

Fourier 분석법에 의한 레이저 출력 광속의 위상파면 분석에 관한 연구

최승호 · 박대운

인하대학교 이과대학 물리학과

이 승 걸

인하대학교 공과대학 전자재료공학과

(1994년 12월 28일 받음)

레이저 출력 광속의 위상파면 분석에 관한 이론적인 연구와 측정 실험을 수행하였다. 출력 광속의 위상파면을 측정하기 위해 Mach-Zehnder 간섭계가 사용되었고, 간섭무늬로부터 출력 광속의 위상파면을 얻기 위해 Fourier 분석법을 적용하였으며, 컴퓨터에 의해 위상파면을 자동적으로 분석하기 위한 분석용 프로그램도 개발하였다. 위상파면 분석에 관한 전산시뮬을 반복 수행하여 개발된 프로그램의 타당성을 입증할 수 있었으며 분석용 프로그램의 오차 범위는 대략 $\lambda/30$ 이하임을 알 수 있었다. 개발된 프로그램을 적용하여 연속발진 Nd:YAG 레이저 출력 광속의 위상파면을 측정하는 실험을 수행하였으며 이로부터 레이저 출력 광속의 위상파면이 대략 구면에 가까운 형태임을 확인할 수 있었다.

I. 서 론

일반적으로 광학실험을 수행하는데 있어서 광원으로 사용되는 레이저 광속의 beam quality를 평가하는 것은 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 특히 beam quality 중에서 위상파면은 레이저 증폭기나 무회절 Bessel 광속의 발생^[1,2] 등의 응용에서 매우 중요하게 취급되고 있다.

레이저 출력 광속의 위상파면을 측정하기 위해서는 Mach-Zehnder 간섭계, Twyman-Green 간섭계, lateral shearing 간섭계 그리고 radial shear 간섭계^[3,4] 등을 활용하여 먼저 출력 광속의 간섭무늬를 얻어야 한다. 이 중에서 Mach-Zehnder 간섭계를 활용하여 출력 광속의 Fizeau fringe를 얻는 경우 기준 광속(reference beam)으로 광속확대기(beam expander)에 의해 확대된 출력 광속을, 시험 광속(test beam)으로 출력 광속 그 자체를 사용한다. 이때 확대된 출력 광속 즉, 기준 광속의 파면은 확대에 의해 평면이 되는데 이러한 기준 광속을 "self-generated reference beam"이라 한다. 기준 광속과 시험 광속을 사각으로 중첩시켜 높은 공간주파수의 간섭무늬를 얻게 되며 이러한 간섭무늬 내에 위상파면에 관한 정보가 저장되어진다.

높은 공간주파수의 간섭무늬로부터 위상파면을 분석하는 방법으로는, 1982년 Takeda 등에 의해 제안된 Fourier 분석법^[5]이 있으며, 같은 목적으로 Mertz에 의해 sinusoid fitting^[6,7]법이 제안되었다. 또한 이들 두 가지 방법의 비교 연구^[8] 및 다른 방법들에 의한 위상파면의 분석연구가 활발히 진행되고 있다.^[9-12] Takeda 등에 의해 제안된 Fourier 분석법은 2차원으로 쉽게 확장될 수 있으며 위상파면을 얻는 방법이 간단하므로 위상파면의 분석에 많이 활용되고 있다. 특히, Fourier 변환과정을 적용함으로써 출력 광속의 위상파면을 간단히 분석해 낼 수 있기 때문에 이 방법은 컴퓨터에 의한 자동분석에 유리한 측면을 가지고 있다.

본 연구에서는 레이저 출력 광속의 위상파면을 분석하기 위해 Fourier 분석법을 적용한 분석용 프로그램을 개발하였고 전산시뮬을 통해 프로그램의 타당성을 검증하였다. 또한 개발된 프로그램을 실제 간섭무늬에 적용하여 LD-pumped cw Nd:YAG 레이저(AMOCO Laser Co. M/D 1064-50P) 출력 광속의 위상파면을 분석하였다. 이때 출력광속의 간섭무늬는 Mach-Zehnder 간섭계로부터 얻어졌으며, Fourier 분석법을 적용하기 위해 두 광속을 사각으로 중첩시켜 간섭무늬의 공간주파수를 높이고자 하였다.

II. 위상파면의 분석 이론

레이저 광속의 위상파면을 분석하기 위해 본 연구에 적용한 Fourier 분석법은 평면파인 기준 광속을 기준으로 하여 알고자 하는 시험 광속의 위상파면을 분석하는 것이다. 즉, 두 광속의 중첩에 의해 형성된 간섭무늬로부터 기준 광속인 평면파에 대해 상대적으로 시험 광속의 위상파면이 얼마나 왜곡되었는가를 알 수 있도록 한다.

