

# 2¼Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접이음부의 재열균열에 관한 연구

## A Study on the Reheating Crack around Welded Joint of Pressure Vessel with 2¼Cr-1Mo Steel

\*방한서\*, 김종명\*

\* 조선대학교 선박해양공학과

### 1. 서론

최근 석유, 화학플랜트, 원자로 및 발전설비 등이 점차 증가하고 있는 추세이며, 이들 구조물에 사용되는 각종 압력용기들의 재질은 고온 및 고압에 견딜 수 있도록 요구되어지고 있다.

따라서, 내열, 내압 및 내부식성이 뛰어난 2¼Cr-1Mo강의 수요가 급후 증대될 전망이다. 또한, 이들 압력용기들은 용접에 의하여 제작되어지며, 이때 용접부위에는 필연적으로 용접잔류응력 및 변형이 발생되어진다. 한편, 용접에 의한 구조물 제작시 필연적으로 발생한 용접잔류응력은 용접부의 좌굴강도 및 취성파괴강도 등을 현저하게 저하시킬 위험성을 가지고 있으며, 용접잔류응력 및 확산성 수소의 제거와 용접부의 연화를 목적으로 보통 용접후열처리(PWHT; Post Welding Heat Treatment)를 수행한다. 그러나, Cr-Mo강의 경우, 이러한 열처리에 의하여 균열, 소위 재열균열(Reheat Crack)이 많이 발생되어진다. 따라서 역학적 관점에서 재열균열이 발생되어지는 인자로서 크리프변형(Creep Strain)의 누적이력과 용접잔류응력의 완화이력등의 역학적 거동을 규명하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 압력용기 Nozzle 용접부와 같은 파이프 원주용접에 대응되는 축대칭 시험편을 선정하고 이 시험편에 대하여 축대칭 열전도, 탄소성 및 크리프 해석을 수행하여 재열균열의 발생 기구를 밝히고, 나아가 재열균열의 발생을 판정할 수 있는 역학적 지표를 제안하고자 한다.

### 2. 축대칭 시험편과 용접 및 PWHT 조건

압력용기 Nozzle 용접부에 관한 시험편의 해석모델 및 좌표는 Fig.1에 나타내었으며, 재질의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical Composition of Steel Tested(2¼Cr-1Mo)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
0.14	0.12	0.55	0.016	0.005	2.27	1.03	0.25	0.0084

재료는 2¼Cr-1Mo강이며 해석 모델의 좌표계는 용접선 방향을  $\theta$ , 반경 방향을  $\gamma$ , 판두께 방향을  $z$ 으로 하였다.

모델의 크기는 실 용접체와 동일한 역학적 구속조건을 갖는 치수로 압력용기의 폭  $B=600\text{mm}$ , 판 두께  $T=50\text{mm}$ , 원통(Nozzle)의 높이  $H=150\text{mm}$ , 원통의 내경  $D=70\text{mm}$ , 원통의 두께  $t=15\text{mm}$ 로 한다. 용접은 5층8패스를 수행하며, 초층용접 조건은 입열량  $Q=12\text{KJ/cm}$  (전류  $I=120\text{A}$ , 전압  $V=25\text{V}$ , 용접 속도  $v=0.25\text{cm/s}$ )로 하고 예열 및 패스간 온도는  $200^\circ\text{C}$ 로 하였다. 또한, PWHT조건은 승온속도는  $100^\circ\text{C/h}$ 로 하였으며, 최고온도는  $600^\circ\text{C}$ 로 유지(Holding)시간은 3시간으로 하였다.

마지막으로 재열균열 발생이 가장 높다고 생각되어지는 최종 8패스 Toe부의 열영향부 조립(粗粒) 부분을 관찰하여 시험편의 용접에서부터 PWHT까지의 역학적 거동을 밝히고자 한다.

