

# 대출력 연속파 CO<sub>2</sub> 레이저의 국산화 개발

안우희\* · 조연옥\*\*

(\*전기연구소 소장, \*\*동 고전압연구실장)

## 1. 서 론

CO<sub>2</sub> 레이저는 동작 효율이 최고 33%에 이르며 연속으로 수십 KW의 고출력을 낼 수 있고, 매우 안정하게 동작하기 때문에 재료가공, 동위원소 분리, 핵융합 연구, 분광학, 의료 등의 광범위한 활용 범위를 가지고 있다.

레이저를 이용한 재료 가공은 레이저 광(光)을 열원(heat source)으로 사용하는 것으로써 다른 방법에 비해 매우 높은 에너지 밀도를 재료에 공급할 수 있는 것이 특징이고, 이것에는 용접, 절단, 표면처리, 신물질 합성 등이 포함된다. 레이저를 이용하면 정밀한 가공을 할 수 있고, 공정을 단순화할 수 있어 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 출력 제어가 용이하며 반사체를 이용한 원거리 전송이 가능하다. 이러한 레이저 가공은 일반 산업 분야에서 널리 이용되는 것은 물론이고 가공의 정밀성과 원격조정의 편리성 때문에 방사선으로 인하여 접근이 어렵고 작업이 문제가 되는 원자력 분야에서도 그 응용이 증대되고 있다. 일반적인 금속 재료 가공에 필요한 레이저의 출력은 200~1500W 정도인데, 레이저 빔의 질과 출력 안정성이 가공에 있어서 중요한 요소이다.

고출력 레이저 개발에 관한 연구는 70년대 초반에 방전 방식면에서 주로 고전압 직류 방전에 관련된 것으로 대부분 방전에 유리한 전극의 형태를 설계하였고, 방전 컬럼(column)을 위치적으로 고정시키는

데 Lorentz 힘을 이용하여 자장을 인가하는 방법도 연구되었다. 또한 방전의 안정화를 위한 RF보조방전의 사용, 전자빔의 사용, 레이저 매질 흐름의 조절 등이 연구되었다. 1980년을 전후하여 여러가지 형태의 보조방전 이용과 필라멘트 형태의 음극을 사용한 방전, AC 방전 등이 연구되다가 근년에 고주파 전장을 사용하는 것들이 시도되고 있다. 또한 일본에서는 20 KW급의 고출력 연속파 CO<sub>2</sub> 레이저를 개발하기 위해서 무성방전을 보조로한 직류 글로우(SAGE)형식을 채택하여 출력을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 고출력 CW CO<sub>2</sub> 레이저를 완전국산화하고 상품화가 가능하도록 횡류형레이저를 선택하여 1차년도에는 600 Watt급의 모델발진기를 제작하였고, 2차년도에는 kW급의 레이저 개발을 목표로 (주)성진전기와 공동연구 결과 2.4kW 레이저 발진기 개발에 성공하였다.

## 2. CO<sub>2</sub> 레이저의 방전 형식과 방전 안정화

레이저 여기를 위한 방전 방식은 크게 자조 방전(self-sustained discharge)과 비자조 방전으로 나눌 수 있다. 자조 방전은 방전의 유지에 필요한 이온화를 자체의 전장으로 해결하는 것으로 인가전압의 형태에 따라 직류와 교류 및 RF방전으로 나눈다.

직류 자조 방전의 경우에는 V-I 특성이 약간 증가하거나 거의 수평이므로 국부적 불안정에 의한 전류

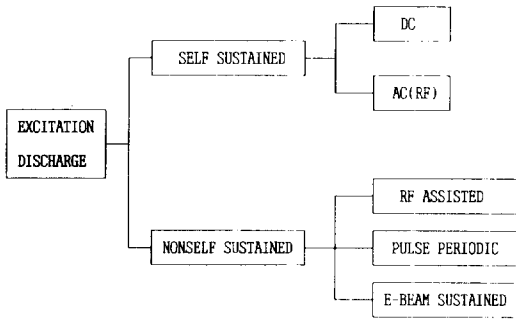


그림 1. 기체 레이저에 사용되는 여기 방전의 유형

증가가 증폭될 수 있어서, 빠른 매질의 유동 속도에 의한 방전의 안정화 이외에도 전극을 분할하여 여러 부분으로 만들고 각 부분에 분배저항(ballast resistor)에 의해 전압을 공급할 필요가 있다. 분배저항은 방전을 안정되고 균일하게 하는 역할을 하지만 공급 전압의 20~25%를 손실시켜 효율이 떨어진다. 큰 전압차가 생기는 음극강하(cathode fall) 부분에서 가열이 심하게 일어나고 불안정이 생성되므로 음극을 분할하는 것이 일반적이다.