두 광속의 중첩 결과인 합성파 $E(x, y)$ 는 기준 광속의 전기장 $E_1(x, y)$ 과 시험 광속의 전기장 $E_2(x, y)$ 의 합으로 주어지며

$$E(x, y) = E_1(x, y) + E_2(x, y) \tag{1}$$

식 (1)과 같이 표현된다.

두 광속의 중첩에 의한 간섭무늬의 세기 $g(x, y)$ 는 $|E(x, y)|^2$ 에 비례하는데, $g(x, y)$ 의 일반적인 표현식은 아래와 같다.^[4,13]

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \tag{2}$$

여기서 $g(x, y)$ 는 관측된 간섭무늬 형태 즉, 세기의 공간적인 분포를 의미한다. 식 (2)에서 $a(x, y)$, $b(x, y)$, $\phi(x, y)$ 는 각각 간섭무늬의 평균 세기(background illumination), 변조량(fringe modulation), 측정된 시험 광속의 위상파면을 의미한다. 또한 spatial carrier frequency f_0 는 기준 광속에 대해 시험 광속의 광축이 기울어진 각도에 따라 그 값이 결정된다.

식 (2)에서 $a(x, y)$, $b(x, y)$, $\phi(x, y)$ 는 비록 공간 함수이지만 f_0 를 포함하는 항에 비해 공간적으로 아주 천천히 변화하므로 간섭무늬의 전체적인 형태는 공간주파수 f_0 에 의해서 결정된다. 이때 위상함수 $\phi(x, y)$ 는 간섭무늬의 간격을 부분적으로 변화시키는 역할을 하게 되며 그 외의 항들은 간섭무늬의 선명도(visibility)를 변화시키는 작용을 할 뿐이다.

식 (2)를 복소 지수함수를 이용하여 다시 표현하면

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)\exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y)\exp(-2\pi i f_0 x) \tag{3}$$

$$c(x, y) = (1/2) b(x, y)\exp[i\phi(x, y)] \tag{4}$$

이 되며 식 (3)의 양변에 Fourier 변환과정을 취하여 $g(x, y)$ 의 Fourier 변환식인 $G(f_x, f_y)$ 를 구하면

$$G(f_x, f_y) = F[g(x, y)] = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_0, f_y) + C^*(f_x + f_0, f_y) \tag{5}$$

이 된다. 여기서 $A(f_x, f_y)$ 는 $a(x, y)$ 의 Fourier 변환식이며 $C(f_x - f_0, f_y)$ 와 $C^*(f_x + f_0, f_y)$ 는 식 (4)의 우변에서 두 번째와 세 번째 항의 Fourier 변환식이다. 물론 $C(f_x, f_y)$ 는 $c(x, y)$ 의 Fourier 변환식으로서 shifting theorem에 의해 식 (5)의 결과가 주어진다.

앞에서 언급한 바와 같이 공간주파수 f_0 를 제외한 나머지 항들은 공간적으로 매우 완만하게 변화하므로 함수 $A(f_x, f_y)$ 와 $C(f_x, f_y)$ 는 f_0 에 비해 아주 낮은 공간주파수를 가진 함수가 된다. 식 (5)의 첫 번째 항인 $A(f_x, f_y)$ 은 위상함수에 관한 정보를 전혀 갖지 못하며 공간주파수 영역에서 원점 주위에 위치하는 함수일 것이고 대략적으로 함수와 유사한 형태를 취할 것이다. 두 번째 항인 $C(f_x - f_0, f_y)$ 는 위상함수 $\phi(x, y)$ 에 관한 정보를 가지며 공간주파수 영역에서 f_0 축을 따라 f_0 만큼 이동된 함수이며 세 번째 항인 $C^*(f_x + f_0, f_y)$ 도 같은 정보를 가지고 있지만 두 번째 항과는 달리 f_x 축을 따라 $-f_0$ 만큼 이동된 함수이다. 결국 식 (3)으로 주어지는 간섭무늬에 Fourier 변환과정을 취함으로써 식 (5)와 같이 위상함수를 포함하는 항과 background illumination의 영향을 공간주파수 영역에서 서로 분리할 수 있게 된다.

