

Nd:YAG 레이저 용접기의 국산화개발 및 응용

Development of a Nd:YAG Welding System and Its Applications

김철중*, 이종민
한국 에너지 연구소

Abstract

A 200 W industrial Nd:YAG laser was developed and its welding applications were investigated. The important factors in designing of an industrial Nd:YAG laser were analyzed and special design features were explained. Also, the performance of laser weldings of Zircaloy-4, stainless steel and fine thermocouples was presented.

I. 서론

1970년대 이후 고출력 레이저가 상용화되면서 레이저 가공은 산업분야에서 절단, 용접, 열처리, 구멍가공, marking, 및 전자소자제조 등의 분야에 널리 이용되고 있다. 본 연구소에서는 핵연료핵심 부품의 레이저 용접 연구 수행과 관련하여 이에 필요한 Nd:YAG 레이저를 개발하게 되었다.

개발시 Nd:YAG 레이저의 다양한 응용성에 따라 국내에서의 활용 증대를 기하기 위하여 부품의 국산화율을 증대시키며 200 W 급 고출력 pulse 형 Nd:YAG 레이저를 독자적으로 설계 제작하여 국내 처음으로 국산화 개발하였다.

II. 레이저 가공의 원리 및 특성

레이저 가공은 레이저의 산업 분야 응용중 가장 활발한 분야로, 자동화가 용이하고 생산성이 우수하여 새로운 첨단 가공기술로서 이용이 증가 추세에 있다. 레이저 가공에는 용접, 절단, 구멍

가공, marking, 전자소자 가공 및 열처리 등 여러 분야가 있으며 각 응용분야별 레이저 조사 조건은 그림-1 과 같다.

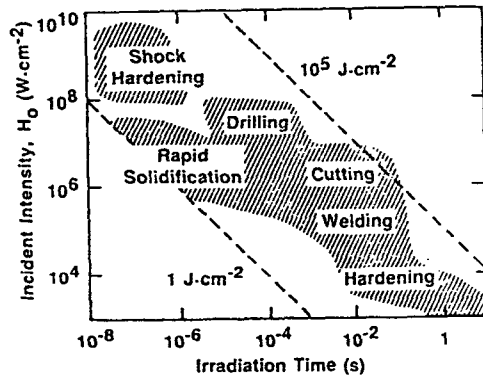


그림-1 레이저·가공 종류별 레이저 조사 조건

일반적으로 금속은 반사율이 높아 레이저 가공에 불리하나 그림-2 와 같이 온도 상승에 따른 흡수율의 증가때문에 금속도 레이저 가공이 용이하다. 특히, 레이저 가공시 표면에 발생하는 plasma 는 열전달 효율을 높여주어 금속 표면의 온도 상승에 기여하며 레이저 power 밀도가 10^6 W/cm² 이상에서는 keyhole 을 형성하여 aspect 비가 큰 섬세하고 깊은 용접이나 구멍가공이 가능하게 한다. 그러나 plasma 발생이 너무 클 경우에는 입사되는 레이저의 흡수율이 커져서 레이저 가공에 불리하므로 plasma 발생을 적절하게 조정하여야 한다.

