

# 광섬유전송에 의한 인코넬 600의 레이저용접 특성연구

A Study on Inconel 600 Laser Welding Characteristics  
by Optical Fiber Transmission

김수성<sup>1</sup>, 권성욱<sup>1</sup>, 정진만<sup>1</sup>, 김철중<sup>1</sup>, 이영호<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국원자력연구소, 대전

<sup>2</sup> 충남대학교 기계공학과

## 1. 서 론

최근에는 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용한 용접이 전자빔용접에 버금가는 방법으로 열변형이 적고 대기중에서도 깊은 용입을 얻을 수가 있는 잇점을 가지고 있으며, 특히 광섬유 (optical fiber) 를 이용하여 다른 용접으로 불가능하거나 용접할 부위가 내부에 위치하고 있을 때 매우 유리하며, 또한 용접물 형상이 복잡한 3차원용접에도 가능하다. 현재 미국, 일본 등의 원자력산업에서는 증기발생기의 U 튜브 전열관 내부에서의 결함 부위에 대한 보수용접을 광섬유를 이용하여 원격으로 사용되고 있는 것으로 보고되고 있다. 1, 2)

본 연구는 1 kW 급 펄스형 Nd:YAG 레이저의 광섬유 전송장치를 이용하여 전열관 재료인 인코넬 600의 레이저용접 응용에 관한 기초 자료를 제공함에 있다. 실험에서는 Nd:YAG 레이저 용접시 먼저 레이저 변수가 되는 펄스폭, 반복율, 펄스에너지에 따라 용입상태를 분석하였고 다시 작업변수가 되는 용접속도, 보호가스, 유량, 그리고 혼합산소량이 비이드폭과 용입형상에 어떠한 영향을 미치는 지 알아보았다. 다음으로 겹치기이음의 레이저용접시 임의의 펄스모양을 변화시켰을 때 이에 따른 용입특성을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에는 Rofin Sinar 에서 제작한 평균출력 1 kW 급 Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 광섬유 전송장치는 Fig. 1 에서와 같이 광학 입구커플러, 광섬유, 그리고 광학출구커플러로 구성된다. 이때 광섬유는 코어직경이 1.0mm 이고 길이가 10m 이며, SI (Step Index) 멀티모드형으로 광섬유의 개구수 (Numerical Aperture) 는 0.2 정도로 하였다.

실험에서 사용된 시험편은 냉간압연, 어닐링한 1.2, 2.0 mm 두께의 인코넬 600 합금판재로 길이 80mm, 폭 30mm 이다. 실험전에 먼저 시험편을 아세톤으로 초음파세척하여 표면에 이물질을 완전히 제거한 후 사용하였다. 실험재료의 화학성분은 Table 1 에서와 같다.

Nd:YAG 레이저용접에 있어서 중요한 변수로는 펄스폭, 반복율, 펄스에너지, 용접속도, 초점위치, 보호가스, 유량, 산소량 등이다. 실험에서는 이러한 변수에 따라 용입형상, 비이드폭이 어떤 영향을 미치는 지 알아보기 위해서 2mm 판재를 사용하여 bead on plat 로 용접하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 초점위치별 용입관계

Fig. 2 는 이동거리 -6 에서 +6mm 까지 각 1mm 간격으로 defocusing 하였을 때 용입깊이와 비이드폭의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2 에서 나타난 바와 같이 defocus -1mm 지점에 위치할 때 대체로 용입이 가장 깊어지며, 시험편 위아래로 이동할 수록 용입은 감소함을 알 수 있다. 반면에 비이드폭은 defocus 관계없이 일정하게 나타났다. 이때 특이한 관찰에서는 defocus 0mm 지점에 위치할 때 spattering 현상이

보였고 비이드면이 거칠었다. 그러므로 본 실험에서는 레이저의 초점 위치를 defocus -1mm 에서 -2mm 정도에서 용접할 때 유리한 것으로 판단된다.

