

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

방한서\* · 김종명\*\*

\*조선대학교 선박해양공학과, \*\*담양대학 기계·자동차공학부

### A Numerical Analysis Study on the Reheating 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, Chonnam 517-800, Korea

**KEY WORDS:** Pressure vessel 압력용기, Welding residual stress 용접잔류응력, Reheating crack 재열균열, Creep strain 크리프 변형률, Thermal-elasto-plasto-creep 접열탄소성, Post welding heat treatment PWHT 용접후열처리

**ABSTRACT:** Recently, various pressure vessels like an atomic reactor and plant facilities become more larger and are needed to bear in both very high temperature and pressure condition. And, in making such a high pressure vessels, the amount of annual usage of 2¼Cr-1Mo steels which are predominant to resist high temperature, high pressure and corrosive circumstances are increasing. But, despite of this advantages of 2¼Cr-1Mo steel, when PWHT(post welding heat treatment)is carried out lots of reheating cracks are occur. In this reason, it is strongly needed to study and examine the mechanical behavior of welded joints through welding to PWHT process. So, in this study, welded nozzle parts of pressure vessel where reheat cracks are frequently occur are selected for analysis the crack-occurrence mechanism.

## 1. 서 론

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. 용접에 의한 구조물 제작시 필연적으로 발생한 용접잔류응력은 용접부의 좌굴강도 및 취성 파괴강도 등을 현저하게 저하시킬 위험성을 가지고 있으며, 용접잔류응력 및 확산성 수소의 제거와 용접부의 연화를 목적(금택과 무전, 1979; 금택 등, 1975; 대남과 매전, 1973; 대남 등, 1976; 상전과 목전, 1975)으로 보통 용접후열처리(PWHT; Post Welding Heat Treatment)를 수행한다.

그러나, Cr-Mo강의 경우, 이러한 열처리에 의하여 균열, 소위 재열균열(reheat crack)이 많이 발생(대남 등, 1976; 오 등, 1998; 이 등, 1998) 되어진다. 따라서, 역학적 관점에서 재열균열이 발생되어지는 인자로서 크리프변형률(creep strain)의 누적 이력과 용접잔류응력의 완화이력능의 역학적 거동을 규명(상전과 목전, 1975; 방 등, 1997) 하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 압력용기 노즐(nozzle) 용접부와 같은 파이프

원주용접에 대응되는 축대칭 시험편을 선정하고 이 시험편에 대하여 축대칭 열전도, 탄소성 및 크리프 해석을 수행하여 재열균열의 발생기구를 밝히고 재열균열의 발생을 관정할 수 있는 역학적 지표를 도출하고자 하였다. 또한, 압력용기 노즐부를 상정한 축대칭 기준식 시험편에 대해서 이음부 형상, 크기, 적층수등을 변화시켜 다양한 종류의 해석을 수행하여 역학적 관점에서 원주 용접이음부의 재열균열 감수성을 평가하는 합리적인 시험편을 제안하고자 한다.

## 2. 시험편과 용접 및 PWHT 조건

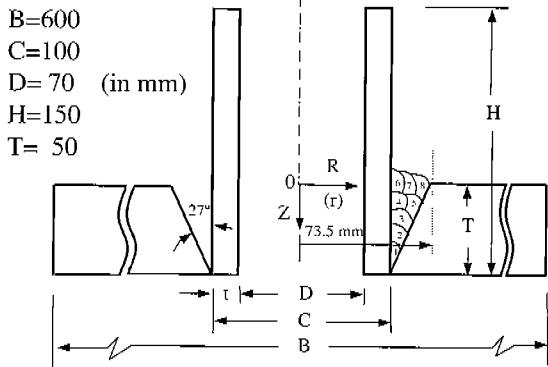
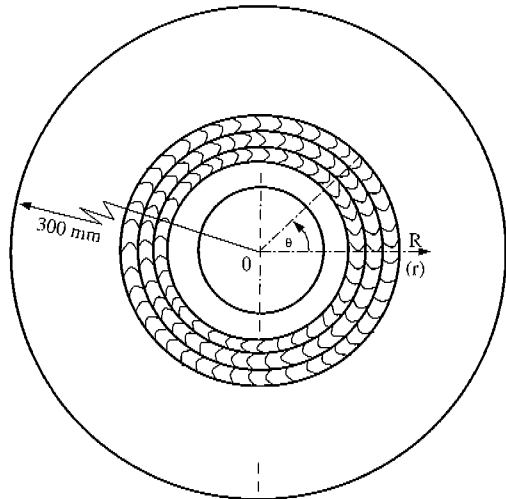
### 2.1 축대칭 시험편

압력용기 노즐(nozzle) 용접부에 관한 시험편의 해석모델 및 좌표는 Fig. 1에 나타내었으며, 재질의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 재료는 2¼Cr-1Mo강이며, 해석 모델의 좌표계는 용접선 방향을  $\theta$ , 반지름 방향을  $r$ , 관두께 방향을  $z$ 으로 하였다.

