

산업용 고출력 YAG 레이저 발생장치의 개발과 응용

(Development & Applications of the Industrial High Power YAG Laser)

글/(주)한빛레이저 김정묵 대표

서론

고출력 레이저의 산업적 활용에는 대부분 CO₂ 레이저와 YAG 레이저가 담당하였으며 평균출력 kW급 고출력 YAG 레이저가 출현함으로써 가공시장에서 YAG 레이저의 활용이 증대되고 있다. 이는 YAG 레이저의 파장 특성이 금속 가공에 유리하고 CO₂ 레이저와는 달리 광섬유로 원거리 전송이 가능하므로 로봇과 결합하여 준 비선형 및 비선형 가공물의 가공성을 향상시킬 수 있기 때문이다.

시장규모 면에서 볼 때 레이저 자체 시장규모는 그다지 크지 않으나, 현재 우리나라의 주력 산업인 반도체, 전기·전자산업, 자동차산업, 정밀기계산업, 원자력산업, 조선산업 등의 고부가가치 산업에서 레이저는 다양하게 사용되고 있으며, 필요수량의 대부분이 수입된 설비들이다.

산업용 레이저 관련기술개발에서 중요한 3가지 요소는 레이저 발전기기술, 자동화와 주변기술 및 가공기술이다. 이 중에서 레이저의 근본기술인 발전기 기술은 일부 선진국의 전유 기술이었으나 현재는 국내의 대학 및 연구소를 포함한 일부 기업에서 발전기 기술개발에 힘쓰고 있으며, 또한 레이저 발전기 개발은 자동화 기술과 접목되어 레이저 절단이나 용접 등의 가공기술 개발에도 직접적인 기여를 하여 고부

가가치 산업 창출에 크게 기여할 기술이다. 고출력 레이저 개발경향은 고전적인 램프 여기방식과 다이오드 여기방식으로 나눌 수 있으며 고출력, 고효율화를 목표로 기술개발이 이루어지고 있다.

레이저 발생장치의 제작

1. 고출력용 레이저 전원장치 개발

Arclamp 전원장치는 크게 trigger 회로, booster 회로, 주전력 회로로 구성되는데, 본 개발에서는 보편적으로 사용되는 series injection 방식의 triggering 회로를 사용하였다. 이 방식의 특징은 transformer를 사용하여 램프 전원회로에 직렬로 고전압의 triggering pulse를 인가한다.

길이 150mm, 구경 지름 8mm인 arclamp 기준일 때 booster 전원의 개방회로전압은 900 VDC 이상이 필요하므로 +1,100 VDC로 설계하였으며, booster 전원의 안정성을 고려하여 폐회로전류는 600 mA 정도로 설정하였다. 주전력회로는 전력용 capacitor에 충전된 전기를 고속 IGBT 스위칭 소자에 step down 시키는 방식의 SMPS 구조로 되어있다.

2. 목표효율 5% 이상의 공진기 개발

고출력 YAG 레이저에 사용된 레이저 헤드는 dual-lamp형으로 구성되었으며, 세라믹 반사체를 사용하였다. 출력과 빔의 질에 가장 큰 영향을 미치는 레이저 발진봉은 램프 및 반사체 재질과 구조, 가격요소 등을 고려하여 $\phi 7 \times 162\text{mm}$ 의 크기를 사용하였다.

다음의 그림1은 단일 공진기모듈을 사용하여 입·출력 및 효율 특성을 측정된 특성곡선이다. 이 때 사용한 레이저 발진봉은 $\phi 7 \times 162\text{mm}$, 0.6% Nd+ 이온 도핑농도를 가졌으며 발진봉의 끝단 평행도는 10arc 초 이내이다. 양면 끝단은 곡률이 500mm로 오목하게 가공되어 레이저 발진 중 발진봉에서 발생하는 열렌즈 현상을 보상할 수 있는 구조를 이루고 있다.

단위 공진기 모듈은 램프의 입력전력이 12.8 kW에서 667 W의 출력을 나타내어 5.2%에 해당하는 효율을 나타내었으며, 11.5 kW의 램프 입력 전력에서부터 효율이 포화되는 특성을 보였다.

