

압력용기 Nozzle 용접부의 재열균열 감수성 평가 시험편 제안

A suggestion of sensitivity appraisal specimen on the reheating crack around welded joint of pressure vessel

방한서*, 김종명**

* 조선대학교 선박해양공학과

** 담양대학 기계·자동차 공학부

1. 서론

최근 석유화학, 플랜트, 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 향후 증대될 전망이다. 또한, 이들 압력용기들은 용접에 의하여 제작되어지며, 이때 용접부위에는 필연적으로 용접잔류응력 및 변형이 발생되어진다.

또한, 용접에 의한 구조물 제작시 필연적으로 발생한 용접잔류응력은 용접부의 좌굴강도 및 취성과 피강도 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 크리프변형율(Creep Strain)의 누적이력과 용접잔류응력의 완화이력등의 역학적 거동을 규명하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 원통이음부를 모델화 한 축대칭 시험편을 설정하고 용접에서 PWHT까지의 역학적 거동을 명확히 함과 동시에 이것과 WES3005호 시험편의 재열균열감수성을 평가하는 시험편으로 WES3005호 시험편의 적용에는 한계가 있음을 명확히 하였다. 또한, WES3005호 시험편 및 축대칭 시험편을 이용하여 재열균열실험을 하였고, 먼저 도출한 역학적 지표(누적 크리프 변형율)의 타당성을 나타냄과 동시에 각 시험편의 실제 기계에서의 적용성을 명확히 하였다.

최종적으로, WES3005호 시험편 및 전단계 연구에서 제안한 원주 용접이음부 재열균열 감수성 평가 시험편을 이용하여, 수행한 재열균열 실험결과를 상당 크리프 변형율 ($\bar{\epsilon}^c$)을 이용하여 정리하고, 상당크리프 변형율의 재열균열 발생판정에 대한 역학적 지표로서의 적용성을 검토 하였다.

2. 실험

실험에 사용한 강재는 2¼Cr-1Mo강 이고, 재질의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

또한, 시험편은 실험실 용해후 1250℃에 1시간 가열 유지하고, 1250℃에서 950℃까지의 온도범위에서 단조를 한 판두께 50mm의 시험편을 실험에 사용하였다.

또한, 사용 강종은 재열균열 감수성이 현저하게 높은 것으로 알려져 있다. 재열균열 유무는 PWHT 후, 먼저 자분탐상검사에 의한 표면 균열을 관찰하였으며 그후, 시험편을 절단하여 단면균열 상태를 관찰하였다.

2.1 WES시험편의 재열균열 실험조건

WES 시험편에서는 구속비드의 용접층수, 패스수를 5층-7패스, 8층-15패스 및 12층-30패스의 3종류에 대해서 재열균열 실험을 하였다. 실험에서 이용한 WES시험편의 이음부 형상 및 용접적층 상태를 Fig. 1(a)에 나타내었으며, 용접 조건은 Table 2에 나타내었다.

실험비드의 루트 균열방지 목적으로 시험비드의 입열량 $Q=17\text{KJ/cm}$ 의 소입열을 하였다. 또한, 구속비드의 용접 1패스당 입열량은 $Q=22\text{KJ/cm}$ 일정하게 하고, 예열온도는 200°C 패스간 온도를 $200^\circ\text{C} \sim 230^\circ\text{C}$ 로 하였다. 용접봉은 고강도 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 강용으로 개발된 저수소계 피복아크 용접봉을 사용하였다. PWHT조건은 승온온도 100°C/h , 유지 온도 600°C , 유지 시간은 12hours로 하였다.

2.2 축대칭 시험편의 재열균열 실험조건

축대칭 시험편에 대해서도 용접 패스수를 1층- 1패스, 4층-5패스 및 6층-10패스로 변화시켜 재열균열 실험을 수행하였다.

축대칭 시험편의 용접 이음부의 형상은 전단계 연구를 통하여 결정한 원주 이음부 재열균열 감수성 평가 시험편이다. 단, 시험편의 제작을 용이하게 하기 위해 기반을 원형에서 정방향으로 변경하고, 직경과 한번의 길이를 같게 하였다. 따라서, 구체적인 치수는 기반의 길이 $L=500\text{mm}$, $B=500\text{mm}$. 두께 $h=49\text{mm}$, 원통은 높이 49mm 와 직경 100mm 의 중실원통을 표준치수로 하였다.

