

## 반공초점 공진기 구리증기레이저의 퍼짐각 제어\*

정지철 · 유영태

조선대학교 정밀기계공학과

임 기 건

전남대학교 물리학과

(1997년 3월 13일 받음)

구리증기레이저 출력빔의 퍼짐각을 제어하고 원거리강도분포를 개선하기 위하여, 공진기 내에 조리개와 선속분할기를 갖는 안정공진기에 대한 실험적인 연구를 시행하였다. 기본형태로서 반공초점 방식을 채택한 안정공진기를 구성하고, 조리개 구경의 변화에 따른 (발진모드의 제어) 출력빔의 퍼짐각과 레이저출력의 의존성을 측정하였으며, 선속분할기의 광축과 이루는 각도의 변화에 따른 (공진기손실의 제어) 퍼짐각과 레이저출력의 변화를 측정하였다. 조리개 구경의 크기를 14 mm에서 2 mm로 점차적으로 줄임에 따라 퍼짐각을 3.1 mrad에서 0.25 mrad까지 연속적으로 조절할 수 있었고, 8배로 증가된 원거리출력밀도를 얻었다.

### I. 서 론

레이저광의 횡방향 강도분포를 개선하기 위하여 조리개(adjustable aperture) 또는 광분할기(beam splitter) 등 간단한 광학소자들이 자주 사용된다. 이 논문에서는 조리개와 광분할기를 구리증기레이저(copper vapor laser) 공진기 내에 직접 설치하여 출력빔의 퍼짐(beam divergence)을 제어할 수 있는 공진기 형태를 소개하고, 그 출력특성에 대하여 보고한다. 이 실험의 결과는 구리증기레이저와 같은 펄스형 고출력레이저를 활용한 레이저가공 및 레이저펌핑 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

구리증기레이저는 가시광선 영역에서 수 백 W의 고출력과 수 백 kHz의 높은 펄스반복율, 3% 정도의 고효율로 동작이 가능한 펄스형 기체레이저이다. 구리증기레이저는 증기상태인 중성구리원자의  $^2P_{3/2}$ ,  $^2P_{1/2}$  준위를 높은 레이저준위로 하고  $^2D_{3/2}$ ,  $^2D_{5/2}$  준위를 낮은 에너지준위로 하여 510.6 nm(초록)와 578.2 nm(노랑)의 두 파장에서 발진된다. 높은 레이저준위들은 기저상태  $^2S_{1/2}$ 에서 가장 가까운 공명준위이므로 빠른 펄스 방전에 의하여 높은 효율로 여기가 가능하고, 낮은 레이저준위에서 기저상태로는 금지된 전이이므로, 펄스형태로만 동작이 가능하다.

구리증기레이저는 색소레이저의 펌핑광원으로 활용되고 있으며<sup>[1]</sup>, 최근 새로운 파장가변 레이저로 주목받고 있는 Ti:sapphire 레이저의 유력한 펌핑광원의 가능성이 주목되고 있다.<sup>[2]</sup> 반도체 및 광집적회로 분야에서 집속성이 우수하고 보다 짧은 파장의 광집적용 광원에 대한 개발이 첨예한 관심이 되고 있다. 이와 관련하여, 구리증기레이저 이차고조파 발생

의 효율을 높이고자 하는 연구가 진행되고 있다.<sup>[3]</sup> 또한, 레이저 가공분야에서는 보다 다양한 파장, 작은 퍼짐각(beam divergence), 우수한 강도분포(field-pattern)를 갖는 고출력 레이저가 요구되고 있다. 레이저 출력빔의 특성을 파악하고 우수한 집속성을 갖는 발진장치의 개발은 산업계의 다양한 요구에 따른 레이저 활용 관련 기술을 확보하기 위한 선결과제이다.<sup>[4]</sup> 레이저 가공분야에는 Nd:YAG 레이저와 CO<sub>2</sub>레이저, Excimer 레이저가 주로 사용되고 있으나, 구리증기레이저의 펄스 형태의 고출력 특성을 활용하여 기계가공 영역에 그 활용이 확대되고 있으며, 이러한 활용성을 높이기 위해 구리증기레이저의 출력빔의 퍼짐각을 개선하는 연구가 긴요하다.

구리증기레이저의 높은 이득율과 관련하여 공진기 형태는 흔히 반사율 99% 이상의 평면경과 4% 또는 8% 반사율을 갖는 평면경으로 구성된 평행평판(plane-parallel) 공진기가 주로 사용된다. 이 경우, 레이저의 출력은 여러 횡모드(transverse mode)를 포함하게 되고 초점에 집속된 광속의 단면적이 커서 집속된 출력밀도는 상대적으로 작은 값을 갖게 되어, 퍼짐각은 회절한계각의 수십배의 크기를 갖는다.

