



KR0000133

KAERI/RR- 1961/98

최종보고서

방전가열형 플라즈마관 국산화

Development of a Discharge-heated Plasma Tube

주관연구기관
한국원자력연구소

과학기술부

KAERI/RR- 1961/98

최종보고서

방전가열형 플라즈마관 국산화

Development of a Discharge-heated Plasma Tube

주 관 연구 기관
한국 원자력 연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 실용화연구지원사업과제중 하나인 “ 방전가열형 플라즈마 관 국산화 ” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 12. 10.

주관연구기관명 : 한국원자력연구소

주관연구책임자 : 차 병 헌

연 구 원 : 진정태 남성모
이성만 최화림
고도경 김성호
이용범 최영수
이종민

참 여 기 업 명 : 서울전광기기(주)
우 리 진 공 (주)

담 당 책 임 자 : 이찬구 정승민

연 구 원 : 이희갑 황규호
이희철 김영주
최기식 손남기

요약문

I. 제 목 : 방전가열형 플라즈마관 국산화

II. 연구개발의 목적 및 필요성

레이저는 고도의 지향성, 뛰어난 단색성, 고휘도 및 간섭성을 바탕으로 학술연구분야, 산업분야 및 의료분야 등에서 널리 사용되고있다. 또한 레이저 응용기술 수준이 고도화됨에 따라 새로운 파장과 더 높은 출력 및 효율, 그리고 안정된 성능을 가진 레이저 광원이 요구되고있다.

방전가열형 플라즈마관을 이용한 고출력 고반복율 가시광 레이저는 원자 및 원자 분광학 연구, 유동 및 열유동 연구, 해저통신 및 해저탐사, 법의학 연구 등 다양한 응용분야를 갖고 있다. 특히 파장가변레이저의 펄핑 광원으로 사용가능하므로 레이저 분광학 기술 개발은 물론 이를 통하여 원자력 산업의 핵심 분야에 활용되고 있는 등 국가전략적으로도 중요한 핵심 기술이다.

그러므로 국내에서도 점증하는 원자력 및 학술, 산업 분야의 필요성에 부응하여 차세대의 원자력용 레이저 기술로서 고출력 가시광 레이저를 연구 개발하여 원자력 분야에 본격적으로 활용할 필요가 있다. 이를 위하여 가시광 금속증기레이저의 핵심 부품인 플라즈마관의 국산 고유모델을 개발할 필요가 있다.

III. 연구개발의 목표 및 내용

연구개발의 목표는 평균 출력 30 W 이상, 펄스 반복율 5 ~ 12 kHz인 수냉식, 개방형 가시광용 레이저 플라즈마관을 국산고유모델로 상품화시키는 것이다.

이를 위하여 먼저 설계 목표치를 결정한 다음 상세설계를 하였다. 상세설계가 완료된 뒤 플라즈마관을 시험 제작하여 내열 및 단열, 진공 기밀, 고전압 방전 및 내전압 시험을 거치고 최종적으로 특성을 보완, 개선하여 국산고유모델을 확정짓는 순서로 연구를 진행하였다.

IV. 연구개발결과

구경 25 mm, 방전길이 1336 mm인 원통형의 레이저관과 그 주위를 감싸는 단열재, 용융석영관 및 water jacket 등으로 구성되는 방전가열형 레이저 플라즈마관을 개발하였다.

개발한 레이저 플라즈마관 구조는 레이저 매질로 사용되는 금속을 교체하기 쉽고 보수를 쉽게할 수 있을뿐만 아니라 고출력화가 용이한 개방형 플라즈마관 방식을 채택하였다. 레이저 창(laser window)은 출력 향상을 위하여 무반사 처리된(anti-reflection coated) 창(windows)을 사용하였다. 출력, 안정성, 및 내구성 향상을 위하여 레이저관 재질은 열적 충격(thermal shock)에 강한 고순도 알루미나 세라믹(recrystallized alumina ceramic)을 사용하였으며, 고온 단열 재료로는 고순도 다공질 알루미나를 사용하였다. 고전압 방전 전극 재료는 내구성이 좋은 텅스텐을 사용하였으며 균일한 방전이 잘 일어나는 전극구조를 개발하였다.

시험 제작한 레이저 플라즈마관은 선행 연구에서 개발된 펄스 반복

을 12 kHz, 펄스 전압 30 kV인 펄스 전원장치(pumping pulse source;PPS)를 사용하여 특성을 조사하였다. 특성조사 결과를 바탕으로 미비점을 수정, 보완하여 최종적인 모델을 확정하고 시제품을 제작하였다.

특성시험 결과 레이저 플라즈마관은 안정하게 동작하였으며 펄스 전압 28 kV, 펄스 반복율 10 kHz 일때 레이저빔 평균출력은 32 W였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

개발된 방전가열형 플라즈마관은 광범위한 분야에서 활용이 가능하다. 우선 고출력 레이저 기술분야에 활용이 가능하다. 즉 고출력 가시광 레이저 장치 개발에 사용될 수 있으며, 파장가변 레이저 및 고체 레이저 여기용 광원으로 사용될 수 있다. 또한 이를 바탕으로 원자 분광기술 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 새로운 초정밀 레이저 가공장치 및 내식성 표면개질장치 등의 개발에 활용될 수 있으며, 고속현상 계측 및 촬영장치 개발에도 활용될 수 있을것으로 기대된다. 그 예로서는 레이저 조명, 고속 비행체 탄도 분석, 유동 및 열유동의 가시화, 및 고속 과도현상 연구 등을 열거할 수 있다.

그 뿐만 아니라 라이다(LIDAR)를 이용한 원격 공해분석 및 감시장치 개발분야와 유속, 온도, 압력, 미세한 기계적, 열적 변형 관측, 해저 통신, 해저탐사장비 개발에도 활용이 가능하고 피부 치료 및 암 진단, 치료 등의 첨단 의료장비 개발에도 기여를 할 수 있으리라 판단된다.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

SUMMARY

I. Title

Development of a Discharge-heated Plasma Tube

II. Purpose and Necessity of Research

Lasers have wide application areas such as scientific research, machining industry, medical industry, etc. due to their high brightness and monochromaticity. And the new growing areas require laser systems with high output power, new wavelength, high efficiency, and high stability.

A laser with a high output power and high repetition-rates is required in the areas of flow and thermal flow researches, undersea communication and investigation, and medical jurisprudence. This type of laser is also needed for uses as an effective pumping source for tunable wavelength lasers, which are light sources for laser spectroscopy used in atomic energy industry. Therefore, it is essential to develop a laser system with a high output power and high repetition rates. We have developed a laser plasma tube, which has an application to construct such a laser.

III. Goal and Contents of Research

The goal of this research was to develop a water-cooled, open-type laser plasma tube, which deliver more than 30 W laser output power at 5 - 12 kHz pulse repetition-rates.

For this goal, 1) a proto-type laser plasma tube was designed, 2) the plasma tube was constructed and tested, and 3) the plasma tube was modified and improved version was constructed.

IV. Results of Research

A discharge-heated type plasma tube was designed and constructed, which consists of an inside ceramic tube, thermal insulators, quartz tubes, and water jacket.

The structure of the laser plasma tube was designed to be convenient in replacing laser mediums and to be easy in maintenance. The structure was also designed suitable for a high output power. Thus, AR coated windows were used as laser windows for an efficient laser beam output. The inside plasma tube made of a high purity recrystallized alumina was robust against thermal shock and improved a laser output power, stability, and endurance. A porous alumina with a high purity was used as high temperature isolation material for better high temperature endurance. The electrode made of tungsten was also chosen for the endurance of high discharge voltage.

A proto-type laser plasma tube was tested with a pulse modulator which can deliver 12 kHz, 30 kV pulse output. Based on this test, the proto-type laser plasma tube was modified and a final version of the laser plasma tube was constructed. The developed laser plasma tube operated with good thermal and electrical stabilities and delivered an average laser output power of 32 watts at 10 kHz repetition rates.

V. Application Plans

The water cooled, open-type laser plasma tube will be initially used for the following areas, such as 1) a part for developing a high output power visible laser systems, 2) pumping sources for tunable wavelength lasers and solid state lasers, 3) laser source for an atomic spectroscopy. Next, it can be also used for developing an precise laser processing machine, an anti-corrosion surface modification machine, measuring and photographing devices of high speed phenomena. Examples of measuring and photographing devices are laser illumination devices, analysis of high speed flying objects, visualizations of flow and thermal flows, studying of high speed transient phenomena, LIDAR systems, precise measuring systems, etc.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	5
제 1 절 레이저 플라즈마관의 종류 및 동작 원리	5
1. 외부가열방식, 방전가열방식, 이중가열방식	5
2. 종방전 여기방식, 횡방전 여기방식	9
제 2 절 레이저 플라즈마관의 설계 및 제작	12
제 3 절 방전가열형 플라즈마관의 출력 특성	23
1. 레이저 플라즈마관의 preconditioning	23
2. 출력특성 실험장치의 구성	24
3. 제작된 플라즈마관의 출력특성	26
제 4 장 결 론	35
제 5 장 참고문헌	38
제 6 장 부 록	42

제 1 장 서 론

1960년 미국의 Mainman에 의해 레이저가 처음으로 발진된 이후 레이저가 갖는 고도의 지향성, 고휘도 특성, 단색성 및 우수한 간섭성에 주목한 각국의 연구진들은 새로운 레이저 개발 및 활용에 많은 시간과 노력을 투입해왔다. 그 결과 레이저는 학술연구분야, 산업분야, 의료분야 등 사회의 거의 모든 분야에서 광범위하게 활용되고 있다.

특히 고출력 고반복율 가시광 금속증기 레이저는 원자력 관련 신소재 개발, 재료가공, 고감도 계측, 원자분광학연구 분야 등에서뿐만 아니라 정밀 기계부품 가공, 반도체 제조, 열유동 연구, 해저 통신 및 탐사, 의료기기 및 법의학 분야 등에서 다양하게 활용될 수 있으므로 그 제조 기술은 국가전략적으로 매우 중요한 핵심 기술이며 산업계 전반에 미치는 기술파급효과가 매우 크다.

미국, 프랑스, 독일, 일본 등 기술 선진국들은 고출력 가시광 금속증기 레이저 시스템 및 관련 핵심 부품 개발에 오랜 기간동안 막대한 연구비를 투입하여왔으며 현재 원자력 산업, 의료분야, 재료가공분야 및 그 밖의 첨단 연구개발분야에 활용하고 있다.

국내의 경우 가시광 레이저용 플라즈마관에 대한 기초 연구는 상당한 수준까지 수행된 바가 있으며, 소구경 및 중구경 플라즈마관은 특성 연구를 위하여 시험 제작된 바가 있다. 그러나 가시광 레이저를 본격적으로 학술연구나 산업 분야에서 이용하기 위해서는 공학적으로 성능이 입증(field proven)된 레이저 플라즈마관 개발이 필요하다. 특히 분광기술

을 개발하기 위해서는 다수의 플라즈마관이 필요하나, 이에 필요한 핵심 부품은 현재 거의 외국으로부터의 수입에 의존하고 있는 실정이다.

가시광 금속증기 레이저 시스템은 레이저 플라즈마관, 펄스전원장치 및 기타 주변장치로 이루어지며 그 중에서 플라즈마관이 가장 핵심적인 장치이다. 플라즈마관은 1500℃ 이상의 고온에서 동작되며 그 내부에서는 증기화된 금속원자가 고전압 전기방전에 의해서 발생된 전자와의 충돌에 의해 여기되고 이로부터 형성되는 레이저 상준위와 하준위간의 반전분포로부터 레이저가 발생된다.

플라즈마관 종류에는 레이저 매질인 금속을 가열 및 여기시키는 방법에 따라 여러 가지의 것이 있으나 본 연구에서는 구조가 간단하고 내구성 및 안정성이 우수한 방전가열형 종방전 여기방식을 채택하여 설계 제작하였다. 시험 제작한 플라즈마관은 온도, 방전 전압, 반복율, 완충기체 종류 및 압력 등의 출력 특성에 영향을 미치는 다양한 파라미터들을 바꾸어가며 그 특성을 실험 분석한 뒤 최종적으로 국산화 모델을 확정하였다.

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

가시광 금속증기레이저 시스템은 원자력, 학술, 산업 분야에서 다양하게 응용될 수 있는 핵심기술이므로 세계 각국에서는 장기적으로 막대한 연구비를 투입하여 연구를 수행하고 있다.

미국의 경우 1975년부터 국가 주도로 Lawrence Livermore 국립연구소에서 대규모의 연구를 수행해 왔으며 1980년대 중반에 단기당 평균출력 200 W, 증폭계열당 1000 W를 상회하는 가시광 금속증기레이저 시스템 개발에 성공하였다. 특히 1992년에는 단기당 평균 출력이 600 W인 구경 80 mm 레이저 플라즈마관 개발에 성공하였으며 이를 산업의 핵심 분야에 활용하고 있다.

일본의 경우 1980년대 중반부터 일본원자력연구소를 중심으로한 연구조합이 원자력 핵심분야에서 활용하기 위하여 집중적으로 연구를 수행한 결과 단기당 평균출력 200 W인 가시광 금속증기 레이저 및 이에 소요되는 대구경 레이저 플라즈마관을 개발하였다.

영국의 경우 국가의 지원하에 Oxford Laser사에서 금속증기레이저를 상용화하여 판매하고 있으나 해외판매에는 많은 제한을 가하고 있으며 English Electric Valve사에서는 소형의 밀봉형 플라즈마관을 개발한 바 있다.

그 외에도 러시아, 프랑스, 호주, 이스라엘 등 많은 국가들이 가시광 금속증기레이저 연구를 수행하고 있고 일부 상품화 개발에 성공하였으나 관련기술을 핵심 전략적 기술로 분류하여 그 기술은 물론 관련 장비

및 부품을 국외로 유출하는 것을 극히 통제하고 있는 실정이다.

국내의 경우 1985년도에 경북대학교에서 기초적인 연구를 수행하여 금속증기레이저 발전에 성공하였으나 그 규모가 미미한 실정이었다. 현재는 한국원자력연구소가 유일하게 연구를 수행하고 있으며 1990년에 10 W급을 개발한데 이어 1996년 이후 평균출력 100 W를 상회하는 가시광 레이저 시스템 및 이에 소요되는 레이저 플라즈마관을 개발하는데 성공하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 레이저 플라즈마관의 종류 및 동작원리

레이저 플라즈마관은 금속원자 증기를 발생시키는 방법에 따라 외부가열방식(external heating type), 방전가열방식(또는 자체가열방식; discharge heating type 또는 self heating type), 이중방전방식(double discharge type) 등으로 분류할 수 있다. 또한 여기방식에 따라서 분류하면 종방전 여기방식(longitudinal discharge excitation type), 횡방전 여기방식(transverse discharge excitation type), 광 여기방식(optical excitation type) 등으로 분류할 수 있다.

1. 외부가열방식, 방전가열방식, 이중방전방식

외부가열방식은 종방전 여기방식이나 횡방전 여기방식 레이저 장치 설계에 모두 사용되는 방식이나, 종방전 여기형 외부가열방식에 대하여 기술하면 다음과 같다. 외부가열방식은 그림 3-1과 같이 금속증기를 가두어 두는 용기로 사용하는 고온 재질(주로 세라믹)의 레이저관 외부에 tungsten, molybdenum, tantalum, niobium, 백금 등 고온 발열이 가능한 발열소자(external heater)가 동축구조로 설치되어 있으며, 레이저관의 양단에 금속원자를 여기시키기 위한 고전압 전극이 설치되어 있는 구조를 갖고 있다.

이 방식은 레이저관의 내부에 레이저 매질금속을 투입하고 완충기체를 채운 다음 가열소자를 이용하여 레이저관을 약 1,500° C 정도로 가열하여 금속증기를 발생시킨 후, 레이저관 양단에 설치된 전극을 통하여 고전압 전기방전을 일으키면 금속원자가 여기되고 레이저 발진이 일어나도록 되어있다.

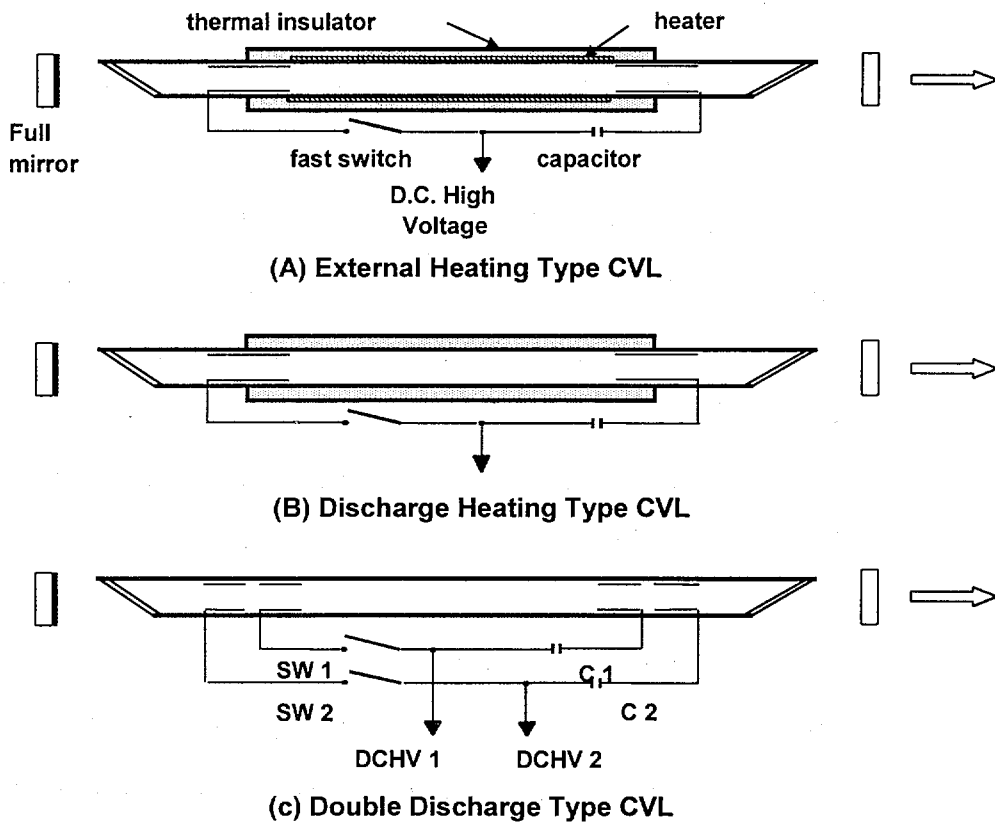


그림 3-1. 금속증기레이저 동작방식

W. T. Walter 등이 처음으로 금속증기레이저를 발진시킬 때 사용한 방식이 이와같은 외부가열방식이었다.^(1,2,3)

외부가열방식은 발열소자 자체가 많은 전력을 소비하기 때문에 레이저 시스템 전체효율이 낮으며, 장치가 비교적 복잡하고 발열소자의 낮은 내구성으로 인하여 안정성이 낮기 때문에 상업용, 고출력 레이저 시스템에서는 채택하기가 곤란한 방식이다. 그러나 외부가열방식은 레이저 발진에 가장 큰 영향을 미치는

레이저관의 온도를 다른 변수들(완충기체의 압력 및 순환 속도, 방전전압, 방전전류, 펄스 반복율, 에너지 저장 축전기의 용량, peaking 축전기의 용량 등)로부터 분리할 수 있기 때문에 금속증기레이저 특성을 연구하기에는 적합한 방식이다.^(15,27)

방전가열방식은 종방전 여기방식이나 횡방전 여기방식 설계에 모두 적용할 수 있는 방식이나, 주로 종방전 방식에 많이 사용한다. 그 이유는 횡방전 여기방식 플라즈마관의 경우 일반적으로 임피던스 정합(impedance matching)이 좋지 않아서 플라즈마관 내부로 충분한 전력이 투입되지 않기 때문에 레이저관을 적정온도로 가열하기가 어렵기 때문이다. 이런 이유로 횡방전방식의 플라즈마관에는 보통 외부가열기가 설치되어 있다. 종방전여기형 방전가열 방식 플라즈마관에 대하여 기술하면 다음과 같다.

방전가열방식은 그림 3-1과 같이 고온에서 사용이 가능한 고절연 재질(주로 ceramic)로 만들어진 레이저관의 둘레에 고온에서 사용이 가능한 단열재가 둘러싸고 있고, 레이저관의 양단에 평평용 고전압 방전전극이 설치되어 있는 간단한 구조로 되어있다. 이 방식에서는 레이저관의 내부에 레이저 매질용 금속을 투입하고 완충기체를 주입한 후 3 - 20 kHz의 고반복율로 고전압 (10 - 30 kV/m) 고전류(수 100 - 수 1000 A)방전을 시켜 레이저관을 가열하는 동시에 금속증기(원자)를 여기시킨다.

즉 금속원자를 여기시키기 위한 고전압 전기방전의 결과로 발생하는 열을 이용하여 레이저관을 가열하므로 방전가열방식이라 하며, 외부가열장치 없이 레이저관이 스스로 가열되므로 자체가열방식이라고도 한다.

이 방식에서는 레이저관을 가열하여 금속증기를 발생시키는 에너지원과 금속증기(원자)를 여기시키는 에너지원이 같기 때문에 레이저 동작에 가장 큰 영향

을 미치는 레이저관의 온도를 다른 변수들로부터 분리시키기가 어렵다. 따라서 이 방식은 금속증기레이저 자체의 특성을 연구하기에는 부적합한 방식이다.

또한 레이저관을 레이저 동작온도까지 충분히 가열할 수 있는 대전력을 공급하여야하므로 외부가열방식에 비해 큰 정격의 고전압 펄스발생장치(H.V. Pulse Modulator)를 사용하여야 한다. 레이저관 온도를 적정한 범위로 유지하기 위해서는 적절한 펄스 반복율을 유지하여야 하므로, 펄스 반복율이 아주 높은 상태나 반대로 아주 낮은 상태로 장시간에 걸쳐 레이저를 동작시킬 수 없다.

그러나 이 방전가열방식은 플라즈마관 구조를 비교적 간단하게 할 수 있고, 장치의 내구성이 높으며, 시스템 효율이 좋고, 큰 레이저 출력을 낼 수 있는 대규모의 레이저 장치를 제작할 수 있기 때문에 현재까지 가장 많이 사용하는 방식이다.^(30,32) 방전가열방식은 러시아 Lebedev Institute의 A. A. Isaev 등에 의하여 처음으로 개발되었으며,⁽⁵⁾ 시스템 효율은 최대 약 1% 가량이다.

이중방전방식은 레이저관의 온도가 상온 또는 1,000°C 이하의 비교적 낮은 온도에서 레이저 동작을 시킬 수 있는 방식으로 플라즈마관의 구조는 그림 3-1과 같다. 그림에서와 같이 2개의 방전회로가 설치되어 있어 먼저 1차 고전압 방전으로 금속증기(원자)를 발생시킨 후, 2차 고전압방전으로 금속증기(원자)를 여기시키는 방식이다.

이 방식에서는 금속증기원으로 순수금속을 사용하지 않고 금속-할로젠 화합물(CuCl, CuBr, CuI 등)을 사용한다. 레이저관의 내부에 금속-할로젠 화합물을 넣고 완충기체를 주입한 후 레이저관을 약 400 - 600° C 정도로 가열하면 금속-할로젠 화합물 증기가 발생한다. 발생한 화합물 증기를 1차 고전압 방전으로 분해시켜 금속원자증기를 생성시키고 2차 고전압 방전으로 여기시켜 레이저 발진을 하게 하는 방식이다.⁽⁸⁾

이중방전방식에서는 금속-할로젠 화합물을 분해시키는 데 많은 에너지가 소비되어 효율을 높힐 수 없고 화합물 분해를 위한 별도의 고전압 방전회로가 필요하여 장치가 복잡해지므로, 한 종류의 고전압 방전만으로 레이저관의 가열은 물론 금속화합물 분해와 금속원자 여기를 같이하게 하는 방식이 개발되었다.

