

노내 및 국부 후열처리에 의한 잔류응력 완화 거동 평가

이 승 건[†] · 김 종 성 · 진 태 은* · P. Dong

A Study on Weld Residual Stress Relaxation by furnaced and local PWHT Procedures

Seung Gun Lee, Jong Sung Kim, Tae Eun Jin and P. Dong^{**}

Key Words: Furnaced PWHT(노내 후열처리), Local PWHT(국부 후열처리), Residual Stress(잔류응력), Relaxation(완화), Creep (크리프), Heating Band(히팅 밴드)

Abstract

In this paper, we established baseline information and insight on residual stress relief mechanism associated with furnaced and local PWHT(post weld heat treatment) operation. Based on FEM analysis results, we suggested that furnaced PWHT stress relief mechanism was based on creep relaxation and local PWHT stress relief mechanism involved complicated interactions between plasticity and creep. In case of furnaced PWHT, significant stress relaxation was occurred in the early stage of PWHT. In case of local PWHT, stress relaxation magnitude was increased as PWHT time increased. Finally, We have proposed that detailed furnaced and local PWHT procedure, and qualification criteria to support current codes of practices.

1. 서 론

일반적으로 후열처리(PWHT, postweld heat treatment)는 용접이 완료된 용접부를 대상으로 잔류응력을 완화시켜 피로강도 특성 및 부식저항성을 향상시키고 저하된 연성(ductility) 및 인성(toughness)을 회복시키기 위한 목적으로 수행되며, 크게 노내(furnaced) 후열처리와 국부(local) 후열처리로 구분한다. 노내 후열처리는 가열물 대상이 균일한 온도로 가열되는 방법으로 소형 기기 제작시 적합하며, 국부 후열처리는 대형 압력용기나 건설현장의 배관 설치시 적합한 방법이

다. 이러한 후열처리시에는 대상 용접부에 적합한 후열처리 온도와 유지시간의 설정이 매우 중요하다. 이는 후열처리 온도 및 유지시간에 따라 금속 미세조직이 변화하여 항복강도가 저하되거나 석출물의 조대화(coarsening)로 인해 파괴인성이 저하될 수 있기 때문이다.

관련 기술기준[1]에 의하면 대상 기기의 두께가 두꺼워질수록 장시간의 후열처리 유지시간을 요구하고 있으나 만약 열처리 초기 단계에서 잔류응력이 급격히 제거된다면 장시간의 열처리는 비효율적일 수 있다[2]. 또한 기술기준에 의하면 국부 후열처리시 가열부와 비가열부와의 온도 구배를 완만하게 유지하도록 규정하고 있으나 이를 위해 사용되는 히팅밴드(heating band)와 보온재(insulation)의 폭에 대한 구체적인 지침은 제시되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 현재 기술기준을 보완하여 후열처리를 효율적으로 수행할 수 있도록 하

[†] 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

E-mail : gun@kopec.co.kr

TEL : (031)289-4472 FAX : (031)289-3189

* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

** Battelle Memorial Institute

기위하여 관련 유한요소 해석을 수행하고 후열처리시 잔류응력이 완화되는 주요 원인을 확인하였으며 유지시간에 따라 잔류응력이 완화되는 정도를 평가하였다. 또한 국부 후열처리시 히팅밴드와 보온재 폭을 변화시켜 잔류응력 완화 해석을 수행하여 이들 폭이 잔류응력 감소에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화 해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화 기구를 확인하기 위해 사용된 2.25Cr-Mo강 배관 협개선(narrow gap) 용접 모델로 총 19개의 용접 패스로 구성되어 있다. 해석시 사용된 고온유동 재료물성은 Fig. 2와 같으며 후열처리 온도이력은 Fig. 3과 같다.

크리프 거동의 중요성을 확인하기 위해 크리프 거동을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대해 잔류응력 완화정도를 평가하였고, 이때 크리프 재료거동은 오메가 크리프 법칙[3]을 사용하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 코드를 사용하였고 실제 용접 과정을 모사하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 요소 생성법을 사용하였다.

