

연속발전 도파형 이산화탄소 레이저의 이득계수 및 포화출력 측정

이 승 걸

인하대학교 공과대학 응용물리학과

김현태 · 박대운

인하대학교 이과대학 물리학과

(1990년 7월 18일 받음)

내경이 2.1mm인 Pyrex 모세관을 사용하여 길이가 150mm인 도파형 이산화탄소 레이저를 제작하였으며, 공진기내에 임의의 손실을 가할 수 있는 ZnSe 손실판을 설치하여 공진기의 내부손실에 따른 출력변화를 여러 방전조건에 대해 측정하였다. 본 실험에 Rigrod 이론을 적용하여 내부손실에 따른 출력변화를 예측했으며 실험치로부터 포화출력 및 불포화 이득계수를 구할 수 있었다. 방전전류와 혼합기체의 유입률이 증가함에 따라 포화출력은 증가하며, 불포화 이득계수는 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

I. 서 론

1964년 E.A.J. Marcatili와 R.A. Schmelzter가 유전체 도파관을 이용한 레이저 이론을 처음으로 제안한 이래,⁽¹⁾ 1971년에 P.W. Smith가 6328Å의 도파형 He-Ne 레이저를 최초로 발진시켰다.⁽²⁾ 1972년 Bridge 등에 의해 Pyrex glass 모세관을 도파관으로 사용하는 도파형 이산화탄소 레이저가 처음으로 발진되었고,⁽³⁾ 또한 같은 해에 Smith 등이 높은 압력의 도파형 이산화탄소 레이저에서 Mode locking을 성공하였다.⁽⁴⁾ 최근에는 Pyrex 뿐만 아니라 유전체 도파관으로 BeO와 BN (Boron Nitride)을 사용하여 도파형 이산화탄소 레이저를 발진시킬 수 있었으며,^(5,6) 봉입형에 관한 연구도⁽⁷⁾ 활발히 진행되고 있다.

기체 레이저의 Scaling relation⁽⁷⁻⁹⁾에 의해 방전관의 직경이 감소함에 따라 기체의 압력, 단위길이당 이득, filling factor 등이 증가하므로 도파형 이산화탄소 레이저는 고효율, 소형화가 가능하다는 장점을 갖는다. 또한, 방전기체의 압력이 높으며 이로 인해 레이저의 발진

선폭이 넓어지기 때문에 분자분광학이나 Lidar 연구에 많은 응용이 가능하다.⁽¹⁰⁾

도파형 이산화탄소 레이저의 발진특성을 이해하고 최적 발진조건을 예측하기 위해서는 이득계수와 방전조건과의 상관관계 및 포화출력과 방전조건과의 상관관계에 관한 연구는 매우 중요할 것이다. 이 연구를 통해 도파형 이산화탄소 레이저의 출력증대 뿐만 아니라 파장 가변성도 증대시킬 수 있을 것이다.

이산화탄소 레이저의 이득계수 측정실험은 여러 가지 방법들이 사용되고 있으며 그 대부분의 방법은 CW 발진기(Oscillator)에서 매우 약한 세기의 레이저를 발진시켜, 이 출력을 렌즈나 거울을 사용하여 집중 후 증폭기(amplifier)를 통과시켜 이 때, 증폭되는 양으로부터 이득계수를 결정하게 된다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 그러나 이러한 측정실험은 공진기내의 손실들과 렌즈 또는 거울에 의한 손실을 고려하지 못하기 때문에 정확한 레이저의 이득계수를 측정할 수 없다. 한편, 도파형 이산화탄소 레이저는 이득계수가 높고 균일 선폭증대 특성을 가지므로 내부손실에 따른 출력변화는 Rigrod 이론⁽¹⁴⁾으로부터 설명될 수 있었다. 그러므로 공진기의 내부손실에 따른 출력변화를 측정할 후 출력변화에 관한 이론으로부터 이득계수를 결정할 수 있었다. 이 경우 공진기의 손실이나 광학계에 의

* 본 연구는 1989년도 문교부 기초과학 학술연구조성비의 지원으로 이루어졌으며 부분적으로 한국과학재단 레이저 장려연구센터의 지원을 받았음.

한 손실을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 포화출력도 결정할 수 있다.