이 방식은 CP-CHL(Continuously-Pulsed Copper Halide Laser)이라 불리우며, 이 방식에서는 레이저관의 내부에 금속화합물을 넣고 완충기체를 주입한 후 비교적 높은 반복율로 고전압 전기방전을 계속하도록 되어있다. 고전압 방전이 계속되면 레이저관이 가열되어 금속화합물 증기가 발생하고 발생한 화합물 증기는 고전압 방전에 의하여 분해가 이루어지고 분해 과정에서 만들어진 금속원자가 여기되도록 되어있다.^(16,18,23,31)

가열, 분해, 및 여기가 동시에 일어나므로 이 방식은 이중방전방식에 비해 장치가 간단하고 높은 효율과 큰 레이저 출력을 얻을 수 있으나, 이 역시 상용 또는 대규모 레이저 장치를 제작하기에는 어려움이 많다. 그 이유로는 첫째, 분해된 금속원자 상당량이 레이저관 벽에 달라붙기 때문에 금속-할로젠 화합물 손실이 크서 화합물을 자주 보충하여야 하고, 둘째, 유리된 할로젠은 활성이 매우 강하여 레이저 장치 전체의 내구성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 셋째, 전자친화력이 매우 큰 할로젠이 고전압 방전을 방해하기 때문이다.

금속화합물을 사용하지 않고 금속 자체를 증기원으로 사용하면서 상온에서 동작하는 금속증기레이저도^(4,7,19,20,21) 개발된 바 있으나 실용성은 거의 없다.

2. 종방전 여기방식, 횡방전 여기방식

금속증기레이저의 여기(펌핑)방법으로는 고전압 전기방전에 의한 여기방법이 사용되며, 그 방식에는 종방전 여기방식(Longitudinal Discharge Excitation

Type)과 횡방전 여기방식(Transverse Discharge Excitation Type)이 있으며 각각의 특징은 다음과 같다.

종방전 여기방식은 레이저 공진기의 광축(레이저 빔 방향)과 여기용 고전압 방전전류의 방향이 일치되어 있는 방식이다. 그 내부구조는 그림 3-1과 같이 원통형의 레이저관 양단에 역시 원통형의 고전압 방전전극(hollow tube electrode type)이 설치되어 레이저 빔이 전극의 내부를 통과하게 되는 구조이다.

종방전 여기방식은 횡방전 여기방식과 비교할 때 장단점을 가지고 있다. 먼저 단점을 살펴보면 다음과 같다.

- 방전회로가 길고 단면적이 크기 때문에 회로의 인덕턴스가 커져서 방전전류의 상승시간이 비교적 길다.

- 고전압 방전시 발생하는 플라즈마에 의한 전기장 차폐효과와 방전 전류의 수축효과(Z-pinch effect)로 인하여, 레이저관의 길이가 길어질 경우 이 효과를 극복하기 위하여 방전 전압을 매우 높여야 한다.

- 레이저 출력을 크게 하기 위해서는 레이저관의 구경을 크게 하고 레이저관의 길이를 길게 하여야 하는데, 이 경우 방전 전압을 매우 높여야 하며, Z-pinch 효과로 인하여 레이저관 내부에서 반지름 방향으로의 전류밀도가 균일하지 않게 된다.

- 음극강하(cathode fall)효과 등으로 인하여 광축 방향으로의 전기장 분포가 균일하지 않다.

- 방전 전압은 통상적으로 횡방전방식에 비해 높지만 단위 길이당의 방전 전압(전기장)은 오히려 낮기 때문에 여기효율이 떨어지며, 이를 보상하기 위하여 완충기체의 압력을 낮게 유지하여야 한다.

- 완충기체의 압력을 비교적 낮게 유지하여야 하므로 매질금속의 손실이 비교적 크다.

이와같은 많은 단점에도 불구하고 중방전 여기방식은 현재까지 가장 많이 사용하는 방식이며, 상업용 또는 평균출력이 큰 고출력 레이저 장치의 경우 대부분 이 방식을 채택하고 있다.^(22,26,28,30,32) 그 이유는 다음과 같은 장점 때문이다.

- 레이저관의 단열이 용이하고, 방전용 전원과 플라즈마관 사이의 임피던스 정합(impedance matching)이 횡방전 여기방식보다 우수하기 때문에 고전압 방전만으로 레이저관을 가열할 수 있다. 즉 방전가열방식 플라즈마관을 제작할 수 있다.
- 플라즈마관 구조가 비교적 간단하여 설계 및 제작이 용이하다.
- 플라즈마관 내구성 및 안정성이 매우 우수하다.
- 대출력의 대규모 플라즈마관 제작이 가능하다.

횡방전 여기방식은 레이저 공진기의 광축(레이저 빔 방향)과 여기용 고전압 방전전류의 방향이 서로 수직으로 되어 있는 방식이다. 횡방전 방식 플라즈마관의 내부구조에는 레이저관의 내부에 2개의 평행판 전극을 설치하여 두 전극판 사이에서 횡방전이 일어나게 하는 평행판 전극구조(plane parallel electrode)와 레이저관의 내부에 내경이 서로 다른 2개의 고음점 금속관을 동축구조가 되도록 설치하여 이들 두개의 전극사이에서 횡방전이 일어나게 하는 동축전극 구조(coaxial electrode)가 있다.^(6,9,11,13,17,24)

횡방전 여기방식은 중방전 여기방식에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- 고전압 방전회로의 길이가 짧고 회로의 단면적이 작기 때문에 방전회로의 인덕턴스를 작게 할 수 있다. 따라서 상승시간이 매우 짧은 전류 펄스를 얻을 수 있어, 효율적인 여기가 가능하다.

- 방전 전극 사이에서 광축 방향으로의 전기장 분포가 비교적 균일하고, 방전이 일어날 때 플라즈마에 의한 차폐효과와 방전전류 수축(pinch) 효과가 비교적 작다.
- 완충기체의 압력을 높게(~ 1 atm)하여 동작시킬 수 있기 때문에 레이저관 내부의 레이저 매질 금속 손실율을 낮출 수 있다.

그러나 횡방전 여기방식은 다음과 같은 단점으로 인하여 실용적 응용보다는 레이저 자체의 특성 연구에 주로 사용된다.

- 방전 전극의 단면적과 방전 전류의 단면적이 매우 크기 때문에 충분한 방전 전류밀도를 얻기 위해서는 큰 전류용량을 갖는 고전압 펄스 발생 장치가 필요하며, 따라서 큰 내부용적을 갖는 고효율 레이저 장치 제작에는 어려운 점이 많다.
- 레이저관의 고온 단열이 구조적으로 어렵고 비교적 불완전하며 방전용 전원과 레이저관 사이의 임피던스 정합이 좋지 않아 레이저관 내부로 투입되는 전력이 적다. 따라서 대부분의 경우 부가적인 외부 가열 장치가 필요하다.
- 구조가 비교적 복잡하고 시스템의 내구성에 많은 문제점을 내포하고 있어 장치의 상용화 및 대형화에 어려운 점이 많다.^(10,14)

제 2 절 레이저 플라즈마관의 설계 및 제작

설계 제작한 레이저 플라즈마관은 방전가열형 중방전여기방식 레이저 플라즈마관으로서 레이저 빔직경은 25 mm이며 평균 출력은 30 W이다.

가시광 금속증기레이저는 다른 레이저와 차이가 나는 여러가지 독특한 특징

을 갖고 있으므로 레이저 플라즈마관을 설계 제작할 때에는 몇가지 특별한 주의가 필요하다.

첫째 방전가열방식의 플라즈마관은 에너지원이 고전압 전기방전이며, 펌핑(여기)을 위해 투입된 전기 방전 전력중 레이저 발진으로 소비된 전력을 제외한 나머지 전력이 레이저관을 가열하는데 사용된다. 따라서 레이저관의 내부온도를 레이저 동작에 가장 적합한 온도(약 1,500°C)로 유지시키기 위해서는 투입 전력과 레이저관의 단열이 약 1500°C에서 균형을 이루도록 설계하여야한다.

이 조건에 대해서는 여러 연구진들의 연구결과를 바탕으로 대체적인 경험법칙이 확립되어 있으며, 그 결과는 다음과 같다. ⁽²⁹⁾

- 최대 평균출력이 나오는 펄스반복율의 조건일 때, 펄스 하나에 의한 레이저관 내부 단위체적당 레이저출력 에너지는 약 $4 \mu\text{J}/\text{cm}^3$ 정도이다.
- 최적 펄스반복율은 레이저관의 직경에 반비례하며, 대체적인 관계식은

$$f_{(optimum)} = \frac{300}{d} \text{ [kHz]} \quad (1)$$

이다.

(1)식에서 $f_{optimum}$ 은 최적 펄스반복율이며, d는 직경(단위는 mm)이다.

- 위의 두 조건으로부터 최대 평균출력 P는

$$P = Ld \text{ [watt]}$$

로 주어진다. 위의 식에서 L은 레이저관의 가열길이(레이저매질 길이)이며 단위는 m이다.

이 조건에 따르면 본 연구에서 개발한 레이저관은 내경이 25 mm이고 가열길이가 약 130 cm 이므로, 펄스당 레이저 출력 에너지는 약 2.36 mJ이 되며, 최적 펄스반복율은 $f_{opt} = 12 \text{ kHz}$, 최대 평균출력은 약 30 W가 예상된다. 플라즈마관

의 효율을 약 1%로 가정하면 플라즈마관에 투입되어야 할 전력은 약 3 kW로 계산되며, 펄스당 투입 에너지는 0.25 J이 된다. 따라서 레이저 플라즈마관에 3 kW의 전력이 투입되면 레이저관 내부 온도가 1,500°C를 유지하도록 단열 설계를 하여야한다.

원통구조의 단열체를 거쳐 빠져 나가는 열량 Q_c 는

$$Q_c = \frac{2\pi K_A L(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

, T_1 ; 단열체의 내부온도(레이저관 온도)

T_2 ; 단열체의 외부온도

r_1 ; 단열체의 내경

r_2 ; 단열체의 외경

K_A ; 단열체의 열전도도

L ; 단열체의 길이

로 주어진다.⁽¹²⁾ (2)식으로부터 $Q_c = 3,000$ W 일때 단열체의 외경을 계산하면 내경 33 mm 일 때 약 71 mm 이다.

둘째 금속증기레이저는 레이저가 동작할때 레이저 플라즈마관 내부온도가 약 1,500°C 정도의 초고온이므로 고온 내열, 단열 설계 및 재료의 선택에 세심한 주의가 필요하다. 또한 레이저 플라즈마관은 레이저가 동작할때 높은 온도와 고전압 전기방전으로 인하여 격심한 스트레스를 받으므로 플라즈마관의 수명에 제한을 받게 된다. 따라서 이를 극복할 수 있는 내구성을 갖도록 설계하여야 하며, 제작할때 가공 정밀도에도 신경을 써야한다.

구리증기를 가두어 두는 용기로 사용되는 레이저관의 재료에는 고온에서의 내열 특성이 우수한 alumina, zirconia, magnesia, boron nitride 등이 있으나, 본

연구에서는 열충격(thermal shock)에 강하고 고온에서도 금속과 잘 반응하지 않으며 가격이 비교적 저렴한 고순도의 recrystallized alumina ceramic 재질을 사용하였다. 고순도의 recrystallized alumina ceramic 은 약 1,800℃ 정도까지 사용이 가능하다고 알려져 있으나 1500℃ ~ 1600℃ 정도에서 연화(softening)되기 시작한다. 따라서 플라즈마관 내부의 알루미늄나 레이저관은 광축에 대하여 평행을 유지하도록 기계적으로 잘 지지되는 구조로 설계하여야한다. 사용한 단열재료 및 레이저관 재료의 특성은 표 3-1, 표 3-2와 같다.

셋째 구리증기레이저는 플라즈마관 내부의 불순물에 의하여 그 동작이 크게 영향을 받으므로, 불순물이 외부로부터 유입되지 않도록 고온에서의 진공기밀을 완벽하게 하여야 하며, 플라즈마관의 제작에 사용된 고온내열재 및 단열재료로부터 불순물이 방출되지 않도록 재료 선택에도 유의하여야 한다.

넷째 레이저 플라즈마관은 고반복율의 고전압 고전류 전기방전에 의하여 가열되고 펄핑되므로 고전압절연 설계를 실시하여야 하며, 아울러 효율적인 여기가 되기 위해서는 빠른 방전 펄스가 요구되므로 방전회로의 인덕턴스가 최소화 되도록 하여야 한다.

동축구조 전도체에서 인덕턴스(l)는 고주파 영역에서

$$l=2 \times 10^{-7} \ln(R/r) \quad (3)$$

로 근사된다. (3)식을 사용하여 본 연구에서 제작한 레이저 플라즈마관의 인덕턴스를 계산하면 약 340 nH이다.

☒ 3-1. Properties of Thermal Insulator.

Typical composition	97% alumina 3% silica
Density	0.48 g/cm ³
Organic content	zero
Modulus of Rupture	
- Normal to Thickness	3.1 MPa
- Parallel to Thickness	2.07 MPa
Melting Point	1,870°C
Max. Service Temperature	
- Continuous	1,540°C
- Intermittent	1,650°C
Linear Shrinkage	2%
Thermal Conductivity	
- at 1,075°C	0.19 W/mK
- at 1,350°C	0.23 W/mK
- at 1,650 °C	0.27 W/mK

☒ 3-2. Properties of Alumina Ceramic Tube.

Constitution	99.8% Alumina
Density	3.85 g/cm ³
Impenetrability	gas tight
Flexural Strength	50,000 psi
Tensile Strength	30,000 psi
Max. Working Temperature	1,950°C
Likely Sag Temperature	1,600°C
Thermal Conductivity at 800°C	8.6 W/mK
Thermal Expansion (24°C ~ 1,500°C)	9.8 × 10 ⁻⁶ /°C
Dielectric Strength at 24°C	9 kV/mm
Volume Resistivity	> 10 ¹³ Ohm-cm

다섯째 고전압 방전전극은 전기 방전이 일어날 때 수 100 A ~ 수1,000 A 의 큰 전류가 흐르므로 이에 대한 자세한 검토가 필요하다. 전극에서 전자 방출을 통하여 흘릴 수 있는 전류의 양은 Richardson-Dushman의 식으로 주어진다.⁽²⁵⁾ 즉

$$\begin{aligned}
 J &= \left(\frac{4\pi mek}{h^3} \right) T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \\
 &= A_0 T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$, A_0 ; 1.2 \times 10^6 \text{A/m}^2 \text{deg}^2$$

m ; 전자의 질량

e ; 전자의 전하량

k ; Boltzmann 상수

h ; Planck 상수

ϕ ; Work function

T ; 전극의 온도

로 주어진다.

Work function ϕ 는 통상 상수로 취급되나 정확하게는 온도의 함수이므로 일차 근사를 하면

$$\phi = \phi_R + \alpha T
 \tag{5}$$

, Φ_R ; Richardson work function

α ; 온도 계수

따라서 식 (4)는 다시 다음과 같이 표현된다.

$$J = A_o e^{-\frac{e\alpha}{k}} T^2 e^{-\frac{e\Phi_R}{kT}} \quad (6)$$

또한 방전전극은 방전이 일어날때 전기장이 가해지므로 전기장에 의한 Schottkey 효과로 인하여 work function은 영향을 받게 된다. Schottkey 효과에 의한 변화량을 $\Delta\Phi$ 라 하면 work function은 $(e\Phi - e\Delta\Phi)$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 $\Delta\Phi = (eE/4\pi\epsilon_0)^{1/2}$ 이다.

결과적으로 식(6)은

$$\begin{aligned} J &= A_o e^{-\frac{e\alpha}{k}} T^2 e^{-\frac{e\Delta\Phi}{kT}} e^{-\frac{e\Phi_R}{kT}} \\ &= J_o e^{-\frac{e\Phi_R}{kT}} \end{aligned} \quad (7)$$

, J_o ; Zero field current density

로 된다.

식 (7)에서와 같이 전류밀도는 work function 및 온도에 크게 영향을 받게 된다. 일례로 식 (7)에서 온도가 1,000°C 일때 온도가 1% 변하면 $\text{Exp}[-e\Phi_R/kT]$

는 약 70% 가 변하게 된다. 따라서 방전전극을 설계할 때 work function이 낮은 재료를 선택하여야 하며, 전극의 온도도 적절히 유지될 수 있도록 설계하여야 한다.

또한 고전압 방전전극은 플라즈마관의 여러 부분중 플라즈마관 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 부품중의 하나이다. 방전전극은 방전이 일어날때 발생하는 전자나 이온들에 의한 가열과 sputtering, 플라즈마관 내부에서의 화학반응 등에 의해 부식되거나 손상된다. 고온에서 사용이 가능하고 sputtering에 강한 전극 재료로는 tungsten, tantalum, molybdenum, niobium 등이 있으며, 본 연구에서는 내구성 및 전류밀도 향상을 위하여 thorium이 첨가된 thoriated tungsten(work function ; 약 2.7 eV)을 방전전극의 재질로 사용하였다.

상기한 여러 조건을 고려하여 평균출력 30 W급 구리증기레이저용 레이저 플라즈마관을 설계 제작하였으며, 그림 3-2는 개발된 레이저 플라즈마관의 단면도이다. 레이저관으로는 내경이 25 mm, 길이 1,336 mm, 순도 99.8%의 recrystallized alumina ceramic tube를 사용하였다.

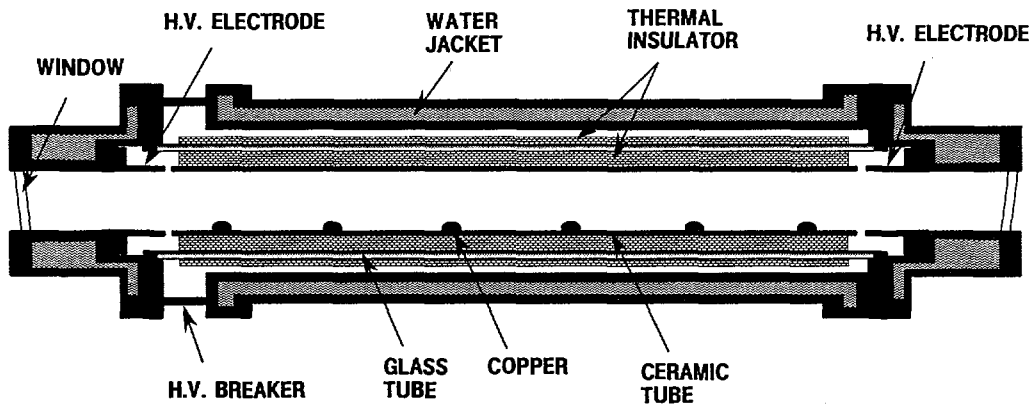


그림 3-2. 30 W급 방전가열형 레이저 플라즈마관 단면도.

레이저관을 단열하기 위해서 고온에서의 단열특성이 우수한 다공질 alumina 재질(alumina 97%)의 원통형 단열재를 레이저관용 alumina 관의 외부에 동축으로 설치하였다.

Alumina 의 열팽창계수는 $1,500^{\circ}\text{C}$ 에서 $9.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이므로 레이저관용 alumina 관은 레이저 동작온도에서 길이가 약 20 mm 정도 늘어나게 된다. 따라서 상기한 바와 같이 설계함으로써 레이저관이 단열재의 내부에서 자유로이 팽창 수축할 수 있게 하였으며, 고온에서도 기계적으로 지지되어 레이저관이 휘지 않도록 하였다.

단열재의 외부는 용융석영관이 감싸도록하여 기계적 견고성을 도모하였으며 냉각을 위하여 용융석영관이 냉각용 water jacket의 내부에 설치되도록 하였다. Water jacket은 이중의 알루미늄 합금관으로 제작되어 있으며, 이중관의 사이로 냉각수를 순환시켜 플라즈마관의 외부를 냉각시킬 수 있도록 하였다

Water jacket의 재료로서 알루미늄을 선택한 이유는 알루미늄이 열전도가 좋으므로 플라즈마관 각 부위를 효율적으로 냉각시킬 수 있기 때문이다. 또한 플라즈마관을 설계할 때 가급적 용접을 배제하여, 용접을 할때 발생하는 기계적 변형을 방지하였다.

플라즈마관의 진공기밀을 위하여 용융석영관과 알루미늄관 사이에 silicone 재질의 O-ring 을 설치하였다. O-ring의 위치를 냉각수가 흐르는 알루미늄관 가까이 함으로써 레이저관이 고온으로 가열되더라도 진공기밀에는 영향을 받지 않도록 하였다.

Water jacket 의 이중 알루미늄관은 고전압 방전회로의 일부로 사용되며, 그 회로는 동축구조가 되도록 하였다. 동축구조가 되게 함으로써 회로의 인덕턴스를 최소화하여 방전전류의 상승율이 극대화되게 하였다. 이로써 레이저관 내부

의 구리원자가 효율적으로 펌핑되도록 하였다.

Water jacket 의 양단 중 한쪽 부위에는 고전압 절연체(H.V. breaker)를 설치하여 두 방전전극사이를 고전압 절연하였다. 플라즈마관의 양단에는 완충기체의 주입구 및 배기구를 설치하여 레이저 동작중에도 완충기체를 흘릴 수 있도록 하였다.

그림 3-3은 제작한 고전압 방전전극의 구조이다. 길이 42 mm, 직경 3.3 mm의 thoriated tungsten 봉을 그림과 같이 구리관 내부에 환형으로 배열 설치하였다. 구리관은 thermal radiation shield 역할을 하여, 방전이 일어날때 tungsten이 적절하게 가열되어 전자방출을 용이하게 하고, 가열된 tungsten으로부터 열이 용융석영관으로 전달되지 않게 하는 역할을 한다.

방전 전극을 alumina 재질의 레이저관 외부에 설치함으로써 레이저관 및 tungsten 전극의 내구성이 높아지도록 하였으며, 레이저관용 alumina관의 길이 전체가 가열길이가 되어 레이저 매질을 최대로 활용할 수 있도록 하였다.

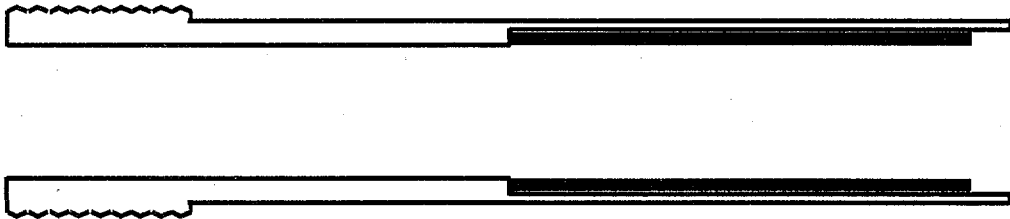


그림 3-3. 제작한 고전압 방전전극의 구조.

두 방전전극 사이의 거리(discharge length ; 방전길이)는 1,376 mm 이다. 레이저창(laser window)은 두께 13 mm인 용융석영판을 사용하였다. 그 이유는 레이저관이 가열되었을 때 발생하는 적외선이 레이저창을 가열하여 파손시키는 것을 방지하기 위함이다. 레이저창은 광축(레이저 빔)에 대하여 5° 경사지도록 설치하여 레이저가 동작할때 레이저창의 표면반사에 의한 기생발진(stray oscillation)을 방지하였다.

구리재질의 고전압 방전전극 holder와 레이저창 사이에 안쪽면을 나사산형으로 가공한 알루미늄판을 설치하여, 가열된 레이저관으로부터 방출되는 적외선을 반사시켜 레이저창이 과열되지 않도록 하였다.

상기와 같은 과정으로 설계한 플라즈마관의 상세 도면을 보고서의 끝부분에 부록으로 첨부하였다.

제 3 절 방전가열형 플라즈마관의 출력 특성

1. 레이저 플라즈마관의 preconditioning

처음 조립된 레이저 플라즈마관 부품들은 부품 내부에 상당량의 불순물이 포함되어있다. 특히 레이저관으로 사용되는 recrystalized alumina관과 단열재로 사용되는 다공질의 alumina 단열재 및 thoriated tungsten 고전압 방전전극은 많은 불순물을 내포하고 있다.