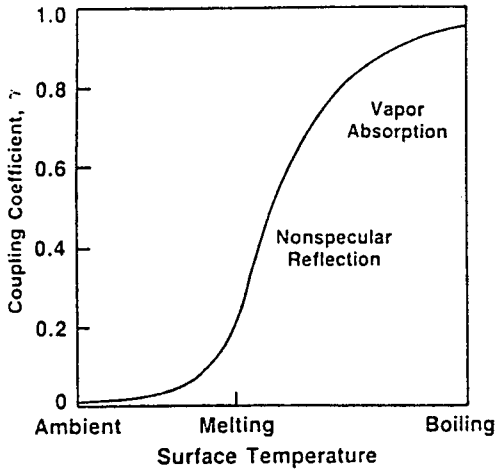


그림-2 금속의 온도에 따른 흡수율 변화

레이저 가공의 장점을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 촛점에 집중된 레이저에 의한 고열을 이용
 - 섬세하고 정밀한 가공 가능
 - 용융점이 높은 금속의 가공이 용이
 - 다양한 재료의 가공
 - 2) 순간적인 레이저 작용에 의한 가공
 - 적은 에너지에 의한 작은 열변형 부위
 - 3) 레이저에 의한 비접촉 가공
 - 가공물에 기계적 힘을 가하지 않고
 - 연약한 재료의 가공이 용이
 - 4) 레이저 출력 제어가 용이하여
 - 생산 공정의 자동화에 의한 생산성 향상
 - 5) 광섬유에 의한 레이저 전송
 - 협소하거나 밀폐된 공간에서의 원격 가공
 - 광섬유 분리에 의한 동시 작업
 - 6) 가공 작업환경
 - 대기중이나 불활성가스 분위기에서의 가공
- 레이저 가공에 주로 사용되는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저의 특성을 비교하면 표-1 과 같다. Nd:YAG 레이저는 평균출력면에서는 CO₂ 레이저에 못미치나 첨두출력은 수 kW 이상으로 높고 크기가

소형이어 작업 공간이 적으며 광전송 특성이 우수하고 금속의 흡수가 높기 때문에 섬세한 금속의 가공에 널리 이용된다.

표-1 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저의 비교

구 분	Nd:YAG	CO ₂
1.크 기	소 형	대 형
2.평균출력	수백 W - 1 kW	수 kW
3.금속흡수	양 호	나쁨
4.광전송	수백 W 이상	수십 W 정도
5.광학부품	일반 광학부품	적외선용 부품

III. Nd:YAG 레이저 용접기 구성 및 특성

Nd:YAG 레이저 용접기의 구성은 그림-3 과 같이 flashlamp 에 전원을 공급하고 제어하는 전원부와 레이저가 발진되며 가공물에 전달되는 광학부와 flashlamp 에서 방출되는 열을 효율적으로 냉각시키는 냉각부와 가공물을 감시하는 감시장치로 구성되어 있다.

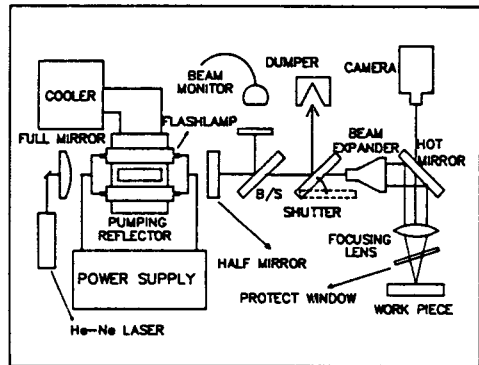


그림-3 Nd:YAG 레이저 용접기의 구성

1. 광학부 구성 및 특성

광학부는 레이저를 발진에 관련된 Nd:YAG 봉, flashlamp, pumping reflector, 앞거울, 뒷거울 이외에 광학부품 정열 및 가공 위치 지시용 He-Ne 레이저, 안정된 출력 제어를 위한 shutter 와 dumper, 레이저 전송관련 광학대기, hot mirror, 집광렌즈, 보호용 window 로 구성되어 있다.

1) Nd:YAG 봉

고출력 Nd:YAG 레이저의 경우 Nd:YAG 봉은 냉각이 충분하지 못할 경우 파손되며 따라서 최대 입력을 제한하게 된다.[1] 평균 출력 100 W 급에서는 1/4" x 4" 가 사용되고, 200 W 급에서는 1/4" x 6" 나 3/8" x 4" 가 사용되나 1/4" x 6" 가 경제적으로 유리하다. 상용 제품중 가장 큰 3/8" x 6" 는 400 W 급 이상에서 사용된다.

Nd:YAG 결정은 성장시 최대 가능한 직경이 3 cm 정도이며 중앙부는 불균일하여 사용하지 못하므로 상용 제품의 최대 구경은 3/8" 이다. 그러나, 3/8" 봉중에서 균일성이 우수한 A 급은 매우 고가인 반면 1/4" 봉은 균일성이 일반적으로 우수하며 저렴하므로 경제적으로 유리하다.

