

## 고리형 Nd:YAG 레이저를 이용한 무회절 광속 발진\*

최승호 · 김기식 · 박대운

인하대학교 물리학과

(1997년 3월 15일 받음)

NBUR(Negative Branch Unstable Ring) 공진기를 갖는 Nd:YAG 레이저의 원고리형 출력광속을 이용하여 무회절 광속을 발진시켰다. Scaper 출력경을 통하여 나오는 원고리형 광속은 평면화된 위상파면을 갖고 있을 뿐만 아니라 균일한 공간적 세기 분포를 가지므로 무회절 광속을 발진시키는데 직접 사용될 수 있으며 높은 출력세기 밀도를 갖게 할 수 있다는 장점이 있다. 구성된 NBUR 레이저의 출력광속의 단면은 내경 2.5 mm 외경 5 mm인 크기를 가졌다. 5 m 초점거리를 갖는 Fourier 변환 렌즈를 레이저 출력경으로부터 초점거리만큼 떨어진 지점에 설치하여 원고리형 출력광속의 먼거리 형태를 관측하였으며, 렌즈를 통과하여 13 m 이상의 위치에서도 광속의 퍼짐이 없음을 확인하였다.

### I. 서 론

최근, Durin 등이 무회절 Bessel 광속의 실현 가능성을 제시한 후로, 무회절 Bessel 광속에 대한 연구가 이론적으로나 실험적으로 매우 활발히 진행되고 있다.<sup>[1,2]</sup> Bessel 광속이란 횡단면에서 세기 분포가 Bessel 함수로 주어지는 광속을 일컫는다. 그러나 Bessel 광속은, 횡단면에서 세기가 중심으로부터 거리의 제곱에 반비례하므로 횡단면 상에서 무한대의 에너지를 갖는다. 따라서 이상적인 Bessel 광속을 얻는 것은 불가능하다. 이러한 점을 이론적으로 보완하기 위하여, Bessel 함수를 Gauss 함수의 포락선에 실은 Bessel-Gauss 광속과 Gauss 테두리 함수로 가둔 무회절 광속이 이론적으로 조사되었다.<sup>[3-5]</sup>

이론적인 고찰과 더불어 실험적으로도 무회절 광속을 구현하고자 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 방법으로 원고리형 슬릿, Fabry-Perot etalon 및 Axicon을 사용하는 방법 등이 제안되었다.<sup>[6-13]</sup> 이러한 방법들에 의해 얻은 무회절 광속은 이상적인 Bessel 광속의 횡단면에서 유한한 영역만을 취한 광속으로서 이상적인 Bessel 광속과는 달리 유한한 전파거리에 대해서만 무회절 특성을 갖는다. 보다 긴 전파거리에 대하여 퍼짐이 없는 무회절 광속을 얻고자 실험적 연구가 계속되고 있다.

본 연구에서는 NBUR Nd:YAG 레이저에서 나오는 원고리형 출력광속으로부터 무회절 Bessel 광속을 직접 발진시키는 방법을 시도하였다. 레이저 출력광속의 특성은 공진기 내의 망원경과 Scaper 출력경에 의해서 결정되고, 망원경의 배율과 Scaper 출력경의 구멍 크기를 바꾸어 원하는 크기의 원고리형 출력광속을 얻을 수 있다. 출력광속의 위상파면은 약 0.17  $\lambda$ 의 왜곡정도를 가져 매우 평면화된 위상파면을 갖는다고 판단되었고, 공간적 출력세기도 매우 균일하였다.<sup>[14-17]</sup> 배율이 2인 망원경 광학계와 구멍의 반지름이 2.5 mm인 Scaper 출력경에 의해 내경이 2.5 mm이고 외경이 5 mm인 원고리형 출

력광속을 얻었으며, 이는 무회절 광속을 얻는데 적합할 뿐만 아니라, Scaper 출력경을 통해 나온 레이저 출력광속이 바로 원고리형 출력광속의 형태를 갖기 때문에 원거리점에서 광속의 세기를 매우 크게 할 수 있는 장점이 있다. Scaper 출력경의 경계면에서 일어나는 산란 효과를 줄이기 위하여 Brewster 각으로 입사될 때 원고리형 광속으로 출력을 얻을 수 있도록 유전체 다층 박막으로 설계·제작된 Scaper 출력경을 사용하여 실험을 수행하였다.