모델의 크기는 실 용접체와 동일한 역학적 구속조건을 갖는 치수로 압력용기의 폭(B)=600mm, 관두께 (T)=50mm, 원통(nozzle)의 높이(H)=150mm, 원통의 내경(D)=70mm, 원통의 두께(t)=15mm로 하였다. 용접은 5층-8패스를 수행하였으며, 초층용접 조건은 입열량 (Q)=12KJ/cm(전류:I=120A, 전압:V=25V, 용접속도:v=0.25cm/s)로 하고 예열 및 패스간 온도는 200°C로 하였다.

**Table 1** Chemical composition of steel tested (wt %) (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



**Fig. 1** Model for analysis of axisymmetric specimen

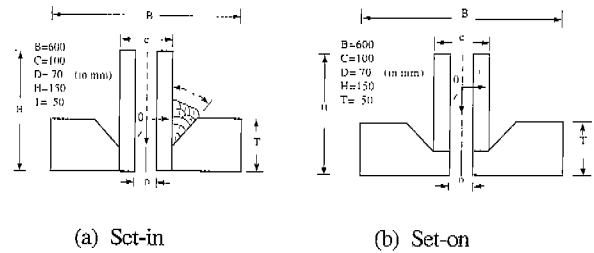
또한, PWHT조건은 승온속도는 100℃/h로 하였으며, 최고온도는 600℃로 유지(holding)시간은 3시간으로 하였다. 마지막으로 재열균열 발생이 가장 높다고 생각되어지는 최종 8페스 Toe부의 열영향부 조립역(거친 결정립) 부분(Fig. 1의 점선부)을 관찰하여 시험편의 용접에서부터 PWHT까지의 역학적 거동을 밝히고자 하였다.

**2.2 감수성 평가식 시험편**

축대칭 시험편 용접이음부의 형상, 크기 및 적층수등을 변화시켜 해석한 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

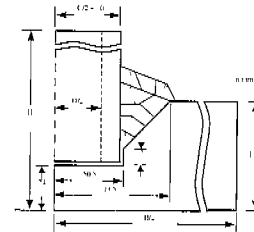
시험편 용접이음부의 역학적 구속조건이 재현될수 있다고 생각되는 2가지의 시험편을 설정하였다. 하나는 Fig. 1에서 서술한 시험편과 같이 원통을 기반의 하부까지 삽입하고, 원통의 중앙부에서의 각도 45°의 개선을 취하였다.

이를 셋인 형(Set in type)(Fig. 2(a)의 용접이음부(이하 Set-in 이음부라 부른다.)라 한다. 다른 하나는 기반의 판 두께 ½까지를 삽입하고, 그 위에 원통을 놓은 셋은 형(Set-on type)(Fig. 2 (b)의 용접이음부(이하 Set-on 이음부라 부른다.)라 한다. 용접은 5층-8페스 다층 용접하였다.



(a) Set-in

(b) Set-on



(c) Model M1-M5 and pass sequence for analysis

**Fig. 2** Axisymmetric test specimens for PWHT

**3. 결과 및 고찰**

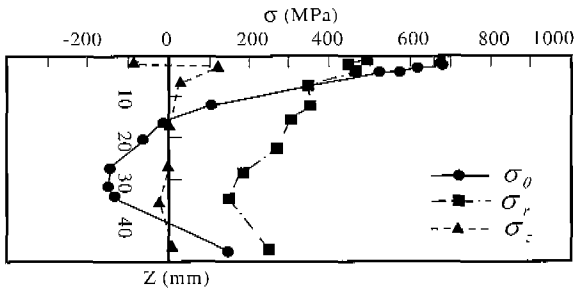
**3.1 축대칭 시험편 고찰**

최종패스 종단부 즉, HAZ(heat affected zone)조립역( $r=74.4, z=0.6\text{mm}$ )의 응력집중부(이후, 주목점이라 부른다.)를 포함하는 판두께(z방향) 방향에 발생하는 용접잔류응력 및 소성변형률의 분포를 Fig. 3(a), (b)에 도시하였다.

