

단일 타원 펄스형 Nd:YAG 레이저의 TEM₀₀ 모드화

이동훈 문진규 광병구 김희제* 조정수 박정후
부산대학교 전기공학과

A study on the TEM₀₀ mode of the pulsed Nd:YAG laser
with a single elliptical cavity

D.H.Lee, J.K.Moon, B.G.Kwak, H.J.Kim*, J.S.Cho, C.H.Park
Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

Abstract - Nd:YAG laser has been used in many applications such as micromachining, nonlinear optical experiments, holography, and rangefinding. These applications quite often require operation of the laser at the TEM₀₀ mode since this mode produces the smallest beam divergence, the highest power density, and, hence, the highest brightness. In this study, a pinhole is put between a rod and a half mirror to make the TEM₀₀ mode, and then we measured the intensity distribution of the output beam as reducing the diameter of the pinhole from 6mm to 1.5mm. As a result, the optimum size of the pinhole fixed in a resonator to make the TEM₀₀ mode was obtained, and we found out that the output beam of the pulsed Nd:YAG laser with a single elliptical cavity has a Gaussian distribution.

1. 서 론

Nd:YAG 레이저는 산업용, 의료용, 물리·화학 분야의 기초 연구에 이르기까지 광범위하게 이용되어 최근에 각광을 받고 있는 대표적 고체 레이저이다[1]. 이러한 응용 중에서 마이크로머시닝(micromachining), 비선형 광학 실험(nonlinear optical experiments), 홀로그래피(holography) 등에서는 가장 작은 빔 발산각, 가장 높은 에너지 밀도, 최고 휘도 등의 특징을 가지고 있는 TEM₀₀ 모드에서의 레이저 동작을 요구하고 있다[2]. 따라서, 본 연구에서는 단일 타원형 공진기[3]로 구성된 펄스형 Nd:YAG 레이저의 TEM₀₀ 모드를 직접 실험적인 방법으로 구현해 보고, 이론적으로 얻어지는 TEM₀₀ 모드의 출력빔 에너지 강도 분포와 실험 결과를 비교,검토하였다. 또한, 이렇게 얻어진 결과로부터 단일 타원 펄스형 Nd:YAG 레이저를 TEM₀₀ 모드화 시키기 위한 공진기 내부 핀홀의 최적 치수에 대해 이론적으로 설명한 후 실험적인 방법을 통해 확인하였다.

2. 이 론 고 찰

2-1. 레이저빔의 에너지 강도 분포

레이저빔의 형태는 레이저 공진기 양단을 왕복하는 광자들의 전자기장에 의해 결정된다. 이 전자기장 설명에 사용되는 TEM_{mn} (Transverse ElectroMagnetic) 은 전파 방향에 수직인 면의 전자기장을 의미한다. 본 연구에서 구하는 TEM₀₀ 모드는 동일한 위상의 파면을 가지며, 그 에너지 강도 분포 $I(r)$ 은 아래 그림 1과 같이 빔이 조사되는 표면 중심으로부터 원주 방향으로 Gaussian 분포를 가진다.

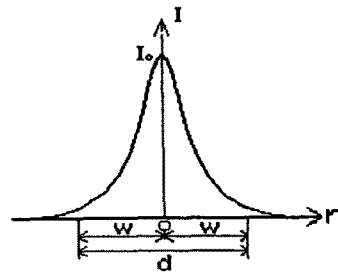


그림 1

$$I(r) = I_0 \exp \left\{ -2 \left(\frac{r}{\omega} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

r : 빔의 중심으로부터 원주 방향의 거리

ω : 점크기(spot size)로서 빔허리(waist)

I_0 : 빔의 중심에서 최고 출력 밀도

d : 빔의 직경 (I_0 의 e^{-2} 로 되는 위치의 크기)

의 축상에 있는 광선은 두 거울에 의해 반사를 반복하게 된다. 그러나 왕복 횟수가 증가하게 되면 광선은 발산하여 손실이 커지게 된다. 반면에 광선이 광축에 접근해 있게 되면 공진기의 손실은 작게 된다. 이러한 관계를 고려해 레이저 공진기의 안정성 조건을 다음과 같이 얻을 수 있다 [4][5].

