

증기발생기 전열관 슬리브 레이저 보수 용접부위 특성분석

정진만, 김민석, 박승규, 김철중
한국원자력연구소

요 약

원자력발전소의 전열관 보수용접기술은 원전시설의 수명연장을 목적으로 개발된 기술이며, 손상된 Inconel 600 전열관 내부에 Inconel 690 재질의 sleeve tube를 삽입한 후 용접을 하는 방법으로 수행된다. 증기발생기 전열관 sleeve 레이저 용접의 기본개념은 방사능지역 외부의 발전기로 부터 발진된 레이저 빔을 광섬유를 이용하여 장거리(200미터 이상) 전송하여 전열관 내부의 광학계 및 회전장치를 이용하여 전열관을 용접하는 방법이다.

본 연구에서는 펄스형 레이저의 용접 변수인 펄스폭, 반복율, 침투출력 및 용접속도를 변화시키면서 용입상태를 측정하였고, 용접된 시편에 열처리 여부와 부식실험을 위한 C-ring 시편을 제작하여 caustic test를 위해 auto-clave vessel에서 1,000 시간 실험을 실시하였다.

1. 서론

원자력 발전소 증기발생기의 전열관 보수용접에 광섬유를 결합한 Nd:YAG 레이저 용접기술을 이용하면, 기존의 가공방법(TIG 용접)에 비해 열변형이 적고 내부식성이 우수한 용접결과를 얻을 수 있다. 이런 레이저 용접은 ASME Boiler and Pressure Vessel code Sec. IX 와 XI(1,2) 요구에 부합되어야 한다

본 연구에서는 레이저 용접부위의 내구성 측정을 위하여, 1) 고리 1호기의 전열관 재질인 Inconel 600 tube 에 Inconel 690 sleeve pipe 를 삽입하여 용접실험을 수행하였고, 용접단면에 따른 레이저 용접조건을 분석 하였다. 2) 부식실험 중 caustic test를 위하여 레이저 용접된 sample을 보수현장에서 사용 가능한 방식으로 열처리(halogen lamp 이용)을 수행하였으며, C-ring 시편을 제작하였다. caustic test는 레이저 변수, 열처리 유무 및 제작된 C-ring 시편에 주어지는 stress 값에 따라 용접부위의 SCC(stress corrosion cracking)부식에 중요한 영향을 미치게 되는데, 본연구에서는 이러한 변수별 용접후면의 상태를 관찰하였다.

2. 용접장치 구성 및 실험 방법

Inconel 600 + 690 pipe 용접을 위한 실험장치는 그림 1 과 같다. 레이저 발진장치로는 펄스형 1 kW 급의 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 장거리 레이저 빔 전송을 위하여 직경 800um 광섬유(발진쪽)와 최종 용접부분에서는 직경 1,000 um 광섬유 광학계를 이용하여 연결 구성 하였다. 이때 구성된 광학계는 표 1 과 같다.

광섬유 장거리 전송을 위한 광섬유 연결 광학계에 용접부위의 용접상태를 감시하기 위한 감시광학계를 설치 하였다. 이 광학계에서는 용접부위에서 발생하는 빛을 파장별로 감시 분석하여, 용접깊이 및 용접폭의 상태를 실시간으로 감시하기 위한 것이다.

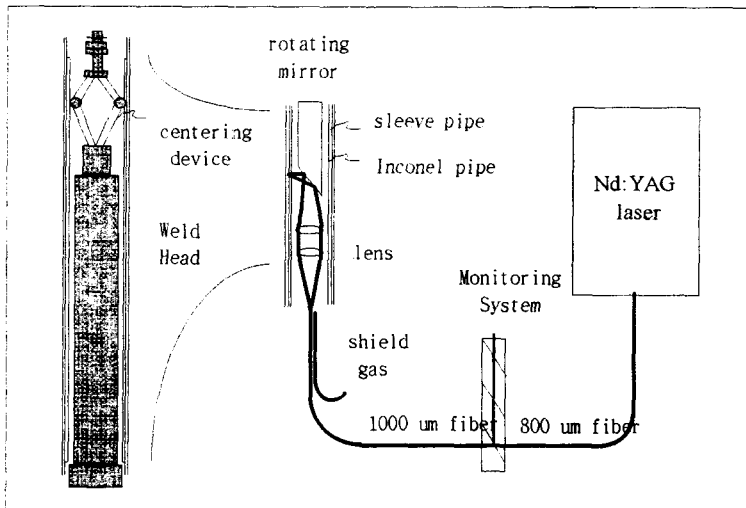


Fig 1. 실험장치 구성도

항 목	값	비 고
광섬유	SI(step index) 형	직경 1,000um
#F (광섬유 출구)	2.48	-
집속광학계	25+20 mm (x0.8)	재질 : BK7+SF6
copper mirror 반사율	80 %	-
보호가스	질소	유량 : 16리터/분

