

고출력 Fast-Axial-Flow CO₂ Laser 제작 Development of High Power Fast-Axial Flow CO₂ Laser

신동주, 이인원

한국표준연구소 광학연구실

Abstract

The limitations of high-power electrical lasers due to heating of the gas and the instability of the glow discharge can be alleviated by the flow of the lasing medium. In order to achieve high power and efficient laser, we are developing a fast-axial flow CO₂ laser. We describe here the classification of gas-discharge CO₂ lasers according to the cooling methods of the lasing medium and the design features of the fast-axial flow CO₂ laser.

I. 서 론

고출력 탄산가스 레이저는 재료의 절단, 용접, 표면 열처리 등 레이저 재료가공 [1] 분야에 이미 널리 사용되고 있으며 수십 kW 이상의 연속출력 탄산가스 레이저 [2]도 개발되어 이용되고 있다.

고출력 탄산가스레이저에서 레이저출력은 레이저 매질의 온도상승 [3],[4],[5]과 Glow 방전의 불안정 즉, Glow-to-Arc transition [6],[7]에 의해서 제한된다. 연속출력 탄산가스 레이저에서 레이저 매질은 방전시에 발생하는 열과 upper active level의 collisional relaxation 에 의해서 가열되며, 평형상태에서 레이저 매질의 온도는 방전전력에 비례한다. [8]

레이저 매질의 온도가 상승하면 충돌작용에 의해서 결정되는 lower active level의 분자밀도는 Boltzman law에 따라 기하급수적으로 증가한다. 즉, 레이저 매질의 온도가 약 280 °C 가 되면 CO₂ 기체 분자의 약 절반이 (010) level 이상의 운동에너지를 갖게 된다.[4]

$$2x^{-2} \int_{E_1}^{\infty} \exp(-E) dE = \Delta N/N \approx 0.49$$

여기서 $\Delta N/N$ 은 $T=280^\circ\text{C}$ 일때 전체 CO₂ 분자수에 대한 E (010) 이상의 운동에너지를 갖는 CO₂ 분자수의 비율을 나타낸다.

CO₂(010) level의 deactivation은 $T_g = 100^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$ 에서 ($\Delta N/N = 0.3 - 0.37$) 가장 빠르게 일어나며 레이저 매질의 온도가 600 K 이상이 되면 population inversion이 소멸되어 [5] lasing이 불가능하기 때문에 고출력 레이저 빔을 얻기 위해서는 효과적인 레이저 매질 냉각이 필요하다.

레이저출력을 제한하는 요소로서 Glow 방전의 불안정 즉, Glow-to-Arc transition을 들 수 있는데 이 현상은 회로 영향 또는 전극의 영향에 의해서도 일어나지만 주로 열효과에 의해서 일어난다[6],[7]. 방전관내의 레이저

매질에서 부분적으로 온도가 상승하면 그 부분의 레이저 매질의 밀도가 감소하고 따라서 전자의 온도, 전자의 밀도와 전기전도도가 증가하여 ohmic heating에 의해서 그 부분의 온도는 더욱 상승하게 된다. 따라서 전류가 그 부분으로만 흐르게 되어 균일한 Glow 방전을 얻을 수 없게 된다.

이러한 Glow-to-Arc transition은 방전관의 단면에서 레이저 매질의 온도분포와 하전입자의 분포를 균일하게 유지함으로써 억제할 수 있는데 fast-axial-flow CO₂ laser의 경우에는 aero-dynamic nozzle를 사용하여 방전관 내에서 레이저 매질의 turbulence를 크게 하여 레이저 매질의 온도분포와 하전입자의 분포를 균일하게 유지시킬 수 있으며 레이저 매질의 유속이 빠를수록 일정한 mass flow rate에 대하여 static pressure와 static temp.가 낮아지기 때문에 레이저 매질의 유속을 빠르게하여 ($V_g > 100 \text{ m/s}$) Glow-to-Arc transition을 억제할 수 있으며 레이저 매질이 초음속으로 흐를 경우에 발생하는 shockwave 도 Glow 방전의 안정도를 크게하는 역할을 한다 [7]. 또한 레이저 매질의 유속을 빠르게 하면 instability의 growth time (1 ms) 이내에 방전관내의 레이저 매질이 교환될수있기때문에 Glow-to-Arc transition 을 억제할 수 있으며 분해시간이 0.1 s - 1.0 s 인 CO₂의 분해에 의한 레이저출력이 감소할 방지할 수 있는 장점이 있다 [3]. 그외에도 동일한 조건의 방전관에서 균일한 Glow 방전을 유지하면서 전기입력을 크게 하기 위해서 여러 개의 전극을 (Multiple electrodes) 사용하기도 한다 [9],[10].