불순물 중에서 특히 산소, 수분, 유기화합물 등은 전자친화력이 크므로 고전압 방전이 일어날때 발생하는 전자와 결합하여 음이온이되는 과정을 통해 레이저 플라즈마관 내부에 있는 전자를 소멸시키는 역할을 하기 때문에 전기방전과 레이저 발진을 방해한다. 따라서 새로 조립된 레이저 플라즈마관은 레이저 동

작에 앞서 preconditioning을 해야 한다.

본 실험에서는 고전압 방전법을 사용하여 preconditioning을 실시하였으며, 그 과정은 다음과 같다. 먼저 플라즈마관을 상온에서 24시간 이상 진공배기하여 불순물을 1차 제거하였다. 이때 내부 진공도는 1 mbar 이하를 유지하였다.

불순물을 1차 제거한 후, Ne 기체를 60 cc/min.의 비율로 흘리면서(플라즈마관 내부 압력은 30 mbar 유지) 전기 방전을 수 10회 반복 실행하였다. 최초의 방전 설정 전압은 약 20 kV, 방전 지속 시간은 1 ~ 2분 가량이었으며 방전 및 배기의 횟수가 거듭될수록 방전 유지시간이 늘어나 수 10회의 방전 및 배기가 반복되면 불순물이 거의 다 배출되어 방전 전압을 30 kV로 올려도 정상적인 방전을 유지하게 되었다. 방전과 방전 사이의 배기 기간은 약 5 ~ 10분 정도가 적당하였다.

그 뒤 플라즈마관의 한쪽 레이저 창을 열고 약 20 g의 레이저 매질 금속(순도 99.996%)을 약 20 cm 간격으로 레이저관 내부에 투입한 뒤 약 2시간 동안 전기방전을 시켜 preconditioning을 마감하였다.

2. 출력 특성 실험장치의 구성

Preconditioning을 완료한 후 레이저 플라즈마관의 출력 특성을 조사하였으며, 이를 위하여 그림 3-4와 같은 실험 장치를 구성하였다.

레이저관의 내부온도는 MIKRON사의 M90-R 적외선 온도계로 측정하였다. 적외선 온도계를 사용하여 레이저관 내부 온도를 측정할 때 플라즈마관의 중앙부에 위치한 용융된 금속 표면을 측정 위치로 하였다.

레이저의 평균출력은 레이저 power meter (Laserstar & FL250A, Ophir, Israel)를 사용하여 측정하였으며, 레이저펄스 측정은 고속 PIN Si-photodiode

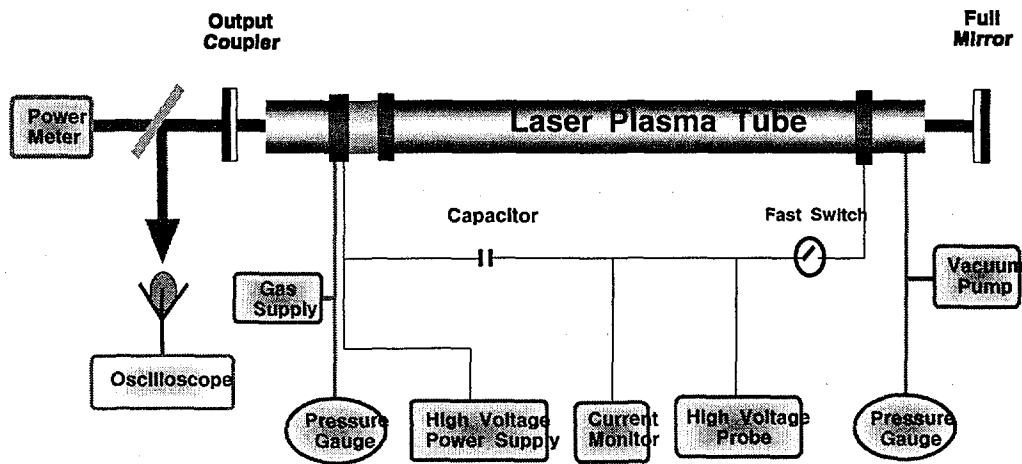


그림 3-4. 출력특성 조사를 위한 실험장치 구성도

(ET2000, Electro-optics Technology Co., U.S.A.)를 사용하였다. 펄스전압 및 전류 검출은 고전압 probe(model P6015, Tektronix, U.S.A.) 및 current monitor(model 110, Pearson Electronics Inc., U.S.A.)를 사용하였으며 검출된 신호들은 digital oscilloscope(model DSA 602A, Tektronix, U.S.A.)를 사용하여 파형을 관측하였다.

플라즈마관 내부 압력은 Balzers사의 진공계(model TPG252, model APR260 1000mbar)를 사용하여 측정하였고 완충기체의 유량은 미국 Sierra사의

디지털 유량계를 사용하여 측정하였다. 내부압력을 측정할 때 압력 센서 (APR260 1000mbar)는 테프론 튜브를 사용하여 플라즈마관으로부터 전기적으로 분리되도록 장착함으로써 플라즈마관이 동작할때에도 전기적 잡음 영향없이 내부 압력을 측정할 수 있도록 하였다.

3. 제작된 플라즈마관의 출력 특성.

preconditioning과 실험장치 구성을 완료한 뒤 평면-평행판 (plane -parallel)형 안정 공진기를 구성하여 제작한 레이저 플라즈마관 출력 특성을 조사하였다.

그림 3-5는 펄스전원의 전압 28 kV, 전류 168 mA, 펄스 폭 60 ns, 펄스 반복율 10 kHz, 완충기체 압력 36 mbar, 그리고 완충기체로는 H₂ 1%가 포함된 99.999% 순도를 가진 Ne을 사용하여 펄스 방전을 일으켰을때의 시간에 따른 레이저 빔 출력특성이다. 그림에서 알 수 있듯이 방전이 시작된지 약 60 여분이 지난 뒤부터 레이저 발진이 시작되며 최대 출력에 도달하기까지는 방전이 시작된 뒤 약 120 여분이 걸림을 알 수 있다. 이때 최대 레이저빔 출력은 32 W였으며 투입 전력에 대한 레이저빔 효율은 0.68%였다.

그림 3-6은 전압 28 kV, 전류 163 mA, 펄스 폭 60 ns, 펄스 반복율 10 kHz, 완충기체 압력 36 mbar, 그리고 수소가 포함되지 않은 99.999% Ne완충기체를 사용했을때의 레이저빔 출력특성이다. 그림에서 130분이 경과한 뒤 출력이 다소 가파르게 증가하는 이유는 직류 고전압전원 장치의 출력전류를 168 mA로 재조정했기 때문이다. 일반적으로 구경 40 mm 이상의 중, 대구경 플라즈마관에서는 완충기체에 약간의 H₂를 첨가하면 레이저 빔 출력이 수 10% 향상된 것으로 보고되었으나 그림 3-5, 그림 3-6을 비교해보면 구경 25 mm 레이저관에서는 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

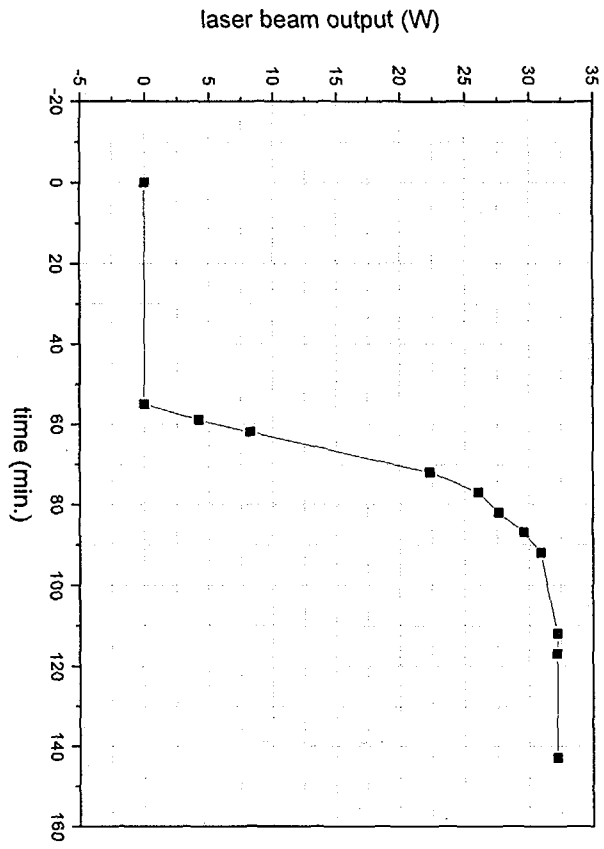


그림 3-5. 레이저 출력 특성(Ne + 1% H₂)

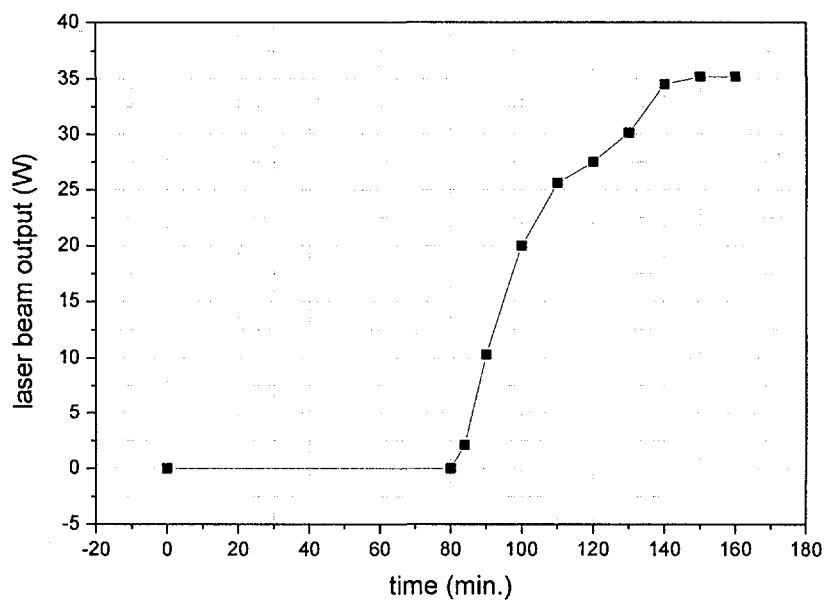


그림 3-6. 레이저 출력특성(99.999% pure Ne)

그림 3-7은 펄스 반복율에 따른 레이저 출력의 변화를 나타낸 것이다. 이때 방전전압은 28kV 완충기체 압력은 36 mbar였다.

반복율을 높이면 레이저 발진 회수가 많져서 레이저 출력은 반복율에 비례하여 증가된다. 그러나 반복율이 준안정 상태인 레이저 하준위의 이완율보다 빠르게 되면 레이저 하준위에 축적되는 구리원자의 수가 증가하여 레이저 출력은 억제된다. 그림 3-7에서 펄스 반복율 12 kHz까지는 레이저 출력이 펄스 반복율에 선형적으로 비례하여 증가하고 그 이상으로 반복율이 높아지면 출력 증가율이 약간 둔화됨을 알 수 있다.

완충기체는 레이저관 내부에서 레이저 매질인 금속증기의 확산을 막아 증기가 레이저창에 달라붙는 것을 방지하며, 전기 방전시 방전 전류를 흘려 주는 역할을 한다. 금속증기 레이저에 사용 가능한 완충기체로는 He, Ar, Ne, Xe 등이 있으며, 기체의 종류에 따라 레이저 출력 특성이 달라진다. 이들 기체 중에서 Ne이 주로 사용된다. 그 이유는 다음과 같다. 고전압 기체 방전시 발생하는 전자는 기체원자와의 비탄성충돌, 탄성충돌에 의해서 에너지를 잃는다. 비탄성충돌의 경우 Ne의 충돌단면적이 Ar, Kr, Xe 등의 충돌단면적 보다 작기 때문에 Ne 기체내에서 전자의 에너지 손실이 더 작다. 따라서 금속원자의 여기에 효율적인 높은 에너지 (4-50eV)를 갖는 전자의 수가 증가한다.

또한 비탄성충돌 단면적은 He 이나 Ne의 경우가 비슷하나, 탄성충돌의 단면적은 Ne이 He의 약 1/3 정도이다. 탄성충돌에 의한 전자의 에너지 손실은 비탄성충돌에 의한 손실에 비해 크지는 않지만, 이 역시 전자의 에너지 손실에 일부 기여를 한다. 따라서 Ne이 He에 비해 높은 에너지를 갖는 전자의 수를 더 증가시킬 수 있으므로, 금속(구리)증기레이저의 완충기체로 Ne을 사용한 경우가 레이저 출력면에서 가장 유리하다.

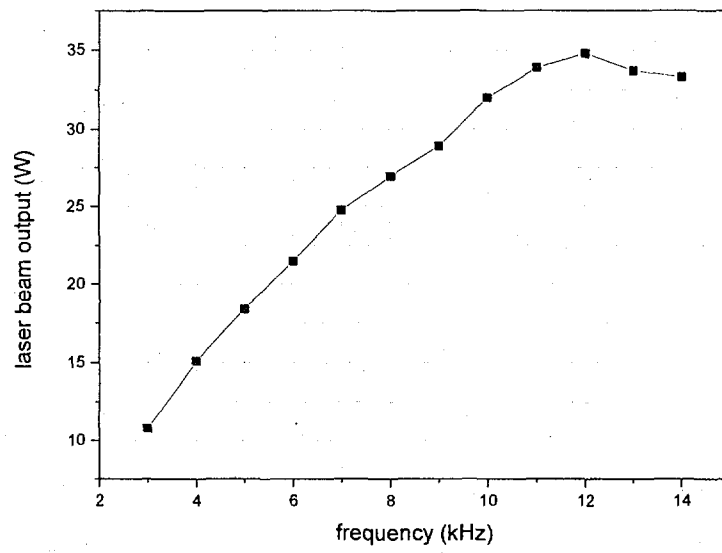


그림 3-7. 반복율에 따른 레이저 출력특성

본 실험에서는 완충기체로 H_2 가 약간(1%) 포함되어있는 혼합기체 또는 순도 99.996% 인 순수 Ne을 사용하였다. 그림 3-8은 완충기체의 압력변화에 따른 레이저 출력을 나타낸 것이다. 이때 펄스전압(방전전압)은 28kV, 펄스 반복율은 10 kHz, 레이저관의 내부온도는 1,500°C였다.

그림 3-8에서 완충기체 압력이 30 ~ 50 mbar 부근일때 최대 레이저 출력을 나타냄을 알 수 있다. 일반적으로 기체 방전에서 전자온도(T_e)는 E/P 값에 크게 의존하므로, 완충기체의 압력이 낮으면 T_e 가 지나치게 높게 되며, 또한 방전 전류의 주 경로가 완충기체가 아닌 구리증기가 됨으로써 많은 수의 구리원자를 이온화 시키게 된다. 따라서 지나치게 낮은 완충기체 압력에서는 레이저 출력이 감소하고, 역으로 완충기체의 압력이 지나치게 높으면 전자와 완충기체간의 충돌횟수가 증가하여 이 결과 T_e 를 떨어뜨리게 되므로 역시 레이저 출력이 감소한다고 알려져 있다. 이때 방전전압을 상승시키면 전자온도(T_e)가 상승하여 레이저 출력이 증가된다. 본 실험 조건하에서는 약 36 mbar에서 최대 출력을 나타내었다. 레이저 동작의 안정성 측면에서는 완충기체의 압력을 높게 사용하는 것이 유리하다. 완충기체의 압력이 낮은 경우 금속증기의 확산속도가 증가하여 금속의 손실율이 커짐으로써 1회 금속 투입으로 레이저를 연속 동작시킬 수 있는 시간이 줄어들기 때문이다.

그림 3-9는 방전 전압에 따른 레이저 출력 특성이다. 이때 펄스 폭은 60 ns, 펄스 반복율은 10 kHz였으며 완충기체 압력은 36 mbar였다. 그림 3- 9에서 전압이 증가할수록 여기효율이 증가하여 출력이 증가함을 알 수 있다. 그러나 전압이 증가할수록 투입전력 또한 같이 증가하므로 적정수준 이상의 전압을 장시간 인가하면 플라즈마관이 과도하게 가열되어(overheating) 출력이 감소하게 된다. 그림 3-10은 레이저빔의 파형이며 반치폭은 약 30 ns 이다.

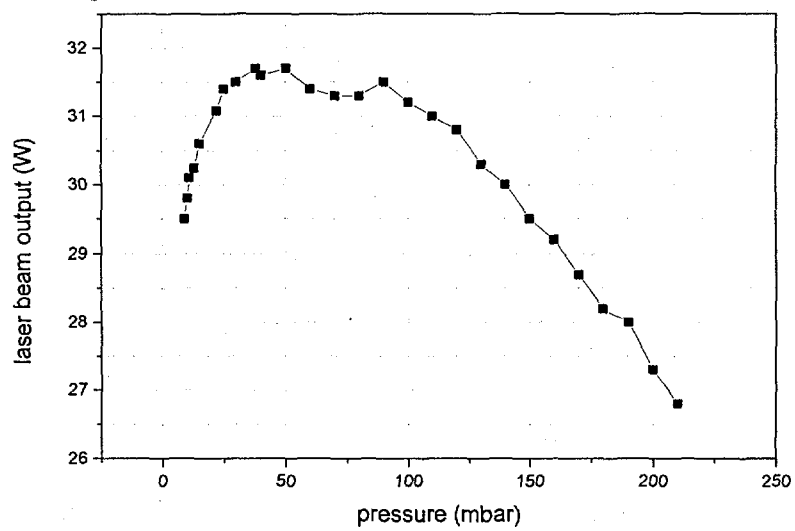


그림 3-8. 완충기체 압력에 따른 레이저빔 출력 특성.

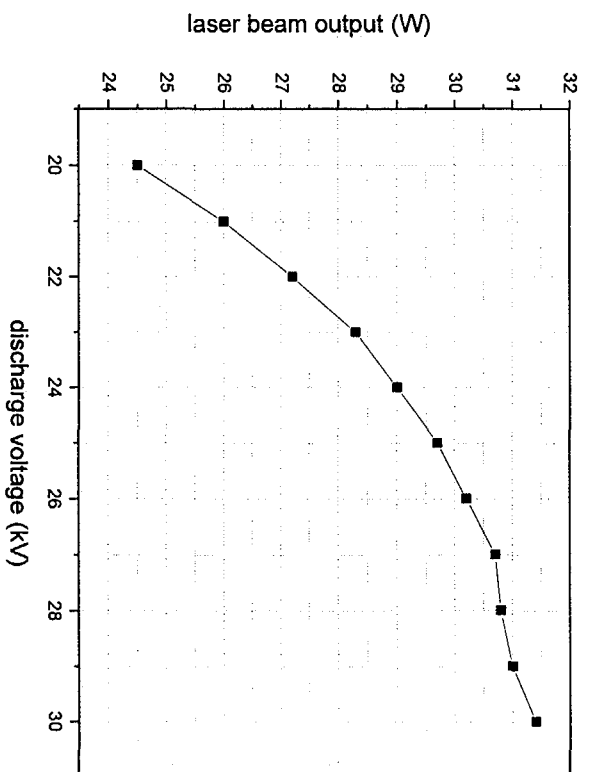


그림 3-9. 방전전압에 따른 레이저빔 출력 특성.

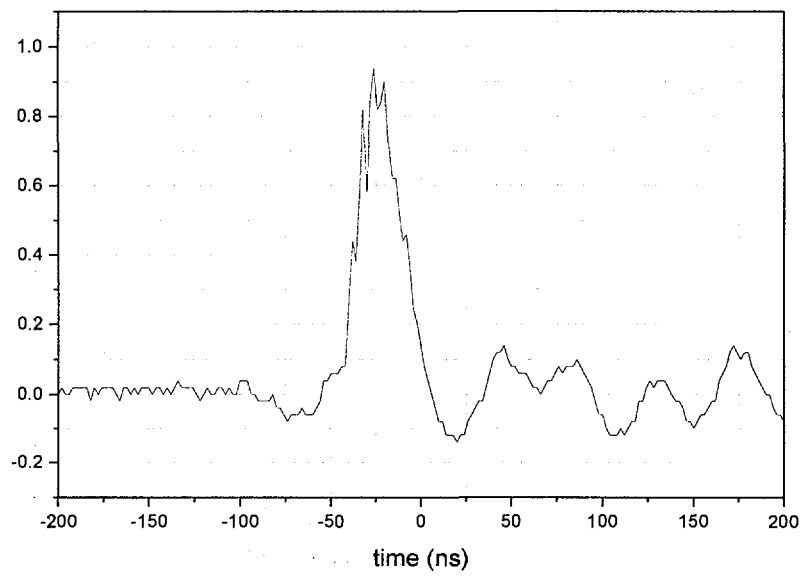


그림 3-10. 레이저 출력 파형

제 4 장 결 론

평균 출력 30 W 이상인 가시광 레이저용 플라즈마관을 국산 고유 모델로 상품화하는것을 목표로 연구개발에 착수하여 그 목표를 달성하였다.

가시광 레이저용 플라즈마관은 금속증기를 생성하는 방법에 따라 외부가열형, 방전가열형, 이중방전형 등으로 구별할 수 있으며, 본 연구에서는 실용성 및 내구성이 우수하고 고출력화가 가능한 방전가열형 종방전 여기방식을 채택하였다. 개발된 레이저 플라즈마관은 레이저관(alumina tube), 단열재, 진공기밀관, water jacket, 고전압 방전전극 등으로 구성되어 있으며, 수 년간의 연구 결과 이미 확보하고 있는 초고온 내열 및 단열 기술, 진공 관련 기술, 광학 및 고전압 펄스 방전 기술을 활용하여 설계 제작하였다.

레이저 플라즈마관의 제일 내부에 위치하는 레이저관 재료는 열충격에 강하고 고온에서도 금속과 반응을 하지 않는 recrystallized alumina 관을 사용하였으며, recrystallized alumina 관 주위는 다공질의 고순도 alumina 재료를 사용하여 단열하였다.

Water jacket은 이중의 알루미늄 합금관으로 제작하였다. 이중관 사이로 냉각수를 흘림으로써 플라즈마관을 냉각할 수 있도록 하였다. Water jacket의 재료로써 열전도율이 우수한 알루미늄 합금을 선택하여 플라즈마관의 각 부위를 효과적으로 냉각시킬 수 있었다. 그 결과 진공기밀용 O-ring에 가해지는 열적 스트레스를 감소시킴으로써 진공기밀 (leak rate ; $\sim 10^{-3}$ mbar/min 이하)을 완벽하게 할 수 있었으며, 플라즈마관의 내구성 및 안정성을 대폭 향상시켰다. 또한 플라즈마관을 설계할 때 용접을 가급적 배제하여, 용접할 때 발생할 수 있는 기

계적 변형이 방지되도록 하였다. 또한 이 water jacket은 방전회로의 일부로 사용되며, 동축구조로 설계하여 인덕턴스를 최소화함으로써 방전전류의 상승률을 빠르게하여 효율적인 펌핑이 되도록 하였다.

고전압 방전전극은 전기방전때 발생하는 전자나 이온이 충돌하여 가열되는 곳으로 플라즈마관 수명에 큰 영향을 주는 부분이다. 본 연구에서는 내구성(refractoriness)이 가장 우수한 텅스텐(tungsten)을 사용함으로써 내구성을 향상시켰다. 특히 텅스텐 재료중 일함수(work function)가 작은 (~ 2.7 eV) 토륨이 함유된 텅스텐(thoriated tungsten)을 전극재료로 사용하여 레이저관이 가열되지 않은 동작 초기부터 원활한 고전압 방전이 이루어질 수 있도록 하였다.

레이저창의 재료로는 온도 특성이 우수한 용융석영판을 사용하였으며, 특히 레이저창의 안쪽 부분에 나사산형으로 가공된 알루미늄 관을 설치하여 레이저관으로부터 복사되는 적외선을 역 반사시킴으로써 레이저창의 과열을 방지하였다. 제작된 레이저 플라즈마관의 제원은 표 4-1과 같다.

