

압력용기 용접부 국부 열처리에 따른 잔류응력 거동에 관한 연구

A Study on the Effects of local PWHT on the Residual Stress of the Weldment in Pressure Vessel

이 회태*, 김 경규

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the behavior of residual stress at the weldment of pressure vessel by local Post Weld Heat Treatment(PWHT). In order to do it, residual stress were measured before and after local PWHT by XRD on the test piece first. And then, the results of finite element(FE) analysis based on thermal-elasto-plastic-creep theories were verified by comparing with the measured results.

1. 서 론

압력용기 제작 공정중 발생하는 용접 잔류응력은 작동중 혹은 가공시 응력이 부분적으로 이완되어 변형을 유발하는 원인이 되기도 하며, 국부적으로 남아있는 인장잔류응력은 압력용기의 취성과파괴, 수소취성, 응력부식균열등을 유발하여 압력용기의 안전성을 저하시킨다. 이에 압력용기는 잔류응력 제거를 위한 후공정이 적용되는데, 후열처리(post weld heat treatment, PWHT)는 가장 대표적인 잔류응력 제거 방법이다.

일반적으로 압력용기의 PWHT는 노 내에 구조물을 장입하여 열처리를 수행하는 노내 PWHT를 의미하는데, 장입이 불가능할 경우 노내 PWHT 대신 국부 PWHT로 대체된다. 국부 PWHT는 용접부 근처를 국부적으로 가열하는 열처리 방법으로 저항체에 직접 통전하여 발열하는 가열 패드와 보온재를 직접 용접부에 부착하여 실외에서 열처리하는 방법이다.

노내 PWHT와는 달리 압력용기의 국부 PWHT의 경우 가열부가 국부적이어서 시공시 중요한 변수인 압력용기의 재질과 두께에 따른 온도 이력과 가열패드 폭이 적절하지 않을 경우 열처리후에도 잔류응력이 완전히 제거되지 않을 수 있다. 따라서, 국부 PWHT 시공 조건에 따른 용접부의 잔류응력 거동에 대한 해석적 평가를 통한 적절한 시공 기준 선정이 요구된다.

이에 본 연구에서는 열탄소성 및 재료의 크리프 거동을 고려한 유한요소해석을 통해 압력용기의 국부 PWHT에 의한 용접부의 잔류응력을 예

측하고 이를 실제 측정결과와 비교함으로써 예측 기법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 실험 및 해석 방법

국부 PWHT에 의해 용접부에서의 잔류응력 이완 정도를 평가하기 위해 우선 외경 457.2mm, 두께 15.9mm, 길이 200mm, 그리고 API 5L Gr. X65 재료의 파이프 2개를 자동 텡덤 GMA 용접으로 butt 용접하였다. 용접된 파이프에 Fig. 1과 같이 폭이 170mm인 전기식 가열패드와 350mm인 보온재를 설치하여 국부 PWHT를 수행하였다. 국부 PWHT시 온도 이력은 ASME 기준에 따라 결정되었으며, 실험중 열전대들을 이용하여 시편의 각 위치별로 시간에 따른 온도를 측정하였다. 용접부에서의 잔류응력 거동을 평가하기 위해 PWHT 전후 XRD(StressTech, Filand)를 이용하여 용접부 근처에서의 잔류응력을 측정후 유한요소해석 결과와 비교하였다.

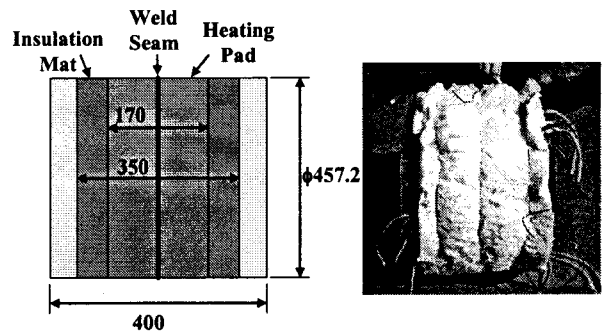


Fig. 1 Schematic of local PWHT for the test

용접부 잔류응력 해석을 위해 Fig. 2와 같이 파이프의 butt 용접부를 실제 용접조건과 유사하게 모델링하였다. 해석 모델의 단순화를 위해 축대칭 요소를 사용하였으며, 용접에 의한 입열 모델은 균일 분포 체적 열속을 적용하였다.

