

저속축류형CO₂ 레이저의 개발

장근호*·김도열**·송정태**
·최홍근**·이병하 †

*금성전선(주) 전무이사 소장
**금성전선(주) 연구소 7부문 연구원
† 서울대학교 대학원 물리학과 석사과정

차례

- I. 서 론
- II. 레이저 설계
 - 2.1 이론
 - 2.2 구성
- III. 실험결과 및 고찰
- IV. 결 론

I. 서 론

레이저광의 특성은 지향성과 단색성이 우수하고 높은 에너지 밀도를 갖고 있다는데 있다. 이러한 레이저광을 렌즈로 초점면에 집광 시킴으로서 물질을 가열, 용융, 증발 시킬 수가 있다. 1964년에 CO₂레이저가 출현¹⁾ 하면서 제일 먼저 시도된 응용중의 하나가 바로 이 특성을 이용한 레이저 가공이다.

그후 여러가지 종류의 레이저가 개발되고 고출력화함에 따라 레이저 가공분야는 계속적인 발전을 이룩하여 근년에 와서는 금속, 비금속 재료의 절단, 천공, 용접, 전자부품의 미세가공, 금속및 반도체의 표면처리, 마킹, 세라믹 가공등에 광범위 하게 응용 되고 있어 레이저 가공의 실용화 시대에 들어 섰다고 할 수 있다.

본 연구는 이미 학계등을 통하여 많은 연구가 되어있는 저속 축류형 (Slow Axial Flow Type) CO₂레이저를 설계, 제작, 시험하여 산업용으로의 응용을 위한 시스템으로 개발 하는데 그 목적이 있다.

II. 레이저 설계

2.1 이 론

2.1.1 공진기 배열²⁾

플라즈마 튜브와 그 양끝을 밀봉하는 반사경들로 구성된 공진기의 설계는 안정된 모드를 발진 (stable resonator) 시키기 위해서 판정식 (1)에 의해 구성한다.

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1 \quad (1)$$

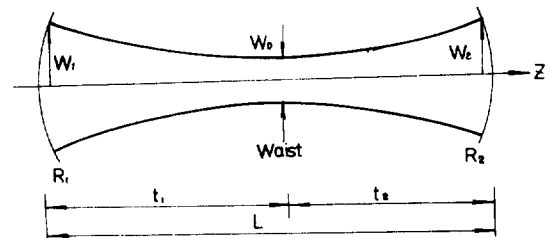


그림1. 공진기 배열

여기서 R_1 과 R_2 는 양쪽 반사경들의 곡률반경이며, L 은 두 반사경 사이의 간격이다.

반사경의 크기가 유한하다는 조건에 기인된 회절효과를 무시하자. 그림1은 파면(wave front)곡률 R_1 을 갖고 가우시안빔(Gaussian beam)이 빔의 허리(beam waist)로부터 t_1 거리에 있는 경우의 공진기 배열을 나타낸 것이다.

이때 반사경에서 빔의 반경은

$$W_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi}\right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right) \quad (2)$$

$$W_2^4 = \left(\frac{\lambda R_2}{\pi}\right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right) \quad (3)$$

이고,

빔허리(beam waist)의 반경은

$$W_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (4)$$

이다.

본 연구에서 구성한 반사경 하나의 곡률반경이 무한대(∞)인 경우의 plano-concave 공진기에서는

$$W_1^2 = W_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) [L(R_2 - L)]^{1/2} \quad (5)$$

$$W_2^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) R_2 \left(\frac{L}{R_2 - L}\right)^{1/2} \quad (6)$$

이다. 이때 빔의 허리 W_0 는 flat($R_1 = \infty$)인 반사경에서 형성된다. ($t_1 = 0, t_2 = L$)

2.1.2 레이저 빔의 집광

레이저 빔이 재료를 가공하기 위해서는 집속이 되어야 한다. 레이저 가공기의 가공조건을 결정하는데에는 빔의 깊이(depth of field)와 빔의 최소 집광 지름(the minimal focussed diameter)은 중요한 요인이 된다.

레이저 빔의 지름을 $2W_1$ 이라고 칩점 거리 f 인 렌즈를 사용할 경우 최소 집광 지름과 집광 깊이는 다음과 같다.

$$2W_2 = \frac{4\lambda f}{\pi W_1} \quad (= \text{최소 집광 지름}) \quad (7)$$

$$b = \frac{2\lambda}{\pi} \cdot \left(\frac{f}{W_1}\right)^2 \quad (= \text{집광 깊이}) \quad (8)$$

집광되는 영역에서 waist가 존재 하는것은 렌즈의 중

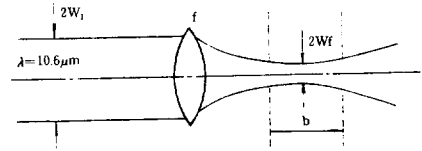


그림2. 레이저 빔의 집광

심을 통과하는 빔이 렌즈의 가장자리를 통과하는 빔과 동일한 평면상에 집광되지 않으므로 야기된다.

