研 究 論 文
大 韓 溶 接 學 會 誌
第 9 卷 第 1 號 1991年 3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 9, No. 1, Mar., 1991

정밀 용접용 펄스형 Nd : YAG 레이저 가공기 개발

김덕현* · 정진만* · 김철중* · 이종민*

Development of a Pulsed Nd:YAG Laser Materials Processing System

D.H. Kim*, C.M. Chung*, C.J. Kim*, J.M. Lee*

Key Words: Nd : YAG laser(Nd : YAG 레이저), Laser Welding(레이저 용접), Thermal Lensing Effect(열렌즈 효과), Laser Beam Divergence(레이저 빔 발산각), Laser Power Density(레이저 파워 밀도), Power Supply(전원 공급장치)

Abstract

A 200 W pulsed Nd : YAG laser for fine welding was developed. The important laser parameters such as laser peak power, average power, pulse width, and pulse energy for welding were studied. In order to obtain the sufficient laser power density for welding, thermal lensing effects were analyzed and a laser resonator with reduced laser beam divergence was designed.

The power supply unit was designed to support up to 7 kW input. The pulse control unit was developed using a GTO thyristor and could control over 100 kW input power to obtain 3.5 kW peak power laser. Also due to the GTO thyristor the pulse width could be varied continuously from 0.1 to 20 msec and maximum repetition rate was as high as 300 pps.

I. 서 론

1960년 처음으로 루비 레이저가 개발된 후 고체 레이저의 발달은 계속되어 왔으며 레이저의 산업적 이용은 증대되었다. 그 중 Nd : YAG 레이저는 다른 고체 레이저에 비하여 고반복률로 동작할 수 있고 낮은 발진 문턱치(threshold for laser oscillation)를 가지는 장점 때문에 산업용으로 가장 많이 이용되고 있는 고

* 정회원, 한국원자력연구소

체 레이저이다. Nd : YAG 레이저는 1970년대이후 상용화되면서 레이저 용접, 절단, 열처리, 구멍가공 및 marking 등에 이용되면서 전자소자의 제조, 의료, 항공기, 자동차 등의 분야에 널리 응용되고 있으며 이러한 추세에 비추어 Nd : YAG 레이저 가공기의 개발과 그 이용은 꼭 필요하다.

레이저 용접기를 개발하기 위하여 본 연구에서는 용접에서 필요한 레이저 출력이 어떠한 특성을 가져야 되는지를 알아보았고 이를 토대로 Nd : YAG 레이저 용접기를 설계 제작하였다.

2. 용접에 필요한 레이저의 조건

레이저 가공에는 CO_2 레이저와 Nd : YAG 레이저가 사용되고 있는데 Nd : YAG 레이저는 평균 출력에서 CO_2 레이저에 비해 작으나 첨두출력은(peak power) 수kw 이상으로 대형 CO_2 레이저와 같으며, 발진장치가 소형이어서 작업공간이 작고, 광전송 특성이 우수하며, 또한 출력 파장이 짧아 금속 가공시 레이저 흡수율이 높은 장점이 있다.

이러한 Nd : YAG 레이저에 의한 용접은 CO_2 레이저 용접이나 전기적 arc를 이용한 다른 용접에 비하여 다음의 여러가지 장점을 지닌다.

1. 발산각이 작은 레이저를 집광렌즈에 의하여 작은 면적에 집속시켜 파워 밀도를 높힐 수 있어서 용융점이 높은 금속의 용접이 가능하고 촛점의 크기를 작게 함으로써 섬세하고 정밀한 용접을 할 수 있다.

2. 레이저의 첨두출력과 펄스폭을 적절히 조절하여 용접물에 순간적으로 가열을 함으로써 열전도도가 큰 금속의 용접이 가능하며 적은 열영향 부위를 얻을 수 있다.

3. 비접촉 가공이므로 가공물에 기계적인 힘을 가하지 않으므로 연약한 재료의 가공이 가능하다.

4. 광섬유를 통하여 평균출력 수백 W 이상의 레이저 전송이 가능하므로 협소하거나 밀폐된 공간에서의 원격가공이 가능하고, 또한 여러부위를 동시에 용접해야하는 특수한 용접에도 사용이 가능하다.