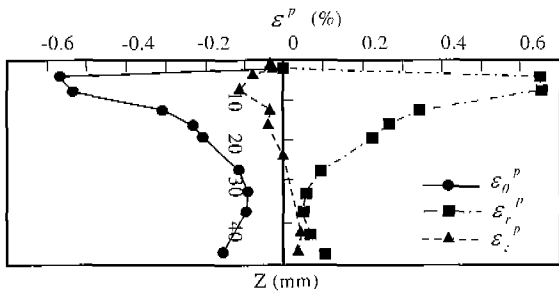
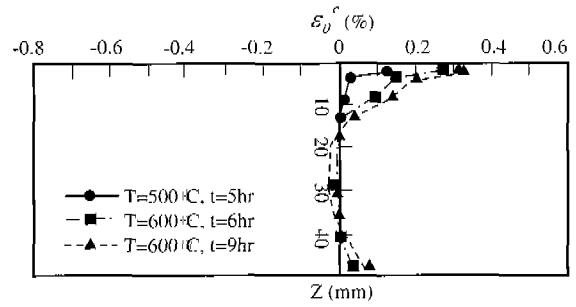
주목해 보면, Fig. 3(a)에서 나타낸 바와 같이 용접잔류응력의 용접선의 원주(円周)방향 성분  $\sigma_\theta$ 는 판두께의 상부와 하부에서는 인장을 나타내고, 중앙부에서는 압축을 나타냈다. 특히, PWHT시에 발생하는 재열균열(횡균열)에 대해서, 최대크기로 발생하고 있다고 생각되는 반경방향의 응력성분  $\sigma_r$ 은 판두께의 전체에 걸쳐 인장이 발생되고 있다.

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 나타내었으나, 그 크기는 작게 나타났다. 주목점의 HAZ(열영향부)조립역에 발생하는 용접잔류응력 성분의 크기를 보면, 반경방향 성분이 응력집중부의 영향을 매우 크게 받으므로  $\sigma_\theta > \sigma_r \gg \sigma_z$  순으로 나타났다.



(a) Welding residual stress



(b) Plastic strain

Fig. 3 Distribution of welding residual stress and plastic strain along z-direction

Fig. 3(b)의 잔류 소성변형률에 주목해 보면, 원주방향 성분  $\epsilon_{\theta}^p$ 는 전체 영역에서 크기가 음(-)이 되고, HAZ조립역의 다소 아래에서 최대의 값이 된다. 반경방향 성분  $\epsilon_r^p$ 는 판두께의 전 영역에 있어서 양(+)의 값을 가지나  $\epsilon_{\theta}^p$ 와 동일한 양상으로 HAZ조립역의 다소 아래에서 최대치가 된다. 판두께 방향 성분  $\epsilon_z^p$ 은 다른 두성분에 비해서 작게 나타났다.

압력용기 노출부를 상정한 축대칭 기준 시험편의 PWHT중에 판두께에 발생(Fig. 1의 점선의 위치)하는 크리프변형률의 누적 이력을 Fig. 4에 나타내었다.

결과에 의하면, 전(全) 크리프변형률 성분의 누적은 모재에 비해 HAZ에서 현저하게 크게 나타났다.

승온온도 500°C까지는 원주방향의 크리프변형률 성분  $\epsilon_{\theta}^c$ 는 반경방향 성분  $\epsilon_r^c$ 과 거의 동일하게 누적되나, 500°C를 초과하면  $\epsilon_z^c$ 의 누적이  $\epsilon_{\theta}^c$ 의 누적보다 크게 나타났다. 이것은, 응력 집중부의 영향을  $\epsilon_z^c$ 가 최대로 받기 때문이라고 판단된다.

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

PWHT초기에 승온온도가 500°C에 도달할 때 까지 용접선방향 응력성분  $\sigma_{\theta}$ 는 크게 완화되고, 거의  $\sigma_r$ 과 동일한 정도의 크기가 된다.