용접조건은 Table 3에서 나타낸 것과 같이, 1층 -1패스 용접에서는 입열량 $Q=12\text{KJ/cm}$ 로 하고, 그 후의 입열량 $Q=17\text{KJ/cm}$ 로 하여 피복 아크용접을 수행하였다. 예열 패스간 온도는 WES 시험편과 동일하게 하였다. 또한, PWHT에서 승온온도 100°C/h , 유지온도 600°C , 유지 시간은 12hours로 하였다.

3. 실험 결과

3.1 WES 시험편의 재열균열 실험결과 고찰

재열균열의 유무는 PWHT후 자분탐상검사에 의한 표면균열을 관찰함으로써 수행하였다. 그 결과, 단면 균열율을 Table 4에 나타내었다.

결과에 의하면, 구속비드 5층-7패스 및 8층-15패스에서는 재열균열이 발생하지 않았으나, 구속비드 12층-30패스 (전층용접)에서는 재열균열이 확인 되었다. 이 경우, 재열균열은 시험체 비드 종단부의 응력집중부에서만 발생하였다.

3.2 축대칭 시험편의 재열균열 실험결과 고찰

재열균열의 발생유무는 PWHT후 자분탐상검사로 표면균열을 관찰한 후, 시험편을 절단하여 단면균열 상태를 단면으로 관찰하였다. 각 용접 패스수에 따른 루트부, 원통측 및 기반측에서 종단부의 응력집중부에서 단면균열율을 측정하였다. 실험결과를 Table 5에 나타내었다. 표의 균열율은 6단면에서의 평균값이다.

결과를 고찰해 보면, 6층-10패스(전층용접)에서는 재열균열이 발생하지 않았으며, 4층-5패스에서는 재열균열이 미소하게 발생되었으나, 1층-패스에서는 67%의 재열균열이 관찰 되었다. 또한, 균열발생 위치를 보면 1층-1패스, 4층-5패스 모두 용접 초층패스의 루트부에서만 발생되었다.

3.3 상당크리프 변형율에 의한 재열균열 발생 판정

상당 크리프 변형율($\bar{\epsilon}^c$)을 재열균열 발생에 대한 하나의 역학적 지표로 생각하고, 전질의 실험을 정리하여 상당 크리프 변형율이 재열균열 발생의 역학적 지표로서의 타당성 여부를 검토하였다.

먼저, WES 시험편에 대한 용접에서 PWHT까지의 결과를 분석해 보았다.

WES 시험편의 구속비드가 15패스 및 30패스 경우, 시험비드 종단부의 응력집중부(주목점 : 위치1)에 발생한 용접잔류응력 $\bar{\sigma}$ 와 PWHT에 의한 누적 상당 크리프 변형율 $\bar{\epsilon}^c$ 를 Fig. 2에 나타내었다.

결과에 의하면, 구속비드 15패스에서는 구속비드수가 증가하더라도 주목점에 생기는 $\bar{\sigma}$ 의 크기는 거의 변화하지 않으나, $\bar{\epsilon}^c$ 의 누적이 커졌으며, 또한 $\bar{\epsilon}^c$ 가 증가하면 재열균열도 커짐을 나타내었다.

Fig. 3에 축대칭 시험편에 대한 실험결과를 정리하여 나타내었다.

결과에 의하면, 층수, 패스수가 증가함에 따라 재열균열이 발생하는 경향이 증가하였다. 또한, 축대칭 시험편에서의 재열균열은 초층용접하여 PWHT한 경우의 루트부에서만 발생하였다. 더욱이, WES 시험편과 같이 $\bar{\epsilon}^c$ 이 누적 커지면 재열균열율도 커짐을 나타내었다.