본 논문에서는 실험에서 사용한 도파형 연속발진 이산화탄소 레이저의 구조에 맞는 이론식을 Rigrod 이론⁽¹⁴⁾을 이용하여 결정하였고, 임의의 포화출력 및 이득계수를 이용한 출력의 특성을 분석하였다. 또한 ZnSe 손실판 회전각도변화에 따른 출력변화를 방진진류 및 혼합기체 유입률의 변화에 따라 측정하여 불포화 이득계수와 포화출력을 구하였다.

II. Rigrod 이론을 이용한 도파형 이산화탄소 레이저의 출력이론

도파형 이산화탄소 레이저는 높은 이득을 갖는 레이저이며 균질 선폭증대 (homogeneous broadening)의 특성을 보이므로, 내부손실에 따른 출력변화를 Rigrod 이론으로부터 설명할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 그림 1은 비대칭 레이저 발진기 (asymmetric laser oscillator)의 개략도로서 g_0 와 L 은 각각 불포화 이득계수 (unsaturated gain coefficient)와 이득 매질의 길이를 의미하며 R_1, R_2 는 반사경의 유효반사율을 의미한다. β_+ 와 β_- 는 공진기내의 $+z$ 방향과 $-z$ 방향의 정규화된 복사선세기 (normal-

ized radiation intensity)를 나타내며 $\beta_+ = I_+/I_0$ 와 $\beta_- = I_-/I_0$ 로 각각 정의된다. 여기서 I_+ , I_- 는 복사선세기 (radiation intensity)이며 I_0 는 포화매개변수 (saturation parameter)를 의미한다.

균질 선폭증대가 일어나는 경우, 이득매질의 포화이득계수 (saturated gain coefficient) $g(z)$ 는

$$g(z) = g_0 / [1 + \beta_+(z) + \beta_-(z)] \quad (1)$$

로 주어지며,⁽¹⁵⁾ 등방성에 의해

$$g(z) = \frac{1}{\beta_+(z)} \frac{d\beta_+(z)}{dz} = -\frac{1}{\beta_-(z)} \frac{d\beta_-(z)}{dz} \quad (2)$$

$$\beta_+(z) \cdot \beta_-(z) = \text{const.} = C \quad (3)$$

의 관계가 만족된다. 그림 1과 식 (3)으로부터 식 (2)를 만족하는 경계조건은

$$(\beta_2/\beta_3)R_2 = (\beta_4/\beta_1)R_1 = 1 \quad (4)$$

$$\beta_1\beta_4 = \beta_2\beta_3 = C = \text{const.} \quad (5)$$

$$\beta_2/\beta_4 = (R_1/R_2)^{1/2} \quad (6)$$

이며, 여기서 $\beta_1 = \beta_+(0)$, $\beta_2 = \beta_+(L)$, $\beta_3 = \beta_-(L)$, $\beta_4 = \beta_-(0)$ 이다.

식 (1), (3)를 식 (2)에 대입하여 $\beta_+(z)$ 로 정돈한 후 이를 적분하면

$$\frac{1}{\beta_+} \frac{d\beta_+}{dz} = \frac{g_0}{1 + \beta_+(z) + C/\beta_+(z)} \quad (7)$$

$$g_0 L = \ln(\beta_2/\beta_1) + \beta_2 - \beta_1 - C(1/\beta_2 - 1/\beta_1) \quad (8)$$

식 (8)의 결과를 얻을 수 있으며 $\beta_-(z)$ 에 대해 같은 과정을 반복하여

$$g_0 L = \ln(\beta_4/\beta_3) + \beta_4 - \beta_3 - C(1/\beta_4 - 1/\beta_3) \quad (9)$$

식 (9)의 결과를 얻을 수 있다.

