

펄스형 Nd:YAG레이저로 용접된 Inconel Tube의 전단강도

Shear Strength of Inconel Tube Welded with Pulsed Nd:YAG Laser

장 웅(인하대 대학원), 김재도(인하대), 정진만, 김철중(한국원자력연구소)

W. Chang(Graduate School, Inha Univ.), J. D. Kim(Inha Univ.), J. M. Chung, C. J. Kim(KAERI)

ABSTRACT

The remote sleeve repair-welding technology using the pulsed Nd:YAG laser for increasing the lifetime of the steam generator tube in the nuclear power plant has been developed. The laser welding has many advantages on deep penetration depth and narrow heat affect zone(HAZ). The inconel 600 tube and inconel 690 sleeve used high temperature and high pressure service have been welded as round lap welds. It is found that the relation between the connection width and welding parameters. It is found that the shear strength in proportion to the connection width by conducting tensile-shear tests.

Key Words : tensile-shear test(인장-전단 시험), shear strength(전단강도), Inconel(인코넬), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저), sleeve repair-welding(슬리브 보수용접)

1. 서 론

레이저 발명에 따른 산업적 활용이 시작되면서부터 원자력분야의 활용도 병행되었다. 이는 레이저의 원격전송 특성이 원자력분야의 각종 제한적 환경에서 사용되던 작업자의 안전성을 향상시킬 수 있기 때문에 초기부터 각광을 받았으며 레이저 가공분야에서 많은 성과를 보여왔다. 그 적용례로서 원자력발전소의 증기발생기 수명연장을 위해 Nd:YAG 레이저를 이용한 원격 sleeve 보수용접기술이 개발되었다.^[1] 레이저 용접은 입열량에 비해 용입깊이가 깊고 적은 열영향 부위를 갖는다. 원자력발전소의 증기발생기에 사용되는 전열관에는 고온 및 고압의 환경 하에서 작동하도록 설계된 Inconel이 사용된다.^[2]

Sleeve 보수용접기술을 이용하여 용접한 Inconel

tube의 용접부에 대하여 충분한 강도 및 내부식성 등의 신뢰도 향상을 위한 여러 가지 시험들이 행하여지고 있다.^[3-4]

본 연구는 그러한 여러 방법중의 일부로서, 레이저 용접조건에 따른 접합폭과 접합폭에 따른 인장-전단강도시험을 실시하고 용접부의 용접강도를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편의 제작

시편의 재질은 Inconel 600 및 Inconel 690 tube이며 재질의 성분은 Table 1과 같다. 인장-전단시험에서는 Fixture를 사용하여 시편의 양 끝단을 물려 시험하였다. 시편의 형상 및 크기는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Chemical compositions 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

3. 실험결과 및 고찰

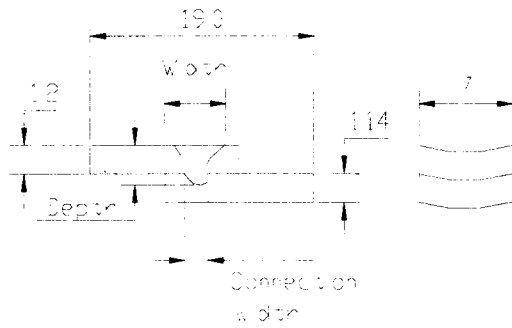


Fig. 1 Geometry of tensile-shear test specimen

2.2 Sleeve 보수용접실험

본 실험에 이용된 sleeve 보수용접기술은 다음과 같다. 결함이 발생한 전열관(Inconel 600)에 직경이 조금 작은 슬리브관(Inconel 690)을 삽입한 후 용접의 효율성을 높이기 위해 sleeve를 확장한다. 슬리브관에 용접 tool을 삽입하고 광섬유로 전송된 레이저빔을 렌즈와 미러를 통해 집속하여 결함 부위의 상단과 하단에 용접을 실시한다. 레이저 용접은 1.2kW 급 펄스형 Nd:YAG레이저(RSY-1000P)를 이용하였다.

2.3 미세조직관찰 및 경도측정

용접시편의 미세조직 관찰을 위해서 시편의 단면을 절단하고 마운팅하여 polishing 후 5%의 Nital 용액으로 전해에칭을 한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 용접부의 경화 정도를 관찰하기 위한 경도 측정은 micro-Vickers 경도계로 측정하였으며 하중 50g, 부하시간 10초로 하여 용접비드를 중심으로 횡단면의 경도를 측정하였다. 측정은 각부위별 경도분포를 측정하였다.

