

GRM(Gaussian Reflectivity Mirror)을 이용한 불안정 공진기형 Q-스위치 Nd:YAG 레이저의 출력특성

이희철*† · 김용평

경희대학교 전자·정보학부 / 레이저공학연구소
Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

*(주) 맥스 엔지니어링

Ⓣ 411-722 경기도 고양시 일산구 백석동 일산 테크노 타운 421호

(2005년 1월 10일 받음, 2005년 2월 21일 수정본 받음)

출력거울로 GRM(Gaussian reflectivity mirror)을 채택한 불안정 공진기를 구성하여 그 Q-스위치 출력의 특성을 분석하였다. 입력 전기에너지가 55J 일 때 1064 nm의 기본파장에서 470 mJ, 532 nm의 제2고조파 파장에서 280 mJ의 출력 에너지를 얻었다. 출력 빔의 발산각은 1.7 mrad 이었으며 근접장 영역에서 Top-Hat 형태의 빔을 얻을 수 있었다.

주제어 : Unstable resonator, Nd:YAG laser, GRM, Q-switching.

I. 서 론

1965년 Siegman에 의해 양자전자 분야에 새로운 영역을 창조한 주목할 만한 한편의 논문이 발표 되었다.^[1] 이 논문은 불안정 공진기의 실용적인 응용에 대해 논하고 있었으며, 이후 불안정 공진기가 갖는 특성은 많은 관심을 모아 활발한 연구가 진행되어 왔다.^[2] 불안정 공진기는 안정 공진기에 비해 큰 기본모드를 갖고 있으며 발산각이 작은 고풍출력의 출력 빔을 만들 수 있는 장점을 갖고 있다.^[3]

초기에는 주로 높은 이득을 갖는 CO₂ 레이저에서의 연구가 진행되어 왔으나 계속된 연구의 결과 Nd:YAG를 이용하는 고체 레이저에서도 열렌즈 효과 보상을 통하여 성공적인 결과를 얻을 수 있었다. 불안정 공진기에서 출력된 빔은 단일위상의 높은 출력을 얻는데 유리하여 비선형 광학결정을 이용한 조화파 발생에 보다 효과적이라는 것이 밝혀져 불안정 공진기를 갖는 Nd:YAG 레이저의 제작은 그 중요성이 증대되어 왔다.^[3] 연구의 초기에는 출력거울의 특성상 큰 기본모드를 갖고 있음에도 불구하고 출력거울의 Hard-edge로 인한 회절의 발생으로 빔을 집중할 때 상당한 양의 빔이 바깥쪽으로 분포하게 되어 측대파(side lobe)를 형성하는 단점이 있었다. 또한 낮은 확대율(magnification)을 갖는 구조에서는 출력거울 주변으로 약하고 얇은 동심원(cotour)을 발생시키는 단점을 갖고 있었다.^[4] 따라서 이러한 Hard-edge로 인한 회절의 발생을 피하고자 VRM(variable reflectivity mirror)를

사용하여 빔의 질을 향상시키기 위한 노력이 진행되어 왔다.^[5-7] 그 결과 횡 모드 분리(mode discrimination)의^[3] 향상과 근접장에서 Top-Hat 형태의 빔의 강도분포 구현이 가능하게 되어 레이저 증폭이나 비선형 실험에서 더욱더 유용하게 되었다.

본 연구에서는 Q-스위치 Nd:YAG 레이저에 출력거울로 VRM의 일종인 GRM(Gaussian reflectivity mirror)을 채용하여 불안정 공진기를 구성하고 그 출력특성을 분석하였다. 또한 GRM을 사용한 Q-switching Nd:YAG 레이저와 기존의 안정 공진기형 Q-switching Nd:YAG 레이저의 제2고조파를 피부에 조사하여 각각의 공진기 종류에 따른 임상 양상을 살펴 보았다.

II. GRM을 사용한 불안정 공진기

불안정 공진기는 그림 1에 나타난 바와 같이 잘 알려진 공진기 안정성 도표에서 양(positive)과 부(negative) 영역에서의 발진이 가능하다. 일반적으로 부 영역에서의 구성이 광축의 틀어짐에 따른 모드 유지능력이 양 영역의 구성 보다 우수하지만,^[8] 공진기 내부에 초점이 형성되어 광학소자의 배치에 제한이 오게 되고 Q-switching의 경우에는 공기의 유전 파괴(air-breakdown)가 발생해 소음과 에너지 손실을 유발하게 된다. 불안정 공진기에 많이 이용하는 구성방법에는 positive-branch, half-symmetric, rod-image와 near-concentric 등 같이 몇 가지 종류가 있다.^[4] 또한 positive-branch 공초점(confocal) 공진기의 경우에는 출력 빔의 발산각이 작고 빔의 질이 좋은

† E-mail: hclee@maxltd.com

장점이 있다. 하지만 레이저 봉(rod)의 열렌즈 현상에 빔의 확대율이 많은 영향을 받으므로 설계할 때 적절한 보상이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 positive branch의 공초점 공진기를 Q-스위치 Nd:YAG 레이저에 적용하여 그 동작특성을 분석하였다.