Table 1. 레이저 용접 tool 광학계

실험은 크게 두 개 분야로 나누어 1) 레이저 sleeve 용접이 양호한 대표적인 레이저 변수를 이용하여 용입깊이 및 bead 폭의 용접상태를 관찰하였다. 대부분의 용접변수는 첨두출력 3.4kW 이하, 펄스폭 4, 7, 12msec., 반복율 10, 20, 50 pps, 용접속도 207, 237, 280 mm/min.로 용접 회수는 1회 또는 2회로 변화시켜 실험하였다. 2) 용접부위는 증기발생기 운전상태하에서의 SCC에 대한 내구성이 검증 되어야 한다. SCC test를 위해 C-ring 시편을 제작하였으며, SCC 실험은 미국 ABB-CE 사에 위탁 수행중에 있다. 용접 부위의 stress 는 30,000psi을 가하여 auto-clave에 투입하였으며, auto-clave 의 운전 온도는 섭씨 400도, 압력 10,000psi, 운전 시간은 1,000시간을 수행 후 일부시편을 꺼내서 광학 및 전자현미경을 이용하여 분석 하였다. 나머지 시편은 2000 시간 test를 위해서 auto-clave에서 SCC 실험중에 있다.

3. 레이저 조사조건에 따른 용접결과

전열관(inconel 600:1.2mm)과 내부 sleeve(inconel 690:1.08mm) tube에 레이저 변수를 변화시켜 전열관 내부에서 외부로 레이저 빔을 조사하였다. 용접 후 용접면에서의 품질은 레이저 변수인 평균출력, 첨두출력 및 투입열량이 적을수록 유리하였으며, 용접면의 균질성등을 고려하여 용접변수를 정하여야 한다. 표 2 에서는 레이저 변수에 따른 용입 깊이 및 bead 폭의 분포를 표시 하였다. 용입비(aspect ratio)는 펄스폭이 클수록(12msec.) 안정적이고, 펄스폭이 짧을수록(4msec.)평균출력에 비하여 용입비는 적다. 이는 펄스폭을 적당히 증가시키면 용입깊이의 증가를 뜻한다. 1회전 용접에서는 펄스폭이 긴쪽이 유리하나 이때 많은 첨두출력이 요구된다. 2회전 용접에서는 평균출력을 적게한 2회전 용접이 1회전 용접보다 안정적이거나 투입 열량이 많으므로 열영향 부위가 넓을것으로 예상된다. 또한 펄스폭이 7msec.에서는 비교적 적은 평균출력으로 용입깊이 및 용입비의 변화가 적음을 알수 있었다. 따라서 에너지 투입 열량에서 보면 펄스폭 (12msec.)이 클수록 1회전 용접이 유리하고, 레이저의 평균출력면에서는 적당한 펄스폭(7msec.)에서 2회전 용접이 용입비가 안정적이다.

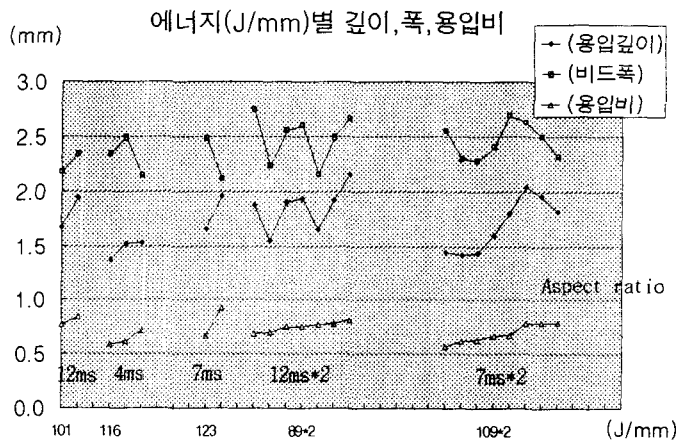
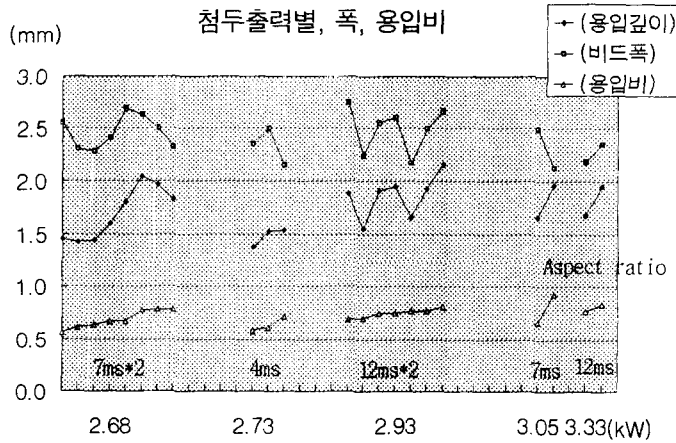
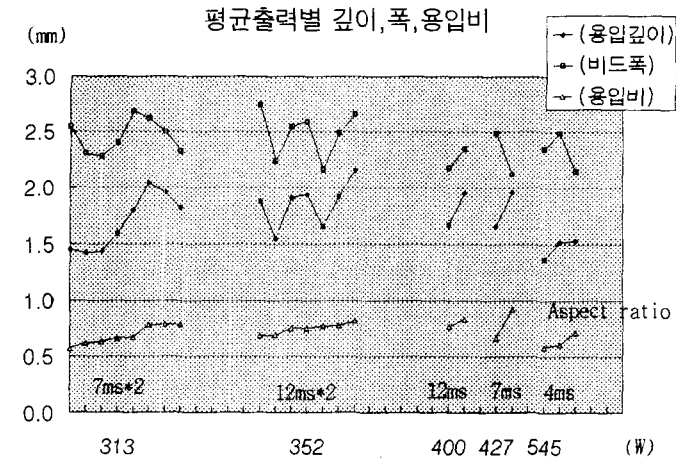