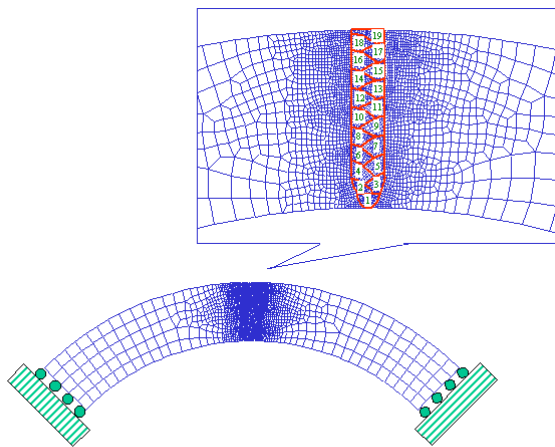


Fig.1 FE models for 2.25Cr-Mo weld

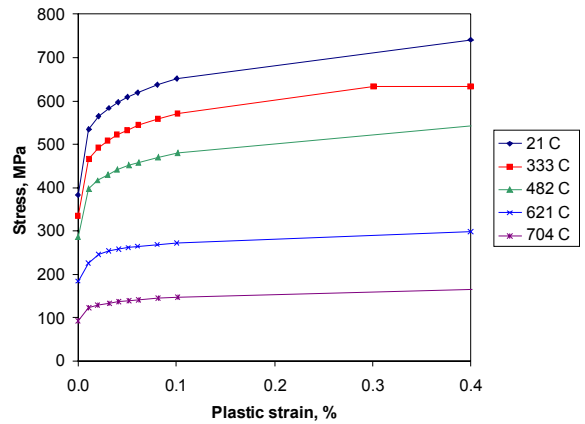


Fig. 2 Plastic behavior of 2.25Cr-Mo steel

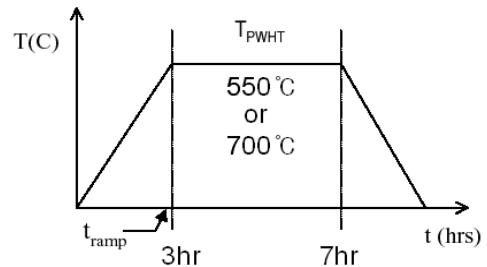


Fig. 3 Uniform PWHT Procedure

2.2 해석결과 및 고찰

Fig. 4(a)는 용접 잔류응력 해석결과를 제시한 것으로 용접후 용융부 표면에는 원주방향으로 약 600MPa의 인장잔류응력이 발생되었다. Fig. 4(b)는 크리프 거동을 고려하지 않고 후열처리 해석을 수행한 결과로, 그림에서 보듯이 기발생된 용접 잔류응력이 거의 줄어들지 않음을 알 수 있다. 반면에 크리프 거동을 고려하여 해석한 결과인 Fig. 4(c)의 경우 용융부 표면의 원주방향 잔류응력이 약 180MPa로 용접 잔류응력이 초기값보다 약 70% 감소되었음을 알 수 있다. 이때 소성거동(deformation plasticity)에 의한 영향을 확인하기 위해 시간에 따른 유효 소성변위(equivalent plastic strain)를 확인한 결과 Fig. 5와 같이 후열처리 온도 및 유지시간의 변화와 상관 유효 소성변위는 일정하였다. 그러므로 노내 후열처리시 소성거동은 잔류응력 완화와 관련이 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 후열처리 유지시간에 따른 잔류응력 변화 거동을 나타낸 결과로 잔류응력은 가열 후 2시간 정도까지는 선형적으로 완만히 감소하였고

