

원고리형 레이저광에 의한 근사 무회절 광의 발진

김현태 · 박대윤[†] · 김기식

인하대학교 물리학과

④ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2001년 8월 8일 받음, 2001년 12월 1일 수정본 받음)

Scraper 출력경을 이용하는 불안전 공진기형 Nd:YAG 레이저 발진기에서 고리 두께 0.145 mm인 원고리형 레이저광을 얻었으며, 초점거리에 위치한 베셀렌즈를 통과시켜 근사 무회절 광을 얻었다. 초점거리 1 m의 렌즈를 이용하여 얻은 근사 무회절 광에 대해서 렌즈로부터 거리 z 의 변화에 따른 출력세기를 측정하여 이론과 비교·분석하였다. 또한 초점거리 5 m의 렌즈를 이용한 경우, 거리 33 m의 지점에서도 근사 무회절광이 지속됨을 확인하였다.

분류코드 : LO.070, LO.080.

I. 서 론

J_ν 베셀(Bessel) 빔은 광축의 횡단면에서 세기분포가 베셀 함수로 주어지며, 무회절 광으로서 광이 전파해 갈 때 세기 분포의 변화가 없는 광이다.^[1,2] 이상적인 무회절 베셀 광은 횡단면에서 세기가 중심으로부터 거리의 제곱에 반비례하므로 횡단면 상에서 무한대의 에너지를 갖는다. 이론적으로는 무한한 입사 에너지를 필요로 하므로 완전한 무회절 베셀 빔은 실험적으로 얻을 수 없다. 다만 빛이 진행하는 방향에 수직인 평면에서 얻어지는 세기 분포는, 유한한 부분에 한하여 근사화된 베셀-가우시안(Bessel-Gaussian)광으로 표현되며, 이는 베셀함수를 가우스 함수의 포락선에 실은 무회절 광 이론으로 풀이된다.^[3] 베셀-가우시안 광은 가우시안 세기 분포를 갖는 일반적인 레이저 출력광에 비하여 매우 작은 회절 효과를 보이며 전파한다. 베셀-가우시안 무회절광의 실험적 구현 방법은 원고리형 슬릿에 의하여 회절된 광을 초점거리에 놓인 베셀 렌즈를 이용하여 중첩시키는 방법^[4,5]과 axicon을 이용하여 평행광을 중첩시키는 방법^[6] 및 CGH^[7](Computer-Generated Hologram)을 사용한 회절 입사광을 이용하는 방법 등에 의하여 근사화된 베셀 광속을 만들 수 있다. 이러한 베셀 광속을 얻기 위해서는 입사광이 평면파이어야 하며, 특히 베셀 렌즈에 의한 무회절 광을 얻기 위해서는 원고리형 슬릿 광속의 폭(Δd)이 매우 좁아야 한다.

본 실험에서는 scraper 출력경에 의한 원고리형 레이저빔(annular beam)을 이용하여 근사 무회절 광을 실험적으로 얻었으며, 분석을 수행하였다. 실험에 사용한 레이저 발진기는 Nd:YAG를 이득매질로 하고, scraper 출력경과 두 개의 렌즈로 된 뉴턴형 망원광학계로서 구성하는 NBUR(Negative Branch Unstable Ring) 진행파형 공진기를 사용하였다. 두 개의 수렴 렌즈에 의한 뉴턴형 망원경 광학계는 자체 결상 조건에 만족되도록 설치하였기 때문에 그 수렴 렌즈의 초점거리

비율에 따라 scraper 반사경을 통하여 출력되는 원고리형 레이저광의 고리폭을 변화시킬 수 있는 장점이 있다.^[8]

본 논문에서는 초점거리 1 m인 렌즈를 사용하여 무회절 영역에서의 세기 분포를 측정하여 분석하였으며, 초점거리 5 m, 7 m인 렌즈를 이용하여 실험실 조건에서의 무회절 영역과 무회절성을 확인하였다.

II. 이 론

Scraper 출력경으로부터 얻는 원고리형 레이저 광은 회절에 의하여 초점거리에 놓인 베셀 렌즈에 입사된다. 베셀 렌즈는 원고리형 레이저광이 이 렌즈를 통과한 후 베셀 함수 J_ν 의 세기분포를 갖고 전파하게 되고, 이러한 역할을 하는 수렴 렌즈를 말한다. 베셀 렌즈의 직경에 따라서 입사 회절광 영역은 제한되며, 이 영역에 입사되는 전기장 분포가 무회절 영역의 세기분포에 영향을 주므로, 입사되는 회절 광에 대하여 구경함수를 이용하여 영역제한을 고려하였다. 이 구경함수의 전기장 분포가 각각 rectangular, gaussian, airy, triangle의 형태를 갖는 경우에 대하여 중앙극대점의 거리에 따른 세기 분포를 계산하였으며, 그 결과를 그림 1에 소개하였다.^[4] J_0 빔은 원형이며 대칭성이 있으므로 원형대칭 구경에 대해서 계산하였다. 입사광의 한 좌표($x_1, y_1, 0$)와 전파된 후의 좌표인(x_2, y_2, z)인 쌍으로 이루어진 위치에 대하여 ρ, θ 와 r, ϕ 의 원통좌표를 이용하여 거리 R 을 기술하였다. 거리 z 만큼 진행한 위치에서의 진폭 $A(x_2, y_2, z)$ 은 Fresnel 근사 회절방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

