

가공용 Nd:YAG 레이저 설계
(Design of Industrial Nd:YAG Laser)

김철중, 정진만, 김정목, 김광석, 이종민
한국에너지연구소

초 록

상용 가공용 Nd:YAG 레이저의 특성 및 제원을 분석하고 설계시 고려하여야 할 thermal lensing 효과의 영향에 따른 출력특성의 제한에 대하여 기술하였으며 이를 토대로 200 W 급의 Nd:YAG 레이저를 설계하였다.

I. 서론

현재 사용되는 상용 가공용 Nd:YAG 레이저의 제원은 표-1 과 같다. Spot 용접용을 제외하고는 보통 최대 평균 출력이 100 W 이상이 요구되며 최대 400 W 정도가 보편화되어 있다. 최대 평균출력은 냉각 능력의 제한 때문이므로 어떤 경우에도 이를 초과할 수 없다. 그리고 thermal lensing 효과 때문에 발진 가능한 최소 평균출력이 어느정도 이상이어야 하므로 single pulse 만의 발진은 안되며 spot 용접과 같은 경우에는 shutter 를 이용하여 여러 연속된 pulse 중에서 단일 pulse 만을 통과시켜 사용할 수 있다. 첨두출력의 가변에 있어서 단일 레이저로는 10 배 정도의 범위에서 가변시킬 수 있다. Pulse 폭 가변에 있어 재래식은 multiple LC 회로를 이용하여 가변시켰으나 최근에는 SCR 과 같은 전자 switch 를 이용하여 연속적인 가변이 가능하게 되었으며 pulse 반복율도 수백 Hz 까지 가능하게 되었다. 최대 출력 에너지는 flashlamp 의 transfer charge 와 explosion energy 에 의해 제한된다.

본 논문에서는 위의 특성을 갖기위하여 설계시 고려하여야 할 사항을 분석하고 각 부분 별로 설계상의 문제점을 기술하고 실제로 200 W 급의 가공용 Nd:YAG 레이저를 설계하였다.

표-1 상용 가공용 Nd:YAG 레이저 특성

구 분	성 능
최대 평균 출력	> 100 W (Max. 400 W)
첨두 출력 가변	0.5 - 20 KW
Pulse 폭 가변	0.2 - 20 msec
반복율	> 100 pps
최대 출력 에너지	50 J per pulse