2) Flashlamp

Flashlamp 는 Xe 이나 Kr lamp 가 사용되며 Kr lamp 가 효율상 유리하나 수명면에서는 Xe 이 우수하다. Flashlamp 의 내부는 방전시 매우 고온이며 외부는 냉각수에 의해 냉각되어 quartz 벽면의 온도변화가 심해서 파손되게 되며 냉각을 충분히 할 경우 1 mm 두께의 경우 최대 입력은 단위면적당 200 W/cm² 이며, 0.5 mm 두께의 경우 250 W/cm² 까지 사용한다.

Flashlamp 의 수명은 사용되는 펄스폭에 의해 결정되는 explosion energy (Eex) 와 입력에너지 (E) 에 의해 아래와 같이 결정된다.[2]

$$E_{ex} = 1.2 \times 10^4 \times L \times d \times T_p$$

L : length in cm

d : diameter in cm

Tp : pulse width in sec

$$N = (E_{ex}/E)^{0.5}$$

그러나 용접에 사용되는 수십 msec 정도의 펄스의 경우에는 매 펄스당 흘려간 전하량에 의해서 먼저 제한되며 펄스당 전하량이 수 coulomb 이하이어야 한다.

3) Pumping Reflector

Pumping Reflector 에는 수 kW 정도의 열이 흡수되며 매우 강력한 자외선이 입사되므로 보통 금도금된 타원형 reflector 가 사용되나 ceramic 등도 사용된다. 금도금된 reflector 는 무산소동 위에 Ni 도금후 금도금을 입혀 사용한다.

4) 앞거울 과 뒷거울

앞거울은 보통 평면 거울로서 반사율 50 % 정도의 반반사 거울이 사용되며 뒷거울은 100 % 전반사 거울로서 평면 또는 곡면거울이 사용된다. 고출력 Nd:YAG 레이저의 경우 thermal lensing 효과에 의해 집속된 레이저에 의해 거울이 파손되는 것에 유의하여야 한다.

5) He-Ne 레이저

He-Ne 레이저는 레이저 발진을 위한 광학 부품의 정렬과 목표물의 지시를 위해 사용된다.

6) Shutter

Nd:YAG 레이저 출력은 thermal lensing 효과 때문에 안정되는 데 수초가 걸리므로 안정될 때까지나 일시 가공중단시 레이저 출력을 dumper 로 보내는 기능을 한다.

7) Dumper

레이저 출력을 사용하지 않을 시 이를 흡수하는 기능을 하며 수백 W 의 레이저를 흡수하기 위해서는 특별한 표면 처리가 되어야 하며 냉각시켜져야 한다.

8) 광확대기

광확대기는 레이저의 광발산 각도를 줄여서 촛점부위의 크기를 작게 해서 가공물 표면에서의 레이저 power 밀도를 크게 해준다.

9) Hot Mirror

Nd:YAG 레이저는 99 % 이상 반사시키고 가시광선은 투과시켜 감시와 레이저 전달을 동시에 수행한다.

10) 집광 렌즈

레이저를 집중시켜 레이저 가공이 가능케하며 레이저 가공의 종류나 가공물의 구조에 따라 F/#를 적절하게 조정하여야 한다.

11) 보호용 Window

레이저 가공시 가공물의 증발에 의한 집광 렌즈의 손상을 방지한다.

2. 전원부의 구성 및 특성

전원부는 그림-4 와같이 capacitor 에 전원을 공급하는 충전장치와, 레이저 펄스폭 및 반복률을 결정하는 펄스형성회로와, flashlamp 톨 초기점등시키고 고반복 동작을 위한 simmer 전류를 공급하는 점등회로와, CNC interface 및 제반 동작 사항을 제어하는 제어회로로 구성되어 있다.

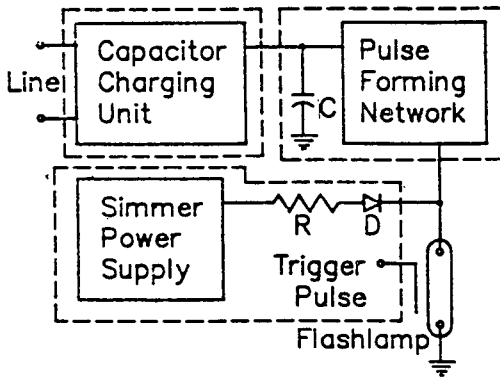


그림-4 전원부의 구성

1) 충전용 capacitor

레이저 용접에 필요한 출력을 위한 flashlamp 방전전압은 수백 V 정도이며 방전시간은 수 msec 정도로 길으나 고반복으로 동작한다. 따라서, 보통 사용되는 고가의 고속방전용 capacitor 보다 저렴한 전해 capacitor 를 이용하고 용량을 크게 하여 매방전 마다 일부 에너지를 뽑아 쓰고 충전 장치에서 보충하면 고반복 동작시에도 긴 수명을

얻을 수 있다.

