

T-Joint 용접부의 Groove형상별 크리프 특성에 관한 연구

방한서* · 김종명**
(99년 6월 14일 접수)

A Study on the Creep Characteristics according to Groove Shape of T-Welded Joint

H. S. Bang* · J. M. Kim**

Key Words : Post Welding Heat Treatment(용접후열처리), Numerical Analysis(수치해석), Welding Residual Creep Strains(용접잔류 크리프 변형율), Thermal-Elasto-Plasto-Creep(점열탄소성), T-Welded Joint(T-용접부)

Abstract

The welding residual stresses produced by the welding frequently caused a crack and promote stress corrosion etc. in HAZ(heat affected zone) contained with external load and weakness of material. Therefore, PWHT(post welding heat treatment) is widely used to reduce welding residual stress, to relax hardening of heat affected zone and to get rid of impurity. In this study, in order to define the effect on shapes of T-welded joint, during the post welding heat treatment, we have carried out numerical analyses on the several test pieces by using computer program which was based on thermal-elasto-plasto-creep theories for the study.

The main results obtained from this study is as follows :

- 1) The mechanical difference for change the thickness of plate and groove angle did not appear.
- 2) The distribution modes of welding residual stresses are same on the all test specimens during the post welding heat treatment.
- 3) In a mechanical point of view, minimum groove angle(40°) is more suitable than maximum groove angle(60°).
- 4) Therefore, it is appropriate to minimize the size of groove shape in strength and safety.

1. 서론

용접부의 재질의 연화 및 용접잔류응력을 완화하기 위하여 용접후열처리(PWHT : post welding heat treatment)가 광범위하게 행해지고 있고, 이에 대한 연구결과도 발표^{1,2,3,4)}되고 있지만, 지금까지 국내에서는 국외에 비하여 용접후열처리에 대한 체계적이고, 과학적인 연구보다는 실험과 경험에 의존하고 있는 실정이다. 용접후열처리를 수행하면 가열 온도와 유지 시간 등의 영향을 받는 크리프(creep)현상에 의한 용접잔류응력의 완화, 용착금속 및 열영향부(heat affected zone)의 연성향상, 함유 가스의 제거 등 많은 효과를 기대할 수 있는 반면, 용접후열처리는 가열 온도, 가열 속도, 냉각 속도 등에 의하여, 강의 물리적 특성 및 역학적 조건 등에 영향을 주기 때문에 용접 구조물에 악영향을 초래할 수도 있다.

따라서, 용접후열처리를 수행함에 있어 사전에 정도 좋게 결과를 예측하여 적절한 용접후열처리 조건^{5,11)}을 선정하여 수행하여야 하며, 무엇보다 중요한 것은 용접구조물의 성능을 향상시키는 것이 목적이므로 본 연구에서는 시간, 온도 및 응력 특성을 고려한 변형을 경화법칙을 도입하고, 최적의 열처리 조건(열처리 온도 및 시간)을 선정한 크리프열탄소성 이론 해석에 의하여 용접후열처리 과정에서 발생하는 역학적 제특성을 규명하고자 하였다.

이를 위하여, 용접후열처리시의 용접잔류응력 완화에 대한 역학적 특성을 정도 높고 손쉽게 규명할 수 있도록 크리프열탄소성 이론을 정식화하였다.

또한, 유한요소 이론을 도입한 열처리 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여 강구조물 제조현장에서 광범위하게 사용되어지는 T-joint 용접부의 형상 변화를 고려한 각각의 시험편에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 용접후열처리시의 잔류응력, 상당잔류응력, 크리프변형을 누적, 상당크리프변형율의 크기 및 분포와 그 발생기구를 규명하여, 최적 용접이음부형상에 대한 PWHT(post welding heat treatment)시의 특성을 고찰 하고자 하였다.

2. 크리프열탄소성이론의 유한요소 정식화

용접후열처리 해석에서는 Fig. 1에 나타난 것처럼 제3기의 크리프 과정은 크리프 속도가 급속히 증가하여 단시간에 파단에 이르게 되므로, 본 해석 과정에서는 포함하지 않고 제2기 크리프 과정의 연장으로 취급하여 해석하였다. 또한, 용접후열처리시 최고 온도로부터 실온까지 냉각하는 과정에서 일반적으로 크리프 변형이 발생하고, 이로 인하여 응력은 다소 완화되는 현상이 나타나지만, 본 연구에서는 냉각과정에서는 크리프 변형이 발생하지 않는 것으로 하여 용접후열처리시의 역학적 특성을 해석하였다.

