

## NBUR Nd:YAG 레이저 위상파면의 공간적 가간섭성 특성\*

박대운 · 최승호

인하대학교 이과대학 물리학과

이 승 걸

인하대학교 공과대학 전자재료공학과

(1995년 9월 14일 받음)

무한한 Fresnel number를 갖는 imaging unstable ring resonator에 의한 펄스형 Nd:YAG 레이저 출력 광속의 위상파면을 분석하였다. 본 연구를 위하여 4개의 평면경과 망원경을 포함하는 Negative Branch Unstable Ring Resonator(NBUR) Nd:YAG 레이저를 제작하였다. NBUR 공진기 내에서 증폭되는 광속이 scraper mirror의 원형 투과창(aperture)을 통해 투과하는 과정에서 발생하는 회절효과는 광학 공진계에 self imaging 조건을 줌으로서 크게 감소시킬 수 있었다. 이러한 self imaging 광속이 고리형 공진계를 반복적으로 진행함으로써 위상파면의 공간적 가간섭성이 향상 되는 것으로 해석 되었다. 레이저 출력 광속의 공간적 위상파면 정보는 Mach-Zehnder 간섭계에 의하여 얻어지는 간섭무늬를 이용하여 얻었으며, 이 간섭무늬를 Fourier 변환 방법으로 분석한 결과, 위상파면 왜곡정도가 0.2 $\lambda$  이하 값을 측정하였다. 이것을 정상파형 레이저 공진기에서의 출력 광속과 비교한 결과 공간적 가간섭성이 75% 정도 향상 되었음을 확인하였다.

### I. 서 론

레이저 출력광속의 공간적 가간섭성은 위상파면의 특성에 따르며, 이는 레이저 발진기를 구성하는 공진 광학계에 많이 의존한다. 레이저 매질에서 광펌핑에 의한 공간적인 펄핑에너지 분포가 다르기 때문에 유도복사 과정에서 필연적으로 불균일한 위상파면이 형성된다<sup>[1]</sup>. 그러나 공진기 내에서의 증폭과정에서 공진 광학계의 구성 조건에 따라 공간적 위상파면을 향상시킬 수 있다. 이는 고체 또는 색소 레이저 등의 광펌핑 방법에서 측면펌핑형 섬광관을 사용할 때 더욱 두드러지며, 많은 self-injection 형의 레이저 발진기에서 유의하여야 할 점이다. 그러나 공진계에 사용하는 광학부품의 기하학적 조건 또는 광속의 결상(image formation) 등을 세밀히 고려함으로써 위상파면 특성을 향상시킬 수 있음이 연구되어 왔다. 1978년 이후 Paxton<sup>[2,3]</sup> 등에 의해 self imaging aperture를 포함시킨 불안정 광학 공진기에서부터 공간적 위상파면에 관한 연구와 원형개구(circular aper-

ture)에 의한 레이저 광속의 공간모드에 관련된 위상파면의 이론적 연구 등이 진행되고 있다<sup>[4,5]</sup>.

공진기 내에서 공진기를 구성하는 광학부품들이 주어 진 조건하에 레이저 광속이 일주하는 동안에 공진 조건인 공진기 거리 및 반사경의 곡률반경 등에 따라 출력광속의 공간적 위상파면이 결정 된다. 그리고 negative branch 형의 2 렌즈 광학계의 공초점에서 pinhole에 의한 spatial filtering effect는 광속의 위상파면을 향상시키는 장점이 있다. 본 연구에서는 4개의 평면경으로 구성된 광학계 내에 Newtonian 망원경 광학계를 삽입하여 제작한 진행파형의 NBUR<sup>[6]</sup> 공진기를 갖는 Nd:YAG 레이저 발진기에 대한 레이저 출력 및 위상파면 특성을 조사하였다. 정상 발진 및 Q 스위칭 발진 실험을 수행한 후 위상파면의 특성을 분석하였다.

출력광속의 공간적 세기분포를 정확히 알기 위하여 CCD 검출기와 frame grabber를 사용하였고, 실험실 개발된 전산시뮬 프로그램<sup>[7]</sup>을 이용하여 광학적 상처리 과정을 가졌다. 출력광속 위상파면을 분석하는데 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하였다. 레이저 출력광속의 위상파면에 관한 정보가 저장된 간섭무늬를 Fourier 분석하였다. 간섭법과 Fourier 분석법에 의한 위상파면 측정

\*본 연구는 교육부의 기초과학 학술연구조성비(거점연구 BSRI-94-2429)와 94년도 인하대 교내 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

방법은 가시 혹은 비가시 영역의 모든 레이저 광속과 매우 작은 광속의 크기를 갖는 Fibre 레이저에 까지 직접 이용<sup>[8-10]</sup>할 수 있을뿐 아니라, 파면개선기술, 무회절 광속의 파면분석<sup>[11,12]</sup> 그리고 초정밀 레이저 광가공 등에 매우 유용할 것이다.