GRM의 반사분포는 (식) 1에 의해 주어진다.^[4]

$$R(r) = R_0 e^{-2\left(\frac{r}{w_m}\right)^n} \quad (1)$$

여기서 R_0 는 거울 중심에서의 반사율 이고, w_m 은 코팅 반경으로 일반적으로 최대 반사율의 $1/e$ 혹은 $1/e^2$ 이 되는 점으로 정한다. n 은 Gaussian 차수이다. 차수에 따른 반사율 분포는 그림 2에 나타내었다. Gaussian 차수에 따라 빔의 분포뿐만 아니라 출력이 달라지므로 적절한 선택이 필요하다. 특히 고차의 차수에서는 출력이 증가하나 hard-edge 불안정 공진기의 빔과 유사한 형태를 갖게 된다.^[4]

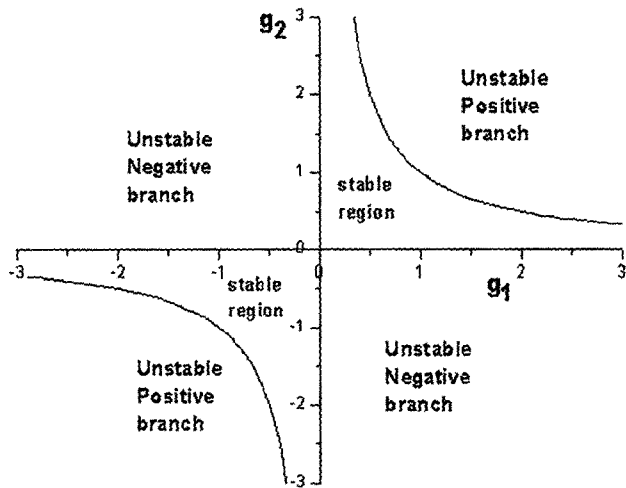


그림 1. 광 공진기의 안정성 도표(g-diagram).

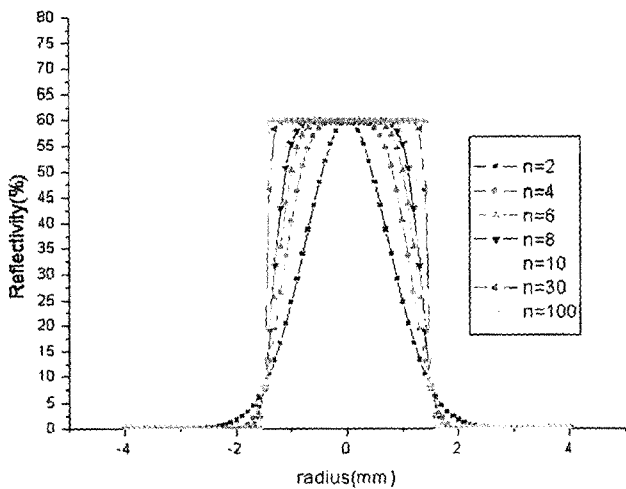


그림 2. Gaussian 차수에 따른 GRM 반사율 분포도.

불안정 공진기는 그림 3과 같이 빔이 출력 거울과 전반사 거울의 곡률의 조합에 의해 공진기안을 왕복 하면서 확대되는 구조로 되어 있다. M_2a 는 전반사 경에서의 빔의 반경이며 M_1a 는 출력 거울에서의 빔의 반경이다. a 는 반사율을 갖는 영역의 반경이며 r 과 L 은 각각 활성매질의 반경과 공진기 길이를 의미 한다. 최초로 반경 a 를 갖는 빔이 출력 거울에 의해 반사 되어 공진기 안을 전파 하면서 출력 거울의 초점 거리만큼 빔이 커지게 된다. 전반사 거울에 도달한 빔은 다시 전반사 되면서 전반사 거울의 초점거리에 해당 하는 만큼 빔의 크기가 변하게 된다. 따라서 적절한 출력을 내기 위하여 선택한 중심 반사율과 빔이 확대되는 확대율(M)과는 서로 관련되며 M 에 따라서 유효 반사율이 변하게 된다. 반사율이 높을 경우 빔 중심의 강도가 약해서 빔의 분포가 가장 자리가 세고 중심이 약한 형태를 갖게 된다. 따라서 확대율과 중심 반사율 Gaussian 차수는 출력과도 관계가 있지만 빔의 분포를 결정하는 중요한 역할을 하게 된다. 불안정 공진기는 식 (2)^[4]로 표현되는 equivalent Fresnel number N_{eq} 의 값에 따라 손실의 분포가 달라진다.

$$N_{eq} = \frac{(M^2 - 1)w_m^2}{(2L_{eq}\lambda)}$$

$$M = G + \sqrt{G^2 - 1}$$

$$G = 2g_1g_2 - 1 \quad (2)$$

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i} \quad (i=1,2 \quad L = \text{cavity length})$$

$$L_{eq} = 2M g_2 L$$

N_{eq} 의 값이 반정수의 값일 때 손실이 제일 적다.^[9] 따라서 확대율을 정할 때는 공진기의 길이와의 조합을 생각해야 한다. 또한 회절이 발생할 때 빔 파면의 강도변조 및 전파에 따른 hot spot의 발생이 우려되므로 공진기 내 광학 소자의 구경을 고려하여 빔의 확대율을 선정해야 한다. 일반적으로 회절을 피하기 위해서는 공진기 내 빔의 크기가 유효 구경의 70~80% 정도의 크기가 되도록 설계하여야 한다.^[9]

