

# 펄스형 Nd:YAG레이저에 의한 Inconel 용접의 기계적 특성 연구

## A study on the Mechanical Strength of Inconel with Pulsed Nd:YAG Laser

장용\*, 전병철\*, 김재도\*, 정진만\*\*, 김철중\*\*

\*인하대학교, 인천

\*\*한국원자력연구소, 대전

### 1.서론

원자력 발전소의 증기발생기 수명연장을 위해 Nd:YAG 레이저를 이용한 원적 sleeve 보수용접기술이 개발되었다. 원자력발전소의 특성상 광섬유전송이 가능한 Nd:YAG레이저가 사용된다. 레이저 용접은 입열량에 비해 용입깊이가 깊고, 적은 열영향 부위를 갖는다. <sup>1)-3)</sup> 본 연구에서는 적은 입열량으로 충분한 용입을 얻기 위해 레이저의 변수에 따른 용입깊이, 비드폭 및 용접부의 인장강도 등의 기계적 특성을 조사하였다.

### 2.실험 방법

#### 2.1 보수용접방법 및 시험편 제작

결합이 발생한 직경 7/8"의 전열관 tube(Inconel 600)에 직경이 3/4"인 sleeve관(Inconel 690)을 삽입하고 용접의 효율성을 높이기 위해 sleeve를 확장한 후, 레이저빔을 광섬유로 전송하여 sleeve 용접을 실시하였다. 레이저 용접은 1.2kW급 펄스형 Nd:YAG레이저를 이용하였다. 용접시편의 재질은 Inconel 600 및 Inconel 690이며, 화학조성은 Table. 1과 같다. 용접변수인 펄스폭, 평균출력 및 용접속도 등을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 인장-전단시험에서 용접시편은 Fixture를 이용하여 실험하였다. 용접시편의 형상 및 크기는 Fig. 1과 같다.

#### 2.2 미세조직관찰, 전단시험 및 경도시험

용접시편의 미세조직 관찰을 위해서 단면을 polishing 후 5%의 Nital 용액으로 전해에칭을 한 후 급속현미경을 이용하여 관찰하였다. 인장-전단 시험은 최대 5ton 하중의 인장시험기를 이용하였으며 항복이 일어날 때의 값을 측정하였다. 용접부의 경도 측정은 대표적 시편을 선정하여 micro-vickers 경도계로 측정하였으며 하중 100g, 부하시간 10초로 하여 모재와 용접부의 경도를 각 부위별로 10회 측정하여 평균을 내었다.

### 3.실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접변수별 용입깊이, 비드폭, 접합폭 및 용입비

레이저 용접에서 용접부의 형상, 즉 용입깊이나 비드폭등에 영향을 미치는 주요한 인자로는 재료에 따라 레이저의 펄스폭, 평균출력, 첨두출력, 용접속도, 등을 생각할 수 있다. 각 조건에 따른 실험결과는 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4에 나타내었다. 12ms 펄스폭보다 7ms 펄스폭에서 적은 출

Table 1. Chemical composition of Inconel 600 and Inconel 690

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu
I600MA	75.1	15.4	8.0	0.01	0.1	0.3	-	0.001	-	0.2
I690TT	58.3	29.81	10.68	0.021	0.39	0.28	0.008	0.002	0.34	0.01

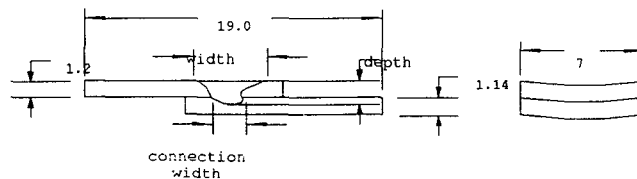
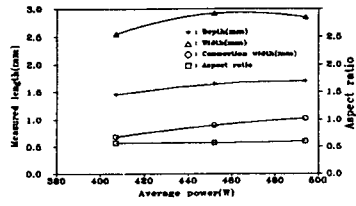
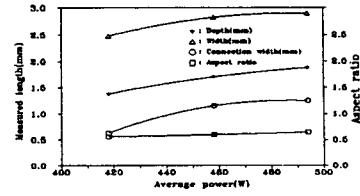