이것으로부터 반경방향 성분  $\sigma_r$ 이 응력집중의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

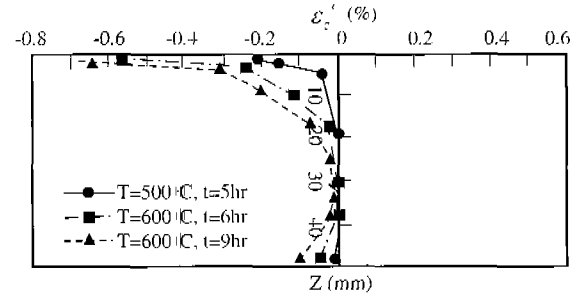
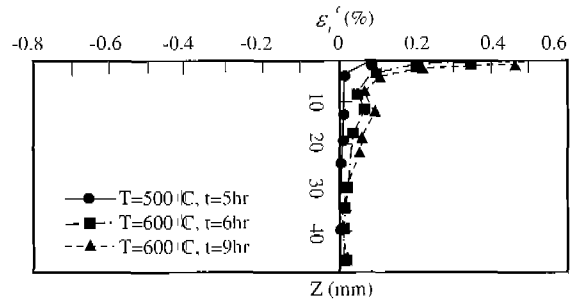


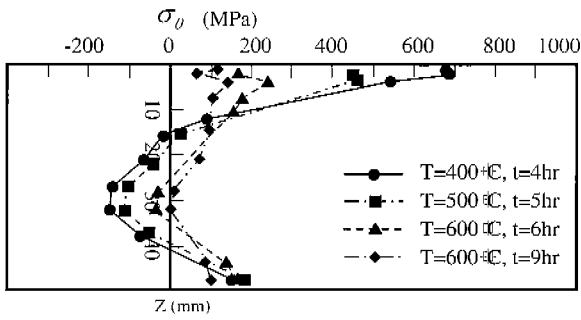
Fig. 4 Distribution of accumulated creep strain along z-direction during PWHT

$\sigma_r$ 과  $\sigma_{\theta}$ 와의 차가 없어진 이후 유지(holding)온도가 600°C가 되면  $\sigma_r$ 이  $\sigma_{\theta}$ 보다 커지고, 유지온도 600°C에 도달후 유지 과정에 들어가면  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{\theta}$ 의 분포는 변화하지 않은 채 그 크기는 다소 완화된다.

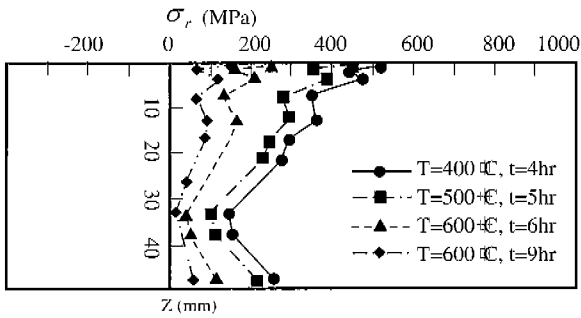
또한, 승온과정에서의 응력완화를 고찰해 보면, 유지과정까지는 모재에 비해서 주목점(HAZ 조립역)에서 응력완화의 정도가 현저하게 나타나지만, 유지과정에 들어가면 주목점과 모재와의 응력차가 거의 없어지게 되고 응력은 전체적으로 같은 양상으로 완화된다.

### 3.2 감수성 평가식 시험편 고찰

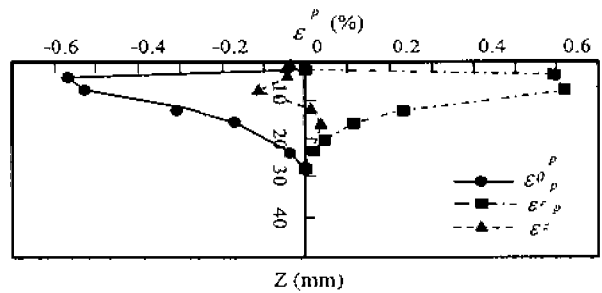
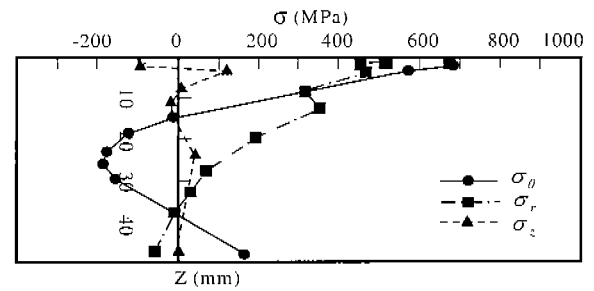
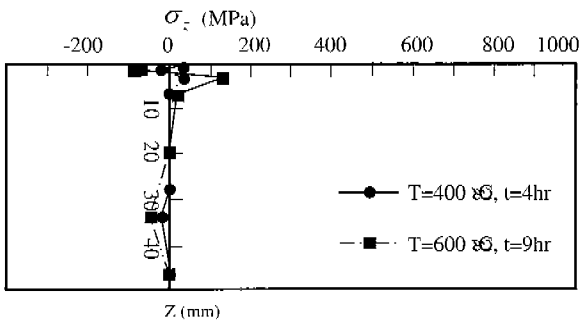
2개의 용접 이음부에 대해서 용접에서 PWHT까지의 일련의 해석을 수행한 결과, Set-in, Set-on 이음부, 또한 3.1절에서 전술한 Fig. 1 시험편을 더하여 3개의 시험편이 가지는 역학적 특성을 비교 검사하여, 시험편 제작이 용이하고 경제성을 만족하는 최적의 용접이음부의 형상을 결정하였다.