정리하면 요구되는 되먹임과 이득 매질 내에 균일하게 빔이 분포되도록 설계하기 위해서는 M , R_0 , w_m , n 의 네 가

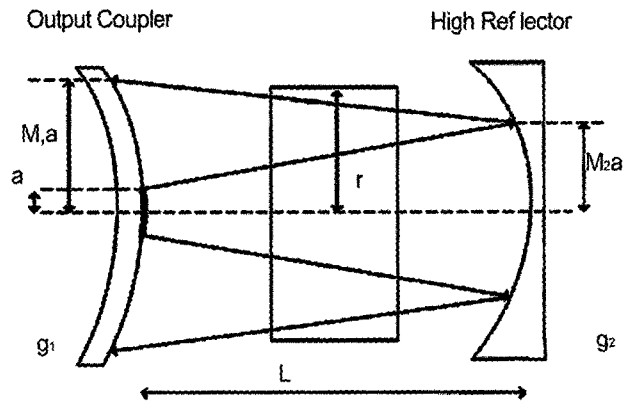


그림 3. 불안정 공진기에서의 빔의 궤적.

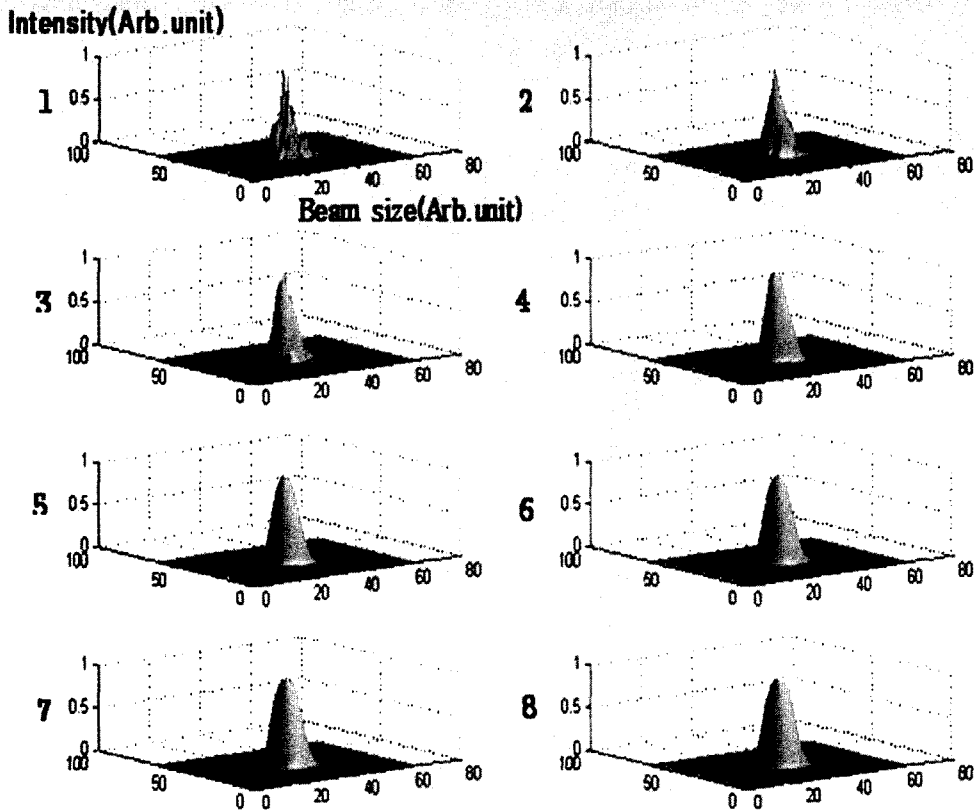


그림 4. GRM을 사용한 불안정 공진기에서의 Q-스위칭 펄스형성 과정의 전산시뮬.

지 요소가 조화를 이루어야 하며, 이때 모드 분리(mode discrimination)와 열렌즈 효과 같은 섭동에 대한 안정성이 증가한다.^[4] 예를 들어 M 이 클 경우 공진기는 섭동에 대한 안정성이 좋아지게 된다. 하지만 과도한 M 의 선택으로 인하여 w_m 은 작아지게 되는데, w_m 은 제작사가 제시 가능한 최소 크기가 존재하며, 충분한 에너지 추출을 위해서 M 은 제한된 조건 내에서 최대한 크게 설계해야 한다. 하지만 특정 이상의 M 값부터는 출력의 증가는 보이지 않고 회절을 더욱더 야기 시켜 빔의 질을 떨어뜨리게 된다. 낮은 이득을 갖는 레이저에서는 M 을 작게 해야 한다. 이득이 작으므로 큰 M 은 공진기 내의 빔 강도를 저하시켜 충분한 에너지 추출을 이끌어 내지 못하게 된다. 이를 해결하기 위하여 R_0 을 높이는 경우에는 많아진 유전층으로 인하여 손상값이 낮아지게 되며 Q-스위치로 동작하는 경우 거울의 손상을 초래할 수 있다. 하지만 대부분의 고체 레이저들은 이득이 높은 편으로 낮은 중심 반사율과 1.2 정도의 M 값을 갖게 해도 좋은 결과를 얻을 수가 있다.^[4] 하지만 이런 낮은 M 값은 섭동에 대해 큰 영향을 받게 되어 문제가 된다. Q-스위치로 동작하는 경우에는 충분한 펄스 형성시간이 주어지지 않게 되면 빔의 파면을 형성하는데 시간이 부족하게 되어 빔의 질이 떨어지게

된다.^[4] GRM을 사용하는 불안정 공진기의 내부와 근접장에서의 출력은 각각 식(3)^[4]과 (4)^[4]로 표현 되어 진다.