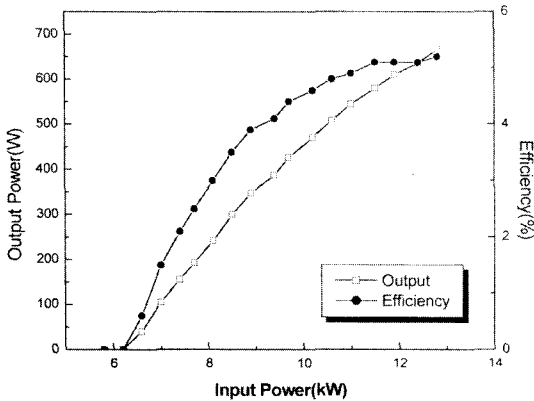


그림1. 단위 공진기 모듈의 입·출력 및 효율 특성곡선

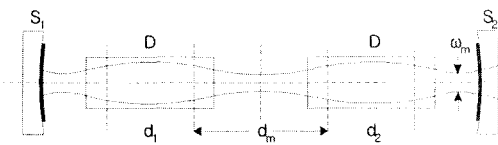


그림2. 두 개의 레이저 발진봉을 가진 공진기 구조

3. 다단공진기 개발

그림 2처럼 두 개의 레이저 발진봉을 가진 공진기를 등가로 표현하기 위해서는 S^2 미러를 기준면으로 하여 single-pass matrix를 구하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/\rho_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/\rho_1 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ρ_1 은 rm S_1 의 곡률 반경, d_1 은 레이저 발진봉의 주요면에서 미러 S_1 사이의 거리, d_m 은 레이저 발진봉 1과 2의 주요면 사이의 거리, 그리고 D 는 하나의 레이저 발진봉이 가지는 refractive power를 나타낸다.

대칭 구조를 가진 공진기 시스템은 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $d_1 = d_2 = d$ 의 관계를 가지며, 곡률이 없는 미러들을 사용하여 구성한 plain-plain 대칭 공진기 구조에서는 $d_1 = d_2 = d_m/2 = L/4$ 의 위치에 두 개의 레이저 발진봉이 위치할 경우 refractive power D 에 대한 beam parameter product의 의존성은 하나의 레이저 발진봉을 사용한 경우와 동일하나 길이가 절반이다. 즉, 출력범위는 하나의 레이저 발진봉을 사용했을 때보다 두 배가된다.

다음의 그림 3은 2단 발진 plain-plain 공진기로 구성된 CW 레이저의 램프 입력전력 증가에 따른 출력 및 효율 변화를 나타낸 것이다. 최대출력은 21.6kW의 램프 입력전력에 대해 1.03kW의 출력을 나타내었으며, 이때의 입·출력 변환효율은 4.8%에 달해 단일 공진기 모듈의 입·출력 변환율에 비하여 0.4% 떨어지는 특성을 나타내었다.

그림 4는 2단 발진 plain-plain 공진기의 램프 입력전력 증가에 따른 beam quality factor(M_2)의 거동을 나타낸 것이다.

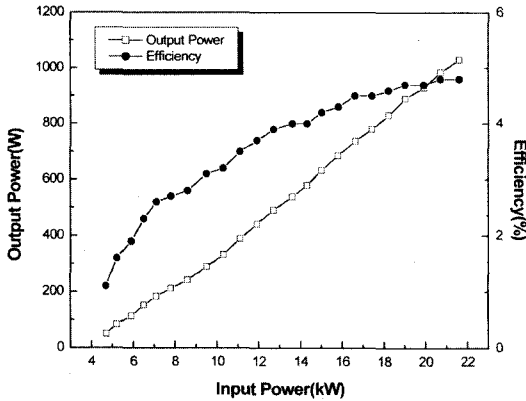


그림 3. 2단 발진 레이저의 입·출력 및 효율 특성곡선

M_2 의 측정을 위해서 구면수차를 최소가 되도록 설계한 doublet lens를 사용하였으며, lens에 입사되는 빔은 knife edge 측정법을 이용하여 출력에 따른 유효구경의 크기를 측정하였다. Lens의 초점거리에서 형성되는 최소 초점의 크기는 CCD IR camera와 빔의 단면 윤곽을 측정할 수 있는 beam-view analyzer(Coherent사)를 사용하여, 첨두출력의 $1/e^2$ 되는 지점에서의 폭을 초점크기로 정하였다.

