

펄스형 Nd:YAG 레이저빔을 이용한 인코넬 판재의 용접 특성

변진귀, 박광수, 한원진, 심상한

한국중공업(주) 기술연구원

Welding Characteristics of Inconel Plate Using Pulsed Nd : YAG Laser Beam

Jin Gwi Byeon, Kwang Soo Park, Won Jin Han, Sang Han Shim

ABSTRACT

The nuclear steam generators are subjected to corrosion environmental condition during operation that can result in stress corrosion in the tube wall. If any tube wall degradation is recognized, the tube must be repaired by plugging or sleeving. For the sleeving repair, Nd : YAG laser welded sleeving technology is one of the most promising when considering radioactive working conditions in the nuclear power plant. In this paper, the laser welding characteristics of steam generator tube and sleeve materials are investigated. The effects of average laser power, laser energy, welding speed, pulse duration and frequency are evaluated. Based on these results, Nd:YAG laser welded sleeving repair was applied to the degraded steam generator tubes in real environment.

Key Word : Inconel 600, Inconel 690, Laser welding, Steam Generator, Tube, Sleeve

1. 서론

내부식용의 Ni 기지 합금인 인코넬 600과 690은 고온에서의 높은 내산화성과 Cl 이온에 의한 응력 부식 균열의 저항성, caustic corrosion의 높은 저항성으로 인해 원자로 등의 고온 내부식성과 응력부식균열 저항성이 요구되는 곳에 많이 사용된다¹⁾. 특히 원자력 발전소의 증기발생기 전열관 소재로써 인코넬 600

이 주로 사용되고 있는데, 10년 이상 사용후 IGSCC(InterGranular Stress Corrosion Cracking), PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)등의 각종 결함들이 발생하고 있으며, 이러한 전열관에 결함이 발생하게 되면 방사능수가 유출될 위험이 있기 때문에 원자력 발전소의 안전성과 효율성을 고려하여 즉시 보수되어야 한다²⁾.

증기발생기 전열관의 결함을 보수하기 위해서는 전열관 결함부위에 인코넬 690의 재생 튜브를 삽입하고 밀봉 용접하여야 하는데 원자력 발전소의 특수성으로 인해 원거리 용접이 가능하여야 하며, 일반 아크 용접 방법으로 용접이 힘든 Ni 기지 합금의 심용입 용접 (Deep penetration welding)이 가능한 레이저 용접 기술을 사용하고 있다.

원거리의 레이저용접을 위해서는 레이저빔을 광파이버를 이용해서 전송하여야 하는데, 이러한 전송이 가능한 레이저에는 파장이 1.06(m인 Nd : YAG 레이저가 이용되고 있으며³⁾, 인코넬 600 전열관의 보수를 위해서는 펄스형 Nd : YAG 레이저를 이용하여 전열관 소재인 인코넬 600 합금과 보수에 사용되는 Sleeve 소재인 인코넬 690 합금 사이의 겹치기 심용입 용접성을 조사하여야 한다.

펄스형 Nd : YAG 레이저 용접에 있어서 중요한 변수로는 펄스폭, 반복율, 펄스에너지, 용접속도, 초점위치, 보호가스 유량 등이 있다⁴⁾. 인코넬 600과 690 합금의 양호한 레이저 용접 조건을 구하기 위해서는 이들 변수 각각에 대한 실험과 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 이를 위해서 평균출력 2kW 급의 Nd : YAG 레이저 용접 시스템(프랑스, Quantel사 IQL 60)을 이용하여 인코넬 600 / 690의 판재에 대해서 여러 용접 조건에 대한 겹치기 용접(lap welding) 실험을 실시하고 각각의 용접조건들이 용접성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 조직, 미세경도 및 전단강도 시험 등을 통해서 양호한 조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 레이저용접 헤드 제작

본 연구에서 인코넬 600과 690 판재의 용접

을 위해서 2kW Nd : YAG 레이저 시스템에 적합하도록 헤드를 설계 및 제작하였다. Fig. 1과 Fig. 2에 레이저 용접용 헤드와 인코넬 600과 690 판재의 레이저 용접 실험에 대한 개략도를 나타내었다. 레이저 용접용 헤드는 레이저빔의 전송을 위해서 광파이버를 이용하였으며, 전용 CNC 가공기에 부착하기 쉽도록 설계를 하였다. 또한 헤드 내부로 보조 가스가 유입되어 렌즈를 냉각하고, 동시에 용접 시편에 보호 가스가 주입되도록 하였으며, 미세한 먼지 및 스파터등으로부터 렌즈를 보호하기 위해 윈도우를 부착하였다. 초점 위치에서 집중된 레이저 빔의 직경은 0.8mm이며, 실험에는 TEM₁₀ 모드를 가지는 빔을 이용하였다.