레이저 가공을 위한 Nd : YAG 레이저는 CW형, Q-switched CW형, 펄스형 등이 있다. CW형은 레이저 첨두출력이 수백 W 이하로 열전도에 의하여 금속면에 열전달이 일어나므로 용입이 적으며 박판용접(conduction welding)에 이용된다. Q-switched CW형은 Acousto-optic Q-switching 등에 의하여 발진하는 레이저로 첨두 출력이 수백 kW 정도에 이르며 용접시 keyhole을 형성하여 깊은 용입을 일으킬 수 있으나 금속의 끓음때문에 용입상태가 좋지 않아서 주로 marking등에 이용되고 있다[1]. 펄스형은 본 연구에서 개발된 것이며 펌핑하는 광원의 첨두출력, 펄스폭, 반복률 등에 따라 레이저 출력 가변이 쉽게 이루어지며 용접, 절단 등의 산업용으로 가장 많이 이용된다.

레이저의 금속면 흡수율은 상온에서 1.06μm인 Nd : YAG 파장의 경우 20% 이내이다[2]. 레이저의 에너지를 금속면에 효과적으로 전달하기 위하여 프라즈마의 발생이 필요한데 0.1MW/cm^2 이상의 파워 밀도가 필요하다[3]. 그러나 과다한 프라즈마의 발생은 오히려 레이저를 차단하는 역할을 하므로 레이저 첨두출력, 촛점의 크기, 펄스폭 등을 적절히 조절하여야 한다.

펄스형 레이저의 경우 파워 밀도를 높이며 용입이 깊어지지만 파워 밀도가 어느 한계 이상이 되면 기화된 금속 등에 의하여 LSD(Laser supported detonation)파가 발생한다[4]. 이러한 LSD파는 10MW/cm^2 정도에서 5MPa 정도의 압력을 수반하여 용융된 pool에 splashing을 일으켜 용접성을 나쁘게 하고 레이저빛도 차단하게 된다.

N.G. Basov[3]에 의하면 박판 용접에서 레이저에 의하여 용입되는 금속면의 깊이는 표면에서 기화가 일어나는 순간까지의 용입 깊이가 되며 레어저 펄스폭도 그 이상 크게할 필요가 없는 것으로 되어 있다. 그에 의하면 매질에 따른 최적 레이저 펄스폭은 흡수되는 에너지(A)와 금속의 녹는점(Tm), 끓는점(Tv), 잠열(L), 비열(c) 등에 관계하며 아래와 같이 표현된다.

$$\tau=\{\frac{c(Tv-Tm)+L}{A}\}^2 \qquad (1)$$

그리고 이러한 펄스폭은 용융된 금속의 혼합정도에 영향을 주며 펄스폭이 길수록 혼합이 잘 이루어 지는 것으로 알려져 있다[5]. 그러므로 레이저 가공에 있어서 파워 밀도와 펄스폭은 레이저 가공에 있어서 중요한 변수로 작용함을 알 수 있고 레어저 용접에서 이것을 적절히 조절할 수 있어야 한다. Fig. 1은 레이저의 응용분야별 레이저의 조사조건을 나타낸다[6]. 그림에서 알 수 있듯이 레이저 용접의 경우 0.1~10MW/cm^2 정도의 파워 밀도와 1msec에서 수십 msec 정도까지 펄스폭이 필요하다.

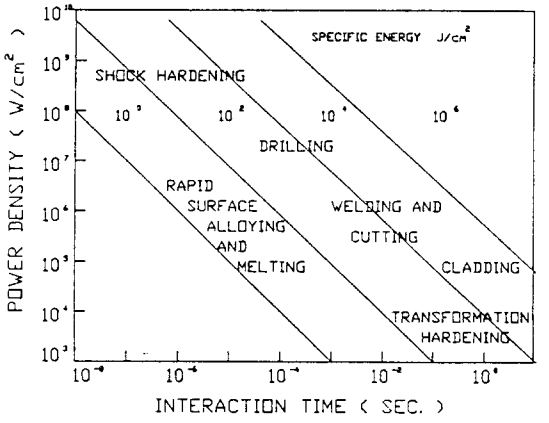

Fig. 1 Laser power density against interaction time.

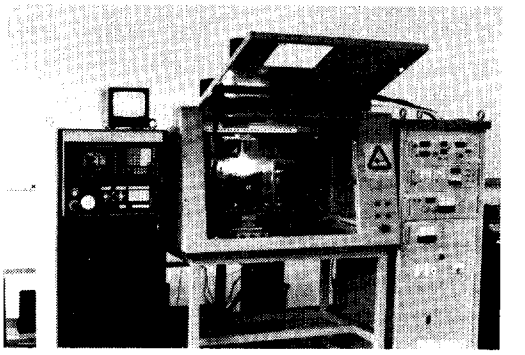

Photo. 1 Configuration of Nd : YAG laser welding system

3. 펄스형 Nd : YAG 레이저의 설계 및 제작

3. 1. 설계의 기본 개념

개발된 고출력 펄스형 Nd : YAG 레이저 용접기는 Photo. 1과 같은데 레이저의 발진장치, 발진된 레이저를 용접하고자 하는 표적까지 전송하는 광학계, 전원 공급 및 제어장치, 냉각장치 등으로 구성되며 CNC(Computer-Numerical-Control) 장치와 제어기에 의하여 X-Y-Z table 및 레이저 출력 변수의 제어가 이루어진다.