구리증기레이저 출력빔의 퍼짐각을 줄임으로서 초평면에서의 집속광의 분포 및 조도를 개선하기 위한 연구가 1970년대 후반에 시작되었고, 불안정공진기를 활용한 레이저에서 회절한계의 퍼짐각을 갖는 레이저장치가 보고되었다.<sup>[5,6]</sup> 출력과 횡방향분포 특성을 고려한 몇 가지 공진기 형태들이 소개되었고<sup>[7]</sup>, 공진기를 구성하지 않고 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 형태로 출력시켜 부분적으로 개선된 강도분포를 얻은 연구도 발표되었다.<sup>[8]</sup> 기존의 불안정공진기 구리증기레이저 장치는 펄스형태의 높은 이득과 관련하여 기하학적 배율이 수 백 정도의 반사경계를 사용함으로써 출력의 현저한 저하없이 회절한계값에 가까운 퍼짐각을 얻을 수 있지만, 근거리강도분포(near-field pattern)는 원형고리 형태이며

\*이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

출력이 공진기 섭동에 민감하다는 단점을 갖는다.

이 논문에서는 Ti : sapphire 레이저의 펌핑을 위한 낮은 퍼짐각 발진과 증가된 원거리출력밀도(far-field power density)를 얻기 위하여, 공진기 내에 위치한 조리개와 광분할기를 사용한 반공초점(hemiconfocal) 공진기에서 발진되는 레이저출력의 특성분석실험에 대한 연구결과를 보고한다.

## II. 실험장치

### 2.1. 레이저장치

실험에 사용된 구리증기레이저는 자체제작된 공냉식 장치이며<sup>9)</sup> alumina ceramic 방전관의 내경은 1.2 cm, 방전전극 사이의 길이는 50 cm로서, 사용가능한 온도는 최대 1650°C 정도이다. 방전관 내부에 순도 99.99%인 구리 3.3 g을 30등분하여 6개씩 5 cm간격으로 방전관 중앙에 오도록 배치하고 50 mbar 정도로 네온기체를 방전관에 채우고 방전전압과 펄스반복률을 증가시키며 방전가열을 시작한다. 고온에서 방전관과 발진기 내의 기타 내열재료에서 발생하는 불순기체를 지속적으로 제거하기 위하여 레이저 동작 중에도 네온기체를 계속 흘러 보낸다. 네온기체의 유량은 대략 0.4 l-atm/hr 이었다.

비교적 낮은 네온기체압력에서 방전전압을 상승시킬 경우, 음극에서 발생하는 이물질(전극 또는 전극 주변의 금속산화물로 추정)이 방전관 내부에 부유하는 것이 레이저 창(window)을 통하여 관찰되었다. 방전이 진행됨에 따라 이물질이 레이저 창에 흡착되어 레이저출력이 현저하게 떨어지는 현상이 관측되었고, 이 현상은 가스유입부를 분사구(nozzle) 형태로 제작하여 유입되는 완충가스가 레이저 창에 분사되도록 함으로서 부분적으로 개선할 수 있었다. 이 현상은 30 mbar 이하의 낮은 압력에서만 관측되었다.

레이저의 운용은 충전전압 10 kV, 주파수 4 kHz, 네온기체압력 70 mbar의 조건에서 주로 시행되었다. 충전전압이 7 kV 정도에서는 완충가스를 공급하는 가스라인을 따라 대략 1 m 길이의 코로나방전을 관측할 수 있었으며, 이때 레이저 방전관과 병렬로 연결된 전기저항에서 상당한 열이 발생되는 것이 관측되었다. 일단, 레이저 발진이 시작되면 코로나방전은 보이지 않게 되며 전기저항에서 발생하는 열도 거의 없어져서 충전된 전력의 대부분이 방전관에서 소모됨을 알 수 있었다.

### 2.2. 측정장치

이 실험에서 사용된 측정장치의 기본적인 구성이 그림 1에

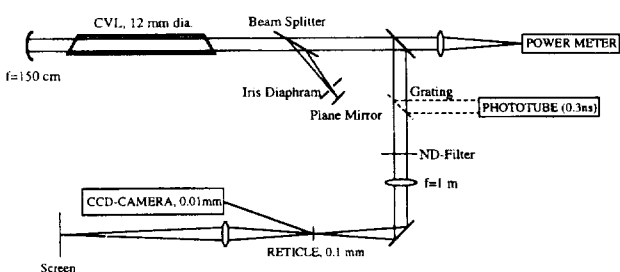


그림 1. 실험장치.