2) 충전장치

Nd:YAG 레이저의 효율은 3 % 정도이므로 10 kW 급의 충전장치가 필요하며 출력 안정 및 효율적인 재충전을 위해서는 정전압/정전류 형의 충전장치가 필요하다.

3) 펄스 형성 회로

Nd:YAG 레이저의 펄스 형성에는 multiple-mesh L-C 회로가 이용되었으나 이 방식은 반복율, 펄스폭에 제한을 받고 광범위한 동작전압 변화시 효율적인 impedance matching 을 기대할 수 없다. 그러나, 레이저 용접기 flashlamp 의 방전 전압은 수백 V 로 낮기 때문에 전자소자에 의한 pulse 제어가 용이하여 전자소자를 이용한 펄스제어가 이용되고 있다.

4) 초기 점등 회로

Flashlamp 의 점등에는 series injection, external 및 parallel trigger 방식이 사용되고 있으나 레이저 용접기에서는 동작 초기 1 회만 점등이 필요하며 대용량 전류가 흐르므로 series injection 방식은 사용되지 않는다.

5) Simmer 회로

Flashlamp 의 고반복 방전시 수명 연장 및 동작의 안정성을 위해 수십 - 수백 mA 의 simmer 전류를 흘려 flashlamp 양단간의 전압을 낮게 유지하며 방전시 simmer 전류의 변동을 방지하기 위해 정전류 전원장치가 필요하다.

6) 제어 회로

레이저 출력 변수를 총괄적으로 제어하며, 입/출력 감시, 레이저 동작시 주변장치 제어 및 안전용 interlock 처리 및 외부 CNC 와의 interface 기능을 수행한다. 또한, 레이저 동작시 flashlamp 의 입력을 감시하여 과다한 변수 설정을 방지하고 안전영역에서 동작케 한다.

3. 냉각부의 구성 및 특성

Nd:YAG 레이저의 열방출 계통은 그림-5 와 같으며 pumping reflector, flashlamp 및 Nd:YAG 봉의 냉각이 가장 중요하며 입력의 97 % 를 물로 냉각시켜야 한다. 특히, flashlamp 와 Nd:YAG 봉의 냉각을 효율적으로 하기 위해 냉각관을 사용 하여야 하며 냉각수는 냉각관 벽에 이슬이 맺히는 것을 방지하기 위하여 20 °C 정도를 유지하여야 한다. 이때, 출력단의 온도가 너무 높아지지 않도록 유량을 충분히 하여야 한다.

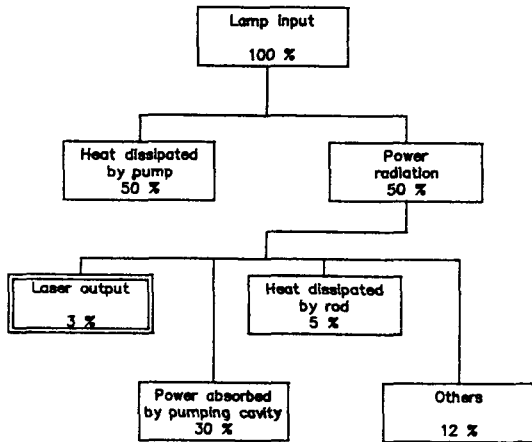


그림-5 Nd:YAG 레이저의 열방출 계통도

4. 감시장치

가공 목표물의 위치를 정확히 찾기 위해서는 가공물을 확대하여 보는 감시장치가 필요하다. 또한, 밝은 상을 얻기 위해 충분한 밝기의 조명 장치가 필요하며 그림자에 의한 어두운 부분이 생기지 않도록 유의하여야 한다. 그리고, 레이저 용접시 반사되는 레이저와 plasma 에서 발생하는 강력한 가시광선 빛이 감시 장치에 영향을 주지 않도록 하여야 한다.