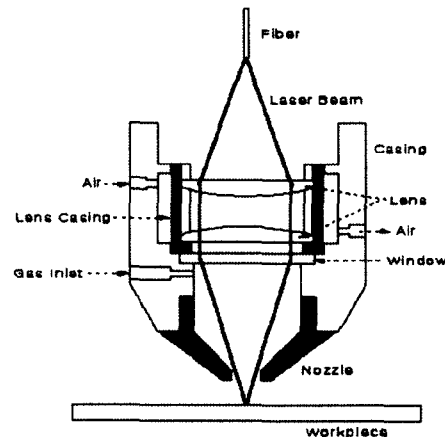


Fig. 1 Schematic diagram of laser welding head.

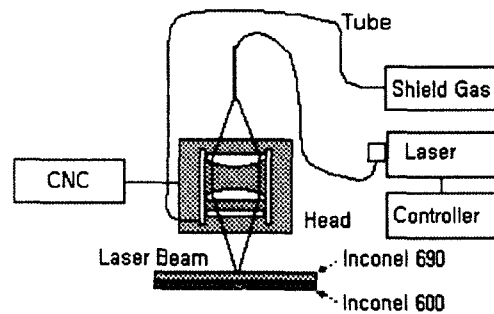


Fig. 2 Schematic diagram of experimental outline.

2.2 실험 방법

본 실험에 사용된 인코넬 판재의 크기는 150 × 25mm, 두께는 1.2mm이며 재료의 화학적 조성은 Table. 1과 같다.

시편의 전처리로서 시편 표면을 Emery paper #120까지 연마하였으며, 초음파 세척기를 이용하여 아세톤으로 10분간 세척하였다. 또한 판재 사이의 틈이 없도록 지그로 판재를 고정하고 실험을 하였다.

본 실험에 사용된 레이저 용접 변수들에 대한 범위를 Table. 2에 나타내었다. 초점의 위치는 판재 표면에 위치시켰으며 이때 노즐의 끝에서부터 표면까지의 거리는 7.5mm로 고정하였고, 용접 중 오염이나 산화를 방지하기 위해서 보호가스로 N₂를 사용하였으며 유량은 55 l/min로 실험하였다.

레이저 용접 실험 후 각각의 변수들(펄스폭, 반복율, 입사에너지, 용접속도)에 대해 마이크로 비전시스템(삼성항공, MW-200B)을 이용하여 용접부의 용입깊이를 나타내는 용입깊이(Penetration Depth)와 용접부의 상부에서 용융부의 폭을 나타내는 비드폭(Bead Width)을 검사하였고, 용접부와 열영향부의 열영향 정도를 알아보기 위해서 미세조직 검사와 마이크로 비커스 경도 측정을 실시하였다. 또한 접합 강도를 조사하기 위해서 Fig. 3과 같은 형상의 인장-전단강도 시험을 위한 시편을 제작하였으며, 이를 인스트론사의 만능시험기(모델 1128)를 이용하여 인장-전단강도 시험을 하였다. 인장-전단강도 시험에는 용접실험 변수들(펄스폭, 반복율, 입사에너지, 용접속도)에 대해 용입깊이와 비드폭을 검사한 결과로부터

심용입이 가능한 용접조건을 만족하는 조건들에 대해서 실시하고, 이를 모재 강도와 비교하였다.

Table. 2 Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690(Range. %).

Parameter	Range
Average Laser Power (W)	150 - 730
Laser Energy (J)	15.7 - 63.8
Speed (mm / min)	100 - 500
Pulse Duration (ms)	3 - 20
Frequency (Hz)	5 - 50
F / #, Focal Length(mm)	2, 6, 57.4
Shield Gas (l / min)	N ₂ , 55

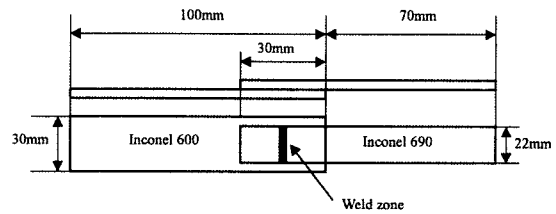


Fig. 3 Schematic diagram of tensile shear strength test specimen.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접변수의 변화에 따른 용입깊이, 비드 모양의 변화

