

Nd:YAG 레이저로 용접한 Inconel Tube의 C링 응력부식시험

C-Ring Stress Corrosion Test for Inconel Tube Welded by Nd:YAG Laser

인하대학교 기계공학과 김재도, 문주홍
한국원자력연구소 정진만, 김철중

I. 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 요구사항을 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 시편의 형태가 튜브이고 작은 치수가 요구되기 때문이다.^[2]

본 연구에서는 1kW급 펄스형 Nd:YAG 레이저를 전열관에 슬리브 보수용접을 하여 그 전열관으로 ASTM G 38-73을 참고로 하여 C-Ring 시편을 제작하였다.^[3] 이 C-Ring 시편에 적용되는 굽힘응력은 시편별 O.D(outer diameter) 변위(δ)에 따른 응력치로 구하였고^[4] 또한 부식 분위기는 증기발생기 전열관 1차측과 2차측 분위기인 primary water와 caustic solution 및 sulfate solution에서 시간의 변화에 따라 실험하였다. 여기서 부식환경에 따른 응력부식시험과 발생한 부식깊이 및 균열과의 관계를 평가하였다.

II. 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 표면

에 이물질들을 완전히 제거한 후 수행하였다. 이때 사용된 인코넬 튜브의 화학적 성분은 Table. 1과 같다. 슬리브 보수용접은 전열관에 직경이 작은 슬리브 관을 삽입한 후, 용접효율과 두 관의 열에 의한 팽창 및 전열효과를 높이기 위해 확관기를 사용하여 슬리브를 확관한다. 그 후, 용접장치를 삽입하고 광섬유를 통해 전송된 레이저 빔을 이용하여 상단과 하단을 용접, 두 재료의 틈새를 막는 방법이다. 레이저 용접에 있어서 중요한 실험변수로 침투출력, 펄스폭, 반복율, 예열처리를 사용하였다.

C-Ring 시편은 ASTM G 38-73을 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 C-Ring 시편에서 최대인장시험을 받는 부분에서 구하였다. 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 caustic solution 및 sulfate solution에서 시간의 변화에 따라 실험하였다. 허용응력은 30~60 ksi의 범위이고 348°C의 고온에서 각 부식시간은 1624~4877 시간이었다.

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 67.5~112.5° 지점으로 다른 부위보다 변형율이 크게 받는 부위이다.^{[5]-[6]} 부식깊이 및 균열을 관찰하기 위한 시편은 용접을 한 부위에 대해서 종방향으로 절단하고 외면을 마운팅하여 연마지로 단계별로 연마한다음 0.05 μ m 알루미나 파우더로 최종 연마하였다. 에칭은 5%의 Nital용액(메탄올 95%+질산 5%)을 사용하여 7V에서 약 60초간 전해에칭 한 후 메탄올로 세척하여 드라이어로 건조시켰다. 분석에 사용된 SEM은 model s-4200을 이용하였다. 광학현미경은 배율 $\times 200$, $\times 400$ 을 이용하여 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 응력부식균열에 미치는 부식액의 영향

Fig. 1(a)에서 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 띄는 부식층이 생겨났으며 응력부식균열은 몇 개의 시편에서 발생되었다. Fig. 1(b)에 caustic분위기에서 응력부식균열이 나타난 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2(a)에서 처

럼 primary water분위기에서는 거의 부식이 일어나지 않았다. 응력부식균열의 종류로는 입간 파손(intergranular failure)과 입내파손(transgranular failure)으로 구분되는데 Fig. 1(a)과 Fig. 1(b)에서 보여진 응력부식균열로는 확인할 수가 없었다.

3.2 응력부식균열에 미치는 부식시간의 영향

응력부식시험은 모두 일정한 응력을 준 상태에서 시험을 하였고 시간의 변화에 따라 SCC에 미치는 영향은 부식용액에 따라 차이가 있었다. 2931 시간의 primary water와 1624 시간의 sulfate solution을 비교해보면 시간은 짧지만 부식분위기가 강한 sulfate solution에서 SCC가 발생되고 부식도 심하였다. Caustic solution에서는 시간에 관계없이 SCC가 발생되었고 부식깊이 및 균열의 길이는 시간에 비례하여 증가함을 보였다.