5. 용접용 Nd:YAG 레이저의 제원

Nd:YAG 레이저는 CW 형과 pulse 형이 있으나 CW 형은 첨두출력이 평균출력과 같아서 낮으므로 레이저 용접에 사용하기에는 제한조건이 많아 pulse 형의 Nd:YAG 레이저가 용접에 유리하다.

Multimode 형태의 Nd:YAG 레이저는 10 - 20 mrad 정도의 beam divergence 를 가지며 촛점에서 수백 um 의 spot 을 형성할 수 있다. 따라서, 가능한 최소 spot 면적은 대략 1/1000 cm² 이며 그림-1 과 같이 레이저 용접에 필요한 최대 레이저 power 밀도는 10⁶ W/cm² 이므로 용접용 Nd:YAG 레이저의 최대첨두출력은 1 kW 이상이어야 한다. 그리고 다양한 조건에서의 레이저 용접을 위해서는 첨두출력의 가변 범위가 커야 한다.

또한, 레이저 용접시 조사시간이 너무 짧으면 용접에 필요한 충분한 에너지 공급이 어렵고 너무 장시간 조사하면 가공 금속이 증발하게 되므로 조사시간은 1 - 20 msec 정도가 주로 사용된다.

레이저 가공속도는 용접에 필요한 에너지공급 능력 즉 평균출력에 의해 결정되며 또한 반복률에 제한을 받는다. 평균 출력은 100 - 400 W 정도, 최대 반복률은 100 pps 이상이 요구된다.

IV. 고출력 pulse 형 Nd:YAG 레이저 설계 및 제작

1. 고출력 Nd:YAG 레이저 국산화

고출력 Nd:YAG 레이저에는 single 과 double ellipse 구조가 주로 사용된다. Single ellipse 구조는 경제성이나 출력 효율면에서 유리하나 최대 평균출력과 첨두출력이 낮은 단점이 있다. 따라서, 본 국산화 개발에서는 다용도의 저렴한 국내 보급형 single ellipse 형과 본 연구소의 핵연료 부품 레이저 용접 연구에 필요한 double ellipse 형의 Nd:YAG 레이저를 각각 개발하였다. 특히, 고출력 Nd:YAG 레이저의 국산화에 대비한

부품의 국산화에 주력하였으며 핵심부품을 자체 설계 국내에서 제작하여 국산화율을 높였다.

2. 광학계 설계 및 제작

고출력 Nd:YAG 레이저의 가장 큰 문제점은 Nd:YAG 봉이 flashlamp 의 열을 흡수하여 radial 방향의 온도 분포가 균일하지 못하며 온도 변화에 따른 굴절율 변화로 렌즈 역할을 하게된다. 이때, 등가 렌즈의 초점거리 f 는 [3]

$$f = 2 \cdot K \cdot A / (dn/dT) / Pa$$

dn/dT : 굴절율의 온도변화 계수

K : Thermal Conductivity

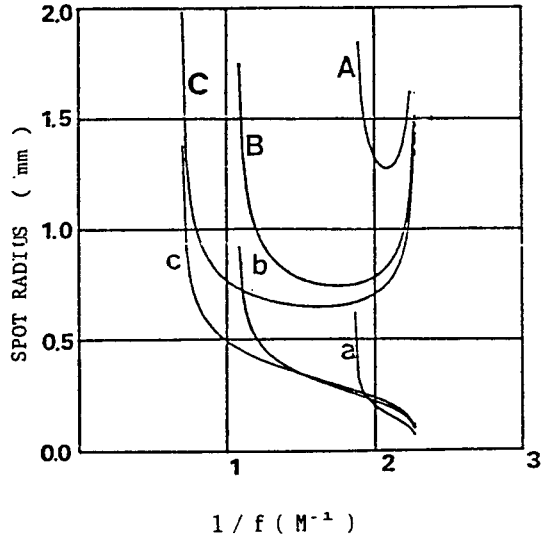
A : Nd:YAG 봉의 단면적

Pa : Nd:YAG 봉에 흡수된 입력

으로 입력에 따라 초점거리가 변하게 되어 레이저 공진 조건이 입력에 따라 영향을 받게되며 입력에 따라 mode 크기 및 beam divergence 등의 출력 특성이 변하게 되어 한정된 입력 범위내에서만 레이저 발진이 가능하게 된다.

