

Nd:YAG 레이저로 용접한 인코넬 600관과 인코넬 690의 C링 응력 부식시험

C-Ring Stress Corrosion Test for Inconel 600 Tube and Inconel 690 welded by Nd:YAG Laser

김재도*, 문주홍*, 정진만**, 김철중**

* 인하대학교, 인천, ** 한국원자력연구소, 대전

key words : Inconel 600 (인코넬 600), C-Ring stress corrosion test (C-Ring 응력 부식), Nd:YAG laser (Nd:YAG 레이저), Sleeve welding (슬리브 용접), Steam generator (증기 발생기)

Abstract

Inconel 600 alloy is used as the material of nuclear steam generator tubing because of its mechanical properties, formability, and corrosion properties. According to reports, the life time of nuclear power plants decreases because of the pitting, intergranular attack, primary water stress corrosion cracking(PWSCC), and intergranular stress corrosion cracking(IGSCC), and denting in the steam generator. The SCC test is very important because of SCC appears in various environment such as solutions, materials, and stress. The C-Ring specimen was made of the steam generator welded sleeve repairing by the pulsed Nd:YAG laser. In the corrosion environment, corrosion solutions are Primary Water, Caustic, and Sulfate solution and corrosion time is 1624~4877hr. The permitted stress is 30~60ksi.

In this C-Ring SCC test is the relationship between corrosion depth, crack and corrosion environment is evaluated. SCC was happens in Sulfate and Corrosion solution but doesn't happen in Primary Water. The corrosion time and stress is very affected by the severely environment of Sulfate or Caustic solution. The microstructure observation indicates that SCC causes intergranular failure in the grain boundary of vertical direction.

1. 서 론

우리나라에서 1978년도에 상업운전을 한 고리1호기를 시작으로 현재 가동중인 가압경수로형(Pressurized Water Reactor's) 증기 발생기 전열관의 재료로 Ni-Cr-Fe 합금인 인코넬 600이 사용되었다. 인코넬 600이 증기 발생기 전열관 재료로 채택된 이유는 설계상의 요구 사항을 만족시킬뿐 아니라 우수한 내부식 특성을 나타내기 때문이다. 일반적인 증기발생기의 설계수명이 30~40년이므로 장시간동안 가동하기 위해서는 전열관의 부식이 억제되어야 한다. 그러나 실제로는 공식(pitting), 입계부식(intergranular attack), 일차측 응력부식균열(primary water stress corrosion cracking), 이차측 응력부식균열(intergranular stress corrosion cracking), 덴팅(denting) 등의 여러 가지 부식손상이 유발되어 원자력 발전소의 효율적인 가동과 수명관리에 큰 위협 요인이 되고 있다.1) 증기발생기 전열관의 부식은 수질, 재료, 응력의 복합적 요소에 의해 응력부식 형태로 나타나므로 이들 조건을 고려한 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking) 특성평가는 매우 중요한 절차이다. 응력부식균열 시험에 사용되는 C-Ring 방법을 선택한 이유는 시험의 형태가 튜브이고 작은 치수가 요구되기 때문이다.2)

본 연구에서는 1kW급 펄스형 Nd:YAG 레이저를 전열관에 슬리브 보수용접을 하여 그 전열관으로 ASTM G 38을 참고로 하여 C-Ring 시편을 제작하였다.3) 이 C-Ring 시편에 적용되는 굽힘응력은 시편별 O.D(outer diameter) 변위(δ)에 따른 응력치로 구하였고4) 또한 부식 분위기는 증기발생기 전열관 1차측과 2차측 분위기인 Primary Water와 Caustic분위기 및 Sulfate분위기에서 시간의 변화에 따라 실험하였다. 여기서 부식환경에 따른 응력부식시험과 발생한 부식깊이 및 균열과의 관계를 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 시편은 원자력발전소의 증기 발생기 전열관에 사용되는 인코넬 600 튜브와 슬리브 보수용접에 사용되는 인코넬 690 튜브이다. 인코넬 600은 MA(mill annealing)된 두께 1.2mm, 외경 7/8"이며, 인코넬 690은 TT(thermal treatment)된 두께 1.2mm 외경 3/4"이다. 레이저 용접은 실험전에 인코넬 튜브를 아세톤으로 약 10분간 초음파로 세척하여 내부의 표면에 이물질들을 완전히 제거한 후 수행하였다. 이때 사용된 인코넬 튜브의 화학적 성분은 표 1과 같다. 슬리브 보수용접은 전열관에 직경이 작은 슬리브 관을 삽입한 후, 용접효율과 두 관의 열에 의한 팽창 및 전열효과를 높이기 위해 환관기를 사용하여 슬리브를 환관한다. 그 후, 용접장치를 삽입하고 광섬유를 통해 전송된 레이저빔을 이용하여 상단과 하단을 용접, 두 재료의 틈새를 막는 방법이다. 레이저 용접에 있어서 중요한 실험변수로는 첨두출력, 펄스폭, 반복율, 열처리 등이다.