그림 1에서 왼쪽 반사경을 전반사경, 오른쪽 반사경을 출력경이라 하면 레이저 출력은 β_2 의 표현식으로부터 얻을 수 있을 것이다. 경계조건인 식 (4), (5)와 식 (8), (9)로부터 β_2 의 표현식을 구하면

$$\beta_2 = \frac{(R_1)^{1/2}}{[(R_1)^{1/2} + (R_2)^{1/2}][1 - (R_1 R_2)^{1/2}]} \times [g_0 L + \ln(R_1 R_2)^{1/2}] \quad (10)$$

이 되며 이 때, 출력경의 투과율을 T_0 라 하면 출력강도 (output intensity) I_2 는

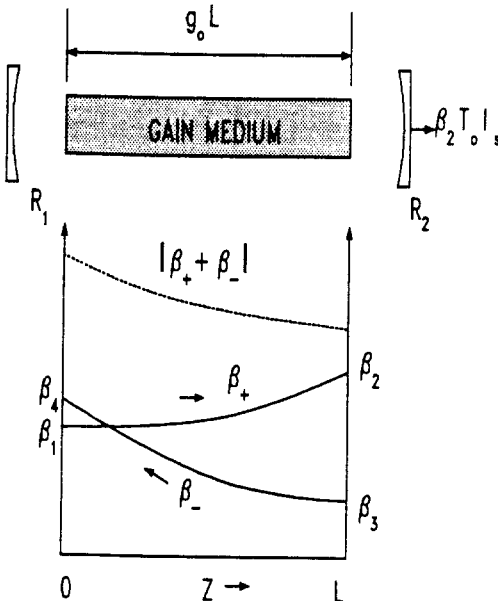


Fig. 1. Schematic diagram of bidirectional normalized radiation intensities (β_+, β_-) vs length of gain medium.

$$I_t = T_o \beta_2 I_s$$

$$= \frac{I_s (R_1)^{1/2} T_o}{[(R_1)^{1/2} + (R_2)^{1/2}] [1 - (R_1 R_2)^{1/2}]} \times [g_o L + \ln (R_1 R_2)^{1/2}] \quad (11)$$

가 된다.

한편, 그림 2는 실제 실험에서 사용된 도파형 공진기의 개략도인데 유효반사율 R_1 은 전반사경의 반사율(R_t)뿐만 아니라 전반사경과 방전관의 왼쪽 끝사이에서 일어나는 모든 손실을 고려한 값이며, 유효반사율 R_2 는 출력경의 반사율(R_o), 방전관의 오른쪽 끝사이에서 일어나는 손실, 그리고 손실판의 흡수 및 반사를 고려한 값을 의미한다. 이와 같은 손실을 모두 고려하면 유효반사율 R_1, R_2 의 표현식은

$$R_1 = (1 - a_c) R_t \quad (12)$$

$$R_2(\theta) = (1 - a_c) [1 - R_p(\theta)]^4 (1 - a_p)^4 R_o \quad (13)$$

가 된다. 여기에서 a_c 는 반사경과 방전관의 끝에서 일어나는 손실로서 반사경 표면의 흡수와 회절에 의한 손실, Brewster 창에 의한 반사와 흡수, 도파형 공진기의 결합손실, 비점수차 등에 의한 손실 및 공진기의 결합손실을 의미한다. a_p 는 ZnSe 손실판에 의한 흡수를 나타내며 레이저 공진시 ZnSe 손실판을 4회 통과하므로 식 (13)의 a_p 항은 네 제곱이 된다. 또한, $R_p(\theta)$ 는 손실판의 반사율로서 손실판의 각도 θ 에 따라 변하므로 유효반사율 $R_2(\theta)$ 는 θ 의 함수로 주어지며, 레이저 공진시 손실판의 여덟개의 면을 통과하므로 팔 제곱이 된다. 유효반사율의 표현을 식 (11)에 대입하여 손실판의 각도에 따른 레이저의 출력 $P(\theta)$ 를 계산하면

$$P(\theta) = \frac{P_s \sqrt{R_1} [g_o L + \ln \sqrt{R_2(\theta) R_1}] T_o}{[\sqrt{R_2(\theta)} + \sqrt{R_1}] [1 - \sqrt{R_2(\theta) R_1}]} \quad (14)$$

와 같다. 여기에서 P_s 는 포화출력(saturation power)으로서 출력광속의 단면적과 I_s 의 곱으로 정의된다. 이

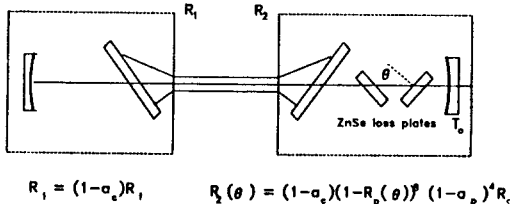


Fig. 2. Schematic diagram of waveguide resonator with ZnSe loss plate.