나타나 있다. 레이저출력은 초점거리가 20 cm인 집광렌즈의 초점 근처에서 레이저출력계(Spectra-Physics, model 404)를 사용하여 측정하였다. 레이저출력계 검출부의 수광각(acceptance angle)은  $\pm 5^\circ$ 이며, 두 발진파장 510.6 nm와 578.2 nm에서 실리콘 검출소자의 분광감도 보정계수는 각각 1.02와 0.97이다. 또한, 계기 내부의 증폭회로로 인하여 평균출력 측정값은 측정범위에 따라 다른 값을 나타내기 때문에, 열전기더미(thermopile)형의 광측정기(Moletron, PM5200/PM30)를 활용하여 레이저출력계의 측정값을 보정하였다. 이 논문에서 보고되는 평균출력은 집광렌즈 및 퍼짐각 측정을 위해 공진기 외부에 별도로 설치된 광분할기에 의한 손실을 보정한 값이다.

레이저 출력빔의 퍼짐각 측정은 우선 10%의 반사율을 갖는 공진기 외부의 광분할기와 초점거리가 1 m인 수렴렌즈(CVL, Achromat Lens)를 통과하여 0.1 mm 간격의 눈금이 새겨진 십자선(reticle)에 원거리선속이 맺히도록 한다. 십자선에 맺혀진 원거리강도분포(far-field pattern)는 눈금과 함께 결상렌즈에 의해 스크린 위에 확대된 상을 맺게 되어 육안으로 빔의 직경을 측정할 수 있다. 십자선의 눈금을 집속된 레이저광으로 부터 보호하기 위하여 ND 필터가 사용되었다. 이 방법에 의한 측정오차는 십자선의 최소눈금과 육안관측 오차에 따라 대략 0.05-0.1 mrad 정도의 오차를 갖게 된다.

위에서 기술한 퍼짐각 측정결과와 신뢰성을 확인하기 위하여 768×494 개의 실리콘 검출소자로 구성된 CCD 측정장치(Spiricon Model LBA-100i / Pulnix-TM-7CN, 8.4×9.8  $\mu$ m, 6.5×4.8 mm)를 이용하여 퍼짐각을 다시 측정하였다. CCD 장치의 내장프로그램에 의해 계산된 퍼짐각의 값은 약간 불안정한 값을 보여주었으나, 십자선을 사용하여 측정한 값과 측정오차의 범위 내에서 대체로 부합된 결과를 보여주었다.

## III. 레이저의 출력특성

### 3.1. 평행평판 공진기 레이저의 출력특성

이 실험에서 사용한 레이저장치의 동작특성을 파악하고 조리개와 광분할기를 활용한 공진기에서의 출력특성과 비교하기 위하여 가장 보편화된 평행평판 공진기를 구성하여 레이저의 출력특성을 조사하였다. 이 연구에서 사용한 평행평판 공진기는 반사율이 대략 90%인 금속코팅된 반사경과 방전관의 진공유지를 겸하고 반사율이 약 8%인 코팅되지 않은 용융석영창(편평도,  $\lambda/10$ )을 사용하여 구성되었다. 반사경 쪽의 또 다른 용융석영창은 광축과  $5^\circ$ 경사를 갖도록 하여 이 창에서 반사된 광속이 레이저발진기 안으로 되먹임되는 것을 방지하였다.

이 실험에서 사용된 평행평판 공진기의 경우, 공진기의 최소반경  $a=0.6$  cm, 공진기의 길이  $L=100$  cm, 파장  $\lambda=510.6$  nm 레이저선에 대하여  $N_f=a^2/\lambda L$ 로 주어지는 프레넬 수(Fresnel number)는 대략 70이며, 출력은 여러 고차 모드를 포함하게 된다. 또한, 출력빔의 퍼짐각은 회절한계값의 수십 배의 값을 가질 것을 추측할 수 있는데, 실제로 측정된 퍼짐각은 2 mrad이었으며 회절한계값( $\theta_c=1.22\lambda/D$ , 직경  $D=2a$ )인 0.05 mrad의 40 배가 된다.

그림 2는 오실로스코프(HP 54522A, 500MHz)를 이용하여

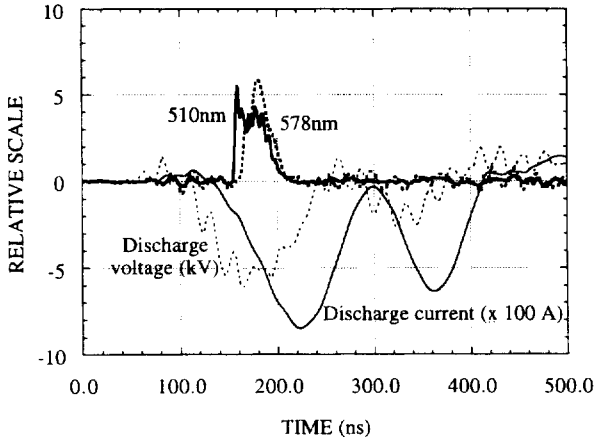


그림 2. 평행평판 공진기에서 발진되는 출력펄스의 모양.

