



2¼Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접이음부의 재열균열에 관한 연구

방한서* · 김종명**

*조선대학교 선박해양공학과

**담양대학 기계·자동차 공학부

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

Han-Sur, Bang* and Jong-Myung, Kim**

*Dept. of Naval architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Kwang-ju 501-759, Korea

**Dept. of Mechanical and Automobile Engineering, Provincial College Damyang, Chonam 517-800, Korea

Abstract

Pressure vessels usually consist of main body and pipes which are connected with the main body. And as joining method of such main body and pipes, welding is carried out. After welding, welding residual stresses inevitably occur around welded joints.

As residual stresses act harmfully on fatigue strength, corrosion and buckling strength of structure, PWHT is carried out for the purpose of removing the residual stress.

But, during PWHT process, 2¼Cr-1Mo steels are frequently apt to generate reheat crack.

For this reason, it is strongly needed to analyze and examine the mechanical behavior of welded joints before and after PWHT process.

So, in this study, welded nozzle parts of pressure vessel where reheat cracks frequently occur are selected for examining the mechanism of crack-occurrence.

(Received December 2, 1999)

Key Words : Pressure vessel, Welding residual stress, Reheat crack, Post welding heat treatment(PWHT), Thermal-elastic-plastic-creep, Creep strain

1. 서 론

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

따라서, 내열, 내압 및 내부식성이 우수한 2¼Cr-1Mo강의 수요가 향후 증대될 전망이다¹⁻³⁾이다. 또한, 이들 압력용기들은 용접에 의하여 제작되어지며, 이때 용접부위에는 필연적으로 용접잔류응력 및 변형이 발

생되어진다. 용접에 의한 구조물 제작시 필연적으로 발생한 용접잔류응력은 용접부의 좌굴강도 및 취성과 파괴강도 등을 현저하게 저하시킬 위험성을 가지고 있으며, 용접잔류응력 및 확산성 수소의 제거와 용접부의 연화를 목적으로 보통 용접후열처리(PWHT: Post Welding Heat Treatment)를 수행⁴⁻⁹⁾한다. 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 용접 잔류응력의 완화이력등의 역학적 거동을 규명하는 것

이 매우 중요하다¹⁰⁾.

따라서, 본 연구에서는 원통이음부를 모델화 한 축대칭 시험편을 설정하고 용접에서 PWHT까지의 역학적 거동을 명확히 함과 동시에 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 입증하였다.

최종적으로, WES3005호 시험편 및 전단계 연구¹¹⁾에서 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 방법 및 조건

실험에 사용한 강재는 재열균열 감수성이 현저하게 높은 것으로 알려져 있는 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo강 이고, 재질의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

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

Table 1 Chemical composition of test specimen (2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo)

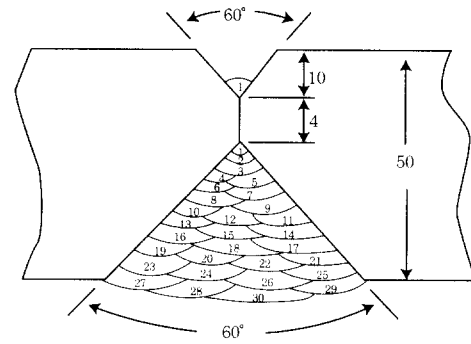
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
0.14	0.12	0.55	0.016	0.005	2.27	1.03	0.25	0.0084

재열균열 유무는 PWHT후, 먼저 자분탐상검사에 의한 표면 균열을 관찰하였으며 그후, 시험편을 절단하여 단면균열 상태를 관찰하였다.