위상정보를 얻기 위해 식 (5)에서 $A(f_x, f_y)$ 와 $C^*(f_x + f_0, f_y)$ 항을 소거한 후, $C(f_x - f_0, f_y)$ 항을 공간주파수 영역의 원점으로 이동시키면 위상정보를 포함하고 있는 항인 $C(f_x, f_y)$ 를 얻게 된다. 이 결과에 Fourier 역변환과정을 취하면

$$F^{-1}[C(f_x, f_y)] = c(x, y) = \frac{b(x, y)\exp(i\phi)}{2} \tag{6}$$

식 (4)에서 정의된 $c(x, y)$ 를 얻을 수 있다. 식 (6)의 표현으로부터 위상파면 $\phi(x, y)$ 는

$$\phi(x, y) = \text{ATAN2}[\text{Im}c(x, y), \text{Re}c(x, y)] \tag{7}$$

와 같이 주어진다. arctangent 함수 값은 2π 의 modulo를 가지므로 식 (7)로부터 계산된 위상은 $(-\pi, \pi)$ 구간 내의 값을 갖게 된다. 즉, 식 (7)의 위상은 wrap phase로서 간단한 알고리즘을 이용해 이를 다시 unwrapping^[2,6]해 주어야만 알고자 하는 시험 광속의 실질적인 위상파면을 얻을 수 있을 것이다.

지금까지 설명된 내용을 그림 1의 흐름도에 정리하여 보았다. 그림 1에서는 간섭계로부터 얻어진 간섭무늬를 이용하여 최종적으로 출력광속의 위상파면을 결정하는 분석과정을 총괄적으로 보여주고 있다.

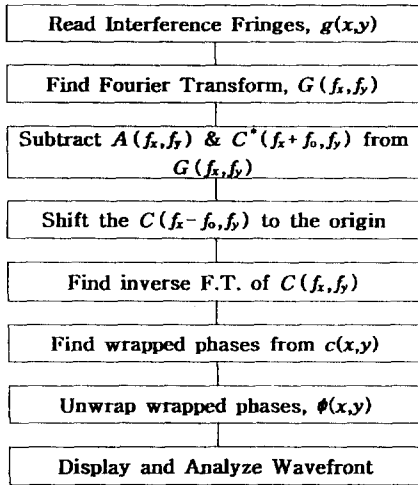


그림 1. Flowchart of the analysis process based on Fourier analysis method.

III. 위상파면의 분석에 관한 전산시능

본 연구에서 위상파면 분석을 위해 적용된 Fourier 분석법과 그림 1의 흐름도에 따라 개발된 프로그램의 타당성을 확인하기 위하여 위상파면을 분석하는 전산시능을 반복적으로 수행하였다. 전산시능에서 입사광의 파장은 $1.064 \mu\text{m}$ 으로 가정하였으며 기준 광속은 평면파로서 시험 광속에 대해 70° (second) 정도 기울어진 각도로 입사한다고 가정하였다.

우선, 시험 광속의 위상파면이 구면파인 경우를 가정하여 간섭무늬를 수치 해석적으로 계산하고, 이렇게 계산된 간섭무늬에 대해 본 연구에서 개발된 프로그램을 적용하였다. 주어진 시험 광속에 대한 가상적인 간섭무늬는 그림 2(a)와 같이 두 광속이 중첩되는 것을 고려하여 계산할 수 있다. 기준 광속과 시험 광속의 전기장 표현으로부터 식 (1)의 합성과 표현을 구하고 이로부터 식 (2)의 간섭무늬를 계산하였다. 계산된 간섭무늬의 크기는 256×256 pixels이며 각 pixel에서의 세기는 256 grey level로 표현하였다. 계산된 간섭무늬의 최종적인 형태는 그림 2(b)와 같다.

그림 2(b)의 가상적인 간섭무늬로부터 시험 광속의 위상파면을 결정하기 위해 개발된 프로그램을 적용하였다. 위상파면을 결정하는 과정에서 간섭무늬에 Fourier 변환과정을 취하는 과정이 필요한데, 공간주파수 영역에서 변환 결과를 표현한 것이 그림 3과 같다. 그림에서 background illumination에 해당하는 $A(f_x, f_y)$ 가 공간주파수 영역의 원점에 분포하는 것을 볼 수 있으며 원점의

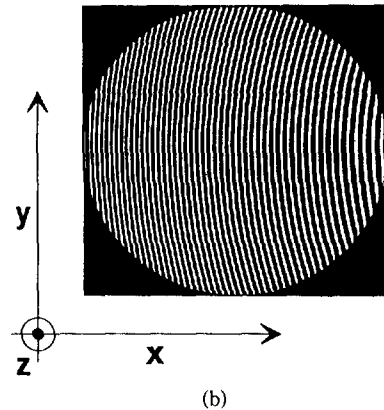
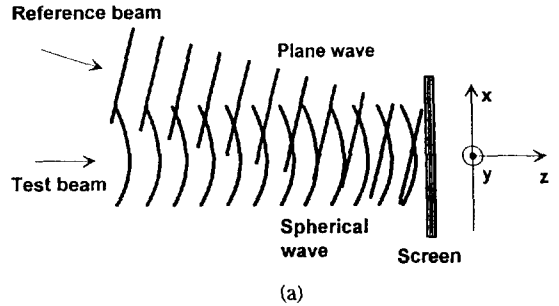


그림 2. Computer simulation for Fourier analysis method.