비자조 방전의 경우에는 전극간 전압이 자조 방전보다 레이저 여기에 더 효율적인 낮은 값을 갖고, 외부에서의 전자빔 공급에 의해(E-beam sustained), 또는 단속 펄스형(pulse periodic) 전압 인가에 의해, 혹은 RF 보조 방전에 의해 방전에 필요한 전자 밀도를 유지하는 방식이다. 이 방식은 높은 비방전 입력을 공급할 수 있고, 방전에 의한 상위 회전 준위로의 여기도 효율적이나, 전자비 발생장치나 방전 회로의 복잡성을 수반하여 장치가 커지거나 복잡하게 된다.

현재 고출력 레이저에 있어서 주요한 관점은 대기압 범위까지 전기 방전 기체 레이저(electric-discharge gas laser)를 운전할 수 있도록 하는데 있다. 높은 방전 입력 또는 고압력 조건하에서 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 방전의 운전특성은 전반적인 플라즈마 불균일성에 의해 심각하게 영향을 받게 되는데, 이러한 불균일성은 아크 형태의 전류 필라멘트(current-filament)의 형태로 나타난다. 이와같은 플라즈마 불안정성은 레이저의 출력과 효율을 감소시킨다. 고출력 레이저에 있어서 안정된 균일 방전을 손상시키는 불안정은

1) 고전적인 이온화 불안정성(conventional ioniza-

tion instability)

2) 음이온의 존재에 의해 야기되는 하전입자 생성 불안정성(charged-particle production instability)

3) 열적 불안정성(thermal instability)로 나눌 수 있다.

높은 광 출력을 얻기 위해서는 높은 비방전 입력(specific discharge power)에서의 운전이 요구되는데, 이 값은 매질의 온도 상승에 의해 제한을 받는다. 따라서 높은 입력값을 유지하기 위해서는 매질의 속도와 더불어 그 압력을 높이는 것이 필요하다. 그러나 압력이 높아지면 플라즈마의 과열에 의한 필라멘테이션(filamentation) 불안정 생성과 이에 따른 글로우 방전의 아크로의 전환이 초래된다.

이상에서 살펴본 것과 같이 레이저 방전을 균일하고, 안정되도록 만들기 위해서는 매질의 유속과 속도분포, 전극의 구조와 재료의 선택, 동작 압력, 인가하는 전압의 형태 등이 중요한 변수가 된다.

### 3. 연속출력CO<sub>2</sub>레이저의 구성과 설계·제작

산업적 응용을 위한 레이저 가공기에 적용되기 위한 레이저는 산업적 사용자의 견지에서 볼 때, 다음과 같은 사항이 레이저의 높은 신뢰성을 위하여 요구된다.

- 장시간에 걸친 출력의 안정성
- 자동화된 레이저 동작(기동, 정지, 운전 조건에 따른 작동 조정)
- 최초기동으로 부터 안정 상태로 되기까지의 시간의 단축
- 지속 운전에 의한 레이저 정지 시간의 감소
- 용이한 장치의 유지보수 및 운전
- 광공진기의 정열의 용이성
- 출력빔 형태의 운전중 점검의 용이성
- 산업적 환경에서 레이저 원(源)의 안전한 작동

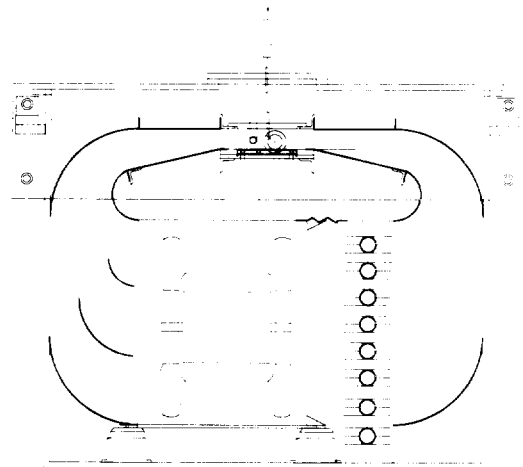
본 연구에서는 위의 요구조건을 고려하여 재료 가공을 위한 횡류 및 횡여기형 연속출력 CO<sub>2</sub> 레이저를 설계·제작함에 있어서 다음과 같은 점을 중점적으로 고려하였다.