상과 같이 ZnSe 손실판에 의한 도파형 이산화탄소 레이저의 출력변화를 Rigrod의 이론을 이용하여 식 (14)을 유도하였다. 출력에 관한 이론식을 이용하여 손실판의 회전각도에 따른 출력변화를 임의의 포화출력 및 불포화 이득계수값에 대해 계산할 수 있을 것이다.

그림 3(a)는 방전조건에 관계없이 불포화 이득계수가 불변한다고 가정한 경우에 대해 손실판의 각도 θ 에 따른 출력변화를 나타낸 그래프이다. 각 곡선은 포화출력(P_s)이 각각 10, 14, 18, 22 W 인 경우로서 P_s 가 증가함에 따라 임의의 각도에 대해 레이저의 출력은 선형적으로 증가하지만, 레이저가 더이상 발전하지 못하는 각도($\theta=43^\circ, 78^\circ$)는 항상 일정함을 볼 수 있다. Brewster window에 의해 p 파의 편광을 갖는 모드만 발전된다고 가정한다면 손실판의 투과율은 $\theta=67.4^\circ$ (Brewster 각)에서 최대가 되므로 이 각도에서 각 곡선의 출력이 최대가 됨을 알 수 있다.

그림 3(b)는 (a)와는 반대로 포화출력이 불변한다고 가정한 경우로서 각 곡선은 불포화 이득계수 g_o 가 각각 0.0020, 0.0022, 0.0024, 0.0026 mm^{-1} 일 때의 출력을 나타낸다. g_o 가 증가함에 따라 임의의 회전각에 대한 레이저 출력은 증가하며 발전이 가능한 θ 의 범위도 점차 확대됨을 볼 수 있다.

만일 여러 방전조건에 대해 ZnSe 손실판의 회전각도에 따른 출력변화를 측정할 수 있다면 식 (14)와 실험치의 curve fitting 과정으로부터 불포화 이득계수 및 포화출력값을 구할 수 있을 것이다. Curve fitting을 위해 merit function $G^{(16)}$ 는

$$G = \sum_{i=1}^n [P_{th}(\theta_i) - P_{ex}(\theta_i)]^2 \quad (15)$$

와 같이 정의된다. 여기에서 $P_{th}(\theta_i)$ 는 식 (14)에 의해 이론적으로 계산된 출력값이고, $P_{ex}(\theta_i)$ 는 ZnSe 손실판의 각도 θ_i 에 따른 출력의 측정치이다.

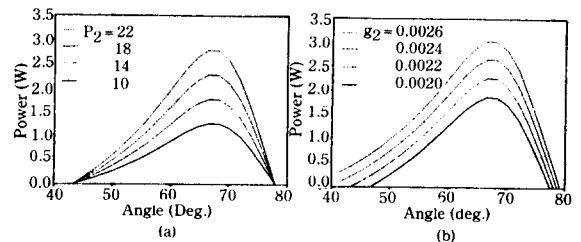


Fig. 3. Calculation of output power with the angle of loss plates; (a) P_s was varied at constant g_o . (b) g_o was varied at constant P_s .

출력에 관한 이론식 (14)에서 $R_t, L, R_p(\theta), T_o, a_p, R_o$ 는 이미 알고 있거나 계산하여 구할 수 있는 값들이고 P_s, g_o, a_c 값은 식 (15)를 이용하여 계산하여야 할 값들이다. Curve fitting 과정에서 Merit function G 의 값이 최소가 되도록 P_s, g_o, a_c 값을 적절히 변화시켜 그 값들을 결정하여 준다. 다음으로 결합손실의 값은 공진기 내에서 불변의 값이므로 여러 방전조건에서 구한 결합손실값을 평균하여 하나의 상수로 식에 대입하여 Merit function G 의 값이 최소가 되는 포화출력 P_s 와 이득계수 g_o 를 구한다.