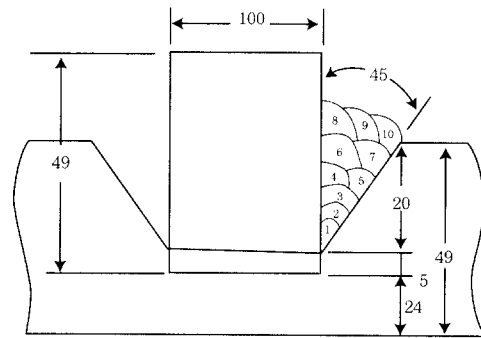
2.1 WES시험편의 재열균열 실험조건

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 초층비드는 입열량 $Q=17\text{kJ/cm}$ 의 소입열을 하였다. 또한, 구속비드(2층~최종)의 용접 1패스당 입열량은 $Q=22\text{kJ/cm}$ 일정하게 하고, 예열온도는 200℃, 패스간 온도를 200℃ ~ 230℃로 하였다. 용접봉은 고강도 2 $\frac{1}{4}$ Cr



(a) Specimen of WES 3005



(b) Axisymmetric

Fig. 1 Groove and bead of reheat cracking test specimens

Table 2 Welding condition of WES reheat crack test specimen

Welding procedure	Heat input (kJ/cm)	Current (A)	Voltage (V)	Weld speed (cm/min)
Test bead : 17	170	25	15	
Fixed bead : 22	220	25	15	
SMAW	Electrode	Preheat temp.		
	JIS 8628 $\phi 4$	200		
	JIS 8628 $\phi 5$	200 - 230		

-1Mo강용으로 개발된 저수소계 피복아크 용접봉 (E9016-B3)을 사용하였다. PWHT조건은 승온온도 100℃/h, 유지 온도 600℃, 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 한변의 길이

를 같게 하였다. 따라서, 구체적인 치수는 기반의 길이 $L=500\text{mm}$, $B=500\text{mm}$, 두께 $h=49\text{mm}$, 원통은 높이 49mm와 직경 100mm의 중실원통을 표준치수로 하였다.

Table 3 Welding condition of axisymmetric reheat crack test specimens

Welding procedure	Heat input (kJ/cm)	Current (A)	Voltage (V)	Weld speed (cm/min)
	Root : 12	120	25	15
	Other : 17	170	25	15
SMAW	Electrode	Preheat temp.		
	JIS 8628 $\phi 3.2$	200		
	JIS 8628 $\phi 4$	200 - 230		

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

Table 4 Average crack ratio in reheat crack test of WES

Restraint bead (No. of pass)	Crack ratio (%)	PWHT condition
7	0	600 $^\circ\text{C} \times 12\text{hr}$
15	0	
30	10.7	

결과에 의하면, 구속비드 5층-7패스 와 8층-15패스에서는 재열균열이 발생하지 않았으나, 구속비드 12층-30패스(전층용접)에서는 재열균열이 확인되었다. 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

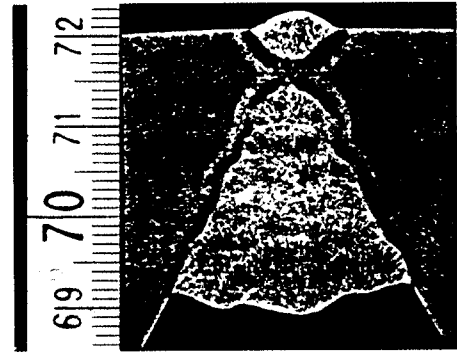


Photo. 1 WES test specimen

상태를 단면으로 관찰하였다. 각 용접 패스수에 따른 루트부, 원통측 및 기반측에서 종단부의 응력집중부에서 단면균열율을 측정하였다. 실험결과를 Table 5에 나타내었다. 표의 균열율은 평균값이다.

Table 5 Average crack ratio in reheat crack test of axisymmetric

Sequence	Crack ratio	PWHT condition
1 layer 1 pass	67.2 (Root)	600 $^\circ\text{C} \times 12\text{ hr}$
4 layer 5 pass	2.7 (Root)	
6 layer 10 pass	0.0	

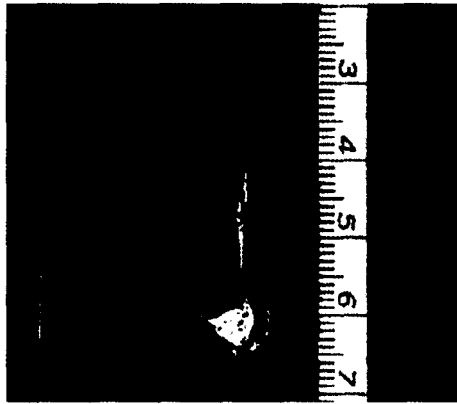
결과를 고찰해 보면, 6층-10패스(전층용접)에서는 재열균열이 발생하지 않았으며, 4층-5패스에서는 재열균열이 미소하게 발생되었으나, 1층-1패스에서는 67%의 재열균열이 관찰 되었다. 또한, 균열발생 위치를 보면 1층-1패스, 4층-5패스 모두 용접 초층패스의 루트부에서만 발생되었다.