이러한 용접기의 설계는 크게 광학부의 설계, 전원장치 및 제어부의 설계, 주변장치의 설계로 나눌 수 있다. 이러한 각 부분의 설계는 레이저 용접변수를 적절히 제어할 수 있도록 하여야 한다. 광학부의 설계는 레이저 공진기의 설계, 광속확대기, 집광렌즈의 설계로 나눌 수 있다. 특히 레이저 공진기 설계는 레이저 용접에서 중요한 변수로 작용하는, 레이저의 발산각을 줄일 수 있도록 설계해야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 공진기 내부에서 TEMoo(Transverse Electro Magnetic) 모우드의 크기를 여러 가지 공진기 구조에 대하여 계산하였으며 발산각이 작은 구조를 설계에 반영하였다. 전원장치 및 제어부에서는 레이저 용접에 필요한 에너지를 충분히 공급할 수 있으며 레이저의 첨두출력, 펄스폭, 반복률 등을 정확하고 쉽게 제어할 수 있도록 설계하였다. 특히 제어부의 설계에서 주변장치의 제어를 동시에 가능하도록 함으로써 자동화가 이루어질 수 있도록 하였다.

3. 2. 레이저 공진기의 설계

고출력 레이저를 사용하여 물질을 기공할때, 레이저를 집속시키지 않는 상태에서는 재료의 가공에 필요한 에너지를 얻을 수 없으므로 집광렌즈를 통하여 접속시켜 필요한 파워 밀도를 얻는다. 이때 파워 밀도(Io)는 출력 빔의 발산각(θ)과 집광렌즈의 촛점거리(f)와 다음의 관계에 있다.

$$I_o = \frac{4P}{\pi (f\theta)^2} \qquad P : \text{레이저의 첨두 출력} \qquad (2)$$

따라서 윗식에서 출력 빔의 발산각이 작을수록 파워 밀도가 높아지는 것을 알 수 있다. 그리고 집광렌즈의 촛점거리가 작을수록 피워 밀도가 큼을 알 수 있으나 너무 작으면 집광렌즈와 시편의 거리가 짧아서 작업에 어려움이 있다. 이때 광속확대기를 사용하면 발산각을 줄일 수 있으므로 촛점거리가 긴 집광렌즈를 사용하여도 높은 파워밀도를 얻을 수 있다.

그러나 파워밀도를 높이기 위하여 너무 큰 배율의 광속확대기를 사용하면 시편에 집속되는 레이저의 입사각이 커져서 가공에 적절치 않으며, 또한 수십 μm 이하의 섬세한 구멍 가공을 할때는 광속확대기 및 집속렌즈의 수차가 촛점의 크기를 제한한다.

레이저 출력 빔의 발산각도는 레이저 공진기의 구조 즉 거울과 레이저봉 사이의 거리 및 전반사경의 곡률과 관계가 있는데, 고출력 레이저 발진시 Nd : YAG 봉은 열렌즈와 같은 구실을 하게 되어 레이저 공진기 구조를 바꾸는 꼴이 된다[7]. 레이저 봉의 열렌즈 효과는 레이저봉을 냉각수로 냉각시키는 과정에서 레이저봉의 중심과 표면사이의 온도 차이에 의하여 생기는 것으로 이때의 열렌즈 촛점거리(f)는 입력 에너지(Pa)에 반비례 한다[7].

$f=\frac{C}{Pa}$ C : 레이저 봉에 관계되는 상수 (3)

그러므로 레이저의 공진기 구조는 입력 에너지에 따라 변하며 레이저 용접시 같은 공진기 구조라도 입력에 따라 레이저의 특성이 달라지므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

3.2.1. TEMoo 모우드 크기의 계산 및 공진기 설계

본 절에서는 공진기 구조에 따라 레이저의 발산각을 이론적으로 계산하였고 이를 토대로 공진기를 구성하였다. 임의의 공진기 구성에 대하여 공진기 내부에서 TEMoo 모우드의 크기(Wo)는 공진기 이론에 의하여 구해질 수 있다. 곡률반경이 무한대인 출력경에서 TEMoo 모우드 크기와 multi mode의 발산각 θ_m은 다음의 관계에 있다[8].

