

펄스형 Nd:YAG 레이저 빔에 의한 Inconel Tube의 용접

김재도* · 장 응** · 정진만*** · 김철중***

Welding of Inconel Tube with Pulsed Nd:YAG Laser

J. D. Kim*, W. Chang**, J. M. Chung*** and C. J. Kim***

Key Words : Tensile shear test(인장 전단 시험), Inconel 600 tube(인코넬 600 관), Inconel 690 sleeve(인코넬 690 슬리브), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저), Sleeve repair-welding(슬리브 보수용접)

Abstract

The basic remote sleeve repair-welding technology by the pulsed Nd:YAG laser for increasing the lifetime of the steam generator tube in a nuclear power plant has been developed. The relationship between the connection width and welding parameters have been investigated for the fundamental research to apply the sleeve-repair-welding technique to the nuclear industry. The Inconel 600 tube and Inconel 690 sleeve used for high temperature and high pressure service were welded as round lap welding by Nd:YAG laser. It was observed that the tensile shear strength, 340MPa of the welded specimen is equivalent to about 60% of that of the base metal (Inconel 600), 550MPa. The difference between the hardness of the base metal and that of the laser welds was about 10%. Ductile fracture was partly occurred in the weld but the cracking has not been observed. In spite of absence of the crack, the strength of welds was not sufficient in terms of the tensile shear strength.

1. 서 론

레이저에 의한 재료 가공방법은 집속된 레이저 빔에 의한 재료의 가열, 용융 및 증발기구를 적절하게 이용하는 것으로 원자력 분야에도 사용되고 있다. 이는 레이저의 원격 전송 특성이 원자력 분야의 각종 제한적 환경에서 사용하여 작업자의 안전을 향상시킬 수 있기 때문에 원자력 부품의 레이저 가공 분야에 많은 성과를 보여왔다.

레이저에 의한 용접법은 기존의 용접법에 비하여 용접부와 열영향부가 작으며, 비접촉 가공기술로 재료의 오염을 방지할 수 있고, 다양한 용접변수들을 활용하여 원하는 용접 특성을 얻을 수 있는 등의 장점을 가지고 있어 최근 널리 이용되고 있다¹⁻⁴⁾. 최근에는 선진국에서 원자력 발전소의 증기발생기 수명연장을 위해 Nd:YAG 레이저를 이용한 원격 슬리브 보수 용접기술(sleeve repair welding technology)이 개발되어 실용화되고 있다. Nd:YAG 레이저는 파장이 1.06 μ m로서 직경 1mm 이내의 광섬유를 통한 빔의 전송이

※ 1998년 7월 9일 접수

* 정회원, 인하대학교 기계공학과

** 정회원, 인하대학교 대학원

*** 정회원, 한국원자력연구소

• 김재도 : kimjaedo@inha.ac.kr

가능하여 작업공간이 협소하여 접근이 어려운 위치로의 전송이 자유롭다. 이렇게 전송된 빔은 광학기기에 의해 집속되어 용접을 수행하게 된다^{5,6)}.

원자력발전소의 증기발생기에 사용되는 전열관으로는 고온 및 고압 환경 아래에서 제작된 인코넬이 사용된다. 슬리브 보수 용접 기술을 이용하여 용접한 인코넬 관의 용접부에 대하여 충분한 강도 및 내부식성 등의 신뢰도 향상을 위한 여러 가지 시험들이 행하여지고 있다. 그것은 응력 부식 결과 슬리브용접에 의해 보수된 용접 및 열영향부에서 균열이 발생한다고 보고되고 있다⁷⁾.

본 연구는 선진국에서 원자력발전소의 증기발생기 전열관의 보수방법으로 개발된 슬리브 보수 용접 기술을 국내에서 현장에 적용하기 위한 기초연구이다. 본 연구의 목적은 Nd:YAG 레이저 용접조건에 따른 접합폭과 접합폭에 따른 인장-전단 강도시험을 실시하고 용접부의 용접강도를 평가하여 보수 용접 기술의 신뢰도를 향상시키는 데에 있다.

