

## 불안정 고리형 공진기를 이용한 Nd:YAG 레이저의 제작 및 발진 특성에 관한 연구\*

최승호 · 박대운

인하대학교 물리학과

(1993년 12월 23일 받음)

네 개의 평면 반사경과 두 개의 볼록 렌즈로 구성된 Newtonian 망원경 형의 negative branch confocal unstable ring (NBCUR) 공진기를 이용한 진행파형 Nd:YAG 레이저 발진기를 설계 제작하였다. 출력경으로 scraper mirror를 사용하여 원고리형 출력광을 얻었다. 이 레이저 발진기는 22개의 광학면을 가지고 있으며 이의 광학적 시준은 등경사 간섭법에 의해 간섭무늬를 관측함으로써 해결하였다. 일방향 진행파형 레이저 발진을 이룩하기 위하여 고리형 공진기 내에 자체 설계 제작된 영구 자석형 Faraday isolator를 삽입하였고, 이에 의한 발진 효과를 검토 하였다. 전기 입력에너지 70 J에서 레이저 출력에너지가 약 80 mJ이었으며, BDN 색소에 의한 수동형 Q 스위칭에 의하여 첨두 출력 0.5 MW를 얻었다.

### I. 서 론

1965년에 처음으로 Siegman 등<sup>[1]</sup>에 의해 불안정 조건을 갖는 공진기에 펄스형 루비 레이저를 적용하여 실험적으로 성공을 한 논문이 발표된 이후로, 불안정 조건을 갖는 공진기로 레이저 발진을 시키는 많은 연구<sup>[2-4]</sup>가 행하여졌다. 1969년에는 Krupke에 의해 불안정 공초점 공진기(unstable confocal resonator)를 이용한 CO<sub>2</sub> 레이저를 발진<sup>[5]</sup>시키는 것도 성공하였다. 3개 이상의 광학 거울을 사용한 고리형(ring type)으로 진행파형 공진기를 형성할 수 있으며, 진행파형 불안정 고리형 공진기는 레이저 붐을 end pumping에 의하여 이득을 크게 할 수 있고 더우기 negative branch형으로 선택하므로써 공간적 필터 효과도 가질 수 있는 큰 장점이 있다.<sup>[6,8]</sup>

본 연구에서는 negative branch형 불안정 고리형 공진기를 갖는 Nd:YAG 레이저의 발진을 위한 공진기 조건을 규명하였다. 이 공진기는 4개의 평면경과 Newtonian 망원경에 의해 고리형이 되도록 하였으며, 두개의 볼록 렌즈에 의해 self-imaging 조건을 만족하도록 하였고, 광축이 공진기를 수차례 일주(round-trip)하는 동안에 출력 광축의 위상파면과 세기가 공간적으로 균일(uniform)하여지도록 하였고, 공진기 내부에 scraper mir-

ror를 설치하여 내경이 2.5 mm이고 외경이 5 mm가 되는 원고리형(annular type) 출력 광축을 얻었다.

불안정 고리형 공진기에서 한쪽 방향(unidirectional)으로 발진(이후 일방향발진으로 표기함)을 갖게하기 위하여 축소형 Faraday rotator를  $\lambda/2$  위상판과 함께 공진기 내부에 삽입하였으며,  $\lambda/2$  위상판의 광축을 회전시킬 때 편광 효과에 의한 출력 광축의 세기를 검토하여 Faraday rotator의 최적 조건을 얻었다. 특히 불안정 고리형 공진기에서의 광경로 길이의 제한 때문에 Faraday rotator의 설계에서는 Verdet 상수가 큰 재료가 요구되며, 사용한 재료로는 Terbium Gallium Garnet를 이용하였는데, 이는 Faraday rotator의 재료로 상용되는 glass 계통에 비해 Verdet 상수가 두배 이상 큰 재료이다. 이로부터 25 mm 이하의 축소형 Faraday rotator를 설계 하였다.

22개 이상의 광학 면을 갖게되는 고리형 공진기 레이저 장치의 정밀한 광학적 시준은 등경사 간섭법을 이용하여 null fringe를 얻는 방법에 의해 해결하였다.

광 펄핑용 섬광관의 트리거 방식은 섬광관의 수명과 반복률을 높이기 위하여 simmer 트리거 방식을 채택하였고, 통상 발진을 위한 capacitance와 inductance는 damping parameter를 고려하여 각각 300  $\mu$ F과 40  $\mu$ H로 하였으며, Q 스위칭 동작은 가포화 흡수체인 BDN 색소를 사용하여 반복률 10 Hz까지의 Q 스위칭 발진 동작을 하였으며, 원고리형 출력 광축을 얻었다.

\* 본 연구는 교육부 기초과학 육성 연구비와 1992년도 인하대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행된 과제임.