레이저 플라즈마관의 동작에 영향을 미치는 변수에는 레이저관의 내부온도, 완충기체 압력, 방전전압, 펄스 반복율 등이 있으며, 개발된 레이저 플라즈마관의 동작특성 분석을 위하여 이들 변수에 따른 출력특성을 조사하였다. 제작된 방전가열형 플라즈마관은 레이저관 내부온도 $1,500^{\circ}\text{C}$, 네온(Ne) 완충기체 압력 40 mbar, 방전전압 28 kV, 펄스반복율 10 kHz에서 레이저 평균출력은 32 W 였다.

방전가열형 가시광 레이저 플라즈마관은 $1,500^{\circ}\text{C}$ 정도의 고온에서 동작하며 효율적인 레이저 발진을 위하여 고반복율(5 ~ 12 kHz) 고전압(10 ~ 30 kV) 고전류(수 100 ~ 수 1,000 A) 초단펄스 방전을 필요로 하는 등 그 기술적 수준이 매우 높고 난점이 많으나 이미 확보된 자체 기술을 토대로 국산화 모델 개

발에 적용시켰다. 가시광 레이저 플라즈마관은 서론에서 기술한 바와 같이 많은 응용 분야를 갖고 있으며, 그 응용분야가 모두 전략적 핵심 분야이거나 기반기술 분야이기 때문에 국내 산업기술 발전에 미치는 파급효과도 아주 클 것으로 생각된다.

표 4-1. 레이저 플라즈마관의 제원.

평균 레이저 출력	32 W
레이저관 내경(외경)	25 mm (32.5 mm)
레이저관 내열 온도	1600 °C
단열체 내경(외경)	33 mm (75.5 mm)
석영관 내경(외경)	75.5 mm (84 mm)
방전 길이	1376 mm
냉각 방식	수냉식
방전 전극 재질	(Thoriated) Tungsten
Water Jacket 재질	알루미늄
Water Jacket 외경	137 mm

제 5 장 참고문헌

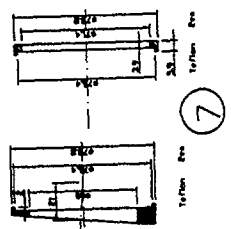
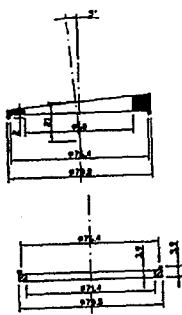
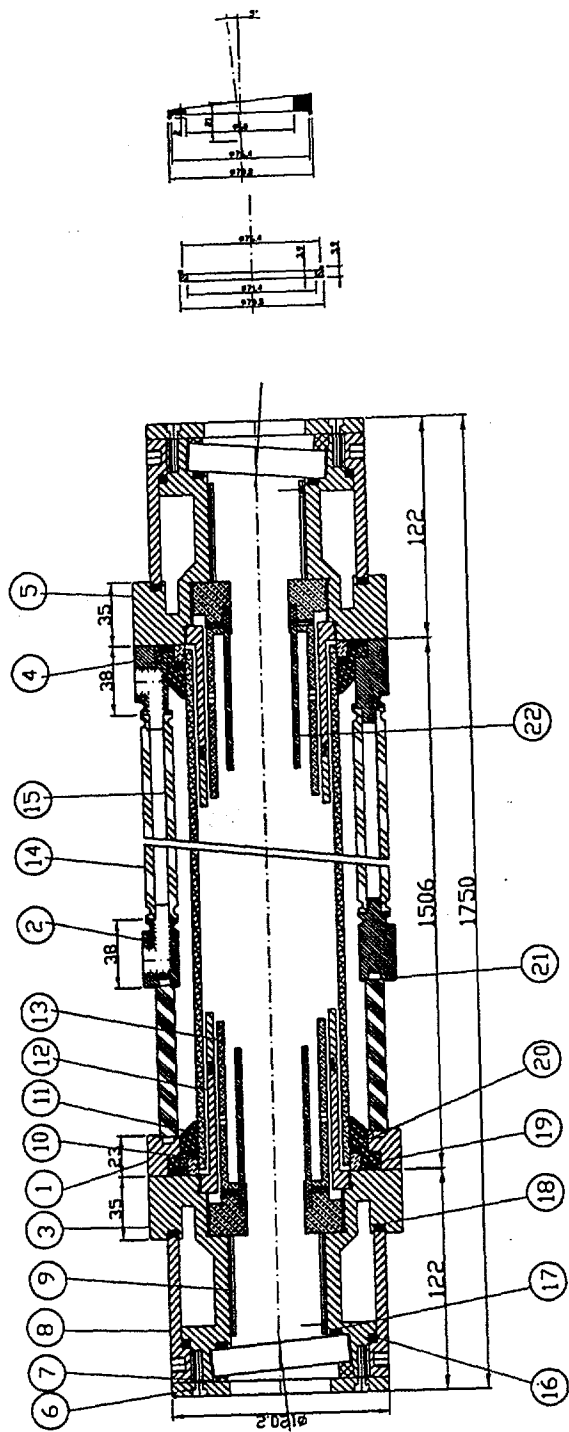
1. W. T. Walter, N. Solimene, M. Piltch, and G. Gould, IEEE J. Quant. Elect., QE-2, 474 (1966).
2. W. T. Walter, M. Piltch, N. Solimene, and G. Gould, Bull. Am. Phy. Soc., 11, 113 (1966).
3. M. Piltch and G. Gould, Rev. Sci. Instrum., 37, 925 (1966).
4. J. F. Asmus and N. K. Moncur, Appl. Phys. Lett., 13, 384 (1968).
5. A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, and G. G. Petrash, JETP Lett., 16, 27 (1972).
6. T. S. Fahlen, J. Appl. Phys., 45, 4132 (1974).
7. A. M. Shukhtin, G. A. Fedotov, and V. G. Mishakov, Opt. Spectrosc., 40, 237 (1976).
8. C. J. Chen, A. M. Bhanji, and G. R. Russell, Appl. Phys. Lett., 32, 146 (1978).
9. P. A. Bokhan and V. B. Shcheglov, Sov. J. Quantum Electron., 8, 219 (1978)

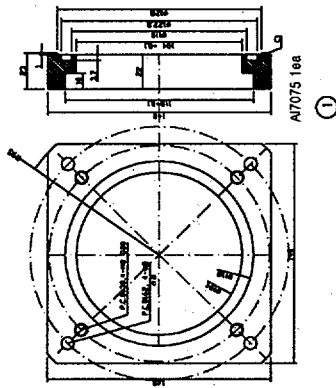
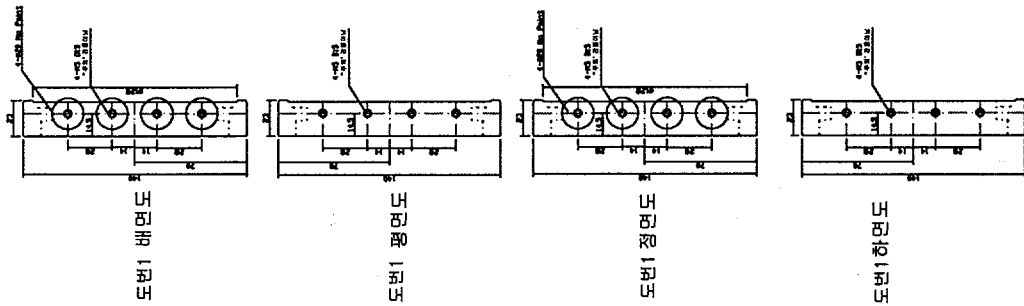
10. A. Yu. Arseniev, Yu. A. Babeiko, O. M. Bakhtin, B. L. Borovich, L. A. Vasil'ev, V. E. Gerts, E. P. Nalegach, G. E. Ratnikov, L. V. Tatarintsev, and A. N. Ul'yanov, *Sov. J. Quantum Electron.*, 10, 1121 (1980).
11. A. V. Sokolov and A. V. Sviridov, *Sov. J. Quantum Electron.*, 11, 1019 (1981).
12. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, John Wiley & Sons (1981), pp. 79-82.
13. O. I. Buzhinskii, I. V. Grekhov, M. E. Levinshtein, V. G. Sergeev, and A. A. Sliviskii, *Sov. J. Quantum Electron.*, 13, 115 (1982).
14. O. I. Buzhinskii, A. V. Efimov, and A. A. Sliviskii, *Sov. J. Quantum Electron.*, 12, 1197 (1982).
15. S. Gabay, I. Smilanski, and Z. Karny, *IEEE J. Quant. Elect.*, QE-18, 996 (1982).
16. T. J. Pivrotto and N. M. Nerheim, *Proc. of AIAA 16th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, July 1983.
17. Jin Joong Kim and Juan Elizonda, *SPIE, Proc. of the Los Alamos Conference on Optics*, 380, 167 (1983).
18. D. N. Astadjov, G. G. Petrash, N. V. Sabotinov, and N. K. Vuchkov, *Opt.*

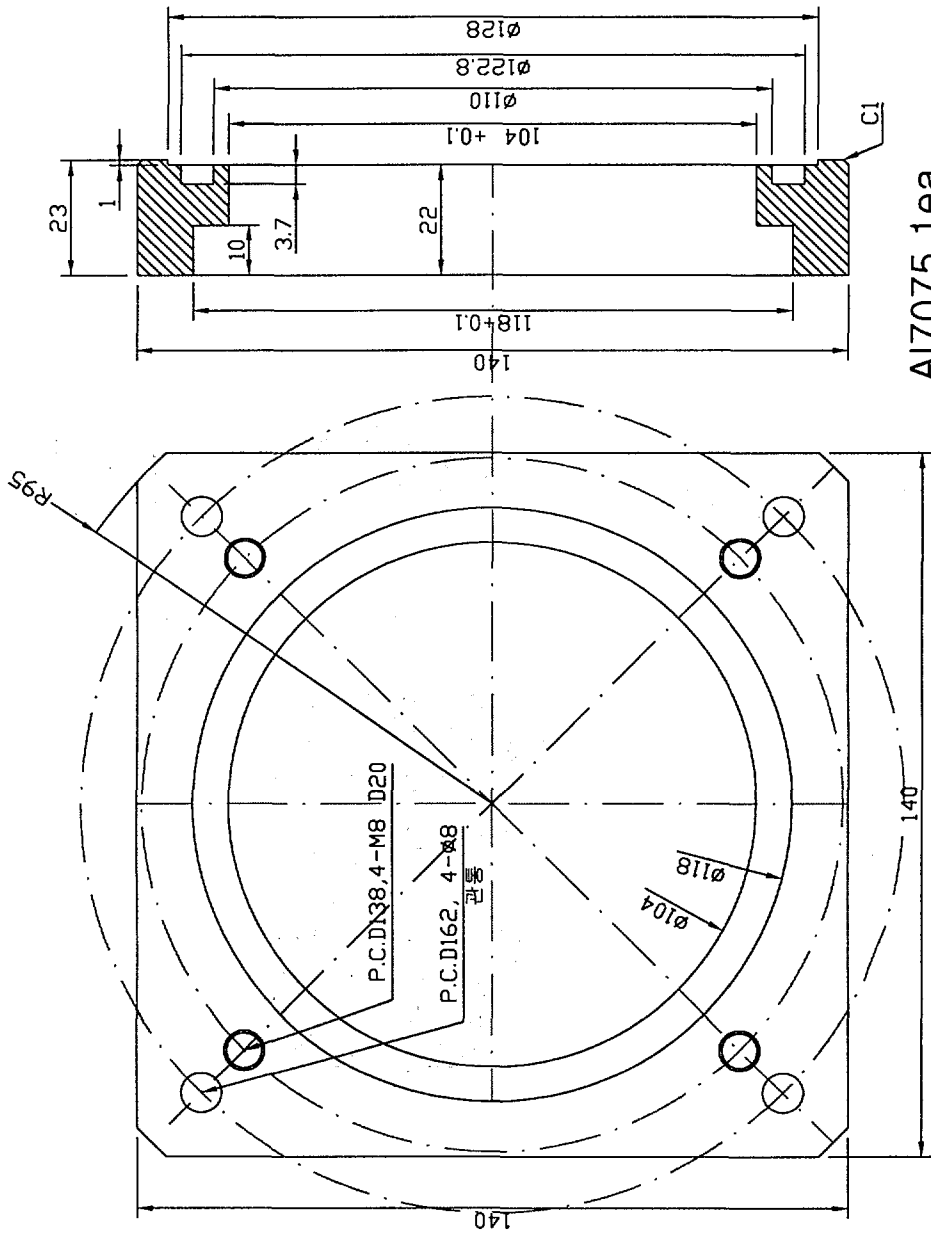
- Comm., 51, 85, (1984).
19. A. Ludmirsky, *Laser and Particle Beams*, 2, 141 (1984).
 20. N. D. Perry and R. C. Tobin, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 17, 1213 (1984).
 21. N. D. Perry and R. C. Tobin, *Appl. Phys. Lett.*, 45, 727 (1984).
 22. O. Marazov, St. Stoilov, V. Borisov, Iv. Draganov, and S. Ivanov, *Phys. E : Sci. Instrum.*, 17, 127 (1984).
 23. Y. Wang, W. Sun, Z. Yao, and B. Shi, *Opt. Comm.*, 55, 345 (1985).
 24. Kiegon Im, Nackchim Sung, and Jin J. Kim, *J. Appl. Phys.*, 59, 3930 (1986).
 25. A. S. Gilmour Jr., *Microwave Tubes*, Artech House Inc. (1986), pp. 108 - 135.
 26. I. H. Hwang, B. H. Cha, and S. M. Nam, *Rev. Sci. Instrum.*, 58, 1185 (1987).
 27. R. R. Lewis, G. A. Naylor, and A. J. Kearsley, *Laser Focus World*, "Copper Vapor Lasers Reach High Power", April 1988.
 28. Yamanaka, *The Review of Laser Engineering*, 17, 37 (1989).

29. R. R. Lewis, *Optical and Quantum Electronics*, 23, S493 (1991).
30. C. Konagai, N. Aoki, R. Ohtani, N. Kobayashi, and H. Kimura, *Proceedings on the 6th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research*, 637 (1994).
31. A. Ohzu, M. Kato, Y. Suzuki, and T. Arisawa, *Proceedings on the 6th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research*, 653 (1994).
32. H. Kimura, R. Otani, N. Aoki, C. Konagai, S. Shirayama, and T. Miyazawa, *The Review of laser Engineering*, 23, 210 (1995).

제 6 장 부 록 (방전가열형 플라즈마관 설계 도면)