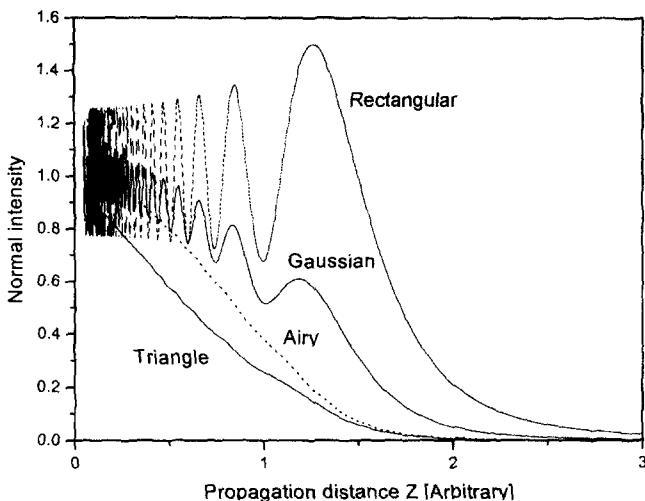
$$A(x_2, y_2, z) = \frac{k}{iz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x_1, y_1, 0) \exp(ikR) dx dy$$

여기에서

$$R = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + z^2]^{1/2}$$

$$= z + \frac{r^2 + \rho^2}{2z} - \frac{2r\rho \cos(\theta - \phi)}{2z}$$

[†]E-mail: dypark@inha.ac.kr

그림 1. 전파 거리에 따른 광축 $r=0$ 의 세기 분포.

입사 진폭 $A(x_1, y_1, 0)$ 은 원통대칭이며, $\rho^2 = x^2 + y^2$ 이고, $r^2 = z^2 + \rho^2$ 이다. 회절장에 대한 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(r, z) = \exp\left(ikz + \frac{ikr^2}{2z}\right) \left(\frac{k}{iz}\right) \int_0^\infty \rho A(\rho, 0) J_0\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) d\rho \quad (1)$$

여기서 k 는 파수(wave number)이고, J_0 는 0차 베셀 함수이며, z 가 0인 지점에서의 진폭은

$$A(\rho, 0) = F(\rho) J_0(\alpha\rho) \quad (2)$$

이다. 여기서 $F(\rho)$ 는 구경(aperture) 함수이다. 다음의 정의 $\xi = \rho/a$ 로부터 $F(\rho)$ 는

$F(\rho) = 1$	Rectangular
$F(\rho) = \exp(-\xi^2)$	Gaussian
$F(\rho) = 2J_1(1.22\pi\xi)/(1.22\pi\xi)$	Airy
$F(\rho) = 1 - \xi$	Triangle

$$(3)$$

와 같이 $\rho < a$ 일 때의 표현이다. 이에 반하여 $\rho > a$ 일 때 $F(\rho) = 0$ 이다. J_1 은 1차 베셀 함수이다.

광축상의 한 점 $r=0$ 에서의 세기분포는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$I(0, z) = A(0, z)^2 = \left(\frac{k}{z}\right)^2 \left| \int_0^\infty \rho F(\rho) J_0(\alpha\rho) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) d\rho \right|^2 \quad (4)$$

여기서, $k = 0.5905 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$ (Nd:YAG laser)이며, 원고리의 레이저 광의 외경 $a = 2.75 \text{ mm}$ 값과 폭 $\alpha = 8 \text{ mm}^{-1}$ 를 식 (4)에 대입하고, 식 (3)의 각각의 구경함수에 따라 계산한 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 가로축은 전파거리 z 를 의미하며, 세로축은 광축에 놓이는 J_0 중앙극대 $I(0, z)$ 의 세기를 나타낸다. Rectangular의 경우에 대해서는 순수한 베셀 광의 분포를 갖고 있는 것으로 나타난다.

III. 실험장치와 결과

본 실험에서 사용한 불안정 고리형 레이저 공진기는 그림 2와 같다. 4개의 평면경과 뉴턴형 망원 광학계를 이루는 2개의 볼록 렌즈를 사용하고, 출력경으로 scraper 거울을 사용한다.^[8,9] Scraper 거울의 중앙 투과창에 의해 발생되는 회절효과를 상쇄시키기 위하여 자체 결상 조건을 갖도록 설계 하였다. 이때의 광학계에 대한 ray matrix는

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_2}{f_1} l_b - \left(\frac{f_2}{f_1} l_a + \frac{f_1}{f_2} l_c \right) \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 된다. 여기에서 f_1, f_2 는 각각 렌즈 L_1 과 L_2 의 초점거리이며 l_a 는 scraper 출력경과 렌즈 L_1 과의 거리, l_b 는 렌즈 L_1 과 L_2 사이의 거리, l_c 는 렌즈 L_2 와 scraper 출력경사이의 거리이다. 일반적으로 공진기의 불안정형 조건에 의하면 half-trace parameter $|lm|$ 은 $|lm| = |A + DV/2| > 1$ 이며, 본 실험에서 사용한 초점거리 $f_1 = 50 \text{ cm}$, $f_2 = 55 \text{ cm}$ 을 대입하여 위의 조건을 만족함을 알 수 있었다. 공진기내에서의 광속의 횡배율 M 은 $M = f_2/f_1$ 에 의하여 1.1배이다. 이는 무회절 광 발생을 위한 입력 원고리 광속으로서 적합한 배율이다.