II. 본 론

1. 가공용 Nd:YAG 레이저의 구성과 부위별 기능

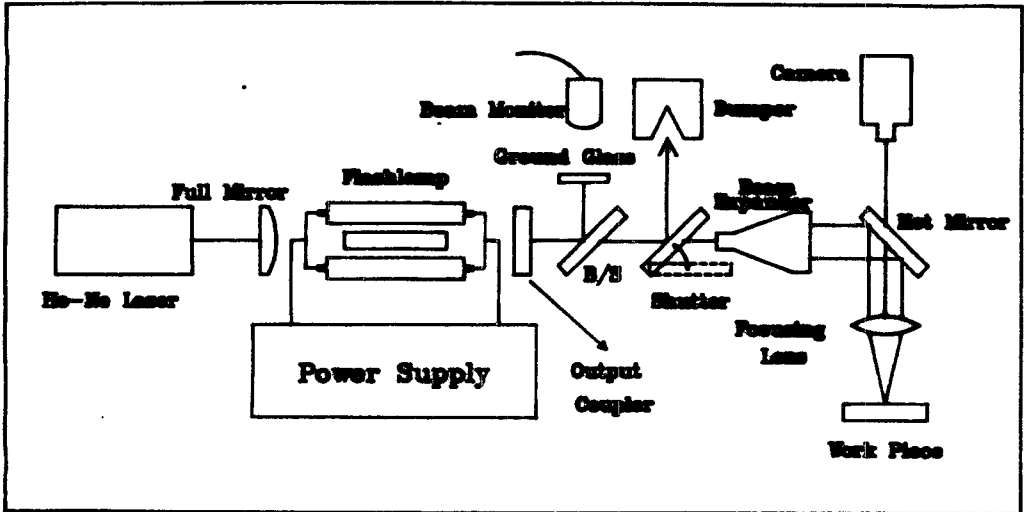


그림-1 가공용 Nd:YAG 레이저의 구성

가공용 Nd:YAG 레이저는 그림-1 에서와 같이 발진부, 출력 monitor, shutter, dumper, 광확대기, hot mirror, 집속 렌즈, He-Ne laser 와 감시 camera 로 구성되어 있다.

출력 monitor 는 레이저의 출력 상태를 표시하며 레이저 출력이 안정화되어 가공에 사용할 수 있는 시점을 알려주며 출력 변화에서 flashlamp 의 수명 상태를 파악할 수 있다. Shutter 는 Nd:YAG 레이저의 출력이 안정될 때까지 기다릴 때나 가공중 잠시 출력을 막을 때 레이저 출력을 dumper 로 보내는 역할을 하며 dumper 는 이때 입사된 에너지를 흡수하여 냉각계통을 통하여 방출한다. Hot mirror 는 1.06 μm 의 레이저를 가공 물체에 반사시키나 가공물체로부터의 가시광선을 투과시켜 가공시 camera 나 확대경을 통하여 가공물체를 관측할 수 있게 한다.

광확대기는 일반적으로 레이저의 beam divergence 를 줄이는 역할을 하며 레이저 가공기에서도 beam divergence 를 줄여 가공 특성을 좋게 하는 것으로 생각되기 쉬우나 광확대기의 역할은 집속 렌즈로부터 가공물체까지의 거리 즉 working distance 를 늘리는 것이다. 레이저 가공시 촛점부의 spot 크기와 working distance 는 아래 식과 같이 정해진다. Spot 크기 S 는 광확대기의 배율에는 무관하며 광확대기를 사용하여도 향상되지 않는다. 그러나 working distance 는 광확대기 배율만큼 길어진다.

$$Q = \text{레이저 가공기의 Quality Factor} \\ = D \cdot \text{Full Beam Divergence} \quad (D : \text{레이저봉의 구경}) \quad (1)$$

$$S = \text{촛점부의 Spot Diameter} \\ = Q \cdot F\# \quad (F\# : \text{집속 렌즈의 } F\#) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 W &= \text{Working Distance} \\
 &= D \cdot F\# \cdot M \quad (M : \text{광확대기의 배율}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

레이저 가공시에 집속 렌즈의 F# 는 보통 3 - 5 가 사용되며 deep hole 가공시에는 보다 큰 F# 가 이용된다. 보통 가공시 요구되는 spot 크기를 200 um 까지 유지하기 위해서는 가공용 Nd:YAG 레이저의 Q 는 50 um 정도이어야 하며 광확대기의 배율은 3 배 정도이면 가공에 충분한 working distance 를 유지할 수 있다. 실제의 경우 광확대기의 수차에 의해 촛점부의 spot 크기가 더 커지므로 deep hole 가공과 같은 큰 F# 의 집속 렌즈를 사용하는 경우는 아주 섬세한 가공을 위하여 광확대기를 사용하지 않는 경우도 있다.

발전부는 앞거울, 뒷거울, flashlamp, pumping reflector, Nd:YAG rod 와 flashlamp 전원공급용 전원부로 구성되어 있다. Nd:YAG 레이저의 출력 효율은 2 - 3 % 정도이므로 입력에너지의 대부분을 냉각시켜야 하며 flashlamp, pumping reflector, Nd:YAG 레이저봉과 dumper 가 냉각수에 의해 강제 냉각되게 되어있다.

