

< 기술논문 >

원전 증기발생기 레이저 클래딩 보수부위 잔류응력 해석

한원진[†] · 이상철* · 이선호**

Residual Stress Analysis of Laser Cladding Repair for Nuclear Steam Generator Damaged Tubes

Won-Jin Han, Sang-Cheol Lee and Seon-Ho Lee

Key Words : Residual stress(잔류응력), Laser Cladding(레이저 육성용접), Nuclear Steam Generator(원전 증기발생기), Repair(보수)

Abstract

Laser cladding technology was studied as a method for upgrading the present repair procedures of damaged tubes in a nuclear steam generator and Doosan subsequently developed and designed a new Laser Cladding Repair System. One of the important features of this newly developed Laser Cladding Repair System is that molten metal can be deposited on damaged tube surfaces using a laser beam and filler wire without the need to install sleeves inside the tube. Laser cladding qualification tests on the steam generator tube material, Alloy 600, were performed according to ASME Section IX. Residual stress analyses were performed for weld metal and heat affected zone of as-welded and PWHT with SYSWELD software.

1. 서 론

원전의 증기발생기 전열관은 원전 기기 중 1 차측과 2 차측의 압력경계를 이루는 기기로서, 결함이 발생하여 성장할 경우 방사성 물질이 함유되어 있는 1 차측의 냉각수가 누설될 수 있다. 따라서 원전의 안전성에 큰 영향을 미치는 핵심 기기 중 하나로서, 전열관의 결함 보수는 원전에서 해결해야 할 중요한 문제로 취급되고 있다.

국내 원전 증기발생기 전열관 보수에 적용된 바있는 수압확관 방식 관재생 보수기술은 전열관의 결함 발생 부위에 재생관을 설치한 후 정밀 수압확관하는 공정으로서 결함부위 밀봉효과가 떨어지며 재생관의 추가로 인한 증기발생기 효율이 감소할 수 있다. 또한 보수 후 재결함이 발생할 경

우, 재 보수 공정의 적용이 불가능하다.

본 연구에서 개발한 와이어 송급 레이저 클래딩보수 장치는 재생관을 사용하지 않고 결함 부위를 직접 보수 하기 때문에 수압확관식 보수 기술의 문제를 해결할 수 있다. 또한 레이저 빔을 열원으로 하므로 비교적 낮은 열응력으로 균열과 같은 결함을 leak-tight 하도록 보수 할 수 있다.

레이저 클래딩 보수의 장점에도 불구하고 여전히 허용용접에 기인한 잔류응력의 발생은 문제이다. 잔류응력이 존재하면 운전 중 SCC 의 발생이 우려되므로 이에 대한 해소는 반드시 필요하다.

본 연구에서는 레이저 클래딩 보수 후의 잔류응력 분포에 대해 SYSWELD 를 사용하여 알아보고 잔류응력 해석을 위한 용접후열처리 공정에 대해서 검토하여 보았다.

[†] 책임저자, 회원, 두산중공업 기술연구원
E-mail : wonjin.han@doosan.com
TEL : (055)278-3763 FAX : (055)278-8525

* 두산중공업 기술연구원

** 두산중공업 기술연구원

2. 레이저 클래딩 보수 장치

그림 1 은 개발된 원전 증기발생기 전열관 레이저 클래딩 보수 시스템의 전체 구성도이다. 전열관 레이저 클래딩 보수 시스템은 크게 레이저 빔 출력부, 각종 작업 공구 제어부, 전열관 내부 레이저 클래딩 작업 공구로 구성된다. 레이저 클래딩 작업공구 이외 클래딩 보수 전, 후 전열관 세척장치, 레이저 클래딩 후열처리 장치, 레이저 클래딩 부 UT 검사 장치가 있다. 모든 작업은 전용 로봇에 의해 수행된다.

연구 대상으로 선정한 증기발생기 전열관은 HTMA(High Temperature Mill Annealing) Alloy 600 으로서 외경이 19.05mm, 두께가 1.07mm 인 세관이다. 전열관 내부에서 레이저 클래딩을 위해서는 작은 직경의 전용 레이저 헤드의 개발이 필수적이다.

작은 직경의 전열관 내에서 와이어 레이저 클래딩을 위해서는 첫째, 직경이 작은 레이저 빔 스폿 내로 일정한 속도의 와이어가 정확히 송급되어야 한다. 둘째, 흠, 스페터에 의해 광학계가 손상되어서는 안된다. 셋째, 전열관 내면 둘레 전체를 보수하기 위해서는 일정한 속도로 360° 회전하면서 상하 이동이 가능하여야 한다. 개발된 장치는 이와 같은 사항을 고려하여 설계 제작되었다.