본 논문은 2장에서 망원경 공진계에서 self imaging 조건에 의한 위상파면의 self uniformity 원리에 대하여 서술하였다. 그리고 3장에서는 NBUR Nd:YAG 레이저의 Pockels cell Q switching 발전특성 실험 결과를 언급 하였으며, Mach-Zehnder 간섭계에 의한 간섭무늬로부터 광속의 위상파면 분석에 관하여 논하였다. 끝으로 실험실 제작한 NBUR Nd:YAG 레이저 발전기로 부터의 출력광속 위상파면의 공간적 가간섭성의 특성에 관하여 논의 하였다.

## II. Self-imaging 조건을 갖는 망원경 공진계의 원리

NBUR 망원경 광학 공진계에서 self-imaging 조건을 갖지 않는다면 scraper mirror의 중앙 투과창에 의한 회절 때문에 증폭광속의 위상파면 특성을 일정하게 유지시킬 수 없게 된다. 이 공진계의 구성에 있어서 개구에 의한 회절을 제거하여 처음 형성된 위상파면이 공진기 일주후에도 정상상태(steady state) 위상파면을 갖게하기 위하여서 이 공진계는 self-imaging 조건을 가져야만 한다.

사용코저하는 Nd:YAG 레이저 봉의 크기와 출력경으로서 scraper mirror의 위치를 결정한 후, 망원경형 공진기에서의 self imaging 조건을 규명하였다. 그림 1(a)는 scraper mirror의 중앙 투과창(aperture)을 통과한 평행 광속은 초점이 다른 두개의 볼록 렌즈  $L_1$ 과  $L_2$ , scraper mirror 그리고 spatial filter로 구성된 Newtonian 망원경 광학계<sup>[13-15]</sup>를 소개하였다. Spatial filter는 두 렌즈의 공 초점에 있으며, 이는 곧 negative branch형으로서 진행 파형 공진기를 만족한다. 이 공진기는 Fresnel number가 무한대가 되도록 self imaging 조건으로 설계되어, 실상의 출력 광속을 얻을 수 있다. 고리형 공진기 내에 삽입된 Newtonian 망원경 광학계에 의한 결상 과정은 그림 1(a)과 같다.

그림 1(a)에서의  $f_1, f_2$ 는 렌즈  $L_1, L_2$ 의 초점거리이고,  $L_c$ 는 렌즈  $L_1, L_2$  사이의 거리를 나타낸다. Ray matrix로 이 광학계를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_2/f_1 & f_1+f_2-f_2L_c/f_1-f_1L_c/f_2 \\ 0 & -f_1/f_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

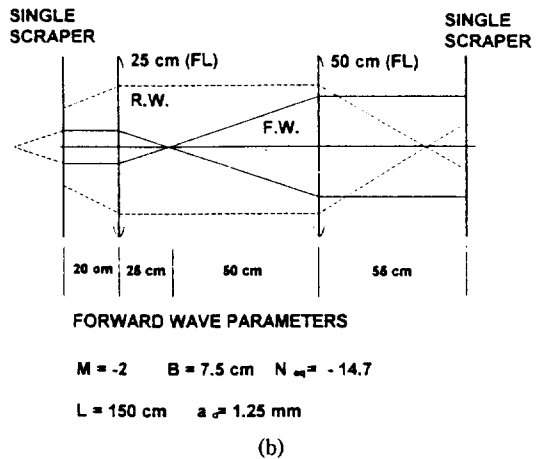
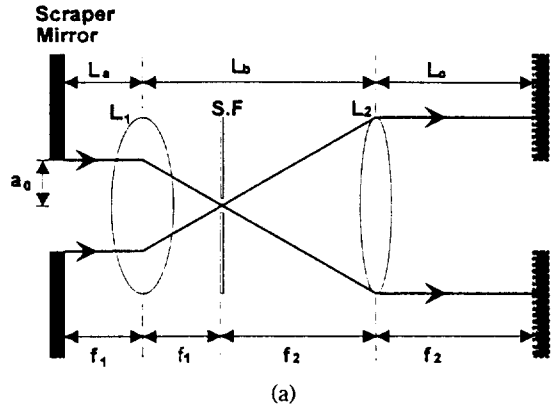


그림 1. Newtonian Telescope resonator system based on self imaging condition.