Fig. 4는 레이저 출력이 600W로 일정할 때 용접속도 변화에 따른 용입깊이의 변화를 나타낸 그래프이고, Fig. 5는 각각의 용접속도 변화에 대한 용접부 단면 형상을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이, 용접속도가 증가할 수록 용입깊이가 감소하며, 이것은 용

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

	Ni	Cr	Fe	Mg	C	Si	S	P	Co	Cu	Mn	N
Inconel600	72	15~17	6~10	1	0.025~0.050	0.5	0.01	0.015	0.015	0.5	-	-
Inconel690	58	28~31	7~11	-	0.015~0.025	0.5	0.01	0.015	0.50	0.5	0.5	0.5

접속도가 증가할 수록 모재에 전달되는 단위 길이당 입열량이 감소되기 때문인 것으로 사료된다.

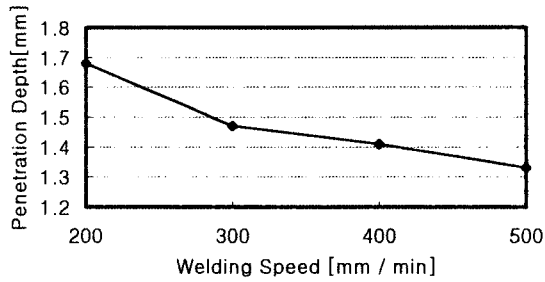


Fig. 4 Relationship between welding speed and penetration depth (power : 600W, Pulse Width : 4ms, Frequency : 40Hz)

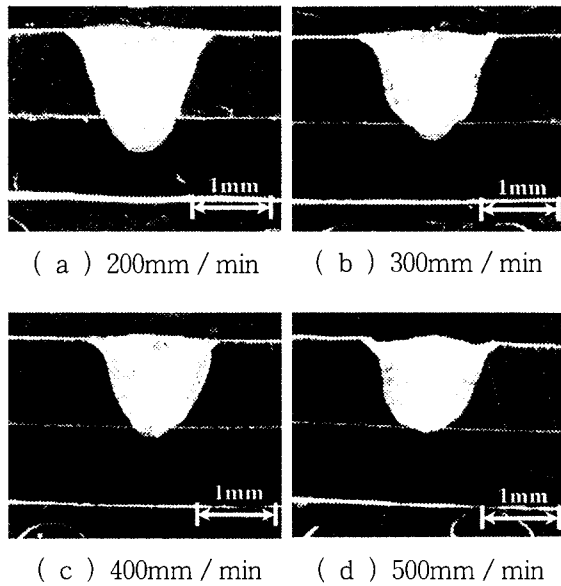


Fig. 5 Microstructures for welding speed.

Fig. 6에는 레이저 출력이 600W로서 일정할 때 반복율이의 변화에 따른 비드폭과 용입깊이의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 반복율이 클 수록 비드폭과 용입깊이가 감소되는 것을 알 수 있으며, 이것은 반복율의 증가에 따라 침투 출력과 펄스당 에너지의 감소 때문인 것으로

판단된다. 또한 반복율이 작을수록 스패터링 현상과 비드면이 거칠어진다는 타 연구결과와는 달리 본 실험에서는 특별한 차이가 발견되지 않았다.