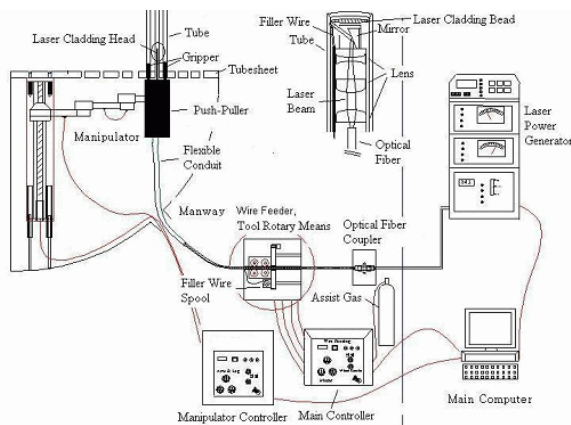


Fig.1 Laser cladding repair system for steam generator damaged tubes

3. 레이저 클래딩 잔류응력 해석

3.1 해석방법

용접 잔류응력 해석은 대표적인 열, 기계적 특성, 유동 특성, 금속 미세조직 특성 등이 모두 고려되어야 하는 유한요소 응력해석을 사용 하여야 한다. 이런 조건을 가장 잘 만족하는 상용 해석 소프트웨어로는 ESI사에서 개발한 SYSWELD가 알려져 있으며 전열관 레이저 클래딩 잔류응력 해석에 사용하였다. 본 해석에 사용한 것은 SYSWELD 2008 version 이며 형상 모델링은 ESI사의 Visual Mesh 4.0을 이용하였다. 잔류응력해석은 용입깊이의 영향, 응력제거 열처리 조건의 영향에 대해 수행하였다. 아래는 해석을 수행한 조건을 정리한 것이다.

- 용입깊이에 따른 잔류응력 변화 : 0.2, 0.4, 0.6, 0.8mm
- 잔류응력 제거 용접 후열처리 후 변화 : 온도(750, 800, 850, 900, 950, 1000℃), 시간(5, 10, 60min)

전열관 레이저 클래딩 보수부의 모델 Drawing을 위한 기본적인 조건들을 아래에 정리하였다.

- 4개 model : 용입 깊이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8mm
- 패스간 중첩도 : 75%
- 한 패스의 크기는 Macrostructure 기준
- 전체 보수 폭 : 25mm

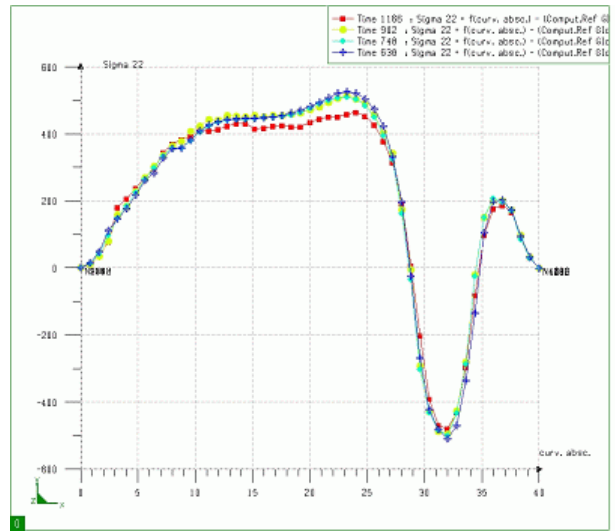
Mesh 생성에는 2차원 축대칭법(2D Axisymmetry)과 Quad & Tri Mixed 방법이 사용되었다. 각 모델의 총 요소(element) 수는 5,560~6,155개이며, 1개 요소의 최소 크기는 약 1mm이었다.

3.2 해석결과

그림 2는 전열관 레이저 클래딩의 용입깊이에 따른 전열관 축방향 응력(σ_{22})의 해석 결과이다. 4가지 모델 모두 전열관 OD의 경우가 ID보다 높은 잔류응력 분포를 볼 수 있다. 최대 응력은 0.8mm 용입깊이 모델에서 526MPa이다. 전열관 ID에서는 Multi-Pass 용접의 마지막 패스에서 가장 높은 응력 분포가 관찰된다. 그림 28은 전열관 ID와 OD 각각의 표면에서의 용입깊이 별 축방향 응력 분포이다. 이때 x축은 모델의