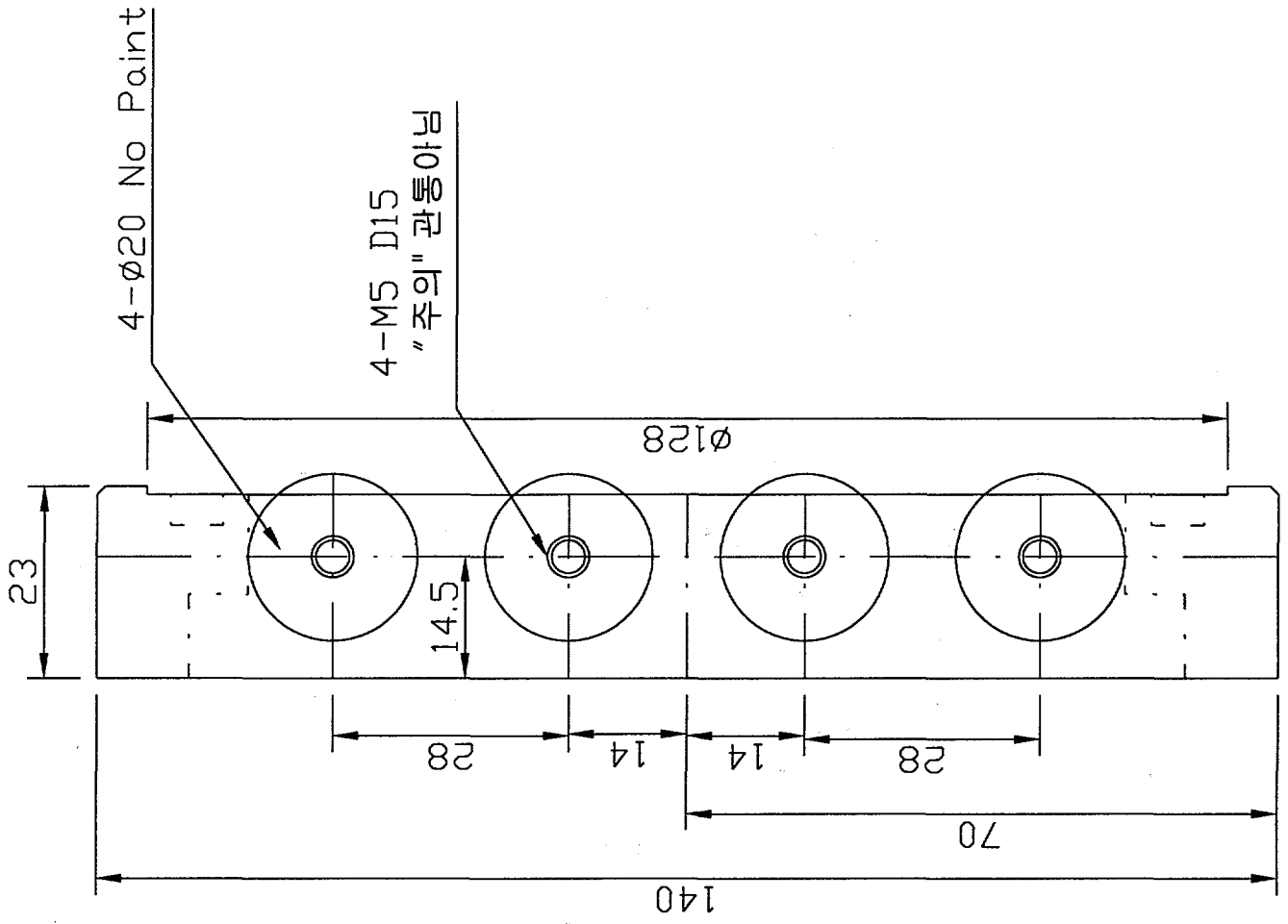




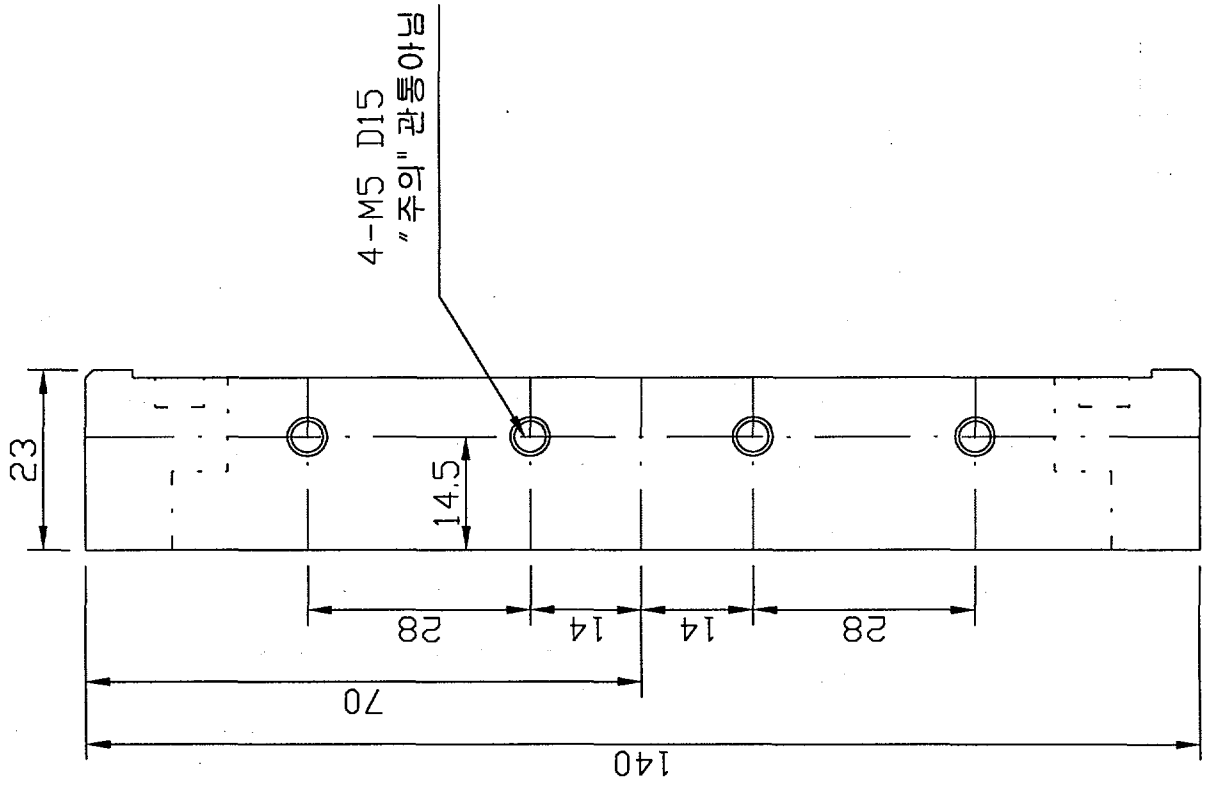


AI7075 1ea

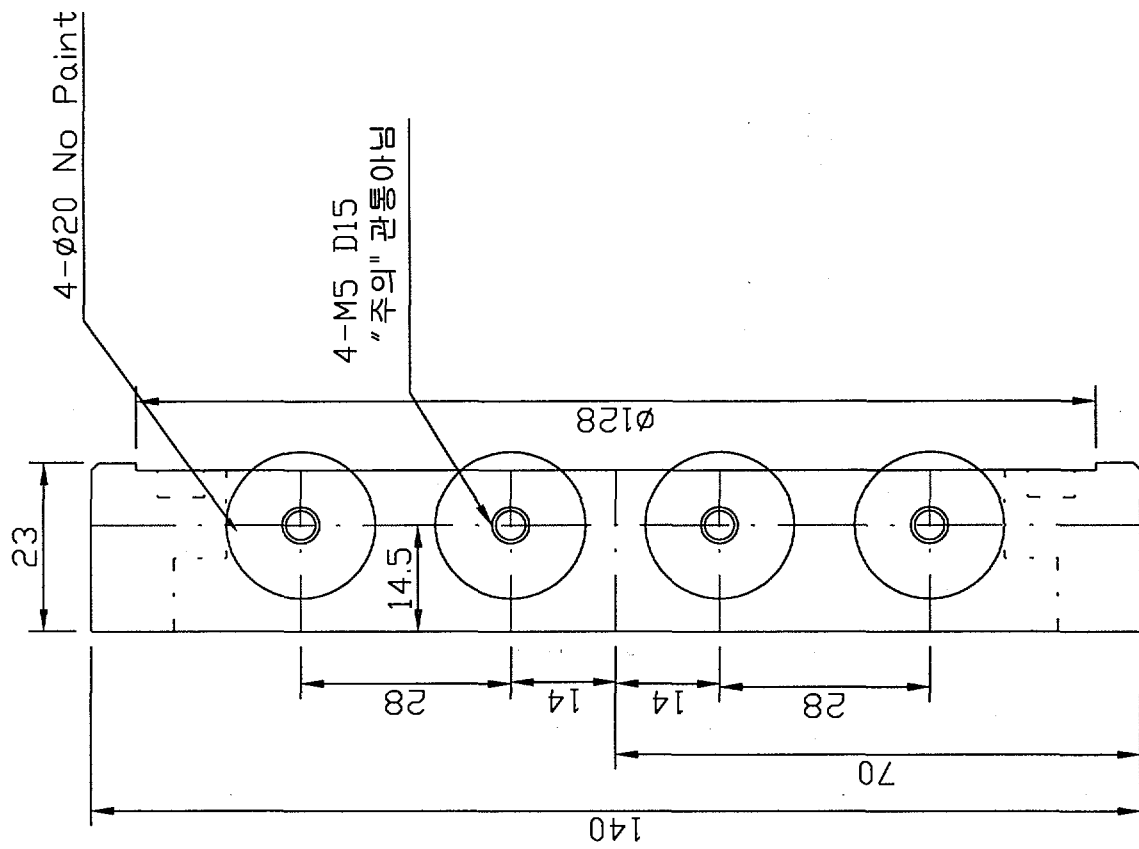
1



도면1 검토도

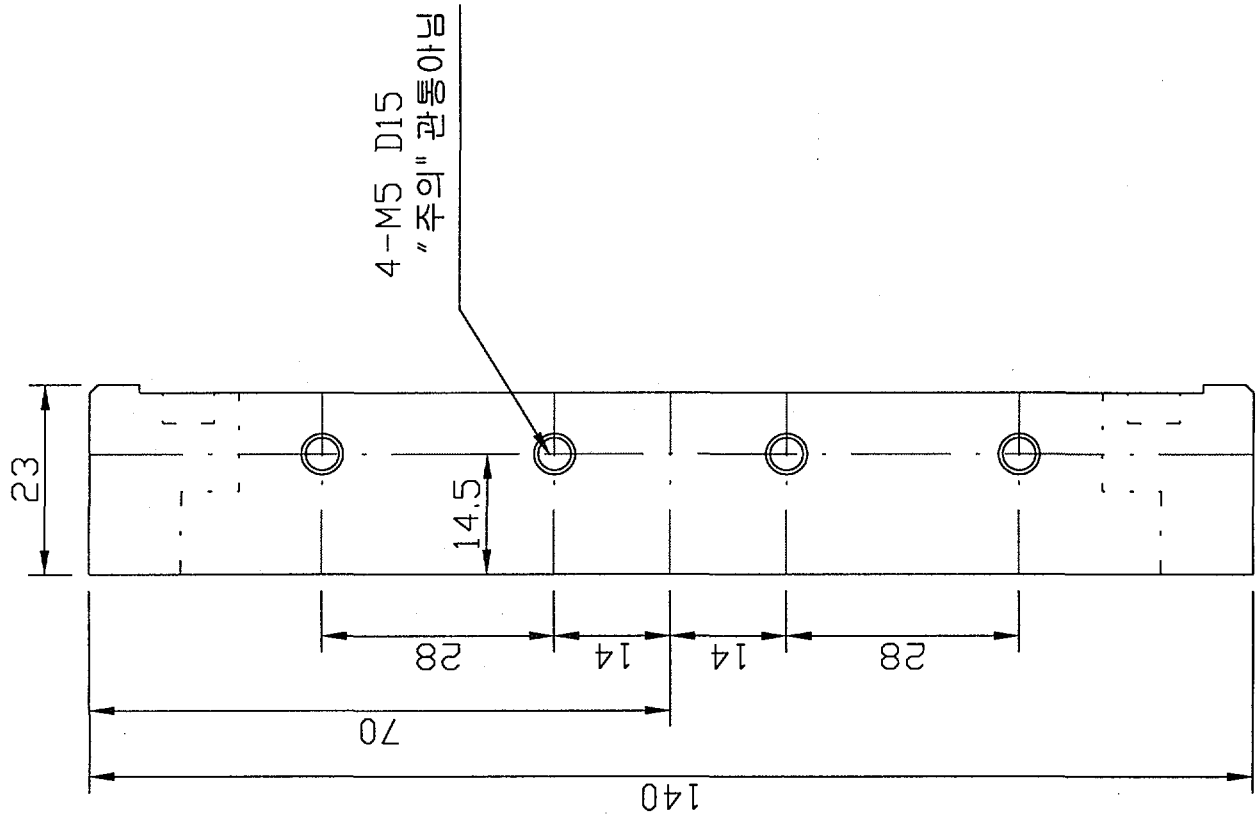


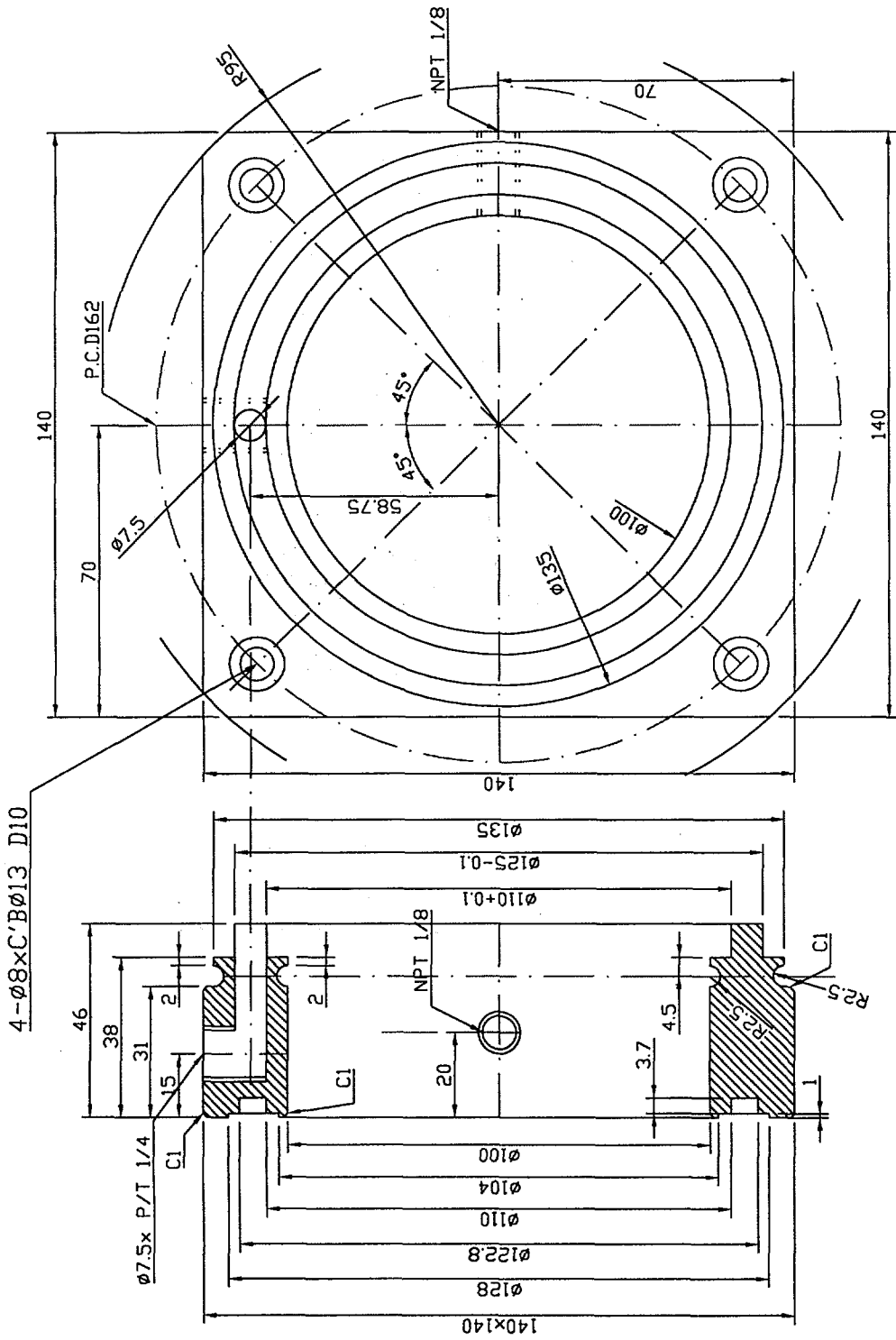
도면 1 평면도



550HA 1455

도면1 하면도

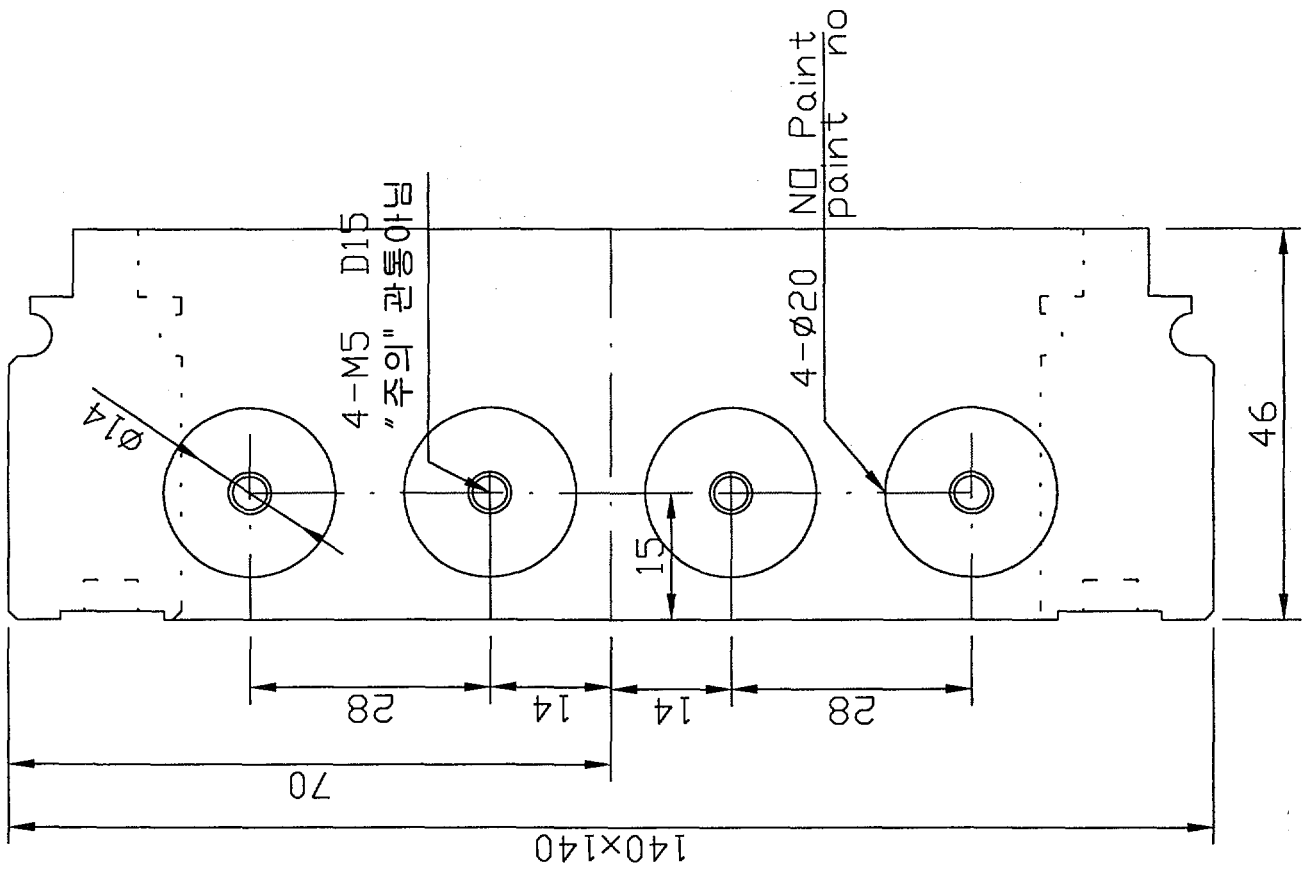




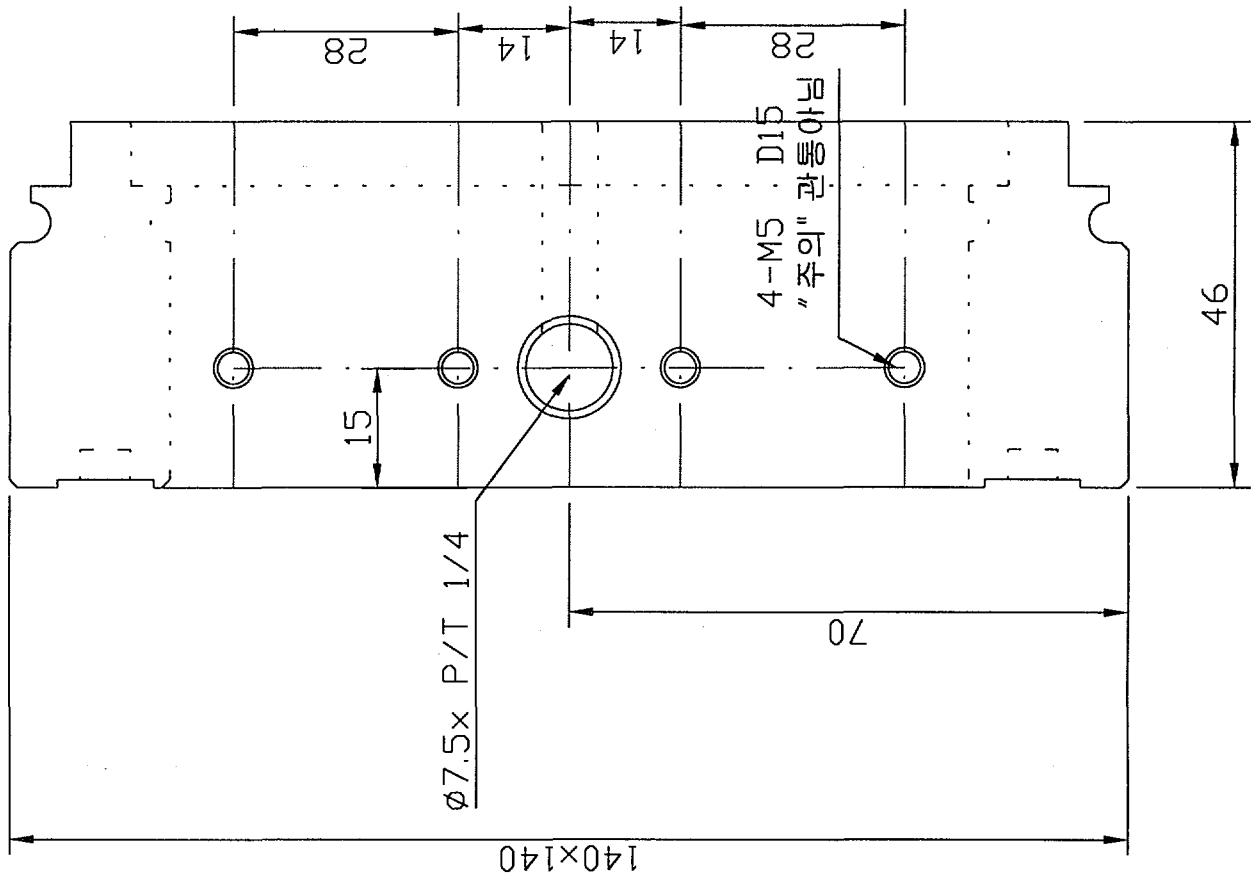
4- $\phi 8 \times C/B \phi 13$ D10

2

AL7075 1e0

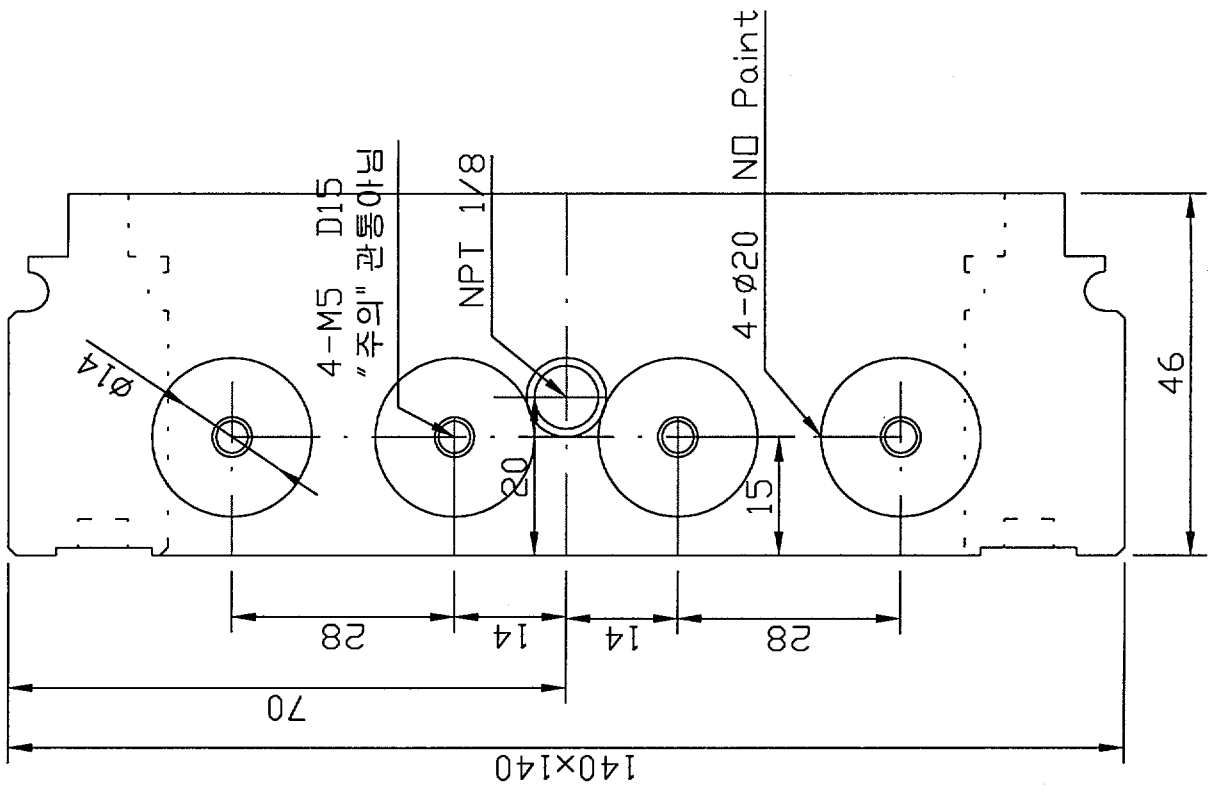


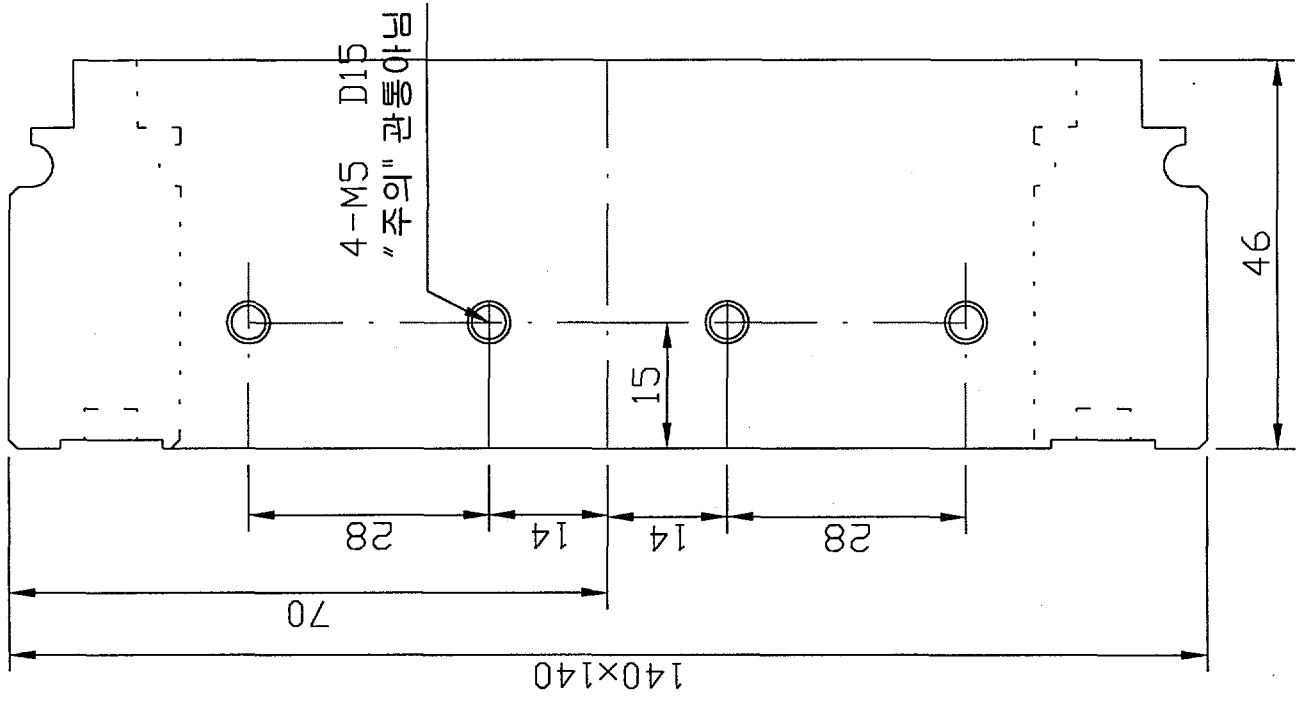
구멍이 2개인 판



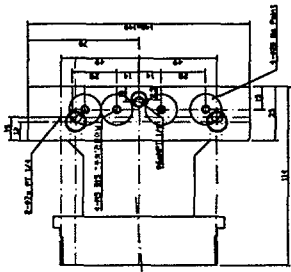
5H2 5H5

5공 배관구

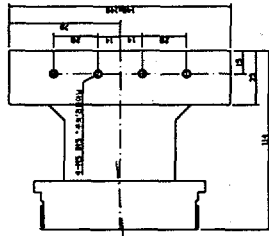




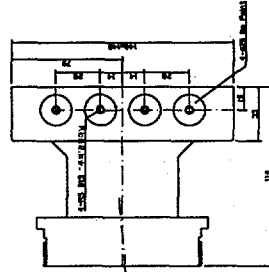
주위 관통야념



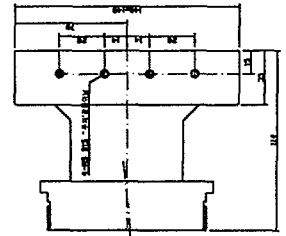
도면 3 배면도