$\theta_m=\frac{D}{\pi Wo^2}$: 파장, D : 레이저봉 직경 (4)

그러므로 윗식에서 Wo의 크기를 알면 레이저의 발산각을 알 수 있다.

Fig. 2의 y축은 레이저봉과 출력경 및 전반사경과의 거리가 13cm, 33cm이고 볼록 전반사경의 곡률이 30 cm, 100cm, ∞일때 출력경과(그래프 a, b, c) 전반사경(그래프 A, B, C)에서 TEMoo 모우드의 크기를 나타낸다. 출력경의 곡률은 ∞의 것을 사용하였고 전반사경의 곡률은 볼록거울을 사용하였는데(이하 모든 전반사경의 곡률은 볼록거울을 의미함), A와 a는 30 cm, B와 b는 100cm, C와 c는 ∞의 곡률반경을 사용할때 TEMoo 모우드 크기를 나타낸다. x축은 열렌즈 촛점거리를 나타내는데, 식3에 의하여 1/f는 입력에 비례하므로 그림의 x축은 입력에 해당되며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

첫째로, 그림에서 점선 밖의 두 부분은(곡률이 30 cm인 경우) 불안정 공진기 영역에서 레이저가 발진하지 않으며, 이러한 영역은 곡률이 작을수록 좁게 나타난다. 그러므로 넓은 영역의 출력 범위에서 레이저 발진이 일어나기 위하여 곡률이 큰 전반사경이 필요하다.

둘째로, 식4에 의하면, 전반사경의 곡률이 작을수록 출력경에서(그래프 a, b, c) TEMoo 모우드의 크기가 커지므로 발산각이 작아진다.

셋째로, 전반사경의 곡률에 관계없이 전반사경에서의 TEMoo 모우드 크기(그래프 A, B, C)는 입력 에너지가 커질수록 감소함을 알 수 있다.

그러므로 높은 출력의 파워 밀도가 전반사경에서 커져 거울의 훼손이 생기므로 설계시 이를 고려해야 한다.

넷째로, 전반사경과 레이저봉의 거리를 바꾸고 공진기 내부의 TEMoo 모우드 크기를 계산하면, 전반사경과 레이저봉의 거리가 짧을수록 안정 공진기가 되는 영역이 우측으로 이동한다.

즉 전반사경과 레이저봉의 거리가 짧을수록 높은 입력에서도 레이저가 발진한다.

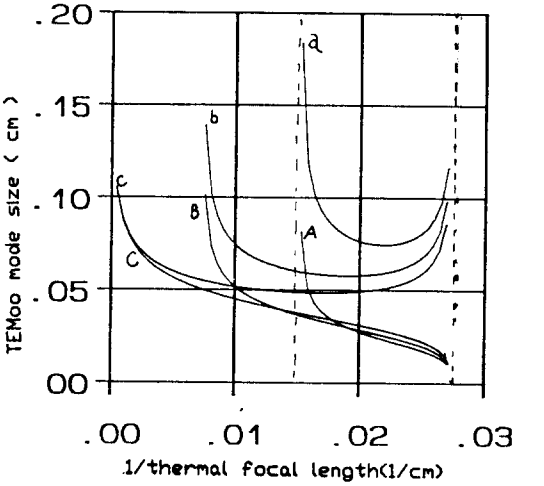

Fig. 2 Calculated TEMoo mode size vs. inverse thermal focal length for different rear mirror radius.
(A,a=30cm ; B,b=100cm ; C,c=∞)

그러므로 단일 펄스의 저입력에서 높은 입력까지 광범위한 영역에서 레어저를 동작시킬때는 곡률이 무한대인 평면 앞거울과 평면 전반사경이 이용되며 고출력의 영역에서만 레이저를 동작시킬 경우 곡률이 있는 전반사경을 사용함이 유리하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 가공의 용도에 따라 전반사경의 곡률반경과 위치를 조절하여 TEMoo 모우드의 효율을 상대적으로 조절할 수 있도록 하였으며 이에 따른 출력 빔의 발산각과 레이저 출력을 변화시킬 수 있도록 하였다.

3.2.2. 공진기 구조에 따른 레이저의 출력특성

본 연구에서 개발한 레이저 용접기에는 용접을 수행하면서 수시로 레이저 출력상태를 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 광수신 다이오드를 설치하였다. Fig. 4

는 레이저봉의 열렌즈 효과를 보정하기 위하여 볼록거울을 전반사경으로 사용할때 전형적으로 나타나는 파형이다. 이 그림은 섬광등의 펌핑 에너지가 레이저봉에 전달되는 초기 상태에서 부터 레이저 출력이 어떻게 변화 하는가를 보여 주고 있다. 펌핑 초기 상태에서는 레이저 공진기 자체가 불안정 공진기 구조를 하고 있으므로 레이저 출력이 작다. 레어저봉의 열렌즈 효과가 진행됨에 따라 레이저 공진조건은 안정영역으로 이동하므로 레이저 출력이 정상 상태에 도달하고 있는것을 보여주고 있다.