### 3.2 레이저변수의 용입관계

Fig. 3 은 레이저출력 600 W 을 일정하게 두고 펄스폭만을 6ms 에서 16ms 범위로 변화시킬 때 bead on plate 시험편의 용입과 비이드폭을 비교한 것이다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 용입과 비이드폭은 펄스폭에 따라 점차로 증가함을 보이다가 펄스폭 12ms 에서 용입이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. S. Aruga 등은 Nd:YAG 레이저용접에서 나타나는 현상으로 긴 펄스에만 볼 수 있으며, 조사된 펄스모양이 축 처진 형태로 이루어져 있어서 이때 레이저입사효율을 저하시킨다고 보고하고 있다. 3)

Fig. 4 는 레이저평균출력 600W, 펄스폭 10ms 에서 펄스에너지 10, 15, 20, 25, 30J 로 변화시킬 때 용입깊이를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 예상한 바와 같이 펄스에너지가 증가할 수록 용입은 커지는 경향을 보이나, 비이드폭은 펄스에너지에 관계없이 비슷한 경향을 나타냈다. 여기서 인코넬 판재의 2.0mm 두께를 완전용입 ( complete penetration ) 되기 위해서는 적어도 펄스당 에너지를 30J 에서 35J 정도 되어야 함을 알 수 있다.

### 3.3 보호가스의 영향

Fig. 5 는 레이저 용접시 아르곤, 헬륨, 질소 가스를 사용했을 때 얻은 용입깊이와 비이드폭을 나타낸다. Fig. 5 에서 나타난 바와같이 질소분위기에서는 헬륨, 아르곤가스보다 용입이 깊으며, 이러한 것은 질소를 사용할 때 헬륨가스보다 플라즈마발생과 키홀형성으로 효과적인 에너지를 전달 ( enhanced energy coupling ) 할 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 4) 또한 헬륨과 아르곤사용시 헬륨의 이온화에너지가 아르곤의 이온화에너지보다 높으며, 열전도성이 좋기 때문으로 판단된다.

### 3.4 임의 펄스모양에 따른 용입특성

Fig. 6 은 기존의 펄스모양과 임의의 펄스모양을 변화시켰을 때 인코넬시험편 1.2mm 두께의 두장을 겹치게하여 얻은 용접결과를 pulse shaping 회로에 의한 출력파형과 용입단면으로 보여주고 있다. 이때 레이저출력은 700W, 첨두출력 2.3kW, 반복율 30pps 그리고 용접속도는 400mm/min 으로 하였다. Fig. 6 (b) 의 pulse shaping 회로에 의한 용입은 (a) 의 펄스모양보다 20% 정도 커짐을 알 수 있으며, 이때 육안관찰에서도 양호한 용접결과를 얻었다. 실제 광섬유를 이용한 Nd:YAG 레이저 용접에서는 기존의 펄스모양보다 (b)에서와 같이 pulse shaping 된 모양을 사용할 때 더 유리한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구는 1kW 펄스형 Nd:YAG 레이저에 광섬유를 이용하여 인코넬 600 판재의 레이저 용접특성을 여러 변수하에서 실험에 의하여 검토한 것으로 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 광섬유전송시 레이저 빔이 초점위치에 따라 용입형상이 크게 달라 지므로 초점면에서 1-2mm 아래로 용접할 때 깊은 용입을 얻었다.
- (2) 레이저 에너지를 인코넬재료에 효과적으로 전달하기 위해서는 Ar, He 의 보호가스보다 질소를 사용하는 것이 유리하다.
- (3) 광섬유를 이용한 Nd:YAG 레이저용접에서 2mm 두께의 인코넬판재를 완전용입하기 위해서는 적어도 펄스에너지가 30J 이상이어야 하고 펄스폭은 10ms, 반복율은 30pps 정도가 적절하다.
- (4) 겹치기이음의 레이저용접시 pulse shaping회로에 의한 펄스모양이 기존펄스모양보다 용입깊이가 커지며, 양호한 용접결과를 얻었다.