- (a) Superposition of test beam and reference beam.
- (b) An artificial fringe given by the superposition of two beams.

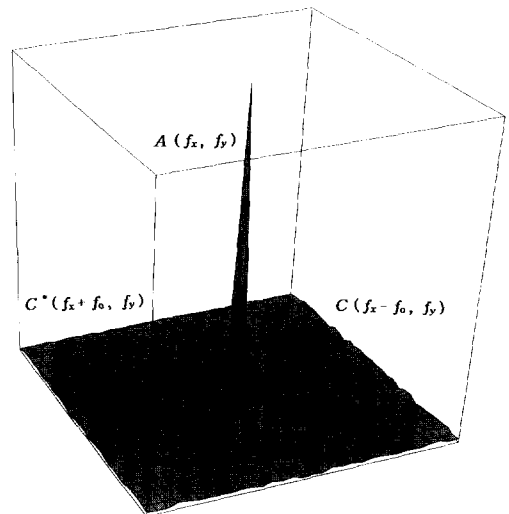


그림 3. 3-D. view of 2-dim. Fourier transform of the artificial fringe shown in Fig. 2(b).

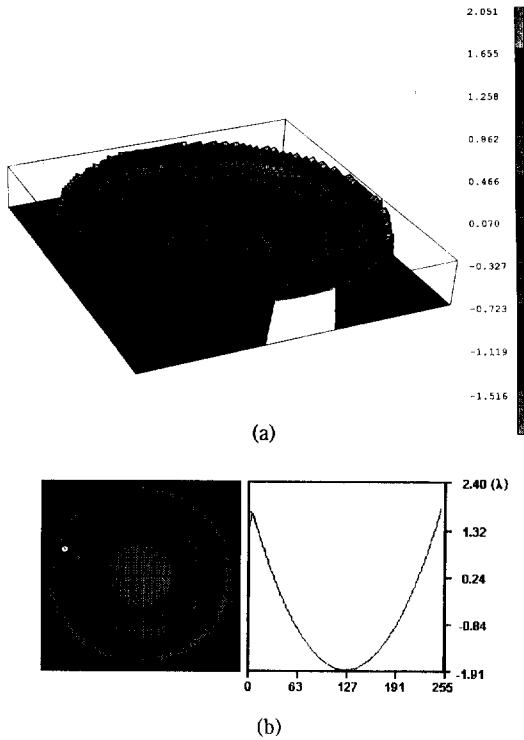


그림 4. Wavefront of a spherical wave by Fourier analysis method. (a) 3-D view of the wavefront calculated by Fourier analysis method. (b) Contour map and line profile of the wavefront.

좌, 우측에 시험 광속의 위상파면 정보를 가지고 있는 $C^*(f_x + f_o, f_y)$ 와 $C(f_x - f_o, f_y)$ 를 각각 볼 수 있다. 여기서 side lobe에 해당하는 두 항의 위치는 spatial carrier frequency f_o 에 의해 주어진다.

그림 3에서 시험 광속의 위상파면을 알아내기 위하여 $A(f_x, f_y)$ 항과 $C^*(f_x + f_o, f_y)$ 항을 소거한 다음, $C(f_x - f_o, f_y)$ 항을 공간주파수 영역의 원점으로 이동시켜 $C(f_x, f_y)$ 의 표현을 구한다. 이 결과에 Fourier 역변환과정을 취하고 식 (7)과 unwrapping과정을 적용하면 시험 광속의 위상파면을 결정할 수 있게 된다. 이러한 과정을 통해 계산되어진 위상파면의 3차원 형상을 그림 4(a)에 나타내었고, 파면의 등고선 형태와 단면도는 그림 4(b)에 나타내었다. 그림에서 각 부분의 높낮이는 그림 4(a)의 우측 막대표를 통해 알 수 있으며 기록된 수치는 파장단위로 주어진 값이다. 이렇게 구한 위상파면(그림 4)과 간섭무늬 계산과정에서 가정된 시험광속의 위상파면(구면)을 비교함으로써 적용된 Fourier 분석법이나 개발된 프로그램의 타당성을 확인할 수 있을 것이다.