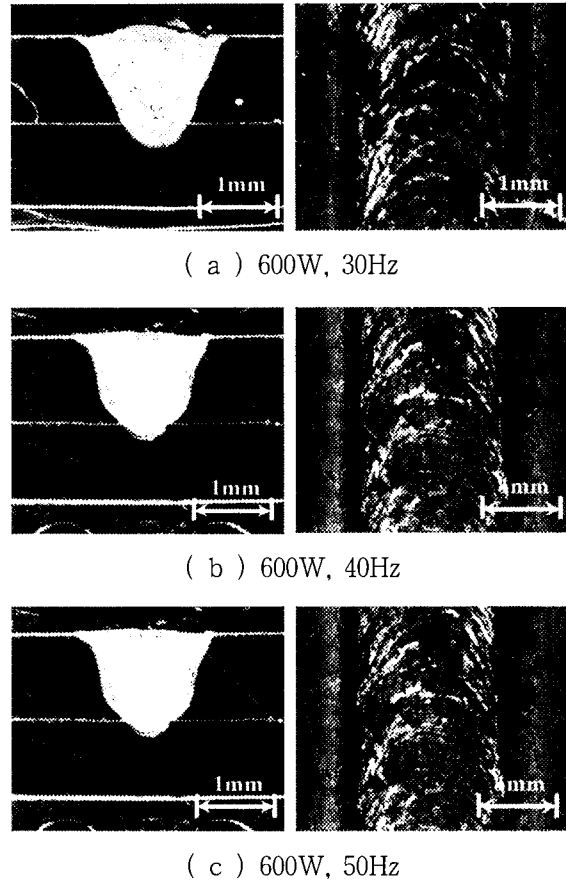


Fig. 6 Weld beads and microstructures for laser frequency.

Fig. 7은 레이저 출력은 300W, 용접속도를 300m / min으로 고정하고 펄스폭을 3ms에서 20ms로 변화시켰을 때의 비드폭과 용입깊이를 비교한 그래프이고, Fig. 8은 펄스폭의 변화에 따른 용접 단면과 비드의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 각 펄스폭에 대해 비드폭은 거의 비슷한 값을 보이나, 용입깊이는 완만하게 증가하여 10ms에서 최대 값을 나타내고 20ms에서 현저하게 감소함을

알 수 있다. 이러한 현상은 펄스폭이 증가할수록 레이저의 첨두출력이 감소하기 때문으로, 본 실험에서는 첨두출력 2.8kW에서 펄스폭 10ms가 가장 적절한 것으로 판단된다. 이것은 Nd : YAG 레이저에서 나타나는 현상으로 긴 펄스 형태에서는 용입 감소를 볼 수 있으며, 펄스모양이 처진 형태가 되어서 입사효

율을 저하시키기 때문으로 판단된다.

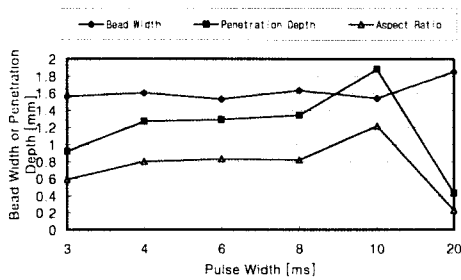
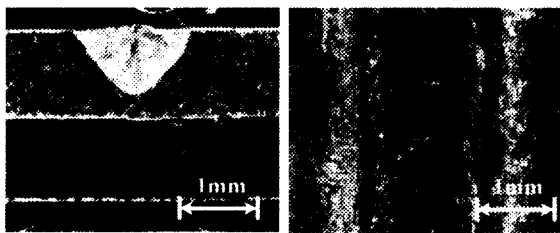
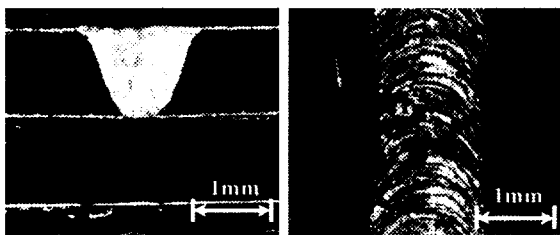


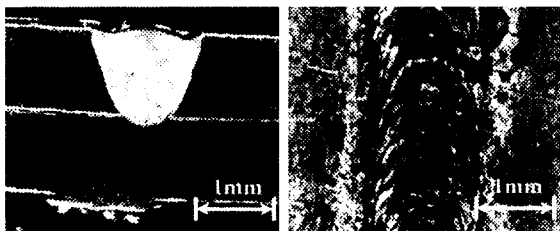
Fig. 7 Relationship between pulse width and bead width or penetration depth.