3.3 응력부식균열에 미치는 부식응력의 영향

부식응력은 원자력발전소의 증기발생기 전열관 사용압력의 15~30배의 응력을 사용하였으며, 응력부식시험의 시간을 단축하기 위하여 가혹한 응력을 사용하였다. 부식응력은 primary water에서는 영향을 크게 미치지 않았으며, caustic 이나 sulfate solution에서는 부식분위기가 심하여 부식응력이 SCC에 함께 작용하였다. 부식응력이 클수록 SCC 균열은 더 깊게 시편내부에 침투하였다.

3.4 용접부의 응력부식 관찰

3.4.1 침투출력에 대한 응력부식 특성

침투출력은 1.9~3.53kW범위에서 사용하였고 전체적으로 SCC가 관찰되었으며 침투출력 2.94~3.0kW 범위에서 부식균열이 적었다. 최소, 최대 침투출력에서 용접을 한 HAZ부위에서는 부식균열이 많이 발생한 것으로 보아 용접이 끝나고 나서 냉각을 하는 과정에 조직이 부식균열에 예민화 된 것으로 보인다.

3.4.2 펄스폭에 대한 응력부식 특성

펄스형 Nd:YAG 레이저라 펄스폭에 대해서도 응력부식 특성을 평가하였다. 펄스폭은 4ms, 7ms, 12ms로 용접실험을 하였고 부식균열에 대하여 각각의 특성을 관찰하였다. 부식균열에 대해서는 펄스폭 12ms가 적은 예민화 반응을 보였으나 SCC는 시편표면에서 관찰되었다. 7ms, 4ms 순으로 부식균열에 큰 예민화 반응을 보였으며 펄스폭 4ms에서는 용접부와 HAZ 경계사이에 용접균열이 발생하였다. Fig. 2(b)는 7ms에서 발생한 부식균열이다.

3.4.3 반복율에 대한 응력부식 특성

반복율은 14pps, 20pps, 50pps로 용접실험을 하였다. 반복율과 펄스폭을 함께 결합하여 실험을 하였기 때문에 부식균열에 대하여 나타난 특성은 같은 결과를 보였다. 다시 말하면 4ms-50pps, 7ms-20pps, 12ms-14pps로 실험을 하였다. 펄스의 반복이 많아질수록 부식균열에 대한 예민화 특성이 더 크게 작용을 하여 영향을 준 것으로 보인다.

3.4.4 예열처리에 대한 응력부식 특성

레이저 용접을 하기 전에 C-Ring 시편에 예열처리를 하였다. 예열처리를 하는 목적은 냉간 균열(cold crack)을 예방하고 잔류응력(residual stress), HAZ에서의 정도, 변형(distortion)을 감소시키는데 있다. 예열처리 유무에 따라 부식균열에 대한 특성을 평가하였는데 다른 변수보다 큰 영향을 주는 요인이었다. 예열처리는 국부적으로 하기 위해 낮은 출력의 레이저로 튜브내부에서 사용하였고 대기중에서 서냉시켰다. 예열처리는 부식환경에 따라 부식균열에 영향을 미치는 경향이 틀리기 때문에 이 실험에서도 평가를 하였다. Sulfate solution에서는 예열처리에 따른 시편의 용접부를 비교해 보면 예열처리를 한 시편에서 부식균열에 큰 영향을 주었다. SCC도 관찰되었으며 부식된 부위도 넓게 분포하였다. Primary water에서는 예열처리를 하지 않은 시편에서 부식균열에 큰 예민화 반응을 보였으며 HAZ부근에서 부식균열이 관찰되었다. 또한 caustic solution에서는 예열처리를 안 한 시편이 다소 차이가 있지만 부식균열에 양호하였다.