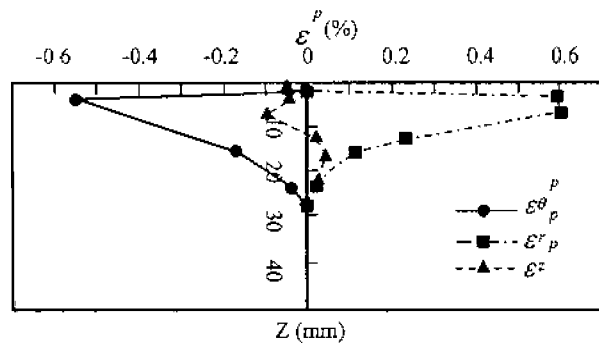
(a) Welding residual stress (Set-in)



(b) Welding residual stress (Set-on)



(c) Plastic strain (Set-in)



(d) Plastic strain (Set-on)

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

치수를 결합할 때 기반의 판 두께(T)=50mm 및 삽입한 원통의 외경(C)=100mm로 일정하게 하고, 기반의 직경(B), 원통의 높이(H), 중심원통등 5개의 치수를 산정하여 이것을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Models for analysis

Model	B	C	D	H	T
M1	600	100	70	150	50
M2	500	100	70	150	50
M3	500	100	0	150	50
M4	500	100	0	75	50
M5	400	100	0	75	50

Set-in 및 Set-on 이음부 양 시험편에 대해 주목점(최종 페이스 종단부: r=74.4, z=0.6mm)의 판두께 방향으로 용접잔류응력 및 소성변형률의 분포를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6 Distribution of welding residual stress and plastic strain along z-direction

양시험편 모두, 주목점을 포함한 판두께 방향으로 용접잔류 응력은 똑같은 분포를 나타내었다. 또한, 주목점에서,  $\sigma_\theta, \sigma_\gamma$  은 인장이고,  $\sigma_z$  는 압축이며 그 크기는  $\sigma_\theta$ (용접선 방향 성분)  $>$   $\sigma_\gamma$ (반경 방향 성분)  $>$   $\sigma_z$ (판두께 방향 성분)이다.

기준모델(Fig. 3)과 Set-in, Set-on 이음부(Fig. 6)에 생기는 용접잔류응력을 고찰해 보았다.

판두께 방향으로의 용접잔류응력 분포에 주목해 보면,  $\sigma_\theta, \sigma_z$  는 3개의 이음부가 동일한 분포를 나타내었다. 그러나, 반경방향성분  $\sigma_\gamma$ 은 Set-in, Set-on 이음부와 기준모델에서는 판 두께의 중앙부까지는 똑같은 경향으로 나타나지만, 판두께 중앙부에서 하부까지 기준모델과는 다르게 나타났다.

즉, Set-in, Set-on 이음부의 경우, 기반이 판 두께의 하부(Z=50mm)에서는  $\sigma_\gamma$ 은 거의 발생하지 않으나, 기준 모델의 경우, 판 두께 하부에서도 판두께 중앙부와 거의 동일한 크기의  $\sigma_\gamma$ 이 생긴다.

이것은 기준 모델의 경우 판두께 하부에서 적층되나, Set-in, Set-on 이음부의 경우 판두께 중앙부에서 용접이 이루어지기 때문이라 판단된다.