본 논문에서는 레이저 매질의 냉각 방법에 따른 탄산 가스 레이저의 분류와 안정된 출력을 갖는 고출력 탄산 가스 레이저 개발을 위해서 제작한 고출력 fast-axial-flow CO₂ laser의 설계특성 및 제작에 대해서 기술 하였다.

II. 레이저 매질의 냉각 방법에 따른 레이저의분류

연속출력 탄산가스레이저는 레이저 매질의 냉각 방법에 따라서 다음과 같이 3가지로 분류할 수 있다 [8].

첫째는 Fig.1의 (a)와 같이 방전관에서 발생하는 열을 기체분자의 확산에 의해서 관벽을 통하여 냉각수에 전달함으로써 레이저 매질을 냉각하는 형태로서 (diffusively cooled CO₂ lasers) 레이저 매질의 순환은 냉각에는 기여하지 않고 여러가지 plasma-chemical reaction에 의한 레이저 매질의 오염을 방지하기 위해서 필요하다.

이 형태의 탄산가스 레이저에서 레이저 출력은 공진기의 직경에는 무관하며 공진기의 길이에 따라 증가하는데[3] 공진기의 길이 (L)는 화철에 의해서 제한된다 [8].

$$\text{즉, } L_{\max} \leq R/2\nu_{\text{eff}} \approx R^2/2l$$

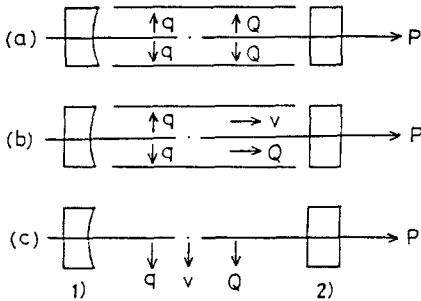


Fig. 1 Types of CO₂ lasers
 v: gas flow velocity, Q: heat flux,
 q: charged particle flux, P: laser output,
 1): total reflector, 2): output coupler.

여기서 v_{eff} 는 1.22 / R로서 파장이, 빔의 반경이 R인 레이저 빔의 회절에 의한 divergence를 나타낸다. 따라서 $\lambda = 10.6 \text{ m}$ 인 탄산가스 레이저에서 $R = 1-3 \text{ cm}$ 일 경우 $L = 5 - 50 \text{ m}$ 이며 이 형태의 탄산가스 레이저의 단위 길이당 레이저출력은 50 - 100 W/m로서 이 형태의 탄산가스 레이저에서 얻을 수 있는 최대출력은 0.3 - 3 kW 정도이다.

둘째는 Fig.1의 (b)와 같이 형태는 기체분자의 확산에 의해서 레이저 매질을 냉각시키는 형태와 같으나 레이저 매질의 속도를 크게하여 (> 100 m/s) 기체분자의 thermal wall relaxation time 보다 더 짧은 시간내에 방전관 밖으로 빠져 나가게하여 방전관내의 레이저 매질을 냉각시키는 형태 (fast-axial flow CO₂ lasers)이다 [11], [12]. 이 형태의 탄산가스 레이저에서 레이저출력은 공진기의 길이보다는 레이저 매질의 massflow rate에 따라 증가하며 Glow방전의 불안정에 의해서 제한된다.