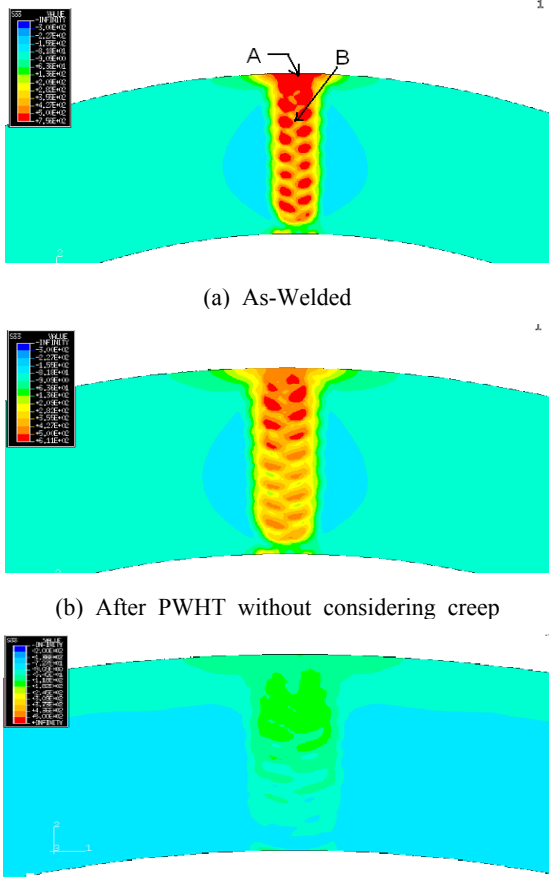


Fig. 4 Longitudinal residual stress distributions before and after PWHT(700°C)

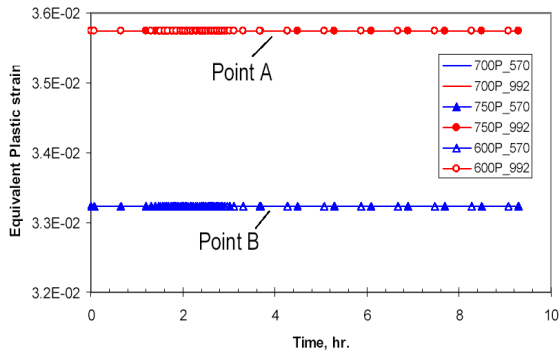


Fig. 5 Equivalent plastic strain history during PWHT at various PWHT Temperatures at A and B

이후 후열처리 목표온도에 도달할 때까지 급격히 감소하고 있다. 목표온도에 도달한 후 종료시점까지는 잔류응력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 크리프 거동에 대한 영향을 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 후열처리 시간에 따른 크리프 변위 거동을 확인하였다. Fig. 7에서 보듯이 가열후