Scraping 출력경은 정 중앙에 직경 2.5 mm의 구멍을 광축에 대하여 45°로서 정밀하게 가공하였다. 가공면이 정밀하지 않을 경우, 산란에 의하여 원고리 레이저 출력에의 균일도가 멀어지게 되고, 이러한 영향으로 무회절 빔의 세기분포에 영향이 생긴다. 레이저광 입사면에서 투과구멍 이외의 반사부분은 입사각 45°에 대하여 1.06 μm의 광이 99.9% 반사되도록 하였으며, 반대쪽 표면은 무반사 박막을 증착하였다. 사용한 Nd:YAG 레이저 봉은 Synoptics 사의 것으로 직경 6.3 mm이고, 길이가 41.3 mm인 고품질의 것을 사용하였다. 또한, 일방향 발진을 위해서 TGG(Terbium Gallium Garnet)를 특수 설계한 영구 자석과 함께 패러데이 회전기를 제작하였다. 영구 자석은 축을 따라 통과하는 광속의 편광 방향이 45° 회전되도록 0.77tesla(7,700gauss)의 자기장을 갖고 있다. Q-스위칭 동작을 일으키기 위해서 두께 1 mm, 직경 9mm인 초기 투과율

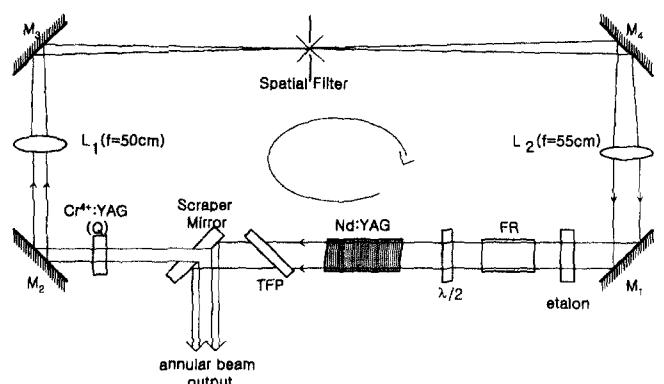
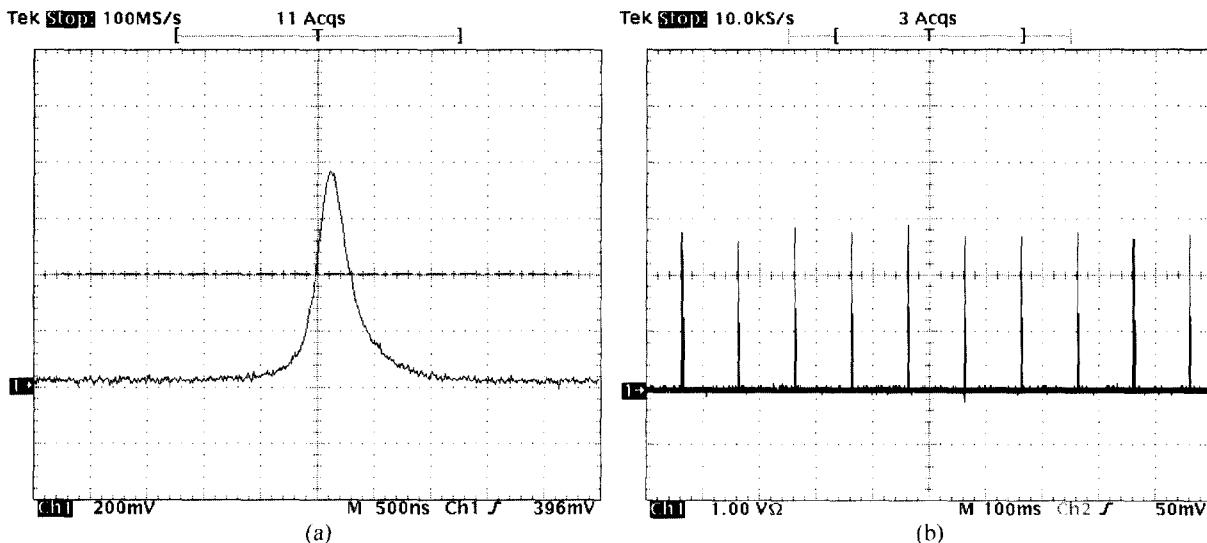


그림 2. 음영역 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저 공진기.

그림 3. Cr⁴⁺:YAG 단결정에 의하여 Q스위칭된 (a) 단일펄스파형(FWHM = 300 ns)과 (b) 출력세기 안정도(10 Hz).

10%의 Cr⁴⁺:YAG(Casix사) 단결정을 사용한 수동형을 선택하였다. 전기 입력에너지가 60J일 때, Q-스위칭된 레이저 출력은 1mJ이었으며, 펄스폭은 300ns이었다. 그림 3은 Cr⁴⁺:YAG에 의한 Q-스위칭 펄스파형과 발진에 대한 안정성을 평가하기 위하여 10Hz로 발진한 결과이다. 출력의 오차는 약 7% 미만이었으며, time jitter도 수십 ns 정도로 매우 적음을 알 수 있었다.

