

용접용 Nd:YAG 레이저의 개발과 응용

Development of an Industrial Nd:YAG Laser and its Applications

김광석, 김수성, 김정복, 정진만, 김철중, 이종민

한국 에너지연구소

ABSTRACT

A 150 W industrial Nd:YAG laser was developed. The thermal lensing effect was examined and the radius and position of rear mirror were optimized for higher efficiency. The efficiency of 2.5 % was achieved. Also, the performance of laser welding in fine thermocouples and between high-temperature-melting dissimilar metals were investigated.

I. 서론

1960년대 초반 레이저 발명 이후 레이저는 여러 분야로 그 응용 범위를 넓혀 왔으며 오늘날 산업분야에서 marking, 절단 및 용접등에 널리 이용되고 있다. 그중 레이저 용접은 여러 가지 장점으로 인하여 많은 관심이 모아져 왔다. 레이저 용접은 국부적인 부분을 순간적으로 가열하여 용접하므로 용접중 열변형이 적고 용융점이 높은 금속이나 이종 금속들간의 용접이 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 현재 상용화되어 있는 가공용 레이저중 중간 크기의 출력(약150 W)을 갖는 용접용 레이저를 국내에서 제작하였으며 고효율 레이저 개발에서 문제가 되는 Nd:YAG 봉의 thermal lensing

이 발표논문은 과학 기술처 레이저 및 광기술 분야의 특정 연구 과제와 관련 입니다.

효과를 분석, 보정하여 레이저 공진기 설계에 반영 하였다. 그리고 설계하여 제작된 레이저의 출력 특성을 이론치와 비교 하였으며, 몇가지 이종금속에 대한 용접 및 열전대 용접 실험을 하였다. 그림 1 은 용접중인 레이저 장치를 보여준다.



그림 1 제작된 레이저 용접기로 용접하는 장면

II. 본론

1. Thermal lensing 효과와 공진기 mode 변화

Flashlamp 에 의하여 에너지를 공급 받은 레이저 봉은 에너지의 대부분이 열로 변화되므로 냉각이 필요 하게 된다. 냉각된 레이저 봉은 중심부와 표면의 온도 차이에 의하여 굴절률이 변화하며 이로부터 기인하는 thermal lensing 효과에 의한 초점거리 f 는 아래와 같다.[1]

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

여기에서 dn/dT 는 굴절률의 온도 변화 계수이고 K 는 Nd:YAG 레이저봉의 열 전도도, A 는 레이저봉의

단면적,  $P_a$  는 단위 시간당 레이저봉에 흡수된 에너지이다. 이러한 thermal lensing 효과는 레이저 입력 범위를 결정하므로 [2] 공진기 구성에 있어서 레이저 공진 거울의 곡률 반경과 상대적인 거리를

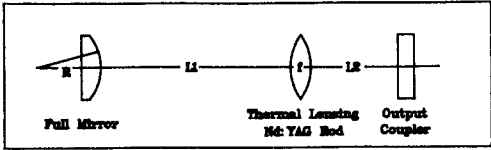
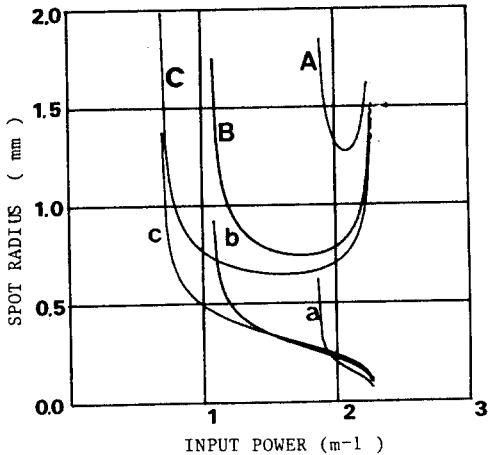


그림 2 Thermal lensing 효과를 고려한

레이저 공진기

제한하게 된다. 공진기 구성은 그림 2 와 같이 전반사경은 thermal lensing 효과를 보정하여 주기 위하여 볼록 거울을 사용하였고 출력경은 광학계 정렬의 편리함과 다양한 종류의 반사율을 확보할 수 있는 평면거울을 사용하였다. 이때 레이저 발진이 가능한 안정 공진기 ( stable resonator ) 를 구성하는 레이저 봉의 초점 거리는