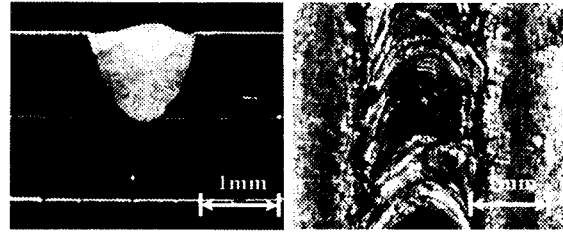
(a) 300W, 3ms



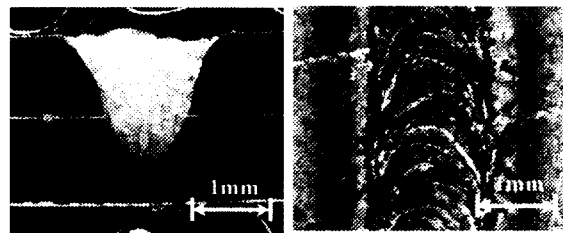
(b) 300W, 4ms



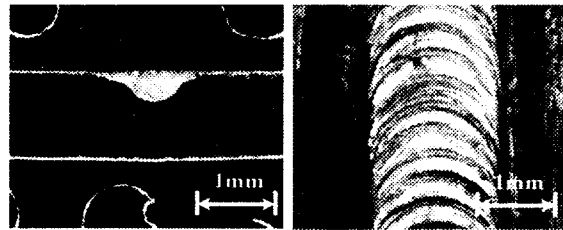
(c) 300W, 6ms



(d) 300W, 8ms



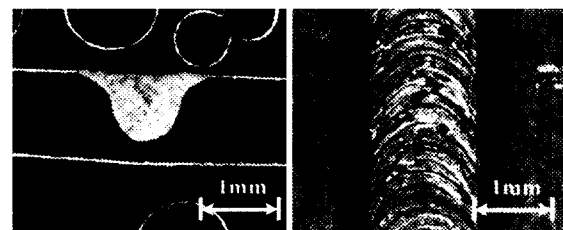
(e) 300W, 10ms



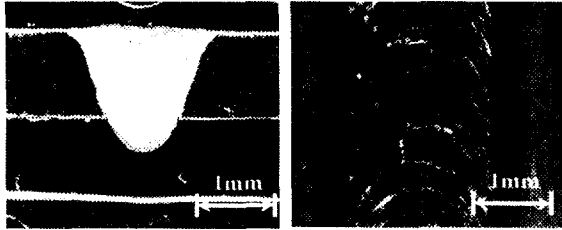
(f) 300W, 20ms

Fig. 8 Microstructures and beads for pulse width.

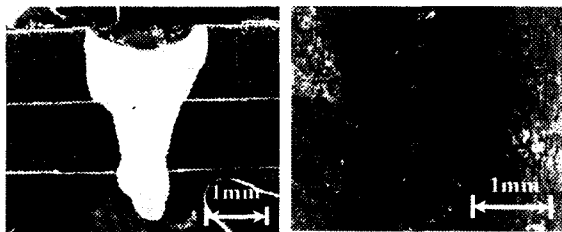
Fig. 9는 용접속도 200mm / min에서 레이저의 입사에너지의 변화에 따른 용접 단면의 양상을 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 입사에너지가 클수록 용입깊이가 증가하며, 입사에너지가 22.7J일 때 용입깊이



(a) Pulse energy : 19.1J



(b) Pulse energy : 22.7J



(c) Pulse energy : 27.4J

Fig. 9 Microstructures and beads for pulse energy.

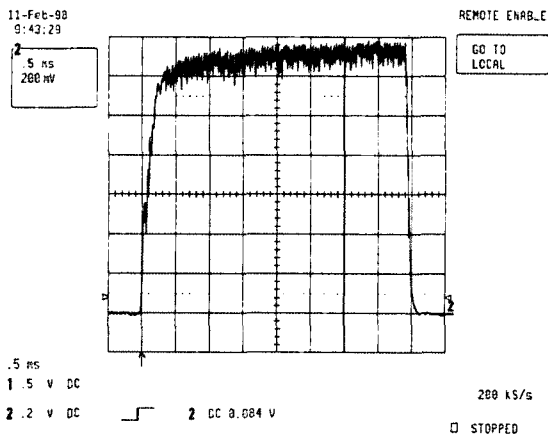


Fig. 10 Laser pulse(Pulse width : 4ms)

1.76mm를 나타내었다. Fig. 10는 이때 사용한 레이저빔의 펄스 모양을 나타낸 것이다.

3.2 심용입이 가능한 용접조건 선정

인코넬 600과690 판재의 두께는 각각 약 1.2mm이므로 전체두께는 2.4mm가 되며, 이들 상호간에 접합이 가능하기 위해서는 용입깊이가 1.4~2.0mm는 되어야 한다. 본 연구에서는

여러 조건에 대해서 레이저 용접 실험을 수행하였으며, 총89개의 용입이 발생한 용접 시편을 얻었다. Fig. 11는 이들을 비드폭과 용입깊이에 대해서 나타냈으며 위의 조건을 만족하는 조건에 대해서 사각형으로 표시했다.