2.1.3 냉각기

전원의 입력 Power중 레이저 발진 출력을 제외한 나머지 열량은 레이저 효율이 떨어지지 않도록 하기 위하여 방전관으로부터 제거 해야한다. 이를위해 냉각기는 추출해야 할 전열량 보다 냉동열량을 크게하는 냉동 cycle로 구성해야 한다. 이때 증발기(Evaporator)의 크기는 선정된 냉각유체에 준하여 열 교환변수(식9의 L)인 유량 및 냉각관의 직경과 전열면적(A) 항의 냉각관 길이와의 상호 관계로 부터 적정치를 구할 수 있다. 관계식은 다음과 같다.

$$Q = UA\Delta T_m^3 \quad (9)$$

$$T_m = \frac{(T_{fo} - T_{oo}) - (T_{fi} - T_{oi})}{\log \left(\frac{T_{fo} - T_{oo}}{T_{fi} - T_{oi}} \right)} \quad (10)$$

Q : 전열량

U : 열 교환 계수 (Overall Convection Coeff.)

A : 전열면적

T_{oi}, T_{of} : 냉각유체의 입, 출 온도

T_{fi}, T_{fo} : 냉매의 입, 출 온도

2.2 구성

본 연구에서 구성한 전체 시스템은 크게 나누어 방전관(Laser Cavity)과 기체 공급단(Gas system), 냉각단(Cooling system), 고전원부 및 전원 조절단(Power supply and control system)으로 나눌 수 있다. 시스템 개요도는 그림3과 같다.

본 연구의 시스템 설계 과정에서 중요하게 고려한 사항은 방전관의 역학적 안정성과 전원단의 안정성 및 신뢰성에 두었다. 레이저 방전관에서 광부품은 방전관에

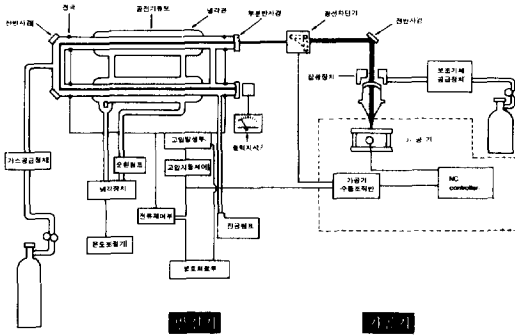


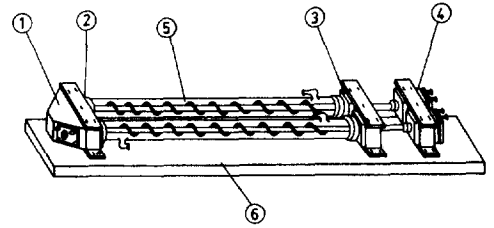
그림3. 레이저 구성도

(* 가공기는 가공실험 목적으로 부착한 것임)

정확하게 (accurately), 그리고 강체처럼 (rigidly) 부착되어야 한다. 왜냐하면 방전관의 구조물은 온도 변화에 민감하기 때문이다. 따라서 설계상에서 구조물의 크기, 무게, 역학적 견고성, 온도에 무감각한 정도에 대해 많은 고려를 해야 했다. 또한 반사경 홀더 (mirror holder)는 각도변화를 시킬수 있어야 한다. 이는 역학적 구조물의 가공 오차에 의한 반사경 정렬 풀림현상(Mirror alignment)을 보상하기 위함이다. 전원부에서는 방전에 필요한 고압을 발생 시키는 고압 발생부와 방전관내에 흐르는 방전전류를 제어하는 전류 제어부, 방전시 안전사고에 대한 보호 회로부 및 레이저 발진을 위한 주변 여건들인 기체비, 냉각온도, 관내 압력 등이 정상이 아닐 경우 고전압을 중지 시키는 안전 회로부를 구성했다.