II. 불안정 고리형 공진기의 제작 및 광학적 시준

본 실험에서 시도하고 있는 Newtonian 망원경 형의 공진기에서 유도된 ray matrix(ABCD matrix)로부터 self-imaging 조건<sup>[9,12]</sup>을 알아보았다. 이는 구성하려는 공진기의 결상 조건, 각 부품의 위치 설정 등의 조건을 알아내어 레이저 장치의 최적 구성을 위한 것이다. 그림 1에서 보는 것과 같이 aperture를 통과한 평행 광속은 초점이 다른 두개의 볼록 렌즈  $L_1$ 와  $L_2$ 로 구성되어진 negative branch 공초점 공진기에서 평행 광속이 일주하는 것을 ray matrix로 표현하면

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

여기서 횡배율  $M = -f_2/f_1$ 이다.

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

여기서  $a_0$ 는 aperture의 반경이다.

$$B = Ml_a + l_b + \frac{l_c}{M} \quad (3)$$

식 (3)에서 한개의 aperture와 두 개의 볼록 렌즈에 의해 구성된 negative branch 공초점 공진기에서 각각의 부품들의 위치에 따른 effective length  $B$ 를 알 수 있고, 그것으로 equivalent Fresnel number  $N_{eq}$ 를 계산할 수 있다. 식 (2)에서  $B$ 가 0일 때가  $N_{eq}$ 가 무한대가 되어 공진기에서의 광속은 self-imaging을 갖게 된다. 이 Newtonian 망원경형 공진기는 그림 2에서 보듯이 self-imaging 조건 하에서 공진기 내를 일주하는 광속의 세기가 2개의 볼록렌즈에 의해 광속의 직경이 횡배율  $M$ 만큼 증가하고 이 광속이 scraper mirror의 중앙 aperture를 통과하는 과정을 거치며 자체적으로 균일해 지도록 설계 되었다.

Self-imaging 조건을 갖는 불안정 고리형 공진기는 그것의 길이 보다는 짧은 초점거리를 갖는 두개의 볼록렌즈를 사용하고, 대상 레이저 봉의 단면 크기에 알맞는 평행 광속을 망원경 광학계의 배율에 의해 조절할수 있는 유통성이 큰 장점이 있다. 이러한 고리형 공진기에서는 scraper 출력경의 aperture를 물체점으로 한 self-imaging relay system으로 해석할 수 있다. 렌즈  $L_1, L_2$ 의 각각의 초점거리를  $f_1, f_2$ 라 하고, 렌즈계의 물체와 상 거리를 각각  $l_a, l_c$  그리고  $f_1 + f_2 = l_b$ 라 하면 이 광학계에 대한 ray matrix는 식 (1)에 의해 다시 아래와 같이 표

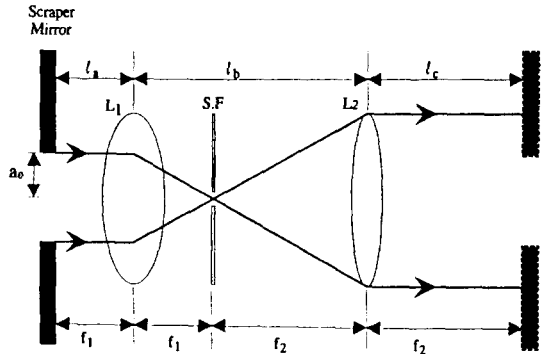


그림 1. Newtonian 망원경 형의 불안정 공진기 개략도.

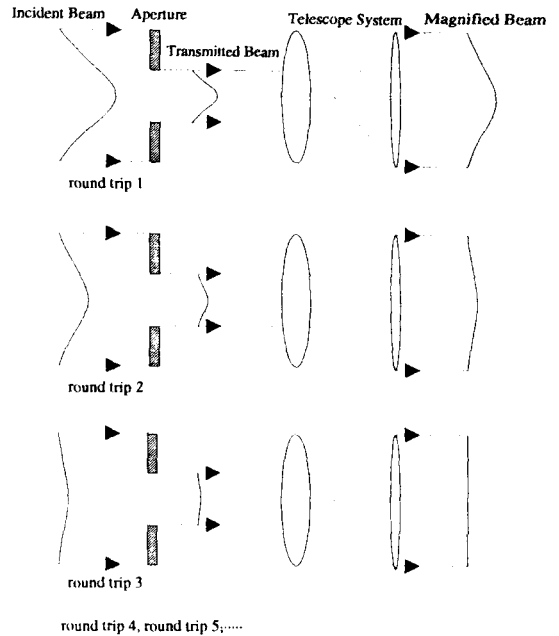


그림 2. 공진기를 일주하는 동안의 레이저 광속의 출력 세기의 분포.

현되어

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_2/f_1 & f_1 + f_2 - f_2 l_a/f_1 - f_1 l_c/f_2 \\ 0 & -f_1/f_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 된다. 일반적으로 공진기의 불안정 조건에 의한 half-trace parameter  $|m|$ 은

$$|m| = \frac{|A+D|}{2} > 1 \quad (5)$$

이고, 식 (5)와 같이 망원경형 공진기에서 불안정 조건을 갖게 되면 공진기를 일주하는 동안의 횡배율  $M$ 은

$$M \equiv \begin{cases} m + (m^2 - 1)^{1/2} & m > +1 \text{ (positive branch)} \\ m - (m^2 - 1)^{1/2} & m > -1 \text{ (negative branch)} \end{cases} \quad (6)$$

이다. 설계한 negative branch 불안정 고리형 공진기에서의 image relay의 횡 배율  $M$ 은 식(5)과 (6)에 의해 계산할 수 있다.