일반적인 fast-axial flow CO₂ lasers에서 단위길이당 레이저출력은 500 ~ 1,500 W/m로서 연속출력 2 - 6 kW 까지 개발되어 있으며 전극과 기체 주입구 등의 형태를 개선하여 60 cm 길이의 공진기에서 3.6 kW의 레이저출력을 얻은 경우도 있다 [10].

세째는 Fig.1의 (c)와 같이 레이저 매질이 광축과 수직방향으로 흐르는 convective cooling 형태 (transverse flow CO₂ lasers)이다 [2],[3]. 이 형태의 탄산가스 레이저에서 레이저출력은 레이저 매질의 온도상승보다는 glow방전의 불안정에 의해서 제한되며 단위길이당 레이저출력은 1 ~ 100 kW/m로서 레이저 매질의 mass flow rate와 방전 방법 등에 따라서 좌우된다. 현재 수 kW 이상의 고출력 탄산가스 레이저에서는 주로 이 방법이 사용된다. 이 형태의 탄산가스 레이저에서는 많은양의 레이저 매질을 순환시켜야 되기 때문에 경제적인 면에서 closed-cycle operation을 해야 하며 레이저 매질의 성분은 작동중에 레이저 매질의 일부가 교환되도록 하거나 재생장치를 설치하여 일정하게 유지시킬 수 있다.

레이저 매질의 냉각 방법에 따른 분류에서 위의 3가지 형태외에도 slow-axial-fast transverse CO₂ laser [14]와 multichannel diffusively cooled CO₂ laser [8] 등이 있다.

III. 고출력 fast-axial flow CO₂ laser 설계 및 제작

Fig.2와 Fig.3는 각각 제작된 fast-axial flow CO₂ laser system의 개략도와 사진을 나타낸다. 제작된 fast-axial flow CO₂ laser는 레이저 공진기, 전원 및 전극, 기체순환시스템등 크게 3부분으로 나눌 수 있는데 공진기는 직경이 50 mm, 길이가 180 cm이며, 실리콘 전반사 거울과 10.6 μm 파장에서 반사율이 50%인 ZnSe 반투과 거울로 구성하고 전반사 거울은 뒷면을, 반투과

거울은 측면을 냉각할 수 있도록 제작 하였다.

전원은 25 kV, 600 mA의 용량을 갖는 직류전원을 사용 하였으며 양극은 알루미늄으로 원통형으로 제작하여 배기구 근처에 설치하고 음극은 Fig.4와 같이 방전관 내에서의 균일방전과 전기입력을 크게하기 위해서 광축주위로 6개를 설치하였으며 각각의 음극에 Ballast resistor를 연결하였다. 이들 6개의 음극은 기체 주입의 역할도 하는데 방전관내에 레이저 매질이 균일하게 주입되고 방전관내에서 turbulence를 크게하기 위해서 노즐 형태로 제작하였다. 양극과 음극의에 보조전극을 사용해서 레이저출력을 안정화[15]하기 위해서 각각의 음극앞에 핀 형태로 제작한 보조전극을 설치하였는데 이 보조전극은 출력안정화에도 방전의 ignition과 6개의음극이 균일하게 방전하도록하는데도 이용될 수 있다. 양극과 음극사이의 거리는 80 cm이며, 양극과 6개의 음극모두 절연유를 사용하여 냉각할 수 있도록 제작하였다. 제작된 fast-axial flow CO₂ laser는 closed-cycle 형태로서 많은 양의 레이저 매질을 순환시키기 위해서 pumping speed가 2005 m³/h 이고, max. allowable pressure difference가 80 mbar 인 roots pump를 사용하였으며 초기의 기체배기와 작동중에 레이저매질의 일부를 교환하기 위해서 mechanical pump를 사용하였다. 레이저 매질이 방전관으로 들어가는 주입구 부분은 직경 10 mm인 노즐 6개를 광축주위로 광축과 30 경사로 설치하였으며 이들은 동시에 유극으로 사용된다. 방전관에서 레이저 매질의 배기구는 T자형 stainless-steel로 제작하여 양극과 전반사 거울 사이에 설치하였으며 roots pump와 방전관 사이의 각 연결부는 pyrex tube를 사용하였다. 냉각 시스템은 기체의 냉각과 전극 및 거울을 냉각하는 절연유의 냉각으로 구성되는데 기체의 냉각장치는 방전관의 기체 주입부분과 배기부분에 각각 설치하였으며 전극 및 거울을 냉각하는 절연유는 oil/water heat exchanger에 의해서 절연유를 냉각할 수 있도록 하였다.