특히 Nd:YAG 레이저봉은 냉각시 온도분포가 불균일하여 굴절율이 변화하여 볼록 렌즈의 기능을 갖게 된다. 이것이 thermal lensing 효과이며 렌즈의 촛점거리가 입력에너지에 따라 변하여 레이저 resonator 의 mode 크기와 beam divergence 를 변화시키며 레이저 발전의 안정성까지도 결정하게 된다. 가공용 Nd:YAG 레이저 설계시 가장 중요한 것은 이 thermal lensing 효과를 분석하고 그 영향을 설계에 반영하는 것이다.

2. Thermal Lensing 효과 와 Mode 변화

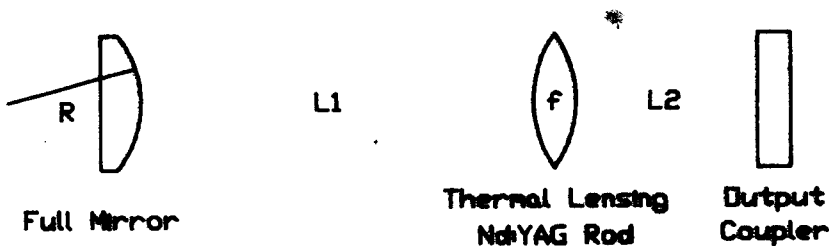


그림-2 Thermal Lensing 효과를 포함한 광학계

Thermal Lensing 효과를 감안한 가공용 Nd:YAG 레이저의 광학계는 그림-2 와 같다. Thermal Lensing 효과에 의한 촛점거리 f 는 아래식과 같다. [1]

$$f = 1/2 \cdot dn/dT \cdot K \cdot A / Pa \quad (4)$$

- dn/dT : 굴절율의 온도변화 계수
- K : Thermal Conductivity of Nd:YAG
- A : 레이저봉의 단면적
- Pa : 레이저봉에 단위시간당 흡수된 에너지

앞거울은 곡면거울을 사용할 수 있으나 광학계 정렬의 편의성과 다양한

여러 종류의 반사율을 확보하기 위하여서는 평면 거울이 유리하고 레이저 출력 특성도 우수하여 평면거울인 경우만을 고려하였다.

그림-2의 광학계를 분석하기 위하여서는 mode 특성을 분석하여야 한다. [2] 그림-3은 앞거울 (A,B,C)과 뒷거울 (a,b,c)에서의 촛점거리 변화에 따른 mode radius 변화를 보여준다. 발진 가능한 최소 및 최대 입력 부근에서 앞거울의 mode radius는 급격히 커져서 출력을 감소시키며 레이저발진이 불안정하게 되며 뒷거울은 최대입력 부근에서 촛점이 맺히게 되어 거울을 파손시키게 된다.

앞거울과 레이저봉의 mode radius는 거의 같으므로 레이저봉의 직경이 D일 때 multimode beam divergence θ_m 는 아래와 같다. [2]

$$\begin{aligned} \theta_m &= W_m/W_o \cdot \theta_o & (\theta_o : \text{TEM}_{00} \text{ mode beam divergence}) \\ &= D/2W_o \cdot 2w/\pi/W_o & (W_o/W_m : \text{TEM}_{00} / \text{multimode radius}) \\ &= w/\pi \cdot D/W_o^2 & (w : \text{wavelength of laser}) \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 quality factor Q와 촛점부의 spot 크기는 아래와 같다.