무회절 영역의 크기를 결정짓는 변수는 scraper 출력경에 의하여 발진된 원고리 레이저광의 내경의 크기 d 와 원고리 광의 폭 Δd , 그리고 푸리에 변환렌즈의 직경과 초점거리이다. 원고리 레이저 광의 내경은 출력경인 scraper 거울의 중앙 구멍 직경에 의하여 결정되며, 원고리 광의 폭 Δd 는 뉴턴형 망원 광학계의 배율에 의하여 결정된다. 원고리 광의 폭은 중앙극 대의 크기를 결정하는 $\Delta d \sin\theta = \lambda$ 의 관계로부터 초점거리와 사용하는 렌즈의 직경을 고려하여 식으로부터 사용하는 파장의 약 20배의 크기가 적당하나, NBUR 레이저 공진기내에 설치할 이득매질, Q-스위칭 소자, 모드 잠금소자, 패러데이 소자 등의 공진기내 광학소자의 설계조건과 앞에서 기술한 맹원경

배율과 부합되는 값이어야 한다. 이 증폭된 레이저 광속의 고리폭은 이론적 계산결과는 $\Delta d = 0.125$ mm이다.

그림 4는 scraper 출력경으로부터 7 cm 위치에서 CCD 검출기에 의해 촬영한 원고리형 출력광속의 모양이다. 실험장치를 통한 원고리형 레이저 출력의 고리는 내경 2.57 mm, 외경 2.86 mm로 고리의 간격 $\Delta d = 0.145$ mm였다. 설계 값과 차이를 보이고 있는 이유는 제작한 scraper 출력경 내경의 가공오차와 공진기 구성 광학계의 정렬 오차에서 발생하였다. 사진에서 보이는 중앙의 밝은 점은 아라고의 반점(Arago's spot)^[8]이라고 불리우는 점이다.

원고리형 출력광속의 분포가 균일하여야만 무회절 광의 세기 분포가 균일해지고, 이를 위하여서는 공진기내의 모든 광부품의 완전한 광학적 정렬과 사용되는 각각의 부품들의 내부 광학적 규질 특성이 양호하여야만 한다. 광학적 정렬은 본 연구실에서 이미 발표하였던^[9] 간섭법에 의한 null fringe 확인 방법을 이용하여 되도록 완전한 정렬을 갖도록 하였다.

Scraper 출력경으로부터 나온 원고리형 출력은 회절에 의하여 그림 5에서와 같이 광축을 따라 진행 할 때, 측정위치 변화에 의한 회절 무늬가 점차 커지는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 레이저 광속의 품질(quality)을 평가할 때 이용하는 focal spot 방법과 다른 점을 비교하여 보면, focal spot 방법에서는 출력경 근방에 위치한 렌즈에 의하여 초점거리에 집속된 빔 형상을 측정하지만, 본 실험에서 사용하는 방법은 렌즈를 출력경으로부터 초점거리만큼 떨어진 위치에 설치하여 무회절 영역을 측정하게 된다.

무회절 레이저광을 구현하기 위하여 사용하는 초점거리 1 m, 5 m, 7 m인 렌즈를 scraper 출력경으로부터 각각 1 m, 5 m, 7 m의 초점거리에 위치토록 설치하여 실험하였다.

그림 6은 실험에서 얻어진 scraper 거울에서 나오는 출력광의 회절무늬를 CCD 검출기(Pulnix, TM-540)에 의하여 촬영한 영상이다. 기하광학적인 방법을 이용하면, 무회절 영역의 길이 Z_{max} 를 원고리형 출력광속의 직경과 고리폭, 파장 및 사



그림 4. Scraper 출력경에 의한 원고리형 레이저 출력 광속.