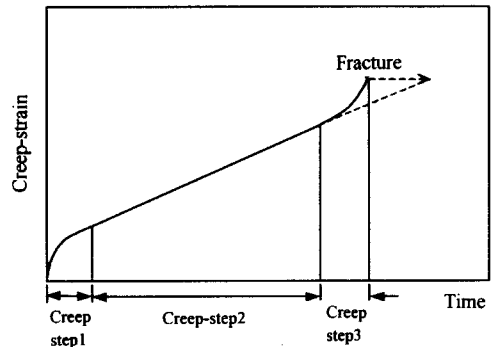


Fig. 1 Classification of creep curve and stage

2.1 변형을 경화이론에 따른 크리프속도

변형을 경화이론에 따른 크리프 속도는 단축실험에 의해 구해진 상당크리프 속도를 Mises형 크리프이론에 따라, 다축 크리프 구성식을 도출하면, 상당크리프 변형속도는 (1)식과 같다.

$$\{\dot{\bar{\epsilon}}^c\} = m A^{1/m} (\bar{\sigma})^{n/m} (\bar{\epsilon}^c)^{(1-1/m)} \quad (1)$$

또한, Von-mises형 크리프 이론에 따른 상당크리프 속도와 크리프 속도의 관계는 (2)식과 같이 구성할 수 있다.

$$\{\dot{\bar{\epsilon}}^c\} = \frac{3}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}^c}{\bar{\sigma}} \right) \{\sigma'\} \quad (2)$$

따라서, 변형을 경화이론에 따른 크리프 속도를 구성하여 천이크리프 상태에서는 (3)식을 사용하였으며,

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = (3/2) mA^{1/m} \bar{\sigma}^{(n-m)/m} (\bar{\epsilon}^c)^{1-1/m} \{\sigma'\} \quad (3)$$

정상크리프 상태에서는 (4)식을 사용하였다.

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = (3/2) \beta \bar{\sigma}^n \{\sigma'\} \quad (4)$$

여기서, $\{\dot{\epsilon}^c\}$: 크리프 변형률 속도, $\bar{\sigma}$: 상당응력, $\bar{\epsilon}^c$: 상당크리프 변형률, $\{\sigma'\}$: 편차 응력, m, A, n : 크리프상수 이다.

2.2 탄소성역에서 크리프 구성방정식

탄성역에서 전(全)변형을 증분은 열변형을 증분과 크리프변형을 증분 및 적합관계 조건을 만족하기 위하여 발생하는 탄성변형을 증분의 합으로 나타내어 (5)식과 같이 사용하였으며,

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^c\} + \{d\epsilon^T\} \quad (5)$$

소성역에서는 (5)식에 소성변형을 증분을 고려한 (6)식을 사용하였다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^c\} + \{d\epsilon^T\} + \{d\epsilon^p\} \quad (6)$$

여기서, $\{d\epsilon\}$: 전 변형을 증분,
 $\{d\epsilon^e\}$: 탄성 변형을 증분,
 $\{d\epsilon^c\}$: 크리프 변형을 증분,
 $\{d\epsilon^T\}$: 열 변형을 증분,
 $\{d\epsilon^p\}$: 소성 변형을 증분 이다.

또한, 크리프 변형을 증분은 크리프 속도에 시간 증분을 곱하여 (7)식과 같이 구성하여 사용하였다.

$$\{d\epsilon^c\} = \{\dot{\epsilon}^c\} dt \quad (7)$$

여기서, $\{\dot{\epsilon}^c\}$: 크리프 속도, dt : 시간 증분이다.

3. 해석모델 및 후열처리 조건

3.1 해석모델

T-joint 시험편의 형상은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 용접시 용접부의 역학적 조건 즉, 시험편이 수축 및 팽창의 영향을 받지 않는(무한판의 역학적 조건) 최소크기로 선정하였으며, 시험편의 재원은 Table 1에 나타내었다. 해석모델에서 x는 용접선 방향, y는 판(plate)의 폭 방향 및 웨브(web)의 두께 방향을 나타내고, z는 판의 두께 방향 및 웨브의 폭 방향을 나타낸다.

