

熔接 後熱處理時 필렛熔接部の 形狀에 따른 應力緩和 特性에 關한 研究

방한서*, *김종명**

A Study on the Stress Relief Characteristics during the Post Welding Heat Treatment on the Shape in Fillet Welded Joint

1. 서 론

용접부의 재질의 연화 및 용접잔류응력을 완화하기 위하여 용접후열처리(PWHT : Post Welding Heat Treatment)가 광범위하게 행해지고 있고, 이에 대한 연구결과도 발표되고 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. 또한, 용접후열처리를 수행함에 있어 사전에 정도(程度) 좋게 결과를 예측하여 적절한 후열처리 조건을 선정하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 용접후열처리시의 용접잔류응력 완화에 대한 역학적 특성을 정도 높고 손쉽게 규명할 수 있도록, 점열탄소성 이론을 정식화하여 유한요소이론을 도입하여 개발된 열처리 수치해석용 컴퓨터프로그램을 이용하여 필렛 용접이음부 형상 변화를 고려한 각 시험편에 대하여 수치시뮬레이션을 수행하여 상당크립변형을, 크립변형을 누적, 용접후열처리시의 잔류응력, 상당잔류응력 등의 크기 및 분포와 발생기구를 규명하여, 최적용접이음부 형상에 대한 근거를 마련하고자 하였다.

* 조선대학교

** 조선대학교 대학원

2. 후열처리 조건 및 방법

후열처리해석 조건은, 후열처리중에 새로운 열응력이 발생되지 않도록 하기위해, 시험체전체가 일정하게 온도가 상승하도록 승온속도를 100℃/h로 하였고, 유지시간(Holding Time)및 온도는 600℃에서 1시간으로 하였다. 또한, 400℃이하의 온도역에서는 크립변형률(Creep Strain)이 너무나 적어서 400℃ 이하에서는 크립변형률이 발생하지 않는 것으로 하였다. 더우기 용접금속, 열영향부 및 모재의 크립속도는 전부 동일하게 취급하였다. 해석모델은 Fig. 1의 열탄소성 수치해석시 모델과 동일한 모델을 사용하였으며, 점열탄소성 해석시의 초기 잔류응력은 열탄소성 해석시의 최종 용접잔류응력을 사용하였다. 또한, 크립상수를 적용하였다.

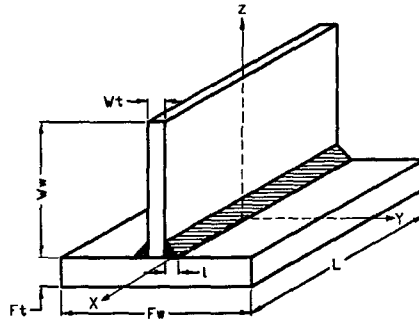


Fig. 1 Analysis Model

3. 후열처리시 필렛용접부 형상별 열역학적 특성 해석

필렛 용접부의 개선형상을 변화시킨 각기 6종류의 시험편에 대하여 자체개발된 평면 변형 열·탄·소성·크리프 해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 해석 결과에 대한 역학적 특성(크립변형률 누적, PWHT시의 잔류응력등)을 각 시험편별로 분석하여, 각각에 대한 열·탄·소성 해석시와 후열처리시의 역학적 특성을 아래와 같이 규명하였다. 또한, 평면변형 열·탄·소성·크리프해석은 필렛 용접이음부 형상변화에 따른 후열처리시의 잔류응력 완화과정 및 크리프변형률 누적과정에 주안점을 두고 고찰하였다.

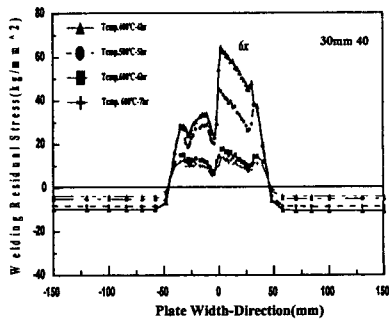
3.1 개선형상별 역학적 특성 비교

먼저, 필렛용접부의 개선각의 변화에 따라 고찰하였다.

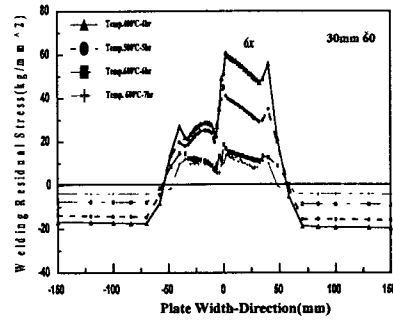
Fig. 2(a),(b),(c)에서 도시한 그림은 용접잔류응력성분(σ_x , σ_y 및 σ_z)이 용접후열처리(PWHT : Post Welding Heat Treatment), 즉 응력제거 열처리시에 변화되어 가는 과정을 시간 및 온도별로 도시한 것이다.