(a) The schematic diagram of an unstable resonator with the Newtonian telescope type. (b) Single-aperture unfolded NBUR resonator

여기서  $-f_2/f_1$ 를 광속의 횡배율  $M$ 으로 표현하면, 식 (1)은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & B \\ 0 & 1/M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & MB \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 1/M \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서의  $B$ 는 식 (1)에서의

$$B = ML_a + L_b + \frac{L_c}{M} \quad (3)$$

로서 유효길이(effective length)이다. 또한, equivalent Fresnel number  $N_{eq}$ 는

$$N_{eq} = \frac{M^2 - 1}{2M} \cdot \frac{a_0^2}{B\lambda} \quad (4)$$

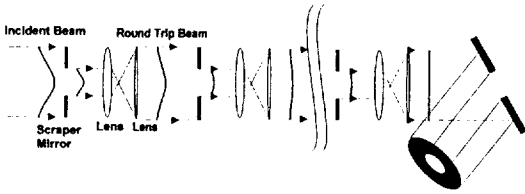


그림 2. Schematic diagram of the telescope relay system.

여기서  $a_s$ 는 scraper mirror의 개구의 반경이다. 만일 유효길이  $B$ 가 0이면, equivalent Fresnel number  $N_{eq}$ 는 무한대가 된다. 이는 초기의 위상과면의 scraper mirror의 중앙 개구에 의한 회절효과는 self imaging 조건에 의해 구성된 망원경 공진계에서 제거되어지고, 물체 면(object plane)이 횡배율  $M$  만큼 확대되어 실상으로서 정확하게 얻어진다. 이것을 self-imaging NBUR 공진기라 한다.

그림 1(b)에서 보는 것과 같이, NBUR 공진기는 총길이 150 cm이고,  $L_1$ 과  $L_2$ 의 초점거리는 각각 25 cm와 50 cm로 구성하였다. self imaging 조건을 갖기 위해서는 앞에서 언급한 것과 같이 두 렌즈의 한쪽 공초 평면에는 scraper mirror가 위치하며 다른 쪽 공초평면에는 spatial filter를 장치한다. 만일 그림에서와 같이 scraper mirror의 위치가 렌즈  $L_1$  사이의 거리가 20 cm이고, scraper mirror와 렌즈  $L_2$  사이의 거리가 55 cm로 구성되어 self imaging 조건을 갖지 못한다면, 식 (3)과 (4)로부터 유효길이  $B$ 는 7.5 cm이고 equivalent Fresnel number  $N_{eq}$ 는 -14.7이 된다. 이 결과로부터 회절효과를 작게 하기 위해서는  $B$ 의 값이 작아져서  $N_{eq}$ 의 절대값이 커질 수 있도록 공진기를 구성 하여야만 정확한 실험결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 2는 고리형으로 겹쳐있는 망원경 광학계의 펼친 그림이다. 그림에서 보면 입사되어진 광속은 scraper mirror의 중앙 투과창을 지나 self imaging 조건으로 구성된 망원경 광학계를 지나 다시 scraper mirror에 이르게 된다. scraper mirror에 도달한 광속의 직경은 망원경 광학계의 횡배율  $M$ 배만큼 확대된 도립 실상을 갖게 된다. 여기서부터 다시 scraper mirror의 중앙 투과창을 지나며 광속의 중심부분 만이 통과된다. 이런과정을 반복적으로 수행하여 광속이 문턱에너지 이상의 값을 갖게 되면 scraper mirror를 통하여 원고리형 출력(annular output beam)을 얻게된다. 이 때 방출되는 레이저 광속의 위상과면은 매우 향상된 공간적 가간섭성을 유지할 수 있다.

NBUR Nd:YAG Laser

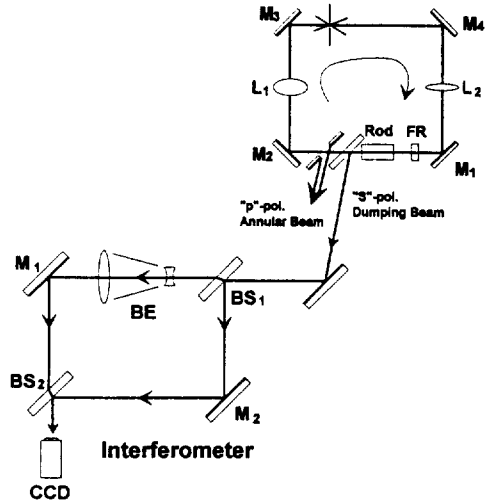


그림 3. Schematic diagram of composition of the unstable ring resonator with four mirrors.

### III. NBUR 공진기에 의한 레이저 출력광속 특성

#### 1. 레이저 발진 실험

그림 3에서와 같이 NBUR Nd:YAG 레이저 발진기는 고리형이며, 또한 많은 광학부품을 사용하기 때문에 발진을 위한 광학적 시준은 쉽지 않다. 왜냐하면 4개의 반사경, 두개의 수렴렌즈 그리고 각각의 광학부품은 총 22개의 광학면을 가지고 있고, 공진기의 총 광경로 길이가 150 cm이기 때문이다. 4개의 반사경 광학계를 갖는 고리형 공진기는 등경사 간섭계로 볼 수 있다. 만일 반사경  $M_1$ 이 부분적인 반사경이라면, 시준용 레이저 광속이  $M_1$ 에서 일부 반사할 것이고 나머지 투과 광속은 공진기를 일주할 것이다. 만일 두 광속이 완전한 중첩을 이룬다면, 궁극적으로 null fringe가 형성 될 것이다.