4. 결 론

WES 시험편과 축대칭 시험편에 대한 재열균열 실험결과를 이론해석에서 얻어진 상당 크리이프 변형율을 이용하여 정리하였다. 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 직선비드 재열균열 시험편인 WES 3005호 시험편의 경우, 시험비드 중단부에서만 재열균열이 발생하였다. 또한, WES 3005호 시험편을 이용하여 재열균열 감수성을 평가할 경우, 구속비드는 전층 용접후 수행할 필요성이 있음을 보였다.
- 2) Set-on type 축대칭 시험편을 PWHT하면 재열균열은 최종층의 원통측 및 기반층의 중단부에는 생기지 않
고, 루트부에서만 발생하였다. 또한, 용접 적층수가 많아지면 균열발생율이 적어지는 경향을 나타내었다.
- 3) 양 시험편에서 재열균열의 발생위치가 크게 다르게 나타났다.

-참고문헌-

- [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, “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] 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
- [7] 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

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

Table 2 Welding condition of WES reheat cracking test specimen

Welding procedure	Heat input (KJ/cm)	Current, Voltage, Weld speed (A) (V) (cm/min)		
	Test bead : 17	170	25	15
Fixed bead : 22	220	25	15	
SMAW	Electrode	Preheat temp.		
	8628 Ø4	200		
	8628 Ø5	200 - 230		

Table 3 Welding condition of axisymmetric reheat cracking test specimens

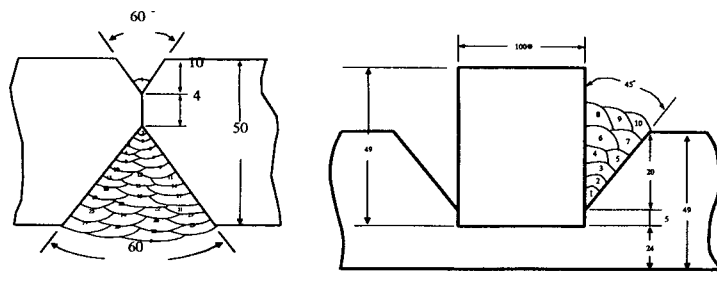
Welding procedure	Heat input (KJ/cm)	Current, Voltage, Weld speed (A) (V) (cm/min)		
	Root : 12	120	25	15
Other : 17	170	25	15	
SMAW	Electrode	Preheat temp.		
	CM2V Ø3.2	200		
	8628 Ø4	200 - 230		

Table 4 Average cracking ratio in reheat cracking test of WES

Restraint bead (No. of pass)	Cracking ratio (%)	PWHT condition
7	0	600 °C × 12hr
15	0	
30	10.7	

Table 5 Average cracking ratio in reheat cracking test of axisymmetric

Sequence	Crack ratio	PWHT condition
1 layer	67.2	600 °C × 12 hr
1 pass	(Root)	
4 layer	2.7	
5 pass	(Root)	
6 layer	0.0	
10 pass		



(a) WES

(b) Axisymmetric

Fig. 1 Groove and bead of reheat cracking test specimens

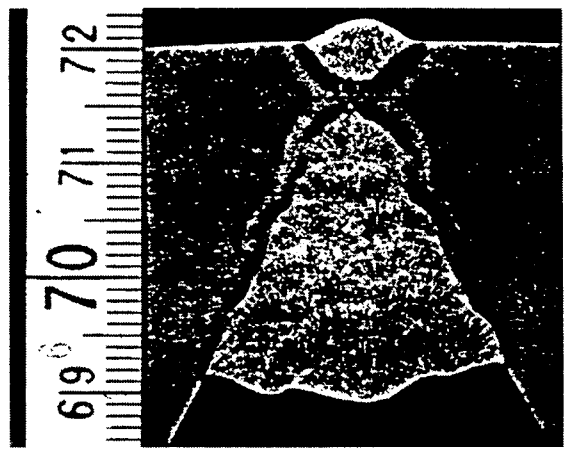
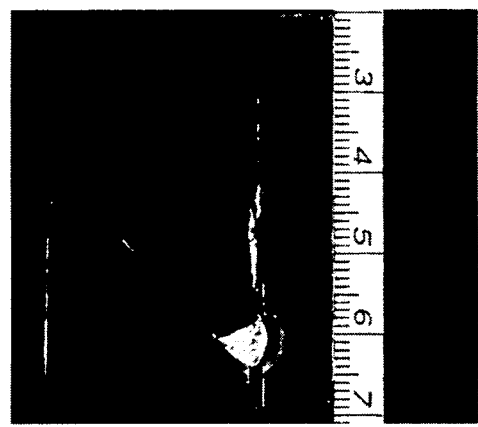
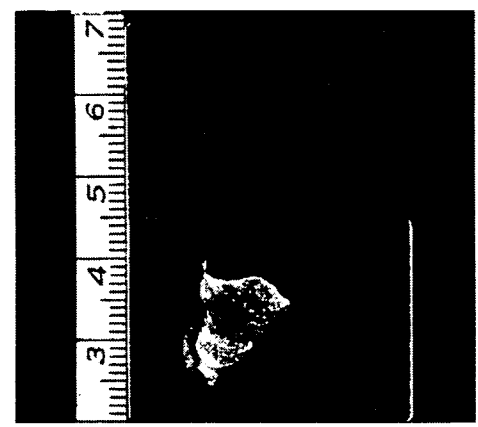