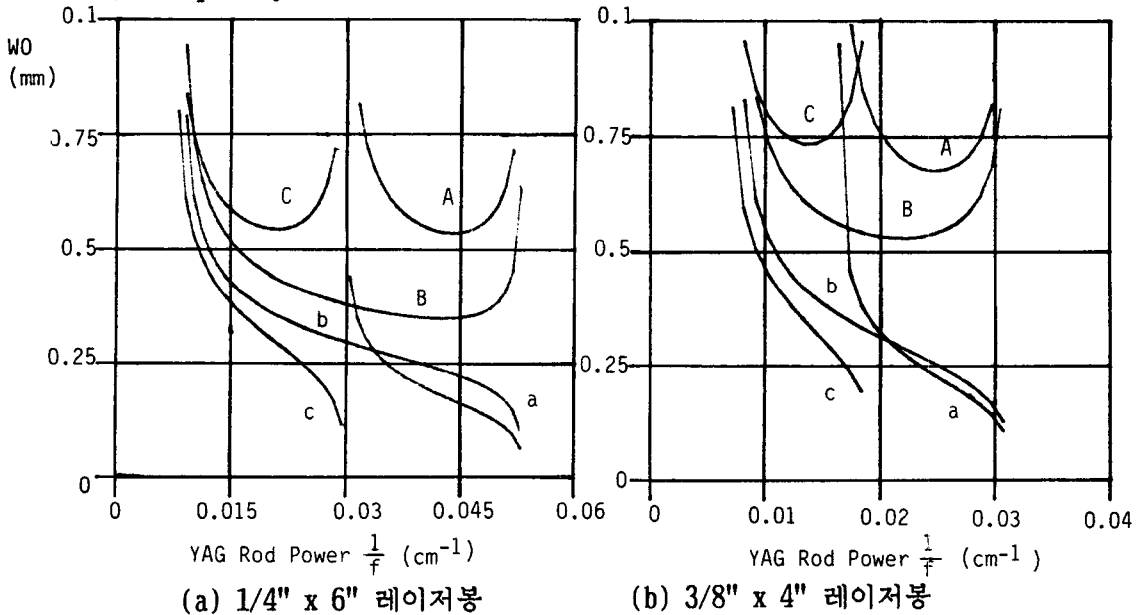


그림-3 촛점거리 변화에 따른 Mode Radius 변화 관계

$$Q = w/\pi \cdot (D/W_o)^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S &= F\# \cdot Q \\ &= w/\pi \cdot F\# \cdot (D/W_o)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

레이저 발진시 입력변화에 따라 mode radius가 변하며 따라서 beam divergence도 변하고 촛점부의 spot 크기도 변하여 레이저 가공 특성이 입력에 따라 달라지게 되며 spot 크기의 변화는 mode radius 변화의 2배가 된다.

$$dS/S = 2 \cdot dW_o/W_o \quad (8)$$

그림-2 의 경우 발진 가능한 최대 초점거리는 $R + L1$ 이며 최소 초점거리는 $L1$ 이므로 $(R+L1)/L1$ 은 발진 가능한 최대입력과 최소입력과 의 비를 결정한다. 레이저 발진이 광범한 영역에서 가능하게 하기위하여서는 이 비를 크게 하는 것이 좋으나 대신 발진시 그림-3 에서와 같이 mode radius 가 작아져서 beam divergence 가 커지게 된다.

3. 200 W 급 가공용 Nd:YAG 레이저 설계

A. 광학계통 설계

200 W 급의 출력을 내는 데는 3/8" x 4" 또는 1/4" x 6" 의 standard 레이저봉을 선택할 수 있다. 아래서는 이 두가지의 경우를 비교하며 설계 하였다. 가공용 Nd:YAG 레이저는 첨두출력이 10 KW 이하로 낮기때문에 Kr flashlamp 를 사용할 수 있으므로 2 % 정도의 효율은 쉽게 기대할 수 있으며 따라서 10 KW 급의 전원이 필요하게 된다.