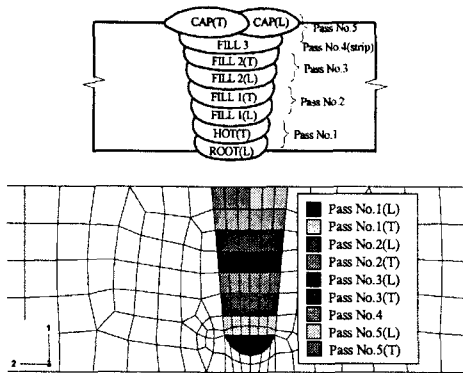


Fig. 2 Weld pas and finite element model for analysis

국부 PWHT 해석을 위해 용접 해석을 통해 평가된 용접부 잔류응력을 초기 응력으로 사용한 후 열탄소성 크리프(creep) 해석을 수행하였다. 이때 크리프 구성방정식으로 멱수 법칙 크리프 (Power-Law creep)을 적용하였다.

3. 실험 및 해석 결과

Fig. 3은 국부 PWHT시 butt 용접부 중심에서의 거리(d)에 따른 시간에 대한 온도 변화의 실험 및 해석 결과를 나타내고 있다. 해석의 경우, 가열패드와 접하는 절점에 대해 열처리 온도 이력과 동일하게 온도에 대한 경계조건을 부여하여 해석한 결과인데, Fig. 3에서 해석 결과가 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 이후 국부 PWHT의 열전달 해석시 가열 패드에 의한 입열은 절점에서의 온도 경계조건으로 구현하였다.

Fig. 4는 국부 PWHT 수행전과 수행후의 용접부에서의 잔류응력 분포에 대한 XRD 측정 및 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 4의 잔류응력 측정 결과 국부 PWHT에 의해 용접부의 인장 잔류응력이 대부분 제거가 되었음을 알 수 있다. 또한, 재료의 크리프 거동을 고려한 유한요소해석 결과는 측정 결과를 비교적 잘 예측하고

있음을 알 수 있다. 하지만 재료의 크리프 거동을 고려하지 않을 경우 국부 PWHT에 의한 잔류응력 제거가 거의 발생하지 않았으며 실제 잔류응력 측정 결과와도 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 국부 PWHT에 의한 잔류응력 거동 해석을 위해서는 재료의 크리프 거동을 고려해야함을 알 수 있다.

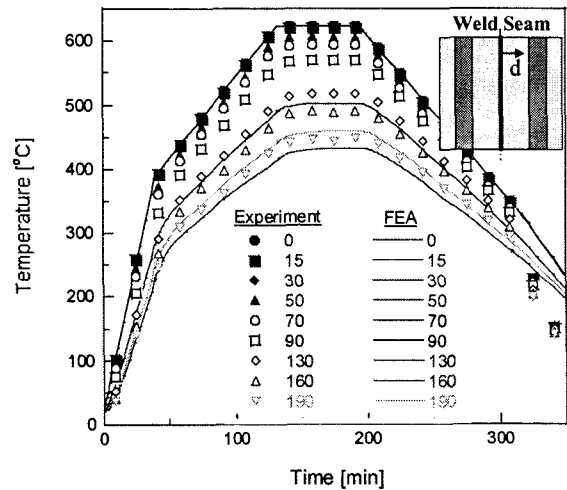


Fig. 3 Heating schedule for local PWHT

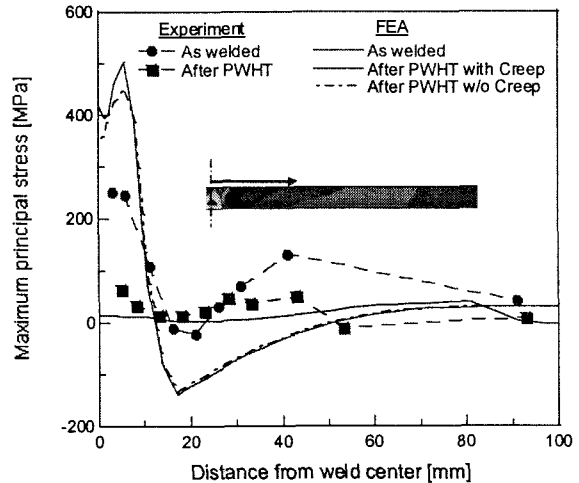


Fig. 4 Change of longitudinal residual stress by local PWHT

4. 결 론

압력용기 국부 PWHT시 잔류응력 거동 평가를 위한 해석 및 실험을 통해 국부 PWHT에 의한 잔류응력 예측을 위해서는 재료의 크리프 거동을 고려해야하며, 본 고에서 제안된 해석 모델이 잔류응력 예측에 적절함을 알 수 있었다.