또한 이 공진기에서 self-imaging 조건을 만족하기 위하여서는 식 (2)의 ray matrix의 성분 중에  $B$ 가 0이어야만 한다. 따라서

$$f_1 + f_2 = \frac{f_2}{f_1} l_a + \frac{f_1}{f_2} l_c \quad (7)$$

이어야 하므로,  $l_a = f_1$ ,  $l_c = f_2$ 일 때 정확히 만족한다. 고리형 공진기의 총 길이는

$$l_{tot} = l_a + l_c + l_b \quad (8)$$

이며,

$$l_{tot} = 2(f_1 + f_2) \quad (9)$$

이 된다.

본 실험에서 평행광속 구역( $l_a + l_c$ )의 출력경 이전에 설치 하여야 할 부품은 레이저 붐, 출력경, 편광판,  $\lambda/2$  위상판, Faraday rotator, Q 스위치 등등이며, 사용할 레이저 붐의 직경은 6.3 mm 이므로 진행과 레이저 광속은 5 mm 직경의 광속을 갖는 것이 적합하다. 이상의 실험 장치 구성 조건과 4개의 mirror mount와 각 부품의 고정대까지를 고려하여 총 광경로  $l_{tot}$ 이 150 cm가 되도록 설계 제작 하였다.

4개의 평면 거울과 2개의 볼록 렌즈 그리고 레이저 붐 등의 광학 부품들은 총 22면을 갖고 있으며, 공진기의 전체 광 경로가 150 cm에 이르므로, 구성되어진 고리형 공진기에서 레이저 발진을 시키기 위하여 수행되어지는 광학적 시준 방법은 매우 중요하다. 본 연구에서는 그림 3에서와 같이 4개의 거울을 갖는 고리형 공진기는  $M_1$ 을 부분 반사경으로 사용한다면 간섭계와 동일하므로 원형 간섭 무늬를  $M_1$ 의 위치에서 관측할 수 있다. 시준용 광원으로는 He-Ne 레이저 543 nm(green) 파장의 가시 광과 1.064  $\mu\text{m}$ 의 CW LD-pumped Nd:YAG 레이저 (Amoco Laser Co.)의 근 적외선 광속을 동시에 사용하였다. 공진기 내에 있는 반사경을 미세 조정하여 간섭

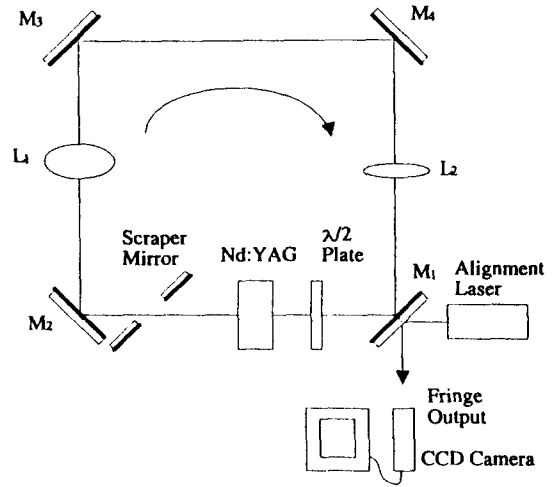


그림 3. 불안정 고리형 공진기의 광학적 시준 개략도.

무늬를 형성시키는 방법으로 정밀 시준에 이르도록 하였다. 이때 부분 반사경  $M_1$ 에서 반사된 광속과 투과되어 공진기를 일주한 후 다시 돌아온 광속이 정확하게 일치한다면 국소 무늬의 형성에서부터 원형 무늬로의 변화 과정을 볼 수 있다. 이때의 null fringe의 형성은 완전한 광학적 시준을 의미한다. 그림 4는 광학적 시준에 의해 관측된 대표적인 간섭 무늬를 소개 하였다. (a)~(d)의 순서로 광학적 시준이 되어지는 과정을 나타낸다. 이 때 광학적 시준을 위해 부분 반사경  $M_1$ 은 입사광의 파장이 1.064  $\mu\text{m}$ 일 때 입사각이 45°에서 60%의 반사율인 것을 사용하였다.