### II. Bessel 광속의 이론

자유공간에서 전파하여 나가는 전기장의 한 성분만을 생각하면, 전기장이 만족하는 파동방정식은

$$[\nabla^2 - (\frac{1}{c})^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2}] E(\vec{r}, t) = 0 \quad (1)$$

이고, 이 방정식의 일반해는 평면파의 조합

$$E(\vec{r}, t) = \int \epsilon(\vec{k}) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t) d^3k \quad (2)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서  $\omega = ck$ 이고,  $c$ 는 진공에서 빛의 속도이다. 식 (2)는 여러 평면파의 조합으로 나타나므로, 전파하여 가면서 서로 다른 평면파 성분이 중첩되어 회절현상을 보인다. 식 (2)에서  $z$ 축을 따라 진행하는 광속을 묘사하기 위하여

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \vec{\alpha} \cdot \vec{\rho} + \beta z \quad (3)$$

로 쓰자. 여기서  $\vec{\alpha}$ 와  $\vec{\rho}$ 는 각각 2차원의 파동벡터와 위치벡터를 나타내고,  $\beta$ 는 파동벡터의  $z$ 성분을 나타낸다. 식 (1)에 의하여

$$\alpha^2 + \beta^2 = k^2 \quad (4)$$

이 만족 되어야 하고,

\*본 연구는 교육부의 기관연구 학술연구조성비 지원에 의한 BSRI-96-2429과제와 96년도 원자력 중·장기연구계획에 의하여 수행된 것임.

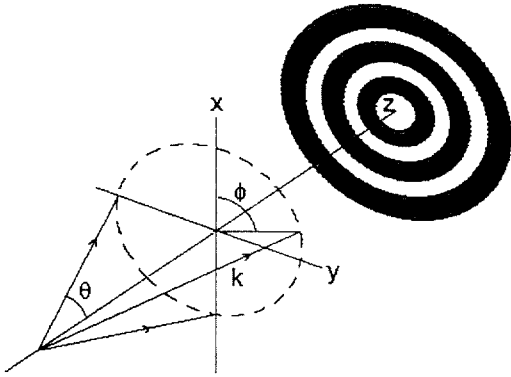


그림 1 광원면과 실상면의 기하학적 구조

$$|\vec{\alpha}|^2 = k^2 - \beta^2 \equiv \alpha_0 \quad (5)$$

로 주어져,  $\vec{\alpha}$ 는 그림 1에서와 같이 원뿔상에 존재하여야 한다. 따라서 식 (2)는

$$E(\vec{r}, t) = \exp(i\beta z - i\omega t) \int \varepsilon(\vec{\alpha}) \exp(i\vec{\alpha} \cdot \vec{\rho}) d^2\alpha \quad (6)$$

로 쓰여진다. 식 (5)에서

$$\vec{\alpha} \cdot \vec{\rho} = \alpha_0 \rho \cos(\Phi - \theta) \quad (7)$$

로 쓸 수 있고, 여기서  $\Phi$ 와  $\theta$ 는 각각  $\vec{\alpha}$ 와  $\vec{\rho}$ 의 방위각으로 그림 1에 표시한 바와 같다.  $\varepsilon(\vec{\alpha})$ 는  $\Phi$ 의 함수로 볼 수 있고,  $\theta$ 의 정의구역이  $0 < \Phi < 2\pi$ 임을 주지하여 다음의 Fourier 급수로 쓸 수 있다.

$$\varepsilon(\vec{\alpha}) = \delta(|\alpha| - \alpha_0) \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\alpha_0) \exp(in\Phi) \quad (8)$$