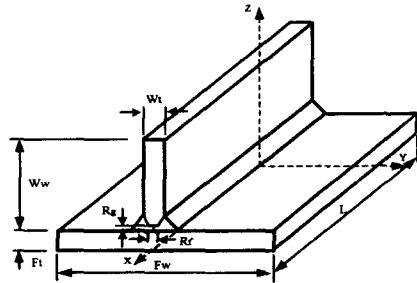


Fig. 2 Model of test specimen

또한, 홈 형상 선정은 작업조건 및 현재 사용중인 각종 규정을 참고하여, 최소각은 실제 작업현장에서 용접봉의 운봉조건등을 고려하여 작업가능한 최소각 40° 를, 최대각 60° 는 규정 및 규칙에서 정한 값으로 선정하였으며, 웨브 두께는 범용성을 고려하여 10mm, 20mm 및 30mm를 선정하였다. 재료는 연강(SM41)을 사용하였으며, 시험체의 용접은 자동 submerged-arc 용접을 하였고, 용접조건은 전류 700-850(Amperes), 전압 33-40(Voltages) 및 용접속도 30-50(cm/min)로 하였다

Table 1 Dimensions of specimen (unit:mm)

Dimension	①	②	③	④	⑤	⑥
Length of Model(L)	600	600	600	600	600	600
Width of Web(Ww)	170	170	170	170	170	170
Width of Flange(Fw)	300	300	300	300	300	300
Thickness of Web(Wt)	10	10	20	20	30	30
Thickness of Flange(Ft)	30	30	30	30	30	30
Weld size(l)	8	8	16	16	24	24
Root Gap size(Rg)	2	2	3	3	4	4
Root Face size(Rf)	3	3	4	4	5	5
Bevel Angle	40°	60°	40°	60°	40°	60°

요소분할은 용접수행시 발생되었던 최종 용접잔류응력 분포특성을 고려한 것으로, 4절점 아이소-파라미터를 도입하여 4절점 사각형요소 와 4절점 삼각형 요소를 사용하여 총요소수 700-900개, 총절점수 800-1100개로 분할 하였으며, 크리프 해석에서 사용한 경계조건은 시험편의 대칭성을 고려하여, 시험편이 자유롭게 수축 및 팽창 할 수 있도록 웹(Web) 상단의 중앙점(y=0mm, z=200mm)을 좌·우(y방향)로 구속하고, 플랜지(flange) 하단의 중앙부(y=0mm, z=0mm)를 좌·우(y방향), 상·하(z방향)로 구속 하였다.

3.2 용접후열처리 조건

용접후열처리 해석 조건은 용접후열처리중에 새로운 열응력이 발생되지 않도록 하기 위해, Table 2에 나타낸 바와 같이 시험체 전체가 일정하게 온도가 상승하도록 승온속도를 100℃/h로 하였고, 유지 시간(holding time) 및 온도는 600℃에서 1시간으로 하였다. 또한, 400℃ 이하의 온도역에서는 크리프변형율(creep strain)이 매우 적으므로 400℃ 이하에서는 크리프변형율이 발생하지 않는 것으로 하였다. 더욱이 용착금속, 열영향부 및 모재의 크리프 속도는 전부 동일하게 취급하였다.

Table 2 Conditions of PWHT

Time(hour)	Temperature(℃)
4hr	400℃
5hr	500℃
6hr	600℃
7hr	600℃

4. 고찰

4.1 홈 형상별 특성

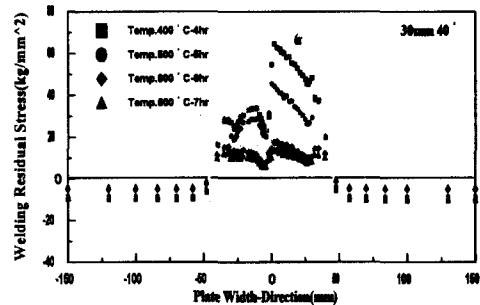
Fig. 3 (a), (b), (c)에서 도시한 그림은 용접시 발생되었던 용접잔류응력 성분(σ_x, σ_y 및 σ_z)이 용접후열처리(PWHT) 즉, 응력제거 열처리시에 변화되어 가는 과정을 시간 및 온도별로 도시한 것이다.