- (1) 가능한 소형의 장치로 큰 출력을 가질 것
- (2) 안정된 동작과 빔 모우드의 안정성이 높을 것
- (3) 경제적인 제작과 운전 조건을 가질 것

### 3.1 본체의 설계 및 제작

대류 냉각형 레이저의 기본 구성 요소로서는 방전부, 열교환기, 기체 순환 장치, 공진기, 전원 등을 들 수 있다. 그림 2는 설계 제작된 레이저 본체의 모습으로서, 이 장치는 경제성을 고려하여 기체의 유관을 폐회로로 하였고 레이징 영역에서의 매질의 속도가 높아지도록 넓은 송풍장치와 좁은 레이징 영역으로 구성하였다. 본 장치의 송풍장치부의 유로 단면적 55cm × 160cm로 하였고, 발진부는 단면적이 5.5cm × 160cm가 되도록 하였다.

본체의 재질은 레이징 매질에 의한 부식을 방지하고 내구성을 높이며, 내부를 진공으로 할 때 대기압에 의한 응력을 견디도록 SUS 304를 선택하였다. 압력차에 의한 본체의 변형은 레이저의 동작과 진공 유지에 나쁜 영향을 미치며, 특히 발진부의 경우는 치명적이 될 수 있다. 본 장치에서는 7mm의 SUS 판으로 직육면체의 외함을 만든 다음, 내부에 기체



DIM : L×W×H = 1600×1100×1000

그림 2. 레이저 본체의 구성도  
의 유로와 방전부, 송풍기 등을 내장 함으로써, 챔

표 1. 레이저 본체의 설계 특성표

SPECIFICATION	DESIGN CHARACTERISTICS
TYPE	Transverse-Flow, Transverse-Excited
DIMENSION	1600mm × 1100mm × 1000mm
DISCHARGE REGION	Electrode : Pin cathode-Plate anode d <sub>gap</sub> : 3-4cm Cathode : Mo 3Φ, 183 EA Anode : Cu, 16cm × 146cm Discharge Volume : ~3.3ℓ Ballast Resistor : 15 kΩ, 100watt
OPTICAL RESONATOR	Type : single, stable resonator Total mirror : Mo, 98%, 2"(R=10m) Partial mirror : ZnSe, 65%, 2"(R=∞) Length of resonator : 2030mm
BLOWER SYSTEM	Type : Multi-Wing, Axial Fan No. of wing : 12EA Motor power : 3HP × 3EA, 7200RPM Inveter Control
POWER SOURCE	DC Power : DC-DC Converter, 40kW, 6kHz HF Power : 2kW, 20kHz

버의 진공유지를 용이하게 하였고, 챔버 외부에 보강대를 설치하여 대기압에 의한 응력을 견딜 수 있도록 하였다.

송풍 장치부는 다익 축류형 팬을 3마력 모터의 양측에 고정하여 병렬로 3대를 하나의 구조물에 설치하고, 장치 외함과 연결부는 공기 충격 흡수기(air shock absorber)를 설치하여 송풍기의 진동이 외함에 전달되는 것을 방지하도록 하였다.

발전부는 핀형태의 음극과 평판형태의 방전부, 이들을 지지하는 형강과 절연물, 양쪽의 발전용 미러를 포함하는 공진기 부분으로 구성하였는데, 폭은 25cm로 하였고, 높이를 5.5cm로 하여, 내부에 설치하는 전극 구조물에 의해 전극사이의 거리를 조정할 수 있도록 하였다.

제작된 장치 전체의 체적은 약 2.5m<sup>3</sup> 정도이고 외형의 크기는 160cm × 110cm × 120cm이다. 진공은 700ℓ/min 용량의 진공 펌프를 사용하였고, 커패시턴스 마노메타를 사용하여 진공도 측정과 적절한 압력을 유지하도록 하였고, 송풍기에 의한 유속을 측정하기 위하여 전극의 하부 20cm에 피토투관(pitot-tube)을 설치하였다. 방전부 전후에서의 기체 온도를 측정하기 위하여 방전부로 기체가 유입되는 부분과 방전부를 통과한 부분에 열전대(thermocouple)을 설치하여 온도를 측정하였다.

이상에서 설명한 레이저 본체의 설계 특성표는 표 1과 같다.

레이저 본체에서 발전된 빔은 빔가이드를 통하여 X-Y Table로 이송된다. 빔가이드는 빔 셔터, 벤딩 미러(bending mirror), 레이저 헤드로 구성되며, 빔 셔터는 솔레노이드로 구동되고, 사용된 미러는 Mo 평면 미러이다. 레이저 본체는 고전압이 내재하고, 레이저 빔은 인체에 조사되면 치명적인 화상을 입게 되므로 레이저의 운전은 본체와 분리된 제어계(control system)에서 할 수 있도록 하였다.