### 3. 결과 및 고찰

최종패스 종단부 즉, HAZ조립역( $r=74.4$ ,  $z=0.6\text{mm}$ )의 응력집중부(이후, 주목점이라 부른다.)를 포함하는 판두께( $z$ 방향) 방향에 발생하는 용접잔류응력 및 소성변형율의 분포를 Fig. 2(a),(b)에 도시하였다.

주목해 보면, 용접잔류응력의 용접선(円周) 방향성분  $\sigma_\theta$ 는 판두께의 상부와 하부에서는 인장을 나타내고, 중앙부에서는 압축을 나타낸다. 특히, PWHT시에 발생하는 재열균열(횡균열)에 대해서, 최대크기로 발생하고 있다고 생각되는 반경방향의 응력성분  $\sigma_r$ 은 판두께의 전체에 걸쳐 인장이 발생되고 있다. 그 중에서도 종단부의 응력집중부에서  $\sigma_r$ 은 최대가 되고, 판두께 하부로 갈수록 점차 작아진다. 또한, 판두께 방향의 응력성분  $\sigma_z$ 은 판두께 상부에서는 압축을 나타내고, 그 밖에서는 인장을 나타내나 그 크기는 작게 나타난다.

여기서,  $\sigma_r$ 은 상술한 바와같이 판두께의 전체에 걸쳐 인장을 나타내고, 그 자체는 면내에서 평형을 이루지 않지만, 축대칭 문제에서는 축에 대하여 힘의 평형을 유지하게 된다. 이점이 직선비이 드를 가진 WES시험편과 크게 다르다.

주목점의 HAZ조립역에 발생하는 용접잔류응력 성분의 크기를 보면, 반경방향 성분이 응력집중부의 영향을 매우 크게 받으므로  $\sigma_\theta > \sigma_r \gg \sigma_z$  순으로 나타난다.

다음은 잔류 소성변형율에 주목해 보았다.

원주방향 성분  $\epsilon_\theta^p$ 는 전체 영역에서 크기가 음(-)이 되고 HAZ조립역의 다소 아래에서 최대의 값이 된다. 반경방향성분  $\epsilon_r^p$ 는 판두께의 전 영역에 있어서 양(+)의 값을 가지나  $\epsilon_\theta^p$ 와 동일한 양상으로 HAZ조립역의 다소 아래에서 최대치가 된다. 판두께 방향성분  $\epsilon_z^p$ 은 다른 두성분에 비해서 작게 나타난다. 압력용기 노즐부를 상정한 축대칭 기준 시험편의 PWHT중에 판두께에 발생(Fig. 1의 점선의 위치)하는 크리프변형율의 누적이력을 Fig. 3에 나타내었다.

결과에 의하면, 전 크리프변형율 성분의 누적은 모재에 비해서 HAZ에서 현저하게 나타난다.

승온온도  $500^\circ\text{C}$ 까지는 원주방향의 크리프변형율 성분  $\epsilon_\theta^c$ 는 반경방향 성분  $\epsilon_r^c$ 과 거의 동일하게 누적되나,  $500^\circ\text{C}$ 를 초과하면  $\epsilon_r^c$ 의 누적이  $\epsilon_\theta^c$ 의 누적보다 현저하게 나타나게 된다. 이것은 응력집중부의 영향을  $\epsilon_r^c$ 가 최대로 받기 때문이라고 생각된다. 또한, 상당크리프변형율 누적이력에 주목(Fig. 4)하여 보면, 응력집중부 근방의 주목점과 다른부분에서의 크리프변형율 누적이 서로 상이하게 나타남을 명확히 보여주고 있다.

다음은 PWHT중에 주목점을 포함하는 판두께에 발생(Fig. 1의 점선의 위치)하는 각 응력성분의 완화이력을 Fig. 5에 나타내었다.