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1 \quad (2)$$

M_1 거울: $q_1 = 1 - L/R_1$ L : 공진기 길이

M_2 거울: $q_2 = 1 - L/R_2$ R_1, R_2 : 공진기 거울의 곡률반경

본 연구에서 $q_1 = 0.575$, $q_2 = 1$ 이라 공진기는 안정성 조건을 만족한다.

2-3. Fresnel 수 (N_f)

공진기 내에서 반지름이 a 인 핀홀(pinhole)을 넣었을 때 회절 손실을 나타내는 수이다.

$$N_f = \text{허용각} / \text{회절각} = \frac{(a/L)}{(\lambda/a)} = \frac{a^2}{\lambda L} \quad (3)$$

Fresnel 수가 1 이하일 때 회절 손실은 크나 TEM₀₀ 모드를 만들기 쉽다고 알려져 있다. 본 연구에서는 핀홀의 크기를 rod의 직경인 6mm에서 1.5mm까지 변화시켰다. 레이저 파장 λ 는 1.064 μm 이며 공진기 길이 L 은 0.85m 이라 핀홀 개구직경이 1.9mm일 때 N_f 가 1이 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

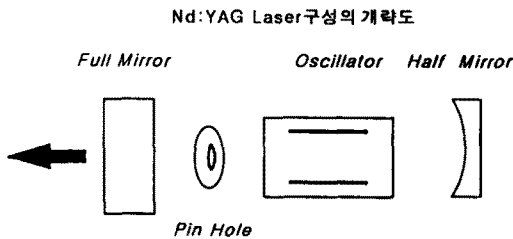


그림 2

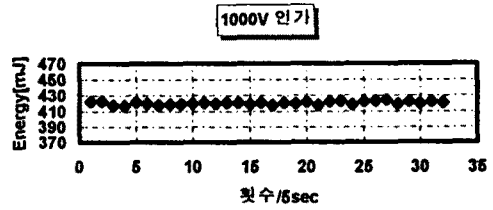


그림 3

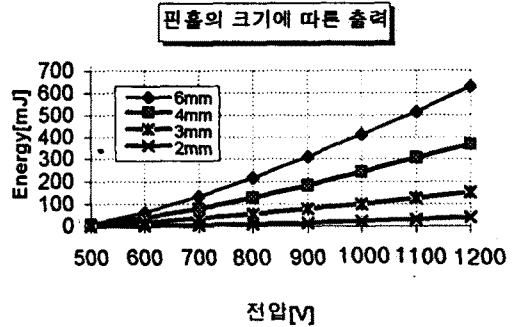


그림 4

먼저 본 실험에 들어가기 전에 발생된 펄스 레이저빔 출력의 시간에 따른 안정도 즉, 장시간 실험에서 출력빔의 변화 정도를 조사하였다. 그리고 나서, 공진기 내부(rod와 출력 반사경 사이)의 레이저빔 경로 중심에 정확히 핀홀을 설치하고 핀홀의 개구직경을 rod의 직경인 6mm에서 4mm, 2mm 순으로 1.5mm까지 감소시켰다. 발생된 출력빔의 직경이 작은 경우는, 출력경 외부에 볼록렌즈 하나를 설치하여 그 크기를 확대하였다. 그리고 에너지 메타 직전에 직경 1mm 크기의 핀홀을 두어 동간격(1mm)으로 정확히 이동시켜 가며 출력빔의 에너지 강도 분포를 측정하여 이론적으로 예상한 N_f 값에서 TEM₀₀ 모드가 되는지 확인하였다. 그림 3에서는 충전전압 1000V에서 플래쉬램프를 구동하기 위해 SCR의 게이트를 5초 간격으로 30회 정도 트리거 했을 때의 레이저 출력 변화를 보여주고 있다. 이 결과 출력빔의 변화율은 에너지 메타의 오차율을 감안할 때 0.5%이내에 있다는 것을 알 수 있다.