또한, 용접잔류응력의 크기의 순서는  $\sigma_\theta > \sigma_\gamma > \sigma_z$  로 되고, 3개의 이음부에서 모두 동일하게 나타났다. 소성변형율의 경우, 용접잔류응력 분포와 같이 Set-in, Set-on 이음부에서는 기반의 판두께 하부에서 소성변형율이 생기지 않으나 기준모델의 경우는 발생하였다.

이상에 의해 제작이 용이하고, 경제적이며 역학적조건도 기준모델과 동일한 Set-in, Set-on 용접이음부를 최적의 축대칭 시험편 형상으로 선정하였다.

위에서 서술한 Set-on type의 용접이음부에 대해서 Table 2 (모델 1이 주목점에서 기준모델을 구현한 모델이다.)에 나타난 다른 4개의 해석모델(모델 M2~모델M5)를 설정하고, 기준모델과 동일한 역학적 조건을 유지하는 최소치수의 시험편을 결정하였다.

각 모델의 주목점을 포함한 용접 잔류응력의 판 두께 방향으로의 분포를 Fig. 7에 나타내었다.

전(全)모델에서 용접잔류응력의 용접선방향 성분  $\sigma_\theta$  와 판두께 방향성분  $\sigma_z$ 의 분포양상 및 크기는 거의 같으나 반경방향 성분  $\sigma_\gamma$ 은 모델 M2 및 M3,M4는 같은 양상을 나타내었고, 모델 M5와는 다르게 나타났다. 이것으로, 반경방향 성분  $\sigma_\gamma$ 은 원통의 높이와 지름보다도 기반의 직경에 크게 의존함을 알수 있다.

다음에 각 모델의 주목점을 포함한 누적상당 크리프변형율의 판두께 방향으로의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 누적상당 크리프변형율 모두 각 모델에서 크리프의 크기는 각각 다르나, 판 두께 방향으로 분포는 똑같은 경향을 나타내었다.

여기서, 주목점을 주목하면 모델 M5를 제외하고 다른 모든 모델에서 거의 똑같은 누적값이 된다. 또한, 주목점의 누적상당 크리프변형율  $\bar{\epsilon}$ 의 크기의 순서는  $M2 \geq M3 \geq M4 \geq M5$  이다.

이상의 결과에 의해 주목점에서 모델 M1의 역학적거동을 구현하는 최소치수의 축대칭 시험편으로 하고, 모델 M4가 실용적인 시험편 치수로 나타났다.

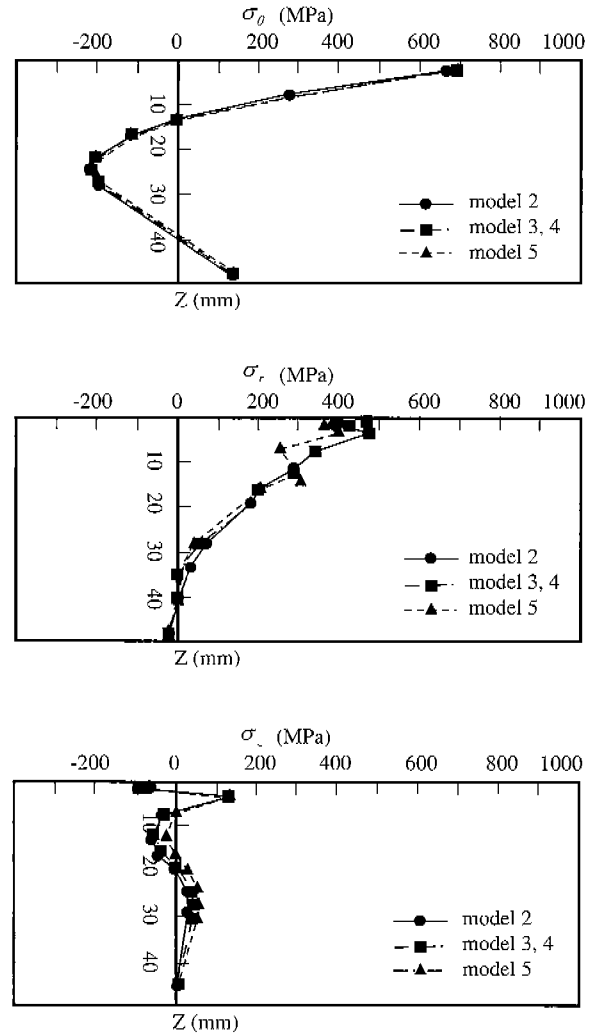


Fig. 7 Distribution of welding residual stress in z-direction

다음은 M4 모델에 대해서 재열균열발생의 가능성이 최고로 높은 주목점(3곳)에서 용접상당잔류응력  $\bar{\sigma}$  및 누적상당크리프  $\bar{\epsilon}$ 에 주목하고 용접 적응수가 재열균열에 미치는 영향을 분석하였다.