### III. 실험 장치 및 결과

본 연구를 위해 우리가 사용한 Nd:YAG 붐은 Synoptics 사의 것으로 직경이 6.3 mm이고 길이가 41.3 mm인 것으로 양면은 A. R. coating 되어 있고, 입사 광축에 대해 ( $S_1 = 2.0^\circ$ ,  $S_2 = 2.5^\circ$ ) 기울어져 있다. 섬광관은 I.L.C.의 제품으로 유효 방전 길이는 25.4 mm이고, 내경 4 mm이다. 냉각 장치는 온도 제어 범위가 5~35°C 이고, 안정도는  $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 의 온도를 유지시켜 주고 줄 수 있도록 설치 하였다. 레이저 cavity는 방향을 자유로이 회전시켜 조정할 수 있도록 holder에 고정시켜 3" Gimbal mount에 부착하였다.

Scraper 출력경은 1.064  $\mu\text{m}$ 에 대한 Brewster( $\theta_b$ )각으

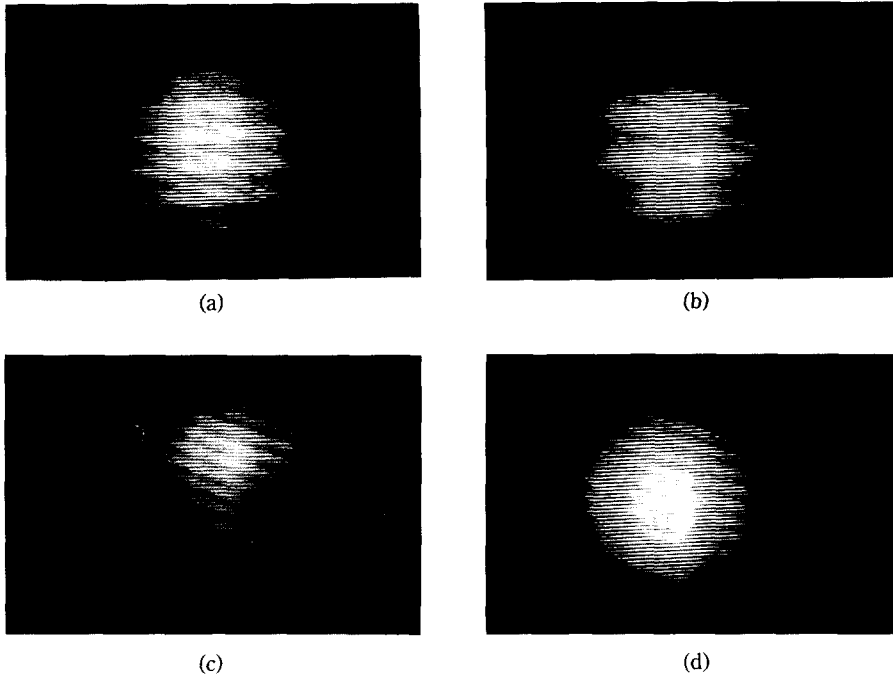


그림 4. 간섭법을 이용한 광학적 시준 방법에 의한 간섭무늬 형태.

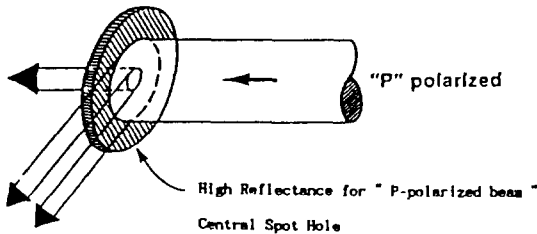


그림 5. 제작된 scraper mirror의 개략도.

로 고정되었고, 증폭된 레이저 출력 광속은 그림 5에서 보는 것과 같이 중앙의 aperture를 투과하여 공진기 내에서 진행하고, scraper mirror 앞면에서는 원고리형 출력으로 완전 반사된다. 사용한 scraper mirror는 단축의 길이가 2.5 mm이고 장축은 단축에  $1/\cos\theta_0$ 배 만큼 되는 타원을 형성하고 있다.

불안정 고리형 공진기를 이용한 Nd:YAG 레이저 발진을 하기 위하여 구성된 전원 장치에서의 pulse forming network으로는 capacitance가  $300 \mu\text{F}$ 이고 inductance는  $40 \mu\text{H}$ 로 구성하고, simmer trigger 방식을 채택하여 반복률을 높여도 섬광관에 전기적 충격을 감소시킬 수 있도록 하였다. Simmer trigger 장치는 약 10 kV의 고전압에 의해 섬광관을 trigger시키고 simmer current를

표 1. Comparison of TGG and Tb-doped Glass properties at 1064 nm.

property	material	TGG	Tb-glass
Verdet Constant, $V$ ( $\text{Rad T}^{-1}\text{m}^{-1}$ )		40	20
Absorption Coefficient, $\alpha(\text{cm}^{-1})$		0.0015	0.003
Thermal Conductivity, $\chi$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )		7.4	0.7
Refractive Index, $n$		1.95	-

0~250 mA 사이에서 변화할 수 있도록 하였다.