다음에는 flashlamp 를 선정하여야 하는 데 flashlamp 의 bore 직경을 레이저봉의 직경과 같게 하는 것이 유리하므로 10 mm 와 7 mm 의 bore 직경을 각각 선택하였다. 보통 natural fused quartz 를 사용한 1 mm 두께의 flashlamp 는 200 W/cm² 의 입력을, 0.5 mm 두께는 320 W/cm² 의 입력을 감당할 수 있다. 그러나 기계적 강도면에서 10 mm lamp 는 약하므로 3/8" x 4" 는 두께 1 mm, bore 직경 10 mm 를 2 개 사용하고 1/4" x 6" 는 두께 0.5 mm, bore 직경 7 mm 1 개를 사용하였다. 이때 사용가능한 최대 입력은 3/8" 의 경우 12.5 KW 이며 1/4" 의 경우 9.5 KW 이다. 따라서 3/8" 는 double ellipse reflector 를 1/4" 는 single ellipse reflector 를 선택하였다.

레이저봉 선정시 고려하여야 할 사항은 레이저봉의 열 흡수에 따른 stress 로 레이저봉이 깨질 수 있으며 이는 단위길이당의 입력에 관계가 있으며 cm 당 1.5 KW 를 초과하지 않아야 한다. 이점에서는 1/4" 가 유리하나 1/4" 는 thermal lensing 효과가 2 배 정도이며 실제로 10 KW 에서 초점거리가 15 cm 정도이므로 10 KW 이상에서 사용하는 것은 무리다. 따라서 15 KW 이상의 입력을 사용할 때는 가장 큰 상용 standard 인 3/8" x 6" 를 사용하여야 한다.

1/4" 의 경우 single ellipse reflector 를 사용한 이유는 1 개의 flashlamp 로 필요한 입력을 공급할 수 있으므로 single ellipse reflector 의 높은 효율을 살리기 위함이다. 3/8" 의 경우 double ellipse 로 transfer 효율이 다소 떨어지나 이는 3/8" 레이저봉의 보다 큰 흡수효율로 상쇄할 수 있으며 3/8" 의 경우 single ellipse 로 하여도 효율이 1/4" 의 경우보다는 떨어진다. 결국 single ellipse reflector 는 높은 효율, double ellipse reflector 는 보다 큰 입력 즉 보다 큰 출력을 기대할 수 있다.

식 (6) 에서 quality factor Q 를 50 um 정도를 유지하기 위해서는 레이저봉 직경 D 와 TEM₀₀ mode radius 의 비가 12 이하가 되어야 한다. 따라서 3/8" 의 경우 TEM₀₀ mode radius 가 .8 mm, 1/4" 의 경우 .5 mm 이상이 되어야 한다.

그림-3a 에서 A 는 $L1 = 15$ cm, $R = 15$ cm 의 경우로 입력 가변범위는 약 2 배로 최소 입력이 5 KW 이상이어야 하며 B 는 $R = 100$ cm 로 입력 가변 범위가 7 배 정도로 최소 입력 1.5 KW 에서 30 W 정도의 평균 출력을 기대할 수 있다. C 는 특별히 섬세한 가공을 위한 것으로 $L1 = 30$ cm, $R = 100$ cm 의 경우로 최대 입력은 5 KW 정도이며 최대 출력은 100 W 정도