NBUR Nd:YAG 레이저에서는 Faraday rotator와 편광기 그리고  $\lambda/2$  위상판으로 구성된 Faraday isolator를 사용하여 일방향 발진을 하였으며 정상발진(normal oscillation)에서의 출력에너지를 측정하였다. 또한 그림 3에서와 같이 제작된 NBUR Nd:YAG 레이저를 구성하는 다수의 광학부품들 중에 손실이 큰 광속 분할기(mirror 1)와 편광기(polarizer)에서의 출력에너지를 측정하여, scraper mirror로부터의 출력에너지에 대한 각각의 손실률을 비교하였다. Nd:YAG 레이저 발진기에서 scraper mirror, 편광기 그리고 mirror 1에서부터의 출력에너지를 측정된 결과가 그림 4이다. 이 경우에 편광기와 mirror

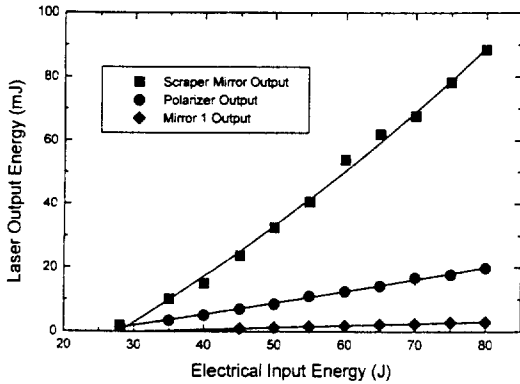
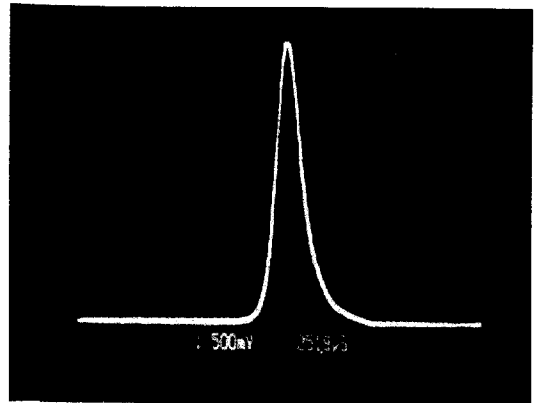


그림 4. The comparison of the laser output energy against the electrical input energy.

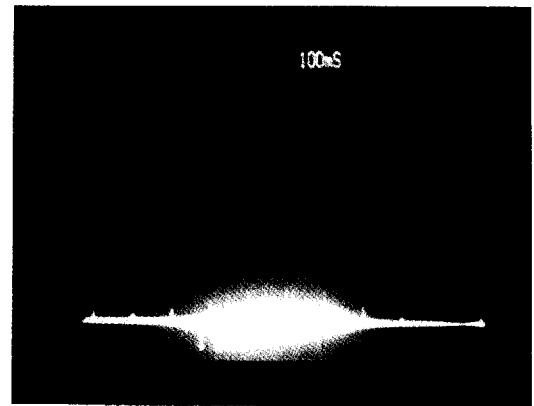
1에서의 출력에너지는 이 레이저 발진기에서의 손실로 분석될 수 있다. Dumper로서 사용된 편광기에서 나온 출력은 그림 3의 장치도에서 보듯이 위상파면 분석용 광원으로 사용하였다.

Q 스위칭 펄스 발진을 위하여 능동형인 전기광학 변조방법을 사용하였다. 사용한 Pockels cell은 LiNbO<sub>3</sub> 결정(9×9×25.4 mm)이며, piezoelectric damping을 위해 결정면에 fused silica block을 붙였다. 광속의 편광성분의 λ/4 위상차를 갖게하기 위한 Pockels cell crystal 양단에 인가 전압 V<sub>λ/4</sub>는 약 1.5 kV이고, 이 고전압의 상승시간이 10 ns인 thyatron 스위치를 사용하였다. 그림 5(a)은 Q 스위칭 펄스 파형<sup>[16]</sup>으로서 펄스의 반치폭은 약 200 ns 이고, 상승시간은 약 80 ns이다. Q switching 펄스의 검출을 위하여 적외선 영역에서 감도가 좋은 EG&G 사의 FND 100Q photodiode를 사용하였고, storage oscilloscope(Tek 7834)에 의해 출력파형을 관측 기록하였다. 그림 5(b)에서와 같이 반복률 10 Hz에서도 안정적으로 발진함을 보여 주었고, 이때 섬광관에 약 100 mA의 방전 전류를 흐르도록한 simmer trigger 방법을 적용하여 안정적인 방전을 유도하였다. 그림 5(c)에서는 Q 스위칭 단일 펄스의 출력이 매우 안정되어 있음을 보여주며, 출력오차는 5% 이내였다. 본 실험에서 사용한 Q 스위칭 방법은 time jitter가 수십 ns 정도로 매우 안정적인 장점이 있었다.