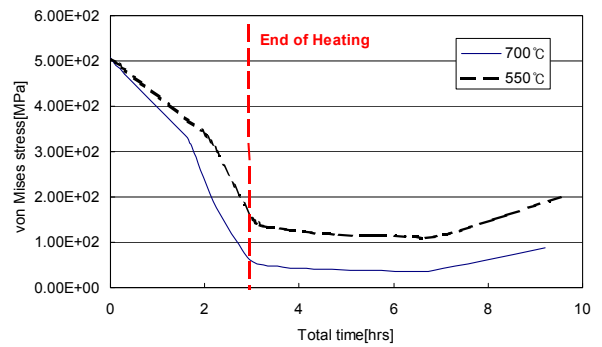


Fig. 6 von-Mises stress history during PWHT at position B

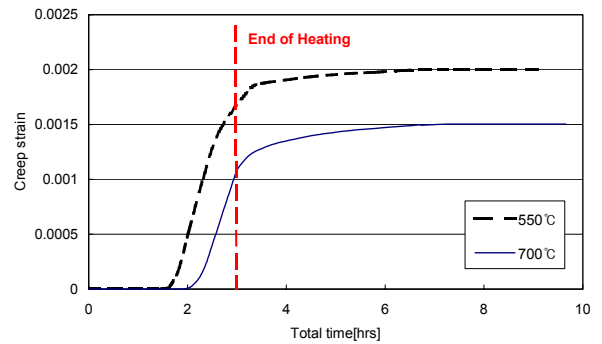


Fig. 7 Effective creep strain during PWHT at Position B

2시간까지는 크리프 변위가 없으며 이후 목표온도에 도달할 때까지 급격히 증가하다가 목표온도에 도달한 후에는 거의 일정한 변위 값을 보이고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 종합해 보면 노내 후열처리 초기 단계에서는 온도증가에 따른 재료의 항복강도 저하에 의해 잔류응력이 완화되며 이후 크리프 거동에 의해 잔류응력이 완화된다고 설명할 수 있다. 또한 크리프 거동에 의한 잔류응력 완화 정도는 후열처리 목표온도에 도달할 때까지는 매우 크나 그 이후에는 그 정도가 매우 미약하다고 할 수 있다. 따라서 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화는 주로 크리프 거동에 기인하며, 잔류응력의 완화가 노내 후열처리의 주요 목적이라면 후열처리 시간을 단축하여도 원하는 특성을 얻을 수 있다는 사실을 확인하였다.

3. 국부 후열처리에 의한 잔류응력 완화 해석 3.1 해석모델

Fig. 8은 국부 후열처리시 사용된 2.25Cr-Mo강 모델형상을 나타낸 것이다. 앞에서와 마찬가지로

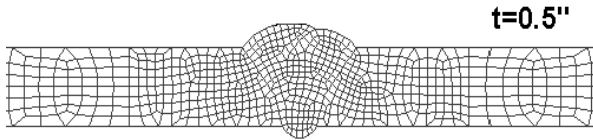


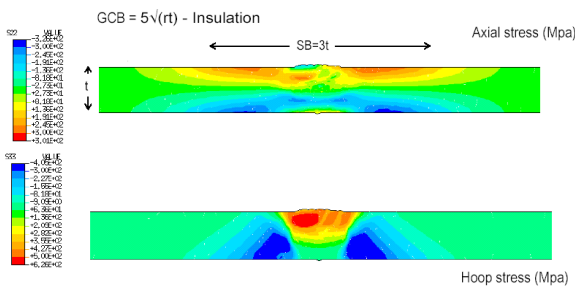
Fig. 8 FE models for 2.25Cr-Mo weld

크리프 거동을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 히팅밴드와 보온재의 폭을 변화시키면서 잔류응력 완화해석을 수행하였다.

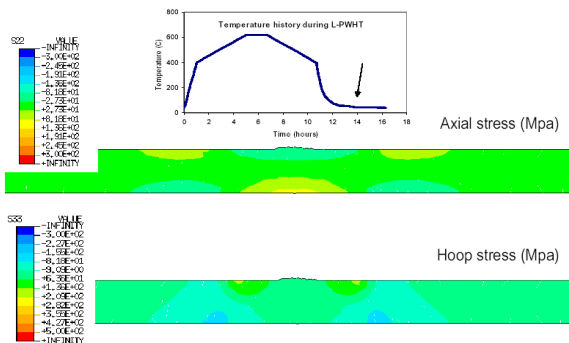
3.2 해석결과 및 고찰

3.2.1 잔류응력 완화기구 고찰

Fig. 9(a)는 용접 잔류응력 해석 결과로 축방향 잔류응력 분포의 경우 용접부를 중심으로 국부적인 굽힘 형태를 보이고 있다. Fig. 9(b)는 Murakawa[4]의 연구결과에 따라 최소 히팅밴드의 폭을 3t, 보온재의 폭을 $5\sqrt{(rt)}$ 로 설정하여 국부 후열처리를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 잔류응력이 매우 큰 폭으로 감소했음을 확인할 수 있다. 이때 작용된 완화기구를 확인하기 위해 크리프 거동을 고려하지 않고