본 실험에서는 Faraday rotator를 공진기 내부에 삽입하여 일방향 진행할 수 있도록 하였는데, 특히 공진기의 총 광경로 길이를 고려하여 Faraday rotator의 길이  $L$ 을 25 mm 내외로 하기 위해서 고유 특성인 Verdet 상수나 그것에 인가되어지는 자기장  $B$ 를 상대적으로 크게하여야 하는 어려운 점이 있다. 우리는 이의 해결을 위하여 표 1에서 보는 것과 같이 유리 계통의 다른 재질에 비해 Verdet 상수가 크고 또한 다른 여러가지 조건들이 유리한 재질인 TGG (Terbium Gallium Garnet)

를 사용하였고, 또한 특수 제작된 영구 자석을 이용한 축소형 Faraday rotator를 설계 제작하였다.

Faraday rotator는  $p$  편광된 광속이 입사하였을 때에 광속의 진행 방향에는 무관하고, 인가되어진 자기장의 방향에 의해서 한쪽 방향으로만 회전 되어지게 되며, 회전 되어지는 각을 계산하는 식은 다음과 같다. 축을 따라 통과하는 광속의 편광 방향이 회전하는 각도  $\theta_R$ 은

$$\theta_R = V \cdot B \cdot L \quad (10)$$

$\theta_R$ : 회전 각 (Radian)

$V$ : Verdet 상수 (Rad T<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)

$B$ : 자기장의 세기 (Tesla)

$L$ : 봉의 길이 (m)

이다. Verdet 상수  $V(=40 \text{ Rad T}^{-1}\text{m}^{-1})$  그리고 rotator의 길이  $L(=25.4 \text{ mm})$ 을 알면 편광된 광속을 45° 회전시키는데 필요한 영구 자석의 자기장은 약 0.77 Tesla 정도이다.

Faraday isolator의 삽입에 의한 일방향 진행의 정성적 해석은 그림 6과 같다. 그림 좌측으로부터 입사되는 비편광 광속은 Brewster각의 초자판을 지나며  $p$  편광되고,  $\lambda/2$  위상판을 지나면서  $2\theta$ 의 각도로 회전하게 된다. 그리고 이  $p$  편광파는 Faraday rotator를 통과하는 동안 45° 만큼 회전하게 된다. 회전한  $p$  편광파가 다시 Brewster각의 초자판을 통과할 때, 이 편광파가 이상적이라면 투과 광속 세기  $I_F$ 는 Malus의 법칙에 의해

$$I_F = I_o \cos^2(2\theta - 45^\circ) \quad (11)$$

을 따르며, 여기서  $I_o$ 는 Brewster각의 초자판을 지나기 전의 광속 세기이다. 이때 반대 방향으로 진행하는 광속에 대해서는 반대 방향의 입사광 세기를  $I'_o$ 이라 하면

$$I_B = I'_o \cos^2(2\theta + 45^\circ) \quad (12)$$

이다.

여기서  $\lambda/2$  위상판의 광축이 진행 광속의 입사에 대하여 수직 방향으로 회전하는 각도에 따라서 투과되는 광속의 세기  $I_F$ 가 달라지며 그 결과는 그림 7와 같다. 점선은 이론값이고 실선은 실험치로서 비교하여 검토하였다. 이론값에서의  $\lambda/2$  위상판의 광축의 각도는  $p$  편광파에 대해 22.5°, 112.5°, 202.5° 그리고 292.5°에서 출력되는 광속의 세기가 최대치를 갖고 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 실험치에서도 일치한 값으로 측정되었다. 그러나 이론값에서 볼 때 67.5°, 157.5°, 247.5°, 337.5°에서 Brewster각의 초자판을 통과한 광속의 세기가 0이 되지만 실험값은 그러하지 못하였다. 그 이유는

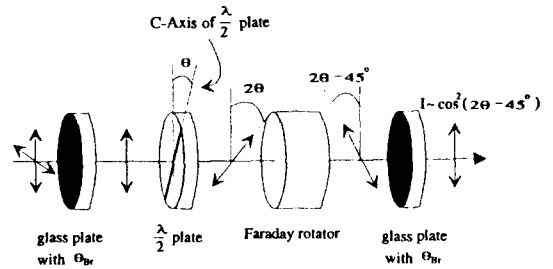


그림 6. Faraday isolator에서의  $\lambda/2$  위상판의 광축에 대한  $p$  편광파의 투과.

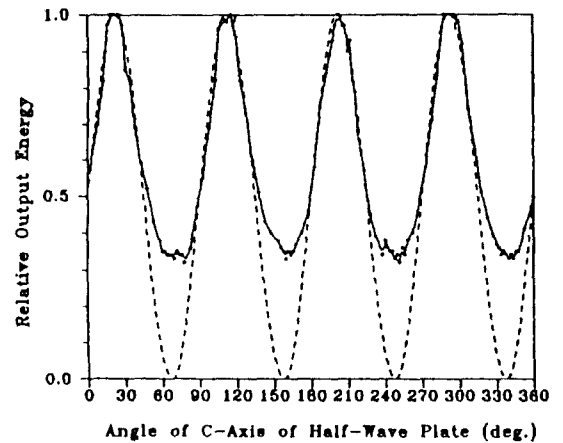


그림 7.  $\lambda/2$  위상판의 광축의 회전에 의한 규격화 출력 에너지의 비교.