2. 실험방법

2.1 시편 제작

용접시편은 원자력발전소의 증기발생기 전열관에 사용되는 인코넬 600 관과 슬리브 보수 용접에 사용되는 인코넬 690 관이다. 인코넬 600은 어닐링된 두께 1.2mm, 외경 22.2mm 이며, 인코넬 690은 열처리된 두께 0.9mm, 외경 19.05 mm이다. 레이저 용접 실험 전에 용접 샘플은 아세톤으로 약 10분간 초음파 세척하여 관 내부 표면에 이물질을 완전히 제거한 후 사용하였다. 이때 사용된 인코넬 재질의 화학 성분은 Table 1과 같다. 인장-전단 실험을 할 시편을 Fig. 1과 같이 가공하였다. 시편이 작기 때문에 시험기에 맞는 치공구를 제작하여 사용하였다.

2.2 슬리브 보수 용접 실험

슬리브 보수 용접은 광섬유를 통한 원격 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저를 이용하였다. 슬리브 보수 용접은 우선 결함이 발생한 전열관 (인코넬 600)에 직

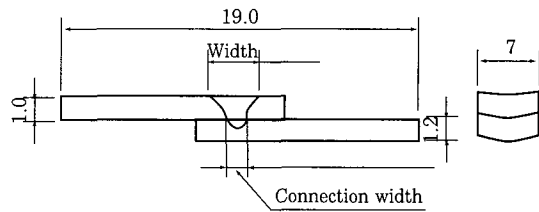


Fig. 1 Geometry of tensile shear test specimen (mm)

경이 조금 작은 슬리브관 (인코넬 690)을 삽입한 후, 관의 전열효과를 향상시키기 위해서 확관기로 용접할 부위의 슬리브를 확관하였다. 슬리브관에 용접 장치를 삽입하고 광섬유로 전송된 Nd:YAG 레이저 빔을 렌즈와 미러를 통해 집속하여 결함 부위의 상단과 하단에 용접하였다. Fig. 2에 슬리브 보수 용접 후의 형상을 나타내었다.

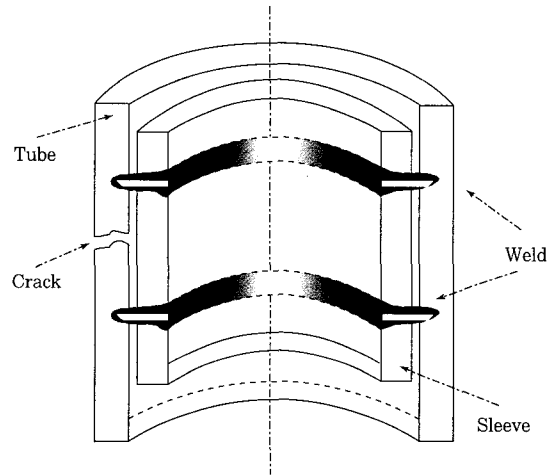


Fig. 2 Schematic illustration of sleeve welding

Fig. 3에서 보는 바와 같이 발전기에서 발전된 빔은 집광렌즈로 집속되어 SI(step index)형 광섬유를 통하여 모니터링 시스템에 전송되고 용접하고자 하는 위치로 전송한다. 광섬유로부터 발산되어 나오는 빔은 다시 두 개의 렌즈와 반사미러로 재집속되어 용접이 이루어지며 용접 장치가 회전을 하면서 슬리브의 내면을 용접하게 된다. 본 실험에 사용된 레이저는 Rofin-Sinar사의 1.2kW급 펄스형 Nd:YAG 레이저로서 모델명은 RSY1000P이다. 실험변수로는 평균출력, 펄스폭, 용접속도를 선정하였고, 평균출력과 펄스

Table 1. Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690(wt%)

	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

쪽으로부터 침투출력을 환산하였으며 평균출력과 용접속도로부터 입력에너지를 구하여 실험 데이터로 사용하였다. 보호가스로 N₂를 사용하였고, 펄스폭 7ms, 12ms, 평균출력 300~500W, 용접속도 160~260mm/min의 범위에서 각 변수들에 대한 용접을 수행하였다.