2.2.1 방전관

본 연구에서 구성한 공진기는 Plano-Concave로 반사율 65%인 ZnSe 재질의 출력경과 굴곡률 10m인 GaAs 재질의 전반사경을 사용했다. 공진기 길이는 2.62m로 전반사경 2개를 이용하여 「ㄷ」자 구부림 형태로 구성했다. (그림4) 이때 출력빔의 직경은 8mm 이었다. 열적 영향에 의한 방전관의 변형을 최소화 하기 위하여 방전관 고정판 (그림4-6)을 화강암(두께 100mm)으로 했다. 유효 방전 길이를 크게 하면서 전체 크기를 줄이기 위해 전반사경 2개를 양극(Anode)에 직접 붙였으며 음극(Cathode)은 방전 전자에 의한 반사경 손상을 없애기 위해 적정거리를 유지했다. 플라즈마 튜브의 재질은 Glass 계로 내부에는 공진관을, 외부에는 냉각관이 결합된 이



- ① :전반사경 홀더
- ② :양극(Anode)
- ③ :음극(Cathode)
- ④ :출력경 홀더
- ⑤ :냉각관이 연결된 공진기 튜브
- ⑥ :방전관 고정판

그림4. 방전관 구조

중관으로 했다. (그림4-5)

2.2.2 반사경 조절기

반사경이 부착된 반사경 조절기는 곡면의 형상을 한 두 금속 사이의 미끄러짐 (Sliding)에 의해 조절되며 조절 가능한 각도는 ±5°이다. 재질은 Al 합금이며 크기가 약 70×70×45(mm)인 조절기는 인장 스프링과 나사의 이동에 의해 구동되며 각도의 변형에 따른 나사의 움직임을 가능케 하기 위해 나사와 고정된 블록의 접촉부에 와샤(Position Washer)를 삽입하였다. 그림5는 이 조절기의 조립도이다. ①은 조절나사이고, ②,③은 조절나사와 moving plate와의 상대운동을 가능케 해주는 와샤이며, ④는 반사경의 조절을 가능케하는 moving plate이

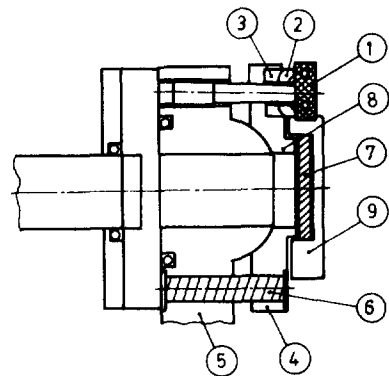
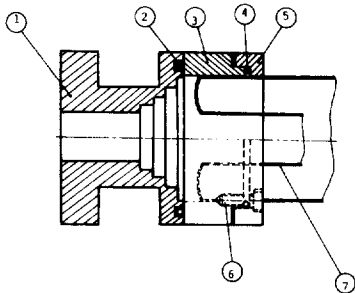


그림5. 반사경 조절기

고, ⑤는 고정블럭, ⑥은 인장 스프링이며, ⑦은 반사경, ⑧은 반사경 보호판, ⑨는 반사경 고정판이다.

2.2.3 전극구조

전극은 각각 2개의 양극과 음극으로 구성되어 있으며 재질은 stainless steel이다. (그림6) 전극의 형상은 계단면을 형성하고 있는데 이는 효과적인 전기장의 형성과 아울러 음극쪽의 반사경 보호를 위한 것이다.



- ①: 전극
- ②, ④: O-ring
- ③: 방전관 지지판
- ⑤: spacer
- ⑥: O-ring 압축용 나사
- ⑦: 공진기 튜브

그림6. 전극의 구조

2.2.4 기체공급장치

방전관을 진공으로 한 다음 미량의 CO₂, N₂, He 기체를 공급하는 기체공급장치는 Rotameter를 이용했으며 방전관과 진공펌프 사이에 밸브를 두어 pumping speed의 조절이 가능하게 했다. 진공펌프는 용량 300 l/min을 사용했으며 leakage valve를 설치 발진 중지시 진공오일의 역류를 방지했다. 기체 공급장치의 구성은 그림 7과 같다.

그림7에서 압력 스위치는 입력 기체의 하한선 압력을 설정하여 하한 압력을 못 미칠 경우 고압전원부를 차단시키는 역할을 한다. Relief valve는 입력 기체 압력의 상한선을 설정하여 높은 압력의 기체가 들어올 경우 밸브로 유출 되어 방전 관내 기체 압력의 변화를 최소화

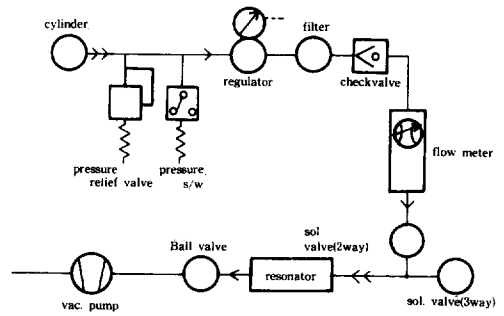


그림7. 기체공급장치의 구성

시킨다. 그림7의 3way Solenoid Valve는 레이저 동작 중지시 진공펌프의 작동중지와 더불어 동작하여 방전관을 대기압으로 유지 시킨다.