A, a: -0.1M B, b: -0.5M C, c: -1M radius

그림 3 레이저봉의 초점거리 변화에 따른 공진 거울에서의 spot radius 변화

$$L1 < f < R + L1 \quad (2)$$

이므로 (1) 식을 참고하여 보면  $(R+L1) / L1$  은 이론적으로 발진 가능한 최대 입력과 최소 입력의

비율임을 알 수 있다. 그림 3 은 레이저 입력이 변화 할때 공진기 내부에서 TEM<sub>00</sub> 모드의 전반사경 (A,B,C) 과 출력경 (a,b,c) 에서의 spot 크기 이며 출력경과 레이저 봉에서의 spot 크기는 거의 같다. 따라서 레이저봉의 직경이 D 일때 multimode beam 확산각  $\theta_m$  은 다음과 같은 관계가 있다.[3]

$$\theta_m = wD / \pi W_0^2 \quad (3)$$

여기에서 w 는 레이저 파장,  $W_0$  는 출력경에서의 TEM<sub>00</sub> 모드의 spot radius 이다. 그림 3 에서 레이저 봉의 크기는 1/4"x6" 이고 L1 은 약 40 cm, L2 는 16 cm, 전반사경의 곡률 반경은 (A,a) (B,b) (C,c) 각각 -1m, -0.5 m, -0.1 m 이다. (3) 식을 참조하여 그림 3 을 분석 하여 보면 곡률반경이 작을때에는 입력 범위는 작으나 레이저 beam 의 확산각은 작아진다. 곡률반경이 클때는 반대의 현상이 나타나게 되어 가공목적에 따라 곡률반경을 결정 해야 한다.

### 2. Nd:YAG 레이저 출력 실험

레이저 출력 실험 장치는 그림 4 와 같다. 레이저 봉의 크기는 1/4" x 6" 이고 flashlamp 는 bore 구경이 7 mm 길이가 6" 인 Kr lamp 이다. 출력경과 전반사경은 1" 크기로 전반사경의 곡률은 -0.1m, -0.3 m, -0.5m, -1m 등으로 바꾸어 주었다. Pumping reflector의 면은 길이가 6" 인 타원형 금도금으로 되어 있다. 레이저 출력은 EG&G 의 YAG

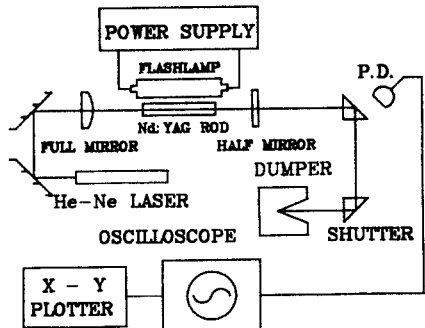


그림 4 레이저 출력 측정 실험 장치도

100 photodiode 로 측정 하였으며 Sciencetech 380401 power meter 로 calibration 하였다. 그림 5 는 pumping 에너지가 레이저 붐에 전달되는 초기 상태에서 부터 레이저 출력을 시간 변화에 따라 측정 한 것이다. 에너지 입력 초기 상태에서는 불안정 공진기 영역이므로 레이저 출력 에너지가 매우 작음을 알 수 있는데 전반사경의 곡률반경을 크게하면 이 초기출력 에너지는 커지는 것을 측정 하였다. Thermal lensing 이 진행됨에 따라 레이저 공진기

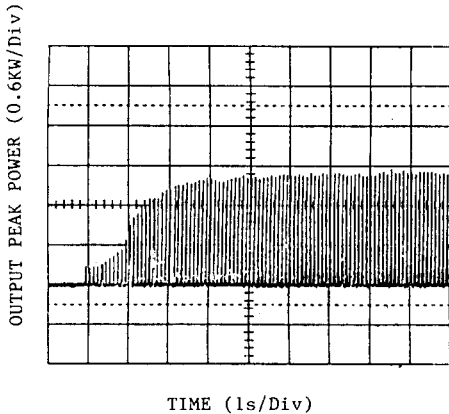


그림 5 Thermal lensing 변화에 따른 출력의 시간적인 변화

R: - 0.3M, L1: 40cm, L2: 16cm  
Input : 4.5 KW

조건은 안정 공진기 영역으로 이동하므로 레이저 출력이 정상 상태에 도달하며 thermal lensing 의 rise time 은 입력이 많수록 짧아진다. 따라서 이러한 공진기 구조에서는 레이저 출력을 차단하는 shutter 가 필수적 임을 알 수 있다. 레이저 발진이 시작된 바로 다음 출력이 작아지는 부분이 순간적으로 있는데 이는 pumping 초기에 발생하는 negative lensing 효과 때문인 것으로 생각 된다.

그림 6 은 전반사경의 곡률을 바꾸어 가면서 측정 한 레이저 출력 효율의 변화를 나타낸 것이다. 앞의 그림 3 에서 볼 수 있듯이 곡률반경이 작을수록 입력범위가 좁고 최대효율을 나타 내는 최적 입력이

높은쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 곡률반경이 클때에는 최대효율을 나타내는 입력범위가 넓다. 다만 곡률 반경이 작은 경우에는 최적입력에서 레이저 beam 의 길이 좋아지므로 정밀가공과 같은 특수한 용도에서 고려될 수 있다. 이러한 실험결과 전반사경의 곡률반경과 레이저붕에 대한 상대적인