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_i}\right)^n\right) \quad (3)$$

$$I_{out}(r) = [1 - R(r)]I_i(r) = I_0\left(1 - R_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_m}\right)^n\right)\right)\exp\left(-2\left(\frac{r}{w_i}\right)^n\right) \quad (4)$$

그림 4는 왕복 횟수에 따른 출력 거울 앞에서의 강도 분포를 Matlab을 사용하여(okotech 사의 matlab용 lightpipe 사용)

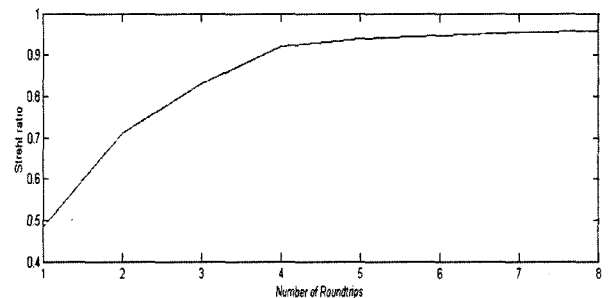


그림 5. 공진기 왕복횟수에 따른 Strehl 비율.

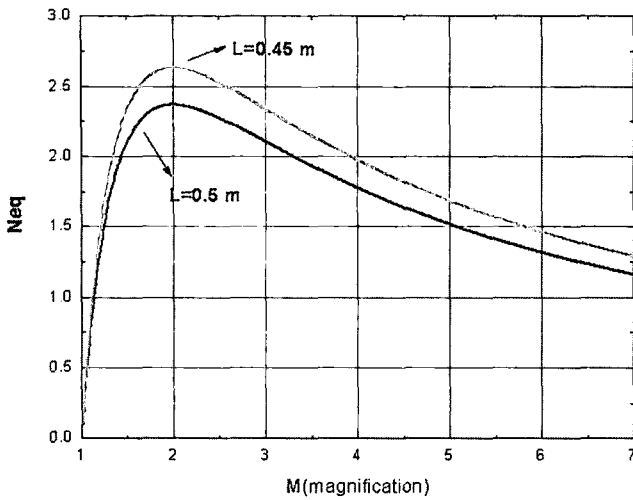


그림 6. 공진기 길이가 0.45 m 및 0.5 m일 때의 최적 M값.

모의 전산시뮬을 한 결과 이다. 펄스폭이 짧아 공진기를 한번 왕복하는 경우 모의 전산시뮬에서 보인 것처럼 빔의 파면이 저하 된다. 그림 5 역시 Matlab을 이용하여 공진기의 왕복 횟수에 따른 Strehl ratio 값을 나타 낸 것이다. Strehl ratio 값이 0.8 이상 일 때 광학계는 회절한계의 성능을 가질 수 있다.^[10] 따라서 이상적인 최적의 빔 질을 갖도록 하기 위해서는 공진기의 왕복 횟수가 4회 이상이 되는 펄스폭을 갖도록 설계를 해야 한다. 그렇지 않을 경우에는 빔의 파면이 저하되게 된다.

그림 6에 공진기 길이에 따른 가능한 M값의 예를 나타내었다. 최소의 손실을 위하여 N_{eq} 을 반정수 값을 택하는 경우 공진기 길이에 따라 가능한 M값이 정해지게 된다. 이때 위에서 설명한 바와 같이 에너지 추출과 섭동 및 빔 질을 고려하여 적절한 M을 선택해야 한다.

III. 실험 및 결과

그림 7은 본 연구에서 설계한 공진기의 구조를 보여 준다. Nd:YAG 봉(Saint-Gobain사)의 크기는 6.35 mm x 85 mm 이며 펌핑 영역의 길이는 70 mm이다. 출력 거울로 사용된 GRM의 차수 $n=4$ 이며, 공진기의 길이 $L=40$ cm, $d_1=8$ cm, $d_2=27$ cm이다. 다소의 회절이 발생하고, N_{eq} 의 값이 반정

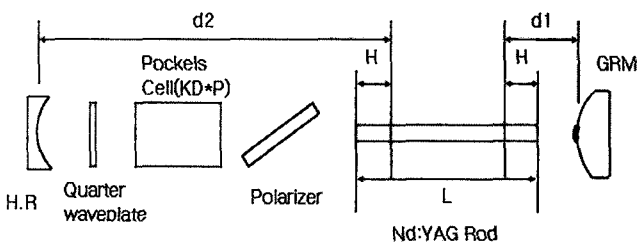


그림 7. GRM을 사용한 Q-스위치 Nd:YAG 레이저 불안정 공진기의 실험 장치도.

수 값이 되지 않으나 모드의 부피를 크게 하여 출력을 증가시키기 위해 빔의 확대율이 $M = 1.8$ 을 갖도록 설계 하였다. 펌핑 챔버(pumping chamber)의 반사면은 난반사 체인 세라믹 소재를 사용하여 균일한 펌핑이 이루어 질 수 있도록 하였으며 flashlamp(Xe, Perkinelmer 사)에 Ce^{3+} 이온이 첨가된 제품을 사용하여 자외선을 차단, 레이저 봉에 불필요한 열이 발생하지 않도록 하였다. Pockels cell(KD*P 결정, Cleveland crystal사)에 인가되는 전압은 3.4 kV로 구동드라이버는 자체 제작하였으며 펄스 상승시간(rise time)은 20 ns 이다.