주목점은 두께가 일정(30mm)하고 홈 형상이 40°에서 60°로 변화할 때, 플랜지 상표면에서 두께

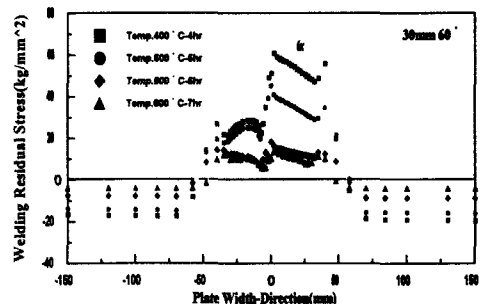
방향으로 2mm인 지점에서 플랜지 폭 방향으로 응력 성분별로 나타내었다. (a)그림은 σ_x 성분, (b)그림은 σ_y 성분, (c)그림은 σ_z 성분을 나타내고 있다.

그림에서 도시한 바와 같이, T-joint 용접부의 홈 형상이 40°에서 60°로 변화함에 따라 용접후 열처리시의 응력완화 특성은 시간 및 온도별로 동일한 양상을 나타내었고, 홈 형상의 변화에 따른 차이점은 보이지 않았다.

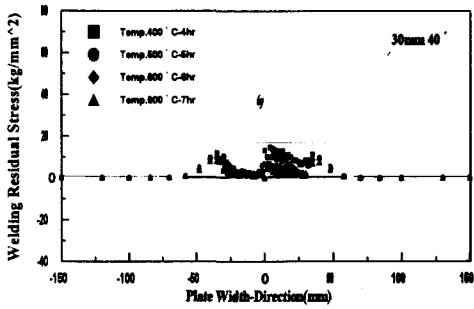
또한, 홈 형상이 40° 및 60°일 때 공히 용접선 길이 방향 성분(σ_x)이 용접선 폭 방향(σ_y) 및 두께 방향 성분(σ_z)에 비해 응력완화 정도가 크게 나타났는데 이는 용접잔류응력이 큰 쪽의 크리프 진행속도가 빠르기 때문이라고 사료되어진다. 또한, 용접후열처리시 응력완화정도를 온도별로 보면 응력의 각 성분(σ_x, σ_y 및 σ_z)은 모두 500℃~600℃에서 가장 많은 응력완화 정도를 나타냈으며, 600℃ 상태에서 승온시키지 않고 1시간 동안 유지하였을 때의 응력완화정도, 온도의 상승이 없는 관계로 단지 시간에 기인한 응력의 완화 현상을 보이거나 그 완화정도는 적게 나타났다.



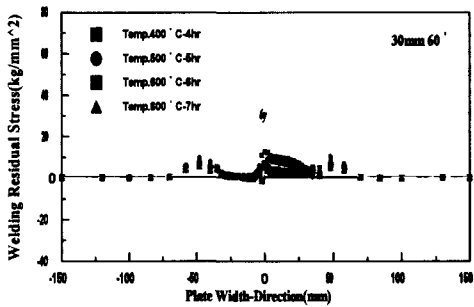
(a.1) 30mm 40° (σ_x)



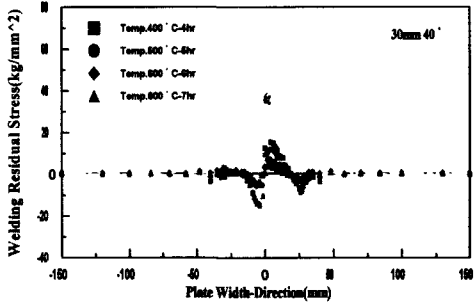
(a.2) 30mm 60° (σ_x)



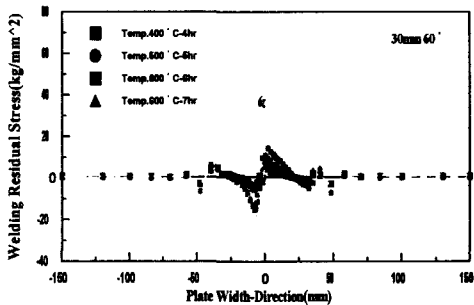
(b.1) 30mm 40° (σ_y)



(b.2) 30mm 60° (σ_y)



(c.1) 30mm 40° (σ_z)

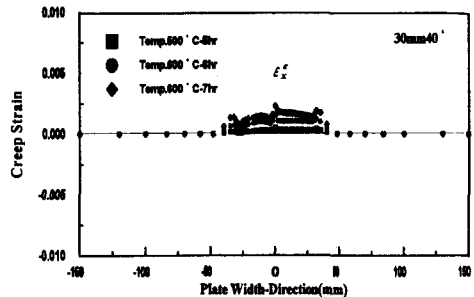


(c.2) 30mm 60° (σ_z)