III. 실험장치

그림 4는 이 실험을 위한 전체 장치도이다. 실험에서 사용된 도파형 이산화탄소 레이저의 도파관은 내경 2.1 mm, 외경 9mm인 Pyrex 모세관으로 제작되었으며 도파관 양 끝부분에는 봉형 텅스텐 양극과 실린더형 니켈 음극을 부착시켰다. 또한, 선형 편광된 출력광을 얻기 위하여 방전관 양단에 두께 2mm의 ZnSe 결정 평행판을 Brewster 각($\theta_B = 7.4^\circ$)으로 부착시켰다.

이산화탄소, 질소, 헬륨을 최저 혼합비인 2:3:5 (압력비)⁽¹⁷⁾로 혼합하여 방전관에 주입시켰으며, 수은주 압력계를 이용하여 레이저 방전시 혼합기체의 압력을 방전관의 유입구와 유출구에서 각각 측정하였다. 유입구에서의 압력은 기체 유입률에 따라 30~60 torr의 값을 가졌으며 유출구에서의 압력은 10 torr로 일정하게 유지시켜 주었다. 유입구와 유출구에서의 압력차가 크게 나타나므로⁽¹⁸⁾ 그의 평균치를 구하는 것은 물리적 의미가 없으므로 대신에 질량유량계(mass flowmeter, MKS Model 258B)를 도파관의 유입구쪽에 설치하여 기체의 유입률(flow rate)을 측정하였다. 레이저의 출력을 측정하기 위하여 Coherent Co.의 power meter(Model

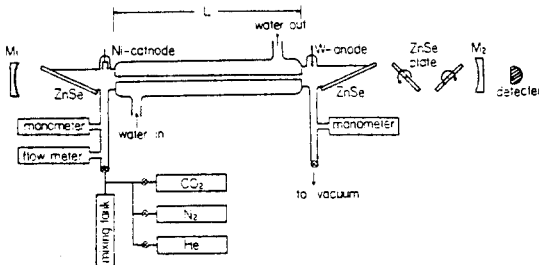


Fig. 4. Schematic diagram of waveguide CO₂ laser. M₁; Ag-coated Si total reflector with the radius of curvature of 300 mm. M₂; ZnSe output coupler. L; length of waveguide.

201)가 사용되었다.

도파형 공진기를 구성하기 위해 곡률반경이 30 cm인 전반사경과 곡률반경이 50 cm인 출력경(Laser Power Optics Co.)을 사용하였다. 전반사경은 실리콘 기판에 Ag를 증착한 것으로 파장 10.6 μm에서 99.61%의 반사율을 가진다. 출력경은 ZnSe에 유전체 박막을 증착한 것으로 곡률반경이 50 cm이고 반사율이 80%인 것을 사용하였다.

공진기의 내부손실을 변화시키기 위해 ZnSe 결정판을 공진기 내부에 설치하였으며 광축에 대한 손실판의 회전각도로서 내부손실을 조절하였다. 공진기의 정렬상태를 유지하기 위해 두 개의 ZnSe 손실판을 서로 대칭이 되며 회전하도록 장치하였으며 회전각도는 펄스 발생장치와 스텝핑 모터를 사용하여 한 펄스마다 1.8°씩 회전을 하게 하였다.

IV. 결과 및 논의

1. ZnSe 손실판의 회전각도에 따른 레이저의 출력변화

ZnSe 손실판의 회전각도 θ 에 따른 레이저의 출력변화를 여러 방전조건에 대해 측정하였으며 방전조건은 방전전류와 혼합기체의 유입률에 의해 주어진다.

그림 5(a), (b), (c), (d)는 혼합기체의 유입률을 400 sccm으로 고정시키고 ZnSe 손실판을 1.8°씩 회전시키며 방전전류를 각각 4, 6, 8, 10 mA로 변화시켰을 때의

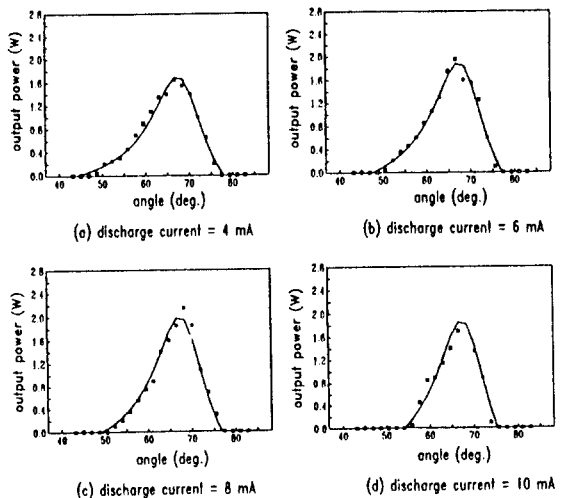


Fig. 5. Variation of output power vs the angle of loss plates at different discharge current and constant flow rate of 400 sccm.