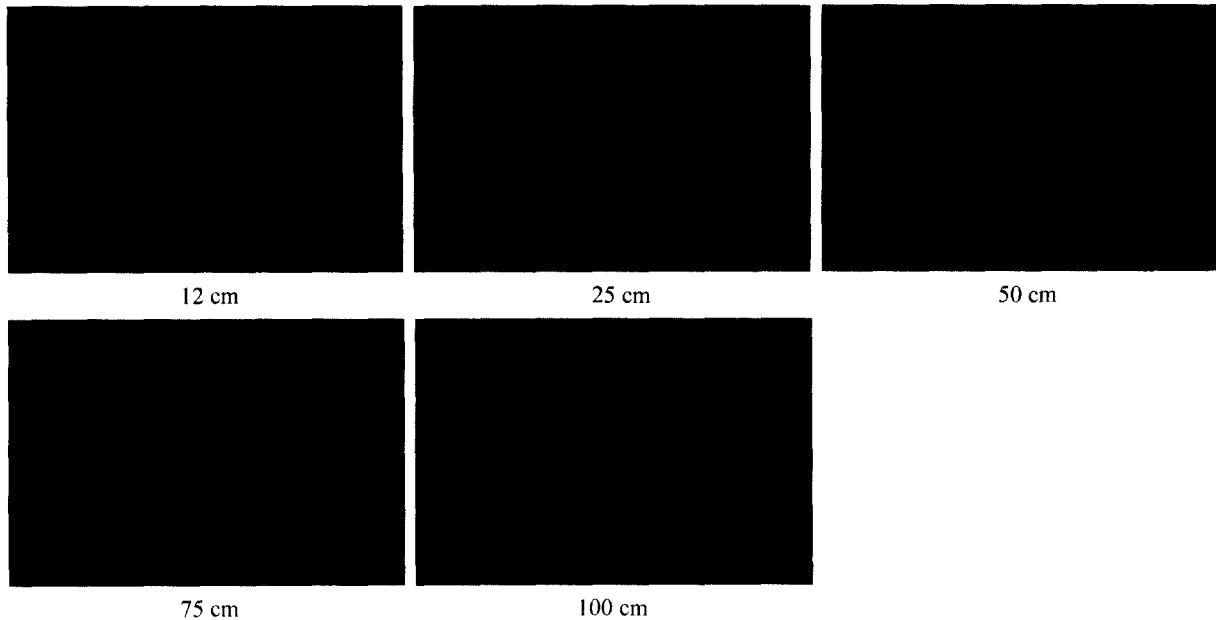


그림 5. Scraper 출력경으로 부터 광축을 따라 전파해 갈 때의 회절 무늬.

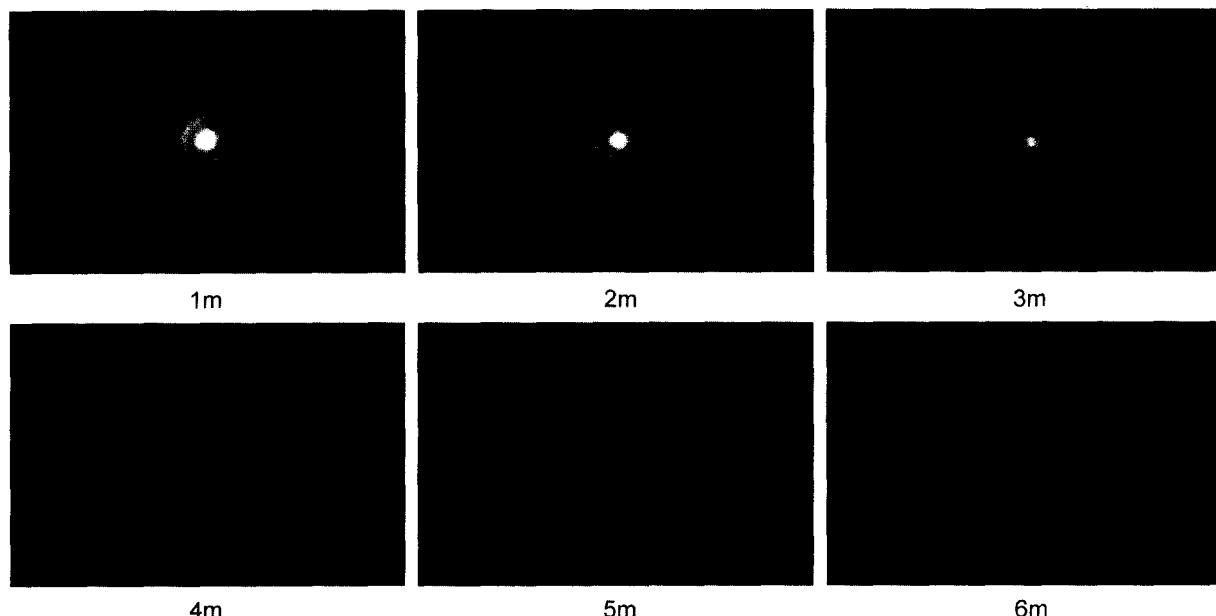


그림 6. 초점거리 1 m 렌즈에 의한 무회절 영역 측정.

용한 렌즈의 초점거리와의 관계는 다음과 같다.^[1,2]

$$Z_{max} = \frac{R_{eff}}{\tan\left(\frac{d}{2f}\right)} \quad (6)$$

$$R_{eff} = \frac{d}{2} + \frac{f\lambda}{\Delta d} \quad (7)$$

식 (7)의 R_{eff} 는 사용하는 레이저광의 파장 λ 와 원고리형 슬릿의 직경 d , 폭 Δd , 초점거리 f 에 의하여 결정되어지는 회절 반경으로, 초점거리에 놓이는 렌즈의 크기를 결정하는 요소이다.

본 실험조건을 대입하여 계산하여 보면 R_{eff} 은 8.7 mm이었으며, 사용한 베셀 렌즈의 직경이 10.16 cm이므로, 베셀 렌즈의 반경 R 과 유효반경 R_{eff} 의 관계조건인 $R > R_{eff}$ 을 만족한다. 이로부터 본 연구에서 계산된 무회절 영역의 크기 Z_{max} 는 6.41 m이었으며, 실험에서 측정한 결과는 $Z_{max} = 6.22$ m으로 근사적으로 만족하고 있었다. 이를 벗어난 거리에서는 무회절성이 서서히 사라짐을 볼 수 있었다.

무회절 빔의 세기분포가 첫 번째 극소를 이루는 지점사이의 거리는 중앙극대점의 지름이다. 그 크기는 $d_c = 4.81/k_\perp$ 로 주어지며, 4.81은 $J_0(x)$ 함수에서 그 값이 0인 $2x$ 의 크기이다.