2.2.5 냉각장치

공진기 튜브로 부터 방출되는 열량을 제거하기 위하여 이에 해당하는 냉동 cycle을 선택하고 증발기를 이용하여 열을 흡수한다. 이를 위한 열교환기의 크기를 식(9)에 의해 구하여 제작했다. 열교환계수 (식(9)의 U)를 결정할때 관련이 되는 Oil의 flow rate와 냉매의 flow rate 결정은 압축기가 정해지면 고정되므로 오일의 flow rate를 최소값으로 계산하여 설계하고 안전율을 부가했다. 본 연구에서는 온도의 조절이 가능 하도록 하기 위하여 냉동 cycle을 30% 정도 부가하여 설계 했다. 그림 8은 냉각기의 계통도이다.

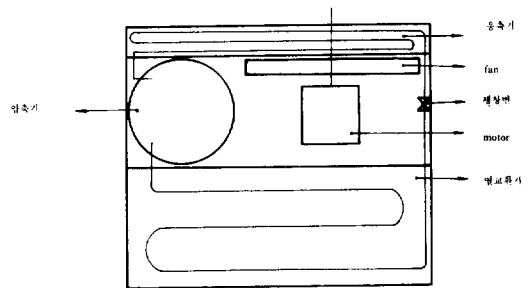


그림8. 냉각기의 계통도

2.2.6 광선 차단기

레이저 빔을 이용하여 재료가공을 할 경우 가공기의 프로그램에 의해 동작하는 빔의 on-off 기능인 광선 차단기(Beam shutter)가 부착되어야 한다. 본 연구에서

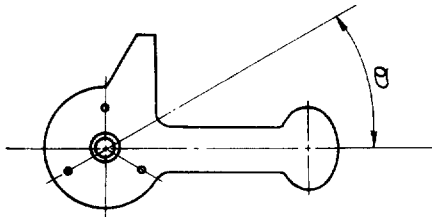


그림9. 광선 차단기 거울형상

는 슬레노이드를 이용, 그림9와 같은 광선 차단 거울을 구동했다. 슬레노이드는 광선차단 거울의 관성 모멘트를 측정하고 광선 차단기 구동시간 (run time)을 결정하고 슬레노이드의 Torque를 계산하여 선정했다.

광선 차단기에 부착되는 beam trap 설계는 beam trap 재질의 흡수율을 고려하여 trap 내에서 빔의 반사 횟수를 계산 설계했다. 흡수율을 ϵ 이라 하고 출력(p)을 100W로 할 경우 ϵ 은

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P\epsilon & P &= 100W \\
 P_2 &= P_1\epsilon = P\epsilon^2 & P_1 &= 1\text{번 반사후의 출력} \\
 P_4 &= P\epsilon^4 & P_4 &= 4\text{번 반사후의 출력} \\
 P_4 &= \frac{1}{100} P \\
 0.01 &= \epsilon^4
 \end{aligned}$$

즉 $\epsilon=31\%$ 가 된다.

Stainless steel의 Oxidized 된것은 $\epsilon=33\%$ 이상이고 Al의 anodized 된것이 $\epsilon=80\%$ 이다.

2.2.7 전원장치

전원장치는 입력전압 220VAC를 승압하여 최고 20KVDC 전압을 발생 하도록 고전압 발생부를 구성 했다. 방전 전류의 제어는 연속 제어인 경우 100mA까지, 펄스 제어의 경우 100mA, 1KHz까지 가변이 가능 하도록 구성했다. 본 시스템의 고전압 자동 제어는 Thyristor를 이용 했으며 안전 차단부를 부착하여 안전성을 고려 했다. 전원단 전체의 블록 다이어 그램은 그림10과 같다.

방전 전류 제어는 Transistor 베이스 전류를 변화 시킴으로서 콜렉터 전류를 제어하면 이것이 진공관의 전류 sink가 되게 된다. 또한 베이스 전류를 변환시켜서 방전 전류를 펄스 형태로도 제어가 가능해 진다. 기체 레이저의 일반적인 I - V 특성곡선에서 알 수 있듯이 레이저의 초기 방전시에는 높은 직류 고전압의 공급이