출력을 측정된 결과이다. 각 그래프에서 실험에 의한 측정치를 점으로 표현하였으며 실선은 최소자승법에 의하여 식 (14)와 곡선맞춤 (curve fitting)을 한 결과이다. ZnSe 손실판의 투과율은 $\theta=67.4^\circ$ 에서 최대가 되므로 이 회전각에서 각 방전전류에 대한 출력이 최대가 됨을 볼 수 있다. 또한 ZnSe 손실판의 투과특성에 의해 회전각 θ 가 67.4° 보다 크거나 작아짐에 따라 공진기의 내부손실은 항상 증가하므로, $\theta=67.4^\circ$ 를 기준으로 해서 각 방전전류에 대한 출력이 감소하는 것을 알 수 있다.

방전전류가 증가함에 따라 출력의 최대값 $P(\theta=67.4^\circ)$ 는 서서히 증가하는 경향을 보이지만 방전전류가 10 mA를 초과하면 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 한편 불포화 이득계수의 크기에 의해 결정되는 출력분포의 폭은 방전전류가 증가함에 따라 점차 감소하는데 이로부터 이득계수가 방전전류에 따라 감소함을 알 수 있다.

그림 6(a), (b), (c), (d)는 그림 5와는 달리 방전전류를 8 mA로 고정시키고, 혼합기체의 유입률을 각각 400 sccm에서 1000 sccm으로 변화시켰을 때의 그래프로서 각 곡선은 최소자승법에 의하여 곡선맞춤을 한 결과이다. 이 경우에도 그림 5에서와 같은 경향을 나타내므로 유입률이 증가함에 따라 불포화 이득계수가 감소함을 알 수 있다.

2. 방전조건에 따른 불포화 이득계수 및 포화출력 변화

레이저 출력에 관한 이론식인 식 (14)를 그림 5, 6의

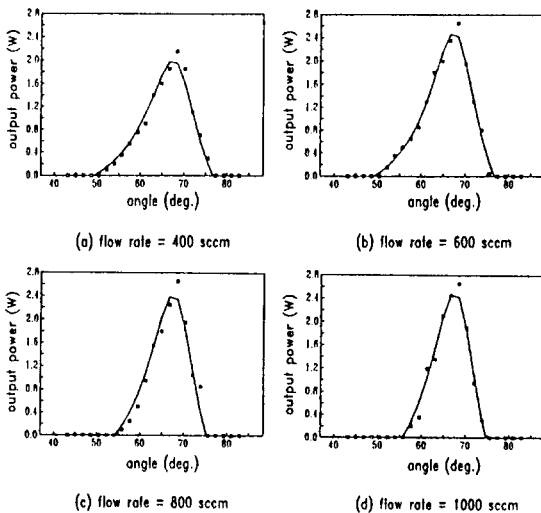


Fig. 6. Variation of output power vs the angle of loss plates at different flow rates and constant discharge current of 8 mA.

실험결과에 곡선맞춤하므로써 각 방전조건에 따른 포화출력과 불포화 이득계수를 얻을 수 있었으며 그림 7에 그 결과를 나타내었다. 공진기와 도파관 사이의 결합손실 $(1-a_c)$ 는 방전조건에 관계없이 일정한 값을 가질 것으로 예상되지만 실험오차로 인해 그 값은 0.954~0.982의 범위 (표준편차=0.01)를 나타냈다. 그래서 그림 5, 6의 실험결과를 곡선맞춤할 때 결합손실 $(1-a_c)$ 에 평균치 0.967을 대입하여 각 방전조건에 따른 포화출력 및 이득계수의 변화를 계산하였다.