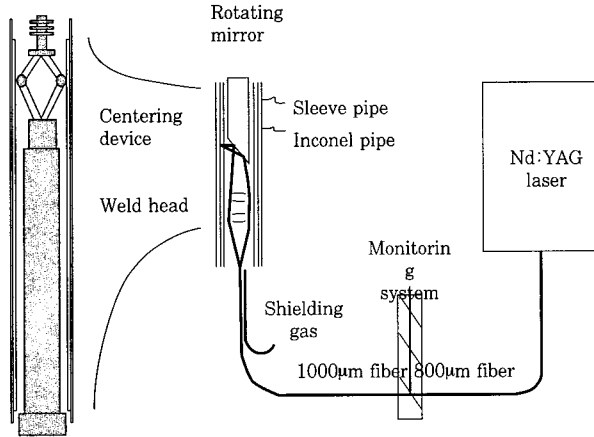


Fig. 3 Schematic illustration of laser welding system

2.3 미세조직관찰 및 경도측정

용접시편의 미세조직 관찰을 위해서 시편의 단면을 절단하고 마운팅하여 연마지로 연마한 다음 알루미늄 연마제로 최종 연마하였다. 에칭은 5%의 nital용액 (메탄올95%+질산 5%)을 사용하여 8V에서 약 20초간 전해 에칭을 한 후 드라이어로 건조시켜 광학현미경으로 관찰하였다.

용접부와 열영향부 및 모재에 걸친 경도변화를 알아보기 위하여 양호한 용입현상을 나타낸 시편을 선정하였다. 경도 측정은 미소 비이커스 경도계를 사용하였으며, 경도측정시 하중을 0.98N, 부하시간 10초로 하여 용접 비드(인코넬690, 표면에서 0.4mm)를 중심으로 횡단면을 따라 경도를 5회 반복 측정하여 산출하였다.

2.4 인장-전단 강도시험 및 파단면 관찰

열영향 부위에서의 미세균열 및 강도변화를 알아보고 용접부에서의 강도를 측정하기 위하여 인장-전단강도시험을 실시하였다. 최대 49,000N 하중의 인장시험기를 사용하였다. 인장-전단 시험편을 치공구로 고정 후 인장시험기의 척에 장착하고, 2mm/min의 인장속도로 정하중시험을 하여 두 시편이 완전히 분리될 때까지 실험하여 최대하중을 파괴값으로 정하였다. 파단면의 관찰은 SEM을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰

Fig. 4는 용접단면을 나타낸 사진이며, 각 용접 부위별 미세조직에 대한 사진이다. Fig. 4(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 용접 중심부에서는 응고가 진행됨에 따라서 결정립이 성장하여 columnar grain 조직을 나타내고 있다^{8,9)}. 모재와 용접부가 만나는 경계부분을 확대한 Fig. 4(d)에서 볼 수 있는 것과 같이 모재로부터 응고가 시작되면서 약 3~5µm 정도 면선단 응고가 일어난 후 셀룰라 응고가 진행된다. 관찰된 모든 시편의 용접에서 고온균열은 발견되지 않았는데, 그 이유는 두 모재와 용접된 시편의 용융구역 모두 상변태가 일어나지 않았고 또 모재 내의 P, S가 매우 적기 때문으로 생각된다. 기공은 몇몇 시편에서 불규칙하게 분포하고 있었다. 모재의 결정립 크기는 Fig. 4(a), (b)에서와 같이 큰 차이가 없는 분포 거동을 나타내고 있다.

3.2 경도시험

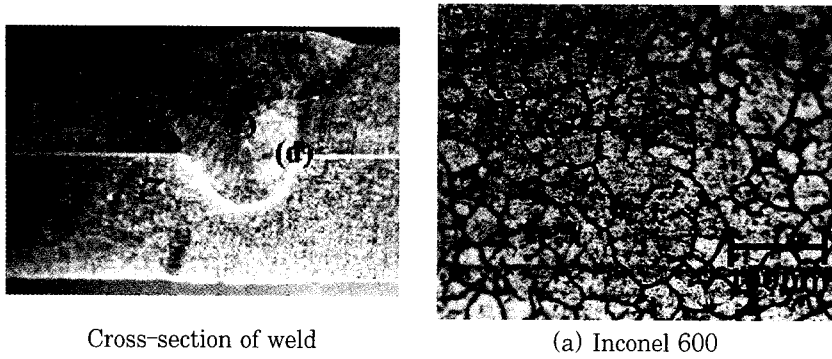
Table 2와 Fig. 5은 용접 시편의 각 부분별 경도값과 용접단면(인코넬690)을 따라 측정된 경도값을 나타낸다. 용융부에서의 경도는 235 (Hv 0.98)로 약 20% 정도 모재보다 높게 나타났으며, 모재부와 용접부의 경계면에서 경도값이 약 10% 차이가 나타났다. 용융부 중심과 열영향부 부근에서 경도 차이가 나는 것은 레이저 용접시 빠른 냉각속도로 인해 발생하는 것으로 생각되며 미세화된 조직에 의한 영향으로도 생각된다. 용융부의 경계면에서 취성을 유발시키는 높은 경도값을 나타내는 현상은 없었다.