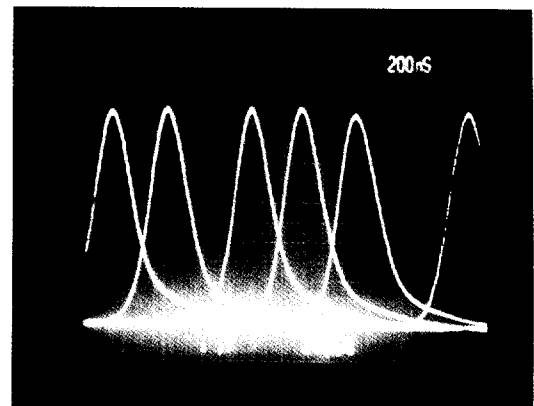
**2. Fourier 분석법에 의한 출력광속의 위상파면 분석**  
광학적 상처리 장치를 사용하여 self imaging 조건을 갖는 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저 출력 광속의 공간적 위상파면을 분석하기 위한 측정장치의 개략도를 그림 3에 소개하였다. NBUR Nd:YAG 레이저 발진기의 scraper



(a)



(b)



(c)

그림 5. The characteristics of the Q-switching output pulse in the unstable ring Nd:YAG laser. (a) The Q-switching operation output pulse shape. (b) The Q-switching output pulse in the repetition rate 10 Hz. (c) The stability measurement of single Q switched pulse.

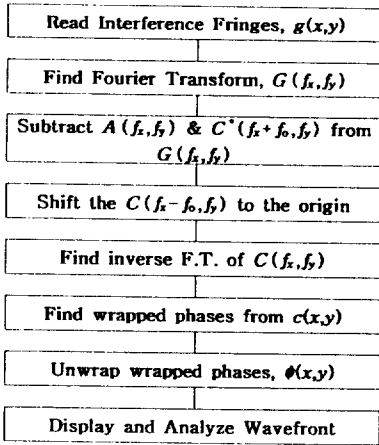


그림 6. The flow chart of Fourier analysis method.

mirror 바로 앞의 위치에 고정시킨 dumper로부터 나오는 광원을 사용하였으며, 이는 공진기 내에서 발생하는 출력광속의 전파면을 검출하기 위한 것이다. 이 발진 광속을 사용하여 Mach-Zehnder 간섭계로부터 간섭무늬를 얻었고, 이 간섭무늬로부터 공간적 위상파면의 정보를 추출하였다.

Mach-Zehnder 간섭계에서 Fizeau fringe를 얻는 과정에서 기준 광속의 경로에 광속확대기( $\times 9$ , Spindler & Hoyer)를 사용하였다. 기준 광속의 확대에 의한 간섭무늬의 contrast를 고려하여  $BS_1$ 과  $BS_2$ 는 반사율이 각각 40%와 80%인 것을 사용하였다. Mach-Zehnder 간섭계를 구성하는 광속 분할기와 반사경들의 평면도(flatness)는  $\lambda/20$ 이고, 직경은 50 cm이다.

레이저의 출력광속의 위상파면의 분석에는 Fourier 변환을 적용하였다. 이를 위해 개발된 분석용 프로그램은 그림 6에 제시한 흐름도와 같이 간섭무늬를 Fourier 변환<sup>[17]</sup>하면, 간섭무늬의 변조량이 들어있는 항에 의해 변환된  $C(f_x - f_0, f_y)$ 에는 위상파면 정보가 들어 있으므로 background illumination의 변환  $A(f_x, f_y)$ 와 간섭무늬 변환식의 공액항  $C^*(f_x + f_0, f_y)$ 를 소거한 다음,  $C(f_x - f_0, f_y)$ 만을 주파수 공간의 원점에 놓은 후, 역 Fourier 변환하여 위상파면을 분석하였다.