그림 7(a)는 방전전류를 8 mA로 일정하게 유지한 채 혼합기체의 유입률만을 400 sccm에서 1000 sccm으로 변화시켰을 때의 결과로서, 유입률이 증가함에 따라 포화출력 P_s 는 각각 6.78, 7.57, 11.42, 14.20 W로 증가하지만 불포화 이득계수 g_0 는 각각 1.12×10^{-3} , 1.08×10^{-3} , 0.79×10^{-3} , $0.69 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 7(b)는 혼합기체의 유입률을 400 sccm으로 고정하고 방전전류만을 4 mA에서 12 mA로 변화시켰을 때, 포화출력 P_s 와 불포화 이득계수 g_0 의 변화를 구한 결과이다. 방전전류가 증가함에 따라 포화출력 P_s 는 각각 4.19, 5.69, 6.78, 9.84, 11.8 W로 증가하지만 불포화 이득계수 g_0 는 각각 1.43×10^{-3} , 1.22×10^{-3} , 1.12×10^{-3} , 0.82×10^{-3} , $0.65 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 으로 불포화 이득계수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

이상과 같이 방전전류와 유입률의 증가에 따라 도파형 이산화탄소 레이저의 포화출력은 증가하지만, 불포화 이득계수는 반대로 감소하는 경향을 나타내며 평균치는 각각 8.70 W, $0.99 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 로 주어진다. 일반적인 기체 레이저의 경우에는 대개 혼합기체의 유입률이 증가하더라도 불포화 이득계수는 일정한 값을 유지하는데, 본 실험에서 측정된 불포화 이득계수는 혼합기체의 유입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러

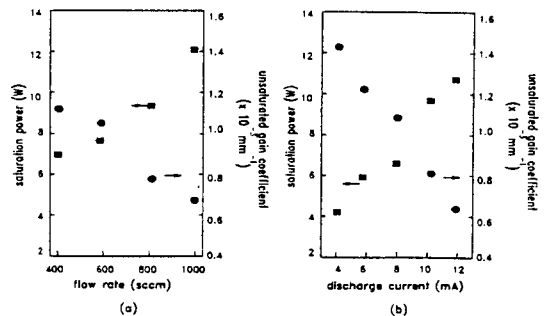


Fig. 7. Variation of saturation power and unsaturated gain coefficient for constant discharge current of 8 mA (a) and constant flow rate of 400 sccm (b).

한 이유는 방전관으로 도파관을 사용하는 것으로 인해 방전시 혼합기체의 온도가 상승하기 때문이며, (19-21) 도파관을 열전도율이 좋은 BeO를 사용하거나(3,22) He 기체의 양을 증가시켜 주면 불포화 이득계수가 급격히 감소하는 것을 어느 정도 줄일 수 있을 것이다. 또한 도파관을 실온이 아닌 낮은 온도로 냉각을 시킬 경우 불포화 이득계수가 일정하게 유지될 것으로 예상된다.

참고로 본 논문에서 이용한 fitting 함수에서 결합손실 $(1-a_c)$ 와 포화출력 P_s , 이득계수 g_0 의 상관관계를 알아 보기 위하여 결합손실 $(1-a_c)$ 의 값을 0.5% 변화시켰을 때 곡선맞춤과정을 통해 얻어지는 포화출력과 이득계수의 변화 정도를 계산해 보았다. 계산결과 포화출력 P_s 와 이득계수 g_0 의 변화 정도는 각각 27%, 3%임을 알 수 있었으며 이로부터 본 실험을 통해 얻어진 포화출력 및 이득계수의 신뢰도를 평가할 수 있었다.

V. 결 론

Rigrod 이론을 통하여 실험에서 사용한 레이저 공진기에 맞는 레이저 출력에 관한 식을 유도할 수 있었고 이 이론식을 이용하여 포화출력, 불포화 이득계수 및 내부 손실에 따른 레이저의 출력특성을 예상할 수 있었다. 방전관과 출력경 사이에 회전 가능한 ZnSe 손실판을 설치하여 각도에 따른 출력변화를 측정하였으며, 유도한 이론식을 이용해 도파형 이산화탄소 레이저의 포화출력 및 불포화 이득계수를 구할 수 있었다.