이 조건을 만족하는 시편에 대한 단위 길이당 입열량[J/mm]과 Aspect Ratio(용입깊이/비드폭)와의 관계를 Fig. 12에 나타냈다. 그림에서 보듯이 단위길이당 입열량이 100 ~ 200J/mm의 영역에 존재하는 용접조건이 많았으며 Aspect Ratio는 0.8 ~ 1.4에 분포하고 있다. 이러한 분포 밀도를 바탕으로 용입깊이가 1.4~2.0mm가 되는 심용입(Deep penetration)이 가능한 용접 조건의 범위를 다음과 같이

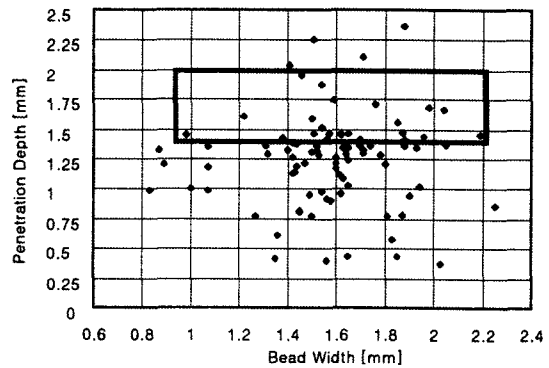


Fig. 11 Distribution of weld width and penetration depth in 89 laser welded specimens.

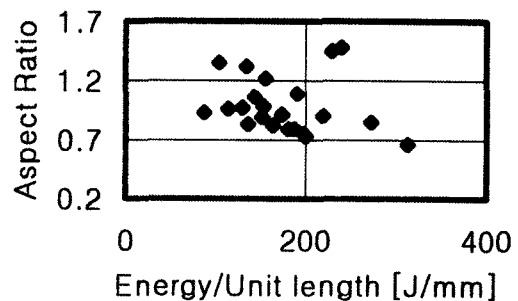


Fig. 12 Distribution of aspect ratio as a function of per unit length in selected 22 weld specimens.

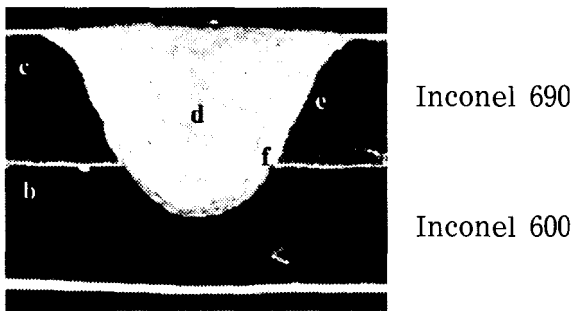
선정하였다.

즉, 용접 속도 200~500 mm/min, 펄스폭 4~10ms, 반복율 10~50Hz, 침투출력 1.7~4.1kW의 범위에 걸쳐 존재하였다

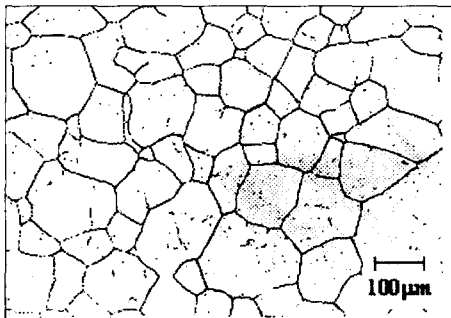
3.3 미세조직 및 미세경도 시험

용접부 및 열영향부의 건전성을 확인하고 열영향 정도를 관찰하기 위해서 광학현미경 (Union사, 모델9012)을 이용해서 인코넬 600과 690의 모재와 레이저 용접부 및 열영향부의 미세조직을 비교 관찰하였다.

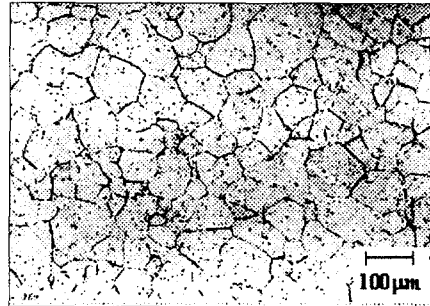
Fig. 13는 인코넬 600과 690 모재의 미세조직과 레이저 용접부와 열영향부 및 인코넬 600, 690 두 모재 사이의 경계부분에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 13의 (d)에서 볼 수 있듯이 용접된 모든 시편들에서 균열은 발생하지 않았고, 열영향부 (e)와 모재의 조직 (b), (c)를 비교해 볼 때 열영향부가 매우 적음을 알 수 있다.