Table 2. Results of hardness test (Hv 0.98)

Position of hardness test	Average hardness
(a) Inconel 600	220
(b) Inconel 690	195
(c) Center of weld	235
(d) Boundary of weld	218

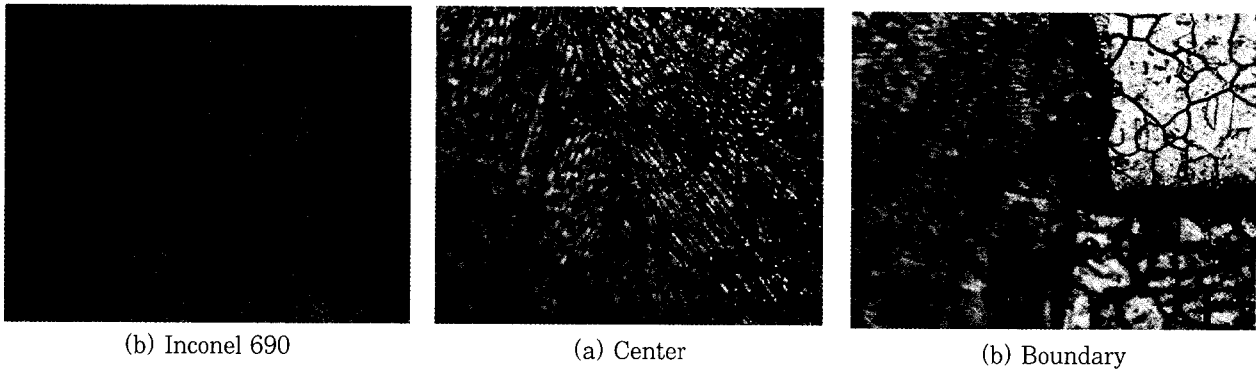
3.3 실험조건별 접합폭

레이저 용접에서 용접부의 형상, 즉 용입 깊이나 비



Cross-section of weld

(a) Inconel 600



(b) Inconel 690

(a) Center

(b) Boundary

Fig. 4 Microstructures of weld

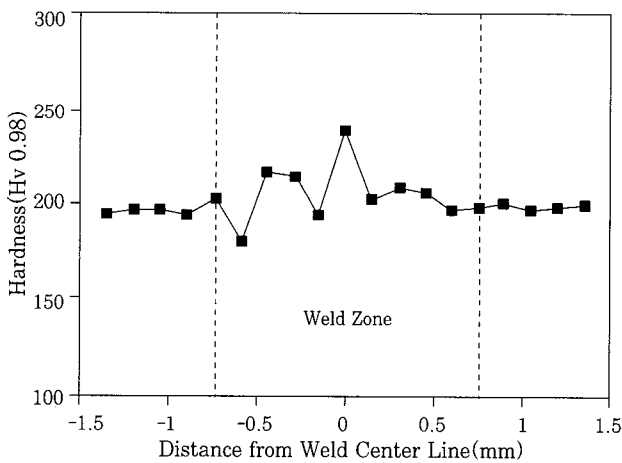


Fig. 5 Distribution of hardness test (Peak power = 3.0kW, 12ms)

드폭 등에 영향을 미치는 주요한 인자로는 레이저의 평균출력, 첨두출력, 펄스폭, 용접속도 등을 생각할 수 있다.