(a) As welded residual stresses(local bending type)



(b) After local PWHT

Fig. 9 Residual stresses before and after local PWHT considering both thermoplasticity and creep relaxation

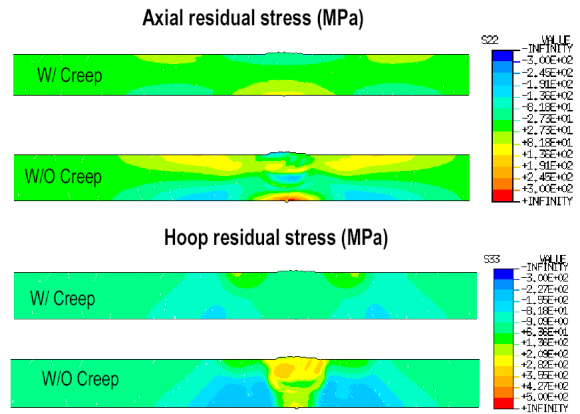


Fig. 10 Residual stresses after local PWHT : with and without considering creep

해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 그림에서 보듯이 크리프를 고려하지 않은 경우에도 소성변형에 의해서 잔류응력이 현저하게 완화되므로 국부 후열처리에서는 노내 후열처리와는 달리 소성변형과 크리프 거동 모두가 잔류응력을 완화시키는 인자임을 알 수 있다.

3.2.2 히팅밴드 폭에 따른 영향 고찰

Fig. 11은 보온재의 폭을 $5\sqrt{(rt)}$ 로 고정된 상태에서 히팅밴드의 폭을 3t, 10t로 변화시켜 국부 후열처리 해석을 수행한 결과를 제시하였다. 그림과 같이 국부 후열처리를 수행함에 따라 상부에는 압축응력이 지배적이고 하부에는 인장응력이 지배적인 굽힘형태의 잔류응력 분포를 보인다.

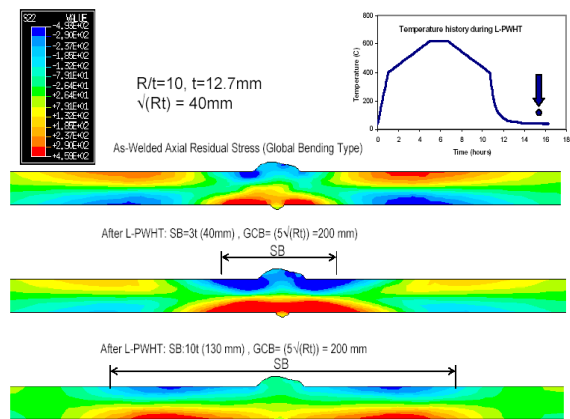


Fig. 11 Residual stresses after simulated treatment with various local PWHT parameters for global bending type of residual stresses

또한 히팅밴드의 폭이 증가할수록 용접부에서 떨어진 지점에서 압축과 인장 응력이 발생하고 있다.

Fig. 12는 국부 후열처리 시간에 따라 잔류응력 분포가 변화하는 정도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 후열처리 온도가 최고점에 도달할 때 까지는 크리프 거동에 의해 잔류응력이 크게 감소하다가 그 후 온도가 낮아짐에 따라 소성변형에 의해 추가적인 잔류응력이 발생되어 용접부 하부에 큰 인장 잔류응력이 발생된다.