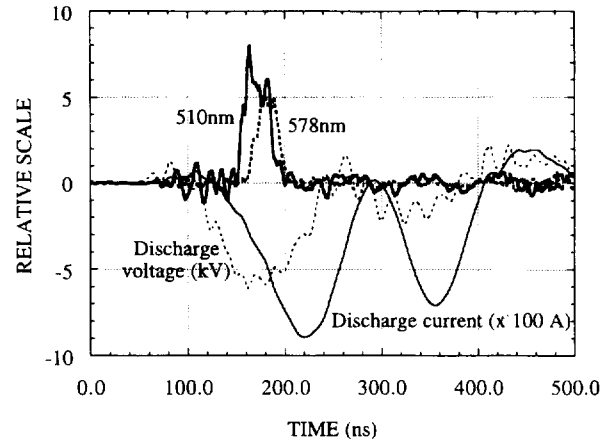


그림 3. 반공초점 공진기에서 발진되는 출력펄스의 모양.

측정한 평행평판 공진기 구리증기레이저의 방전펄스와 레이저펄스의 모양을 보여준다. 방전전압 펄스는 방전음극에 설치된 고전압 탐침자(high voltage probe, Tektronix P6015A, 75MHz)를 사용하여 측정하였으며, 방전전류펄스는 피크축전기(peak capacitor)의 접지부에 설치한 자체제작된 MPL(magnetic pickup coil)을 이용하여 검출하고 오실로스코프의 적분기능을 이용하여 측정하였다. 레이저펄스는 회절격자를 사용하여 두 발진파장을 분해하고, 오름시간(rise time)이 0.27 ns 정도인 광계측관(phototube, Hamamatsu R1193U-01)을 사용하여 검출하였다. 레이저 작동조건은 충전전압 10 kV, 펄스반복률 4 kHz, 네온기체압력은 75 mbar이며, 방전전압의 최대값은 6.5 kV이고, 방전전압과 방전전류의 오름시간은 대략 55 ns이다. 이 실험에서 사용한 MPL의 출력신호를 보정하기 위하여 펄스발생기로부터 얻은 100 ns 펄스폭을 갖는 2 V 구형파를 사용하여 40 mA의 전류신호를 얻고 MPL로 측정한 전류펄스와 비교하였다. 이 결과를 이용하여 방전전류의 값을 보정하였고, 그림 2에 보이는 방전전류의 최대값은 0.85 kA 이다.<sup>[10]</sup>

### 3.2. 반공초점 안정공진기의 출력특성

그림 1에 그려진 반공초점 안정공진기를 사용하면 평면거울 가까이 설치된 조리개의 구경을 조절함으로써 공진기 내로 되먹임되는 빔의 퍼짐각을 제어할 수 있다. 두 레이저파장에서 반사율이 99.5%, 곡률반경이 3 m인 오목거울을 방전관 뒷 쪽 10 cm되는 위치에 설치하고 방전관 앞 25 cm 지점에 광분할기(편평도 2λ, 두께 2 mm, 평행도 3 arc min.)를 설치하였다. 이 광분할기는 코팅이 되지 않은 용융석영판이며 광축과 이루는 각도를 조정하여 출력으로의 투과광과 반사율 99.5%인 평면 반사경으로 향하는 반사광의 비율을 조절할 수 있다.

평행평판 공진기의 반사경만을 곡률반경이 3 m인 오목거울로 교체하였을 때, 평균출력은 20% 증가하였는데, 이 사실은 레이저광이 오목거울에 의해 집중됨과 관련된 공진기 손실의 감소와 오목거울의 반사율이 평행평판 공진기 실험에서 사용한 반사경의 반사율보다 거의 10% 가량 높은 데 기인한다. 퍼짐각은 평행평판 공진기의 경우인 2 mrad에서 3.1 mrad으로 증가하였다. 광분할기와 평면경을 사용하여 반공초점 안정공

진기를 구성했을 때, 평균출력은 광분할기에서의 손실로 인하여 다시 평행평판 공진기의 경우와 거의 비슷한 정도의 수준으로 감소되었으며, 퍼짐각도 약간 감소하였다.

그림 3은 반공초점 안정공진기 구리증기레이저의 방전펄스와 레이저펄스의 파형을 보여준다. 그림 2와 그림 3의 레이저펄스들은 비슷한 모양을 보여준다. 즉, 안정공진기에서 도출된 레이저펄스의 파형은 10배 이상 감소된 퍼짐각에도 불구하고, 두 발진파장의 레이저펄스가 평행평판의 경우와 비슷한 형태를 보여준다. 그러나, 두 발진파장의 출력비는 두 경우에 약간 다른 값이 측정되었다. 평행평판 공진기의 경우, 510.6 nm : 578.2 nm의 출력비는 1.5 : 1이었으며, 반공초점 안정공진기의 경우는 1.75 : 1이었다. 이 두 값의 차이는 근소하지만, 공진기손실이 상대적으로 높은 반공초점 안정공진기의 경우에 발진문턱이 증가되는 사실, 즉, 그림 3의 레이저펄스에 해당하는 레이저 발진조건이 발진문턱에 보다 근접해 있다는 사실과 부합된다.