C-Ring 시편은 ASTM G 38을 참고로 하여 전열관으로부터 절단가공하여 제작하였으며, 시편 치수는 외경 7/8", 두께 2.4mm, 폭 19.0mm이며, 일면은 60°로 잘라내었다. C-Ring 시편에 구멍을 뚫어 볼트와 너트로 굽힘응력을 주었다. 또한 실험에는 Rofin Sinar에서 제작한 평균출력 1kW급 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

응력부식시험은 미국 ABB사에 의뢰를 하여 수행하였다. 굽힘응력을 주기 위하여 스트레인 게이지를 설치하여 O.D(outer diameter)의 변형량(δ)을 측정하였고, 응력값은 인장시험을 한 시편의 항복응력(30ksi), 2배의 항복응력(60ksi), 그리고 0.2% offset 한 항복응력(55ksi)이다. 부식 분위기는 증기 발생기 전열관 1차측과 2차측 분위기인 Primary Water와 Caustic분위기 및 Sulfate분위기에서 시간의 변화에 따라 실험하였다. 허용응력은 30~60 ksi의 범위이고 348°C의 고온에서 각 부식시간은 1624~4877 시간이었다.

Table 1. Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690

Compositions Materials	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu
Inconel 600MA	75.1	15.4	8.0	0.01	0.1	0.3	-	0.001	-	0.2
Inconel 690TT	58.3	29.81	10.68	0.021	0.39	0.28	0.008	0.002	0.34	0.01

응력부식을 끝낸 C-Ring 시편에 대해서 부식깊이 및 균열을 관찰하기 위해서 SEM(scanning electron microscope)를 사용하였고 미세조직을 보기 위해서 광학현미경을 사용하였다. C-Ring 시편에서 분석부위는 응력을 가한 부위에서 80~100° 지점으로 다른 부위보다 변형율이 크다. 부식깊이 및 균열을관찰하기 위한 시편은 용접을 한 부위에 대해서 중방향으로 절단하고 외면을 연마하였다. 분석에 사용된 SEM은 model s-4200을 이용하였다. 또한 미세조직을 관찰하기 위한 시편은 부식된 표면을 제거하고 폴리싱을 하여 전해칭 하였다. 광학현미경은 배율 $\times 400$ 을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식환경에 대한 응력부식균열

그림 1에서 보는 바와 같이 Sulfate분위기에서는 심한 공식(pitting)이 발생하여 균열이 발생하였다. 시편 표면에 따라 공식이 많고 적음이 나타나 분석하는 부위마다 차이가 났다. 공식이 나타나지 않은 부위에는 부식깊이도 적고 균열도 나타나지 않았다. 그러나 공식이 있는 부위에는 표면에서 부식이 깊게 나타났으며 응력부식균열도 발생하였다. Caustic분위기에서는 표면전체에 검은 색을 띠는 부식층이 생겨났으며 응력부식 균열은 몇 개의 시편에서 발생되었다. 그림 2에 Caustic분위기에서 응력부식균열이 나타난 것을 볼 수 있다. 또한 그림 3에서처럼 Primary Water분위기에서는 거의 부식이 일어나지 않았다. 응력부식균열의 종류로는 입간파손(intergranular failure)과 입내파손(transeggranular failure)으로 구분되는데 그림 1과 그림 2에서 보여진 응력부식균열로는 확인할 수가 없었다.

3.2 부식시간에 대한 응력부식균열

실험에 주어진 부식시간에 관계없이 응력부식균열은 부식분위기에 따라 발생했으며, 부식시간이 길어지면 응력부식균열이 발생한 시편에서는 균열이 더 진행될 것이다. 또한 응력부식균열이 발생하지 않은 부식분위기에서도 균열이 나타날 수 있다고 본다.