IV. 실험결과 및 결론

CO₂: N₂: He = 1 : 2 : 10인 상태에서 Ballast resistor의 저항값을 변화시키면서 실험을 수행하였는데 6개의 음극 각각에 연결되는 저항의 저항값이 10 kΩ일때 양극에 인가되는 전압이 4.5 kV, 전류가 450 mA 이상이 되면 방전이 불안정하게 되었다. 즉, 6개의 음극중 일부만 방전되었으며 저항값이 50 kΩ일때는 양극에 인가되는 전압이 12 kV, 전류가 240 mA 이상이 되면 방전이 불안정하게 되었다. 이것은 6개의 음극이 병렬로 연결되기 때문에 전체 Ballast resistor의 저항이 너무 작기 때문인 것으로 판단된다. Fig.5는 방전되고 있는 상태의 음극 부분을 나타내며, Table 1.은 저항값이 100 kΩ일때 양극에 인가되는 전압, 전류와 레이저출력 및 효율을 나타낸다. 여기서 효율은 Ballast resistor에서 소모되는 전력을 포함해서 계산한 값이다. 저항이 100 kΩ일 경우 양극에 인가되는 전압이 15 kV 이상이 되면 양극과 양극에서 약 2.5 m 떨어져 있는 열교환기 사이에서도 방전이 일어나서 전력손실이 커지게 되었다.

실험에서 보조전극에 약 200 V의 전압을 인가하면 보조전극과 음극 사이에서 6개 모두 방전이 일어났으며 이 상태에서 양극에 인가되는 전압을 서서히 증가시키면 양극과 음극 사이의 방전이 보조전극에 전압을 인가하지 않았을 경우보다 쉽게 일어나는 것을 확인하였다.

제작된 fast-axial flow CO₂ laser에서는 양극에 인가되는 전압이 15 kV, 전류가 270 mA일때 레이저출력 540 W, 효율 13.3%를 얻었으며 양극과 열교환기 사이의 방전 문제점을 개선하면 레이저출력 및 효율이 더 증가할 것으로 기대한다.

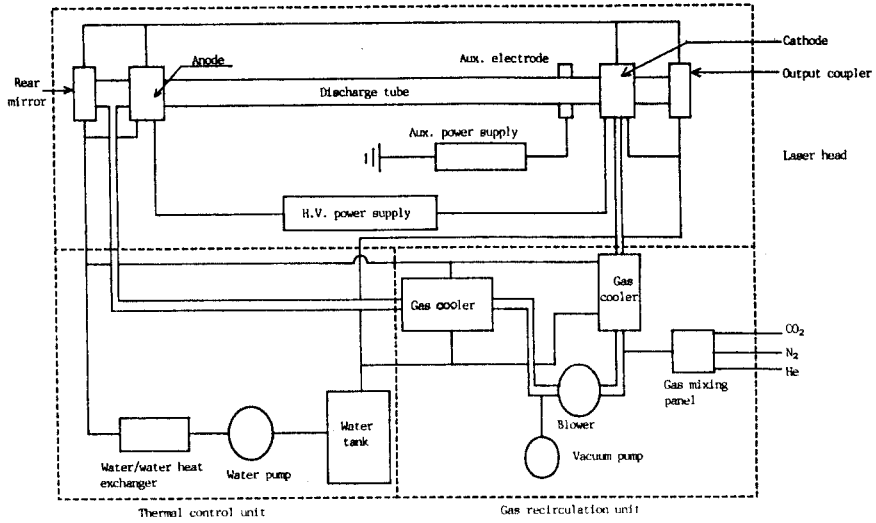


Fig. 2 Schematic diagram of the fast-axial flow CO₂ laser system.