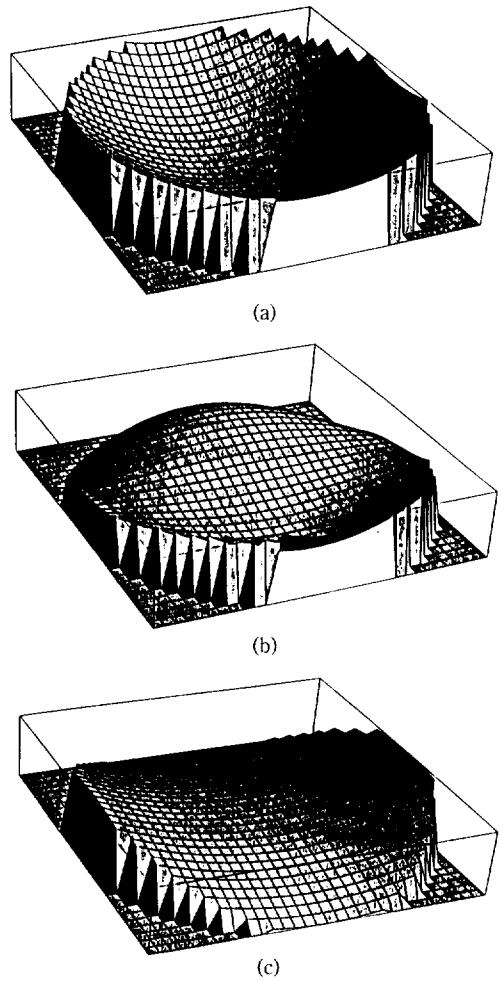
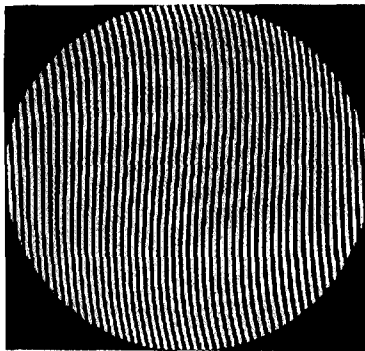


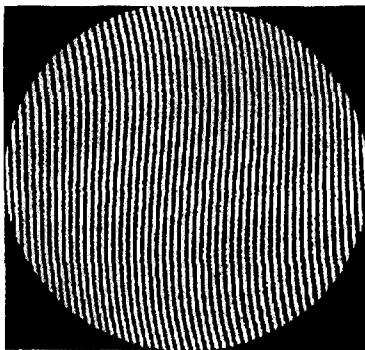
그림 5. 3-D shapes of wavefronts with the aberration of defocus=1.0 (a), coma(x)=1.0 (b), and astigmatism(0/90°)=1.0(c), respectively.

프로그램의 정확도를 정량적으로 취급하기 위해 여러 가지 파면 형태를 갖는 시험 광속에 대해 수치 해석적으로 위상파면을 결정하는 전산시뮬을 반복하였다. 가상적인 시험 광속의 파면으로 각각 defocus, 코마(coma), 비점수차(astigmatism)와 같은 수차^[4]를 가진 파면들을 고려했으며, 실험적으로 간섭무늬를 얻는 과정에서 발생하는 잡음의 영향도 고려하였다.

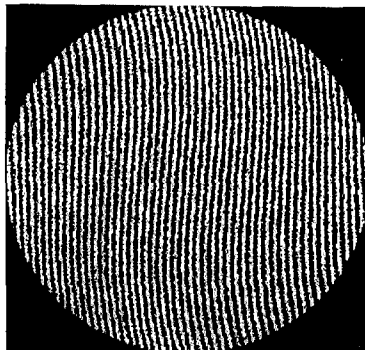
그림 5의 (a), (b), (c)는 가상적인 시험 광속의 파면 형태를 나타낸 것으로 각각 defocus=1.0, coma(x)=1.0, 비점수차(0/90°)=1.0인 경우의 파면이다.^[4] 주어진 시험 광속에 대해 간섭무늬를 계산할 때 잡음의 영향은 다음과 같이 고려되었다. 식 (1)과 식 (2)로부터 계산된 각 pi-



(a)



(b)



(c)

그림 6. Three artificial fringes with the noise level of 0% (a), 20% (b), and 40% (c), respectively. They are generated by interfering the reference beam with the test beam having the aberration of coma(x)=1.0.

xel에서의 grey value에 불규칙한 잡음치(noise value)을 추가함으로써 잡음 효과를 고려하였다. 예를 들어 고려될 noise level이 n%이라면 추가될 잡음치는 $n \times 256 \times (\text{random number})/100$ 로 주어진다. 물론 random number는