PWHT초기에 승온온도가  $500^\circ\text{C}$ 에 도달할 때 까지 용접선 방향 응력성분  $\sigma_\theta$ 는 크게 완화되고 거의  $\sigma_r$ 과 동일한 정도의 크기가 된다. 이것으로부터 반경방향 성분  $\sigma_r$ 이 응력집중의 영향을 크

게 받고 있음을 알 수 있다.  $\sigma_r$ 과  $\sigma_\theta$ 와의 차가 없어진 이후 유지(Holding)온도가 600℃가 되면  $\sigma_r$ 이  $\sigma_\theta$ 보다 커지고, 유지온도 600℃에 도달후 유지과정에 들어가면  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ 의 분포는 변화하지 않은 채 그 크기는 다소 완화된다.

또한, 승온과정에서의 응력완화는 모재에 비해서 주목점(HAZ조립역)에서 현저하게 나타나나 유지과정에 들어가면 주목점과 모재와의 응력차가 없어지고 응력은 전체적으로 같은 양상으로 완화하게 된다.

#### 4. 결 론

이상의 결과를 종합해 보았다.

- 1) 축대칭 시험편의 경우, 재열균열 가능성이 높은 최종패스 종단부의 응력집중부에서 크리프변형율의 누적이 현저하게 나타난다.
- 2) 크리프 변형율 성분중에서도 응력집중의 영향을 크게받는 반경방향 크리프변형율 성분  $\epsilon_r^c$ 의 누적이 현저하게 발생되며, 반경방향 잔류응력성분  $\sigma_r$  이 완화된다.  
이상의 결과를 종합해보면, 상당크리프변형율이 재열균열에 있어서 매우 중요한 인자임이 밝혀졌다.

#### -參考 文獻-

- 1) 田中、小幡： 応力除去焼鈍に関する研究(題1報)、日本溶接學會誌、36-2(1967), pp.140-145
- 2) 内木、山崎ら： 応力除去焼鈍に関する研究(題1報)、日本溶接學會誌、33-9(1964), pp.710-717
- 3) 金澤、武田： 応力除去焼なましわれ、日本金屬學會會報、18-6(1979), pp.425-431
- 4) 金澤、山戸ら： 応力除去焼鈍われ(再熱割れ)に関する研究 (第1報)、日本溶接學會誌、44-10(1975), pp.791-798
- 5) 内木、岡林ら： 応力除去焼鈍に関する研究(題2報)、日本溶接學會誌、33-9(1964), pp.718-725
- 6) 大南、梅田： 高温にあける切欠きクリーブ破斷に関する研究、日本材料學會、22-234(1973)、pp.278-284
- 7) 大南、梅田ら： 高温にあける1Cr-1Mo-1/4V鋼の切欠きクリーブ破斷に関する研究、日本機械學會論文集、42-354(1976), pp.335-342
- 8) 上田、福田： 応力除去焼なましの力學問題に對する有限要素法の適用、日本溶接學會誌、44-11(1975), pp.902-908
- 9) 上田、中長： 応力除去焼なまし處理後の残留応力の近似推定法(第1報)、日本溶接學會論文集、1-2(1983), pp.174-181

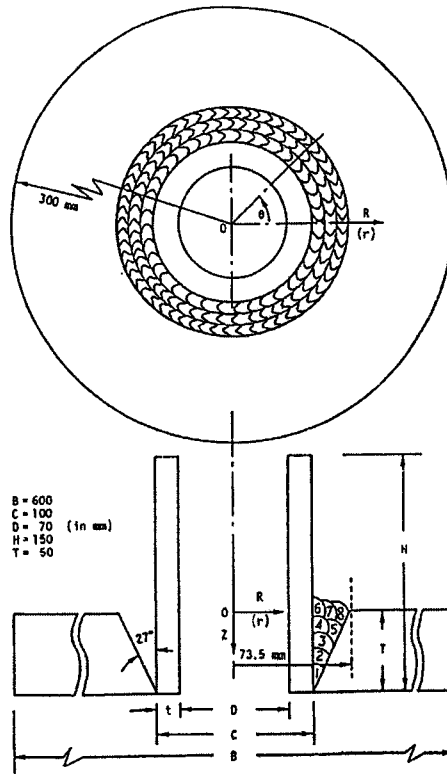
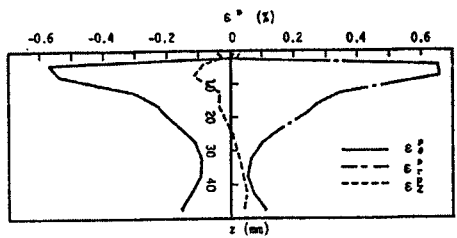
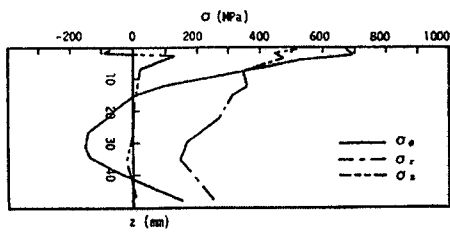