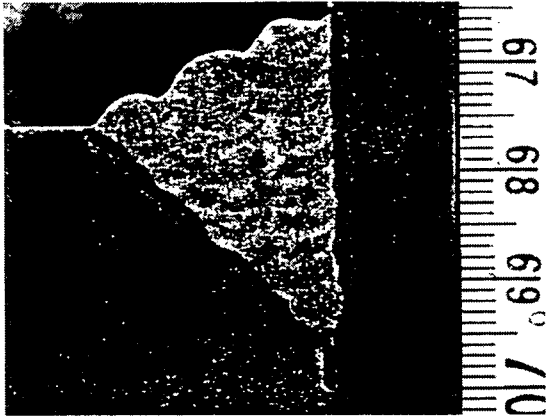
Photo. 1 WES test specimen



(a) 1 layer - 1 pass



(b) 4 layers - 5 passes



(c) 6 layers - 10 passes
 Photo. 2 Axisymmetric test specimen (WES)

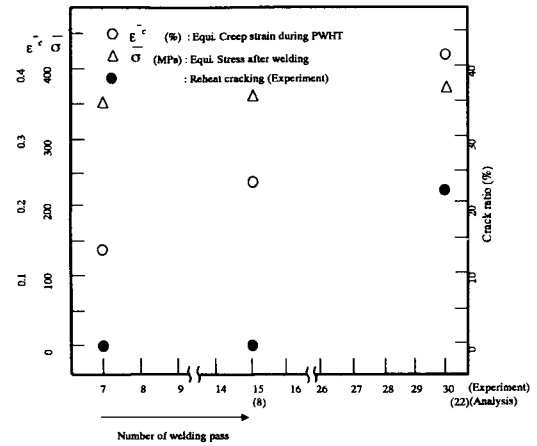


Fig.2 comparison of equivalent welding residual stress and creep strain with reheat cracking test results

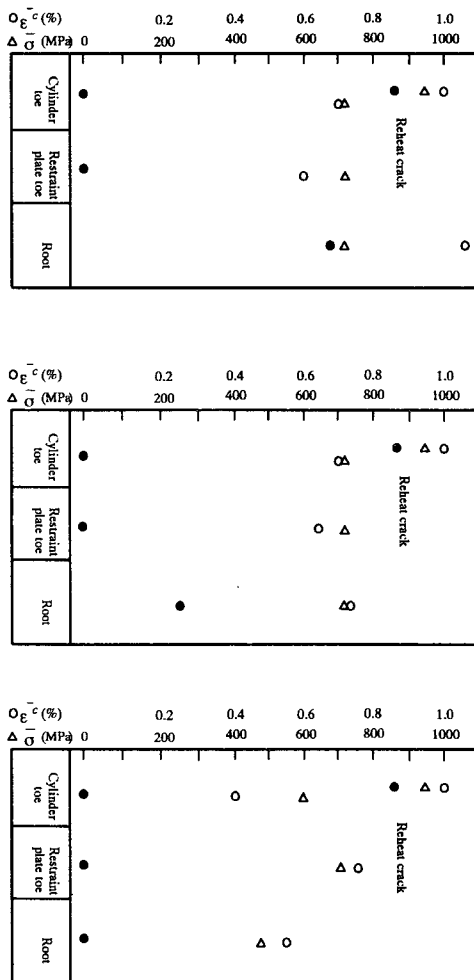


Fig. 3 Comparison of equivalent welding residual stress and creep strain with reheat cracking test results (axisymmetric)