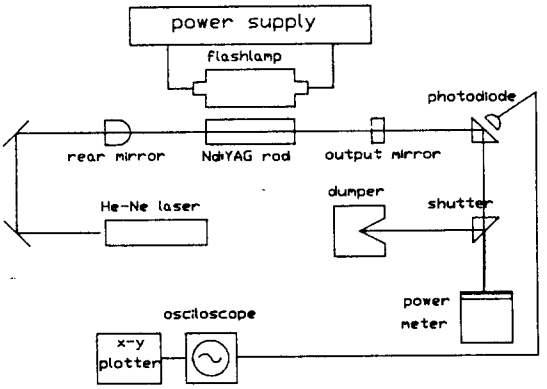

Fig. 3 Schematic diagram of experimental set up for detecting laser output

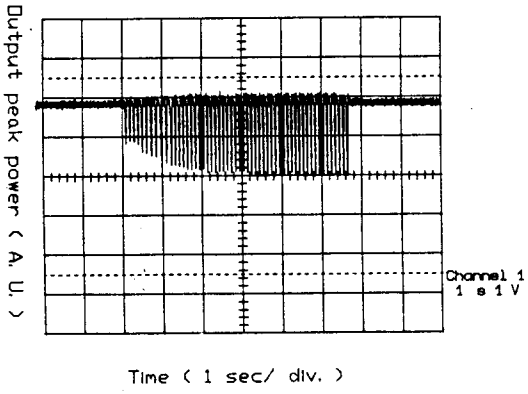

Fig. 4 Laser output from a time dependent thermal lensing rod.

Fig. 5는 전반사경의 곡률반경이 무한대와 30cm 되는것을 레이저봉으로 부터 약 33cm 떨어진 곳에 위치시키고 입력 에너지를 변화시키면서 평균 출력을 측정한 것이다. 이 실험에서 알 수 있는것은 다음과 같다.

첫째로, 전반사경의 곡률에 관계없이 어느 한계 이상의 입력에서는 입력이 증가할 수록 레이저의 출력이 감소된다. 이것은 식 3에서 알 수 있듯이 입력 에너지가 증가하면 열렌즈 효과에 의하여 레이저봉의 촛점거리가 짧아지고 또 Fig. 2에 의하여 레이저 공진기가 불안정 영역으로 되기 때문이다.

둘째로, 전반사경의 곡률이 무한대 일때, 레이저 출력은 적은 입력 에너지에서 최고 출력이 되는 입력까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 반면에 전반사경의 곡률이 30cm인 경우 2.5kM 까지의 입력에서는 레이저 출력이 거의 없다가 3kW 이상의 입력에서부터 레이저가 발진함을 알 수 있다. 이러한 것은 Fig. 2에서 알 수 있듯이 전반사경의 곡률이 짧아 짐에 따라 안정영역이 되는 입력 에너지의 범위가 좁아지기 때문이다.

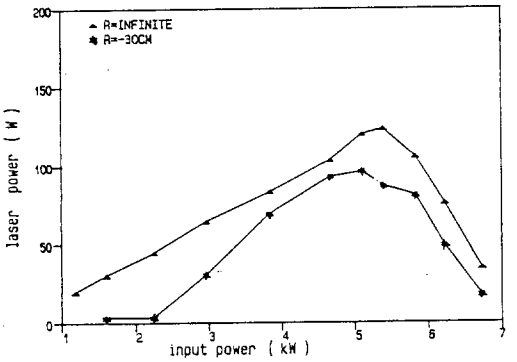

Fig. 5 Laser output variations vs. curvature of rear mirror.

셋째로, 전반사경의 곡률이 작은 것이 레이저의 출력이 적다. 그러나 같은 출력 이더라도 Fig. 2에 의하면 전반사경의 곡률반경이 작은 30cm의 경우가 무한대보다 TEMoo 모우드의 크기가 크므로 발산각이 적을 것으로 예상할 수 있다. 실제로 Fig. 6에 의하면 전반사경의 곡률이 30cm인 경우가 무한대인 경우보다 발산각이 적음을 알 수 있다. 이러한 것은 Fig. 2와 식 4에 의하여 잘 설명된다. 즉 Fig. 2에서 곡률이 30cm인 전반사경을 공진기에 사용할 경우 TEMoo 모우드 크기가 곡률이 무한대인 전반사경을 사용할 때보다 커지므로 식 4에 의하여 발산각이 줄어듬을 알 수 있다. 즉 Fig. 5, 6과 식 2에 의하면 4.5kW 정도의 입력에서 파워 밀도는 9배 까지 클 수 있음을 알 수 있다.