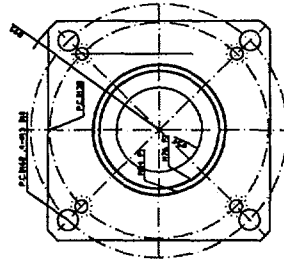
도면 3 정면도



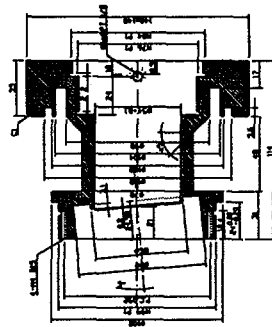
도면 3 좌면도



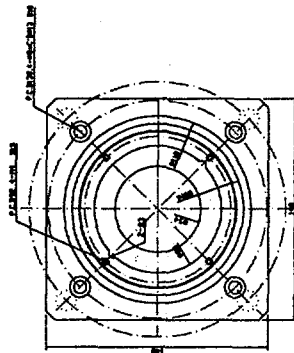
도면 3 하면도



도면 3 앞쪽면도

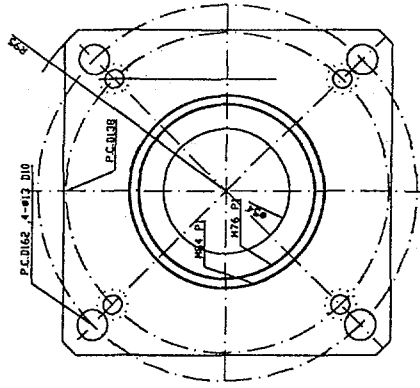


도면 3 정면도

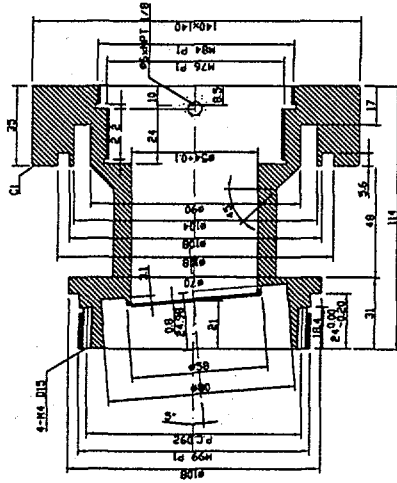


도면 3 좌측면도

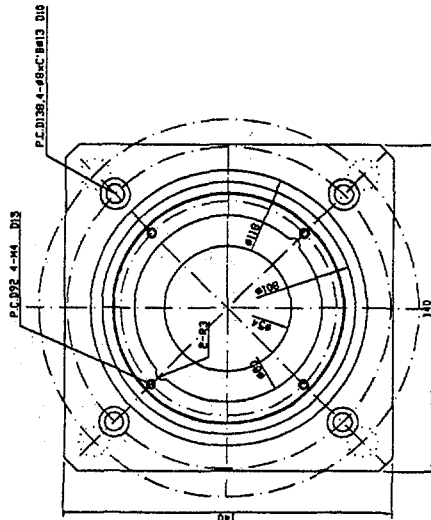
③ A17075 1ea



도면 3 아랫면도



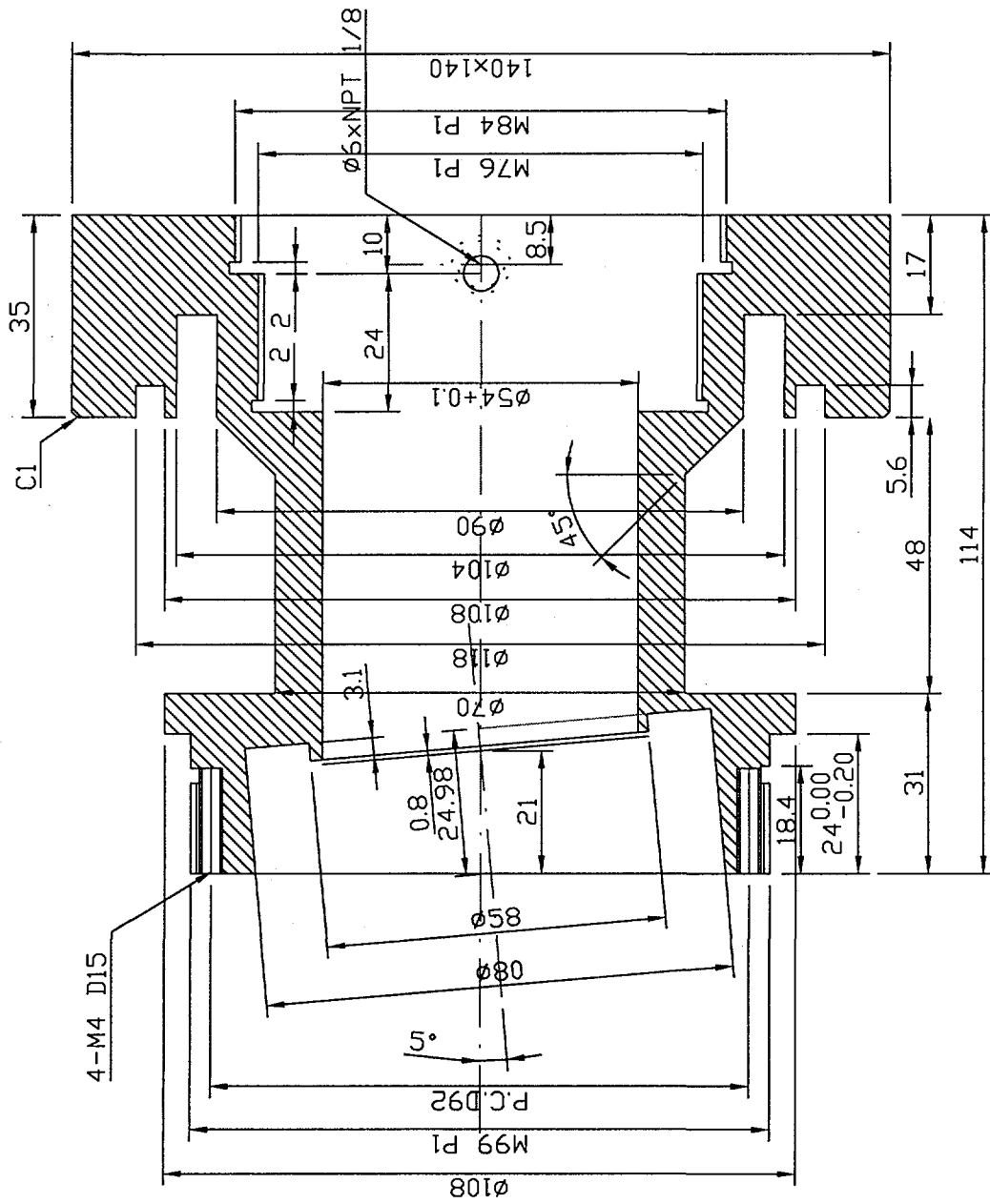
도면 3 정면도

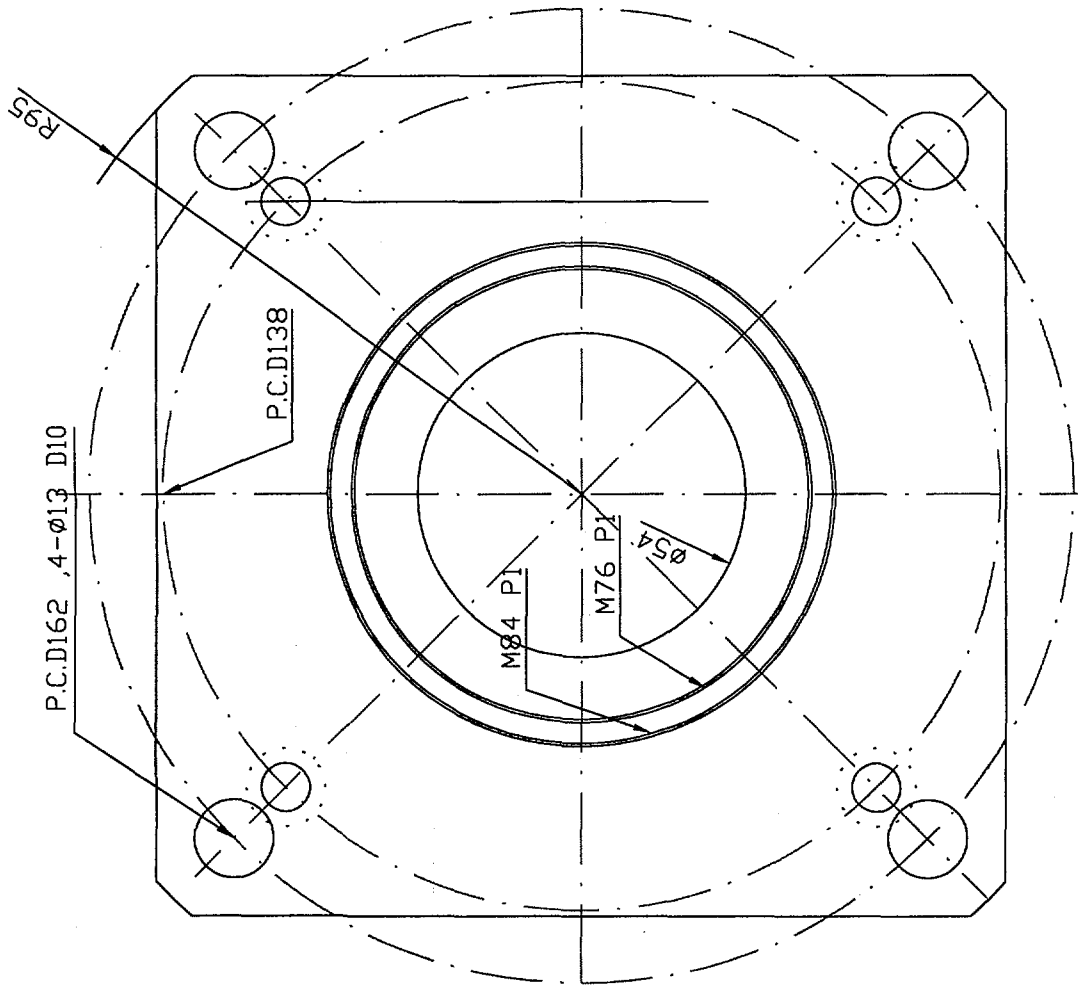


도면 3 좌측면도

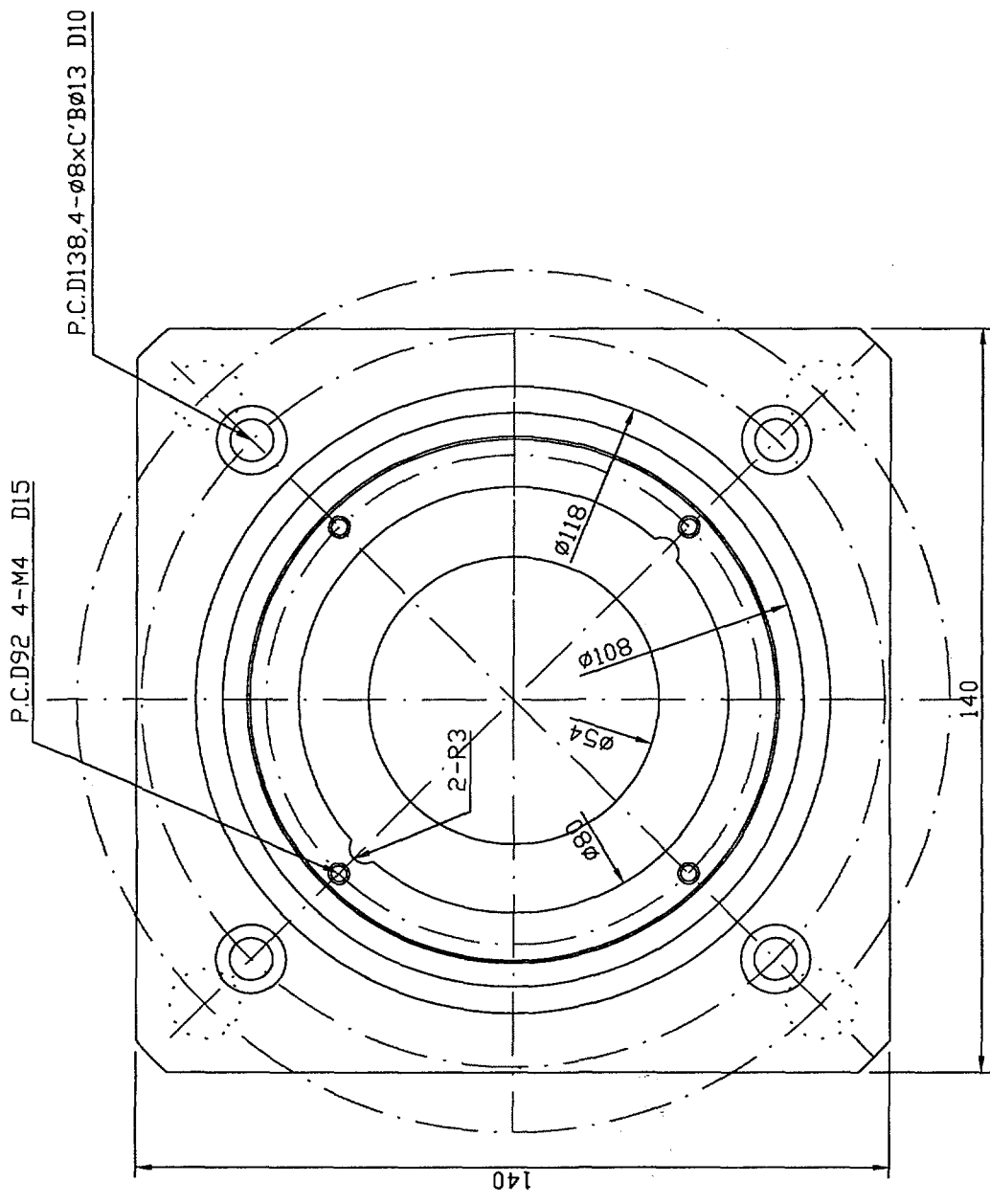
③ Al7075 1ea

도면 3 정면도



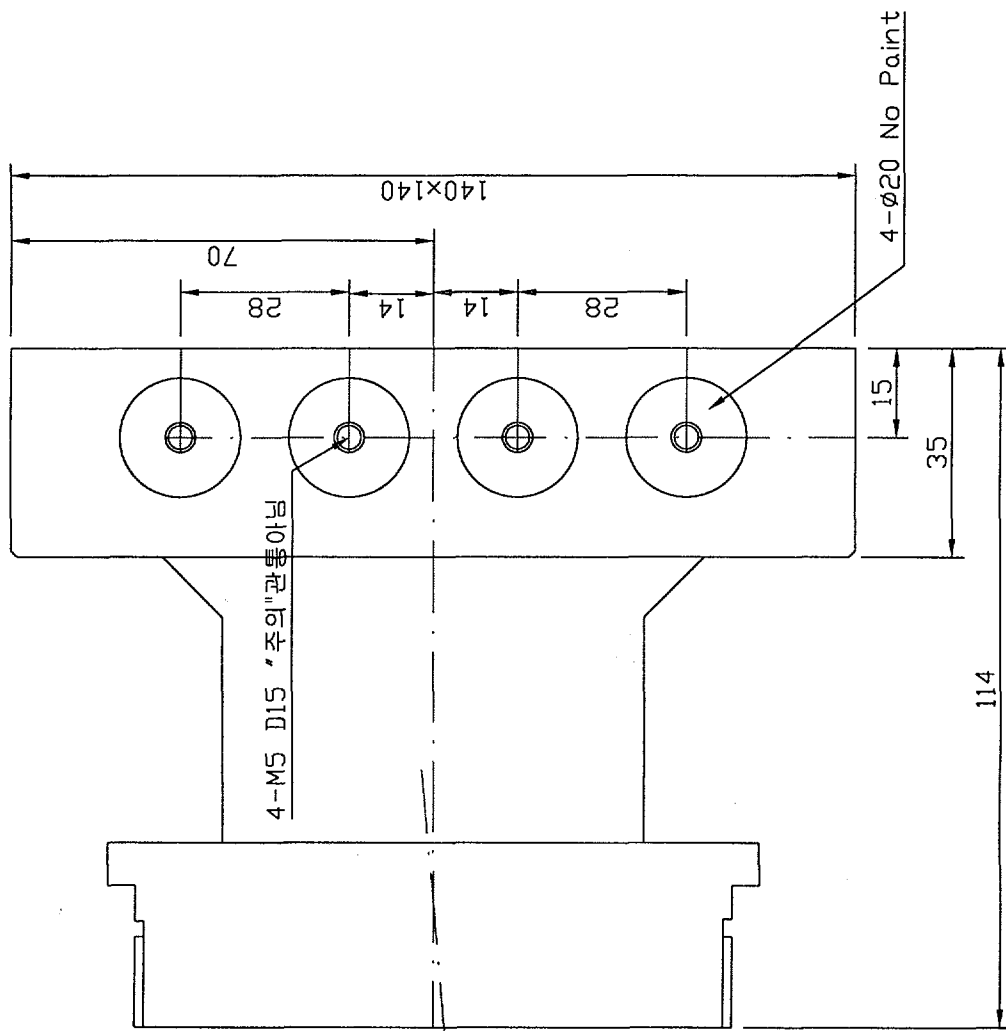


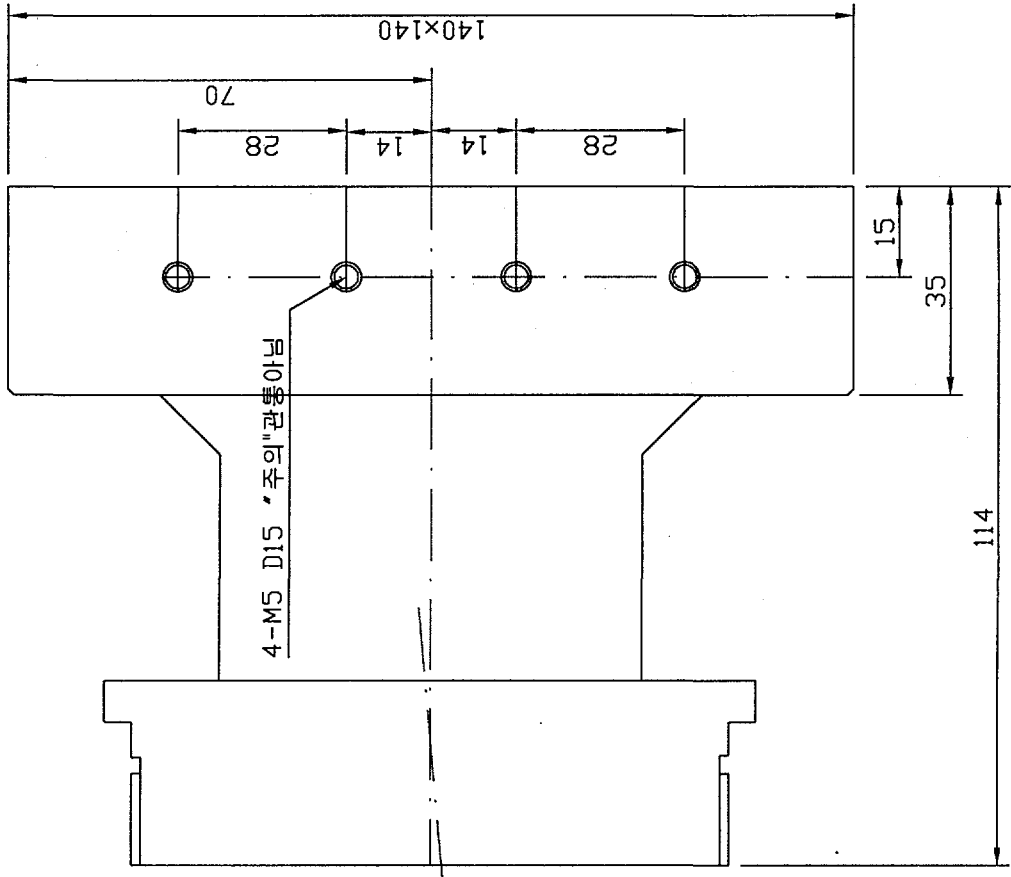
도면 3 우측면도



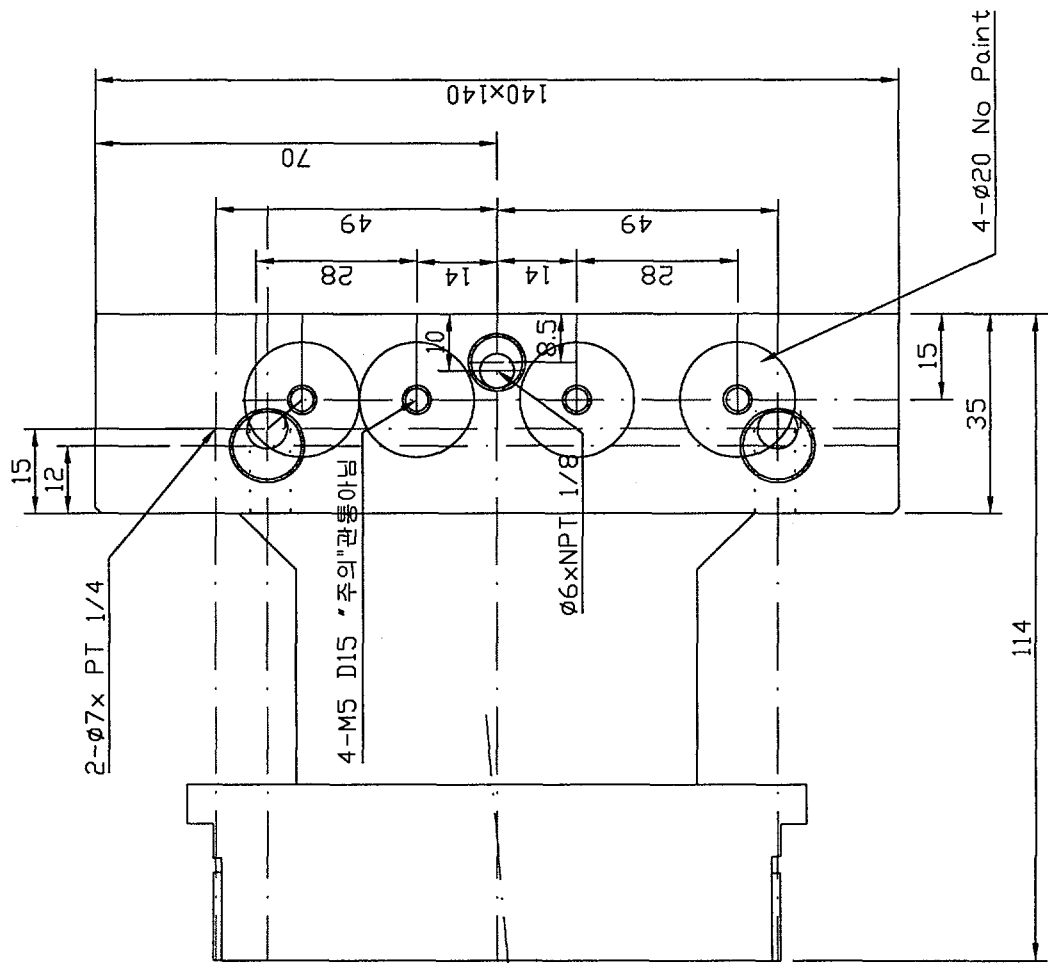
도면 3 좌측면도

도면3 정면도

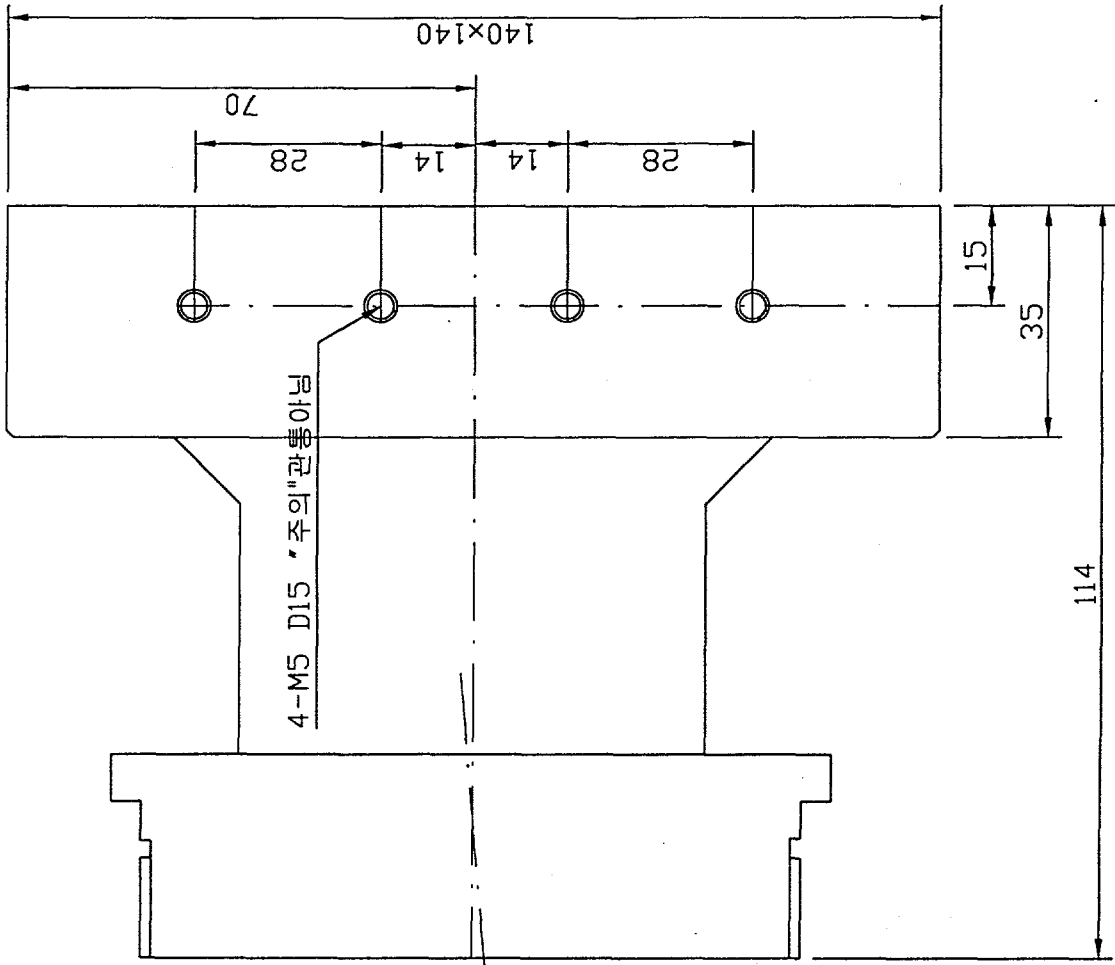