### 3.2 레이저 제어부 설계 및 제작

제어 시스템 CO<sub>2</sub> 발전기를 작동할 수 있도록 마그네트(magnet) 접점들로 구성하였고, X-Y Table은 컴퓨터로 제어할 수 있도록 설계하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 발전기의 제어 시스템의 개략도는 그림 3과 같다.

그림 3에서 진공펌프는 CO<sub>2</sub> 발전기 내부를 초기에

진공 상태를 10<sup>-3</sup>torr 이하로 배기시키고, CO<sub>2</sub> 가스를 발전기 내부에 수십torr 정도 주입시키고, 발전기의 압력을 일정상태로 유지시키는 작용을 한다. 냉각탑 펌프는 공진기의 전극 및 열교환기를 통해 나온 물을 냉각하는 역할을 한다. 송풍기 팬은 레이저 가스를 고속으로 회전시키며, 가스의 온도를 열교환기를 통하여 일정하게 유지시킨다. 고주파 전원은 레이저 발전기의 안정된 방전을 유도하기 위한 여기용 보조 방전 전원이다. 직류 전원은 레이저 발전기의 주방전 전원으로 레이저 발전에 직접적인 역할을 하는 전원이다.

본 제어 시스템은 전자식 접점들로 구성되어 있고, 각 부분별로 고장 발생시 고장부위별 지시램프와 부저로서 알려 줄 수 있도록 구성하였다. 그리고 제어 판넬(control pannel)에서는 레이저 출력, 직류 전원 전압, 전류 그리고 가스압력 및 온도를 읽을 수 있도록 구성하였다.

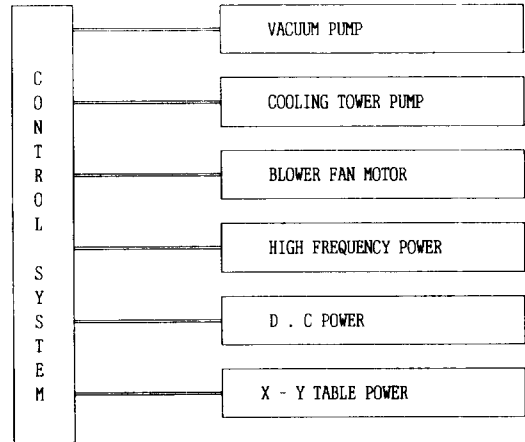


그림 3. 제어계(Control System) 개략도

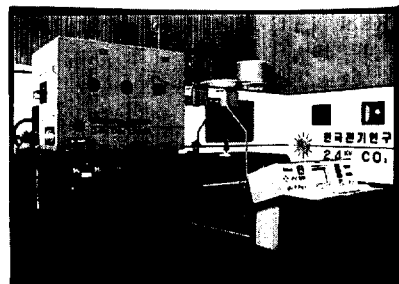


사진 1. CO<sub>2</sub> 레이저 전체 시스템 모습

사진 1은 설계, 제작된 레이저 시스템의 전체 모습을 보인다.

#### 4. 특성실험 및 논의

특성 실험은 진공측정, 방전실험, 발진실험의 과정의 3단계로 실시하였다. 진공측정은 커패시터 마노메타를 이용하여 절대 압력을 측정하였고, 진공도는  $5 \times 10^{-3}$  torr까지 유지할 수 있었다. 진공도는 기체압력의 배합비와 특히 산소가 존재하는 경우 방전에 나쁜 영향을 미치므로 가능한 낮은 진공도에서 기체를 주입하도록 하였다.

방전실험은 커패시터 마노메타를 이용하여 기체 혼합비, 전체 압력을 조절한 후, 방전전류와 송풍기 속도를 변화시키면서 방전상태를 관찰하였다. 기체 혼합비는 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He=1:3:15의 경우가 방전도 안정하고 출력도 가장 많이 발진됨을 알 수 있었다. He의 비율이 증가할수록 방전은 안정화 되지만 발진 출력면에서는 불리하였다. 그림 10.은 방전 전류에 대한 전압 변화를 보이고 있는데 전류증가에 따라 전압이 약간 증가하나 전류가 10A 이상되면 방전이 글로우에서 아크로 전이하기 때문에 방전전압은 감소하였고 기체 압력에 따라서는 상당한 차이를 보인다. CO<sub>2</sub> 레이저의 핀-평균 방전에 대한 실험식  $V_d = 7.52Pd + 300$ , P: 압력 (torr), d=전극간격 (cm) 과 비교할 때 대체로 잘 일치함으로 알 수 있었다.