식 (8)에 나타나 있는 각 항에 대한 적분은 잘 알려진 적분 공식들에 의하여 수행할 수 있어<sup>[18]</sup>

$$\int \exp(in\Phi) \exp(i\vec{\alpha} \cdot \vec{\rho}) \delta(|\alpha| - \alpha_0) d^2\alpha = \exp(in\theta) J_n(\alpha_0 \rho) \quad (9)$$

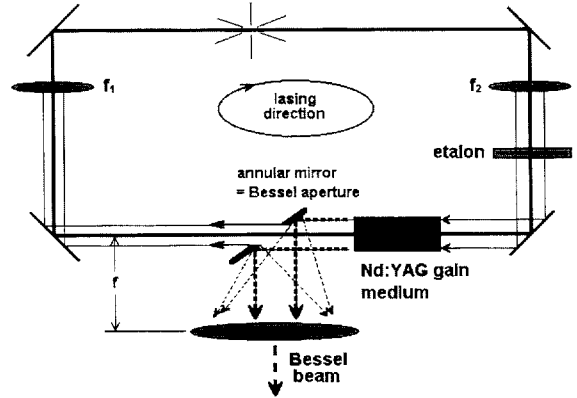
을 얻는다. 식 (7), (8), (9)를 식 (6)에 대입하여 일반적인 무회절 광속에 대한 표현

$$E(\vec{r}, t) = \exp(i\beta z - i\omega t) \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(in\theta) J_n(\alpha_0 \rho) \quad (10)$$

을 얻을 수 있고,  $A_n$ 은 상수이다. 식 (10)으로부터, 광속이 z축을 따라 전파하면서 횡단면의 세기 분포는 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 본 실험에서 구현하고자 하는 Bessel 광속은 식 (2.10)에서 n=0인 항만이 존재하는 경우로서, 이 경우에 대해서 횡단면의 마당 분포는  $J_0(\alpha_0 \rho)$ 로 주어진다.

### III. 실험 결과 및 논의

본 연구에서 사용한 NBUR Nd:YAG레이저는 그림 2와 같



Bessel beam Generation with Imaging NBUR

그림 2. NBUR Nd:YAG레이저 발진기의 개략도

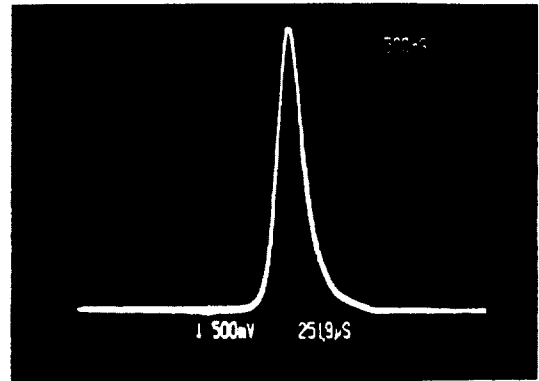


그림 3. NBUR Nd:YAG레이저의 Q-스위칭 펄스 형태

이 구성되어 있으며, 이 공진기는 4개의 평면경으로 고리형을 이루고 있고, 두 개의 수렴렌즈에 의한 Negative Branch형의 뉴턴형 망원경을 자체결상 조건에 만족되도록 설치하였다. 이 공진기의 특징은 끝단면 펌핑으로 출력이득을 향상시킬 수 있고, 공진기 내부에서 공간적인 세기분포를 제어할 수 있는 장점이 있다. 구성된 NBUR Nd:YAG레이저로부터 파장이 1.06 m, 반치폭이 200 ns, 그리고 첨두출력이 약 0.5 MW이며 공간적으로 균일한 원고리형 광속을 얻었다. [그림 3] 출력광속은 위상파면이 0.17의 왜곡정도를 갖는 매우 평면화된 광속이다.<sup>[13,14]</sup>