각 성분별 잔류응력의 완화정도는 용접잔류응력이 큰 순서로 완화되는 폭이 증가하였다. 이것은 고응력과 저응력에 의한 크리프 속도의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 4 (a), (b), (c)의 그림은 Fig. 3 (a), (b), (c)와 동일한 위치에서 용접후열처리 시간별, 온도별 크리프 변형을 누적과정을 도시한 것이다. 그림에서 도시한 바와 같이 홈 형상의 변화(40° 및 60°)에 따른 크리프 변형을 누적양상은 동일한 형상을 나타내었으며, 그 크기의 차도 거의 발생되지 않았고, 각 성분별 누적정도는 $\epsilon_x^c > \epsilon_y^c > \epsilon_z^c$ 순으로 나타났다.

또한, 용접후열처리에 완화된 응력의 정도와 비교해 보면, 응력의 완화정도가 많이 발생되었던 온도 및 시간대에 있어서는, 크리프변형을 누적분포도 많이 진행됨을 보이고 있다. 이것은 용접후열처리의 응력완화 정도가 크리프변형을 누적과 비례관계에 있음을 보여준 것이라 사료된다. 특이한 사항은 T-joint 용접부에 발생하는 크리프변형을 성분중 용접선 방향의 성분인 ϵ_x^c 는 양(+)의 값을 나타내는데 반해, 용접선 폭 방향 및 두께 방향의 성분인 ϵ_y^c 및 ϵ_z^c 는 음(-)의 값을 나타내는데, 이는 크리프 이론의 유한요소식으로서의 정식화 과정에서 크리프변형을 비압축성으로 취급하였기 때문이다. 즉, 시편체의 체적일정의 조건을 만족하기 위하여 역학적 구속도가 약한 용접 폭 방향 및 두께 방향 성분이 음(-)의 값을 나타내기 때문이라 사료 되어진다.



(a.1) 30mm 40° (ϵ_x^c)

Fig. 3 Distribution of Stresses on the Bevel Angle 40° and 60° during PWHT

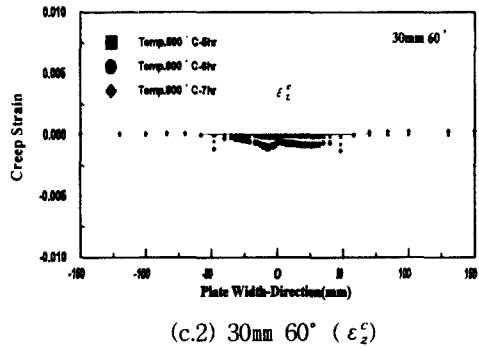
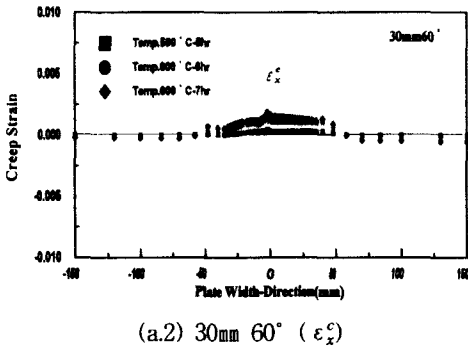
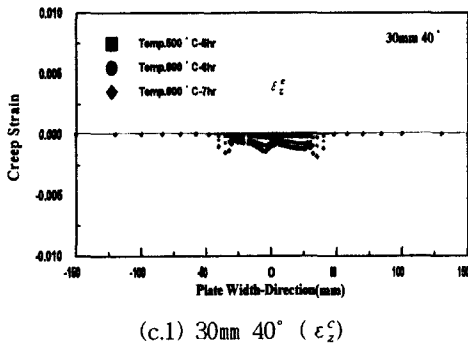
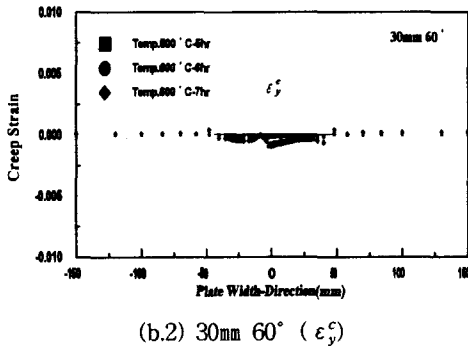
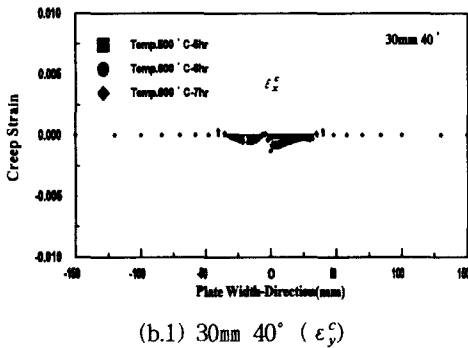