표 1. Variation of wavefront errors with noise level for three test beams, whose shapes have aberrations of defocus, coma, and astigmatism, respectively.

| wavefront error (λ) \ noise level | defocus=1.0 | coma(x)=1.0 | astigmatism (0/90°)=1.0 |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| 0% | 0.02 | 0.013 | 0.014 |
| 10% | 0.023 | 0.017 | 0.014 |
| 20% | 0.022 | 0.016 | 0.015 |
| 30% | 0.024 | 0.019 | 0.021 |
| 40% | 0.032 | 0.024 | 0.026 |
| 50% | 0.070 | 0.040 | 0.032 |

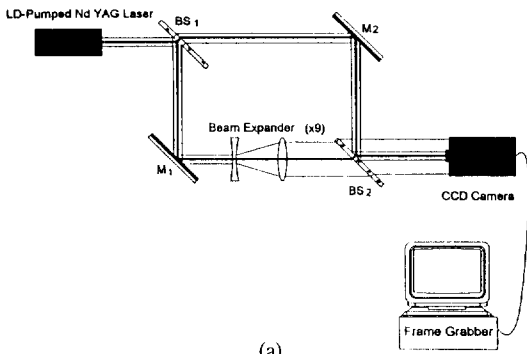
0에서 1부터 값을 갖는다. 참고로 그림 6에 각 noise level에 따른 간섭무늬의 변화를 나타내었다. 여기서 그림 6(a), (b) 그리고 (c)의 noise level 값은 각각 0%, 20% 그리고 40%이다.

앞에서 설명한 세 가지 파면 형태와 0~50%의 noise level을 고려한 각각의 경우에 대해 개발된 프로그램을 적용하여 간섭무늬로부터 위상파면을 결정하였다. 이 결과의 정확도를 평가하기 위해 간섭무늬 계산과정에서 시험 광속의 가정된 파면과 프로그램을 통해 구해진 위상파면과의 차이를 구해 그 최대값을 파면 오차(wavefront error)로 정의하고 그 결과를 표 1에 정리하였다.

고려된 시험 광속의 파면 형태에 따라 파면 오차가 달라짐을 알 수 있으며 defocus가 존재하는 경우 즉, 시험 광속의 파면이 구면일 때 분석에 의한 파면 오차가 가장 큰 것으로 판단된다. 한편 noise level이 대략 30% 이하인 경우 잡음은 분석의 정확도에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나 noise level이 50% 이상인 되는 경우 분석에 의한 파면 오차가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 noise level이 40% 이하인 간섭무늬만을 취급하게 된다면 개발된 프로그램은 λ/30의 파면 오차 범위 내에서 위상파면을 결정할 수 있을 것이다.

IV. 위상파면의 분석 실험

LD-pumped cw Nd:YAG 레이저의 출력 광속이 갖는 위상파면을 결정하기 위해 개발된 프로그램을 적용하였다. 레이저 출력 광속의 위상파면을 분석하기 위해서는 출력 광속으로부터 간섭무늬를 얻어야 한다. 이를 위해



(a)

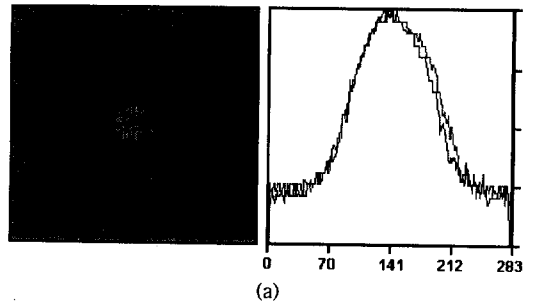


(b)

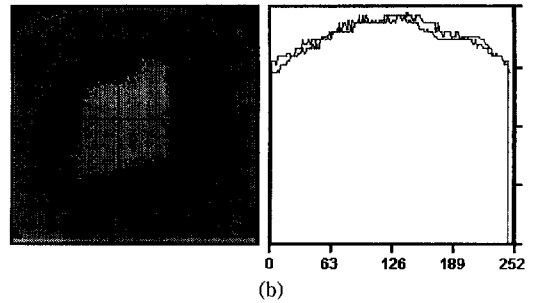
그림 7. The fringe pattern using Mach-Zehnder interferometer system. (a) Schematic diagram of image processing system and Mach-Zehnder interferometer. (b) Interference fringe of laser output beam.

그림 7(a)와 같이 두 개의 beam splitter와 두 개의 반사경 그리고 한 쪽 광경로를 지나는 기준광속이 평면파가 되도록 광속확대기를 사용하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였으며 1.064 μm 의 출력 파장을 갖는 LD-pumped cw Nd:YAG 레이저의 출력 광속을 사용하였다.