주목점은 두께가 일정(30mm)하고 개선각이 40°에서 60°로 변화할 때, 플레이트의 상표면에서 두께방향으로 2mm인 지점에서 플레이트의 폭방향으로 응력성분별로 나타내었다. (a)그림은 σ_x 성분, (b)그림은 σ_y 성분, (c)그림은 σ_z 성분을 나타내고 있다.

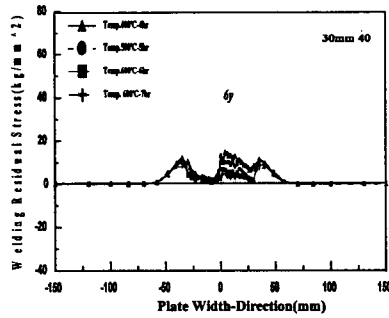
그림에서 도시한 바와 같이, 필렛용접부의 개선각이 40° 에서 60° 로 변화함에 따라 후열처리시의 응력완화 특성은 시간 및 온도별로 동일한 양상을 나타내었고, 개선각의 변화에 따른 차이점은 보이지 않았다. 또한, 개선각이 40° 및 60° 일 때 공히 용접선 길이방향 성분(σ_x)이 용접선 폭방향(σ_y) 및 두께방향 성분(σ_z)에 비해 응력완화 정도가 크게 나타났는데 이는 용접잔류응력이 큰 쪽의 크리프 진행속도가 빠르기 때문이라고 사료되어진다.



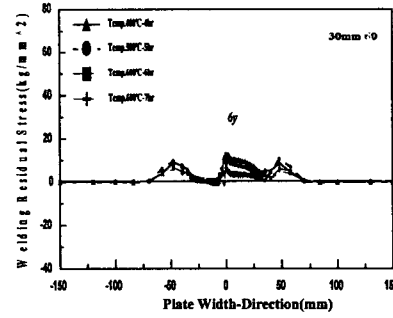
(a)-1 : 30mm 40° -Stress x(σ_x)



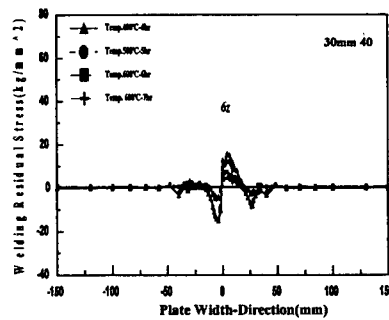
(a)-2 : 30mm 60° -Stress x(σ_x)



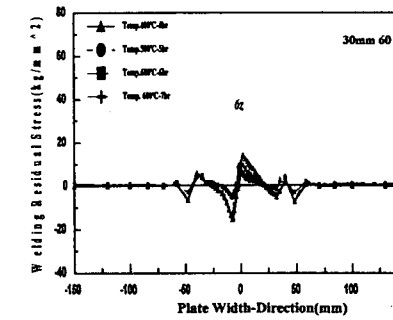
(b)-1 : 30mm 40° -Stress y(σ_y)



(b)-2 : 30mm 60° -Stress y(σ_y)



(c)-1 : 30mm 40° -Stress z(σ_z)



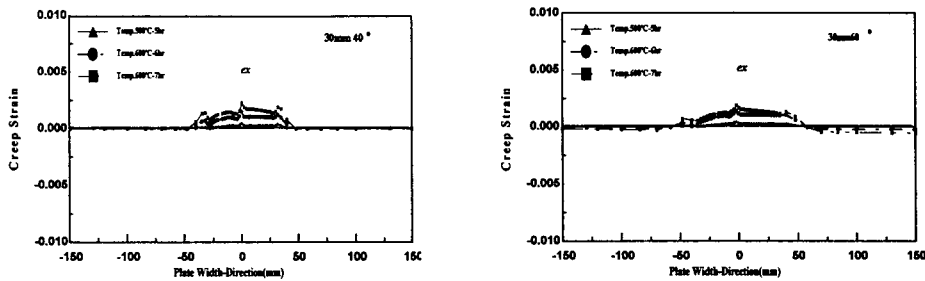
(c)-2 : 30mm 60° -Stress z(σ_z)

Fig. 2 Distribution of Stresses on the Bevel Angle 40° and 60° during PWHT

또한, 후열처리시 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 응력완화 정도는, 온도의 상승이 없는 관계로 단지 시간에 기인한 응력의 완화 현상을 보이거나 그 완화정도는 적게 나타났다.