발진 출력은 레이저 출력계 (Sciencetck Model No. 39-0211)로 측정하였고, 레이저 빔의 모드는 내화 벽돌을 이용하여 관찰하였다. 레이저 출력은 방전 전류, 방전 전압, 기체조성비, 방전부에서의 기체속도 등의 함수인데, 본 연구에서는 기체조성비 CO<sub>2</sub>:

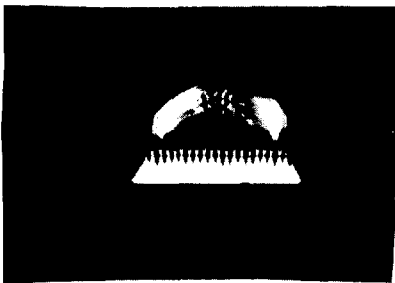


사진 2. 전극부 방전모습

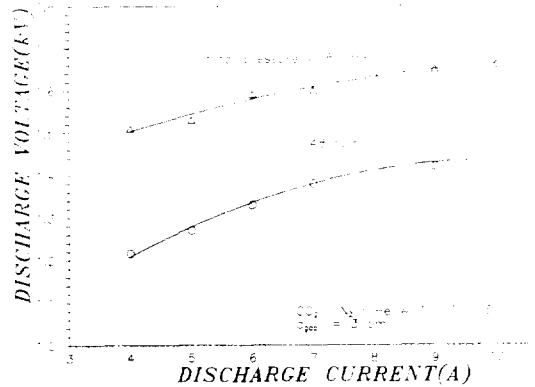


그림 4. 방전전류에 따른 전압변화

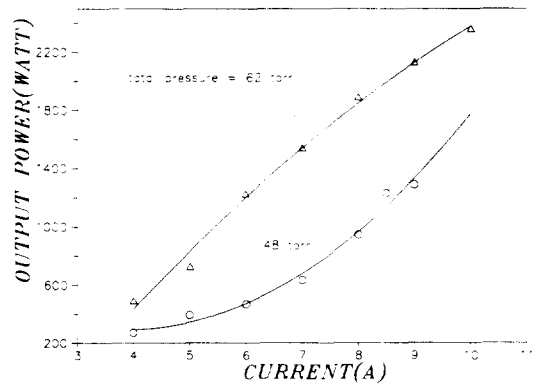


그림 5. 방전전류에 따른 출력변화

N<sub>2</sub>:He=1:3:15, 방전 전류 9.5A, 방전전압 1.65 KV, 전체 기체 압력62torr, 방전부에서의 기체속도 약 70m/sec에서 최고 출력 2.4kW를 얻었고, 효율은 15%를 달성하였다. 그림 11.은 방전 전류에 대한 출력을 보이고 있는데 전체 기체 압력이 70torr이상에서는 안정한 글로우 방전을 유지하는 전류치가 낮아서 높은 출력을 얻지는 못하였고, 또 압력이 너무 낮아지면 방전 입력값(방전 전류 × 방전 전압)이 낮아지므로 불리하다. 본 연구에서는 60torr 근방에서 방전 모양도 안정하고 출력도 최너치를 보였다.

#### 5. 결론

가공용의 대출력 CO<sub>2</sub> 레이저를 개발하여 이를 국

산화하기 위하여 광축과 횡방향으로 매질을 유동시키고 횡방향으로 여기시키는 연속출력 CO<sub>2</sub> 레이저를 설계하고 제작하였다.

현재까지 실험을 통하여 최대출력 2.4kW, 최고 효율 17%를 달성하였다. 이는 연구목표인 1kW를 상회할 뿐만 아니라, 국내 최초로 2kW 이상의 레이저 연속출력을 발전에 성공함으로써 대출력 레이저 개발에 새로운 이정표를 세우는 계기가 되었으며,

효율면에서도 외국과 대등한 수준에 도달했다.

또한 이번 연구를 통하여 레이저의 운전을 중앙집중화할 수 있는 제어시스템을 개발함으로써 레이저 가공기의 상업화에 더욱 접근할 수 있게 되었다.

앞으로의 과제는 레이저 출력을 더욱 안정화시키고, 레이저 빔의 제어연구와 레이저에 의한 가공연구를 통하여 레이저 가공기의 완전한 국산화를 이룩하는 것이다.



**안우희(安宇熙)**

1932년 2월12일생. 1961년 육군사관학교 졸업. 1966년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1975년 미국 미시간 주립대 대학원 졸업. 1978년 동 대학원 졸업(공박). 현재 한국 전기연구소장, 당학회 평의원.



**조연옥(趙淵玉)**

1952년 5월8일생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 미국 일리노이 대학원 졸업. 1985년 미국 아이오아주립대 대학원 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 고전압연구실장.