간섭계에서 시험 광속으로는 레이저 출력 광속을 그대로 이용하였으며 기준 광속으로는 광속확대기($\times 9$, Spindler & Hoyer)에 의해 확대된 레이저 출력광속을 이용하였다. 광속확대기에 의해 확대된 광속 중의 일부 파면만을 취함으로써 평면파에 가까운 기준 광속을 얻을 수 있었다. 그림 8(a)는 레이저의 출력 광속이 광속확대기를 통과하기 전에 광속의 공간적 세기분포를 3차원적으로 나타낸 것이며, 그림 8(b)는 통과한 후 광속의 공간적 세기분포를 나타낸 것이다. 확대된 광속의 세기분포인 그림 8(b)에서 부분적인 세기 변화를 볼 수 있지만, 간섭무늬의 형성에는 이 광속의 일부 파면만이 이용되



(a)



(b)

그림 8. Intensity profile of cw Nd:YAG laser using beam expander. (a) Intensity profile of laser output beam. (b) Intensity profile of output beam expanded by beam expander($9\times$).

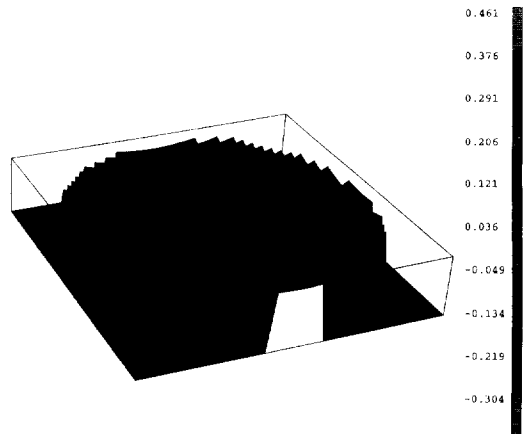


그림 9. 3-D wavefront of Nd:YAG laser output beam, which was calculated by applying Fourier analysis method.

었으므로 기준 광속을 대략적인 평면파로 간주할 수 있을 것이다. 물론 레이저 출력 광속의 위상 파면이 심하게 왜곡된 경우라면 self-generated reference beam은 더 이상 평면파가 될 수 없을 것이다.

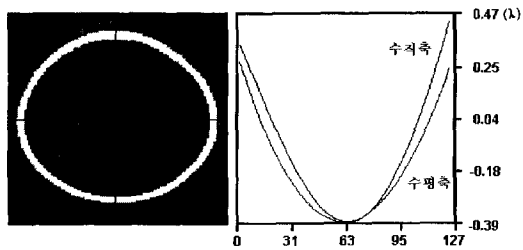


그림 10. Contour map and line profile of the wavefront of Nd:YAG laser output beam.

기준 광속이 확대되는 것을 고려하여 BS₁과 BS₂는 반사율이 각각 30%와 33%인 것을 사용하였다. Mach-Zehnder 간섭계를 구성하는 beam splitter와 반사경(total reflector)의 평면도(surface figure)는 $\lambda/20$ 것을 사용하였다.

Mach-Zehnder 간섭계로부터 얻어지는 간섭무늬는 CCD 검출기(Pulnix Inc.)로 수광하며 frame grabber를 통해 컴퓨터에 저장된다. 사용된 간섭무늬 검출장치는 Mach-Zehnder 간섭계와 함께 구성되었으며 대략적인 구성은 그림 7(a)와 같다. 이와 같은 간섭무늬 검출장치로부터 얻은 간섭무늬는 그림 7(b)와 같으며 레이저 스펙클이나 frame grabber의 잡음으로 인해 많은 잡음이 포함되어 있음을 볼 수 있다.

그림 7(b)의 간섭무늬를 개발된 프로그램으로 처리하여 구한 LD-pumped cw Nd:YAG 레이저 출력 광속의 위상파면은 그림 9와 같으며 파면의 높이는 파장단위로 나타내었다. 또한 위상파면의 등고선 그림과 단면도는 그림 10에 나타내었다. 이 결과로부터 위상파면이 평면에 대해 최대 0.8λ 정도 왜곡되어 있음을 알 수 있었으며 위상파면을 Zernike polynomial에 fitting하며 레이저 출력 광속이 갖은 수차 성분들을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

광학실험에서 광원으로 사용되는 레이저 출력 광속의 beam quality를 평가하기 위한 방법 중에 하나인 광속의 위상파면 특성을 조사하였다. 위상파면 특성을 분석하는 방법으로 Fourier 분석법을 적용하여 출력 광속의 간섭무늬로부터 위상파면을 계산하고 이 결과를 3차원으로 나타낼 수 있는 프로그램을 개발하였다.