이와같은 thermal lensing 효과를 분석하기 위해서는 입력에 따른 resonator 각부분에서의 mode 크기를 computer program 으로 분석하여야 한다. 그림-6 은 평면 앞거울과 곡면 뒷거울을 사용하였을 때의 뒷거울의 곡률반경 변화에 의한 입력 변화에 따른 앞거울 (대문자) 과 뒷거울 (소문자) 에서의 mode 크기 변화를 보여준다. 특이한 것은 곡률반경이 빠를 수록 발진 가능 입력 범위는 좁아지나 mode 특성은 좋아진다.

Mode 크기의 중요성은 레이저가공 특성을 결정하는 multimode beam divergence θ_m 과 앞거울에서의 mode 크기 W_0 와 레이저 봉 직경 D 사이의 관계가



(A,a: 0.1 M) (B,b: 0.5 M) (C,c: 1 M)

그림-6 초점거리 변화에 따른 mode 크기 변화

$$\theta_m = w / \pi \cdot D / W_0' \quad (w : \text{wavelength})$$

과 같으며 집중된 초점면에서의 spot 직경 S 는

$$S = F/\# \cdot D \cdot \theta_m$$

$F/\#$: 집광렌즈의 F number

이므로 초점면에서의 레이저 power 밀도는 mode 크기 W_0 의 4 제곱에 반비례 하게 되어 W_0 크기에 매우 민감하므로 설계시 면밀한 분석이 요구된다.

광학계 설계의 순서를 고려하면 우선 최대 평균 출력에 필요한 입력을 결정하고 이에 맞는 Nd:YAG 봉과 flashlamp 를 선정하고 앞거울과 뒷거울의 위치 및 곡률반경에 따른 mode 크기 및 레이저 발진 가능 영역을 분석하여 결정한다. Single pulse 의 저입력에서부터 최대입력까지의 광범위한 영역에서 레이저를 동작시킬 때는 평면 앞거울과 평면 뒷거울이 이용되며 그림-6 과 같이 고출력 영역에서만 동작시킬 때는 빠른 곡면의

컷거울을 이용한다. 본 개발품의 경우 용도에 따라 거울의 위치 및 곡률반경을 변화시킬 수 있도록 제작하였다.

Single ellipse 형의 경우 1/4" x 6" Nd:YAG 봉과 bore 직경 7 mm, 길이 6" flashlamp 1 개를 사용하였다. 이 flashlamp 는 6 kW 입력공급이 가능하므로 150 W 이상의 출력을 예상할 수 있다. Double ellipse 의 경우는 같은 Nd:YAG 봉에 2 개의 동일 flashlamp 를 사용하였으며 최대입력은 냉각 능력을 고려하여 10 kW 로 하였다. 따라서, 최대출력 200 W 이상이 가능하며 특히 첨두출력을 2 배 정도 증가시킬 수 있다.

3. 전원부 설계 및 제작

용접용 Nd:YAG 레이저의 경우 flashlamp 당 150 kW 정도의 입력을 공급하고 제어할 수 있으면 되며 flashlamp 의 방전시 저항이 1 Ω 정도이므로 400 V 정도의 동작전압에 400 A 정도를 제어할 수 있으면 충분하다. 따라서 충전용 capacitor 로는 450 V, 2400 μF 전해 capacitor 를 28 개 병렬 연결하여 사용하였으며 400 V 에서 약 5000 J 을 저장하게 되어 pulse 당 500 J (출력 약 10 J) 방전시에 1/10 정도만 보충하면 된다.

최고 동작전압이 400 V 로 낮기때문에 충전 장치는 저렴하게 대응량을 처리할수 있는 3 상 SCR 위상제어방식의 정전압/정전류 형태로 제작 하였으며 15 kW 의 용량을 갖고 있다.