원고리형 레이저 광속을 얻기 위하여 Scraper출력경은 매우 중요한 역할을 한다. 사용한 Scraper출력경은 3.5 mm의 지름과 5 mm의 두께를 갖는 광학초차를 사용하였고, 정중앙에 단경 2.5 mm, 장경 4.47 mm의 타원형 투과 구멍을 두고 바깥부분을 1.06 m에 대해서 99.9%반사 다층 박막을 형성시켜 광속에 대하여 Brewster각으로 고정시켜 증폭된 레이저 광속으로부터 원고리형 출력광속을 얻었다. 이 제작 과정에서 중앙 구멍과 고반사 코팅이 된 경계에는 수 micron이하의 거칠기를 갖도록 정밀 가공하였다. 몇번의 시행착오를 거쳐 상당히 질이 좋은 Scraper출력경을 제작할 수 있었으며, 실험실에서 제작한 Scraper출력경을 사용하여 출력된 원고리형 광속의 횡단면은 그림 4와 같다. 본 실험을 수행하기 위하여

NBUR Nd:YAG 레이저와 99.9%반사율을 갖는 10 cm 직경의 평면 반사경 7개를 사용하여 수십 m 내에서 무회절성을 규명할 수 있도록 광속 전파 장치를 구성하였다.

이 원고리형 레이저 출력광속은 무회절 Bessel 광속의 발생을 위한 광원으로 사용하였다. 이 원고리형 광속의 먼거리 형태를 보기 위하여 사용한 Fresnel 변환 렌즈의 규격은 직경이 50 mm 이고 초점 거리가 5 m 이다. 그림 5는 Scrapper 출력경으로부터 렌즈를 통과하여 무회절 영역에 이르기까지 원고리형 광속의 광선을 추적한 그림이다. 원고리형 광속의 먼거리 형태를 보기 위하여 렌즈(f=5 m)를 레이저의 출력경으로부터 초점거리와 같은 5 m의 거리에 두고, 결상면의 거리를 렌즈로부터 점점 증가시키면서 광속의 형태를 측정하였다.

무회절 영역의 길이는 원고리형 광속의 직경과 두께에 의해 결정된다. 무회절 영역의 최대 거리는 다음과 같이 주어진다.<sup>11)</sup>

$$Z_{\max} = \frac{R_{\text{eff}}}{\tan(d/2f)} \quad (11)$$

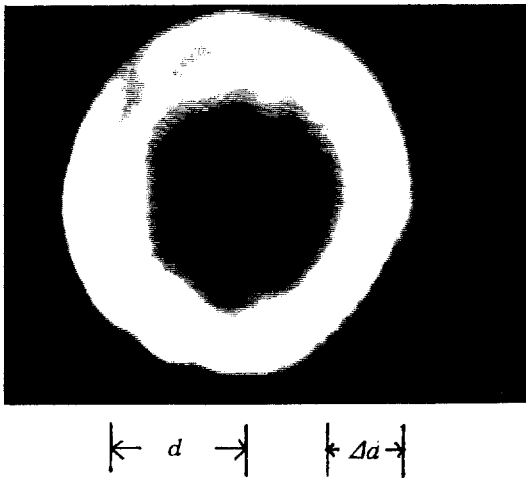


그림 4. 무회절 광속의 발생을 위한 실험 장치 배열

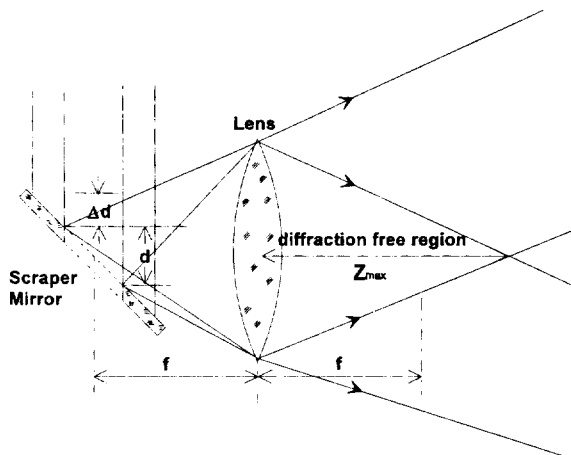


그림 5. Scrapper 출력경으로 부터의 원고리형 출력광속

$$R_{\text{eff}} = \frac{d}{2} + \frac{f\lambda}{\Delta d} \quad (12)$$

여기서  $R_{\text{eff}}$ 는 회절무늬의 유효반경이다. 본 실험에서의 조건인  $d=3.75 \text{ mm}$ ,  $\Delta d=1.25 \text{ mm}$ 을 식 (11)과 (12)에 대입하면, 기하광학적인 최대 거리  $Z_{\max}$ 는 16.3 m이다.