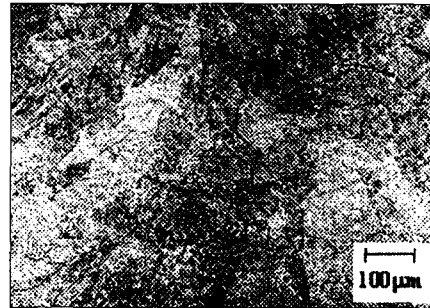
(a) Weld cross section



(b) Inconel 600



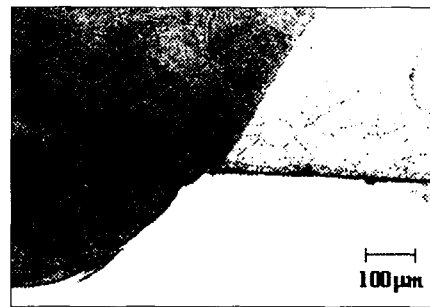
(c) Inconel 690



(d) Weld zone



(e) Heat affected zone



(f) Boundary

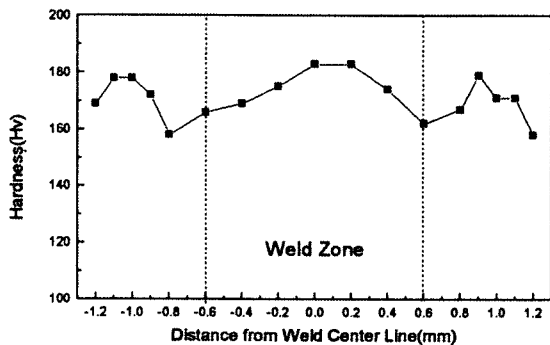
Fig. 13 Microstructure of weldments.

용접부, 열영향부 및 모재의 경도변화를 알아 보기 위해서 Akashi사의 AVK-C1 마이크로 비커스 경도 시험장비를 사용하여 시험하였다. 경도 측정시 하중은 0.2kg이었으며, 인코넬 600 과 690 판재 각각에 대해 표면으로부터 0.2mm 간격으로 용접비드의 중심으로부터 횡단면을 따라 측정하고, 또한 용접비드의 중심에 대해 수직으로 0.2mm 간격으로 측정하였다.

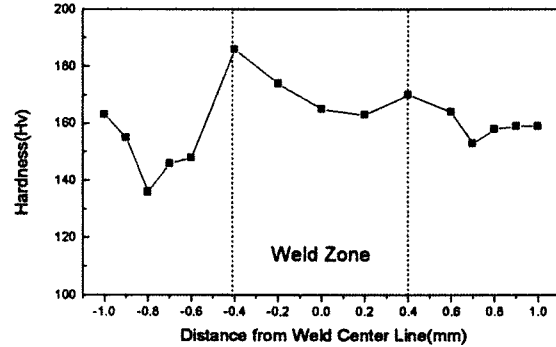
Table. 3은 용접부와 모재부분에서 미세경도의 평균값을 나타낸 것이며, Fig. 14는 양호한 용입현상을 보인 조건에 대한 미세경도 분포를 나타낸 것이다. 양호한 용입현상을 보인 시편의 용접부에서 미세경도의 평균값은 173(Hv)이었으며, 경계부에서도 취성을 유발시키는 높은 경도값은 나타나지 않는다. 또한 모재부분의 경도값이 용접부에 비해서는 낮고 열영향부에 비해서는 높은 값을 가지는 것으로 나타나고 있어 용접후에 후열처리가 필요함을 알 수 있다.

Table. 3 Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690(Range. %).

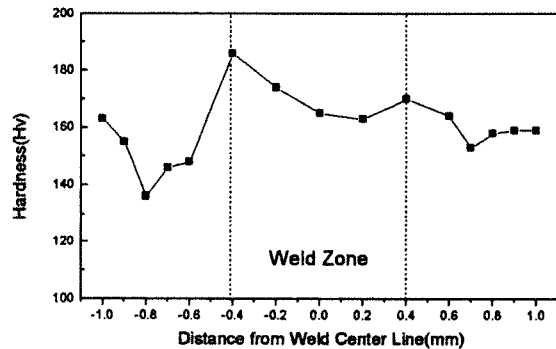
Position of hardness test	Average hardness(Hv)
Inconel 690	178
Inconel 600	168
Weld zone	173



(a) Inconel 690 Weld Zone



(b) Inconel 600 Weld Zone



(c) Distance for Axial Microhardness

Fig. 14 Distances for microhardness test (Duration 3 ms, Frequency 30 Hz, Power 454 W, Speed 200m/min, Flowrate 55 l/min).