조리개에 의하여 퍼짐각이 작은 씨선속(seed beam)이 이득매질로 되먹임되고 증폭될 때, 이득매질 내에 축적된 유효에너지의 많은 분량이 ASE 빔의 형태로 도출된다. ASE 빔은 근거리에서는 레이저빔과 상당부분 겹쳐져 나타나지만 원거리에서는 높은 퍼짐각으로 인하여 배경잡음(background noise)과 같은 효과만을 갖는다. ASE 빔은 이득매질의 중심에서 공진기의 최소구경을 보는 각도에 해당하는 10 mrad 정도로 일정한 퍼짐각을 갖는다.

반공초점 안정공진기에서 출력되는 레이저선속을 발진기에서 90 cm의 거리에서 측정한 510.6 nm 발진파장과 578.2 nm 발진파장의 강도분포가 그림 4와 그림 5에 각각 나타나있다. 강도분포는 일반적으로 약간 타원형으로 관측되었으며, 이는 공진기 내의 광분할기와 두 발진파장을 분해하는 데 사용된 회절격자 등이 갖는 비점수차 때문인 것으로 파악된다. 또한, 레이저공진기 및 측정광학계의 정렬에 있어서 미세한 차이가 비대칭적인 모양을 만들어 낸다. 광학정렬을 조정함으로써 강도분포를 보다 원형에 가깝게 만들 수 있으나, 이 경우, 출력은 약간 감소했다.

레이저 출력빔의 퍼짐각의 변화와 한계를 알아보기 위하여 조리개 직경의 변화와 광분할기의 각도에 따른 퍼짐각과 출력

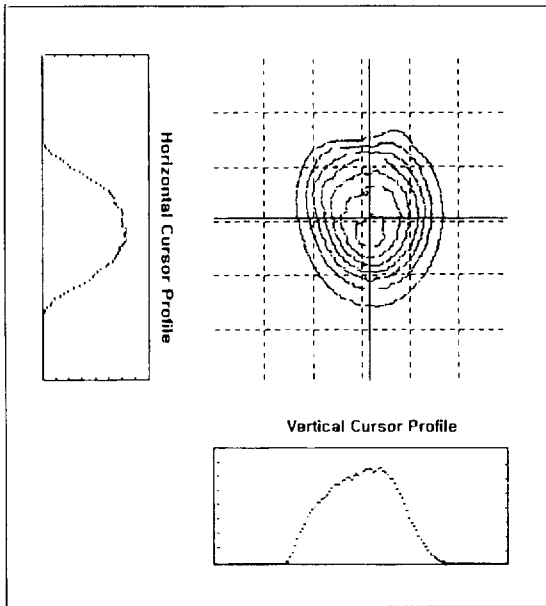


그림 4. 반공초점 공진기에서 90 cm 떨어진 곳에 위치한 집광렌즈의 초점에서 측정한 510.6 nm 레이저 출력의 원거리 강도분포.

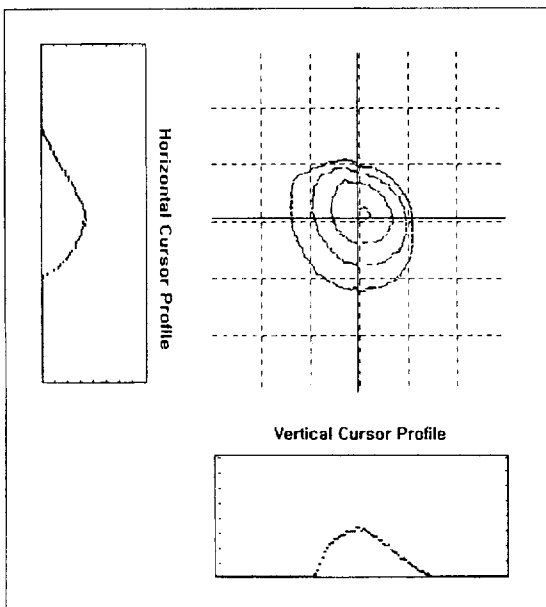


그림 5. 반공초점 공진기에서 90 cm 떨어진 곳에 위치한 집광렌즈의 초점에서 측정한 578.2 nm 레이저 출력의 원거리 강도분포.

을 측정하였다. 그림 6과 그림 7은 광분할기를 각각 25°와 55°로 설치하고 조리개의 직경을 변화시키며 퍼짐각과 출력을 측정한 실험결과를 보여준다. 조리개 구경을 감소시키면 기본적으로 공진기의 프레넬 수가 작아지고, 상대적으로 큰 퍼짐각을 갖는 높은 차수의 횡모드의 발진이 억제되는 효과를 얻게 된다.