3.2.2 보온재 폭에 따른 영향 고찰

Fig. 13은 히팅밴드의 폭은 14t로 고정된 상태에서 보온재 폭을 $5\sqrt{rt}$, $10\sqrt{rt}$ 로 변화시켜 수행한 후열처리 해석 결과와 노내 후열처리 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 노내 후열처리 결과만큼 효과적이진 못하나 보온재 폭이 커질수록 압축 및 인장 잔류응력 정도가 점차 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 국부 후열처리시 보온재 폭을 증가시켜 유익한 온도 구배를 형성시키는 것이 효과적인 잔류응력 완화 측면에서 중요함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 후열처리에 의한 잔류응력 완화 거동을 확인하기 위해 다양한 해석을 수행하였고 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

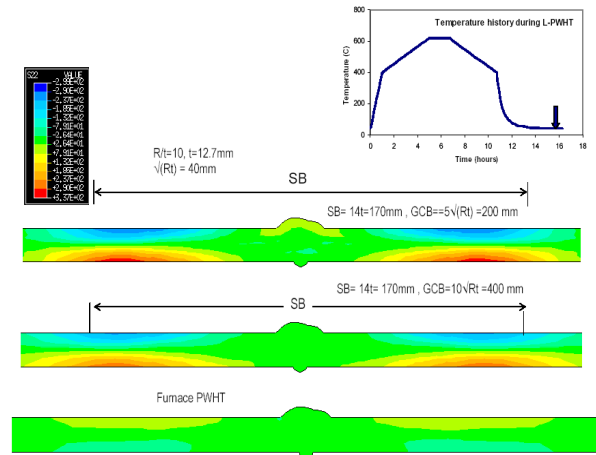


Fig. 13 Insulation band size effects on axial residual stress distribution-global bending type

- 1) 노내 후열처리시 지배적인 잔류응력 완화기구는 고온 소성기구가 아닌 크리프 거동이다.
- 2) 노내 후열처리시 잔류응력 완화는 후열처리 초기기간 내에서 대부분 발생하기 때문에 잔류응력 완화 측면에서 고찰해보면 보편적 후열처리 과정의 지속시간을 단축할 수 있다.
- 3) 국부 후열처리시 고온 소성기구 및 크리프 거동이 복합적으로 작용하여 잔류응력이 완화된다. 가열되는 동안에는 크리프 현상에 의해 잔류응력이 완화되다가 냉각되는 동안에는 소성거동에 의해 잔류응력이 추가적으로 발생한다.
- 4) 히팅밴드의 폭이 커질수록 용접부에서 멀리 떨어진 위치에 굽힘형태의 잔류응력이 분포하며 보온재의 폭이 커질수록 굽힘형태의 잔류응력 분포 정도가 감소한다.

후기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) ASME B&PV Committee, 1998, ASME B&PV Code, Section VIII, Divisions 1&2,

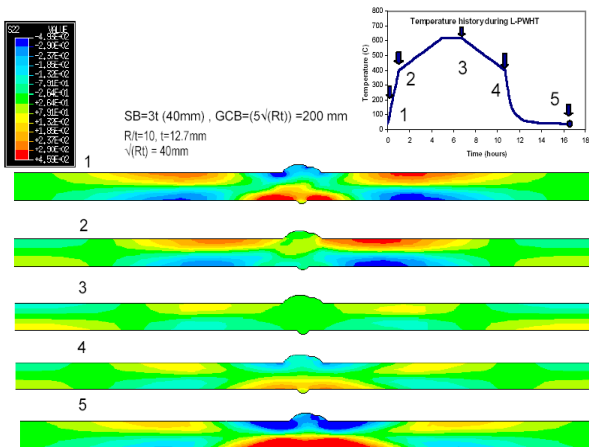


Fig. 12 Step by step residual stress development during local PWHT

Rules for Construction of Pressure Vessels.

- (2) Dong,P., Osage,D., and Prager,M., 2000, Development of Weld Residual Stress Distributions for FFS Assessment, ASME PVP Vol.411, Special Topics in Life Assessment, ASME PVP Conference, pp.53-64.
- (3) PVRC joint industry project proposal, 2000, Weld Residual Stress Estimates for Fitness for Service and Recommended Procedures for Local PWHT, Final Revision.
- (4) Murakawa,H.et al., 2004, Suitable Heating conditions in Local Post Weld Heat Treatment, WRC Bulletin, No.485.