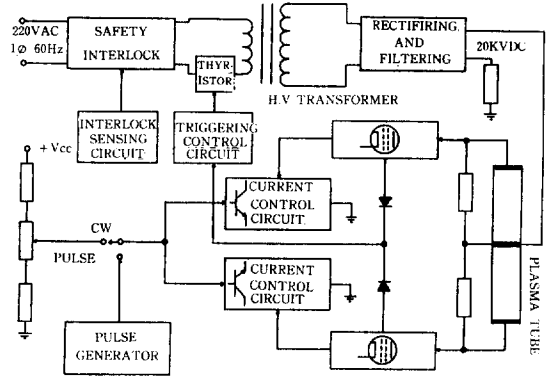


그림10. 전원단의 계통도

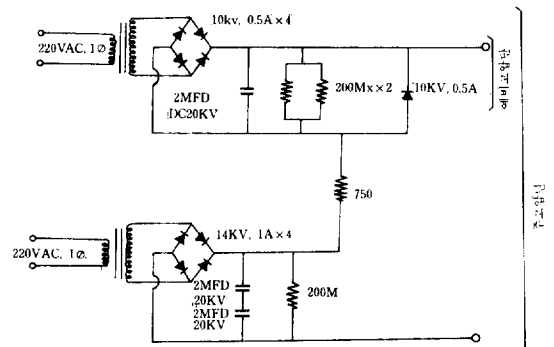


그림11. 고압 전원 장치

필요 되지만 일단 방전 후에는 이보다 낮은 방전 유지 전압만을 공급하면 된다. 방전 유지 전압 이외의 전압은 진공관 플레이트에 걸리게 되는데 이는 레이저 빔 출력에 아무런 영향을 주지 않을 뿐더러 전력면에서 커다란 손실이 된다. 따라서 진공관 플레이트 전압을 감지하여 방전 유지 전압만을 공급 하도록 트랜지스터의 gate 신호의 triggering 위치를 변화시켜 고압 변압기의 입력 전원의 크기가 변화 되도록 시스템을 구성 했다. (그림 11)

방전관내에 흐르는 전류를 제어 하기위해 구성된 회로단인 전류 제어부는 고출력 진공관과 트랜지스터 회로단으로 구성된다. 그림12에서 OP.-Amp. 는 Voltage follower 이며, 트랜지스터는 Current Sink로 동작한다. 즉 OP.-Amp. 출력 전압에 비례한 베이스 전류에 트랜지스터 전류 증폭률 h_{FE} 를 곱한 전류량이 방전관내에 흐르도록 되어있다. OP.-Amp. 입력단을 CW 혹은 Pulse 전압을 인가 함으로서 그에 상응하는 방전 전류를 제어

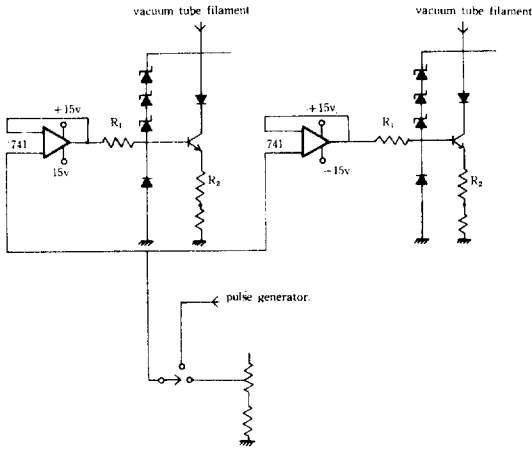


그림12. 전류 제어단 회로

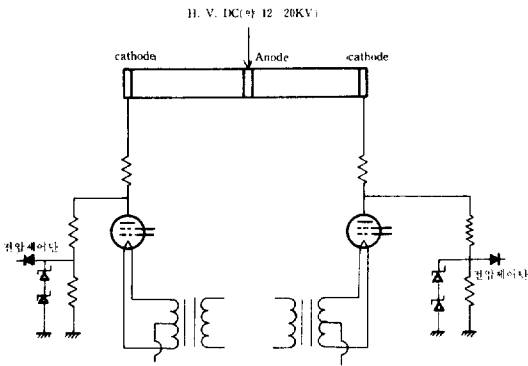


그림13. 고압 진공관 회로

할 수 있다. 고출력 진공관단은 그림13과 같이 진공관이 있어 앞서 설명한 트랜지스터 회로단으로부터 제어된 전류량이 강제적으로 진공관 플레이트로부터 필라멘트로 흐르게 되고, 진공관 필라멘트 전원용 변압기의 2차 측 중간 tap의 D.C 전압이 4극 진공관의 특성에 의해 정해지게 된다. 즉 진공관의 Control grid 전압이 상대적으로 변하게 된다. 그리고, Screen grid 전압은 Current regulation이 되는 진공관 플레이트 전압을 경정해주며, Screen grid 전압보다 플레이트 전압이 다소 높을때부터 4극 진공관의 I - V 특성에 의해 정전류를 시킨다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

레이저 빔의 출력은 식11에 의하여

$$P = TW = \frac{T}{S} \left(\frac{G}{A+T} - 1 \right)^4 \quad (11)$$

이득G와 포화상수 S는 기체의 혼합 비율, 유속, 압력, 온도, 방전 전류 및 관의 크기에 따라 달라진다.⁵⁾⁻¹³⁾

이에따라 본 실험에서는 방전관의 크기를 내경 19mm, 길이 2.62m로 구성하고 방전 전류, 기체 혼합비, 압력, 온도 및 진공펌프의 Pumping speed 조절에 의한 유속을 가변하여 최적 조건을 찾았다.