결과적으로 1kW의 레이저 출력에서 M^2 는 40 이하의 값으로 나타났으며, 측정된 출력범위는 1kW에서 500W까지로 범위가 한정되었는데 이는 측정시 적용된 빔 감쇄계 때문에 낮은 출력에

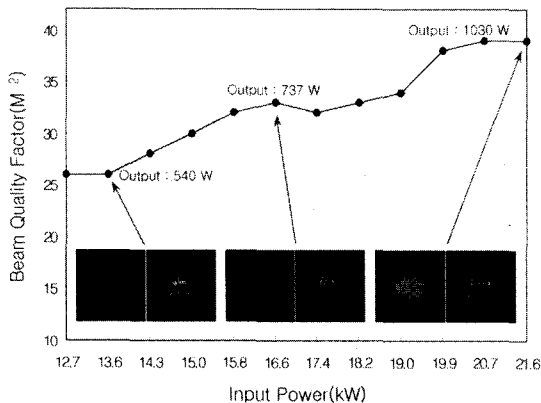


그림 4. 2단 발진 레이저의 입력변화에 따른 빔 특성 변화

서는 신뢰성 있는 data를 구할 수 없기 때문이다.

4. 고출력 YAG 레이저 빔 전송계 개발

발생된 고출력의 YAG 레이저 빔을 광섬유를 통하여 손실 없이 전송하기 위해서는 먼저 전송 특성이 뛰어난 광섬유를 선택해야한다. 또한 전송계의 입사부에서는 고출력의 레이저빔을 광섬유의 core 크기 80% 정도로 집속하여 입사시키게 되므로 광섬유는 높은 damage threshold를 가지고 있어야 한다. 우수한 전송특성은 전송효율 뿐만 아니라 전송 후의 빔 질에도 의존하므로 광섬유는 낮은 구면수차를 가져야 한다.

본 실험에서는 일본의 Mitsubishi-cable industry사의 SI type과 SHOWA Electric wire & Cable사의 QSI type 광섬유를 사용하였다. 제조사의 사양서에 따르면 두 종류 모두 0.17~0.2정도의 numerical aperture를 가지나 core 외층에서 fluorine을 doping한 SHOWA사의 QSI type이 높은 열적 안정성을 가진 것으로 제시되어있다. 일반적으로 사용하는 SI type은 1ms 이하의 폭을 가지는 펄스에 대해 $10^6 W/mm^2$ 의 첨두출력에 대한 damage threshold를 가진다. kW급의 고출력 레이저빔을 전송하기 위해서는 connector의 구조도 달라져야 한다. Connector에 체결하기 위한 광섬유도 열에 가장 약한 buffer층은 충분히 제거되

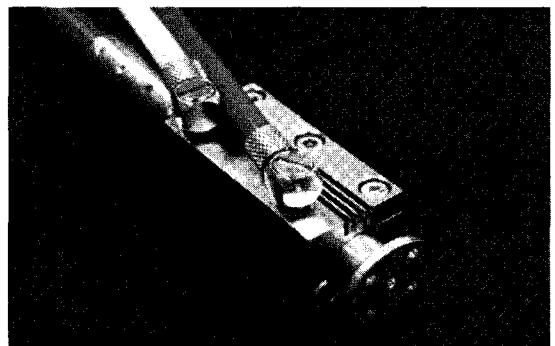


그림 5. 고출력 전송용 Optical Fiber Connector(공냉식, 수냉식 겸용)

어서 kW급 레이저빔의 입사시 열에 의해서 광섬유가 bunt out되는 것을 막아야 한다.

본 실험에서는 kW급 레이저빔을 전송하기 위해 수냉식과 공냉식을 모두 적용할 수 있는 connector를 자체 개발하였으며, 광섬유는 열적 안정성인 높은 SHOWA사의 Fluorine doped QSI type 400 μ m, 600 μ m 광섬유를 사용하여 전송계를 구성하였다(그림 5). 또한 집속된 입사빔이 정확히 광섬유 입사면 core의 중심에 주입될 수 있도록 align용 비전장치를 자체 개발하였다.