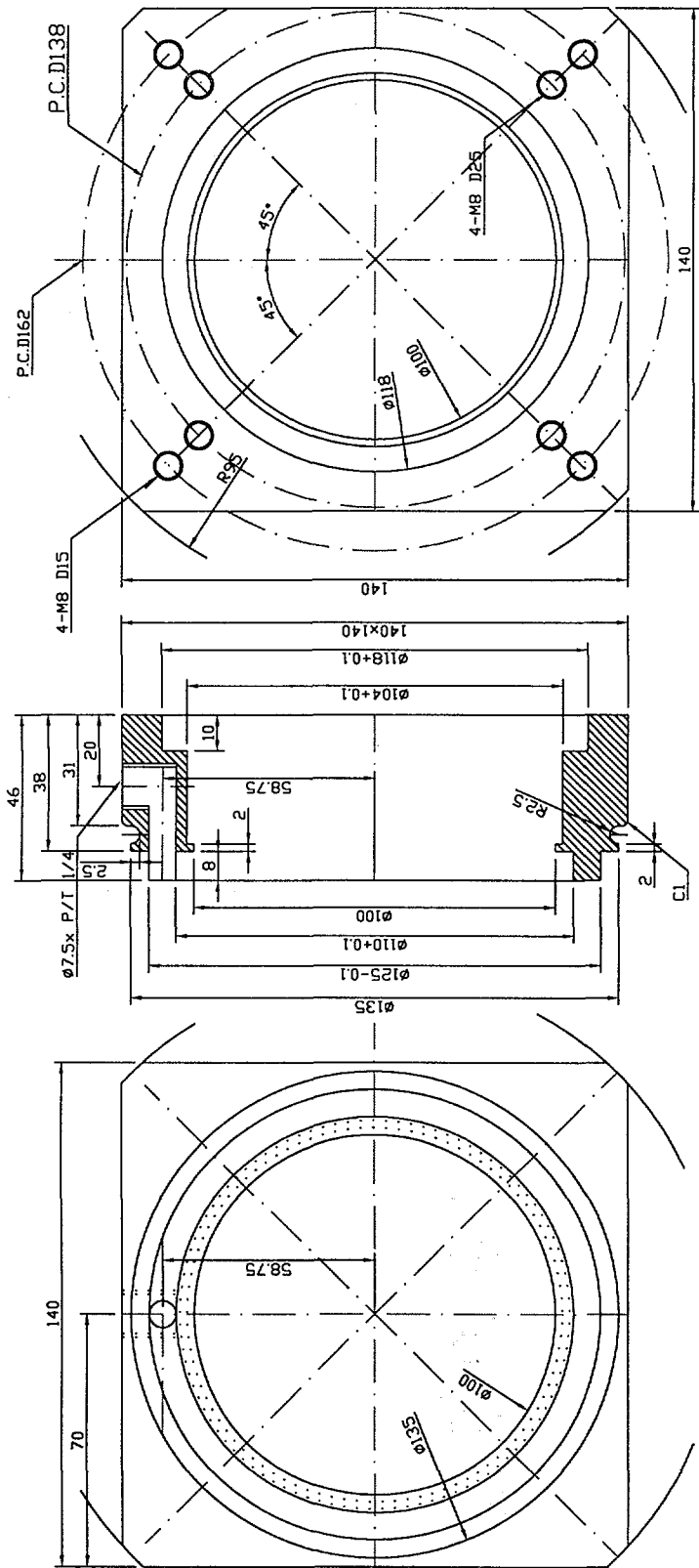
5 5 3 5 5



5공 3배역도

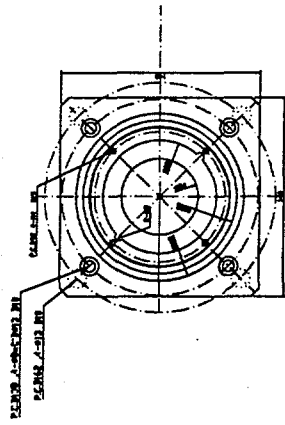
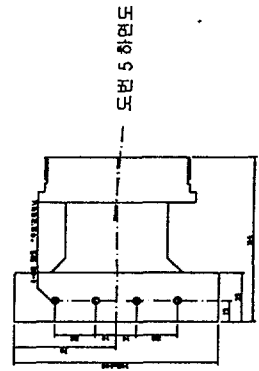
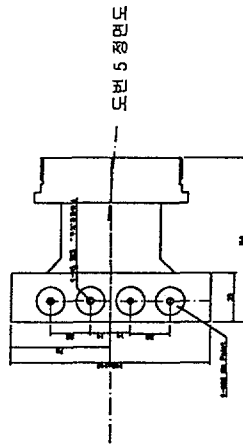
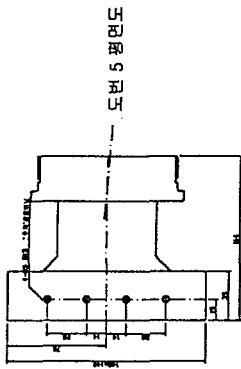
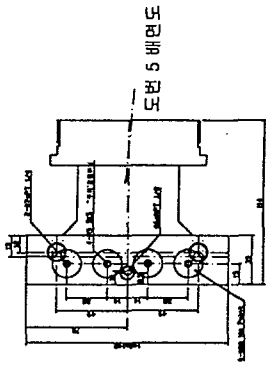


도면 3 하면도



AI7074 1ea

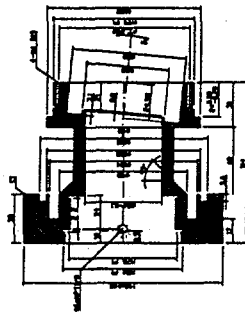
④



도면 5 배선도

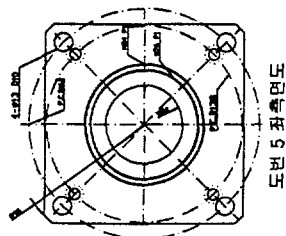
5

AI7075 1ea

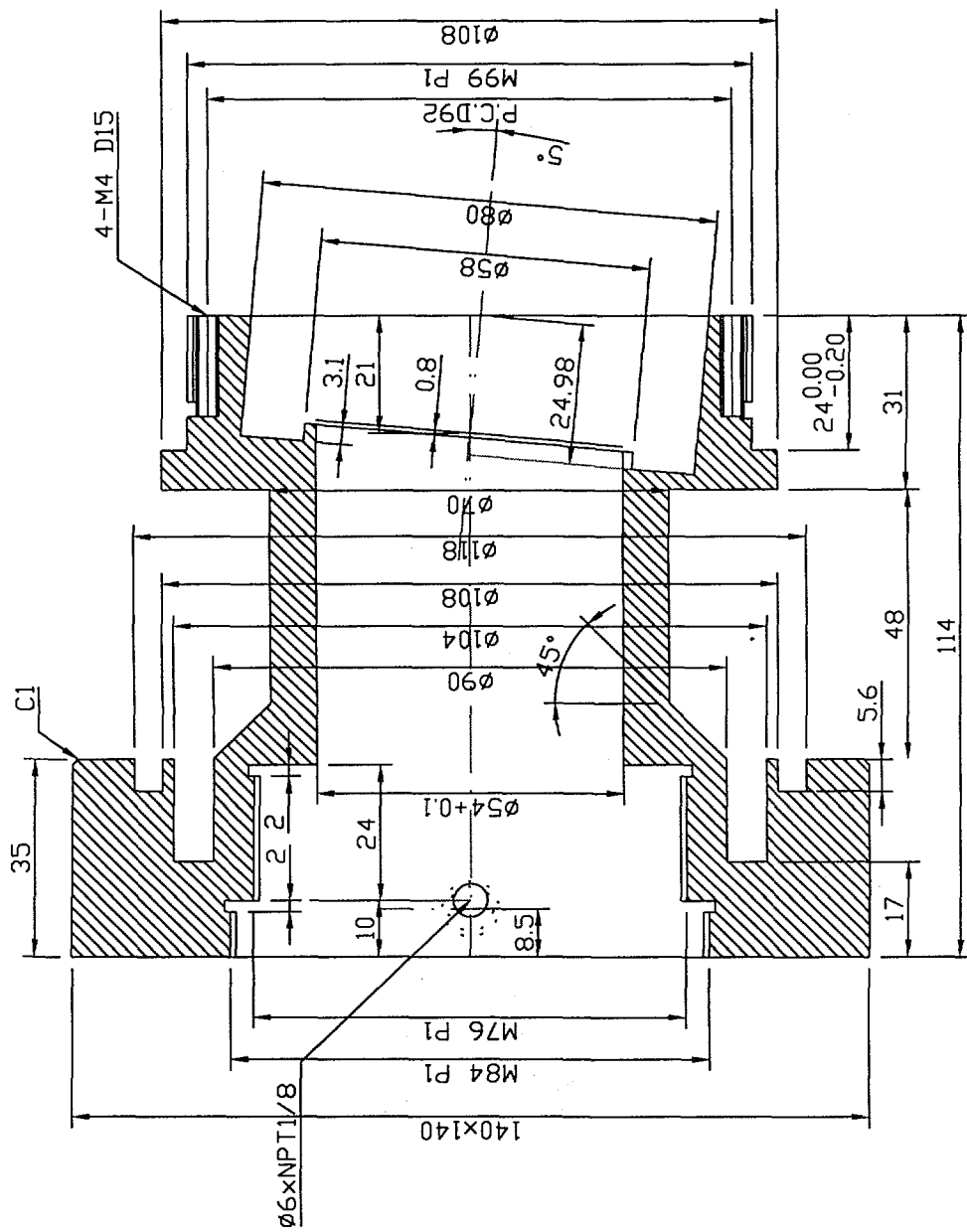


도면 5 배선도

AI7075 1ea

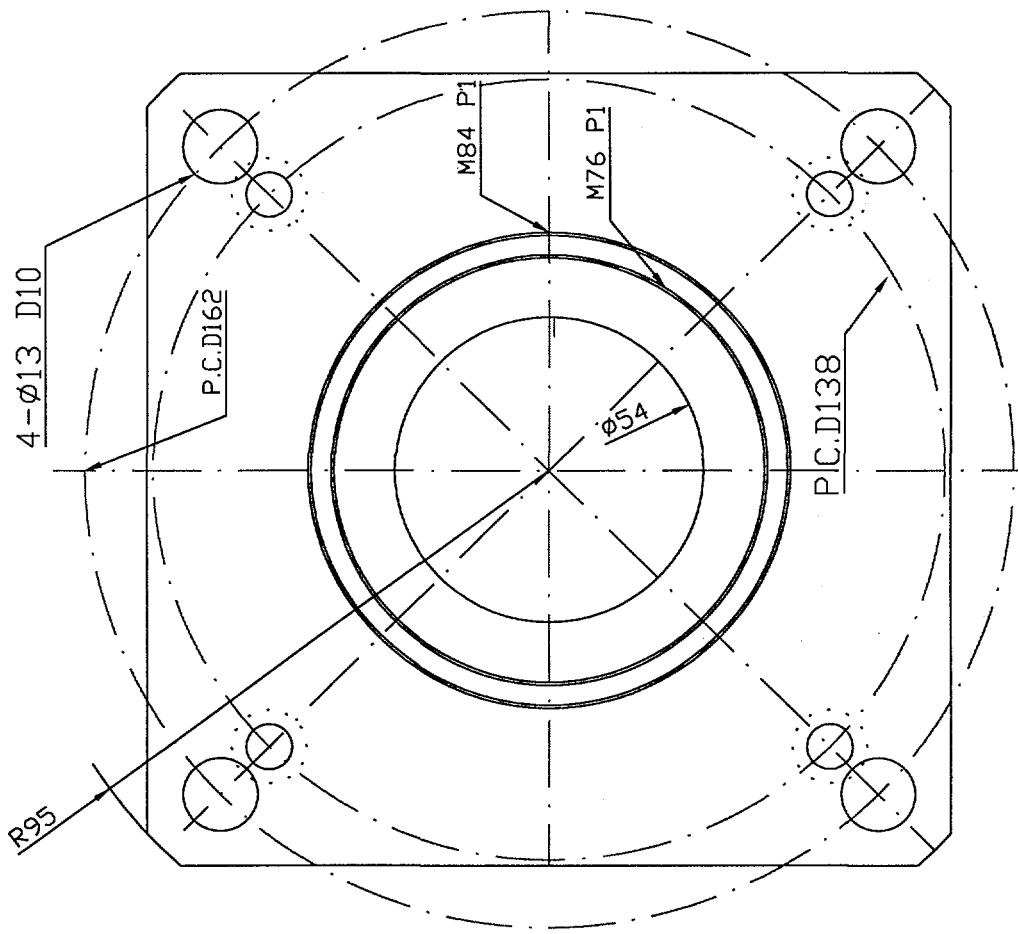


도면 5 배선도



AL7075 1ea

도면 5 장면도

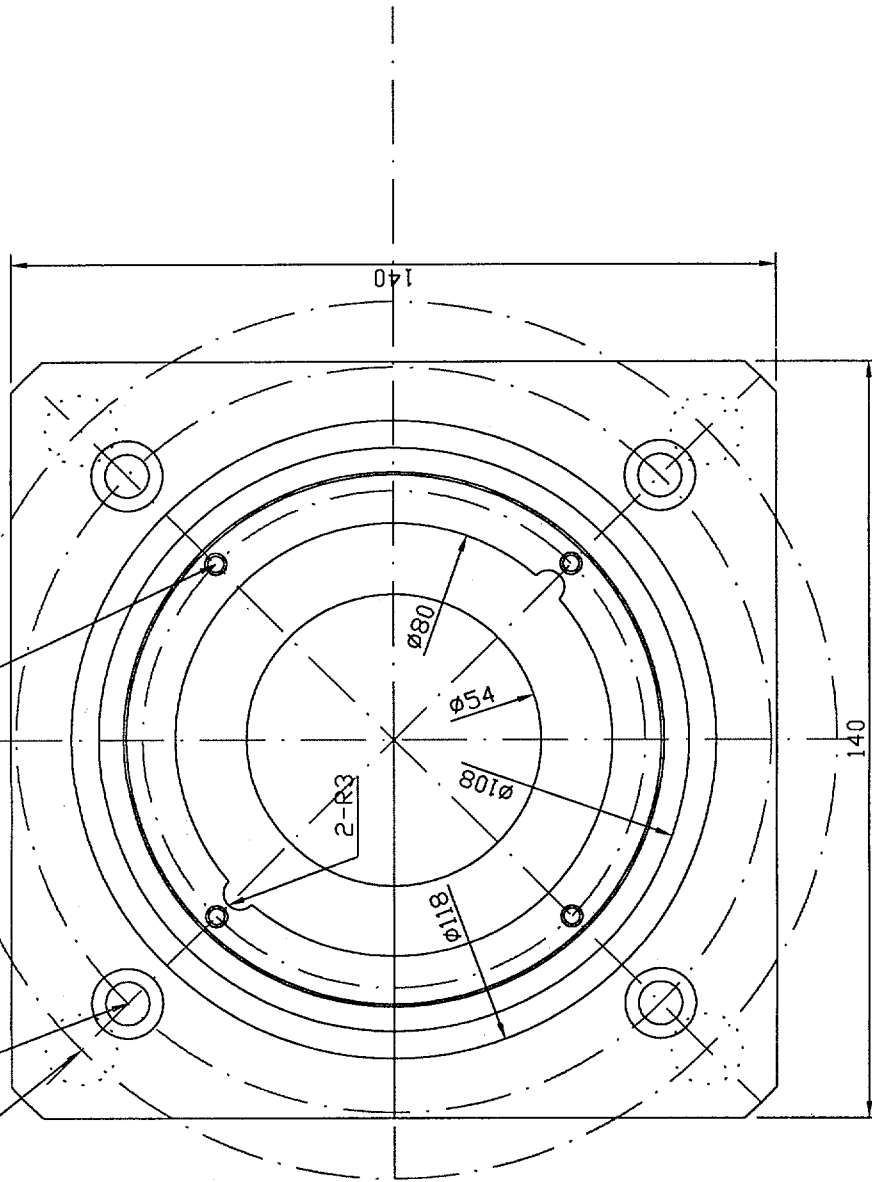


도면 5 좌측면도

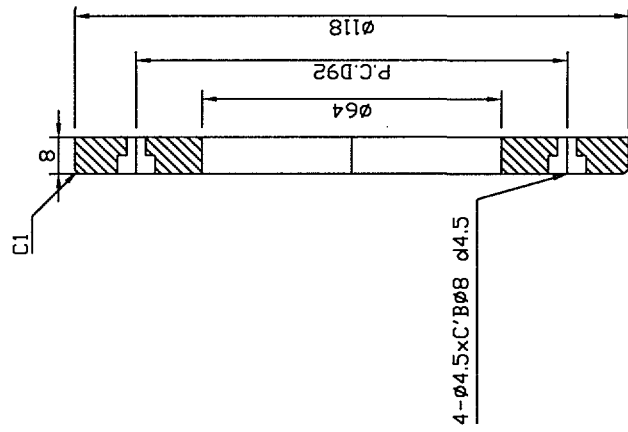
P.C.D138 , 4- $\phi 8 \times C'B\phi 13$ D10