3.3 상당크리프 변형률에 의한 재열균열 발생 판정

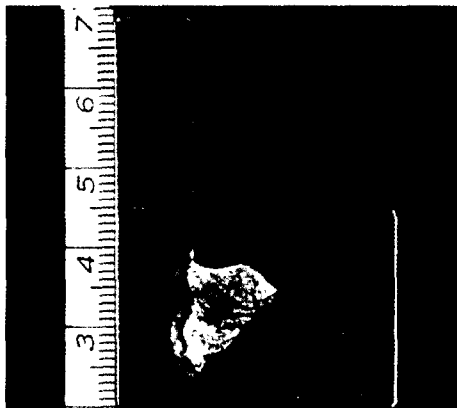
상당 크리프 변형률($\bar{\epsilon}^c$)을 재열균열 발생에 대한 하나의 역학적 지표로 생각하고, 전절의 실험을 정리하여 상당 크리프 변형률이 재열균열 발생의 역학적 지표로서의 타당성 여부를 검토하였다.

먼저, WES 시험편에 대해 용접에서 PWHT까지의 결과를 분석해 보았다.

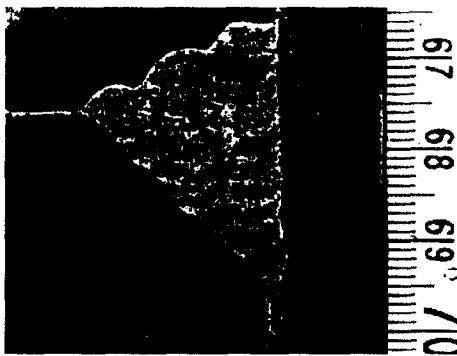
WES 시험편의 구속비드가 15패스 및 30패스 경우, 시험비드 종단부의 응력집중부(주목점)에 발생한 용접잔류응력 $\bar{\sigma}$ 와 PWHT에 의한 누적 상당 크리프 변



(a) 1 layer - 1 pass



(b) 4 layers - 5 passes



(c) 6 layers - 10 passes

Photo. 2 Axisymmetric test specimen

형률 $\bar{\epsilon}^c$ 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. Fig. 3(a)는 1층-1패스, (b)는 4층-5패스, (c)는 6층-10패스의 결과이다.

결과에 의하면, 층수, 패스수가 증가함에 따라 재열균열이 발생하는 경향이 증가하였다. 또한, 축대칭 시

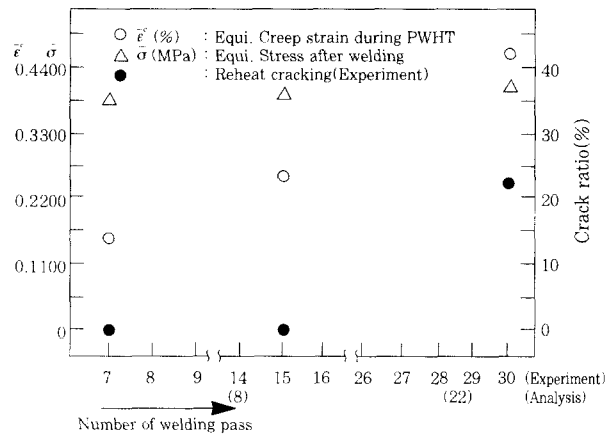
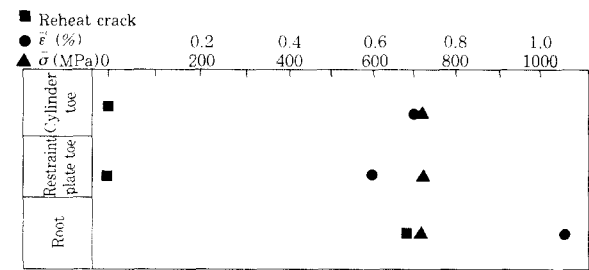
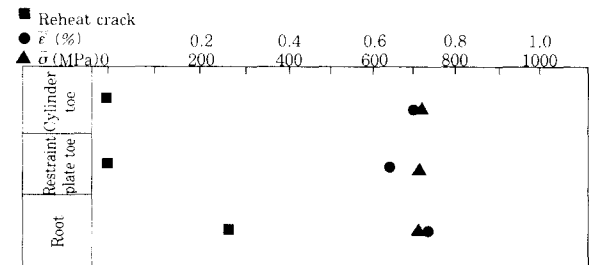