Fig 2. 용접조건에 따른 용입폭, 깊이 및 비

부식실험을 위한 C-ring 시편제작은 ASTM G-38에서 요구되는 규정으로 stress를 부여 하였다. 여기서 stress를 가하여 변화된 거리 delta는 다음과 같다.

$$\Delta = (f * \pi * D^2) / (4 * t * Z)$$

여기서 각 부분에 주어진 값은 표-2 와 같고, 30,000PSI stress 에 의한 변형거리(delta)는 0.005" 이다. 따라서 용접시편에 외경을 0.879"에서 0.874" 까지 줄이면 stress 는 30,000 PSI를 가해지게 된다.

항 목	값(inch)
D=Tube OD - Wall thk	0.878"-0.095"=0.784"
T=Wall Thickness	0.095"
E=Modulus of Elasticity	31x10 ⁶ PSI
Z=Corrosion Factor	0.92
Stress	30,000PSI

Table 2. C-ring 시편의 stress 조건

Caustic test를 위하여 12개의 시편을 auto-clave 에 투입하여 1,000시간 지난후 용접면을 관찰하였다. 대부분의 시편에 대한 전자현미경 사진에서는 SCC 균열이 발견되지 않았다. 다음 사진-1은 용접 부분에 30,000PSI 의 stress를 가하고 1,000 시간의 caustic test를 한 후의 대표적인 시편의 전자 현미경 사진이다.

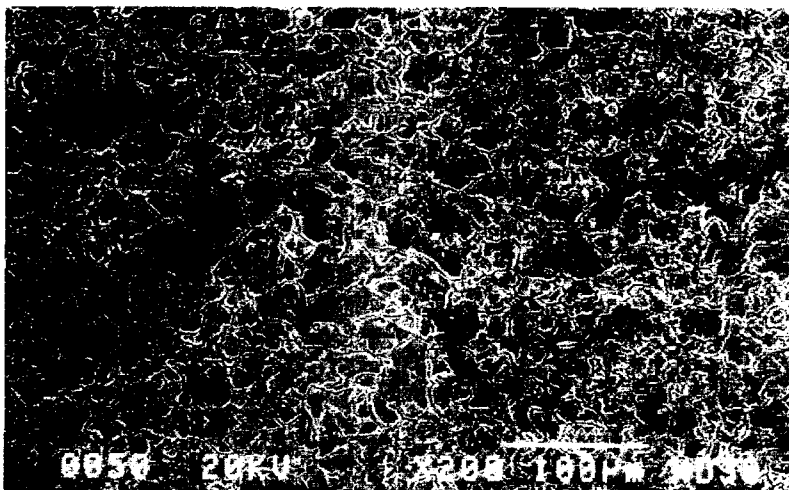


Photo 1. C-ring 시편용접부위의 현미경 사진

4. 결론

본 실험에서는 Inconel 600 + 690 pipe 내부에서 레이저 변수에 따른 외관상의 용입상태를 분석, 조사하였다. 전체적으로 볼때 레이저출력이 충분하면 평균출력, 펄스폭, 그리고 침투출력이 높은 상태에서 용접하는 것이 유리하였다. 그러나 협소한 공간에서의 용접변수의 증가는 안정적인 용접상태를 얻을 수 없었다. 용접횟수 변수는 1회전 용접보다는 2회전 용접에서 안정적인 용입상태를 얻었으나, 투입 열량이 많은 관계로 열영향 부위가 클것으로 생각된다. 따라서 첫번째 용접에서는 레이저 출력을 적게하고 2회째 용접에서 출력을 증가시키므로 보다 좋은 용접결과를 얻을수 있을 것이다.

용접부위에 30,000 psi stress를 가하고 1,000 시간의 caustic test을 한 부식실험 분석에서는 용접변수 및 열처리 유무에 따른 SCC 현상이 나타나지 않았다. 따라서 caustic test에서 더 높은 stress 와 많은 실험시간이 요구 된다.

1. ASME Code Section IX - Qualification Standard for welding and Brazing Procedures, Welder, Brazers, and welding Brazing Operators, New York, N.Y., 1992.

2. ASME Code Section XI - Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, New York, N.Y., 1992.

3. ASTM G-38 - Standard Practice for Making and Using C-ring Stress -Corrosion Test specimens, New York, N.Y., 1972