NBUR 펄스형 Nd:YAG 레이저 출력광속의 위상파면과의 비교를 위하여 정상파형 연속발진 Nd:YAG 레이저 출력광속의 위상파면을 기준으로 삼았다. 위상파면 분석 실험에 앞서 레이저들의 공간적 세기분포를 얻었다. 그림 7(a)는 LD-pumped cw Nd:YAG 레이저의 출력세기의 공간적 분포형상을 보여준다. 일반적으로, 이것은 정상파형 공진기를 갖는 레이저 출력광속으로서 Gaussian

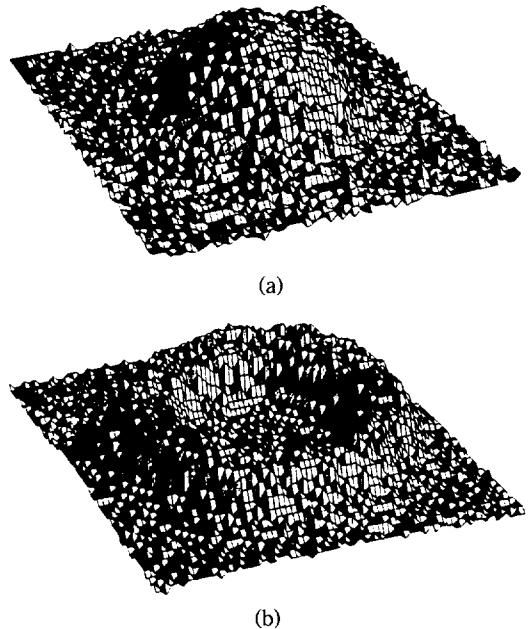
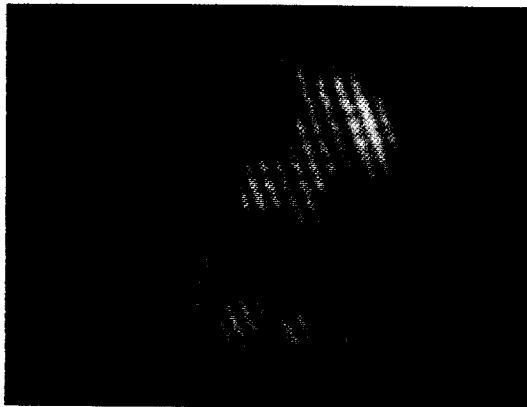


그림 7. The 3-D profile of the spatial intensity distribution from laser output beam.

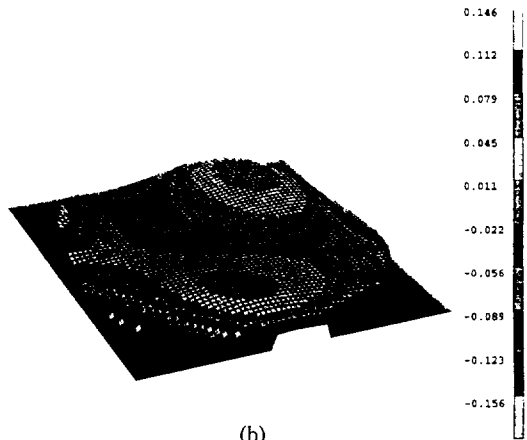
(a) The intensity distribution of the general Nd:YAG laser output beam with two mirror system. (b) The intensity distribution of annular output beam from the NBUR Nd:YAG laser with unstable ring resonator.

분포를 갖는다. 그림 7(b)는 NBUR 공진기를 갖는 펄스형 Nd:YAG 레이저의 원고리형 출력세기 분포를 보여주는 데, 출력세기가 거의 균일함을 측정할 수 있었다.

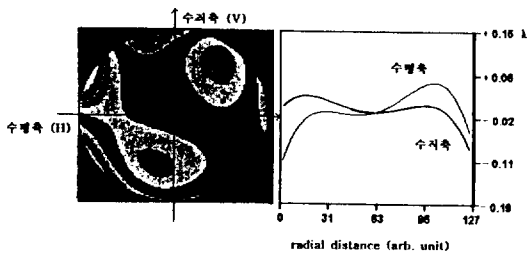
그림 8(a)은 NBUR Nd:YAG 레이저의 출력광속으로 Mach-Zehnder 간섭계에 의해 얻은 간섭무늬이다. 간섭무늬의 간격은 위상파면을 정확하게 분석하기 위해 Mach-Zehnder 간섭계에서 중첩되는 두 광속의 사각을 조절하여 결정하였다. 간섭무늬 사진의 배경에 세기분포가 균일하지 못한 것은 기준으로 사용하는 광속의 직경이 약 45 mm이기 때문에, 입사광속에 대해  $45^\circ$  기울어져 있는 광속분할기의 hard edge에 의한 회절무늬의 영향 때문이다. 그러나 이 배경무늬는 공간주파수가 매우 작기 때문에 background illumination의 Fourier 변환식  $A(f_x, f_y)$ 에 흡수되어, 실질적으로 광속의 위상파면을 분석하는데에는 영향을 주지 못한다. 얻어진 간섭무늬를 실험실 개발된 프로그램으로 수치해석적으로 구한 NBUR Nd:YAG 레이저 출력 광속의 위상파면은 그림 8(b)에 소개 하였다. 파면의 높이는 파장단위로 사용하고 3차원 그림으로 나타내었다. 그림 8(c)의 왼쪽 그림은



(a)



(b)



(c)

그림 8. The analysis of the wavefront of NBUR Nd:YAG laser (a) Interferogram fringe of Mach-Zehnder interferometer, (b) The 3-D profile of wavefront, and (c) The contour map of wavefront.