일반적으로 고체 레이저 매질에서 열이 발생하는 주된 요인은 펌핑광의 강한 자외선 발생, 레이저 매질의 광흡수, 레이저 발진 에너지 준위의 차이로 인한 양자결함, 레이저 천이 준위간의 양자효율, 상방전환(up-conversion) 현상, 도핑은 되어있지만 발진에 가담하지 않는 영역의 존재 등을 들 수 있다. 일반적으로 Nd:YAG 봉의 경우 기본적으로 펌핑 광원의 10-15%가 열로 전환 되어지며 주 흡수 밴드영역의 파장인 808 nm가 흡수되어 1064 nm가 발진하는 경우 약 25% 정도가 열로 전환되어 발생되게 된다.^[11]

Nd:YAG 봉 내에는 포물선 형태의 온도분포 때문에 구면 렌즈가 형성된다.^[12] 따라서 Nd:YAG 봉은 주평면의 길이가 $H=l/2n$ (l = Nd:YAG 봉의 길이, n = Nd:YAG 봉의 굴절율)인 굴절능 D 인 두꺼운 렌즈와 같다.^[7] 일반적으로 지름이 6.35 mm인 경우 $f=1.41 m/kW$ ^[3] 정도의 열렌즈 효과를 보인다. 열렌즈로 인한 초점거리의 측정방법에는 He-Ne 레이저 빔을 확대하여 봉에 투과시켜 빔의 크기 변화를 관찰하는 방법^[13], 봉에 투과된 He-Ne에 의해서 나타나는 간섭무늬가 봉의 열렌즈 효과에 의해 이동하는 양을 측정하는 방법^[14], 공진기가 펌핑 빔의 강도에 따라 안정영역에서 불안정 영역으로 변하는 양상을 측정하는 방법^[15] 등 많은 방법들이 소개되어 있으므로 적절한 방법을 선택하여 열렌즈를 보상한 공진기를 설계해야 한다. 열렌즈를 보상하지 않는 경우 고출력 혹은 고 반복용 레이저에서는 상당한 양의 공진기 안정성의 변화와 사용된 광학부품의 파괴를 초래하게 된다. 따라서 측정된 봉의 열렌즈 초점거리를 바탕으로 봉의 공진기내 위치 분포에 따른 출력거울과 전반사 거울의 곡률을 수정하여 주어야 한다. 예를 들어 열렌즈 효과가 전혀 없을 때의 확대율이 1.4 라면 봉이 0.055 diopter 정도만을 갖게 되어도 확대율을 1로 떨어뜨리게 되는 결과를 초래한다. 공진기의 확대율 이외에도 열로 인한 스트레스로 인하여 빔의 질과 모드의 변화를 초래하므로 상황에 따라 적절한 광학부품을 추가하여 보상을 해야 하는 경우도 있다.

Nd:YAG 봉이 펌핑 강도에 따라 $f=1.41 m/kW$ 의 열렌즈 효과를 갖는 경우 0.5 kW의 전기 에너지를 공급(펄스당 에너지 50 J, 반복율 10 Hz)하면 2.82 m의 초점 거리를 갖는다. He-Ne 레이저를 확대하여 평행광을 만든 후 발진 하지 않는 Nd:YAG Rod에 투과 한 다음 CCD 카메라(Spricon사, LBA-100)로 최소 빔 반경을 찾아 초점거리를 측정 해본 결과 약 2.7 m로 측정 되었다. 레이저가 발진 할때에는 발진 하지 않

는 경우에 비하여 열렌즈 효과가 약 10% 감소 할 것으로 추정, 열렌즈 효과는 3 m로 정한 후 실제 얻고자 하는 빔 확대율 1.8을 얻을 수 있는지 확인 하였다. Nd:YAG 붕의 굴절능이 D일때 다음의 식^[16]을 이용하여 거울의 곡률을 보상 해주어야 한다.

$$g_i^* = g_i - D_i d_i (1 - \frac{d_i}{\rho_i}) \quad (5)$$

$$L^* = d_1 + d_2 - D d_1 d_2 \quad (6)$$

($g_i = 1 - \frac{l}{\rho_i}$, (L = 공진기의 길이, ρ_i = 거울의 곡률 반경))

$$M^* = G^* \pm \sqrt{G^{*2} - 1} \quad (7)$$

$$N_{eq}^* = \frac{w_m^2}{2L^* g_2^* \lambda} \times \sqrt{G^{*2} - 1} \quad (8)$$

특히 식 (5)의 d_2 에서는 삽입된 Pockels cell(KD^*P)로 인

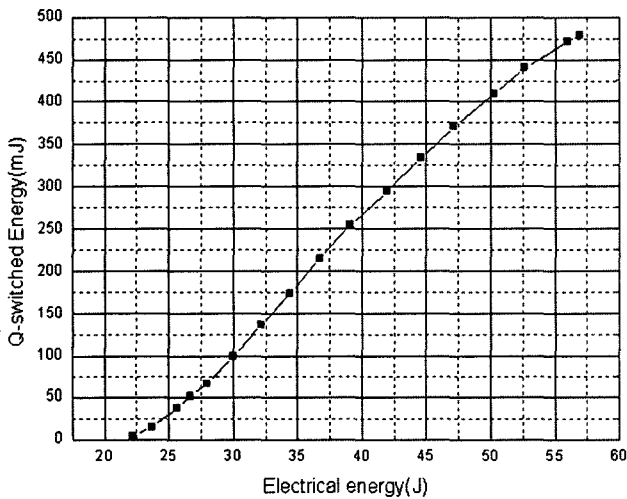


그림 8. 펌핑 에너지에 따른 Q-스위치 Nd:YAG 레이저의 출력에너지.