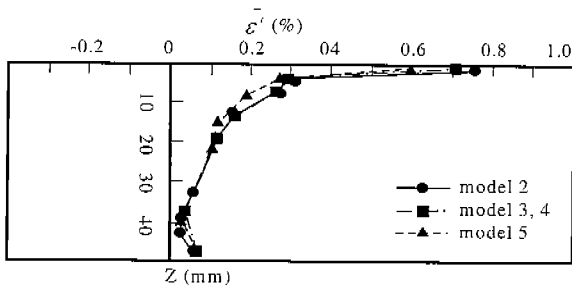
여기서, 적응수의 영향을 비교하기 위해 초층, 4층-5패스 및 5층-8패스의 3가지 조건을 살펴보았다.

또한, 초층에서 주목점은 루트부와 원통측 (r=49.9, z=14.5(mm)) 및 기반측 (r=58.5, z=14.5(mm))의 종단부의 HAZ 조립역을 4층의 경우는, 루트부와 원통측 (r=49.9, z=4.5(mm))와 기반측(r=65.1, z=4.5(mm))에서 종단부의 용접중부의 HAZ 조립역에 주목하였다.

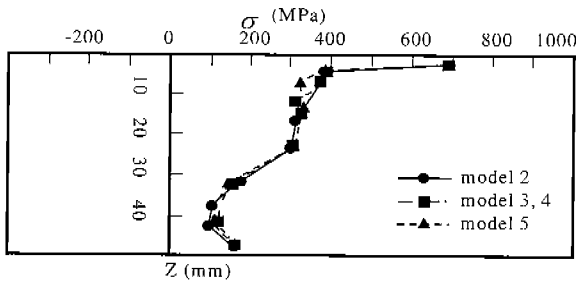
용접 적응순서는 Fig 2(c)에 의한 것으로 하였다.

또한, 5층-8패스(수층 용접종료)의 결과는 모델 M4이다. 3개의 주목점에서 용접잔류응력  $\bar{\sigma}$  및 누적상당 크리프 변형율  $\bar{\epsilon}$ 를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9(a)의 초층 용접의 경우, 주목점은 전부 항복하고 주목점에 생긴  $\bar{\sigma}$ 은 일정하였다. 또한,  $\bar{\epsilon}$ 는 루트부>원통측>기



(a) Equivalent creep strain



(b) Equivalent stress

Fig. 8 Distribution during PWHT and after welding in z-direction

반측 순으로 나타났다.

Fig. 9(b) 에서처럼 4층 용접하고, 이것을 PWHT 하면 주목점에 생기는  $\bar{\sigma}$ 는 일정하나,  $\bar{\epsilon}^c$ 의 크기는 루트부에서 각각 크기는 3개의 주목점에서 거의 일정해진다.

이러한 것에 대해 Fig. 9(c)에 나타낸 바와 같이 전층용접하고, 이것을 PWHT하면 최종 페스 지단부의 기반측에서는  $\bar{\epsilon}^c$ 은 4층의 경우의 루트부에 누적한  $\bar{\epsilon}^c$ 와 똑같은 정도이나 다른 주목점에서는 매우 작아진다. 이상에서 용접잔류상당 응력  $\bar{\sigma}$ 은 적층에 의한 영향을 받지 않으나, 상당크리프 변형을  $\bar{\epsilon}^c$ 은 적층수에 의존한다. 그 중에서도 초층 용접한 것을 PWHT하면 루트부의 누적이 현저히 크게 나타났다.

#### 4. 결 론

해석결과를 통하여, 압력 용기 노즐부의 용접잔류응력 생성 기구 및 PWHT시의 각종 역학적 거동을 분명히 하였으며, 재열균열 발생을 억제할 수 있는 역학적 지표를 마련하였다. 또한, 원통이음부의 재열균열 감수성을 평가하는 새로운 시험편을 제안하였다.