위상파면의 2차원 등고선을 나타낸 것이고, 왼쪽 그림에서의 수평축(Horizontal axis)과 수직축(Vertical axis)의 단면도를 오른쪽 그림에서 소개하였는데, 여기에서 수평 좌표계는 광속의 직경을 CCD pixel 수로 나타내었고

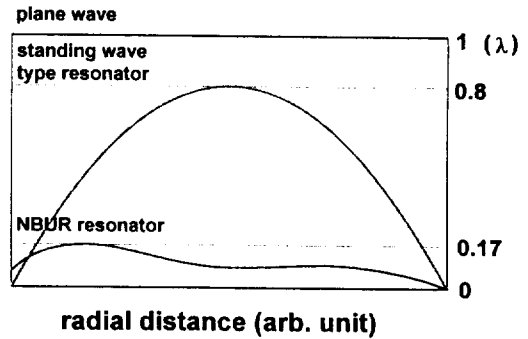


그림 9. The comparison of wavefront of NBUR Nd:YAG laser output with that of standing wave type resonator.

수직 좌표계는 파장단위로 나타낸 것이다. 그림 8(c)의 오른쪽 그림의 이 결과로부터 위상파면이 평면에 대해 수평축의 최대값이 약  $+0.06\lambda$ 이고 최소값이 약  $-0.11\lambda$ 로서 전체적으로는  $0.2\lambda$  이하로 왜곡되어 있음을 알 수 있었다. 왜곡의 기준은 레이저 출력의 공간적 위상파면의 최대와 최소 거리의 차이에 의해 결정하고, Nd:YAG 레이저의 발진파장인  $1.064 \mu\text{m}$ 를 기준으로 하여 한파장에 대해 어느 정도의 왜곡을 갖는지를 비교하였다. 이 결과의 비교를 위하여 사용한 LD-pumped Nd:YAG 레이저의 출력과의 위상파면이  $0.8\lambda^{[17]}$  왜곡에 비해 NBUR에서의  $0.2\lambda$ 는 매우 향상된 결과이다.

그림 9는 평면 위상파면의 파장을  $1\lambda$  ( $1.064 \mu\text{m}$ )로 하여, 두 결과의 위상파면의 최소값을 좌표계의 0의 위치에 맞추어 각각의 최대 위상파면을 비교하였다. 비교된 정상파형 공진기를 갖는 Nd:YAG 레이저보다 본 연구에서 구성한 NBUR 공진기에 의한 레이저 출력광속의 위상파면 왜곡이 훨씬 줄어들었음을 실험을 통하여 확인하였다. 이는 정상파형 공진기는 두 개의 반사경을 왕복하여 일주하는 동안 형성된 출력세기 형상이 Gaussian형이고 이때의 위상파면은 실험결과와 같이 구면을 이루게 되며, NBUR 공진기에 의한 레이저 출력광속은 self-imaging 조건을 갖는 망원경 공진계로서 평면의 위상파면을 형성하게 된다. 위상파면이 공간적으로 평면을 갖게 될 때 공간적 가간섭성을 갖는다고 한다.

#### IV. 결 론

Newtonian 망원경형 negative branch 불안정 공진기는 레이저 출력광속의 공간적 가간섭성을 개선하는데 매우 적합함을 알 수 있었다. 이는 self-imaging 조건

아래에서 진행파형 공진기로서의 scraper mirror의 중앙 투과창에 의한 위상파면 평면화와 망원경 광학계의 공 초점 위치에서의 공간적 잡음제거 효과가 뚜렷한 것으로 분석할 수 있었다. 이에 대한 실험적 확인 과정은 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하는 출력광속의 간섭무늬 정보로부터 분석에 의해 수행되었다. 간섭무늬에서의 위상파면 정보 추출은 Fourier 변환한 후, 분리된 위상파면이 포함되어 있는 함수부분만을 역 Fourier 변환하는 방법에 의해 이루어졌으며, 이 방법은 위상파면 분석시 수치해석상의 오차가  $\lambda/30$  정도의 왜곡을 갖는 정밀한 분석방법이다.