2단발전형 레이저에서 발생된 최대 출력 1kW가 400 μ m core 크기 광섬유를 통해 전송 가능한지 검토하기 위해 집속된 초점크기와 beam quality factor M^2 값과의 관계를 이용하여 근사적으로 계산하면 80 이하의 M^2 정도까지는 core 크기의 80%인 320 μ m에 집속할 수 있을 것으로 예상된다.

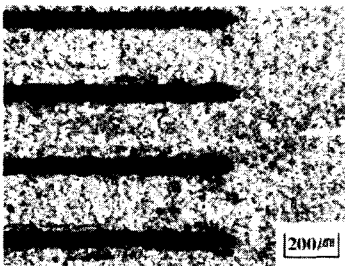
고출력 YAG 레이저의 응용

1. 레이저 절단

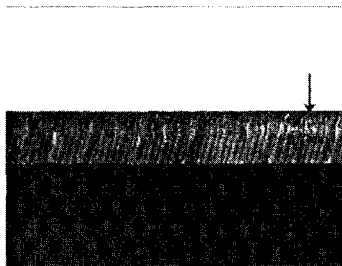
절단은 레이저빔을 렌즈 또는 거울을 이용하여 물체 표면에 미소 초점을 형성, 국부적인 가열로 인한 순간적 용융 또는 증발상태로 만든 다음 이를 보조가스를 이용하여 제거하는 공정이다. 레이저를 이용한 절단과정의 특징은 타 기구로의 가공에서 발생하는 절단기구의 마모현상이 없으며 높은 에너지 밀도를 이용한 고속 절단,

열변형과 조직변화의 감소 등을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 절단면이 가공물 표면에서 거의 수직으로 형성되며, 낮은 표면 거칠기 및 적은 열영향부(HAZ)로 인해 절단후의 후가공을 하지 않아도 되는 이점을 가지고 있다.

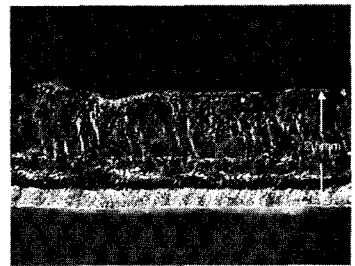
절단에 사용되는 산업용 레이저의 종류는 주로 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 대부분이며, 이러한 레이저의 작동 모드는 펄스방식과 Super 펄스(Q-switched)방식, 그리고 super 펄스방식과 CW방식을 결합한 방식이 사용된다. 펄스방식으로 작동되는 가공은 에너지 유입량과 절단속도를 조화시켜야 하는 경우에 주로 사용이 되며, 첨두출력은 변화시키지 않고 평균출력을 줄여서 속도 변화에 상응하는 레이저 출력 조절이 가능하다. Super 펄스 방식은 평균출력은 낮으나, 높은 첨두출력을 요구하는 가공재료에 사용되는데, 이러한 방식은 열충격으로 인한 미세균열을 방지하고자 할 경우 또는, 스테인레스강의 절단시 용융점이 높은 Cr 산화물 제거 등에 유용하다. 또한 super 펄스와 CW방식을 결합한 레이저는 알루미늄 절단에 효과적이다. 레이저 출력은 최고 절단속도와 절단 두께를 결정하는 중요한 변수이다. 따라서 레이저의 고출력화가 되면 고속절단이 가능해지므로 생산성향상에 기여 할 수 있으며, 가공물의 두께 제약에 대해 좀 더 여유가 생긴다. 다음의 그림 6은 1,064nm 파장의 Nd:YAG 레이저를 사용한 절단가공의 예를 보여주고 있다.



⇒ 재질:SUS ⇒두께:60 μ m
⇒ 절단속도:1000mm/min.



⇒ 재질:아연도금강판 ⇒ 두께:0.7mm
⇒ 보조가스:N₂ ⇒ 절단속도:700mm/min.



⇒ 재질:SUS ⇒ 두께:2.5mm
⇒ 보조가스:Air ⇒ 절단속도:500mm/min.