도파형 이산화탄소 레이저의 포화출력과 불포화 이득계수를 계산한 결과 방전전류와 혼합기체의 유입률이 증가함에 따라 포화출력 P_s 는 증가하지만 불포화 이득계수는 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 일반적인 기체 레이저와 달리 불포화 이득계수가 감소하는 이유는 도파관 내벽과 혼합기체의 충돌확률이 증가함으로 인해 혼합기체의 온도가 상승하기 때문으로 판단된다.

이와 같이 레이저의 포화출력과 불포화 이득계수를 측정함으로써 레이저의 최적 발전조건을 예측할 수 있으며 레이저 출력증대를 위한 방전조건을 찾을 수 있을 것이다.

한편, 본 실험을 수행하는 전과정에서 레이저의 발전

조건은 본 연구팀이 이미 발표한(9) 도파형 CO₂ 레이저 출력특성의 연구결과와 잘 부합되었음을 재확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] E. A. J. Marcetili and R. A. Schmeltzer, *Bell. Sys. Tech. J.* **43**, 1783 (1964).
- [2] P. W. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **19**, 132 (1971).
- [3] T. J. Bridges, E. G. Burkhardt and P. W. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **20**, 403 (1972).
- [4] P. W. Smith, T. J. Bridges and E. G. Burkhardt, O. R. Wood, *Appl. Phys. Lett.* **21**, 470 (1972).
- [5] E. G. Burkhardt, T. J. Bridges and P. W. Smith, *Opt. Commun.* **6**, 193 (1972).
- [6] A. Papayoanou, *IEEE J. Quantum Electron* **QE-13**, 27 (1977).
- [7] R. L. Abrams and W. b. Bridges, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-9**, 940 (1973).
- [8] V. K. Konyukhov, *Sov. Phys-Tech. Phys.* **15**, 1283 (1971).
- [9] 김현태 외 3인, *새물리* **29**, 688(1989).
- [10] Mitsunobu Miyagi, Yuji Matsuura, Mitsunori Saito and Akihito Hongo, *Applied Optics*, **27**, 4169(1988).
- [11] N. Djeu, T. Kan and G. J. Wolga, *IEEE J. Quantum Electron* **QE-4**, 256 (1968).
- [12] N. Djeu, T. Kan and G. J. Wolga, *IEEE J. Quantum Electron* **QE-4**, 783 (1968).
- [13] T. A. Cool, J. A. Shirley and R. R. Stephens, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 278 (1970).
- [14] W. W. Rigrod, *J. Appl. Phys.* **36**, 2487 (1965).
- [15] E. O. Schulz, du Bois, *Bell Sys. Tech. J.* **43**, 625 (1964).
- [16] Nicholas Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation." McGRAW-Hill Press (1983).
- [17] 이민희, *새물리* **23**, 148(1983).
- [18] P. W. Smith, P. J. Maloney and O. R. Wood II, *Appl. Phys. Lett.* **23**, 524 (1973).
- [19] M. C. Fowler, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 175 (1971).
- [20] E. T. Antropov, I. A. Silen-Bekchurin, N. N. Sobolev and V. V. Sokovikov, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-4**, 790 (1968).
- [21] S. C. Cohen, *IEEE J. Quantum. Electron* **QE-12**, 237 (1976).
- [22] G. M. Carter and S. Marcus, *Appl. Phys. Lett.* **35**, 15 (1979).

Measurement of Gain Coefficient and Saturation Power of CW Waveguide CO₂ Laser

Seung-Gol Lee

Dept. of Applied Physics, Inha Univ.

Hyun-Tae Kim and Dae-Yoon Park

Dept. of Physics, Inha Univ. Incheon, 402-751

(Received: July 18, 1990)

Two ZnSe loss plates were installed in the resonator of waveguide CO₂ laser which consisted of Pyrex capillary tube in order to change the internal loss. By rotating the loss plates, the output variations with the internal loss was measured on various discharge conditions. The variations could be explained by the Rigrod theory, and the saturation power and the unsaturated gain coefficient were determined by fitting of the experimental results. It was found that the saturation power increased while the unsaturated gain coefficient reduced as the discharge current or the gas flow rate increased.