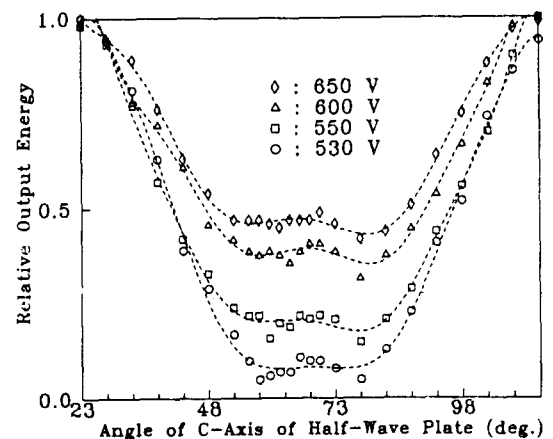


그림 8. 입력 전압에 따른 투과 출력 세기의 비교.

Brewster각의 초자판이 이상적인 편광판이 아니기 때문이다. 이러한 근거를 규명하기 위하여  $\lambda/2$  위상판의

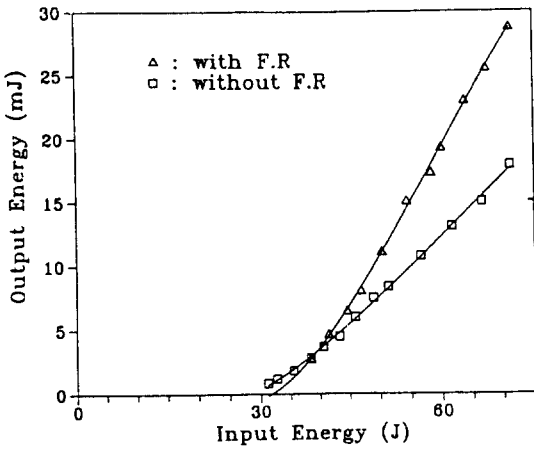


그림 9. Faraday isolator의 삽입전과 삽입후의 출력 에너지 비교.

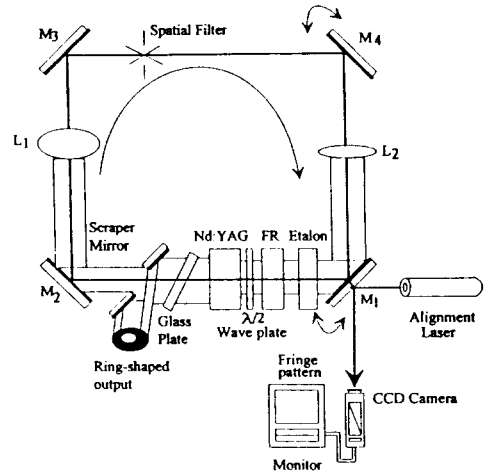


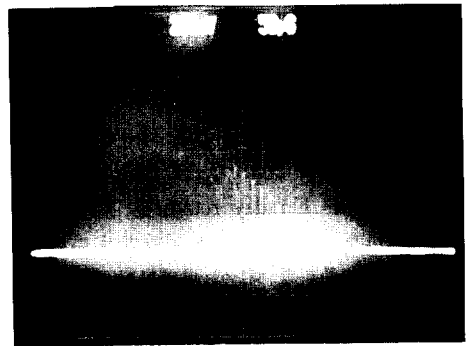
그림 10. 제작된 불안정 고리형 공진기 장치도.

광축이  $p$  편광파에 대하여  $22.5^\circ$ 에서  $112.5^\circ$  사이에서 입사 광속의 세기와 거의 비례하는 입력 전압을 각각 530, 550, 600, 650 V로 변화시키며 레이저 발진 실험을 하였다. 이 때 그림 8은 편광판을 투과하는 광속의 세기를 규격화하여 비교한 실험값으로 입력 전압이 작을 수록 최소값이 0으로 가까워지는 것을 알 수 있다. 이는 전기 입력 에너지가 적어지면 레이저 매질에서의 이득이 적어지고 따라서 광속의 세기가 레이저 발진을 위한 문턱 값까지 증폭되기 위해서는 더 여러번 Brewster 편광판을 통과해야 하므로 편광 효율이 좋아지는 효과를 갖게 된다. 결과적으로 이상적인 편광판이라면 그림에서의 실험 결과는 이론값과 일치할 것으로 판단된다.

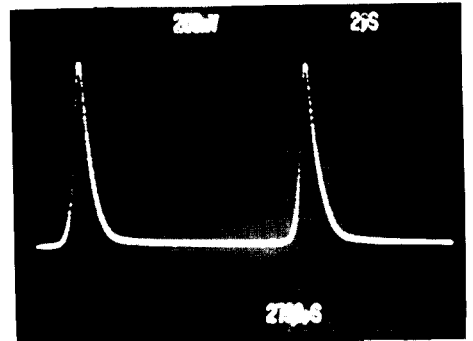
또한 그림 9는 Faraday isolator를 삽입하였을 때와 삽입하지 않고 레이저 발진을 시켰을 때의 출력 에너지를 비교하여 보았다. 삽입하여 일방향 발진을 할때가 문턱 입력 에너지는 조금 더 높지만 입력 에너지가 증가함에 따라 전반적으로 거의 두배 만큼의 출력이 증가함을 검증하였다.