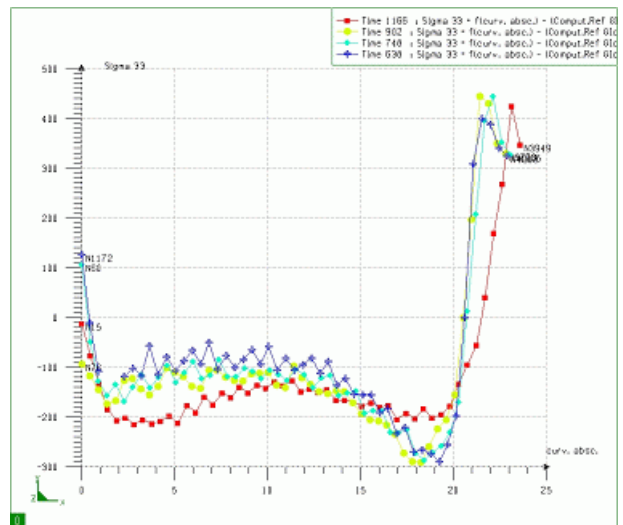
상단에서 하단으로의 길이를 의미한다. 그림 28 에서 볼 수 있듯이 용입깊이별 응력 변화는 크지 않지만 용입깊이가 증가함에 따라 약간의 응력 상승이 관찰된다. ID 표면에서 최대 응력은 마지막 패스에서 관찰되며 280 ~350MPa 의 분포를 볼 수 있다. OD 표면의 경우는 레이저 클래딩 중간 부위에서 가장 높은 응력값이 나타났고 400~500MPa 의 분포를 가진다.

그림 3 은 전열관 레이저 클래딩의 용입깊이에 따른 전열관 원주방향 응력(σ_{33})의 해석 결과이다. 4 가지 모델 모두 전열관 ID 의 마지막 패스에서 가장 높은 잔류응력 분포를 볼 수 있다. 최대 응력은 0.2mm 용입깊이에서 633MPa 으로 나타났다. 그림 30 은 전열관 ID 와 OD 각각의 표면에서의 용입깊이 별 원주방향 응력 분포이다. 전열관 ID 표면의 경우 마지막 패스에서 높은 인장 잔류응력 값이 나타났지만, 나머지 패스에서는 압축 잔류응력을 볼 수 있다. 최대 인장 잔류응력값은 각 용입깊이별로 400~440MPa 범위였다. 전열관 OD 표면의 경우 용입깊이 증가에 따라 증가된 응력값을 볼 수 있다. 0.2mm 용입깊이의 경우 대부분 압축잔류응력이 관찰된다. 최대 인장 잔류응력은 Multi-Pass 시작점과 끝점에서 관찰되며, 0.8mm 용입깊이 모델에서 최대 360MPa 을 볼 수 있다.

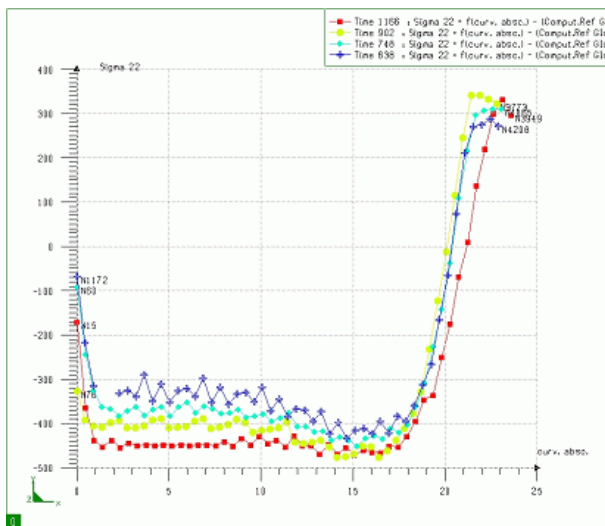


(b) OD

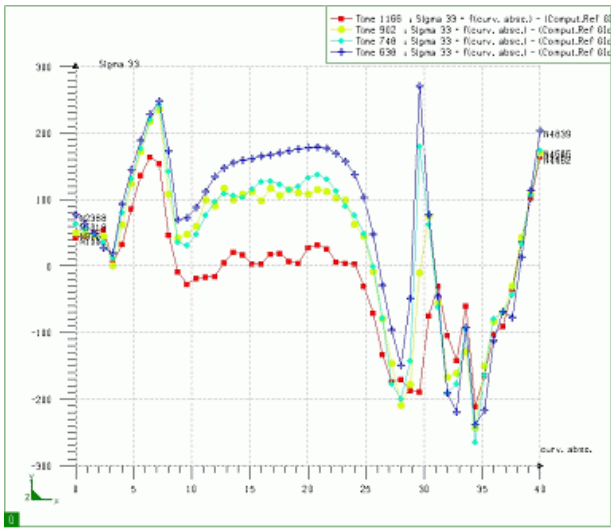
Fig.2 Axial stresses for ID and OD surface of tubes after laser cladding repair