Fig. 4 Distribution of accumulated creep strains on the bevel angle 40° and 60° during PWHT

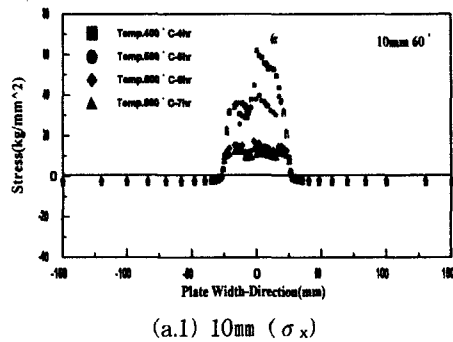


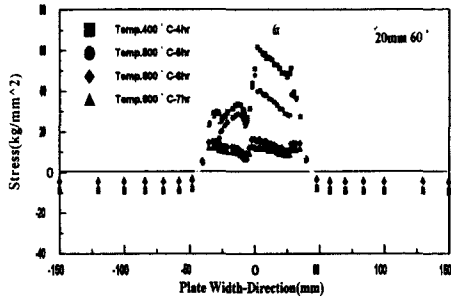
4.2 판 두께별 특성

Fig. 5 (a), (b)의 그림은 홈 형상을 일정(60°)하게 하고, 웨브 두께를 변화(10mm, 20mm 및 30mm)시켰을 때, 플랜지 두께 방향으로 2.0mm 떨어진 지점에서 폭 방향으로의 용접잔류응력의 분포양상이 용접후열처리시 변화되어 가는 과정을 시간 및 온도에 따라 용접잔류응력을 주도하는 용접선 방향의 응력성분 σ_x 의 완화과정과 동일한 위치에서 용접후열처리시 시간별, 온도별 크리프변형률 누적과정을 두께 변화에 따라 ϵ_x^c 성분을 예들들어 도시한 것이다.

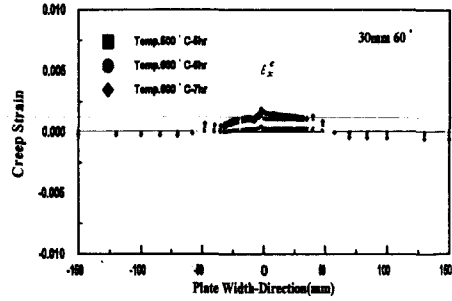
그림에서 보여준 바와같이 홈 형상이 일정하고, 두께를 변화시켰을 경우의 응력의 완화정도는 두께의 변화에 따라 일정하게 나타났으며, 그 분포의 양상이나 그 크기의 차가 발생되지 않음을 알 수 있다.

또한, 두께 변화에 따른 크리프변형률의 누적과정의 차이점은 발생하지 않았다.



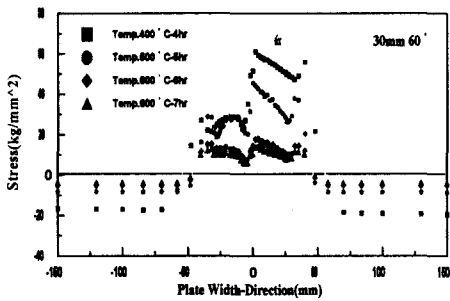


(a.2) 20mm (σ_x)



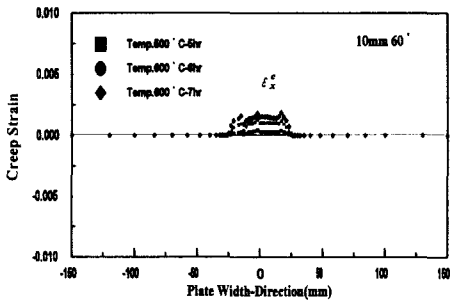
(b.3) 30mm (ϵ_x^c)

Fig. 5 Distribution of stress (σ_x) and accumulated creep strain (ϵ_x^c) on the thickness during PWHT



(a.3) 30mm (σ_x)