Fig. 6의 경우는 첨두출력이 증가함에 따라 접합폭은 미미하게 증가하는 경향을 보이고 있고, Fig. 7은 평균출력이 증가함에 따라 접합폭은 실험 범위에서 거의 비슷한 크기를 보이고 있다. Fig. 8은 단위길이당 입력에너지를 나타낸 것으로 입력에너지가 증가할수

록 접합폭이 약간 증가하고 있으나 그 영향은 매우 미미하다. Figs. 6, 7, 8에서 접합폭은 다소 넓은 분포를 가지며 경우에 따라서는 출력이나 에너지가 증가함에 따라 변화가 미미하게 나타나고 있다.

3.4 접합폭에 따른 인장-전단강도

인장-전단강도시험은 양호한 표면상태와 용입을 나타내는 경우에 대해서만 실시하였다. Fig. 9에서 나타나는 바와 같이 용접시편의 인장-전단강도는 310MPa에서 440MPa 사이의 값을 갖고 있으며, 접합폭이 0.65에서 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 용

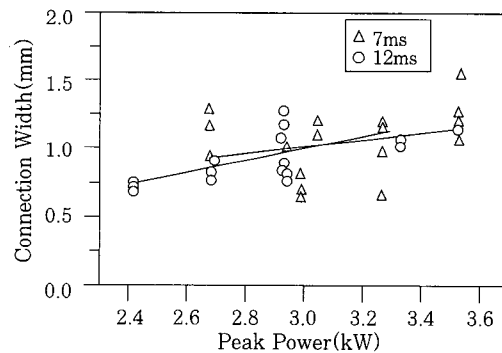


Fig. 6 Relationship between peak power and connection width

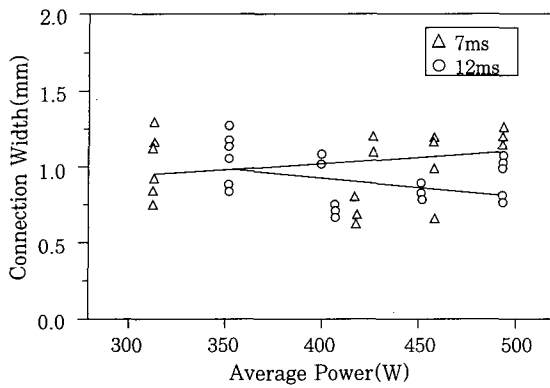


Fig. 7 Relationship between average power and connection width

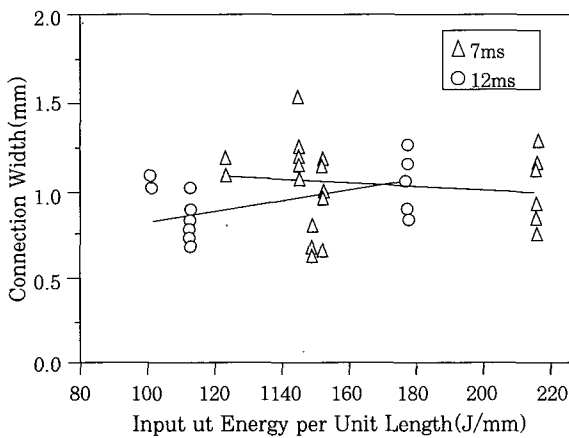


Fig. 8 Relationship between input energy per unit length and connection width

접부위는 모재의 인장강도 550MPa (ASTM B167)의 약 60%에 해당하는 340MPa의 인장-전단강도를 지녀 접합폭에 따른 인장-전단강도의 관점에서는 강도가 부족하게 나타났다. 이는 인장-전단시험시 시편에 순수 전단 외에 파괴가 일어나기 전에 약간의 휨이 발생하면서 전체적인 강도값을 떨어뜨리는 효과가 발생한 것으로 생각된다.