전자소자를 이용한 펄스 제어에는 2 개의 SCR 을 이용한 방법이 사용되고 있으나 여기서는 on/off 기능을 갖는 새로운 소자인 GTO (Gate Turn Off) thyristor 를 사용하였다. 제작된 GTO 펄스 제어회로는 SCR 에비해 속도가 빨라 500 pps 이상의 반복률이 가능하며 0.1 msec 에서 수십 msec 까지 광범위한 범위의 펄스폭을 연속적

으로 가변시킬 수 있으며 8 kW 입력을 제어할 수 있는 회로 2 개로 구성되어 있어 1 개로 single ellipse 를 구동시키거나 2 개로 double ellipse 를 동작시킨다.

Flashlamp 초기점등과 관련 flashlamp 의 trigger wire 의 배치를 개선하여 trigger 전압을 6 kV 로 낮추어 diode 차단형 parallel trigger 방식을 사용하였다. 본방식은 낮은 trigger 전압을 사용하며 external trigger 방식에 비해 flashlamp 부근의 배선이 간단하며 절연이 쉽다. 초기 점등후 고반복 동작을 위하여 정전류 simmer 전원에서 60 mA 의 simmer 전류를 공급시켜 flashlamp 양단간의 전압을 200 V 이하로 유지케 하였다. 또한, 레이저 동작 전압 범위를 넓게 하기 위하여 본방전 이전에 prepulse 를 방전시켜 flashlamp 양단간의 전압을 낮추어 낮은 전압에서도 레이저 발진이 가능하도록 하였다.

그밖에 안전 동작과 관련 입력을 실시간 감시 하여 안정 영역에서만 동작토록 하였으며 GTO 파손에 의한 flashlamp 및 Nd:YAG 보호를 위하여 방전회로 차단장치도 설치되어 있다. 또한, 출력 감시 및 용접관련 주변장치 제어가 가능하며 그림-7 은 제작된 전원부의 구성도이다.

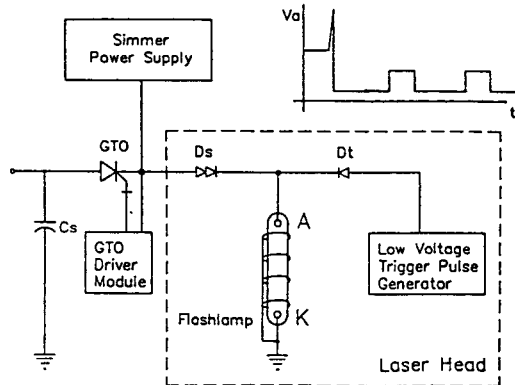


그림-7 제작된 고풍력 Nd:YAG 용 전원부 구성

4. 냉각계 설계 및 제작

Flashlamp 벽면과 Nd:YAG 봉 벽면을 효율적으로 냉각시키기위해 냉각관을 사용하여 냉각수를 고속으로 흘리도록 하였으며 pumping reflector 수명 연장을 위해 cavity 내부에는 물을 흘리지 않고 reflector 금속 뒤에서 냉각토록 하였다. Flashlamp 의 전극의 외부 연결부위는 온도상승이 높지않아 냉각수로 냉각시키지 않았으며 냉각수에 simmer 전류가 흐르지 않게 되므로 냉각 장치의 가격을 낮출 수 있는 장점이 있다. 냉각계통에서 중요한 것은 flashlamp 빛이나 레이저에 의한 O-ring 파손을 방지하여야 한다.

5. 출력 특성 및 제한

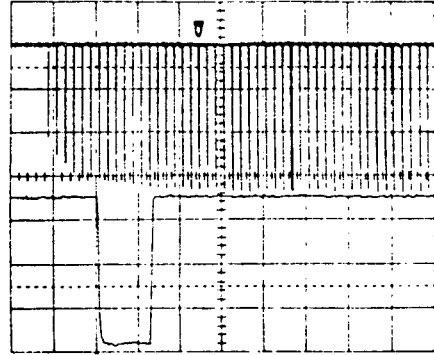
그림-8 은 출력 감시회로에서 관측된 레이저 출력 형태이며 thermal lensing 효과가 안정되는데 수초가 걸림을 알 수 있다. 개발된 pulse 형 Nd:YAG 레이저의 제원은 표-2 와 같으며 주요 수입된 부품 및 가격은 표-3 과 같다.