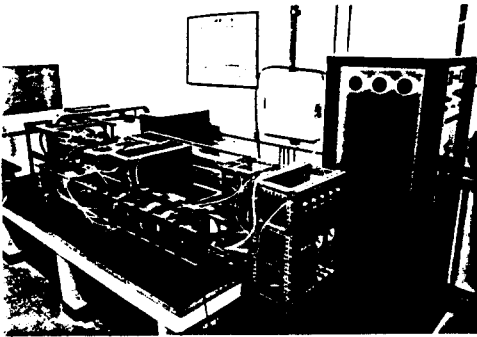


Fig. 3 Photograph of the fast-axial flow CO₂ laser system.

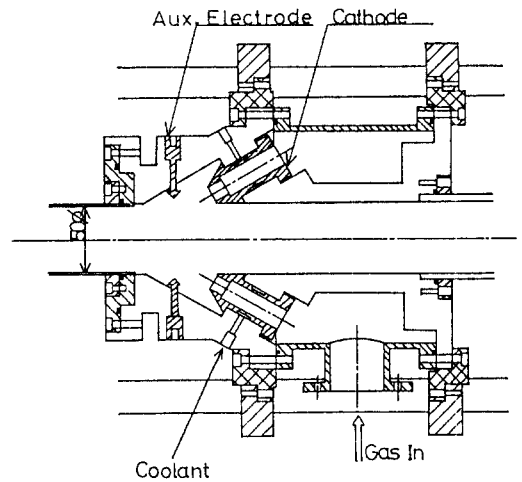


Fig. 4 Schematic diagram of cathode region.

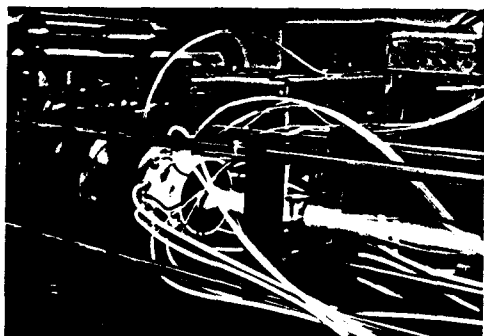


Fig. 5 Photograph of cathode region in electrical discharge.

Table 1. Operating characteristics of the fast-axial flow CO₂ laser.

| Electrical Input | | Output Power | Efficiency |
|------------------|--------|--------------------|------------|
| V [kV] | I [mA] | P _o [W] | [%] |
| 12.0 | 210 | 250 | 9.9 |
| 13.0 | 220 | 400 | 14.0 |
| 14.0 | 260 | 480 | 13.2 |
| 15.0 | 270 | 540 | 13.3 |

참고문헌

- [1] C.M. Banas and R. Webb, Proceedings of the IEEE 70, 556 (1982)
- [2] Allen E. Hill, Appl. Phys. Lett., 18,194(1971)
- [3] R. H. Bullis et. al., AIAA Journal 10,407 (1972)
- [4] Allen E. Hill, Appl. Phys. Lett., 16,423 (1970)
- [5] Anthony J. Demaria, Proceedings of the IEEE 61, 731 (1973)
- [6] Alan C. Eckbreth and Frank S. Owen, The Rev. Sci. Instrum 43,995 (1972)
- [7] E. Wasserstrom, et.al., J. Appl. Phys., 49,81 (1978)
- [8] G. A. Abil' siitov, et. al., Sov. J. Quantum Electron, 11, 1535 (1981)
- [9] J. E. Harry and S. N. Saleh, Appl. Phys. Lett., 40,359 (1982)
- [10] Laser Focus/ Electro-Optics, 22(5), 24 (1986)
- [11] Thomas F. Deutsch, et. al., Appl. Phys. Lett., 15, 88 (1969)
- [12] R.E. Beverly III, Optical and Quantum Electronic 14,25 (1982)
- [13] Kaung-Hsiung Wu, IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-23, 1981 (1987)
- [14] Laser Focus/ Electro-Optics,22(4), 123 (1986)
- [15] D. J. Shin, et. al., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (will be published in the April 1989)

*. 본 연구는 과기처 특장연구로 수행되었음