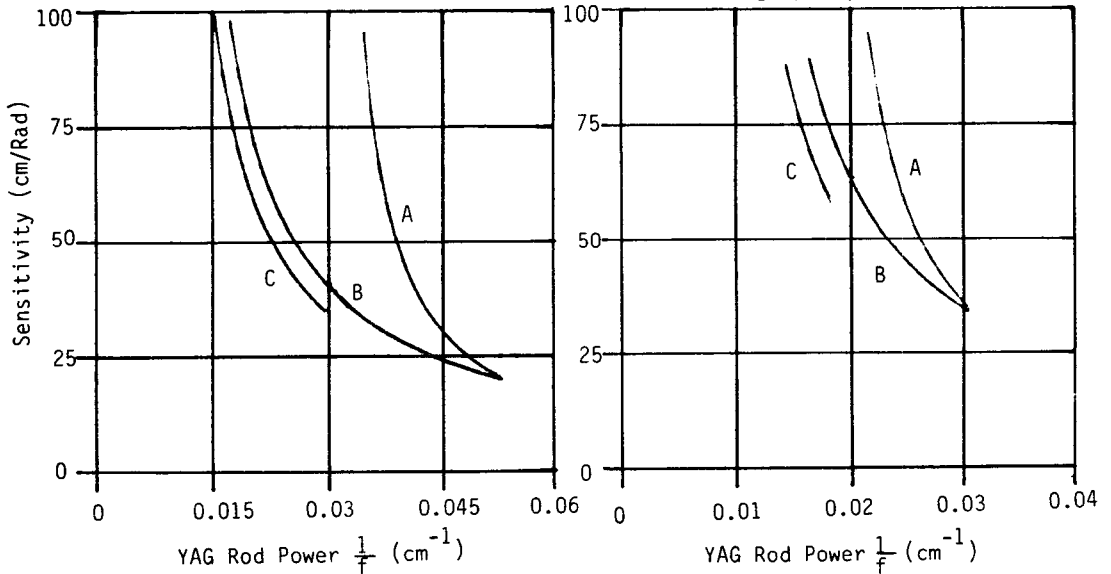
이다. 이때의 입력가변 범위는 3.3 배로 가공에 불편함이 없다.

그림-3b 는 3/8" 의 경우로 L1 = 30 cm, L2 = 15 cm 이며 R = 30 (A), 100 cm (B) 인 경우와 L2 = 50 cm, R = 100 cm (C) 일 경우이다. A 의 입력 가변 범위는 2 배 정도이며 B 는 4 배 이며 C 의 최대입력은 6 KW 정도이며 가변범위는 3 배 정도이다.

이상에서 볼수 있듯이 출력 가변범위가 클수록 가공특성은 떨어지므로 가공특성을 좋게 하기 위해서는 저출력과 고출력에서 따로 뒷거울을 바꿔서 사용하여야 한다.

그림-2 의 광학 구조에서 정열시 가장 민감한 부품은 평면인 앞거울 이다. 앞거울이 tilt 되면 그만큼 레이저 광축이 tilt 되어 레이저 발진에 지장을 준다. 그러나 뒷거울은 tilt 되어도 레이저 광축이 tilt 되지 않고 평행 이동만 하게 되어 레이저 발진에 지장이 적다.

그림-4 는 위의 1/4" 와 3/8" 의 경우에 뒷거울 tilt 에 따른 앞거울 에서의 레이저 중심축의 이동비 (cm/rad) 이다. 이 비가 150 cm/rad 이면 뒷거울 1' tilt 시 중심축이 0.5 mm 이동하므로 레이저 발진에 지장이 없다. 그림에서와 같이 뒷거울의 tilt sensitivity 가 적어 다소 틀어져도 레이저 발진에 지장이 없으며 따라서 거울의 교환이 용이하다.



(a) 1/4" x 6" 레이저봉

(b) 3/8" x 4" 레이저봉

그림-4 뒷거울 tilt 에 따른 앞거울에서의 중심축 이동비

B. 냉각계통 설계

입력된 에너지의 약 2 % 가 레이저로 출력되고 약 50 % 는 flashlamp 에서, 약 43 % 는 pumping reflector 에서, 나머지 약 5 % 정도는 레이저봉에서 각각 냉각시켜져야 한다. 우선 10 KW 입력시 냉각수의 온도 상승을 10 도 정도로 유지하기 위해서는 냉각수의 유량을 15 liter/min 로 하여야 하며 냉각수는 flashlamp 의 누전을 막기 위해 200 Kohm · cm 이상의 증류수를 사용하여야 한다.