표-2 개발된 pulse 형 Nd:YAG 레이저 제원

구 분	Model - I	Model - II
1. 구성	Single Ellipse	Double Ellipse
2. Nd:YAG	1/4" x 6"	1/4" x 6"
3. 평균출력	> 150 W	> 200 W
4. 첨두출력	> 2.5 kW	> 5 kW
5. 펄스폭	0.1 - 20 msec	0.1 - 20 msec
6. 반복율	> 300 pps	> 300 pps
7. 에너지	> 30 J	> 50 J

표-3 수입된 부품 및 가격

품 명	단 가	비 고
1. Nd:YAG 봉	\$ 1,800	-국내 개발중
2. 레이저 거울	\$ 250	-국산 가능
3. Flashlamp	\$ 250	-관련제품 생산
4. He-Ne 레이저	\$ 500	-수입 필요
5. Hot Mirror	\$ 30	-생산 가능
6. Cold Mirror	\$ 100	-생산 가능
7. GTO switch	\$ 600	-수입 필요
8. 냉각장치	\$ 3,000	-국산 대체가능



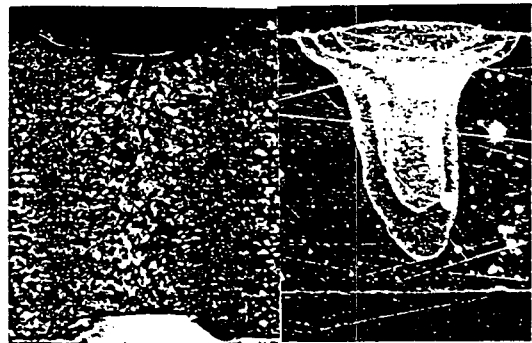
수평축 : 0.5 s/div 수직축 : 450 W/div
(아래부분은 5 ms/div 으로 확대)

그림-8 개발된 Nd:YAG 레이저의 출력 파형

V. 레이저 용접 응용 및 분석

개발된 200 W 급 Nd:YAG 레이저는 핵연료 부품에 사용되는 Zircaloy-4 합금의 레이저 용접 특성 연구에 이용되었으며 앞으로 핵연료 개발을 위한 Zircaloy-4 합금의 섬세한 용접에 활용될 예정이다. 사진-1a 은 레이저 용접된 Zircaloy-4 단면을 보여주며 열영향 부위가 좁고 용입상태가 양호한 것을 알 수 있다.

그밖에 용접이 어려운 Al 과 stainlee 의 정밀용접, Zr-4 와 용용점이 높은 Ti 및 Ta 과의 용접 및 0.3 mm 정도의 섬세한 thermocouple 용접 연구가 수행되었다.



(a) Zircaloy-4 (b) Stainless Steel

사진 -1 Zircaloy-4 및 stainless 용접 단면

VI. 결 론

레이저 용접용 고출력 Nd:YAG 레이저를 자체 설계하여 개발하였으며 부품의 국산화율을 높혀 국산화에 대비하였다. 제작된 Nd:YAG 레이저는 200 W 이상의 평균출력과 5 kW 의 첨두출력을 낼 수 있어 여러분야의 레이저 용접 특성 연구를 수행할 수 있었다. 또한 그동안 사용결과 상용 제품에 맞먹는 내구성을 보여주고 있다.

레이저 가공은 새로운 첨단 가공기술로서 기존의 가공 기술을 대체하여 생산성을 높이고 성능 향상을 기할 수 있으며 또한 기존 기술로 불가능한 신제품을 가공할 수가 있어 새로운 제품 개발에 있어서는 필요 불가결한 신기술로 선진국에서는 그 응용이 꾸준한 증가추세에 있다. 국내에서도 레이저 가공이 여러분야에서 이용되고 있으나 아직 본격적인 활용단계라고는 할수 없다. 앞으로 본 개발된 고출력 Nd:YAG 레이저 국내 레이저 가공 활성화에 기여할 수 있게 되기를 바란다.

참고 문헌

- [1] W.Koechner, " Solid-Sstate Laser Engineering", p-349, Spring-Verlag, N.Y., 1976.
- [2] ILC Tech. Bull. No.1 : An Introduction to Flash Tubes.
- [3] [1] 의 p-353.