5. 참고문헌

1. N. Nakajima, Y. Shimokusu, "Fundamental study on 1 kW class YAG laser welding using optical fibre", Welding in the world, Vol. 27 No. 5/6, (1989)
2. T. Ishide, Y. Nagura, "High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plant", Proceedings of LAMP'92, June, (1992), pp. 957-962.
3. S. Aruga, "Efficient & High-Quality Overlap Welding of Car Body Aluminum Alloy Metal Sheets with High Power Nd:YAG Lasers by Flexible Fiber Beam Delivery", Proceedings of LAMP'92, June, (1992), pp. 517-522.
4. K. Behler, E. Beyer, "Laser welding of aluminum" Laser Materials Processing of ICALEO'88, November, (1988), pp 249s-258s

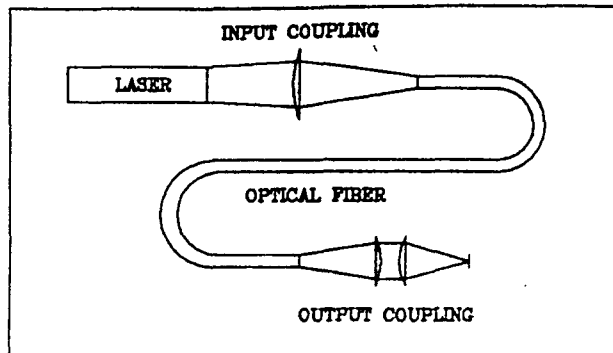


Fig. 1 Optical fiber beam delivery system

Table 1 Chemical composition & mechanical properties of Inconel 600

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
wt (%)	.03	.22	-	.001	.11	15.48	74.38	.36	9.42