NBUR Nd:YAG 레이저 출력광속을 Mach-Zehnder 간섭계를 통하여 얻은 간섭무늬를 Fourier 변환방법으로 분석한 결과 위상파면을 왜곡이 0.2 $\lambda$  이하로 나타냈다. 이는 레이저 발전기에 사용한 Faraday 회전기의 균질성, scraper mirror 중앙 투과창의 가공 미흡 등에 의해 발생된 것으로 추측되며, 간섭무늬에 나타난 배경무늬는 낮은 공간주파수를 갖고 있으므로 background illumination에 포함되어 출력광속의 위상파면 분석에는 큰 영향을 주지 못한다. 이 결과는 정상파형 공진기의 위상파면 왜곡정도인 0.8 $\lambda$ 에 비하여 매우 향상된 결과로서, 공간적 가간섭성이 75% 향상된 것이다. 본 실험에서의 결과는 공간적으로 위상차이가 거의 없는 가간섭성이 향상된 광속임을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Skinner, "Pumping energy distribution in ruby rods," *Appl. Opt.* **3**, 963 (1964).
- [2] A. H. Paxton and T. C. Salvi, "Unstable Optical Resonator with self imaging Aperture," *Opt. Commun.* **26**, 305 (1978).
- [3] P. R. Cunningham and S. S. Townsend, "Mode properties and characteristics of negative-branch unstable ring resonators," *Opt. Engin.* **30**, 1553 (1991).
- [4] P. Belland and J. P. Crenn, "Changes in the characteristics of a Gaussian beam weakly diffracted by a circular aperture," *Appl. Opt.* **21**, 522 (1982).
- [5] S. Wang et al., "Gaussian modes changed by apertured resonators analyzed by matrix methods," *Opt. Commun.* **86**, 401 (1991).
- [6] S. H. Choi and D. Y. Park, "A Study on the Construction and the Output Characteristics of Nd:YAG Laser Using Unstable Ring Resonator," *J. of Opt. Soc. Kor. (Kor. Ed.)* **5**, 1, p 51.
- [7] D. Maloara, *Optical Shop Testing*, Chap. 4, 5, 13, (John Wiley & Sons, Inc., 2nd ED, 1992).
- [8] R. J. Freiberg, P. P. Chenausky and C. J. Buczek, "Unidirectional Unstable Ring Lasers," *Appl. Opt.* **12**, 6 (1973).
- [9] P. D. Pozzo, R. Polloni, O. Svelto and F. Zaraga, "An Unstable Ring Resonator," *IEEE J. of Quantum Electron.* **QE-9**, 11 (1973).
- [10] R. J. Freiberg, P. P. Chenausky and C. J. Buczek, "An Experimental Study of Confocal CO<sub>2</sub> Resonators," *IEEE J. of Quantum Electron.* **QE-8**, 12 (1972).
- [11] F. Gori, G. Guattari, and C. Padovarni, *Opt. Commun.* **64**, 491(1987).
- [12] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly, *Opt. Lett.* **13**, 79(1988).
- [13] P. D. Pozzo, R. Polloni, O. Svelto and F. Zaraga, "A Doubly-Confocal Unstable Ring Resonator," *Opt. Commun.* **11**, 115 (1974).
- [14] A. E. Siegman, *Lasers*, Chap. 21-23. (University Science Books, Mill Valley, 1986).
- [15] D. Y. Park, et al, "Operational Characteristics of an Imaging, Unstable Ring Resonator using Nd:YLF as an Active Medium," *Proc. of the International Conferences on LASERS '89*, New Orleans, STS Press, 449 (1990).
- [16] K. H. Drexhage and U. T. Muller-Westerhoff, "New Q-switch Compounds for IR," *IEEE J. of Quant. Electron.* **QE-8**, 9 (1972).
- [17] S. H. Choi, D. Y. Park and S. G. Lee, "Analysis of the Wavefront of Laser Beam based on the Fourier Analysis Method," *J. of Opt. Soc. Kor. (Kor. Ed.)* **5**, 445, (1994).

## **The Spatial Coherence Characteristics of Wavefront of NBUR Nd:YAG Laser Output Beam**

Sueng Ho Choi and Dae Yoon Park

*Department of Physics, Inha University, Incheon, 402-751, Korea*

Seung Gol Lee

*Department of Electronic Materials and Devices Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea*

(Received: September 14, 1995)

We have studied about spatial wavefront analysis of a pulsed laser output beam by means of an imaging unstable ring resonator with an infinite Fresnel number. We have constructed a Newtonian telescope type NBUR (Negative Branch Unstable Ring) Nd:YAG laser with 4 plane mirrors. Provided that the NBUR resonator is under self imaging condition, the resonator could be reduced diffraction effects which were occurring to the beam transmitting through the circular aperture of scraper mirror in the resonator. We have observed enhancement in the spatial coherence of wavefronts of laser beam due to the iterative round trips of the self imaging beam inside the ring resonator. The information on the spatial wavefronts was determined by the fringe patterns from Mach-Zehnder interferometer and the fringe analysis by means of the Fourier transform method showed the distortion of wavefronts of less than  $0.2\lambda$ . In comparison with a standing wave type resonator, we have confirmed that the spatial coherence of the NBUR Nd:YAG laser output beam was enhanced as much as 75%.