2.4 인장-전단강도시험 및 파단면 관찰

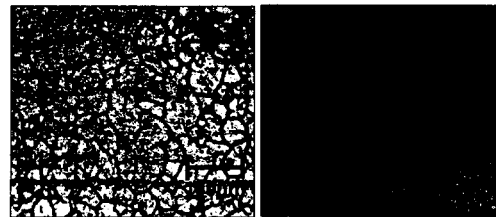
인장-전단강도 시험은 최대 5ton 하중의 인장시험기를 이용하여 행하였으며 두 시편이 완전히 분리되었을 때의 값을 파괴값으로 측정하였다. 파단면의 관찰은 SEM (Scanning Electronic Microscope)을 이용하였다.

3.1 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 structure가 형성되어 있다. Fig. 2는 용접단면을 나타낸 사진이고, Fig. 3는 각 용접부위별 미세조직에 대한 사진이다.

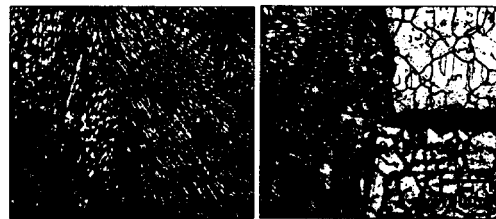


Fig. 2 Cross-section of weld



(a) Inconel 600

(b) Inconel 690



(c) Center of weld (d) Boundary of weld

Fig. 3 Microstructure of weldments

3.2 경도시험

용접부에서의 경도는 350(HV0.1)으로 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.

Table 2 Results of hardness test (HV0.1)

Position of Hardness Test	Average Hardness
(a) Inconel 600	220
(b) Inconel 690	195
(c) Center of Weld	250
(d) Boundary of Weld	218

3.3 실험조건별 접합폭

레이저 용접에서 용접부의 형상, 즉 용입깊이 나 비드폭 등에 영향을 미치는 주요한 인자로는 재료에 따라 레이저의 평균출력, 첨두출력, 펄스폭, 용접속도 등을 생각할 수 있다.

레이저의 평균출력, 첨두출력, 단위길이당 입력에너지에 따라서 접합폭은 다소 넓게 분포되어 있었다. Fig. 4는 평균출력에 따른 접합폭, Fig. 5는 첨두출력에 따른 접합폭, 그리고 Fig. 6에는 단위길이당 입력에너지를 나타내었다.

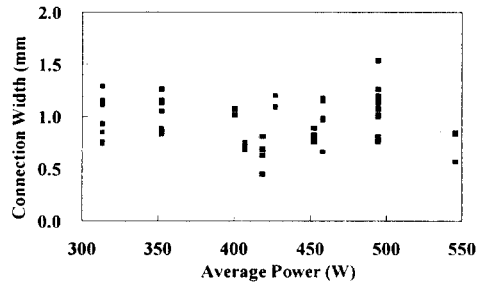


Fig. 4 Relation between average power and connection width

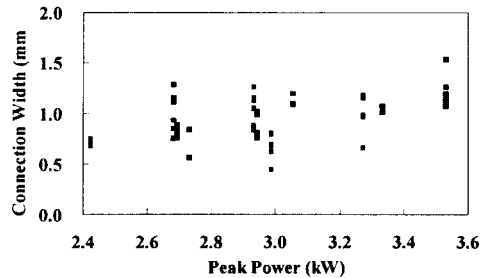


Fig. 5 Relation between peak power and connection width

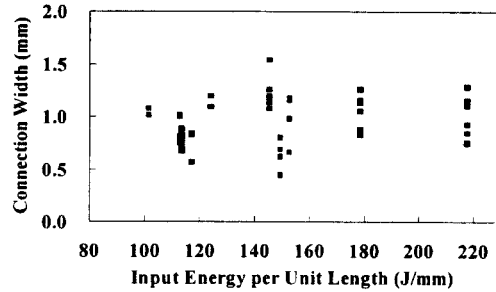


Fig. 6 Relation between input energy per unit length and connection width

3.4 접합폭에 따른 전단강도

용접시편의 전단강도는 접합폭에 관계없이 대체로 일정한 값(약 340MPa)을 유지하고 있었다. 모재의 인장강도 550MPa(ASTM B167)의 약 62%에 해당하는 340MPa의 전단강도를 지니 접합폭에 따른 전단강도의 관점에서는 강도가 부족하게 나타났다. Fig. 7에 접합폭에 따른 전단강도를 나타내었다.