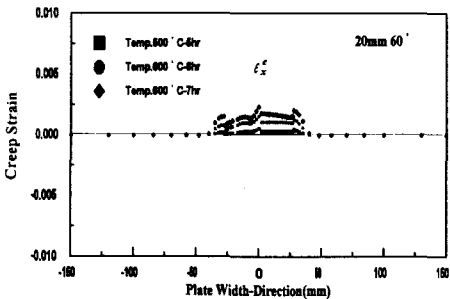
Fig. 6 (a), (b)의 그림은 두께가 30mm로 일정하고, 홈 형상이 변화(40°, 60°)함에 따라, 플랜지의 상표면에서 두께 방향으로 2mm인 지점에서 플랜지 폭 방향에 걸쳐, 용접후열처리시에 최종적으로 재편되는 상당응력 성분($\bar{\sigma}$)과 상당 크리프변형을 누적 성분($\bar{\epsilon}^c$)을 도시하였다.



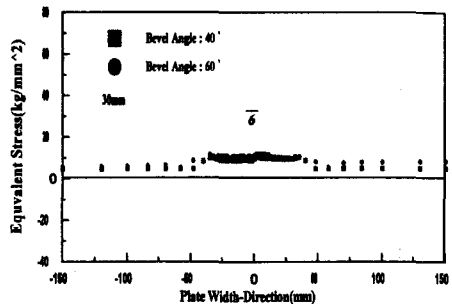
(b.1) 10mm (ϵ_x^c)

(a)그림은 $\bar{\sigma}$ 성분, (b)그림은 $\bar{\epsilon}^c$ 성분이다.

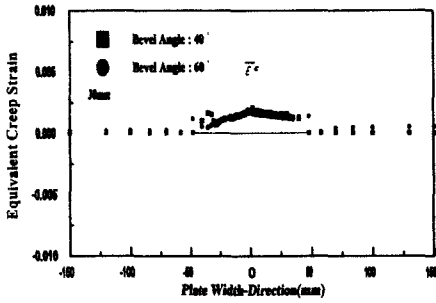
그림에서 주목하여 보면, 홈 형상의 변화에 따라 용접후열처리시에 재편성되는 최종 상당응력 및 상당크리프변형을 누적성분들은 그 분포양상 및 그 크기의 차는 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.



(b.2) 20mm (ϵ_x^c)



(a) Equivalent stress ($\bar{\sigma}$)

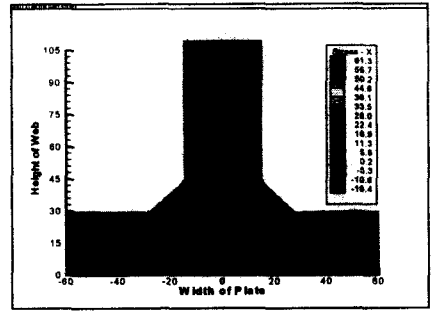


(b) Equivalent creep strain($\bar{\epsilon}^c$)

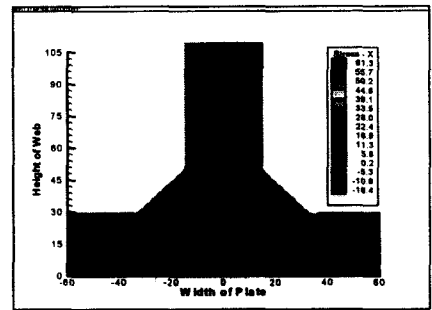
Fig. 6 Distribution of last equivalent stress($\bar{\sigma}$) and equivalent creep strain($\bar{\epsilon}^c$) during PWHT

Fig. 7 (a), (b)의 그림은 T-joint 시험편 30mm40° 및 60°의 경우, 시험체 단면 전영역에 걸쳐 용접수행시 발생된 최종 용접잔류응력 분포도이고, (c), (d)그림은 용접후열처리시 완료된 응력분포도이다.

도시한 그림에서 보여준 바와 같이, 용접후열처리시 홈 각도(40°, 60°)에 따른 응력완화 양상은 동일하였고, 그 크기의 차는 거의 발생하지 않았다. 또한, 용접후열처리에 비해 시험편 모두 아주 적은 양의 응력이 남게 됨을 알 수 있다.