IV. 결 론

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

1. 주어진 부식시간에서 부식환경이 primary water인 C-Ring 시편에서는 SCC가 관찰되지 않았고 가혹한 부식환경인 sulfate solution과 caustic solution에서 SCC가 관찰되었다.
2. 부식시간의 변화에 따라 SCC에 미치는 영향은 부식용액에 따라 차이가 있었다. 2931 시간의 primary water와 1624 시간의 sulfate solution을 비교해보면 시간은 짧지만 부식분위기가 강한 sulfate solution에서 SCC가 발생되고 부식도 심하였다.
3. 부식응력은 primary water에서는 크게 영향을 미치지 않았으며, 부식분위기가 가혹한 caustic 이나 sulfate solution에서는 응력이 SCC를 발생시키는데 함께 작용하였다. 부식응력이 클수록 SCC 균열은 더 깊게 시편내부에 침투하였다.
4. 슬리브 보수용접을 하는 용접변수 중에서 침투출력은 2.94~3.0kW, 펄스폭과 반복율은 12ms-14pps, 예열처리는 부식용액에 따라 차이가 있지만 안하는 편이 더 부식균열에 양호하였다.

V. 참고 문헌

- [1] R. Douecke, S. Odar and B. Stellway, "Operating Experience with Steam Generators", Service Report Power Plants, p.4, (1989)
- [2] "Stress Corrosion Testing", ASTM-STP-425, American Society for Testing and Materials, p.3, (1967)
- [3] "Standard Practice for Making and Using C-Ring Stress Corrosion Test Specimens",

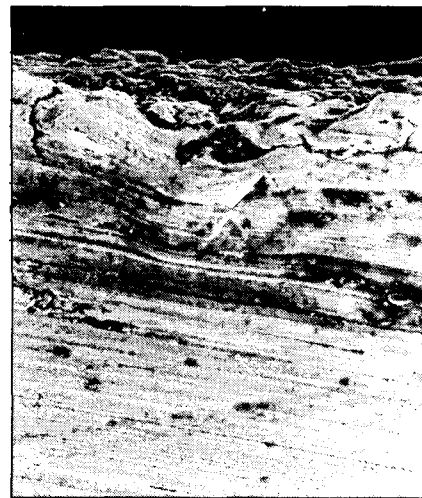
- [4] S. O.Fernandex and G. F. Tisinai, "Stress Analysis of Unnotched C-Rings Used for Stress Cracking Studies", Journal of Engineering for Industry, Vol.90, p.147-152, (1968)
- [5] S. O. Fernandex and G. F. Tisinai, "Stress Analysis of Unnotched C-Rings Used for Stress Cracking Studies", Journal of Engineering for Industry, Vol.90, pp.147-152, (1968)
- [6] 김우곤 외, "응력부식균열 시험을 위한 C-Ring 시편의 응력 정량화", 한국부식학회지, Vol.26 No.6, pp.476-485, (1997)

Table 1. Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690

Composions 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



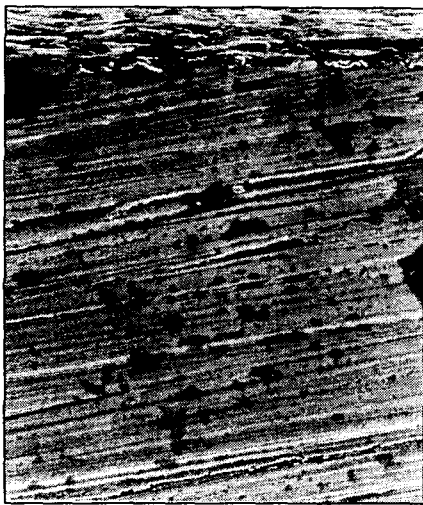
(a)



(b)

Fig. 1 SEM micrograph showing the corrosion after immersion in corrosion solution ; (a) SCC after pitting in sulfate solution at 60ksi for 1624hr, (b) SCC in caustic solution at 60ksi for 2008hr

solution at 60ksi for 2008hr



(a)



(b)

Fig. 2 SEM micrograph showing the corrosion after immersion in corrosion solution ;
(a) corrosion section part in primary water at 55ksi for 2931hr, (b) corrosion crack in caustic solution at 60ksi for 2869hr