공초점공진기에서와 마찬가지로, Laguerre-Gaussian 횡모드를 갖는 반공초점 공진기에서 발진을 예상할 수 있는 최고차 모드

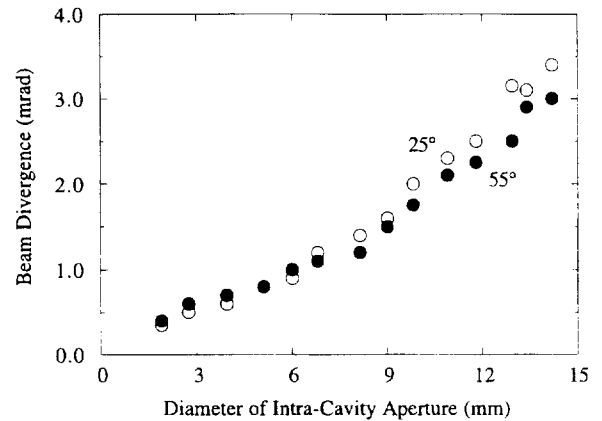


그림 6. 조리개의 구경 변화에 따른 레이저출력의 퍼짐각의 변화.

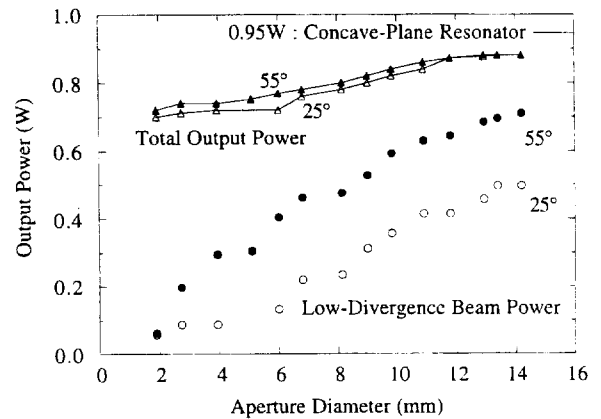


그림 7. 조리개의 구경 변화에 따른 레이저출력과 ASE를 포함한 총출력의 변화.

$$N_{\max} \approx (a/w)^2 \tag{1}$$

로 표현할 수 있다.<sup>[11]</sup> 식 (1)에서  $a$ 는 공진기의 유효반경이며,  $w$ 는 공진기의 구경을 제한하는 조리개에서 가우시안 모드의 spot size로서  $w = \sqrt{L \lambda / 2 \pi}$ 의 값을 갖는다. 이 실험장치의 최대 유효구경 14 mm, 공진기의 길이 150 cm에 해당하는 차수는  $N_{\max} \approx 400$ 이므로 대단히 높은 값을 가지며, 유효구경 2 mm에서도 8 정도로 상당히 큰 값을 갖는다. 모드 간의 경쟁은 많은 횡모드의 발진을 억제하겠지만, 이 실험에서 관측되는 레이저 광은 기본적으로 여러 횡모드를 갖고 있음을 알 수 있다.

TEM<sub>lm</sub> 가우시안 모드의 퍼짐각은 대략적으로

$$\theta_{lm} = C_{lm} \theta_{00} \tag{2}$$

와 같은 표현을 가지며, 여기서  $C_{lm}$ 은 기본모드의 빔허리 (beam waist)에 대한 비, 즉,  $C_{lm} = w_{lm} / w_{00}$ 와 같이 정의되며, 모드 차수의 증가에 따라 완만하게 증가하는 함수이다.<sup>[12]</sup> 또한,  $n$ -차 Hermite-Gaussian 모드의 크기는 대략  $n^{1/2}w$ 와 같이 표현할 수 있다.<sup>[11]</sup> 따라서, 조리개 구경의 감소에 따라, 보다 큰 퍼짐각과 큰 빔허리를 갖는 고차 모드의 발진이 억제되어 레이저 빔의 퍼짐각이 감소하게 된다.

이 실험의 경우, 레이저 펄스의 길이는 대략 40 ns이며 (그

림 2) 공진기 일주시간 10 ns에 비교해 볼 때, CW 발진에서의 논의를 그대로 적용할 수는 없으나, 대체적인 경향에는 별 차이가 없을 것이다. 반면에, 극단적으로 펄스형태의 ASE 빔의 경우를 생각하면, 조리개 구경의 감소는 출력의 퍼짐각 자체를 감소시키게 되고, 간단한 기하광학적 추론에 의하면 퍼짐각이 조리개 직경의 크기에 비례하여 증가하는 결과를 예측할 수 있다. 그림 6의 결과는 위에서 기술된 두 개의 요인이 부분적으로 나타나고 있는 결과라고 판단된다.