넷째로, Fig. 2의 넷째 결과에서 살폈듯이, 레이저봉과 전반사경의 거리가 짧아질수록 불안정 공진기가 되는 입력 에너지의 크기가 커짐을 알 수 있었다. Fig. 7은 레이저봉과 출력경 및 전반사경과의 거리를

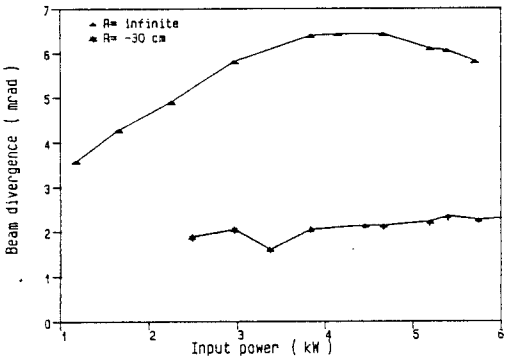

Fig. 6 Laser beam divergence vs. rear mirror curvature

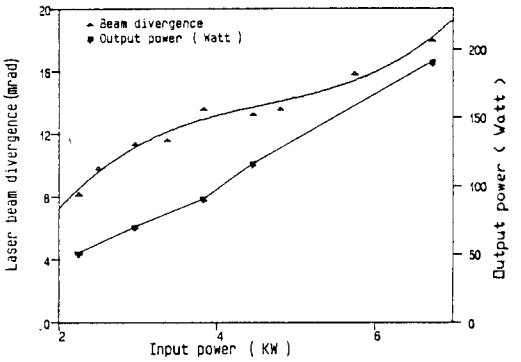

Fig. 7 Laser beam divergence and laser output vs. input power.

13cm로 각각 할때 레이저 출력과 발산각을 나타낸 것이다. 전반사경과 레이저봉의 거리를 짧게 하였을때는 7kW 까지 입력이 가능하였으며, 이때 최대 평균출력 200W에서 발산각 13mard 정도의 레이저를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 실제 용접시 발산각이 어떠한 변수로 작용하는가를 알아보기 위하여 Al 재료면에 레이저를 조사시켜 그 용입 상태를 알아 보았다. 레이저의 출력 모우드 상태에 따른 용입 상태를 알아보기 위하여 레이저의 발산각이 큰 경우와 레이저의 발산각이 작은 경우에 대하여 용입 상태를 관찰하였다. 전자의 경우 Fig. 2에 의하여 레이저 봉에서 거울까지 거리 L1, L2를 L1=L2=13cm로 하고 전사경의 곡률을 무한대로 하여 레이저 발산각을 크게 하였고(A), 후자의 경우 거울 사이의 거리는 같으나 전반사경의 곡률을 100 cm로 하여 레이저 발산각을 줄였다(B). 그리고 2가지 경우 모두 레이저 첨두출력이 같도록 입력 에너지의 전압을 조절하였다. Photo. 2는 이러한 공진기 상태에서 용입상태를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용입은 A가 B보다 더 작음을 알 수 있으며 용입의 기하학적인 형태도 다름을 알 수 있다. A의 경우는 원뿔형의 완만한 용입을 보이나, B의 경운 원주형에 가까우며 aspect ratio가 큰 용입을 보여준다. 이것은 식 2에서 알 수 있듯이, B의 경우 A보다 발산각이 작아서 A1 표면에서 파워 밀도가 크기 때문이다. 그러나 B와 같이 원주형에 가까운 aspect ratio가 큰 용입의 경우 균열 발생이 용이함을 알 수 있었다. 그러므로 레이저 용접에서 중요한 변수로 작용하는 파워 밀도는 재료의 종류에 따라 적절히 조절해야 하며, 이를 위하여 레이저의 출력과 발산각을 적절히 조절할 수 있어야 한다.