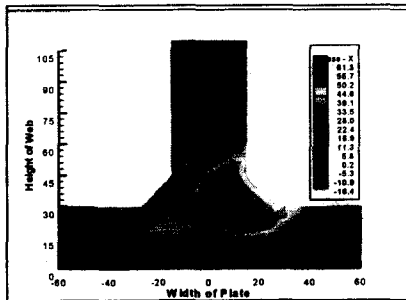


(c) 30mm40° (σ_x) - after PWHT

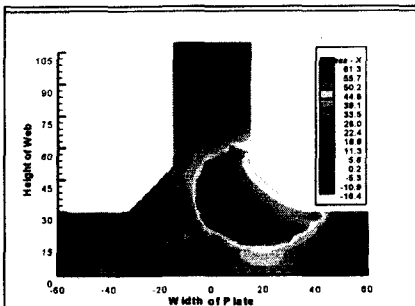


(d) 30mm60° (σ_x) - after PWHT

Fig. 7 Distribution of last stress(σ_x) in the part of full model during PWHT



(a) 30mm40° (σ_x) - before PWHT



(b) 30mm60° (σ_x) - before PWHT

5. 결론

해석 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

- 1) 잔류응력의 완화양상 및 크리프변형을 누적과 정에서 홈 각도 및 두께의 변화에 따른 차이점은 발생하지 않았다.
- 2) 용접후열처리시의 응력완화 정도는 시험편 모두 500~600℃에서 가장 크게 완화되었으며, 또한 이때 크리프 변형을 누적정도가 가장 크게 나타났다.
- 3) 용접후열처리시 응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y \geq \sigma_z$ 순으로 나타났다.
- 4) T-joint 용접부의 경우는 판 폭 방향 및 두께 방향 성분 즉, ϵ_1^c 및 ϵ_2^c 가 구속력에 기인한 체적일정을 유지하기 위해 음(-)의 값을 나타냈다.
- 5) 상당응력 완화 및 상당크리프변형을 누적정도는 홈 형상에 무관함을 보였으며, 그 차도 거의

발생하지 않았다.

추후에 실험을 수행할 예정이며, 이상의 연구결과에 의하면, 용접후열처리시 홈 각도 및 두께 변화에 대한 역학적 차이점은 동일하였으며 용접후열처리후의 응력은 아주 미소한 양이 남게 됨을 보였다. 따라서, 역학적으로 안정된 용접부는 홈 형상이 최소일 때라는 것이 판명되어 졌다고 사료된다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Ueda, Yukio and Keiji Fukuda, "Analysis of Welding Stress Relieving by Annealing Based on Finite Element Method", Transactions of JWRI, Vol. 3, No. 2, pp.39~45, 1974
- 2) Ueda, Y., "Application of Finite Element Method for Analysis on Process of Stress Relief Annealing", Journal of J.W.S, Vol. 44, No.11, pp.902~908, 1975
- 3) Naiki, T., Y. Yamazaki, Y. Manago, H. Okabayas, "Stress Relief Cracking in Heat Affected Zone(I)", Journal of Japan Welding Society, Vol. 33, No. 9, pp.710~717, 1964
- 4) Kanazawa, S., K. Yamato, T. Takeda, K. Hasimoto, "Study of Reheat Cracking in Weldment(I)", Journal of Japan Welding Society, Vol. 44-10, pp.791~798, 1975
- 5) Swift, R. A., "The Mechanism of Stress Relief Cracking in 2¹/₄Cr-1Mo Steel Weld." J, Vol. 50 No. 5, pp.195~201, 1975
- 6) Daley, Z., P. D. Hibbert, "Computation of Temperature in Actual Weld Design," America Welding Journal, Vol. 54, No. 11, pp.385~392, 1975
- 7) Bathe, K. J., "Finite Element Procedures", Third Edition, Prentice Hall Inc., 1990
- 8) Daley, Z., P. D. Hibbert, "Computation of Temperature in Actual Weld Design", America Welding Journal, Vol. 54, No. 11, pp.385~392, 1975
- 9) Parlane, A. J. A., "Residual Stresses in Thick Weldments A Review of Contemporary Measurement Techniques", The Welding Institute, Abington, Cambridge, England, Aug. 1977
- 10) Bjorhovde, R., J. Broziatti, G. A. Alpsten, "Residual Stresses in Thick Welding Plates", Welding Journal, 51(8) Research Supplement, 1972
- 11) Ueda, Yukio and Keiji Nakacho, "Theory of Thermal Elastic-Plastic Analysis with A More General Workhardening Rule", Trans. of JWRI, Vol. 9, No. 1, pp.107~114, 1980