P.C.D162 , 4- $\phi 13$ D10

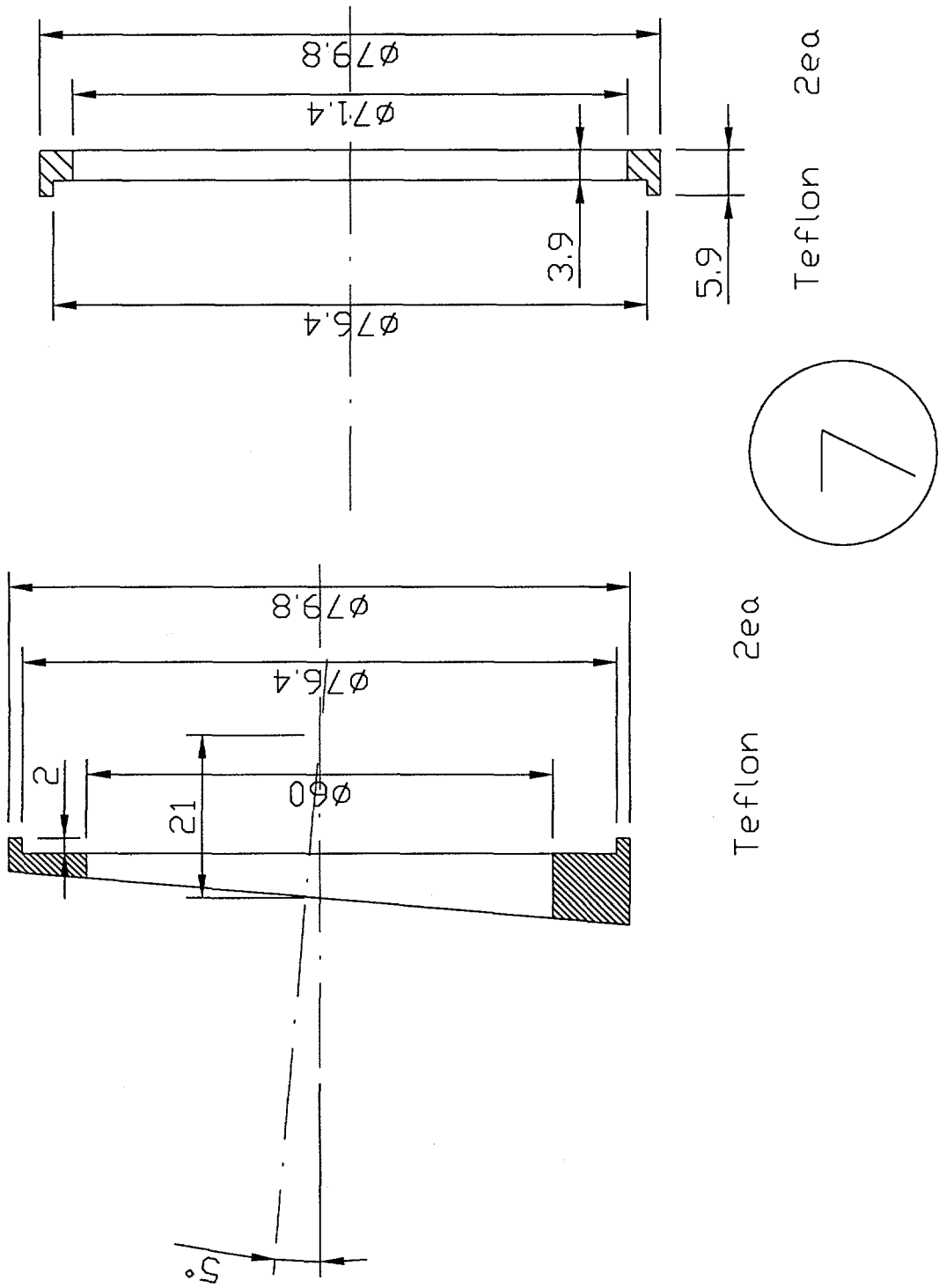
P.C.D92 4-M4 D15

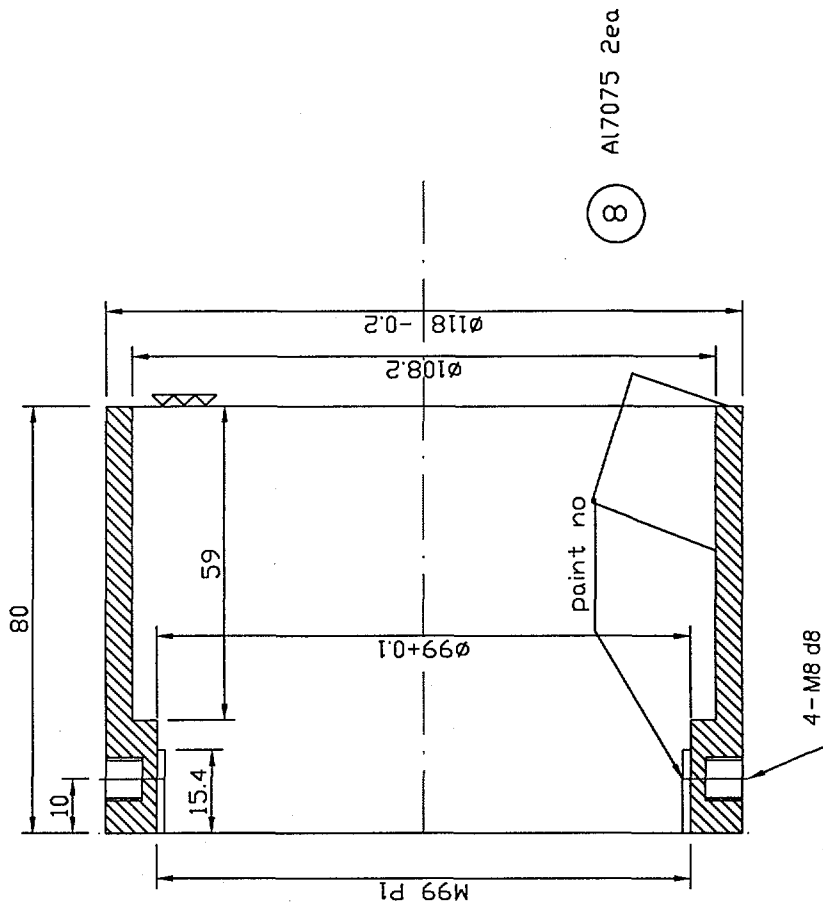


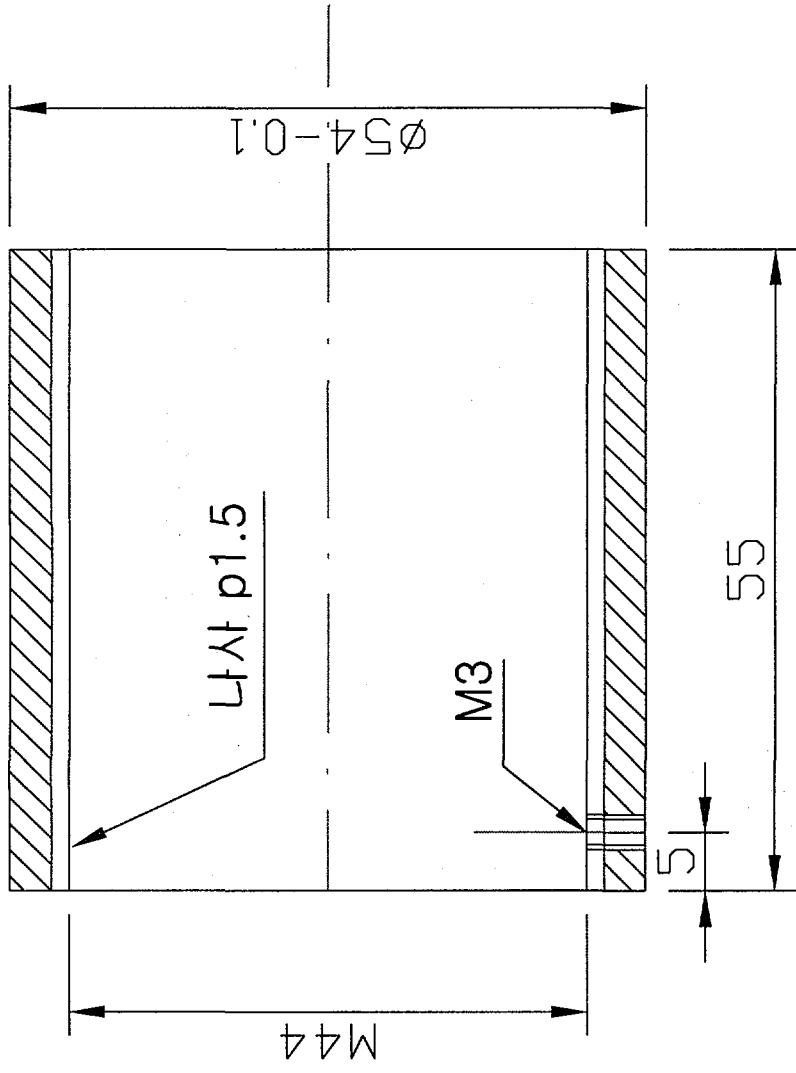
도면 5 우측면도



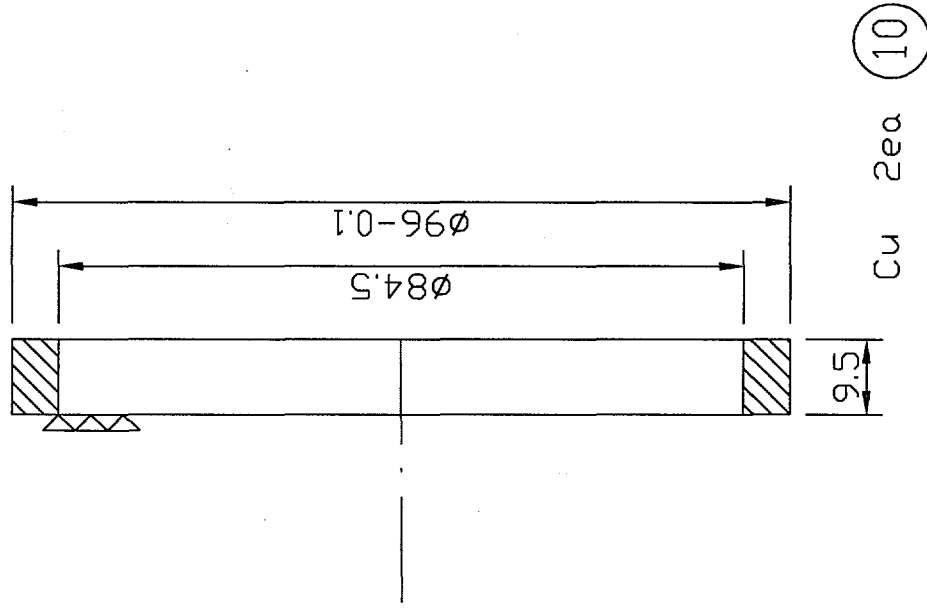
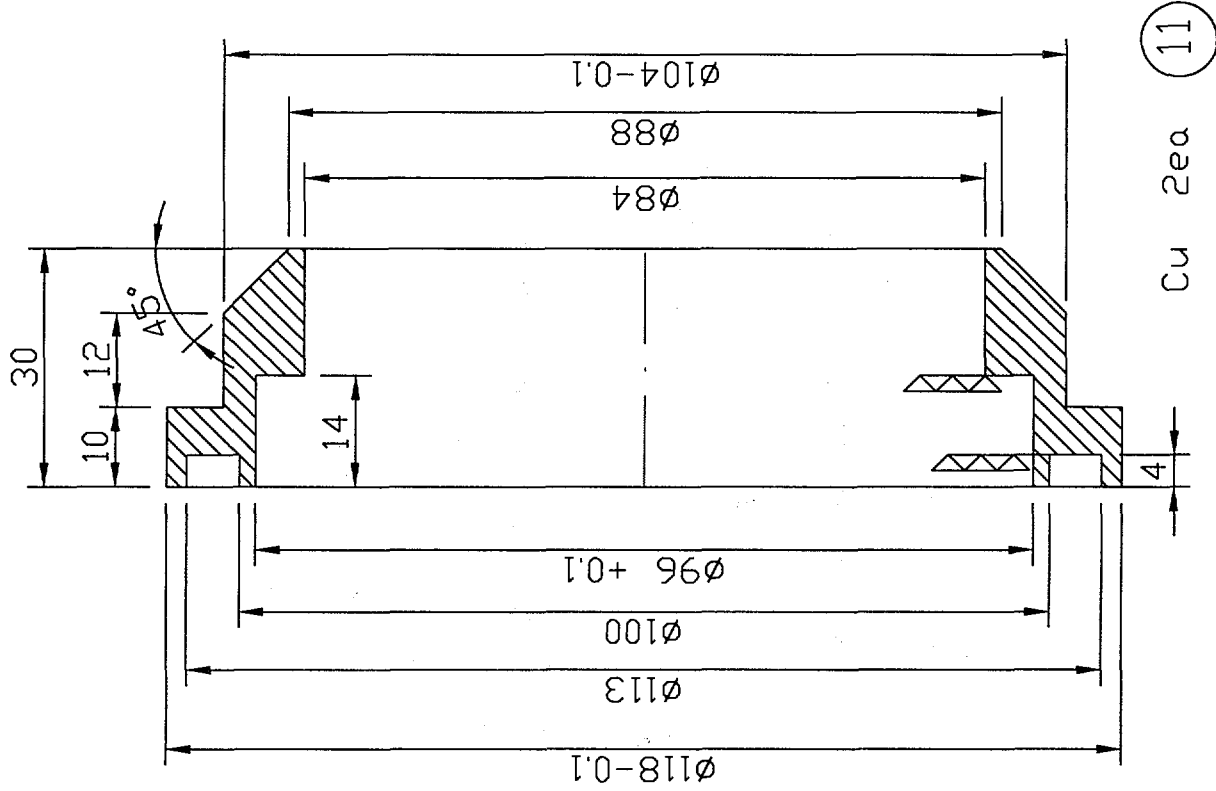
⑥ A17075 2ea

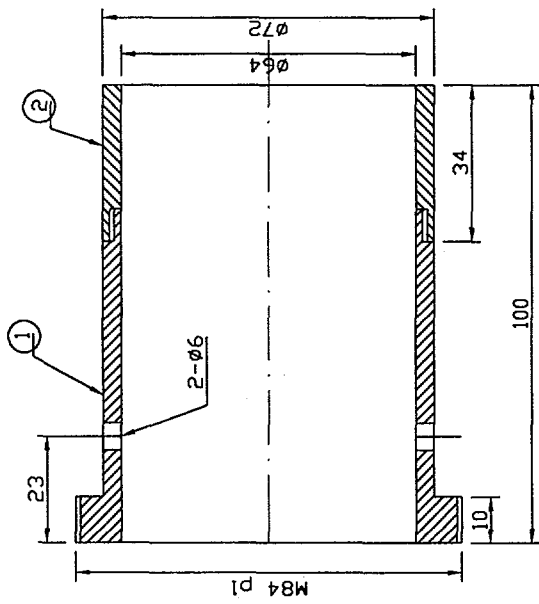




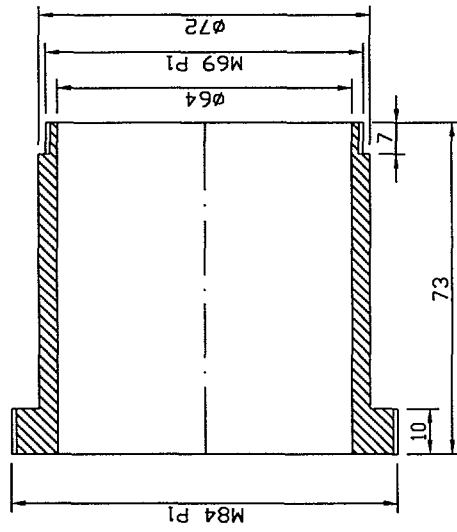


⑨ SUS304 2ea

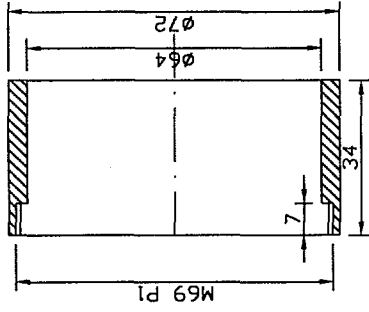




12 2set

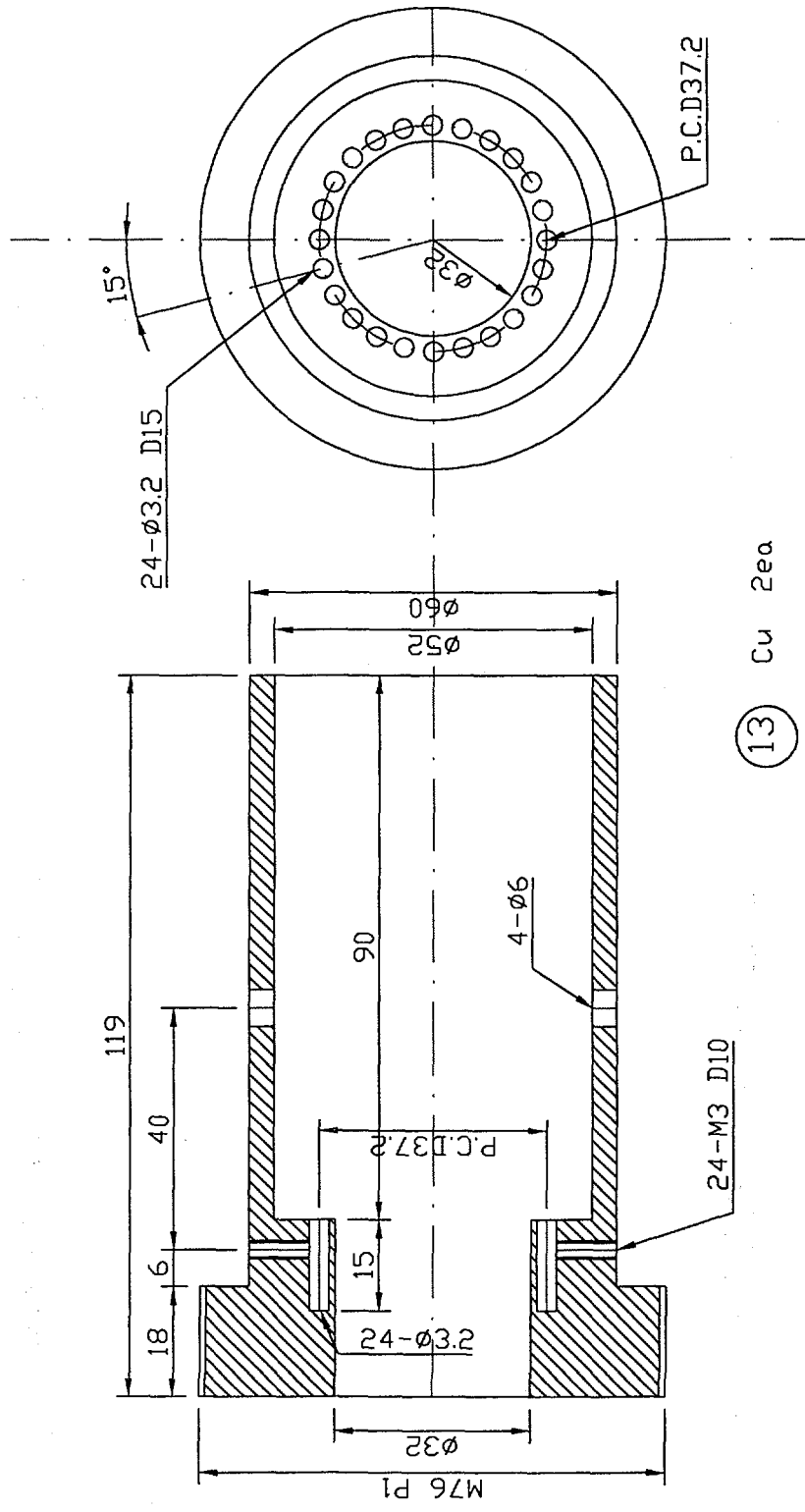


1 Cu 2ea

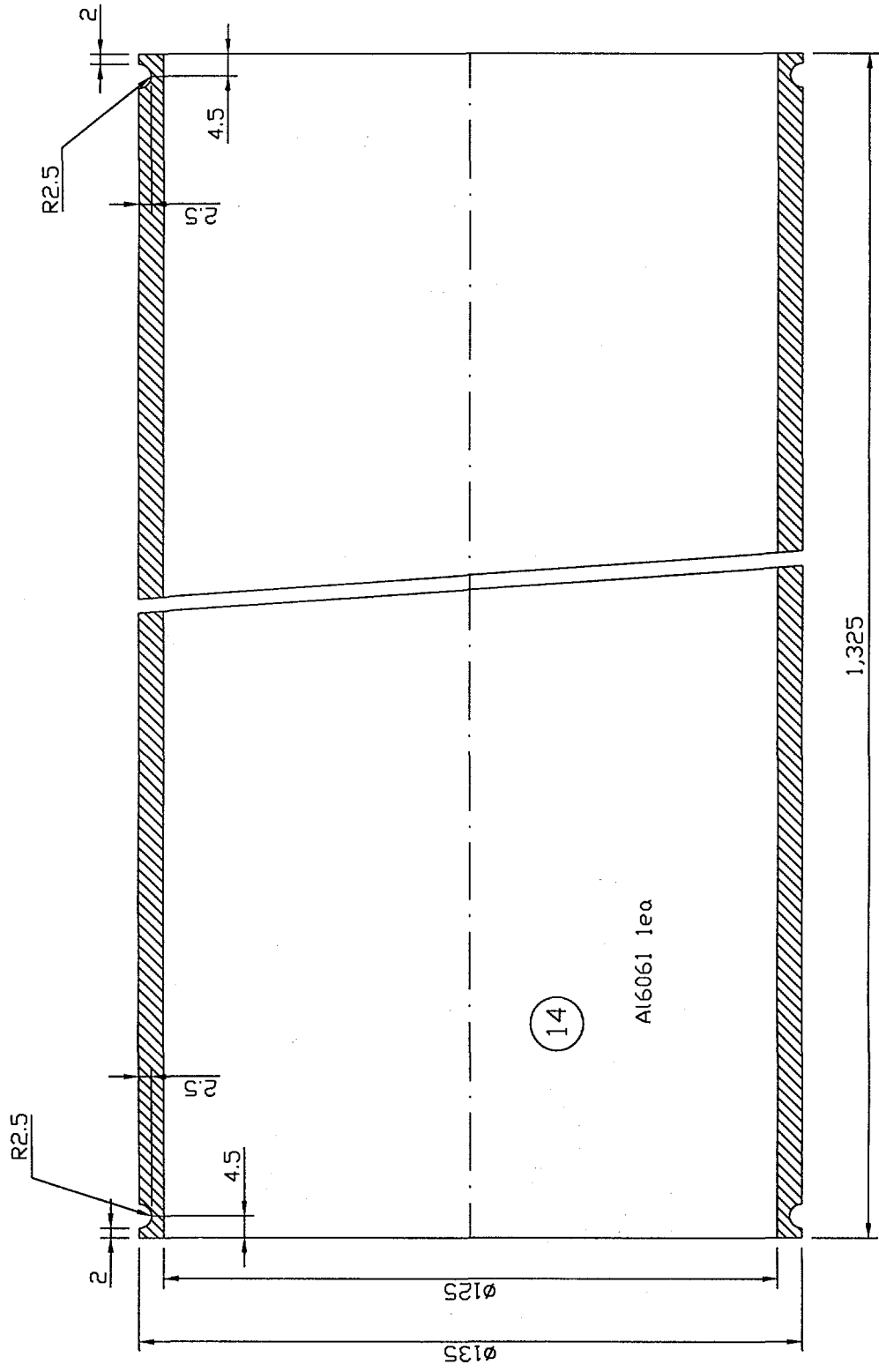


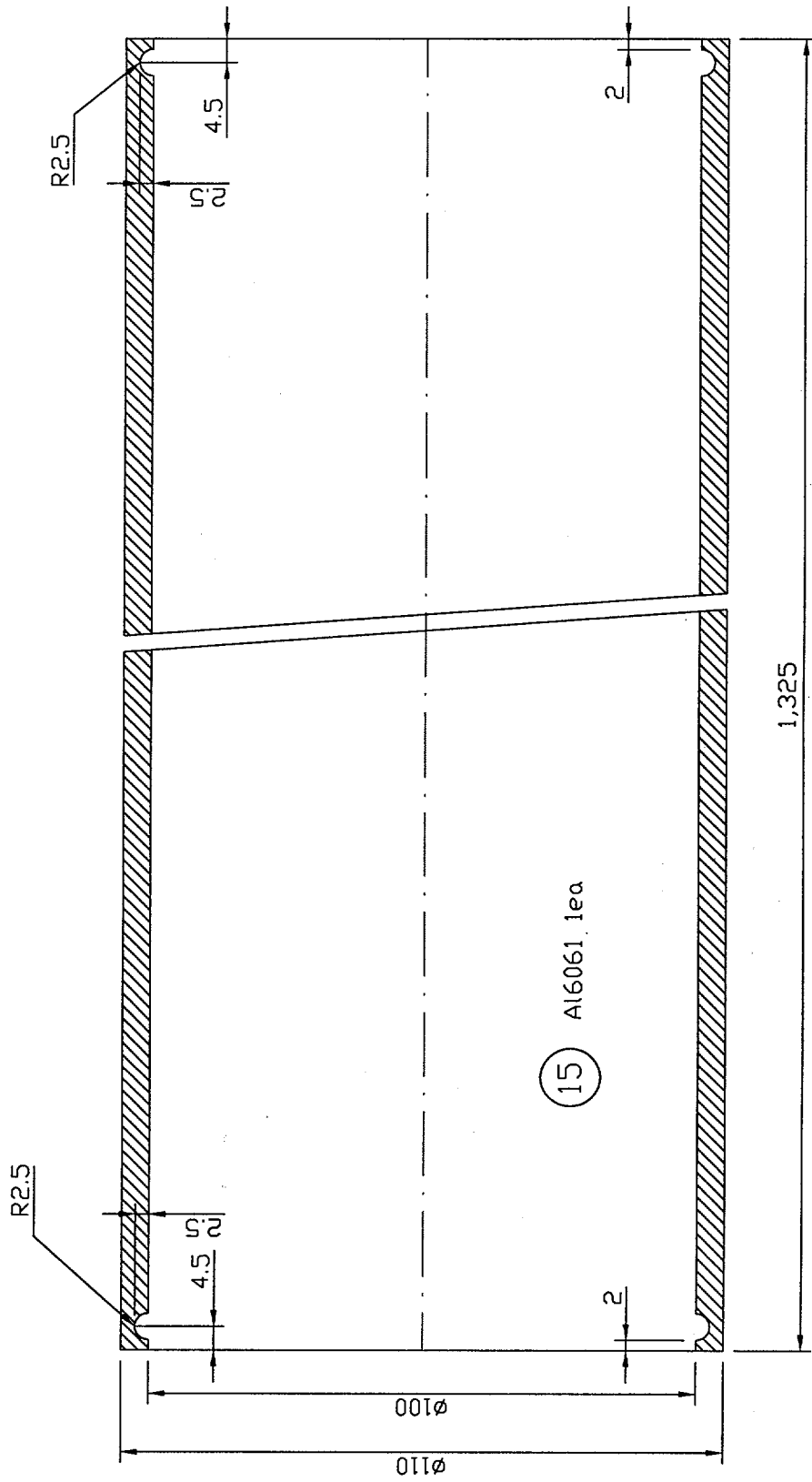
2

SUS304 2ea



(13) Cu 2ea





서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-1961/98					
제목 / 부제	방전가열형 플라즈마관 국산화				
연구책임자 및 부서명	차 병 헌 (양자광학기술개발팀)				
연구자 및 부서명	진정태, 남성모, 이성만, 최화림, 고도경, 김성호, 이용범, 최영수, 이종민 (양자광학기술개발팀) 이찬구, 이희갑, 이희철 (서울전광) 정승민, 김영주, 최기식, 손남기 (우리진공)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1999.12
페이지	88 p.	도표	있음(0), 없음()	크기	A4
참고사항	실용화 연구지원 사업과제				
비밀여부	공개(0), 대외비(), ___ 급비밀	보고서종류	연구보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록	<p>구경 25 mm, 방전길이 1336 mm인 방전가열형 레이저 플라즈마관을 개발하였다. 개발한 플라즈마관은 유지, 보수가 편리한 개방형 플라즈마관방식을 채택하였다. 레이저관 재질은 고순도 세라믹을 사용하였으며 단열관은 고순도 다공질 알루미늄을 사용하였다. 고전압 방전 전극은 텅스텐을 사용하였으며 레이저 창(laser window)은 무반사 처리된 창을 사용하였다.</p> <p>개발된 플라즈마관의 특성분석 결과 방전전압 28 kV, 투입 전력 4.6 kW, 펄스 반복율 10 kHz 일 때 레이저 출력은 32 W에 도달하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	플라즈마관, 레이저				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/RR-1961/98					
Title / Subtitle		Development of a Discharge-heated Plasma Tube			
Project Manager and Department		Byung-Heon Cha (Quantum Optics Team)			
Researcher and Department		J.T.Jin, S.M.Nam, S.M.Lee, H.L.Choi, D.K.Ko, S.H.Kim, Y.B.Lee, Y.S.Choi, J.M.Lee (Quantum Optics Team) C.K.Lee, H.G.Lee, H.C.Lee (Seoul Electro-Optics Co.,Ltd) S.M.Jung, Y.J.Kim, G.S.Choi, N.G.Son (UNIVAC Co.,Ltd)			
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1999. 12.
Page	88p.	Ill. & Tab.	Yes(0), No()	Size	A4
Note					
Classified	Open(0), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Research Report	
Performing Organization	KAERI		Contract No.		
Abstract	<p>A discharge-heated type plasma tube was designed and constructed. The structure of the laser plasma tube was designed to be easy in maintenance. The inside plasma tube was made of a high purity alumina and the thermal insulator tube was made of a porous alumina. The electrode made of tungsten was chosen for the endurance of high discharge voltage. AR coated windows were used as laser windows.</p> <p>A proto-type laser plasma tube was tested with a pulse modulator. An average laser output power was 32 W at the discharge voltage of 28 kV, the electric input power of 4.6 kW, and the pulse repetition rates of 10 kHz.</p>				
Subject Keywords	Plasma Tube, Laser				

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.