그림 10에서는 공진기의 총 길이가 150 cm 그리고  $f_1 = 25$  cm,  $f_2 = 50$  cm의 두 개의 볼록 렌즈와 직경이 50 mm인 4개의 평면경을 갖고 있는 Newtonian 망원경형의 불안정 고리형 공진기를 이용한 진행파형 Nd:YAG 레이저 장치의 단면도를 소개하였다.

그림 11 (a)에서의 통상 발진에 의한 레이저 출력 파형은 적외선 영역에서 감도가 좋은 detector (EG & G, FND-100Q)를 이용하였고 storage oscilloscope(Tek 78 34)로서 출력 파형을 관측하였다. 이 통상 발진에서 얻은 relaxation oscillation 출력 광속의 세기는 시간에 따라



(a)



(b)

그림 11. 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저의 통상 출력 특성.

(a) 통상 출력에서의 relaxation oscillation (b) Relaxation oscillation에서의 spike pulse의 주기.

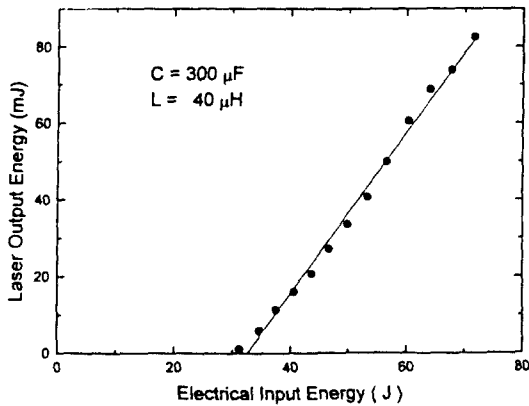


그림 12. 전기적 입력 에너지에 대한 레이저 출력 에너지.

지수적으로 감소하는 모양을 가지고 있으며, 그림 11(b)에서 보듯이 spike pulse의 반치폭은 약 1 μs 정도이고 주기는 약 11 μs 정도이다. 입력 에너지에 대한 출력 에너지는 그림 12에서 보는 것과 같고 전기적 입력 에너지에 대한 출력 에너지의 효율은 약 0.11%이다. 그리고 전기적 문턱 입력 에너지는 약 25 J 정도였다. 이때 출력 에너지의 측정은 energy meter(Rj-7610)로서 Pyroelectric probes(Rjp-735)를 사용하였다.

다음으로 가포화 흡수체인 BDN [bis-4-(dimethylamino-di-thiobenzil)-nickel] 색소를 이용한 Q-switching 발진실험<sup>[13]</sup>을 수행하여 그림 13(a)와 같은 출력 펄스를 얻었다. 이 출력 펄스의 상승 시간은 20 ns, 폭은 60 ns이고 첨두 출력은 약 0.5 MW를 얻었다. 그림 13(b)는 scraper mirror에서 나온 원고리형 출력의 burning pattern 보였다. 이 때의 단위 면적당의 출력의 세기는 3.40 MW/cm<sup>2</sup>이었다. 그리고 그림 14는 입력 전압 600 V에서 반복률을 10 Hz로 하였을 때의 Q-switching 발진 파형으로 비교적 안정적인 출력을 얻을 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 negative branch를 갖는 Newtonian 망원경 형의 공진기를 self-imaging 조건을 갖도록 하였으며, 이를 다시 4개의 평면경을 이용한 불안정 고리형 공진기를 가지고 레이저를 발진시키기 위한 구체적인 구성 조건을 찾고, 이것에 의하여 Nd:YAG 레이저 매개체를 이용한 출력 특성을 조사하였다. 이 고리형 공진기 내부에서의 광속은 진행파형이며, scraper mirror를 통하여 발진된 출력 광속은 위상 파면이 균일한 원고리형



(a)



(b)

그림 13. 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저의 Q-switching 출력 특성.

(a) Q-switching 발진 출력 펄스 파형 (b) scraper mirror에서의 원고리형 출력 광속 burning pattern.

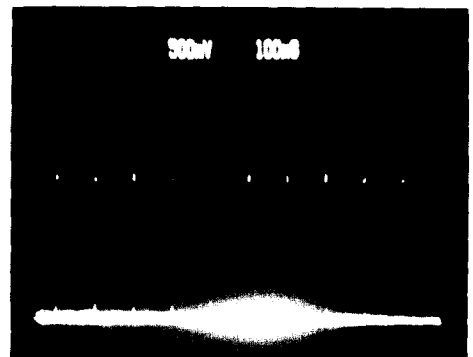


그림 14. 반복률 10 Hz일때의 Q-switching 출력 펄스.