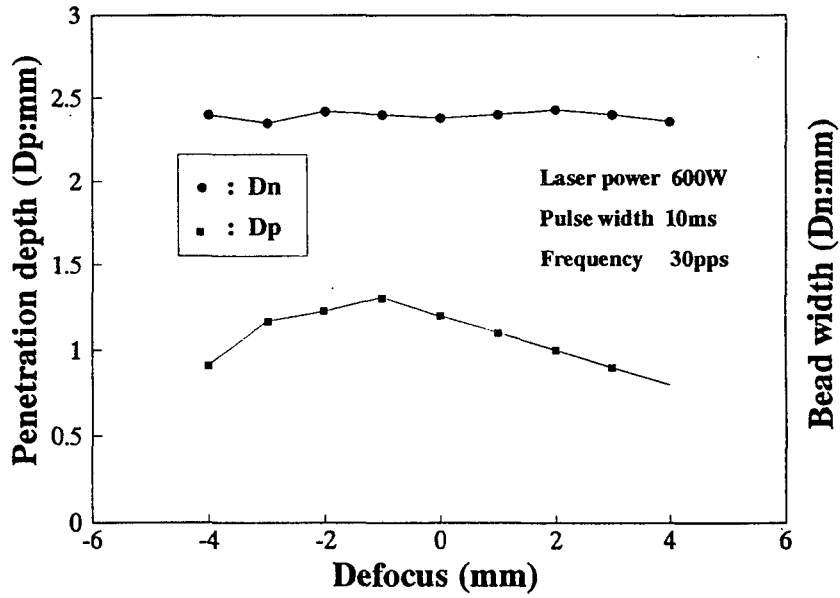


Fig. 2 Penetration depth and bead width dependence on defocus

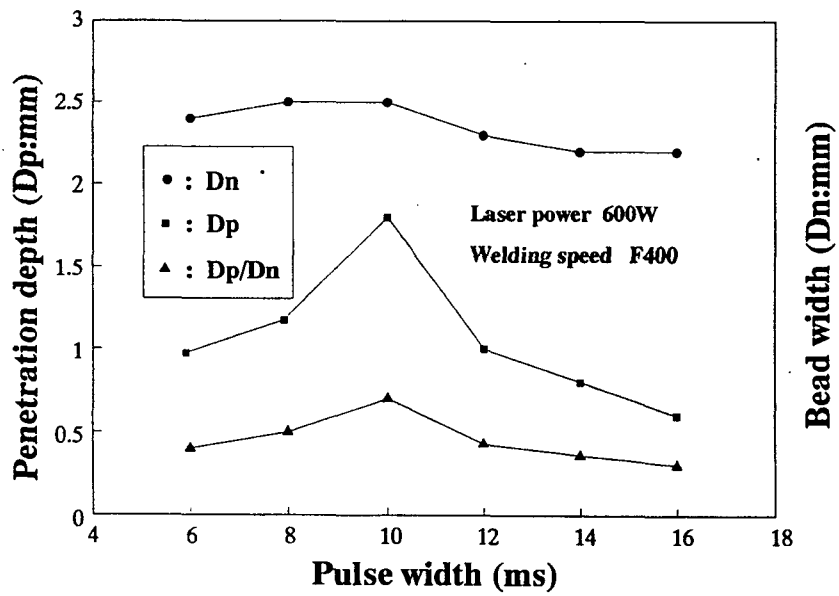


Fig. 3 Penetration depth and bead width dependence on pulse width

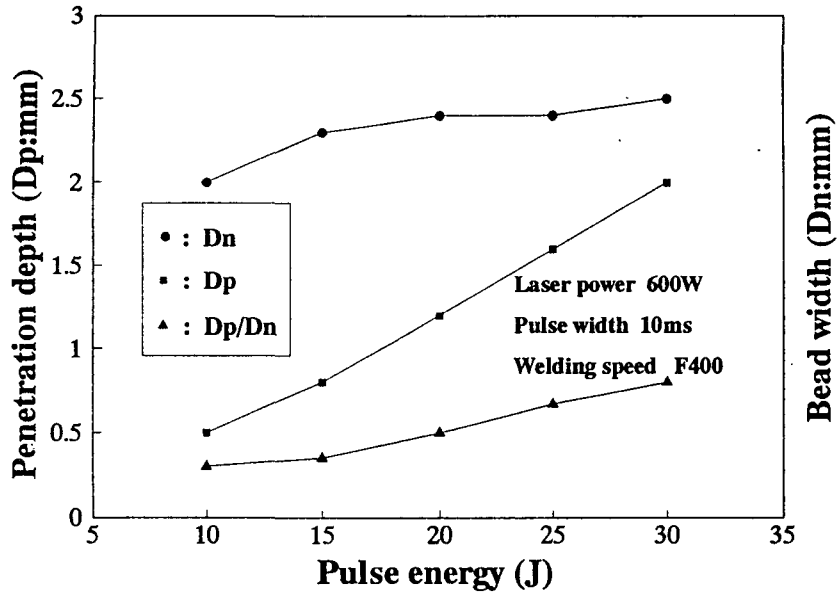