그림 7에는 그림 6의 낮은 퍼짐각에 해당하는 레이저빔의 평균출력과 ASE 출력을 포함한 총출력이 함께 그려져 있다. 광분할기의 각도가 각각 25°와 55°일 때 레이저빔의 평균출력은 ○, ●로 ASE 출력을 포함한 총출력은 △, ▲로 각각 표시하였다. 동일한 발진조건에서 광분할기의 각도를 0°로 하여 8% 반사율을 갖는 출력경 역할을 하게 함으로써 오목-평면(concave-plane) 공진기를 구성하였을 때의 레이저 출력은 0.95 W이었다. 평면경에서 조리개를 통과하고 광분할기에서 반사되어 이득매질로 주입되는 씨선속의 세기는 조리개 직경의 제곱에 비례하지만, 씨선속의 세기가 커지면 이득률은 포화되는 경향이 나타난다. 그림 7에서 광분할기의 각도가 25°인 경우, 즉, 조리개 직경이 작아서 출력이 비교적 낮을 때는 대체로 조리개 직경의 제곱에 비례하는 경향을 보여주지만, 차츰 포화되어 선형적인 변화를 보여주며, 광분할기의 각도가 55°인 경우, 즉 출력이 보다 높은 경우에는 작은 조리개 직경값에서 이득포화 현상이 이미 시작되고 있음을 보여준다. 실험에서 측정된 최소의 퍼짐각은 0.25 mrad이며, 이 때 낮은 퍼짐각을 갖는 출력빔의 평균출력은 0.05 W이다. 그림 7에서 총출력은 레이저발진에 참여하지 못한 이득매질 내의 유효에너지가 ASE 출력으로 측정값에 기여하게 되어, 조리개의 크기가 커짐에 따라 전체적인 손실 감소의 영향으로 완만한 증가를 보여주고 있다. 총출력은 광분할기의 각도에는 주목할 만한 변화를 보여주고 있지 않다.

공진기 내의 레이저광은 매 왕복할 때 마다 광분할기에서 두 번 이탈손실(walk-off loss)을 겪게 되는데, 이 중 평면경에서 출발한 이탈손실에 해당하는 빔은 퍼짐각이 크며 이 실험에서는 출력으로 취급하지 않았다. 출력에 기여하는 이탈손실이 광분할기의 프레넬의 법칙에 따른 투과율에 비례하는 반면, 출력에 기여하지 않는 이탈손실은 광분할기의 각도에 거의 무관하며 총출력의 20% 정도의 값으로 측정되었다. 그림 8에는 출력의 퍼짐각이 광분할기 각도의 함수로 그려져 있으며, 조리개의 서로 다른 세 직경값 2 mm, 4 mm, 6 mm에 대한 여러 측정결과의 평균값이 나타나 있다. 그림에서 퍼짐각이 광분할기의 각도에 따라 약간 증가하는 경향을 보여주는 것은 고차 모드의 발진이 활성화되는데 따른 것으로 이해된다. 일반적으로, 레이저출력의 퍼짐각과 평균출력은 광분할기의 각도에 그다지 큰 변화를 보여주지 않았다.

조리개의 구경을 변화시켰을 때, 단위입체각당 레이저출력의 세기가 변화되는 경향이 그림 9에 나타나 있다. 그림 6과 그림 7에서와 같이, 조리개의 구경을 작게 하면 퍼짐각과 출력이 모두 감소하지만, 단위입체각당 레이저출력의 세기는 증가하고 있어서, 조리개의 구경을 줄임으로써 레이저출력의

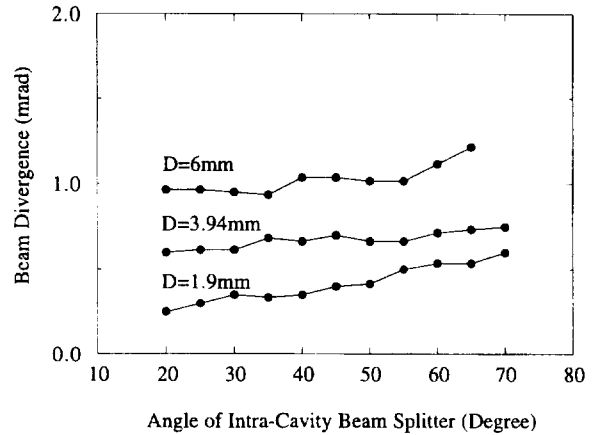


그림 8. 광분할기의 방향 변화에 따른 레이저빔 퍼짐각의 변화.