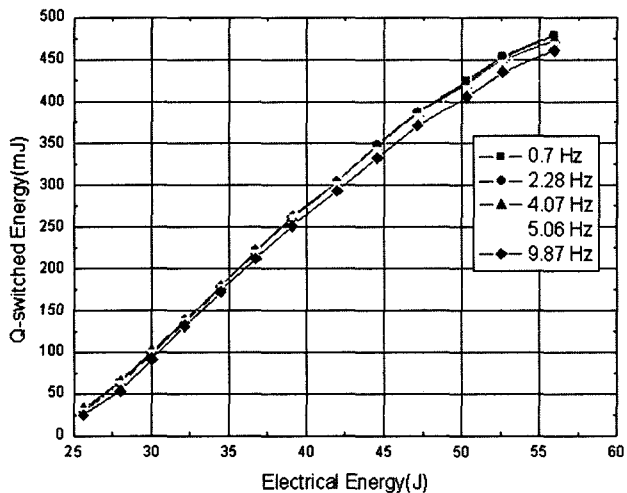


그림 9. 반복율에 따른 Q-스위치 Nd:YAG 레이저의 출력변화.

한 광학 경로의 변화를 식 (9)과 같이 보정해야 한다.

$$d_2' = d_2 + (n_{KD^*P} - 1) * L_{KD^*P} \quad (9)$$

(n_{KD^*P} = KD^*P 결정의 굴절율, L_{KD^*P} = KD^*P 결정의 길이)

편광자와 위상 지연판은 그 두께가 얇으므로 고려 하지 않았다.

펌핑 에너지에 따른 출력 에너지의 변화를 그림 8에 나타내었다. 55 J에서 1000 shot의 평균값을 취하면 에너지 변동률은 4% 이내로 안정적이다. 그림 9는 반복율에 따른 출력의 양상을 보여 준다. 반복율의 증가에 따라 Nd:YAG 붕의 굴절능이 바뀌게 되어 점차 초점거리가 짧은 렌즈처럼 된다. 이에 따라 공진기 내에는 초점거리가 가변되는 렌즈가 삽입된 효과를 나타나게 되므로 공진기의 M 값이 변하게 된다. 그림 9에서 알 수 있듯이 반복율의 증가에 따라 출력이 다소 감소함을 알 수 있다.

그림 10에 불안정 공진기와 안정 공진기의 1064 nm와 532 nm의 출력 특성을 나타내었다. 안정 공진기의 구성은 그림 7의 구조에서 평면 출력 거울과 3 m의 곡률 반경을 갖는 오목 전반사 거울을 사용하여 다중 모드로 발진하도록 하였으며 제 2고조파는 KTP 비선형 결정(Cristal Laser 사, 10 mm x 10 mm x 5 mm)을 사용 하였다. KTP는 출력 거울로부터 30 cm 앞에 위치 하며 불안정 공진기와 안정공진기 모두 KTP에 입사 되는 빔의 크기를 줄이기 위한 렌즈는 사용하지 않았다. 입력 전기 에너지가 55 J일 때 변환효율은 60%로 만족스러운 결과를 보이고 있다. 변환되지 않은 1064 nm를 제거하기 위한 필터에서의 532 nm 손실률이 6%임을 고려하면 실제 변환효율은 64%이다. 그림 10에서 알 수 있듯이 1064 nm 출력 에너지의 경우에는 최대 출력 에너지는 비슷하나 낮은 펌핑 에너지 쪽에서는 안정 공진기의 효율이 높음을 알 수 있다. 하지만 안정 공진기의 532 nm의 최대 변환

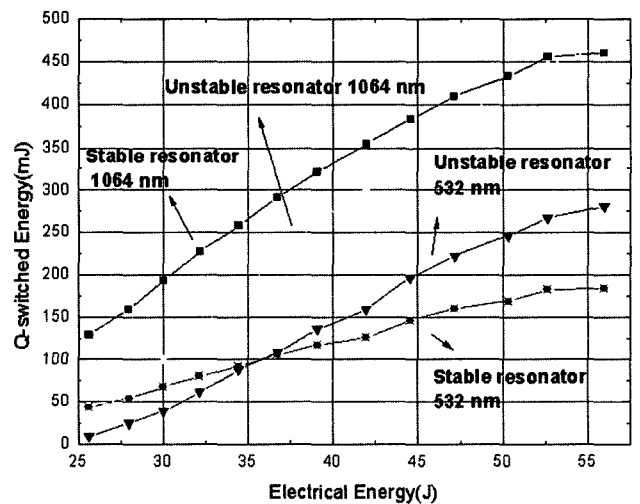


그림 10. 불안정 공진기와 안정 공진기의 1064 nm 입력 에너지에 따른 제 2고조파 출력 에너지.