Fig. 3(a),(b)의 그림은 Fig. 2(a),(b),(c)와 동일한 위치에서 후열처리 시간별, 온도별 크리프 변형을 ϵ_x^c 성분의 누적과정을 도시한 것이다.

그림에서 도시한 바와 같이 개선각의 변화(40° 및 60°)에 따른 크리프 변형을 누적양상은 동일한 형상을 나타내었으며, 그 크기의 차도 거의 발생되지 않았다. 각 성분별 누적 정도는 $\epsilon_x^c > \epsilon_y^c \approx \epsilon_z^c$ 순으로 나타났다.



(a) 30mm 40° -Creep Strain x (ϵ_x^c)

(b) 30mm 60° -Creep Strain x (ϵ_x^c)

Fig. 3 Distribution of Accumulated Creep Strains on the Bevel Angle 40° and 60° during PWHT

후열처리에 완화된 응력의 정도와 비교해 보면, 응력의 완화정도가 많이 발생되었던 온도 및 시간대에 있어서는, 크리프 변형을 누적분포도 많이 진행됨을 보이고 있다. 이것은 후열처리시의 응력완화 정도와 크리프 변형을 누적과는 상용관계가 있음을 보여준 것이라 사료된다.

또한, 특이한 사항은 필렛 용접이음부에 발생하는 크리프 변형을 성분중 용접선 방향의 성분인 ϵ_x^c 는 양(+)의 값을 나타내는데 반해, 용접선 폭방향 및 두께방향의 성분인 ϵ_y^c 및 ϵ_z^c 는 음(-)의 값을 나타내는데, 이는 크리프 이론의 유한요소식으로서의 정식화 과정에서 크리프 변형을 비압축성으로 취급하였기 때문이다. 즉, 시험체의 체적일정의 조건을 만족하기 위하여 역학적 구속도가 약한 용접폭방향 및 두께방향 성분이 음(-)의 값을 나타내기 때문이라고 사료 되어진다.

3.2 판의 두께별 역학적 특성 비교

Fig. 4(a),(b),(c)의 그림은 개선각을 일정(60°)하게 하고, 웹 두께를 변화(10mm, 20mm 및 30mm)시켰을 때, 플레이트 두께 방향으로 2.0mm떨어진 지점에서 폭방향으로의 용접잔류응력의 분포 양상이 후열처리시 변화되어 가는 과정을 시간 및 온도에 따라 용접잔류 응력을 주도하는 용접선 방향의 응력성분 σ_x 의 완화과정을 도시한 것이다.

그림에서 보여준 바와같이 개선각이 일정하고, 두께를 변화시켰을 경우의 응력의 완화 정도는 두께의 변화에 따라 일정하게 나타났으며, 그 분포의 양상이나 그 크기의 차가 발_ㅅ되지 않음을 알 수 있다.

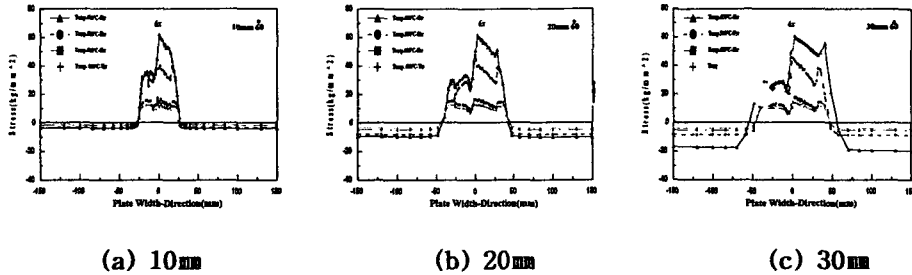


Fig. 4 Distribution of Stress(σ_x) on the Thickness during PWHT

Fig. 5(a),(b)의 그림은 두께가 30mm로 일정하고, 개선각이 변화(40° , 60°)함에 따라, 플레이트의 상표면에서 두께방향으로 2mm인 지점에서 플레이트의 폭방향에 걸쳐, 후열처리시에 최종적으로 재편되는 상당응력 성분($\bar{\sigma}$)과 상당 크립변형을 누적 성분($\bar{\epsilon}^c$)을 도시하였다.

그림에서 주목하여 보면, 개선각의 변화에 따라 용접후열처리에 재편성되는 최종적인 상당응력 및 상당크립변형을 누적성분들은 그 분포양상 및 그 크기의 차는 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.