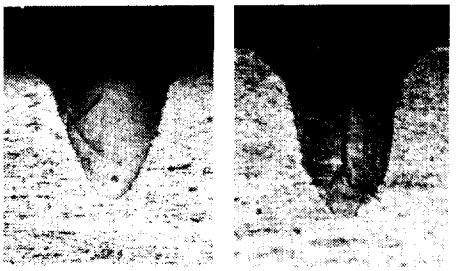

Photo. 2 Laser welded cross sections; (A) R=∞ : (B) R=100cm
A : 전반사경의 곡률이 무한
B : 전반사경의 곡률이 100cm

3.3. 전원장치 및 출력제어부의 설계

레이저 발진을 위한 전기적 장치는 전원을 공급하는 장치와 이를 제어하는 장치로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 레이저 용접에 필요한 다양한 레이저의 출력 특성을 얻기 위하여 이들을 설계하였다. 먼저 용접에 필요한 레이저 출력과 이때 요구되는 전원장치 및 제어부의 용량에 대하여 알아 보기로 한다. 먼저 첨두출력에 관하여 살펴보면 Fig. 1에서 알 수 있듯이 레이저 용접은 0.1-10MW/cm² 정도의 파워 밀도가 필요하다. 만약 3배의 광속확대기를 사용하고 촛점거리가 100mm인 집광렌즈로 발산각이 15mrad인 레이저를 집광한다면 촛점면에서 촛점의 직경이 500μm 정도 된다. 이때 용접에 필요한 최대 파워 밀도를 얻기 위해 필요한 첨두출력은 3kW 정도이면 된다. 그리고 전기적 입력 에너지에 대한 Nd : YAG 레이저의 효율

이 3% 이라면[9] 전원장치에서 섬광등에 공급해야하는 파워는 100KW 정도가 되어야 함을 알 수 있다. 그리고 레이저 용접 속도에 영향을 미치는 평균 출력이 200W 일때 3%의 효율에서 평균 입력되는 파워도 7 KW 정도 되어야 한다. 또한 레이저 용접에서 필요한 펄스폭은 재료의 종류에 따라 식 1과 같이 다르나 수 msec 정도에서 다양한 펄스폭이 필요함을 알 수 있으며 펄스당 에너지를 적절히 제어하기 위하여 이러한 펄스폭을 제어할 수 있어야 한다.

이런 다양한 조건을 만족시키기 위하여 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 전원장치 및 제어부를 구성하였다.

즉 capacitor 탱크에 저장된 전기 에너지를 GTO(Gate Turn Off) 스위치를 통하여 원하는 펄스폭만큼 전기 에너지를 섬광등에 공급하도록 하였다. 이러한 GTO에 의한 펄스 에너지 공급장치는 1980년대 이후 GTO가 실용화 되면서 가능해졌는데 종래의 LC 회로에서 발생하는 펄스폭 가변의 어려움, 방전효율의 저하, 역전류에 의한 capacitor 손상등의 단점 보완이 가능하였다.

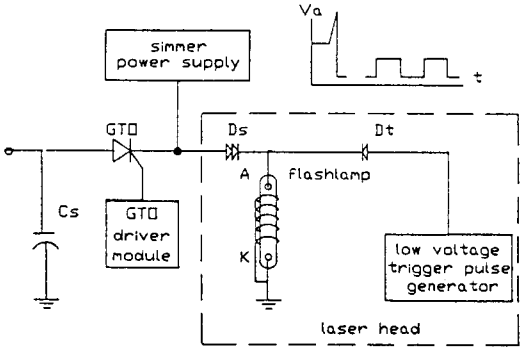

Fig. 8 Electrical system of a pulsed Nd: YAG laser.

이러한 장치는 충전전압의 3승에 비례하는 첨두출력을[10] 가변할 수 있도록 함으로써 가공용도에 따라 첨두출력을 조절하여 파워밀도를 자유롭게 조절할 수 있게 하였다. 그리고 GTO 스위치의 개폐에 의하여 펄스폭, 반복률, 펄스당 에너지 등을 조절할 수 있게 하였다.

Fig. 9는 이러한 방법으로 레이저 펄스폭을 제어할 때 나타나는 전류의 출력 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 전류 펄스의 처음 부분과 끝 부분의 차이가 거의 없음을 알 수 있으며 펄스폭과 반복률도 정확하게 제어됨을 알 수 있다.

이러한 전원 장치에서 사용된 축전지와 GTO 및 충전 장치의 용량은 다음과 같다(Table 1). 먼저 충전용 축전지는 가격이 저렴한 450V, 2400uF 전해 콘덴서를 병열로 연결하여 사용하였으며 400V에서 약 5000J를 저장하게되어 펄스당 500J를 방전시 1/10만 보충하면 되도록 하였다. 그리고 레이저 발진시 섬광등의 임피던스가 1Ω 정도이므로 3.5kW 정도의 첨두출력을 얻기 위해서 400V 정도의 동작전압에 300A 정도의 전류를 GTO 스위치가 제어할 수 있도록 하였다. 최고 동작전압이 400V로 낮은 상태에서 많은 평균 출력을 내기 위해 충전장치는 대용량을 처리할 수 있는 3상 SCR 위상 제어 방식의 정전압/정전류 형태로 7kW 까지 에너지 공급이 가능하다.