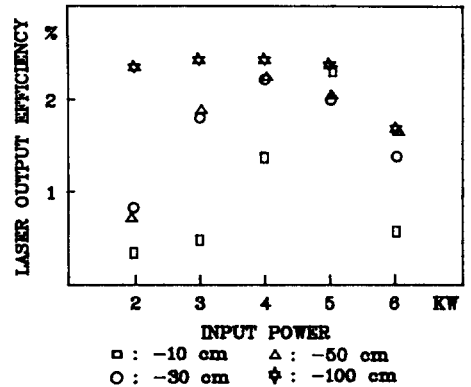


그림 6 입력 변화에 따른 레이저 효율 변화

거리를 변화시켜 가며 측정 한 최대출력은 약 6 KW 입력에서 150 W 의 평균출력을 측정 하였다. 이때의 출력효율은 2.5 % 에 해당하였다. 6 KW 의 입력은 flashlamp 의 입력 제한에 의한 결과이다.

3. 레이저 용접실험

개발된 용접용 레이저로 몇가지 이종금속 용접 [4] 실험을 하여 보았다. 원자력 발전소의 핵연료 Grid 에 사용되고 있는 Zircaloy-4 판재를 각각 Titanium 과 Tantalum 과 조합해 seam 용접을 하였다. 사용된 금속의 물리적인 특성은 표 I 과 같다.

표 1. 레이저 용접된 금속의 물리적인 특성

	용융점 (°C)	열팽창계수 (μ-in/in/°F)
Zircaloy-4	1850	3.2
Titanium	1810	4.6
Tantalum	3000	3.6

그림 7 의 A 는 용융점이 서로 비슷한 Zircaloy-4

와 Titanium 를 조합하고, B 는 열팽창계수가 서로 비슷한 Zircaloy-4 와 Tantalum 을 조합한 레이저 용접된 단면의 용입상태를 나타내고 있다. 이때 A, B 의 용접금속은 급속한 가열로 인해 용융과 용고가 매우 짧은 시간에서 이루어진 급속간의 대류 현상 ( Convection Swirls ) 을 보여주고 있으며 또한 열영향 부위가 거의 나타나지 않았음을 보여준다.[5] 한편 밀폐된 용기나 특수 구조물의 온도를 측정하는 데에 많이 사용되는 열전대 ( Thermo-couple ) 를 용접하였다. 여기에서는 가장많이 사용되고 있는



그림 8 백금선(A) 과 Chromel-Alumel 선(B) 의 레이저 용접 사진

mm - 0.5 mm 정도인 가는 선에 적합하며 용접된 결과는 열변형이 적고 건전한 용접 상태를 알 수 있다.

### III. 결 론

산업 가공용 Nd:YAG 레이저의 출력에 영향을 미치는 thermal lensing 효과를 분석 하였고 레이저 출력 실험에 응용하였다. 1/4" x 6" 레이저봉을 이용하여 최대 약 150W 의 평균출력을 발전시키는 용접용 Nd:YAG 레이저를 국내에서는 처음으로 개발 하였다. 개발된 레이저로 이종 금속및 열전대 용접 실험을 수행하였고 가능성을 확인하였다. 앞으로 보완적인 연구를 계속하여 좀 더 높은 평균출력을 갖는 레이저를 개발할 계획이며 각 재료의 특성에 맞는 용접변수에 대한 data 확립을 위하여 기초 용접실험 연구가 꾸준히 지속 되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] W.koechner, "Solid-State Laser Engineering", (Springer-Verlag, N.Y., 1976), p.353.
- [2] 김철중외, 제 5 회 광학및 양자 전자학 워크샵 논문집, 1(1988).
- [3] D.R.Whitehouse, et al, Report TRECOM-0269-F, US Army Electr. Command(1973).
- [4] W.H.Kearns, "Metals and their Weldability", Vol.4,(AWS Welding Handbook Seventh Ed.1984) pp. 433-485.
- [5] J.Seretsky and E.R.Ryba, "Laser Welding Dissimilar Metals: Titanium to Nickel", (Welding Research Supplement July 1976), p.208



A) Zr-4 to Ti B) Zr-4 to Ta

그림 7 레이저로 용접된 이종금속의 단면 용입사진 ( X 25 )

열전대 재료인 백금선과 Chromel-Alumel 선을 조합해서 spot 용접을 하였다. 이때의 열전대 재료의 성분과 사용 온도범위는 표 2 와 같다.

표 2. 열전대 재료의 성분과 사용온도 범위

	재료 성분	사용온도범위
백금선	Pt87 Rh13 - Pt	0 - 1600 °C
Chromel-Alumel	NiCr합금 - NiAl 합금	-200 - 1200 °C

그림 8 의 A 는 백금선 ( Pt Rh - Pt ) 을 조합하고 B 는 Chromel - Alumel 선을 조합하여 레이저 용접한 것이다. 이때 그림 우측의 보통 바늘과 비교해서 레이저 용접은 열전대의 직경이 0.3