Fig. 4 Penetration depth and bead width dependence on pulse energy

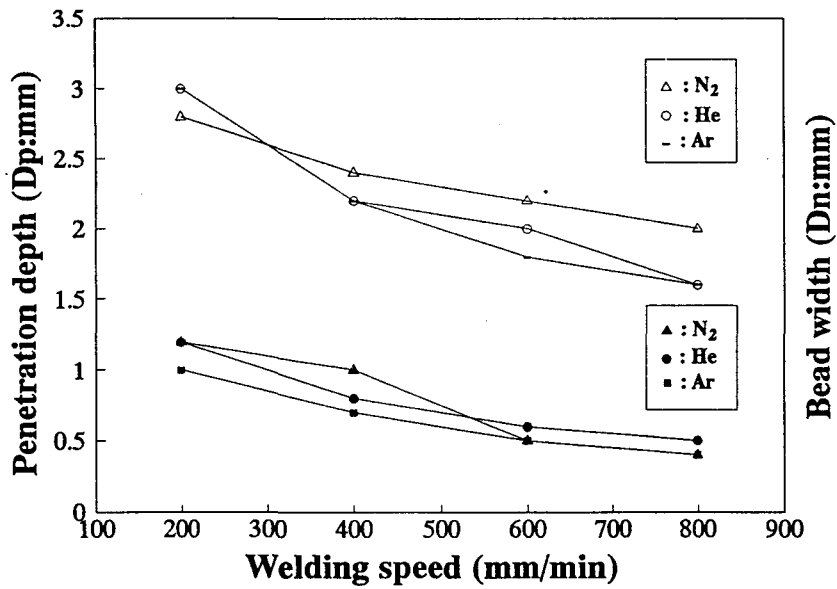


Fig. 5 Comparison of penetration depth and bead width in various shield gas

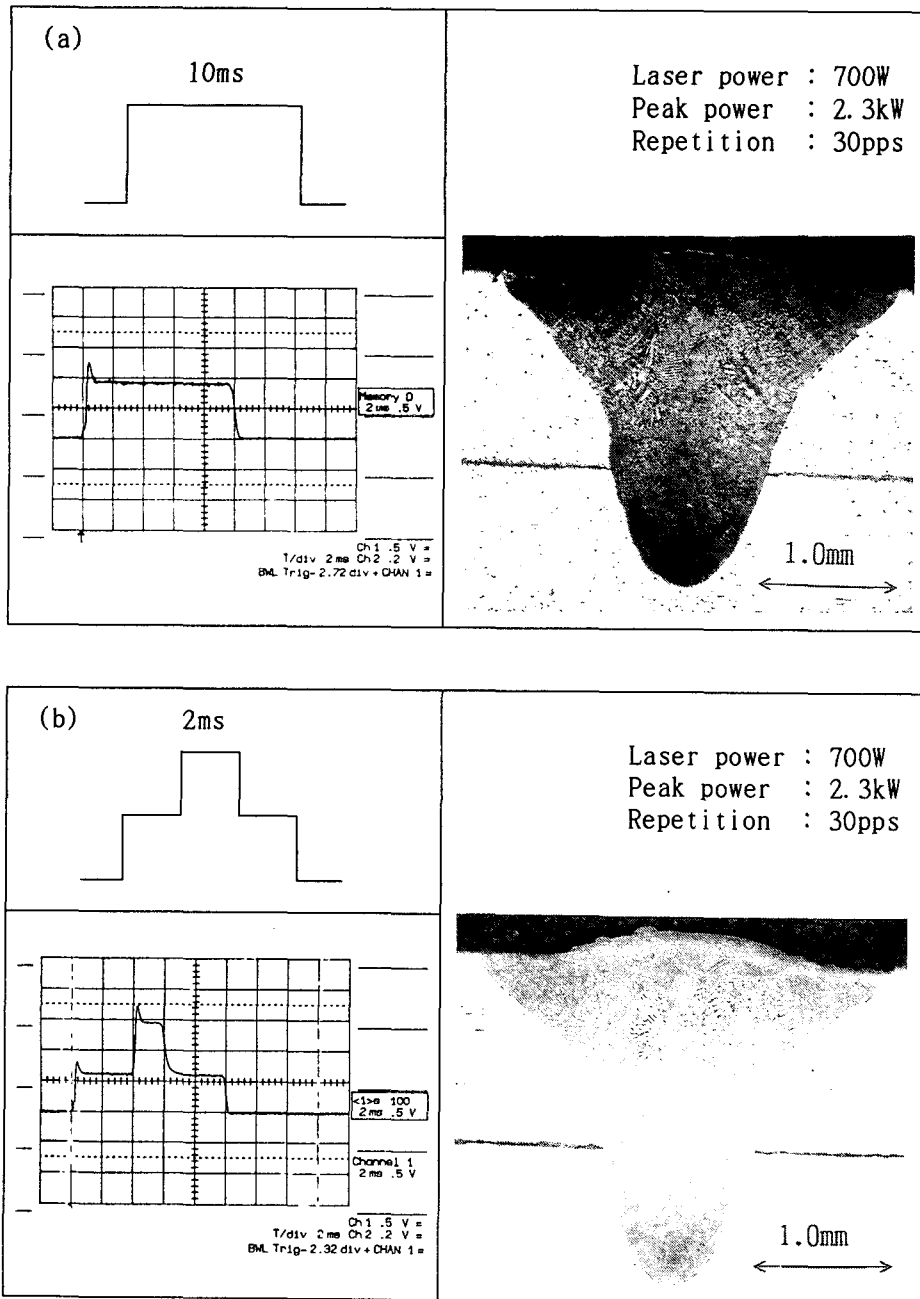


Fig. 6 Comparison of penetration depth dependence on pulse shaping modes