그림 5 (a)는 NBUR Nd:YAG 레이저의 출력경으로부터 약 5.3 m의 거리에서 광속의 형태를 보여준다. 사진을 촬영하기 위해서 약  $1 \mu\text{m}$  파장의 빛을 감지할 수 있는 KODAK사의 고감도 적외선용 필름(HSI 4143)을 사용하였으며, 레이저 출력

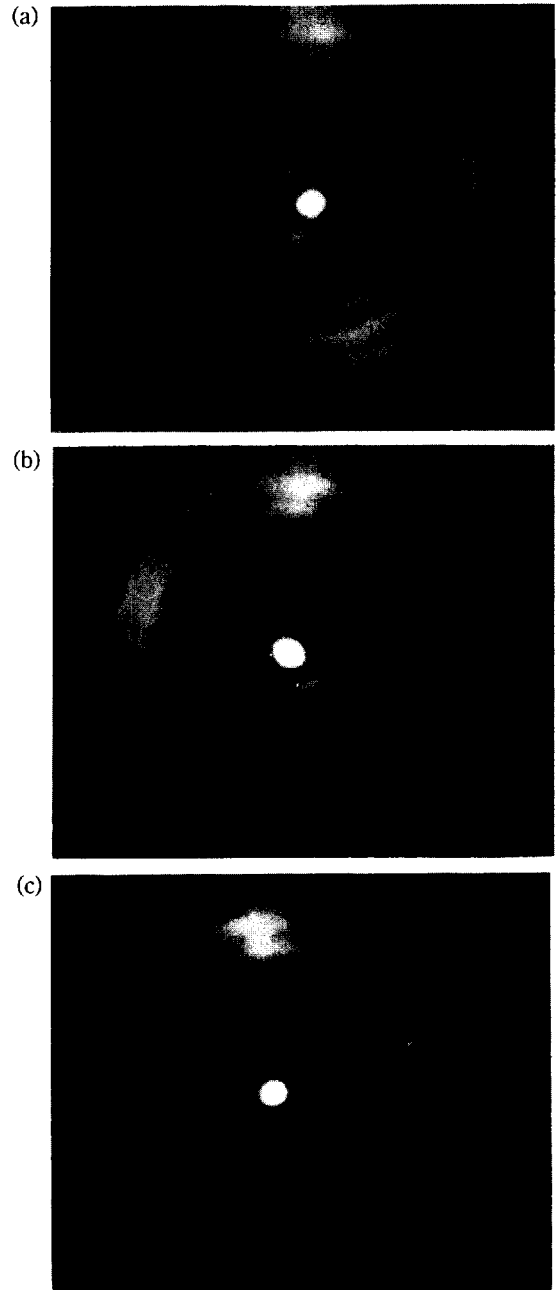


그림 6. (a) 5.3 m 거리에서 무회절 광속 형태  
(b) 9.5 m 거리에서 무회절 광속 형태  
(c) 12.25 m 거리에서 무회절 광속 형태

광속을 필름에 직접 감광시키는 방법을 사용하였다. 중심에 보이는 가장 밝은 원의 반경은 약 500  $\mu\text{m}$ 이다. 그림 6 (b)와 (c)는 각각 Scraper출력경에서 약 9.5 m와 12.25 m의 거리에서 촬영한 무회절 광속의 형태를 보여준다. 출력광속의 중심 원은 12.25 m까지 전파하면서 같은 크기를 갖고 있어 원고리형 출력광속으로부터 무회절성 광속을 얻었음을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