Fig.1 Model for analysis of axisymmetric specimen



(a) Welding residual stress



(b) plastic strain

Fig. 2 Distribution of welding residual stress and plastic strain along z-direction (at  $r=73.5$  mm)

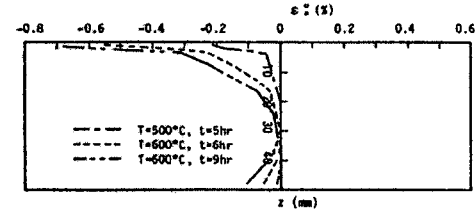
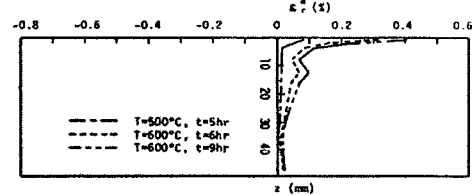
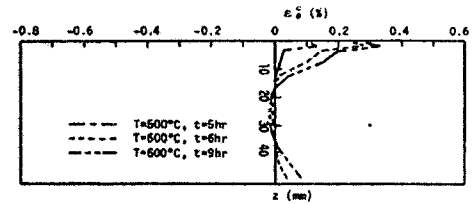


Fig. 3 Distribution of accumulated creep strain along z-direction during PWHT

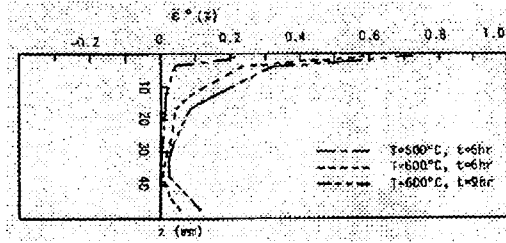


Fig. 4 Distribution of accumulated equivalent creep strain along z-direction during PWHT

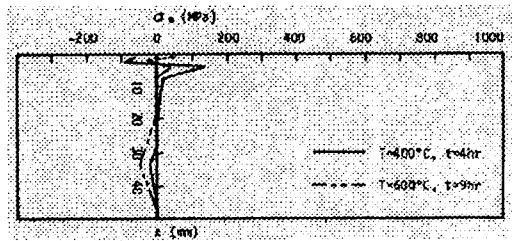
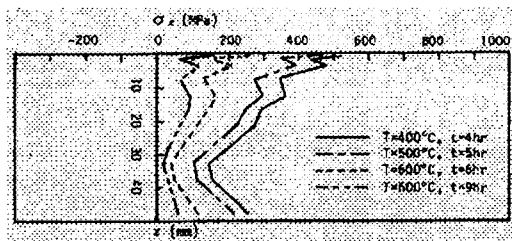
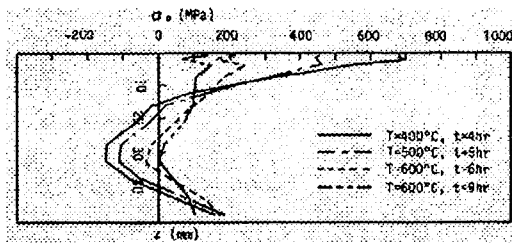


Fig. 5 Distribution of stress relaxation along z-direction during PWHT