그림 4에서는 핀홀의 직경의 크기에 따른 출력빔의 에너지값의 변화를 나타내고 있다. 입력 전압이 500V일 때는 발진 자체가 일어나지 않았고, 다른 입력 전압에서는 핀홀의 직경 크기에 비례해 출력값이 증가함을 알 수

있었다. 그림 5에서는 실험 결과 중에서 핀홀 개구직경을 4, 2, 1.5mm로 했을 때 정규화된 출력빔의 에너지 강도 분포를 나타내고 있다. 직경이 줄어들면서 에너지 강도 분포가 이론적으로 알려진 Gaussian 분포가 되어감을 확인할 수 있다. 즉, 핀홀 개구직경이 1.5mm 근처에서 TEM₀₀ 모드가 된다는 것을 알 수 있다.

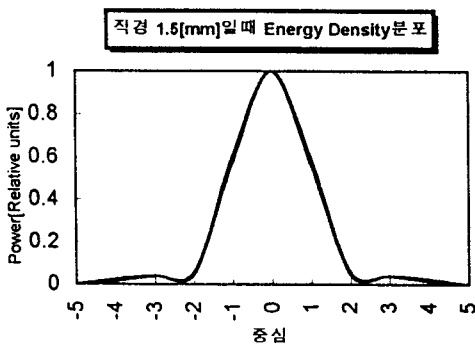
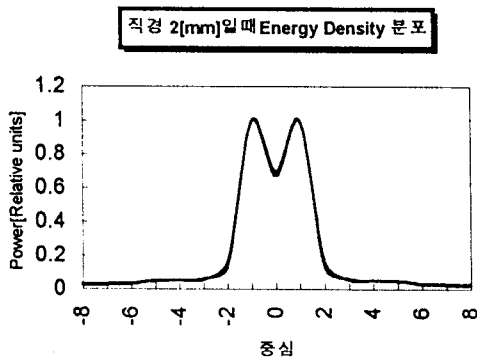
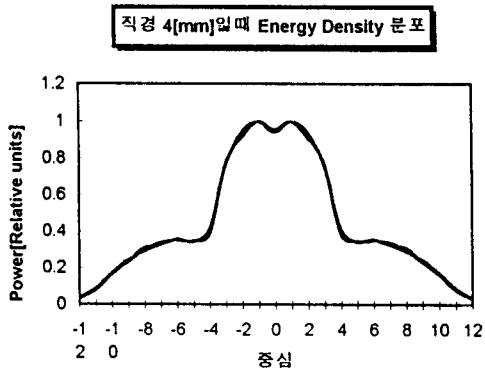


그림 5

4. 결 론

본 연구에서는 단일 타원형 공진기로 구성된 Nd:YAG 레이저를 TEM₀₀ 모드화 시키기 위해서 안정형 공진기 내에 핀홀을 설치하여 그 개구직경의 치수를 조절해 주면서 출력빔의 에너지 강도 분포를 직접 측정하였다. 그리고 이렇게 얻어진 실험 결과와 이론적으로 구해지는 TEM₀₀ 모드의 강도 분포를 비교하여 핀홀 개구직경이 1.5mm 근처에서 에너지 강도 분포가 Gaussian 분포를 한다는 것을 확인하였다. 향후, 핀홀을 이용하지 않고 TEM₀₀ 모드를 만들 수 있는 변수들에 대한 연구를 계속해 갈 것이다. 본 연구는 그러한 목적을 수행하기 위한 가장 기초적인 데이터를 확보한 것으로서 이 결과를 토대로 TEM₀₀ 모드의 출력빔 효율 향상에 주력해 갈 계획이다.

참고문헌

- [1]山中千代衛의 외, “こんなどころにも使われているレーザ技術”, 電學誌 113卷, 第11號, 1993, pp.903-927
- [2]W.Koechner, “Solid-State Laser Engineering”, Springer Verlag, New York, Heidelberg, 1976
- [3]C.Bowness, “On the Efficiency of Single and Multiple Elliptical Laser Cavities”, APPLIED OPTICS, January 1965, Vol.4, No 1
- [4]R.B.Chester and D.Maydan, “Convex Concave Resonators for TEM₀₀ Operation of Solid State Ion Lasers”, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974, Received 8 December 1971
- [5]Jurg Steffen, Jean Pierre Lortscher, and G.Herziger, “Fundamental Mode Radiation With Solid-State Lasers”, IEEE Journal of Quantum Electronics, February 1972