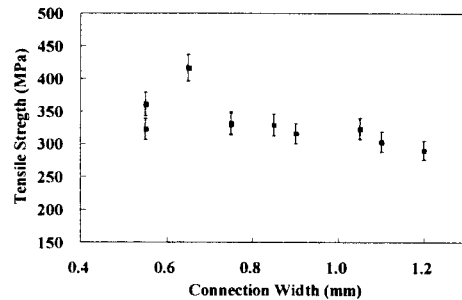


Fig. 7 Dependence of connection width on shear strength

3.5 파단면 분석

인장-전단시험 결과 연성파괴(ductile fracture)의 특징이 나타나 있으며(Fig. 8), Fig. 8의 (b), (c), (d)에서는 shear dimple이 나타나고 있다. Fig. 8 (e)와 (f)에서는 button 현상이 일어나면서 dimple이 형성되었음을 알 수 있다.

Fig. 8 (a)는 인장-전단시험후의 전체적인 파단면의 형상을 나타내었다. Fig. 8 (b), (c)는 파단면의 양쪽끝부분을 나타내며, Fig. 8 (e)는 파단면의 가운데부분을 나타내며, Fig. 8 (d)와 (f)는 각각 (c)와 (e)의 확대사진이다.

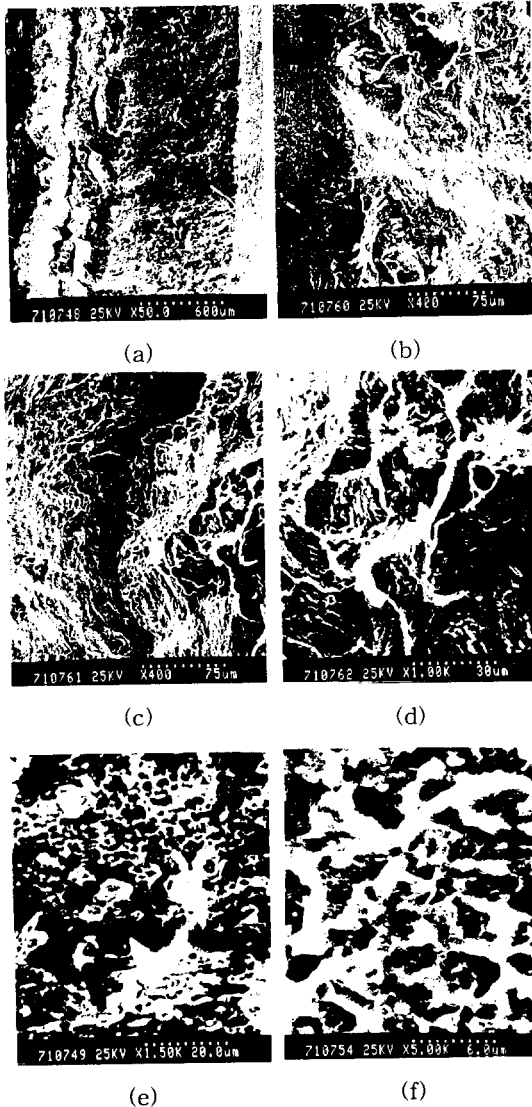


Fig. 8 SEM Fractographs of fracture surface

- (a) Overview of fracture surface
- (b), (c) End part of fracture surface
- (d) Higher-magnification view of (c)
- (e) Center part of fracture surface
- (f) Higher-magnification view of (e)

4. 결 론

1. 용접부의 경계면에서 취성을 유발시키는 높은 경도값은 나타나지 않았다.
2. 용접부에서 균열 등의 결함은 없었으며 건전성을 유지하고 있었다.
3. 레이저의 평균출력, 침투출력, 단위길이당

입력에너지에 따라서 접합폭은 다소 넓게 분포되어 있었다.

4. 용접시편의 전단강도는 접합폭에 크게 관계되지 않는다.

5. 용접시편의 전단강도는 모재의 인장강도 550MPa의 약 62%에 해당하는 340MPa을 갖는다.

6. 전단강도의 관점에서 용접부는 충분한 강도를 지니지 않았다.

7. 인장-전단시험에서 연성파괴가 일어났다.

참고문헌

- [1] 김철중 외 11인, "레이저 가공 및 광계측 기술 개발", KAERI/RR-1492/94, pp.31-149, 1994
- [2] 류병길, 주정권, 오동원 : "니켈 및 니켈합금의 용접에 대하여", 기술현대(Vol.10 No.1), pp.8-15, 1990
- [3] 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, pp.162/s-170/s, May, 1996
- [4] 장웅, 전병철, 김재도, 정진만, 김철중, "펄스형Nd:YAG레이저에 의한 Inconel 용접의 기계적 특성 연구", 대한용접학회 춘계학술대회, pp. 99-101, 1997