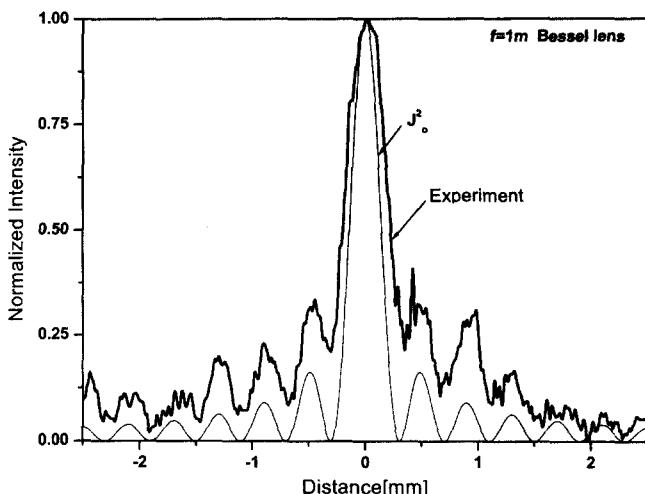
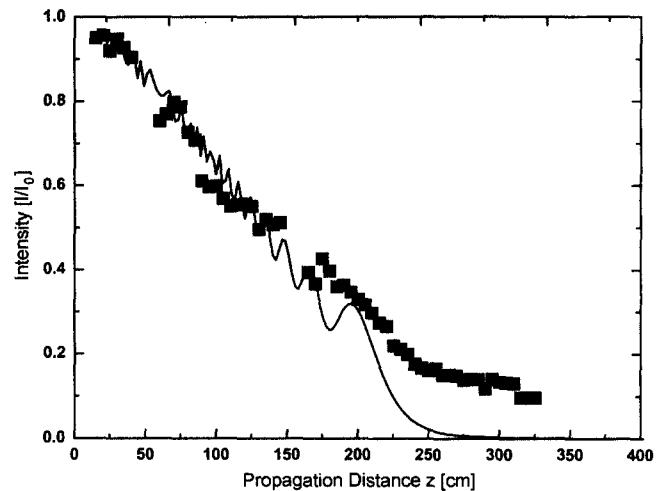


그림 7. 초점거리 1 m 렌즈에 의한 거리 3 m에서의 출력 분포.

k_{\perp} 는 $(2\pi/\lambda) \sin\theta$ 로, 원고리 직경과 초점거리에 비례하는 항이고, $\theta = \tan^{-1}(d/2f)$ 의 관계를 갖고 있다. 이로부터 계산되어진 중앙극대점의 직경은 초점거리 1 m일 때 0.60 mm이었다. 실험에서는 무회절 빔을 적외선 감광 전판(High Speed Infrared Kodak film; HIE135-36)에 노광하여 이동현미경으로 그 크기를 측정한 결과, 0.60 ± 0.01 mm로 이론치와 잘 일치하였다. 그림 6에서와 같이 무회절 영역내에서 중앙 극대점 직경의 크기는 광축을 따라 진행할 때 그 크기가 변화하지 않음을 확인할 수 있었다.

그림 7은 초점거리 1 m 베셀 렌즈를 사용하여 렌즈로부터 거리 3 m에서의 광축과 직각인 평면상에서의 출력세기 분포이다. 가는 실선으로 나타낸 것은 이상적인 베셀 빔(J_0^2)의 출력분포이며 굵은 실선은 CCD 검출기를 통하여 측정된 출력분포 결과이다. $m=0$ 의 중앙극대와 J_0^2 곡선을 규격화시켰을 때, 실험결과의 극대점을 위치가 J_0 함수의 극대치와 거의 잘 일치하였다. 그러나 $m=0$ 이외의 분포곡선은 이상적인 베셀 빔의 출력세기분포와 크기에서 차이를 보이고 있다.

광축 z 의 거리변화에 따라 중앙극대의 세기의 변화 $I(0, z)$ 를 측정하여, 식 (4)에 의한 그림 1과 비교한 결과는 그림 8과 같다. 이는 베셀 렌즈에 의하여 중첩된 빔의 0차 J_0 ($m=0$) 중앙극대 부분의 출력세기를 거리에 따라 측정하였다. 중앙극대의 출력만을 측정하기 위하여 측정기 앞에 직경 1.6 mm의 개구를 설치하여 실험하였다. 사각점(■)으로 표시된 것은 거리변화에 따른 중앙극대점의 세기 분포를 측정한 결과이며, 식 (3)의 gaussian 구경함수를 식 (4)에 적용하고, $a = 2.75$ mm와 $\alpha = 5 \text{ mm}^{-1}$ 를 대입하여 계산한 결과인 굵은 실선과 거의 일치함을 볼 수 있다. 원고리형 레이저 광속이 회절하여 베셀 렌즈에 입사할 때, 빔의 전기장이 가우시안 분포를 갖고 있음을 확인시켜준다. 순수한 베셀 빔에 근사한 무회절 빔을 얻기 위해서는 렌즈에 입사하는 빔의 전기장분포가 rectangular와 같은 평행 평면파를 요구하며, 이를 만족하기 위해서는 원고리 슬릿광속의 폭 Δd 가 실험에서 사용한 값보다 더욱 작은 간격을 필요로 한다.

그림 8. 초점거리 1 m 렌즈에 의한 J_0 중앙극대 점의 거리에 따른 출력세기 분포.