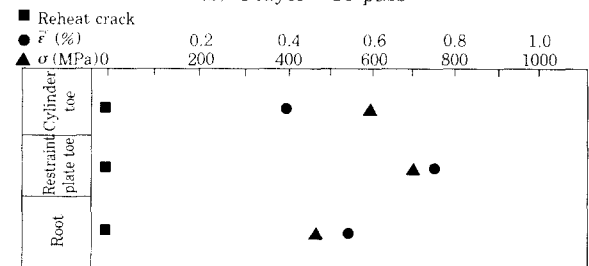
Fig. 2 Comparison of equivalent welding residual stress and creep strain with reheat crack test results (WES)



(a) 1 layer - 1 pass



(b) 4 layer - 15 pass



(c) 6 layer - 10 pass

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

험편에서의 재열균열은 초층용접하여 PWHT한 경우의 루트부에서만 발생하였다. 더욱이, WES 시험편과 같이 $\bar{\epsilon}^c$ 이 누적이 커지면 재열균열률도 커짐을 나타내었다.

4. 결 론

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

- 1) 직선비드 재열균열 시험편인 WES 3005호 시험편의 경우, 시험비드 종단부에서만 재열균열이 발생하였다.
- 2) 축대칭 시험편을 PWHT하면 재열균열은 최종층의 원통측 및 기반측의 종단부에는 생기지 않고, 루트부에서만 발생하였다.
- 3) 용접 적층수가 많아지면 균열발생률이 적어지는 경향을 나타내었다.
- 4) 재열균열 발생조건에 대한 영향인자에는 용접시의 열이력, 소성변형률등을 생각할 수 있으나, 상당 크리프 변형률의 크기를 기본으로 한 재열균열 발생의 평가는 재열균열 실험결과를 정리함으로써 구체적으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 핵심 연구과제(과제번호: 981-1004-029-2)에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 오세규 외2, "전력용 강재의 정적·동적 크리프의 상관성과 예측 및 AE평가(1)", 한국해양공학회지, 제12권, 제1호(1998), pp. 76-84
2. 이상국 외3, "발전용 고온 배관재료 2.25Cr1Mo강의 크리프 특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측", 한국해양공학회지, 제12권 제2호(1998), pp.65-70
3. 이상국 외 3, "ISM에 의한 발전용 고온 배관재료 2.25Cr1Mo강의 고온 크리프 수명예측에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제12권 제2호(1998), pp.71-78
4. 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
5. 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
6. 大南, 梅田, "高温における切欠きクリーブ破断に関する研究", 日本材料學會, 22-234(1973), pp.278-284
7. 大南, 梅田ら, "高温における1Cr-1Mo-1/4V鋼の切欠きクリーブ破断に関する研究", 日本機械學會論文集, 42-354(1976), pp.335-342
8. 上田, 福田, 丸, "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
10. 방한서 외4, "점열탄소성 이론에 의한 용접후열처리에 대한 수치해석", 한국해양공학회지, 제11권, 제1호(1997), pp.113-123
11. 방한서 외1, "2¼Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접이음부의 재열균열에 관한 수치해석적 연구", 한국 해양공학회지, 제14권 1호(2000)