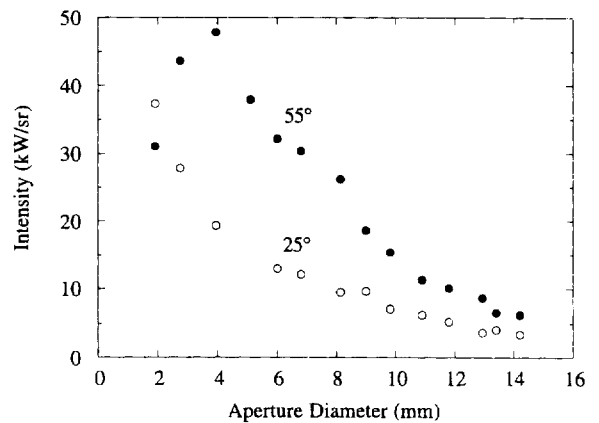


그림 9. 조리개의 구경 변화에 따른 단위공간각당 레이저출력의 변화.

퍼짐각의 감소와 원거리출력밀도의 증가를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

반공초점 공진기를 기본구조로 하고 광분할기와 조리개를 공진기 내에 설치한 안정공진기를 사용하여 공냉식 구리증기레이저 장치에서 개선된 퍼짐각을 갖는 레이저발진을 얻고자 하는 실험을 시행하였다. 조리개의 직경을 감소시킴에 따라 퍼짐각이 낮은 레이저빔을 얻을 수 있었고 직경 2 mm에서 최소 0.25 mrad까지 연속적으로 감소되는 결과를 얻었다. 최소 퍼짐각에 해당하는 원거리출력밀도의 증가는 평균출력 0.95 W, 퍼짐각 3.1 mrad의 오목-평면 공진기에 비하여 8배의 결과이다. 광분할기를 Brewster각으로 설치함으로써 6 : 1의 선형편광을 얻을 수 있었고, 레이저출력의 강도분포는 가우스 함수에 가까운 형태를 보여주었다. 이 실험에서 제시된 강도분포의 개선방법, 상대적으로 증가된 원거리출력밀도와 감소된 퍼짐각에 대한 실험결과들은 통상적으로 0.5 mrad의 퍼짐각과 TEM<sub>00</sub> 모드로 발진하는 Ti : sapphire 레이저의 펌핑을 위한 유용한 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문에서 기술된 논의와 실험결과를 일반화하고 활용성을 높이기 위하여 광분할기의 개선과 불안정공진기 사용 등 후속 실험을 준비하고 있으며, 모드계산 및 펄스형 이득률에 대한 수치해석적 연구를 통하여 퍼짐각과 출력의 의존성을 정량적으로 해석할 수 있는 분석적 이론 연구가 필요하다고 생각된다.

**참 고 문 헌**

[1] W. H. Knox, IEEE J. **QE-24**, 388 (1988).  
 [2] M. D. Ainsworth, D. W. Coutts and J. A. Piper, Proc. SPIE, vol. **1041**, Metal Vapor, Deep Blue Ultraviolet Lasers, pp. 92-103 (1989).  
 [3] D. W. Coutts and J. A. Piper, IEEE J. Quantum Electron. **QE-28**, 1761 (1992).  
 [4] 원종욱, "레이저의 산업화 무엇이 문제인가?" 제12회 광학 및 양자전자학 워크샵, 광주, (1995).  
 [5] K. I. Zemskov, A. A. Isaev, et. al., Sov. J. Quantum Electron., **4**, 474 (1974); **7**, 746 (1977).  
 [6] R. S. Hargrove, R. E. Grove and T. Kan, IEEE Quantum Electron., **QE-15**, 1228 (1979).  
 [7] R. R. Lewis, G. A. Nayler, et. al., Proc. SPIE **737**, 10 (1987).  
 [8] N. A. Ryabin, Sov. J. Quantum Electron., **19**, 426 (1989).  
 [9] 이재경, 임기건, 한국광학회지, **4**, 476 (1993); 이재경, "공냉식 구리증기레이저 장치의 개발 및 동작특성" 전남대학교 석사학위 논문, (1993).  
 [10] 이 방전전류의 값, 0.85 kA는 심사위원의 지적대로 상당히 높은 값이며, 이 연구에 사용된 레이저장치의 방전회로 설계가 아직 최적화되어 있지 않다는 사실을 반영하고 있다.  
 [11] A. E. Siegman, *Lasers*, Oxford University Press, pp. 690-691 (1986).  
 [12] O. Svelto, *Principles of Lasers*, Plenum Press, pp. 396-397 (1977).

**Controlled beam divergence in a hemiconfocal resonator copper vapor laser**

Ji Cheol Jeung and Young Tae Ryu

*Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea*

Kiegon Im

*Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea*

(Received : March 13, 1997)

A hemiconfocal resonator equipped with an intra-cavity adjustable aperture and a beam splitter has been studied experimentally to achieve a controlled low beam divergence operation in a copper vapor laser system. The dependences of output characteristics both on the aperture diameter and on the angle of beam splitter have been investigated. By adjusting the aperture diameter from 14 mm to 2 mm, we were able to reduce the beam divergence from 3.1 mrad to 0.25 mrad and achieved the 8-times increase in the far-field power density.