그림 6. 레이저 절단의 예

2. 레이저 용접

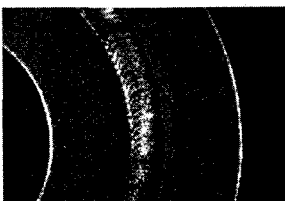
레이저빔이 금속 표면에 조사되는 경우 레이저 에너지의 강도에 따라 금속의 가열, 용융, 증발 및 플라즈마 발생이 일어난다. 레이저빔을 이용한 용접법은 용융 접합 범주에 속한다. 일반적인 아크용접의 경우 아크열이 시편표면에 흡수, 금속을 용융시키면서 내부로 전도되어 이루어지는 전도용접(conduction welding)의 형태를 가지고 있으나, 고밀도 에너지빔에 의한 용접은 빔에너지가 열에너지로 변환되어 용융금속 내에 keyhole 형성에 의한 심용입 용접(deep-penetration welding)이다. 레이저 용접기술은 고품질 및 고능률의 고밀도 에너지 접합으로서 국내에도 자동차 등의 제조라인에 도입돼 성공적인 결과를 가져오고 있다. 이에 따라 기존의 금속절단기가 주종을 이루던 레이저 응용분야는 용접 및 열처리 분야로 시장확대가 기대되고 있다. 현재 전자, 전기부품, 자동차, 차량부품, OA기기 등 작은 부품의 대량생산현장에 적극적으로 도입되고 있어 그 효율을 인정받고 있다. 이는 레이저 용접이 라인 도입시 초기 투자 비용이 많다는 단점을 제외하면, 소품종의 대량생산체제에 적합

하고 용접품질 및 경제성이 뛰어나기 때문이며, 대량생산시 비용절감 효과가 크기 때문이다. 또한 레이저장비의 고출력화가 되면서 기존의 용접법으로 행해지고 있는 상당부분에서 레이저 용접이 검토되고 있다. 특히 자동차 산업에서 레이저 용접이 각광을 얻고 있는데, 이는 연료계통, 엔진, 동력 전달시스템 등에서 빠른 용접속도로 용접을 수행할 수 있으며 용접 후 용접변형이 거의 없다는 장점을 가지고 있기 때문이다. 아래의 그림 7은 Nd:YAG 레이저를 이용하여 가공한 시편들의 예이다.

결론

kW급 산업용 레이저 발생장치의 개발에 성공함으로써 레이저 산업분야에서 국내의 기술 자립도를 높이고 큰 기술파급효과를 기대할 수 있는 발판을 마련하였다. 현재 고출력 레이저 발생장치 개발과제는 절단 가공기 제조업체와의 긴밀한 정보공유 등의 연계성을 유지하여 다양한 제품 개발이 모색되고 있다. 또한 가공시장분야도 우리나라의 주력산업분야를 포함하여 알루미늄 가공과 같은 특수가공분야로 까지 확대될 수 있다.

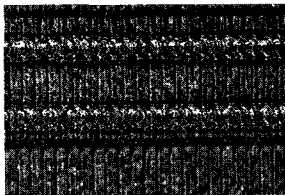
정부의 지원 하에 지속적으로 이루어지는 산·학·연 공동의 연구개발 및 기술공유를 통해서 더욱 개선된 성능의 제품출시와 가공기술 확보로, 외국제품에 많이 밀려있는 레이저발생장치 및 레이저가공기 산업에서 주도적 입지를 구축할 수 있을 것으로 기대한다.



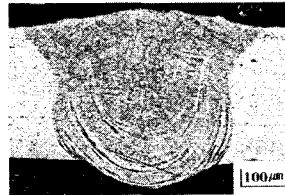
Pulsed Nd:YAG Laser welding
⇒ 재료:연강&압연강 ⇒ 용입깊이: 0.6mm ↑



Pulsed Nd:YAG Laser welding
⇒ 재료: CU



Pulsed Nd:YAG Laser welding
⇒ 재료:규소강판 ⇒ 용입깊이: 0.7mm ↑



CW Nd:YAG Laser welding
⇒ 재료:SUS ⇒ 용입깊이: 0.5mm ↑

그림 7. 레이저 용접의 예