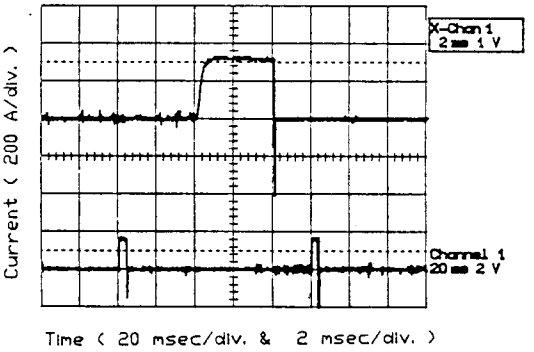

Fig. 9 A typical waveform of current output. (10Hz, 4msec)

Table 1 Specification of Nd: YAG laser

항 목	내 용
최대 평균출력	> 200W
최대 첨두출력	> 3.5kW
최대 pulse 에너지	50J/pulse
Pulse width	0.1-20msec
최대 펄스반복율	300pps

Fig. 4에서 알 수 있듯이 반복적인 펌핑에서 초기의 레이저 출력은 레이저 봉의 thermal lensing 효과가 안정상태로 될때까지 불안정한 출력 파형을 보이므로 볼 설계에서는 안정된 상태의 레이저만을 이용하기 위하여 동작 시간이 20msec인 solenoid shutter를 설치하여 불안정된 초기 레이저를 dumper로 보낼 수 있도록 하였다. 이러한 shutter는 microprocess에 의한 구동으로 자동화가 용이하도록 하였으며 CNC와 연계하여 복잡한 모양의 용접도 가능하도록 하였다.

4. 결론 및 향후 연구과제

레이저 용접용 고출력 Nd : YAG 레이저를 자체 설계하여 개발하였으며, 200W 이상의 평균출력, 3.5 KW급의 첨두출력 및 상용 레이저(최고 출력에서 10 mrad 이상)와 비슷한 13mard(full angle)이하의 발산각이 적은 레이저를 얻을 수 있었다.

한편 제작된 레이저 용접기를 이용하여 핵연료 집합체의 Zr-4지지격자, 여러 가지 이종금속, Al, SUS 304, 열전대 등에 대한 용접실험을 수행하여 좋은 용접특성을 얻었으며, 약 2년동안의 사용 결과 높은 내구성을 보여주고 있다.

현재 경제성 분석을 통한 다양한 레이저 용접기 모델을 선정하여 국내 업체와 기술이전을 통한 레이저 가공기의 국산화 개발이 모색되고 있으며, 앞으로 세계적인 추세에 비추어 볼 때 레이저의 고출력화, 광섬유를 통한 레이저 가공기술, 레이저 파형의 실시간 제어를 통한 가공 물질과 레이저의 작용을 최적화한 첨단 레이저 가공기술 등에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

참고문헌

1) G. Sepold: Pulsed solid state lasers for welding metals, Welding research abroad, Vol. 31, No. 3, (1985), pp. 30-31
2) Kikuo Ujihara: Reflectivity of metals at high temperature, J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 5, (1972), pp. 2376-2383
3) N.G. Basov: Physico-technological special features of laser welding in continuous and pulsed-periodic regimes, Welding research abroad, Vol. 32, No. 10, (1986), pp. 39-41
4) L.R. Hettche, T.R. Tucker: Mechanical response and thermal coupling of metallic targets to high-intensity 1.06 um laser radiation, J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 4, (1976), pp. 1415-1421
5) M. Montarini, J. Steffen: Investigations on laser welding, IEEE J. Quantum Electronics, QE-12, No. 2, (1976), pp. 126-129
6) J.G. Freeman, J. Leece, D.R. Martyr: The development of a modular multikilowatt CO_2 laser width user-selectable beam modes, SPIE Vol. 1020, (1988), pp. 32-36
7) W. Koechner : Solid-State Laser Engineering , Spring-Verlag, N. Y., 1976, pp. 355
8) D.R. Whitehouse: Mode control technology for high performance solid state lasers, Report TR ECOM-0269-F, US Army Electr. command, Fort Monmouth, N.Y. (1973)
9) W. Koechner : Solid-State Laser Engineering , Spring-Verlag, N.Y., 1976, pp. 24
10) ILC Tech. Bull. No1: Introduction to Flash tobes