기체 혼합비에 대한 출력 변화 실험은 그 정확성을 기하기 위해 Mass flow meter를 사용했다. mass flow meter는 기체 온도의 상승이 가한 열량 및 mass flow rate와 기체 특성에의 종속 관계로부터 센서 튜브에 Thermo meter를 부착하여 입력 압력 변화에 관계없이 일정량의 기체를 공급하는 장치이다. 기체 혼합비 실험은 CO₂:N₂:He의비(ratio)를 1:1:8로부터 시작하여 N₂, He을 고정하고 CO₂를 가변시켜 최대 출력을 찾은 다음 CO₂, He를 고정하고 N₂를, CO₂, N₂를 고정하고 He을 가변하는 과정을 반복하여 최대 출력시 관내압력 23.5Torr, 방전 유지 전압 10KVDC, 냉각온도가 25℃일때 기체 혼합비가 1:6:13임을 알 수 있었다. 일반적인 경우 최대 출력시 기체비가 1:1:8인 경우에 비해 N₂ 및 He량

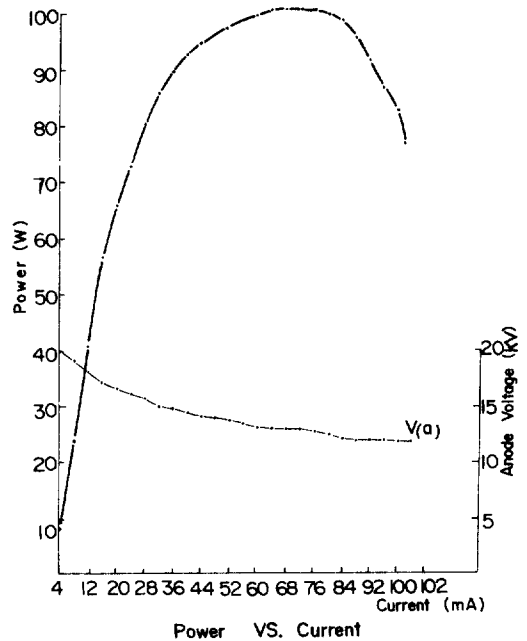


그림14.

이 더 많은 이유는 본 시스템의 방전 조건과 냉각 효율에 의한 차이로 고려된다.

그림14는 방전 전류를 가변할때 출력및 양극 전압의 변화를 나타낸 것이다. 방전 전류를 4mA에서 100mA까지 가변한 결과 전류 64mA에서 최대 출력 100watts를 얻을 수 있었고 이때 양극 전압은 13KVDC이었다. 전류를 76mA이상 증가 시킬 경우 빔 출력이 급격히 줄어들었다. 이는 레이저 매질에 가하는 에너지를 증가시킬 때 어떤 에너지 이상으로 부터는 이득(Gain)이 증가하지 않게되어 출력이 감소하는 포화 현상이 생긴 것으로 이러한 이득 포화 현상은 CO₂의 (00°1)준위의 진동 온도가 높은 에너지가 가해질 경우 포화 됨으로 야기된것으로 해석된다. ¹⁴⁻¹⁶⁾

냉각온도를 상온(25℃)으로 유지 시키고 레이저 발진 후 (냉각유량 18 l / min) 측정된 냉각유체의 입출 온도는 입력단이 25±1℃ 이고 방전관 통과 후의 출력 온도는 27±1℃이었으며 기체온도는 입력단이 16.5±1℃ 이고 출력단은 18.5±1℃ 이었다. 그림15는 냉각유체를 정지 시킨후 시간에 따른 출력 변화를 측정한 것이다. 이로부터 냉각을 시키지 않을 경우 75Watts의 출력빔이