또한, 직경 50.8 mm, 초점거리 5 m인 베셀 렌즈를 scraper 출력경으로부터 초점거리에 설치하고 회절무늬를 측정하였다. 원고리 광속의 폭 Δd 와 직경 d 를 실험결과에서 얻은 조건으로 하여 식 (6)에 대입하여 R_{eff} 를 계산한 결과, 유효반경은 3.80 cm였으나, 본 실험에서 사용한 렌즈의 반경은 반경이 2.54 cm이다. 따라서, 렌즈의 실제 반경을 대입하여 계산하면, 무회절 영역은 97 m에 불과하다. 중앙극대점의 직경 d_{Lz} 는 3.0 mm로 계산되며, 실험측정값은 3.16 ± 0.2 mm이었다. 실험측정은 실험실 측정거리 한계인 $Z_{\text{max}} = 33$ m인 지점까지 측정하였으며, J_0 의 $m=0$ 중앙극대 직경의 크기가 변하지 않았고 베셀 렌즈를 통과한 중첩된 빔이 무회절 됨을 확인할 수 있었다. 67 m 이후에서는 1 m 렌즈를 사용하였을 때와 마찬가지로, 가운데 중앙극대의 무회절성은 서서히 사라진다. 그림 9는 5 m 렌즈에 의한 무회절 영역을 CCD 검출기부터 촬영한 사진이다. CCD 검출기에 의한 무회절 상의 측정에서는 검출기의 레이저 손상을 억제하고 상의 선명도를 높이기 위하여 ND 필터를 사용하였다.

초점거리 5 m와 7 m의 베셀 렌즈를 사용한 실험에서는 2대의 광학대와 직경 10.12 cm 크기의 몇 개의 근적외선 영역의 반사경을 이용한 다중 반사광 경로를 이용하는 방법을 사용하였다. 먼거리에서의 측정은 광학적 시준과 주변 전동의 영향을 완전히 피하기 어려웠으나, 전파 도달된 무회절 광속의 확인 측정은 foot paper나 I.R. viewer를 활용하여 확인 측정하였다.

렌즈의 초점거리가 7 m이고 직경이 10.12 cm인 베셀 렌즈를 초점거리에 설치하여 측정하여 보았다. 계산되는 렌즈의 유효반경은 5.27 cm이고, 이때의 무회절 영역은 272 m이나 본 실험에서는 무회절 영역을 초점거리 5 m의 렌즈를 사용하였을 때와 마찬가지로 67 m까지 시각 확인 할 수 있었다. 중앙극대점의 직경 d_{Lz} 는 4.2 mm로 계산되며, 실험측정값은 4.15 ± 0.2 mm이었다.

베셀 함수의 형태를 갖는 무회절 빔은 파수벡터가 각도

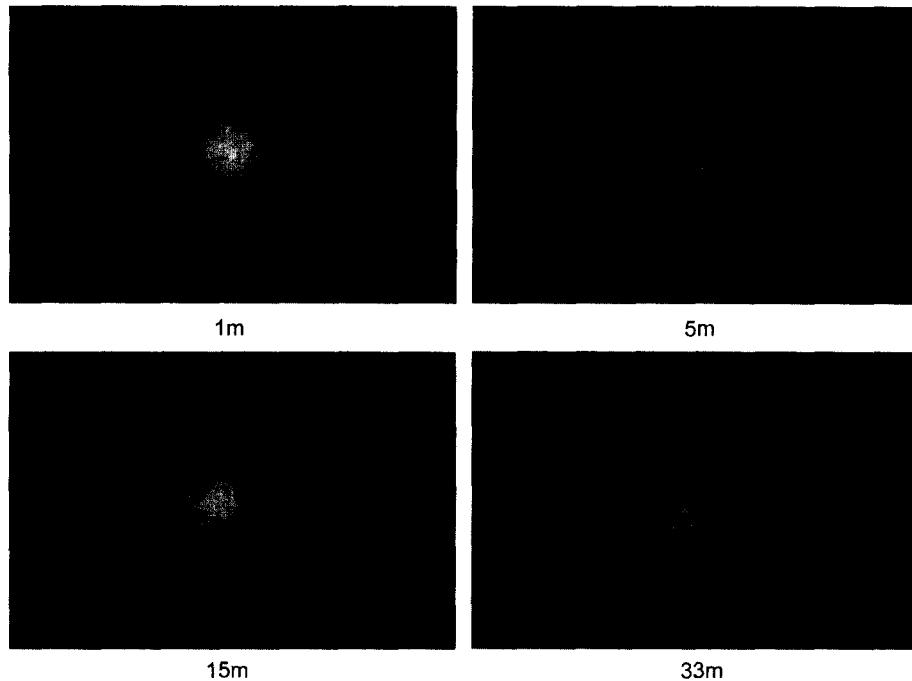


그림 9. 초점거리 5 m 렌즈에 의한 무회절 영역 측정.



그림 10. Mach-Zehnder 간섭계에 의한 무회절 빔 측정.

θ 로 이루어진 cone의 형태로 이루어진 평행 평면파의 중첩으로 볼 수 있다. 그러므로 베셀 빔의 각각의 중심원들은 π 만큼의 위상차를 갖고 있게 된다. 그 위상차를 확인하기 위하여 $\lambda/20$ 정밀도의 광학적 평편도를 갖는 광속분할기 및 반사경, 9배 광속확대기를 사용하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다.^[10] 그림 10은 간섭계에 의하여 관측한 무회절 빔의 간섭무늬이며, 영차모드와 1차 모드사이에는 π 만큼의 위상차가 생긴 것을 확인할 수 있었다. 그림 10에서 세로방향의 간섭무늬는 CCD 검출기 앞단에 설치한 ND 필터에 의하여 발생한 잡음무늬이다. 그러나, 간섭무늬의 오른쪽 부분이 자세히 나타나지 않은 이유는 외경 약 2.7 mm의 광속을 이용한 간섭장치에 의한 확인실험 장치에서는 간섭계에 원고리형 입사광속의 비균일성이 원인으로 간섭무늬의 완전한 대칭성을 유지하지 못한 것이다.