이 방법이 레이저 출력 광속의 위상파면 분석에 적용될 수 있는가를 알아보기 위해 컴퓨터로 계산된 간섭무늬에 대해 위상파면을 분석하여 전산시뮬을 반복적으로 수행

하였다. 우선 시험 광속이 구면파인 경우를 가정하여 간섭무늬를 계산하고 이렇게 계산된 간섭무늬에 Fourier 분석법을 적용하여 시험 광속의 위상파면이 구면파가 되는 것을 확인하였다.

또한 프로그램의 정확도를 정량적으로 취급하기 위하여 여러 가지 파면 형태를 갖는 시험 광속에 대해 위상파면을 결정하는 전산시뮬을 수행하였다. 가상적인 시험 광속의 파면으로 각각 defocus, 코마, 비점수차와 같은 수차를 가진 파면들을 고려했으며, 잡음의 영향도 고려하여 잡음이 위상파면의 분석결과에 미치는 영향도 평가하였다. 분석 결과 개발된 프로그램에 의해 출력 광속의 위상파면은 대략 $\lambda/30$ 정도의 파면오차 범위 내에서 결정될 수 있음을 알았다. 또한 noise level이 30% 이하인 경우에는 분석결과가 잡음의 영향을 거의 받지 않지만, noise level이 50% 이상이 되면 분석의 정확도는 매우 나빠짐을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 실제로 LD-pumped cw Nd:YAG 레이저의 출력 광속을 평가하기 위해 개발된 프로그램을 적용하였으며 출력 광속의 간섭무늬를 얻기 위해 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 위상파면을 분석한 결과 레이저 출력 광속의 위상파면은 대략 구면에 가까운 형태를 가지고 있었으며 위상파면의 높이는 0.8λ 정도임을 알 수 있었다. 이러한 방법은 앞으로 본 연구실에서 plane parallel 출력 광속을 갖도록 제작된 펄스형 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저의 출력 광속을 분석하는데 적용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 교육부 지역거점연구 학술연구 조성비의 지원을 받고, 인하대학교에서 지원하는 1993년도 교내 연구비를 가지고 수행된 과제입니다. 이들 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] F. Gori, G. Guattari, and C. Padovani, *Opt. Commun.*, **64**, 491(1987).
 [2] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly, *Opt. Lett.*, **13**, 79(1988).
 [3] Hecht, *Optics*, chap. 9, (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2nd ED, 1987).
 [4] D. Maloara, *Optical Shop Testing*, chap. 4,5,13, (John Wiley & Sons, Inc., 2nd ED, 1992).
 [5] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, *J. Opt. Soc.*

- Am. **72**, 156(1982).
- [6] L. Mertz, "Complex interferometry," *Appl. Opt.* **22**, 1530(1983).
- [7] L. Mertz, "Real-time fringe-pattern analysis," *Appl. Opt.* **22**, 1535 (1983).
- [8] W. W. Macy, Jr., "Two-dimensional fringe-pattern analysis," *Appl. Opt.* **22**, 3898(1983).
- [9] K. Tatsuno and A. Arimoto, "Measurement and Analysis of diode laser wave fronts," *Appl. Opt.* **20**, 3520(1981).
- [10] D. W. Robinson, "Automatic fringe analysis with a computer image-processing system," *Appl. Opt.* **22**, 2169(1983).
- [11] M. Servin, R. Rodriguez-Vera et al, "Automatic fringe detection algorithm used for moire deflectionometry," *Appl. Opt.* **29**, 3266(1990).
- [12] T. R sgen, K. Wozniak, G. Wozniak, "Image processing for laser speckle velocimetry using the 2-D fast Fourier transform," *Appl. Opt.*, **29**, 5298 (1990).
- [13] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, chap. 4-7, (Pergamon press, 6th ED, 1980).

Analysis of the Wavefront of Laser Beam based on the Fourier Analysis Method

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: Decenber 28, 1994)

The automatic analysis of the wavefront of laser beam is simulated numerically, and is applied to get the wavefront of the output beam of LD-pumped cw Nd:YAG laser, experimentally. The automatic analysis tool was developed by utilizing Fourier analysis method, and its usefulness is proved through numerical simulation. The wavefront error due to the analysis tool is known to be less than $\lambda/30$. In order to find the wavefront of Nd:YAG laser beam, its interference fringe is obtained from Mach-Zehnder interferometer. The wavefront calculated from the developed tool has the shape of nearly spherical wavefront and the maximum distortion is about 0.8λ .