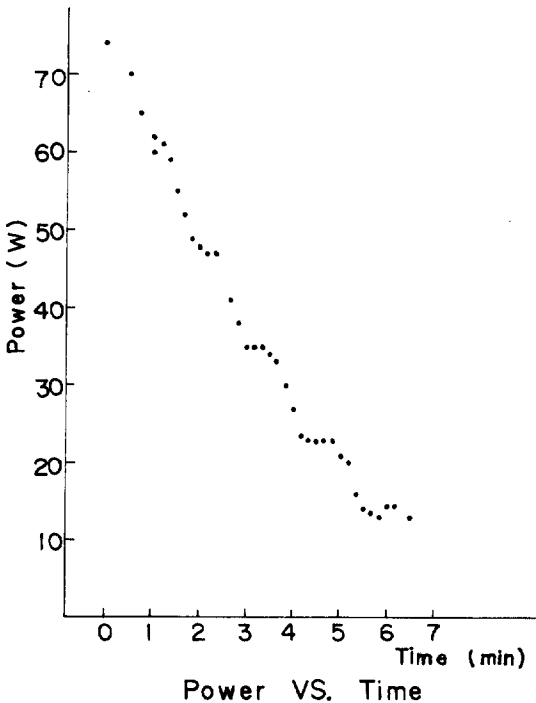


그림15.

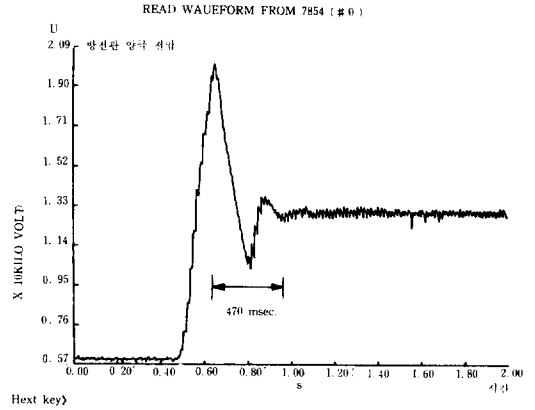


그림16. 시간의 경과에 따른 공진기 튜브의 Anode 전압 변화

6분후에는 15Watts로 감소하여 분당 10Watts의 출력 감소가 일어남을 알 수 있었다. 이는 CO₂ 레이저의 lower level은 기저 상태에서 1400Cm⁻¹ 정도 밖에 떨어져 있지 않으므로 방전시 전기적 에너지에 의해 온도가 상승하므로 냉각 시키지 않을 경우 출력 감소 현상이 일어난 것이다.

방전 유지 전압과 방전 개시 시간을 알기 위해 시간에 따른 공진기 튜브의 양극 (Anode) 전압 변화를 관측했다. (그림16)

최대 출력 발진 조건하에서 양극 전압 변화 과형을 나타내는 그림16으로부터 20KVDC에서 방전이 개시되고 플레이트 전압 궤환되어 13KVDC 에서 방전이 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 진공관 플레이트에 걸리는 전압이 3KVDC이므로 방전 유지 전압은 10KVDC임을

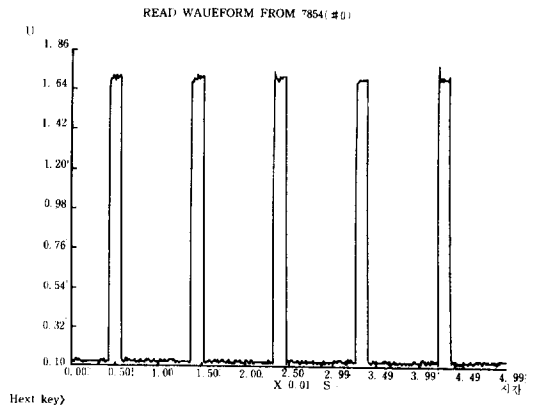


그림17. 시간에 따른 전류 제어용 Tr의 에미터 전압

알 수 있다. 또한 방전 개시 직후부터 정상상태까지의 걸리는 시간은 약 470m sec임을 알 수 있었다.

그림17은 방전 전류를 제어 했을때 방전관내로 흐르는 전류의 파형을 관측한 파형이다. 한쪽 방전관 전류 펄스의 크기는 순시치 36mA이며 펄스 반복률 (Pulse Repitition Frequency)은 100, Duty factor는 15%이다. 이 실험에서는 연속 출력 78W로 발진 시키고 펄스 모드로 변환하여 발진을 시켜 본 것으로 평균 출력은 25W, 펄스 최대 출력 167W를 얻었다.

출력빔 모드의 형상은 그림 18과 같다. 두 모드형상은 20분 간격으로 관측 한 것으로 ①은 출력 100W 일때의 멀티모드(Multi mode)이고, ②는 출력이 60W로 감소된 모습이다. 이러한 출력 감소 현상은 레이저 발진시 진공에서 발생된 열로 인하여 반사경 조절기의 조절나사가

인장 스프링(그림5)과 더불어 미세한 플림 현상이 일어나 반사경의 정렬 플림 현상(Missalignment)이 일어난 것으로 해석된다. 이러한 반사경 플림이 일어나 ②의 모드가 발진하여 출력이 안정화 되었을때 다시 반사경을 정렬시켜 (alignment) 최대 출력으로 발진 시켜야 하는 불편함을 갖게된다. 반사경 조절기의 인장 스프링과 조절나사를 충분히 보강하고 전구 냉각을 효율적으로 시킨후 20분 간격으로 관측한 모드의 형상은 그림 19와 같다.

