이다. 이러한 spot은 고출력 레이저 빔 발생시 공진기 내부 광학부품의 표면에 손상(damage)을 줄 수 있으므로 그 원인을 파악하는 것이 필요하다. 레이저 결정의 곡률반경의 영향, 레이저 결정의 양끝면에 사용된 SUS 재질의 관(sleeve)의 영향 등을 조사할 필요가 있다.

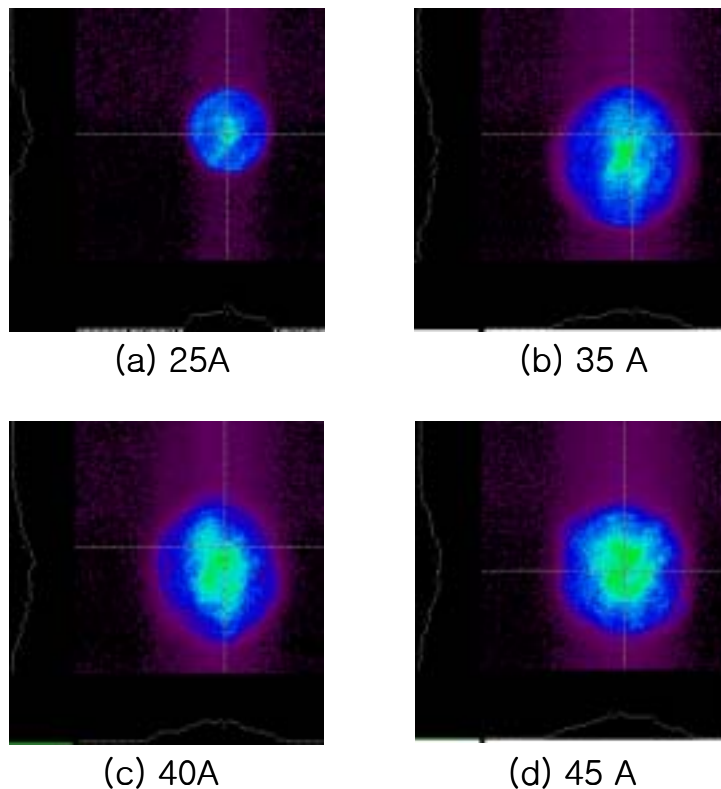


그림 15. R=1000 mm인 경우의 평면-평행공진기에서 여기 출력의 증가에 따른 레이저빔의 강도분포 변화.

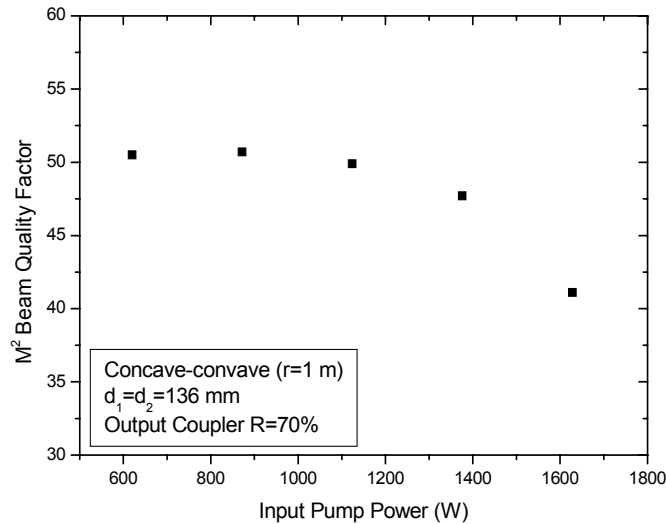


그림 16. 여기출력의 변화에 따른 M^2 빔질인자의 변화.

그림 16에 $d_1=d_2=136$ mm 조건에서 $R=1000$ mm인 경우의 여기 출력의 증가에 따른 M^2 빔질인자의 변화를 측정된 결과를 나타내었다. $I=35$ A인 1050 W 근처의 여기 출력에서 약 50의 M^2 빔질인자가 측정되었으며, 45 A에서 41로 측정되었다.

5. 결론

레이저 결정이 flat-end의 형태를 갖는 경우와 곡률 $R=1000$ mm를 갖는 경우에 대해서 공진기의 안정조건에 대한 이론적 분석연구가 수행되었으며, 이러한 분석으로부터 곡률반경이 있는 경우 고출력의 여기 출력에서 안정조건이 있음을 밝혔다.

짧은 공진기 조건에서 멀티모드로 동작시 700 W 이상의 레이저 출력을 갖는 다이오드 여기 고체레이저 모듈 1대를 제작하였다. 제작된 레이저 모듈을 이용하여, 약 1.8 kW의 여기 출력과 레이저 결정으로부터 거울까지의 거리 $d=136$ mm의 조건에서 675 W의 레이저 출력을 발생시킴으로서 약 37.5%의 높은 광전환 효율을 갖는 DPSSL 시스템을 개발하였다. 개발된 적외선 레이저는 최대 레이저 출력 675 W에서 M^2 빔질인자가 약 40정도로 고품질 빔을 갖고 있다.