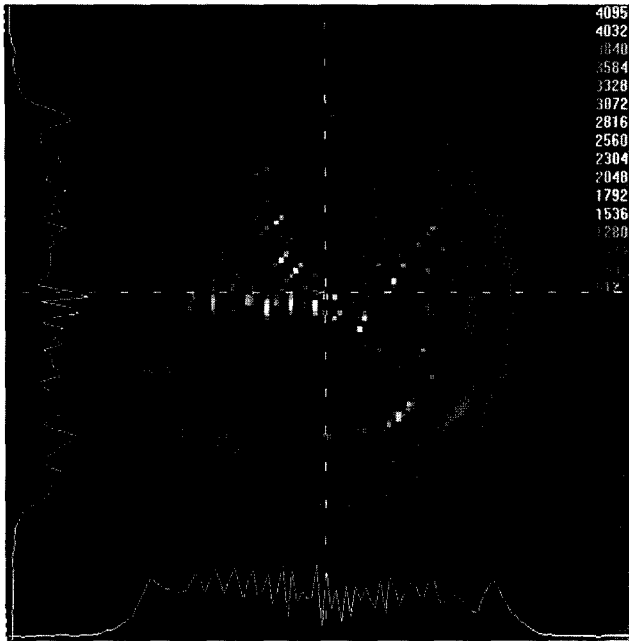


그림 11. 근접장에서의 출력 빔 분포도.

효율을 보면 40%로 60%인 불안정 공진기에 비하여 많이 낮은 것을 알 수 있다. 다중 모드로 동작하는 안정 공진기에 비하여 불안정 공진기는 발산각이 작고 저차 횡모드를 갖기 때문에 이와 같이 파장변환 할 때 높은 변환효율을 보이게 된다.

그림 11은 CCD 카메라로 측정된 출력 빔의 에너지 공간 분포이다. 각각의 축에 나타난 실선은 그 축에서의 빔의 강도분포를 의미하며, 중앙의 빔의 분포도에서 같은 색은 같은 강도를 의미한다. 출력 에너지를 증가시키기 위하여 공진기를 설계할 때 약간의 회절을 포함시켰기 때문에 에너지 분포에 다소 변조가 형성되어 있으나 중심에 함몰은 형성되어 있지 않다. 빔의 발산각은 10 Hz로 동작할 때 1.7 mrad으로 측정되었다. 이는 일반적으로 다중 모드로 동작하는 안정 공진기들에 비하면 작은 값이다. 단일모드로 동작하는 안정 공진기의 경우는 1 mrad 이내의 발산각을 갖는다. 하지만 이를 위하여 공진기 내에 구경(aperture)을 삽입하여 출력이 다중 모드로 발진하는 경우에 비하여 상대적으로 매우 적다.^[17] 구경을 사용하지 않으면서도 단일모드로 동작하고 모드 부피가 큰 안정 공진기의 구조에서는 많은 광학 소자를 필요로 하게 된다. 그 경우에도 공진기 구조 특성상 광학 소자의 손상을 피하기 위해 출력은 다중 모드로 발진 하는 경우에 비하여 상대적으로 작다.^[18] 따라서 거울 두 개의 기본적인 구성으로 작은 발산각과 저차 모드로 큰 출력을 얻을 수 있는 점에서 안정공진기에 비해 장점이 있다.

제2고조파인 532 nm는 피부의 멜라닌 색소 및 붉은색 계열에 대해 흡수율이 높아 상대적으로 피부의 투과율이 높은 1064 nm의 파장에 비해 상피에 위치하는 점이나 붉은색 문신 및 혈관 질환의 치료에 사용이 되어 진다. GRM을 사용

한 공진기와 안정공진기를 사용한 Q-switching Nd:YAG 레이저의 제2고조파 에너지를 200 mJ이 출력 되도록 설정 한 후 출력 거울 앞 1 m 지점에 초점거리가 150 mm인 볼록 렌즈를 설치 하였다. 렌즈에 입사하는 빔의 크기를 13 mm가 되도록 실험 장치를 꾸민 후, 렌즈로부터의 거리가 90 mm 인 지점에서 피부에 조사를 하였다. 피부에 조사한 후 레이저 조사로 인한 피부 조직에 발생한 양상을 살펴 보면 안정 공진기의 경우 피부에 발생한 멜라닌 색소 파괴 크기가 약 4 mm로 측정 되었으며 가운데 부분에 약 1.5 mm 반경의 상처가 발생 하였다. 반면에 GRM을 사용한 불안정 공진기의 경우 피부에 발생한 멜라닌 색소의 크기가 5 mm이며 어느 곳에서도 상처를 찾아 볼 수가 없었다.