초점거리 2.5'인 렌즈를 이용하여 최소 집광 지름 0.2mm, 집광 깊이 1.8mm, 에너지 밀도 3.2×10^5 Watts/cm²를 얻었다. 그림20의 ①은 100W 출력의 빔으로 세라믹에 스크라이빙을 한 예이고, ②는 80W 출력으로 호도나무

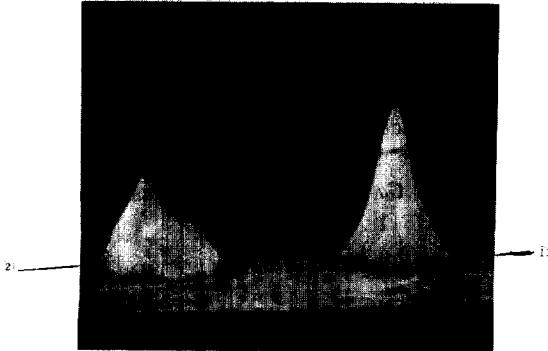


그림 18.

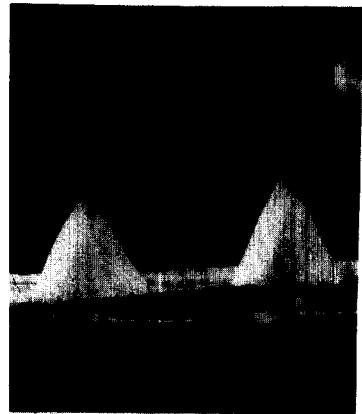


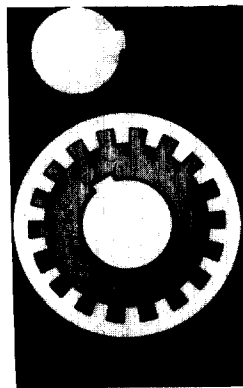
그림 19.



①



②



③

그림20. 비금속 재료 가공의 예

에 조각을, ③은 아크릴과 나무를 기어 형상으로 절단하여 짜 맞추어 본 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 비금속 재료 가공에 적합한 100W 출력의 저속 축류형 (Slow Axial flow type) CO₂ 레이저를 제작 한 것이다. 최대 출력은 CO₂:N₂:He의 비(ratio)가 1:6:13 이고, 관내 압력이 23.5Torr, 냉각온도 25℃, 방

전 전류 64mA 일때 방전 개시 전압은 20KVDC, 방전 유지 전압은 10KVDC 이었으며 최대 출력 100w를 얻었다. 본 연구로 1차 상용화에 제조된 본 시스템을 그림 21에 나타 내었다.

(주)본 논문을 작성한 후 120watt 출력형 2대를 1쌍으로 하는 레이저가공기(Model : SA120D)가 제작 완료 되었음.

* 본 연구를 위한 실험 및 제작에 결정적인 도움을 준 연구원 김제하, 이재갑, 권영일, 임창빈, 박병서, 이명우 씨와 김영일, 박선태씨의 헌신적인 보조에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) C.K.N Patel, W.L.Faust, and R.A. McFarlane, *Bull. Am. Phys. Soc* 9. 500 (1964)
- 2) W. Koechner, *Solid- State Laser Engineering*, Springer- Verlag N. Y pp. 179(1976)
- 3) E.U. Schlünder, *Heat Exchanger Design Handbook 2*, Hemisphere Publishing corp. pp. 15 (1983)
- 4) A.L.Bloom, *Gas Lasers*, John Wiley and Sons Inc. N.Y pp. 337 (1971)

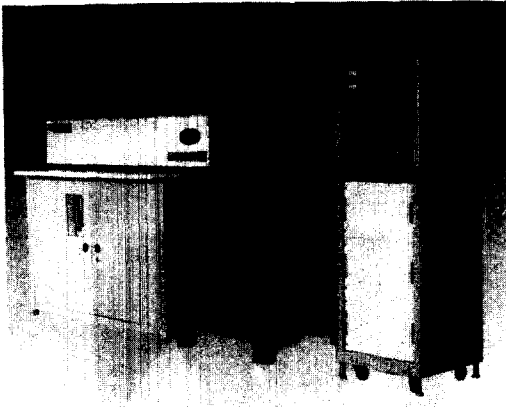


그림21.