- (1) 반경방향 (용접선 직각 방향)의 잔류응력성분  $\sigma_r$ 은 판 두께 방향으로 모두 인장이다.
- (2) 종단부의 응력집중부 HAZ 조립역에서는 반지름 방향 크리프변형률 성분  $\epsilon_r^c$ 의 누적이 크게 나타났으며, PWHT 후의 반지름방향 잔류응력성분  $\sigma_r$ 은 완화되었다.

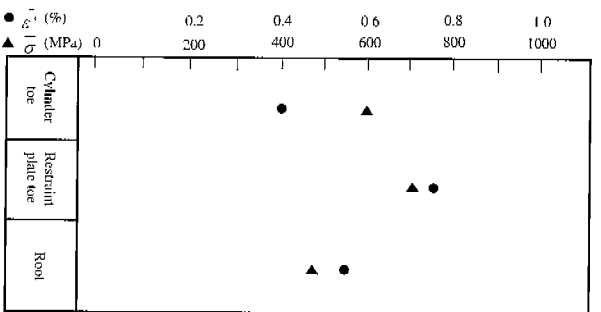
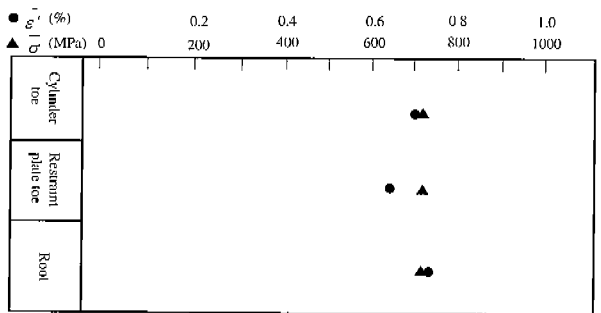
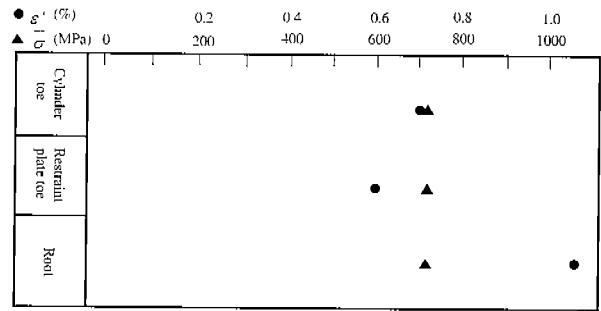


Fig. 9 Comparison of equivalent welding residual stress with accumulated equivalent creep strain in view-points of each test specimen

- (3) 축대칭 시험편에 생기는 용접잔류응력 및 PWHT 후의 누적 크리프 변형률의 분포와 크기는 기반의 크기의 영향을 크게 받는다.
- (4) 축대칭 시험편을 이용하여 재열균열 감수성을 평가시험을 행할 경우, Set-on이음부에서 모델 M4의 치수를 이용하여 초층 용접만 행하고, 이것을 PWHT하는 것이 역학적으로 매우 엄격한 시험편으로 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

- 방한서 외4(1997). “접열탄소성 이론에 의한 용접후열 처리에 대한 수치해석”, 한국해양공학회지, 제11권, 제1호, pp 113~123.
- 오세규 외2(1998). “전력용 강재의 정적·동적 크리프의 상관성과 예측 및 AE평가(1)”, 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, pp 76~84.
- 이상국 외5, “발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성 평가(3), 한국해양공학회, '97춘계학술 발표집, pp 73~77.
- 이상국 외3(1998). “발전용 고온 배관재료 2.25Cr1Mo강의 크리프 특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측”, 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 65~70.
- 이상국 외 3(1998). “ISM에 의한 발전용 고온 배관 재료 2.25Cr1Mo강의 고온 크리프 수명예측에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 71~78.
- 上田, 福田(1975). “応力除去焼なましの力学問題に対する有限要素法の適用”, 日本溶接學會誌, 44-11, pp 902~908.
- 大南, 梅田(1973). “高温にあ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, pp 278~284.
- 大南, 植田ら(1976). “高温にあける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, pp 335-342.
- 金澤, 武田(1979). “応力除去焼なましわれ”, 日本金屬學會會報, 18-6, pp 425~431.
- 金澤, 山戸ら(1975). “力除去焼純われ(再熱焼戻)に関する研究(第1報)”, 日本溶接學會誌, 44-10, pp 791~798.

---

1999년 11월 10일 원고 접수

2000년 2월 17일 수정본 채택