Flashlamp 표면에서의 단위면적당의 열전달 상수 h [W/cm² / °C] 는

냉각구조와 냉각수의 속도에 관계한다.[3] 또한 냉각수의 기화를 방지하기 위해서는 flashlamp 의 표면 온도를 100°C 이하로 유지하여야 한다. 실제의 경우 유압이 3 기압 정도이므로 130°C 이하로 유지하면 된다. 따라서 냉각수의 최대 온도를 30°C 까지 허용할때 냉각수와 flashlamp 표면의 온도차는 100°C 이내가 되어야 하며 $1/4''$ 의 경우는 h 가 $1.8 \text{ W/cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$ 정도가 되어야 한다. $3/8''$ 의 경우는 h 가 $1.1 \text{ W/cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$ 이어야 한다. 이와같은 높은 열전달 상수를 얻기 위하여서는 flashlamp 와 거의 같은 직경의 동심원상의 냉각관을 이용하여 고속으로 냉각수를 흘려야 한다.

Bore 직경 7 mm flashlamp 의 외경은 9.3 mm 이고 10 mm flashlamp 는 12.5 mm 이므로 각각 내경 12 mm 와 15 mm 인 냉각관을 사용하여 설계하였으며 이때의 h 값은 각각 1.9 과 $1.1 \text{ W/cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$ 로 냉각조건을 만족한다. 상용 flashlamp 의 전극연결부는 300°C 까지에서도 사용에 무리가 없으나 flashlamp 는 입력의 약 10 % 정도를 전극연결부로 방출하므로 전극연결부의 냉각도 고려하여야 하며 냉각수에 의한 냉각과 conduction 을 이용한 방법이 이용되고 있으나 10 KW 정도의 입력일 경우에는 냉각수를 이용하는 것이 좋으며 이때 전극 주변의 절연에 유의하여야 한다.

레이저봉은 입력의 약 5 % 정도를 방출하므로 600 W 정도만 냉각시키면 되고 레이저봉의 표면적이 30 cm^2 정도이므로 열전달 상수가 $0.7 \text{ W/cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$ 정도이면 레이저봉의 표면온도와 냉각수와의 온도차는 30°C 이하가 되어 만족할 만하다. 실제로 $1/4''$ 와 $3/8''$ 의 경우 각각 내경이 14 mm 와 18 mm 의 냉각관을 사용하였고 이때의 h 값은 각각 1.0 와 $0.8 \text{ W/cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$ 이다.

Pumping reflector 는 금속으로 열전달 상수가 크므로 열전달에는 어려움이 없으며 냉각수를 reflector 의 외부나 금속 내부의 관을 통하여 흘리면 냉각에는 어려움이 없다. 여기서는 reflector 금속 내부에 관을 뚫어 사용하였다. 이것이 외부에 냉각수를 흘리는 것보다 냉각수가 새는 것을 방지하는 데 유리하였다.

냉각순서는 레이저봉의 냉각열량이 적으므로 레이저봉을 먼저 흘리고 다음에 flashlamp 를 냉각시키고 마지막으로 열전달 효율이 좋은 pumping reflector 를 냉각시켰다. $3/8''$ 의 경우 2 개의 flashlamp 를 평행으로 냉각시켰다.

C. 전기계통 설계

전기계통은 그림-5 과 같으며 flashlamp 의 입력에너지를 저장하는 capacitor 와 이를 충전하는 충전장치, flashlamp 의 초기 점등을 위한 trigger 장치, 고반복율의 방전을 위한 simmer 장치와 레이저 펄스폭과 반복율을 결정하는 pulse 형성회로로 구성되어 있다. 특히 가공용 Nd:YAG 레이저의 경우 정밀가공을 위해서는 CNC 와 같이 사용하여야 하므로 CNC 에서 레이저의 출력 특성을 제어하는 기능이 바람직하며 이를 위해서는 레이저의 출력 특성을 microprocessor 로 제어할 수 있어야 한다. 또한 microprocessor 를 사용함으로써 레이저의 현재 상태를 표시할 수 있으며 각종 data 를 저장할 수 있어 최근에 개발된 가공용 Nd:YAG 레이저는 microprocessor 에 의한 제어가 필수적이다.