Fig. 1 Geometry of shear test specimen

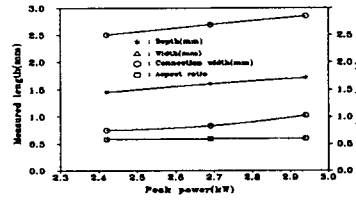


(a) Pulse width : 12ms

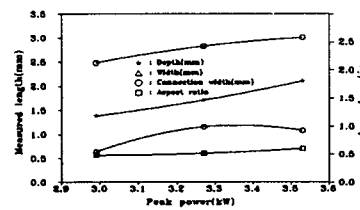


(b) Pulse width : 7ms

Fig. 2 Dependence of measured length on laser average power

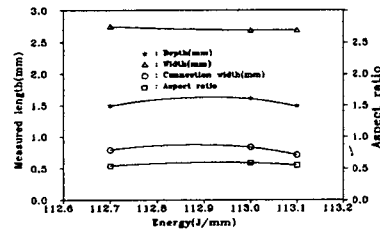


(a) Pulse width : 12ms

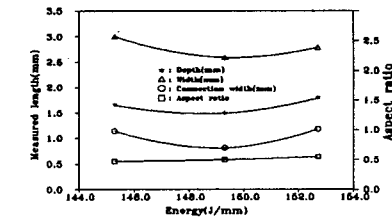


(b) Pulse width : 7ms

Fig. 3 Dependence of measured length on laser peak power



(a) Pulse width : 12ms



(b) Pulse width : 7ms

Fig. 4 Dependence of measured length on laser energy

력에서 용입깊이가 깊은 경향을 가지며, 레이저의 평균출력이 증가할수록 용입이 증가하였다. 용접속도가 증가할수록 에너지가 감소하여 용입이 줄어드는 경향을 보였다.

### 3.2 경도시험

용접부에서의 경도는 250으로 약 20%정도 모재보다 높게 나타났으며, 모재부와 용접부의 경계면에서 경도값이 약 10% 차이가 나타났다. 용융부의 경계면에서 취성을 유발시키는 높은 경도값을 나타내는 현상은 없었다. 각 부위별 평균경도값을 Table. 2에 나타내었다.

### 3.3 전단시험

접합폭에 따라서 전단강도는 대체로 증가하는 경향을 보였다. 접합폭이 0.8mm이상에서는 모재의 인장강도 550MPa(ASTM B167)의 80%에 해당하는 440MPa이상의 전단강도를 나타냈다. 펄스폭이 7ms일때 430W이상의 평균출력 및 110J/mm이상의 단위길이당 에너지의 조건에서 0.8mm이상의 접합폭이 얻어졌다. Fig. 5는 접합폭에 따른 전단강도를 도시한 것이다.

Table. 2 Results of hardness test (HV0.1)

Position of hardness test	Average hardness
Base Metal I (Inconl 600)	220
Base Metal II (Inconel 690)	195
Center of Weld	250
Boundary of Weld	218

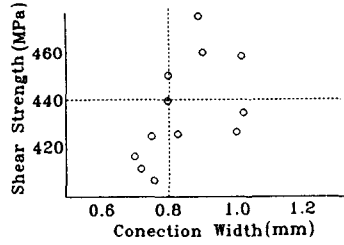


Fig. 5 Dependence of connection width on shear strength

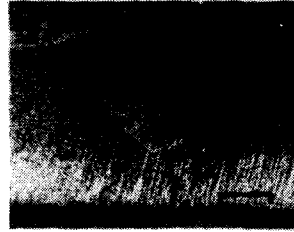


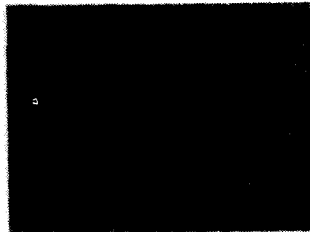
Fig. 6 Cross-section of weld



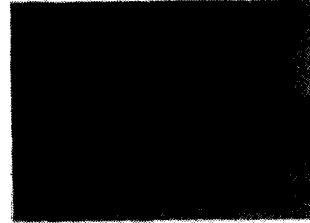
(a) Base metal (Inconel 600)



(b) Base metal (Inconel 690)



(c) Weld zone



(d) Boundary of weld zone and base metal

Fig. 7 Microstructure of weldments

### 3.4 미세조직관찰

모재의 조직은 grain size가 큰 차이가 없는 분포 거동을 나타내고 있으며, 모재와 용접부의 경계면에서 열영향을 받은 부분이 좁고 약간의 refined structure를 보이고 있다. 용접부에서 균열은 생기지 않았으며 용융부의 조직은 fine grained structure로 형성되어 있었다. Fig. 6은 용접단면 사진이고, Fig. 7은 각 용접부위별 미세조직에 대한 사진이다.

## 4. 결론

출력이 높아질수록 용입깊이가 증가하였으며 용접속도가 증가할수록 용입깊이는 감소하였다. 펄스폭 7ms, 평균출력 430W이상, 단위길이당 에너지 110J/mm이상인 용접 조건에서 0.8mm이상의 접합폭을 갖는다. 용접부의 경계면에서는 취성을 유발시키는 용융부의 높은 경도값은 나타나지 않았다. 용접부에서 균열등의 결함은 없었으며 건전성을 유지하고 있었다. 원전시설의 운전하에서 용접부의 건전성 판단을 위해 앞으로 C-Ring Test를 실시하여 용접부의 부식특성 및 기계적 특성등을 비교할 예정이다.

## 참고문헌

1. 김철중의 11인, "레이저 가공 및 광계측 기술 개발", KAERI/RR-1492/94, pp.31-149
2. M. P. Graham, D.C.Weckman, H. W. Kerr, and D.M.Hirak : "Nd:YAG Laser Beam Welding of Coated Steels Using a Modified Lap Joint Geometry", Welding Journal, May, 1996, pp. 162/s-170/s
3. 류병길, 주정권, 오동원: "니켈 및 니켈합금의 용접에 대하여", 기술현대 1990(Vol.10 No.1), pp.8-15