IV. 결 론

Scraper 출력경을 이용한 NBUR Nd:YAG 레이저로부터 얻어지는 원고리형 레이저 광속의 원고리폭은 이론적인 값인 $\Delta d = 0.125$ mm에 근사한 0.145 mm인 원고리형 레이저 출력을 얻었으며, 이로부터 무회절광의 발생과 그 특성해석을 실험을 통하여 확인하였다. 이 원고리형 출력광속은 베셀 렌즈까지 회절을 하며 전파하고, 베셀 렌즈 이후에서는 중첩에 의하여 J_0 함수의 형태를 갖는 무회절 빔을 Z_{\max} 의 한계까지 확실히 보이고 있었다. 본 실험에서 사용한 원고리 출력광의 폭으로부터의 무회절 광 발생은 이상적인 무회절 빔에 근사한 베셀-가우시안 광을 구현할 수 있었다. 즉, 광축을 따라 진행하는 레이저 출력의 세기분포는 구경함수를 가우시안으로 계산하였을 때와 비슷한 결과를 얻었으며, 광축과 직각인 평면에 분포하는 출력분포의 크기가 변하지 않는 결과로부터 베셀-가우시안 무회절 광임을 확인하였다. 초점거리에 놓은 베셀 렌즈를 통과한 레이저광이 초점거리 1 m인 렌즈를 사용하였을 때, 6.22 m 까지 중앙극대의 광속 세기가 줄어들기는 하였으나, 그 크기가 변화하지 않았음을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 초점거리 5 m와 7 m인 베셀 렌즈를 사용하였을 때 실험실내의 거리 측정 한계인 33 m까지 그 크기가 변화하지 않은 결과를 얻었다.

중앙극대점의 강도 분포가 광축을 따라 z 만큼 변화시킬 때 줄어드는 현상은 불안정형 공진기를 구성하는 뉴턴형 망원광학계의 초점거리를 변화시켜 배율을 줄이고, 사용한 레이저 매질인 Nd:YAG 결정의 유효직경까지 사용할 수 있도록 scraper 출력경의 중앙구멍 직경 크기를 증가시키면, 순수 베셀 광에 근접하므로 안정적으로 변화할 것으로 기대 된다. 또한, 원고

리 폭 Δd 가 줄어듦에 따라 비례적으로 적어지는 출력에너지 를 보상하기 위하여 입력에너지를 높이고, 보다 큰 광학계를 사용함으로써 무회절 영역의 향상을 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 원자력연구개발사업 위탁연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly, "Diffraction-free beams," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 15, pp. 1499-1501, 1987.
- [2] J. Durnin, "Exact solutions for nondiffracting beams," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 4, no. 4, pp. 651-654, 1987.
- [3] K. Kim, D.-Y. Park, H. Kim, and S. Choi, "Diffraction-free beam with Gaussian envelope," *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 30, no. 2, pp. 402-406, 1997.
- [4] Z. Jiang, Q. Lu, and Z. Liu, "Propagation of apertured Bessel beams," *Applied Optics*, vol. 34, no. 31, pp. 7183-7185, 1995.
- [5] Y. Lin, W. Seka, J. H. Eberly, H. Huang, and D. L. Brown "Experimental investigation of Bessel beam characteristics," *Applied Optics*, vol. 31, no. 15, pp. 2708-2713, 1992.
- [6] A. Vasara, J. Turunen, and A. T. Friberg, "Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 6, no. 11, pp. 1748-1754, 1989.
- [7] R. M. Herman and T. A. Wiggins, "Production and uses of diffractionless beams," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 8, no. 6, pp. 932-942, 1991.
- [8] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, 1986), pp. 664-665.
- [9] 최승호, 김기식, 박대윤, "고리형 Nd:YAG 레이저를 이용한 무회절 광속발진," *한국광학회지*, 제 8 권 2호, pp. 107-110, 1997.
- [10] 최승호, 박대윤, 이승걸, "Fourier 분석법에 의한 레이저 출력광속의 위상파면 분석에 관한 연구," *한국광학회지*, 제 5 권 4호, pp. 445-452, 1994.

Generation of non-diffraction beam with annular laser output beam

Hyuntae Kim, Dae-Yoon Park[†] and Kisik Kim

Department of Physics, Inha University, Inchon 402-751, KOREA

[†]E-mail: dy park@inha.ac.kr

(Received August 8, 2001 ; revised manuscript received December 1, 2001)

We generated a nondiffracting beam and investigated its intensity profile on propagation. We first obtained an annular output beam from Nd:YAG laser with a negative branch unstable ring resonator and, using a 1m focal length lens, we generated a Bessel-Gauss beam. The inner radius of the annular output beam was 2.57 mm and the ring width was 0.145 mm. The intensity profile of the nondiffracting beam did not show any appreciable diffraction up to 33 m distance from the focal lens. This result was compared with the theory.

Classification codes : LO.070, LO.080.