레이저 출력을 얻을 수 있다. 출력의 향상을 위하여 공진기 내부에서 광속이 일방향 진행을 할 수 있도록 Faraday isolator를 삽입 하였으며, λ/2 위상판의 광축이 p

편광파에 대해 22.5°, 112.5°, 202.5° 그리고 292.5°에서 일방향 출력 광속 세기가 최대가 되었으며, 이는 이론치와 실험값이 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 Faraday isolator의 삽입 전과 삽입 후에 scraper 출력경을 통한 레이저 발진 출력 에너지를 비교하여 본 결과 삽입 하였을 때가 거의 두 배에 가까운 출력이 나오는 것을 확인하였다.

통상 발진에 의한 출력 펄스의 반치폭은 150  $\mu$ s 정도이고 relaxation oscillation 출력 광속의 세기가 시간에 대해 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 각각의 spike 펄스의 반치폭은 1  $\mu$ s이고 주기는 약 11  $\mu$ s 정도였다. 전기적 입력 에너지가 70 J일때 레이저 통상 출력 에너지는 약 80 mJ 정도이다. 본 연구에서 구성한 불안정 고리형 Nd:YAG 레이저의 전기적 입력 에너지에 대한 통상 출력에너지의 효율은 0.11%로서 공진기 내부에 구성한 광학 부품들에 의한 손실이 많은 반면 end pumping에 의한 이득이 비교적 크다는 것을 알 수 있었다. BDN 흡수체를 이용한 Q-switching 발진에서는 첨두 출력이 약 0.5 MW이고, 상승시간은 20 ns, 펄스폭은 약 60 ns이다. 그리고 반복률이 10 Hz에서 안정적인 출력을 얻을 수 있었다.

앞으로 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 불안정 고리형 공진기를 이용한 Nd:YAG 레이저의 출력 광속을 진폭 분할(amplitude dividing)한 두 광속의 간섭무늬를 분석하여 위상파면 특성을 조사하고, 원고리형 출력광에 의한 무회절(non-diffracted) Bessel 광속 특성에 관한 실험과 이의 응용을 위하여 KTP와 KDP 결정에 의한 제 2 고조파 발진을 병행하여 수행하고 있다.

### 참 고 문 헌

[1] A. E. Siegman, "Unstable Optical Resonators for Laser Applications" Proc. of The IEEE, 277(19

65).  
 [2] A. E. Siegman, "Stabilizing output with unstable resonators", Laser Focus, 42-47(1971).  
 [3] A. E. Siegman, "Unstable Optical Resonators", Appl. Opt., 13, 353(1974).  
 [4] A. E. Siegman and D.J. Kuizenga "Review; Active mode-coupling phenomena in pulsed and continuous lasers", Opto-electronic. 6, 43(1974).  
 [5] W. F. Krupke and W. R. Sooy, "Properties of an Unstable Confocal Resonator CO<sub>2</sub> Laser system", IEEE J. of Quantum Electron., 575(1969).  
 [6] R. J. Freiberg, P. P. Chenausky and C. J. Buczek, "Unidirectional Unstable Ring Lasers", Appl. Opt., 12, 6(1973)  
 [7] P. D. Pozzo, R. Polloni, O. Svelto and F. Zaraga, "An Unstable Ring Resonator", IEEE J. of Quantum Electron., QE-9, 11(1973).  
 [8] 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).  
 [9] P. R. Cunningham and S. S. Townsend, "Mode properties and characteristics of negative-branch unstable ring resonator", Opt. Eng., 30, 1553(1991).  
 [10] A. E. Siegman, Lasers, Chap. 21-23. (University Science Books, Mill Valley, 1986).  
 [11] A. H. Paxton and T. C. Salvi, "Unstable Optical Resonator with Self Imaging Aperture", Opt. Commun., 26, 305(1978).  
 [12] D. Y. Park, et al, "Operational Characteristics of an Imaging, Unstable Ring Resonator using Nd:YLF as an active Medium" (Proc. of '89 LASER, 1990).  
 [13] K. H. Drexhage and U. T. Muller-Westerhoff, "New Q-switch Compounds for IR", IEEE J. of Quantum. Electron., QE-8, 9(1972).



**A Study on the Construction and the Output Characteristics of Nd:YAG Laser Using Unstable Ring Resonator**

Sueng Ho Choi, Dae Yoon Park

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

(Received: December 23, 1993)

We constructed travelling type Nd:YAG laser with a negative branch confocal unstable ring (NBCUR) resonator like a Newtonian telescope type using four flat mirror and two positive lenses. Annular output beam was obtained by using scraper mirror. This laser oscillator has 22 optical faces and optical alignment was done by equal inclination interference method. We inserted a Faraday rotator of permanent magnet type designed in the laboratory for unidirectional operation. We obtained laser output energy of 80 mJ with electrical input energy of 70 J. and we obtained that peak power of 0.5 MW through Q-switching with BDN dye.