(a) ID



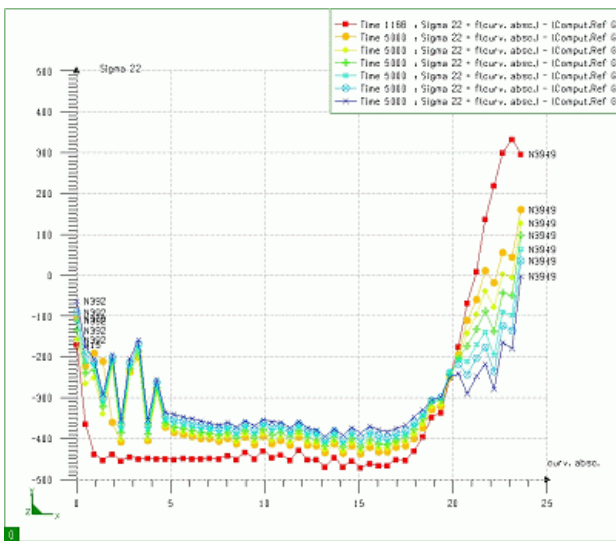
(a) ID



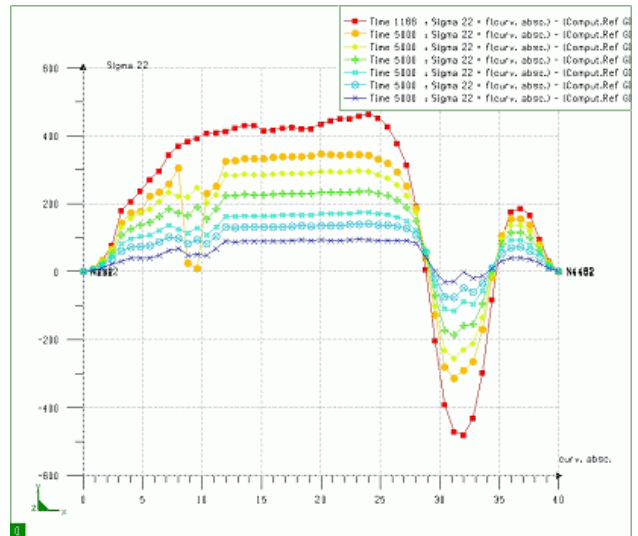
(b) OD

Fig.3 Circumferential stresses for ID and OD surface of tubes after laser cladding repair

그림 4 는 열처리 온도의 증가에 따른 0.2mm 용입깊이 모델의 축방향 잔류응력의 변화를 해석한 결과이다. 열처리 시간 변화와는 달리 열처리 온도의 증가에 따라 최대 인장잔류응력은 전열관 ID, OD 표면 모두 감소한다. 전열관 ID 표면의 경우 열처리 전 약 350MPa 의 최대 인장잔류응력이 750℃ 이상에서 약 170MPa 이하로 떨어짐으로서 Alloy 690 의 항복강도 이하 값을 보였다. OD 표면의 경우는 열처리 온도 850℃ 이상에서 Alloy 600 모재의 항복강도 이하 값을 나타내었다.



(a) ID



(b) OD

Fig.4 Axial stresses for ID and OD surface of tubes after stress relief heat treatment of laser cladding repair(Effect of heat treatment temperature)

4. 결론

- (1) 전열관 축방향의 응력해석 결과, ID 표면에서는 마지막 패스에서 280~ 350MPa 의 최대 인장응력이 관찰되었다. OD 표면은 레이저 클래딩 부위 대부분에서 높은 응력이 관찰되었으며 용입깊이별로 400~ 500MPa 의 최대 인장응력이 나타났다.
- (2) 전열관 원주방향의 응력해석 결과, ID 표면에서는 축방향과 마찬가지로 마지막 패스에서 400~440MPa 의 최대 잔류응력을 보였다. OD 표면은 0.8mm 이하의 용입에서는 비교적 낮은 인장잔류응력을 보였으나 0.8mm 용입의 경우 350MPa 의 최대 인장잔류응력이 관찰되었다.
- (3) 응력제거열처리 시간은 잔류응력 변화에 큰 영향을 미치지 않았고 응력제거열처리 온도 증가에 따라서는 큰 감소를 보였다.
- (4) 0.2mm 용입 모델의 경우, 응력제거열처리 온도 750℃ 이상에서 축방향 ID 표면의 최대 인장잔류응력이 모재 항복응력 이하로 떨어졌으며, 축방향 OD 의 경우 850℃ 이상에서 떨어졌다. 원주방향의 경우 ID, OD 모두 750℃ 이상에서 최대 인장잔류응력이 모재 항복응력 이하로 감소하였다.

참고문헌

- (1) Bala Nair, “Steam generator replacement and repair technology continues to advance”, Nuclear Engineering and Design, April, 1997, pp.25~28
- (2) Hisamoto F., et al, “ Laser cladding technology to small diameter pipes”, Nuclear Engineering and Design 195, 2000, p.289