IV. 결 론

positive branch 영역에서 불안정 공진기를 구성한 후 출력 거울로 GRM을 사용하여 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 동작 특성을 분석하였다. 최대 출력 에너지는 입력 전기 에너지가 55 J일 때 1064 nm의 경우 470 mJ, 532 nm의 경우 280 mJ을 얻을 수 있었다. 안정 공진기의 경우 입력 전기 에너지가 48 J일 때 1064 nm에서 460 mJ, 532 nm에서 184 mJ을 얻을 수 있었다. 1064 nm의 경우에는 다중 모드로 동작 하는 안정 공진기에 비해 다소 효율이 낮으나 비선형 파장 변환에서는 20% 더 높은 효율을 얻었다. 일반적으로 안정 공진기의 경우 단일모드로 발진 하는 경우 다중 모드로 발진 하는 경우 보다 상당히 작은 양의 에너지를 얻게 된다. 또한 작은 빔의 크기로 인하여 비선형 파장변환 혹은 증폭할 때 광학 부품들의 손상이 우려 된다. 이에 반하여 불안정 공진기는 안정 공진기에 비하여 간단한 구성으로 낮은 발산각과 큰 단일모드 부피를 갖는 출력 빔을 만들어 낼 수가 있었다. 또한 출력거울로 GRM을 사용하는 경우 기존의 불안정 공진기가 갖던 출력거울의 회절에 의한 빔 질의 저하 및 근접장에서의 중심 에너지 함몰에 대한 보상을 할 수 있어 균일한 빔 분포를 구현할 수 있었다. 따라서 향상된 빔 질로 인하여 증폭할 때 효율이 증가하고 비선형 파장변환에서도 높은 효율을 보였다. 안정 공진기와 GRM을 사용한 불안정 공진기에서 발생한 200 mJ의 제2고조파를 피부에 조사한 결과 GRM을 사용한 불안정 공진기의 경우 피부에 손상 없이 균일한 색소 파괴를 얻을 수 있었다. 따라서 Q-switching Nd:YAG 레이저를 임상에 적용 하는 경우 GRM을 사용한 불안정 공진기가 더욱 치료 효과가 우수할 것으로 기대 된다.

참고문헌

- [1] A. E. Siegman, "Unstable Optical Resonators for Laser Applications," *Proceeding of the IEEE*, vol. 53, pp. 277-287, 1965.
- [2] Y. U. Anan'ev, Laser resonators and the beam divergence

- problem(Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 1992) pp. 135-137.
- [3] 박명권, "펄스 반복율 10-Hz의 Positive-branch Confocal Unstable Resonator Nd:YAG 레이저", *새물리*, vol. 22, no. 3, pp. 223-229, 1982.
- [4] M. Morin, "Graded reflectivity mirror unstable laser resonator design," *Proc. SPIE*, vol. 3267, pp. 52-65, Laser Resonators, 1998.
- [5] S. De Silvestri, "Rod-imaging unstable resonators with super-Gaussian mirrors," *Pure Appl. Opt.*, vol. 3, pp. 507-514, 1994.
- [6] K. J. Snell, "Diffraction-limited Nd:Glass and Alexandrite Lasers using Graded Reflectivity Mirror Unstable Resonator", *Proc. SPIE*, vol. 1410, pp. 99-106, 1991.
- [7] M. S. Bowers, "Diffractive analysis of unstable optical resonators with super-Gaussian mirrors," *Opt. Lett.*, vol. 17, pp. 1319-1321, 1992.
- [8] K. Yasui, "Off-axis one-sided negative branch unstable resonators compared with positive-branch unstable resonators in wave-optics characteristics," *Proc. SPIE*, vol. 4270, pp. 64-70, 2001.
- [9] N. Hodgson, "High-power solid-state lasers with unstable resonators," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 22, pp. 39-55, 1990.
- [10] 김연수, "입력광파면 왜곡에 따른 광학계 성능", *한국광학회지*, vol. 12, no. 3, pp. 172-176, 2001.
- [11] R. weber, "Thermal effects in solid-state laser materials," *Optical Materials*, vol. 11, pp. 245-254, 1999.
- [12] W.Koechner, *Solid-State Laser Engineering*(Springer, 1999) pp. 408.
- [13] W.Koechner, *Solid-State Laser Engineering*(Springer, 1999) pp. 220.
- [14] Kwang Suk Kim, "Measurement of the temperature and the pumping uniformity inside a Nd-YAG rod by an interferometric method", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 17, pp. 1810-1812, 1991.
- [15] N.Hodgson, *Optical Resonators*(Springer, 1997) pp. 604.
- [16] Peng. HaiBo, "Optimum of Q-switched Nd:YAG lasers with super Gaussian mirrors", *SPIE*, vol. 2889, pp 436-440, 1996.
- [17] Zhou Shouhuan, "Nd:YAG Q-Switched Laser with Variable Reflectivity Mirror(VRM) Resonator", *SPIE*, vol. 1979, pp. 269-274, 1992.
- [18] D.C.Hanna, "Large volume TEM₀₀ mode of Nd:YAG lasers", *Optics Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 359-362, 1981.

Output Characteristics of a Q-Switched Nd:YAG laser with GRM(Gaussian Reflectivity Mirror) unstable resonator

Hee Chul Lee*[†] and Yong Pyung Kim

College of Electronics and Information / Institute for Laser Engineering Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea(south)

[†]E-mail: hclee@maxltd.com

*#421 Ilsan Technotown 1141-1, Baeksok-Dong, Ilsan-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-722 Korea(south)

(Received January 10, 2005, Revised manuscript February 21, 2005)

We investigated the operational characteristics of a Q-switched Nd:YAG laser, which has an unstable resonator with a GRM(Gaussian reflectivity mirror). With electrical input energy of 55 J, we obtained the fundamental energy of 470 mJ at 1064 nm and the frequency doubled energy of 280 mJ at 532 nm. The Top-Hat profile of the output beam was obtained at the near field, and beam divergence was 1.7 mrad.

OCIS Codes : 060.2330.060.2330.