3.4 인장-전단강도 시험

레이저 용접의 여러 조건들 중에서 접합이 이루어진 용입깊이가 1.4~2.0mm이고, 조직 및 경도 시험의 결과 용접부에 결함이 없는 조건들에 대해 14개의 인장-전단강도 시편들을 준비하여 시험하였다. Fig.15는 이들의 레이저빔 입사 에너지에 대한 인장-전단강도의 분포를 나타낸 것이다. 시험결과 레이저 용접된 시편의 인장-전단강도는 89~458Mpa까지 분포를 나타냈다. 모재인 인코넬 600과 690의

인장강도6)는 각각 552MPa과 765MPa로써 인장-전단강도의 최대값인 458MPa은 인코넬 600 모재의 70% 정도로서 접합강도로써 부족한 것으로 나타났다. 따라서 적절한 접합강도를 얻기 위해서는 1pass 용접으로는 부족하며 2pass 이상의 용접이 필요한 것으로 사료된다.

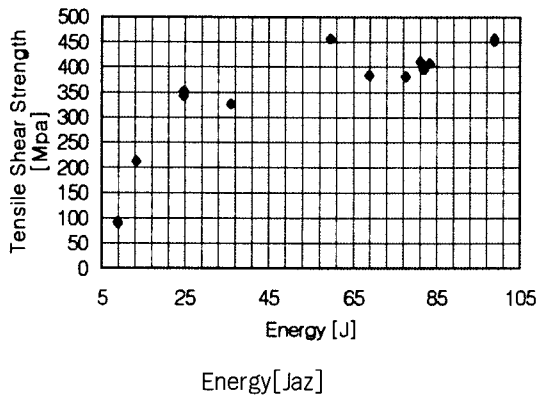


Fig. 15 Effect of energy on tensile shear strength.

4. 결론

펄스형 Nd : YAG 레이저를 이용한 인코넬 600과 690 판재를 조건별로 레이저 용접 시험한 후, 용입깊이, 비드폭을 측정하고 미세조직, 미세경도 및 전단강도 시험을 한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1. 용접속도가 증가할수록 용입깊이가 감소하고, 반복율이 클수록 비드폭과 용입깊이가 감소하였다. 펄스폭이 증가함에 따라 비드폭은 거의 비슷한 값을 나타내지만 용입깊이는 완만하게 증가하여 10ms에서 최대값을 나타내고 20ms에서 현저히 감소하였다. 입사 에너지의 증가에 따라 용입깊이는 증가하지만, 입사에너지가 과도할 경우에는 오히려 절단 등과 같은 결함이 발생하였다.
2. 인코넬 600 / 690 Plate의 접합이 가능한 용입깊이 1.4~2.0mm의 용접조건은 용접속도 200~500mm / min, 펄스폭 4~10ms, 반복율

10~50Hz, 침투출력 1.7~4.1kW의 범위에 걸쳐 존재하였다.

3. 양호한 용입현상을 보인 시편에서 용접부에서 미세경도의 평균값은 173(Hv)이었으며, 경계부에서도 취성을 유발시키는 높은 경도값은 나타나지 않았다. 또한 모재부분의 경도값이 용접부에 비해서는 낮고 열영향부에 비해서는 높은 값을 가지는 것으로 나타나고 있어 용접후에 후열처리가 필요하다.
4. 전단강도 시험의 결과 모재부 강도의 70% 이상을 나타내는 조건은 입사에너지가 30J 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Bala R Nair, "Laser make light work of sleeving", Nuclear Engineering International, Oct., 1993, p.26
2. "Guidelines for steam generator tubing specification and repair ", EPRI NP-6743-L, February (1991).
3. Takashi Ishide, Yasumi Nagura, Osa Matsumoto, Dadashi Nagashima, Takuya Kidera, Akira Yokoyama, "High power YAG laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants", Proceedings of LAMP 92, June (1992).
4. A. Yokoyama, T. Nagashima, O. Matsumoto, "YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants", The 5th International Symposium of the Japan Welding Society April, 1990, p.29
5. Metal Handbook Ninth Edition, Vol3, p.142