NBUR Nd:YAG레이저의 Scraper출력경을 통하여 나오는 원고리형 광속을 이용하여 만든 무회절 광속을 얻었다. 배율이 2인 망원경과 구멍의 반지름이 2.5 mm인 Scraper출력경을 사용하여 내경이 2.5 mm이고 외경이 5 mm인 원고리형 출력광속을 얻었고, 초점거리 5 m인 수렴렌즈를 사용하여 무회절 Bessel광속을 발진시켰으며, 약 13 m이상을 진행하는 동안 거의 회절이 없음을 확인하였다. 적외선 검출 카드로 관측한 결과에 의하면, 더 먼 거리에 대해서도 회절하지 않고 진행하는 것으로 나타났다.

앞으로 레이저 발진기의 개선과 함께 원고리형 광속의 출력세기의 개선이 이루어지면,  $\Delta d$ 를 더욱 작게 할 수 있어 100 m이상에서도 무회절성을 실험할 수 있고, 이론적으로 제안한 Bessel-Gauss광속 등과도 비교·해석이 가능해질 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] J. Durmin, J. Opt. Soc. Am. A, **4**, 651 (1987)  
 [2] J. Durmin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly, Phys. Rev.

Lett., **58**, 1499 (1987)  
 [3] F. Gori et al, Opt. Commun., **64**, 491 (1987)  
 [4] Kisik Kim, Dae-Yoon Park, Hyungju Kim, and Suengho Choi, JKPS, To be published.  
 [5] 박대윤, 김기식 외3인, 제4회 레이저 분광학 심포지움 논문집(KPS, OSK, KAERI), 4권1호, 335 (1996.11)  
 [6] L. Vicari, Opt. Commun., **70**, 263 (1989)  
 [7] G. Indebetouw, J. Opt. Soc. Am. A, **6**, 150 (1989)  
 [8] Y. Lin, W. Seka, J. H. Eberly et al, Appl. Opt., **31**, 2708 (1992)  
 [9] K. Uehara, OYOBUTURI, **59**, 746(60) (1990)  
 [10] P. L. Overfelt and C. S. Kenney, J. Opt. Soc. Am. A, **8**, 732 (1991)  
 [11] R. M. Hermaud and T. A. Wiggins, J. Opt. Soc. Am. A, **8**, 932 (1991)  
 [12] T. Hidaka, Jpn. J. of Appl. Phys., **30**, 1738 (1991)  
 [13] A. J. Cox and Dean C. Dibble, J. Opt. Soc. Am. A, **9**, 282 (1992)  
 [14] 최승호, 박대윤, 이승걸, 한국광학회지, **5**, 445 (1994)  
 [15] 박대윤, 최승호, 이승걸, 한국광학회지, **6**, 288 (1995)  
 [16] 최승호, 박대윤, 김기식, 이승걸, 제3회 레이저 분광학 심포지움 논문집(KPS, OSK, KAERI), 3권4호, 213 (1995. 11)  
 [17] S. H. Choi, D. Y. Park, Kisik Kim et al, Proc. of 17th ICO, SPIE **2778**, 614 (1996.8)  
 [18] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover (1972)  
 [19] A. E. Siegman, *LASERS*, Chapt. 22-23. (University Science Books, Mill Valley, 1986)

### Generation of diffraction free beam from Nd:YAG ring laser

Suengho Choi, Kisik Kim and Dae-Yoon Park  
 Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received : March 15, 1997)

We generated a diffraction free beam from Nd:YAG laser with an NBUR (negative branch unstable ring) resonator. The field inside the resonator had a plane wavefront and a homogeneous intensity distribution and the output beam through a scraper mirror of an annular type was used as a source. The output beam had an inner radius of 2.5 mm and an outer radius of 5 mm. In this experiment, we used a Fourier transformation lens with the focal length of 5 m to observe the far-field pattern. The lens was placed at a distance of the focal length from the scraper mirror and we found that the beam did not show any noticeable diffraction over the distance of 13 m from the lens.