가공용 레이저의 첨두 출력이 낮으므로 고가의 낮은 inductance 의 capacitor 가 필요없어 저렴한 전해 capacitor 를 사용하였다. 펄스 형성회로로는 구형의 경우 LC 회로가 사용되었으나 20 msec 의 긴 펄스를

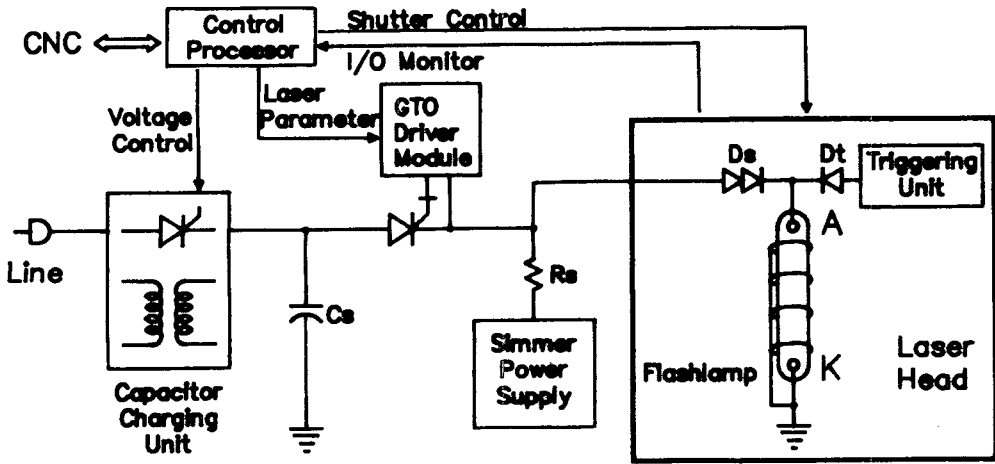


그림-5 전기계통의 구성

만들기가 어렵고 impedance matching 의 어려움이 있으며 연속적으로 펄스폭을 가변시키기가 어려워 80 년대에 개발된 Nd:YAG 레이저는 주로 SCR 을 이용한 switch 가 사용되고 있다. SCR 의 경우 turn-on 과 turn-off 를 위한 두개의 SCR 이 사용되나 여기서는 신소자인 GTO 를 1 개 사용하여 펄스폭과 반복율을 제어할 수 있게 하였다. GTO 는 SCR 보다 빨라서 수백 Hz 의 고반복율을 유리하고 SCR 보다 짧은 펄스를 만들수 있다. Simmer 장치는 안정한 고반복율 동작과 낮은 전압에서의 방전을 위하여 100 mA 이상 수백 mA 까지의 전류를 flashlamp 에 공급시켜 주어야 한다. 초기 점등을 위한 trigger 방식으로는 주로 external trigger 방식이 사용되고 있으나 여기서는 flashlamp 외벽의 wire 를 이용하여 5 KV 정도의 낮은 전압에서 trigger 되게 하였으며 전원부에 고압 diode 를 부착하여 trigger 전류의 누설에 의한 충전부의 파손을 방지하였다.

III. 결론

가공용 Nd:YAG 레이저의 특성을 제한하는 thermal lensing 효과를 분석하였으며 이를 토대로 200 W 급 Nd:YAG 레이저를 설계하였다. 레이저 봉의 직경이 3/8", 1/4" 인 경우 2 가지를 설계하여 그 특성을 비교하였다. 앞으로 이상의 설계를 바탕으로 가공용 Nd:YAG 레이저를 국산화하여 국내의 레이저 가공의 활성화에 기여할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] W.Koechner, "Solid-State Laser Engineering," Springer-Verlag, N.Y. (1976).
- [2] D.R. Whitehouse, et al, Report TR ECOM-0269-F, US Army Electr. Command, Fort Monmouth, N.J.(1973).
- [3] W. Koechner : J. Appl. Phys. 44, 3162 (1973).