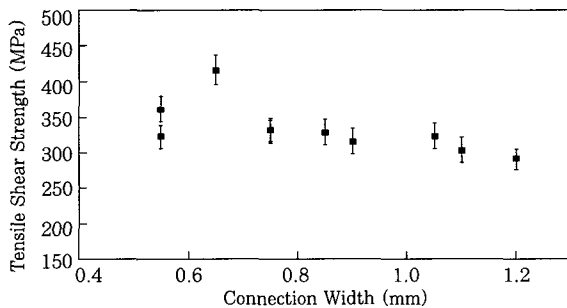


Fig. 9 Effect of connection width on tensile-shear strength ($\sigma_u = 550$ MPa, Inconel 600)

3.5 파단면 분석

Fig. 10 (a)는 인장-전단 시험 후의 전체적인 파단면의 형상을 나타내었다. Fig. 10 (b), (c)는 파단면의 양쪽 끝부분을 나타내며, Fig. 10 (d)는 파단면의 가운데 부분을 나타내고 있다. 인장-전단 시험 결과 연성 파괴의 특징이 나타나 있으며, Fig. 10의 (b), (c)에서는 덤푼을 관찰할 수 있다. Fig. 10 (d)에서는 버튼(button) 현상이 일어나면서 덤푼이 형성 되었음을 알 수 있다.

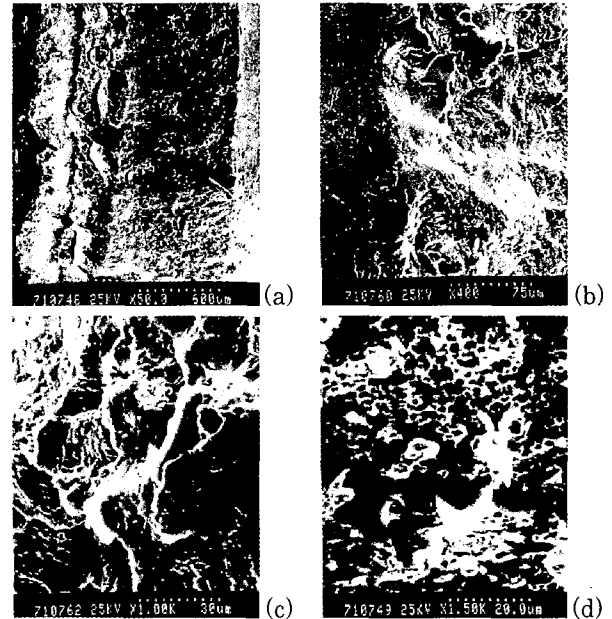


Fig. 10 SEM fractographs of fracture surface
(a) Overview of fracture surface
(b), (c) End part of fracture surface
(d) Center part of fracture surface

4. 결 론

펄스형 Nd:YAG 레이저에 의한 인코넬 600 판에 인코넬 690 슬리브를 삽입 후에 용접 실험 및 인장-전단 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펄스형 Nd:YAG 레이저의 실험변수를 활용하여 균열과 기공이 거의 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.
2. 용융부 중심에서의 경도는 모재보다 약 20% 정도 증가하였으나 용융부의 경계면에서 취성을 유발시키는 높은 경도값을 나타나지 않았다.
3. 실험 범위에서 첨두출력이 증가함에 따라 접합폭은 미미하게 증가하는 경향을 보이며, 평균출력이 증가함에 따라 접합폭은 실험 범위에서 거의 비슷한 크기를

보이고 있다.

4. 용접부의 인장-전단강도는 310MPa에서 440MPa 사이의 값을 갖고 있으며, 접합폭이 0.65에서 최대값을 갖는 것을 알 수 있었다. 모재 인장-전단 강도의 60%에 해당하는 값을 지녀 강도가 다소 부족하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. W. M. Steen: Laser Material Processing, Springer-Verlag, 1991, pp. 23-37.
2. J. Wilson and J. F. B. Hawkes: Lasers Principles and Applications, 1987.
3. C. Dawes: Laser Welding, Abingtion Publishing, 1992, pp. 16-30.
4. 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, 1996, may, pp. 162/s-170/s.
5. 장용, 전병철, 김재도, 정진만, 김철중: 펄스형 Nd:YAG 레이저에 의한 Inconel 용접의 기계적 특성 연구, 대한용접학회 97춘계학술대회, 1997, pp. 99-101.
6. E. Pierson and J. Stubbe: 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, 1993, pp. 697.
7. 김철중 외 11인: 레이저 가공 및 광계측 기술개발, KAERI/RR-1492/94, 1994, pp. 31-149.
8. S. Kou: Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, 1987, pp. 143-165.
9. W. Kurz, and D. J. Fisher: Fundamentals of Solidification, 3rd ed., Trans. Tech. Publications, 1989, pp. 48-55.