3.3 부식응력에 대한 응력부식균열

30ksi 응력에서 보다 60ksi 응력에서 더 깊은 응력부식균열이 발생했으며 부식깊이는 관찰한 부위에 따라 차이가 났다. 55ksi 응력에서는 부식환경이 Primary Water라 응력부식균열은 기대할 수 없었고 시편표면이 검은 색으로 변하였다.

3.4 광학현미경으로 관찰한 미세조직

그림 4를 보면 결정입계를 따라 균열이 지나간 것을 볼 수 있다. 이것은 응력부식균열 중에 입간파손(intergranular failure)이며 층방향으로 침투한 것이라 생각된다. 시편은 Caustic분위기에서 시험한 재료이며 미세조직은 입계내에 쌍정이 분포하고 있으며, 이것은 열처리 중에 발생한 불연속적인 탄화물에 의한 것이다.5)



Fig. 1 Stress corrosion cracking in secondary environmental solution $\times 1800$.

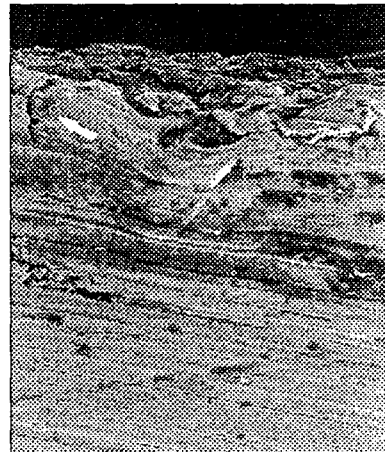


Fig. 2 Stress corrosion cracking in 10 percent NaOH solution $\times 1000$.

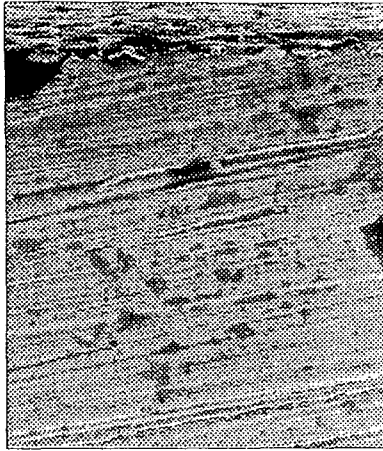


Fig. 3 Corrosion state in primary water ×2000.

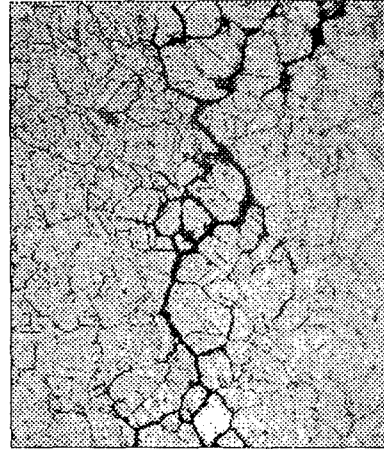


Fig. 4 Intergranular stress corrosion cracking in secondary environmental solution ×400.

4. 결 론

본 연구에서는 C-Ring 응력부식시험에서 부식조건에 따른 부식 깊이와 균열의 상관관계를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응력부식균열은 Sulfate 및 Caustic 분위기에서 발생했으며, Primary Water에서는 발생하지 않았다.
2. 부식시간과 응력은 부식 분위기에 서로 상호관계가 있어서 Sulfate 및 Caustic 분위기 등의 가혹한 조건에서는 크게 작용하지만 Primary Water 등에서는 약하게 작용하였다.
3. 광학 현미경으로 관찰한 미세조직에서는 응력부식균열이 긴 세로방향으로 결정입계를 따라 발생된 입간파손이었다.

5. 참고 문헌

1. R.Douecke, S.Odar and B.Stellway, "Operating Experience with Steam Generators", Service Report Power Plants, 1989, p.4
2. "Stress Corrosion Testing", ASTM-STP-425, American Society for Testing and Materials, 1967, p.3
3. "Standard Practice for Making and Using C-Ring Stress Corrosion Test Specimens", ASTM G 38-73, 1995
4. S.O.Fernandex and G.F.Tisinai, "Stress Analysis of Unnotched C-Rings Used for Stress Cracking Studies", Journal of Engineering for Industry, Vol.90, 1968, p.147-152
5. "인코넬 합금의 기계적 특성 평가", 한국원자력연구소, 1996, p.28-33