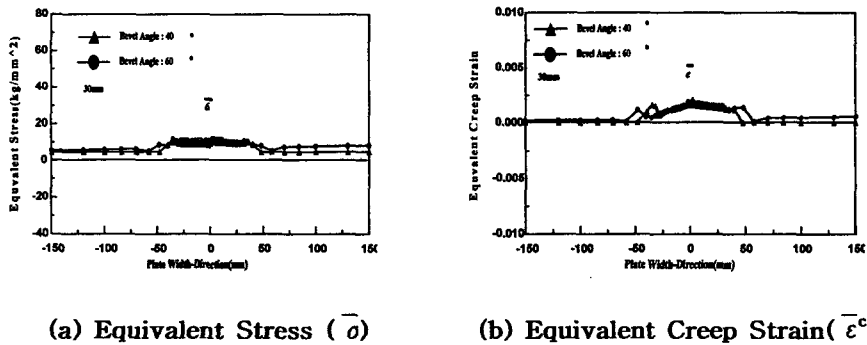
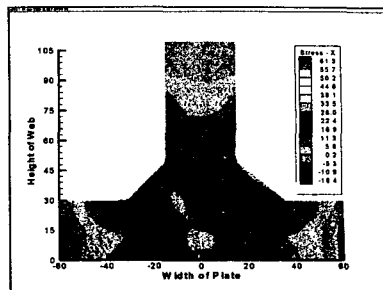
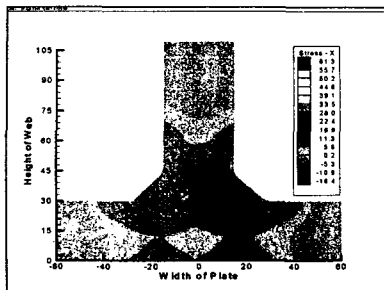


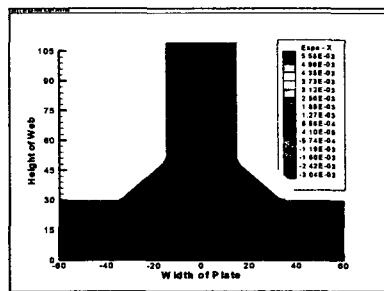
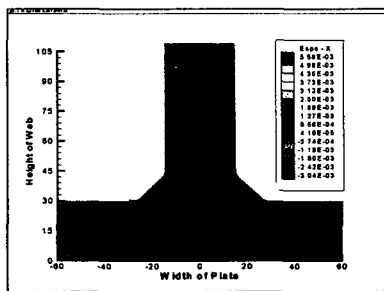
Fig. 5 Distribution of Last Equivalent Stress($\bar{\sigma}$) and Equivalent Creep Strain($\bar{\epsilon}^c$) during PWHT

Fig. 6(a),(b)의 그림은 필렛시험편(30mm)의 전영역에 걸쳐 후열처리시의 응력성분(σ_x)을 용접부 개선형상 변화함에 따라 도시한 그림이고, Fig. 7(a),(b)의 그림은 필렛시험편(30mm) 전영역에 걸쳐 후열처리시의 크리프 변형을 누적성분(ϵ_x^c)을 용접부 개선각이 변화함에 따라 도시한 그림이다.



(a) 30mm40° -PWHT Stress $x(\sigma_x)$ (b) 30mm60° -PWHT Stress $x(\sigma_x)$

Fig. 6 Distribution of Stress(σ_x) in the Part of Full Model during PWHT



(a) 30mm40° -Creep Strain $x(\epsilon_x^c)$ (b) 30mm60° -Creep Strain $x(\epsilon_x^c)$

Fig. 7 Distribution of Last Creep Strain(ϵ_x^c) in the Part of Full Model during PWHT

Fig. 6(a),(b)에 도시한 그림에서 보여준 바와 같이, 후열처리시 개선각(40°, 60°) 및 두께변화(10mm, 20mm 및 30mm)에 따른 응력완화 양상은 동일하였고, 그 크기의 차는 거의 발생하지 않았다. 또한, 후열처리전에 비해 전 시험편 모두 아주 적은 양의 응력이 남게 됨을 알 수 있다.

Fig. 7(a),(b)의 그림에서, 후열처리시 발생하는 크리프 변형을 누적분포를 보면, 용접부 형상(개선각, 두께)변화에 따라 누적양상은 동일하였으며, 그 크기의 차는 미미하였다. 또한, 후열처리시 크리프 변형을 누적정도는 응력완화정도에 비례함을 보이고 있다.

4. 결 언

용접후열처리 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 두께변화에 따른 후열처리의 응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y \geq \sigma_z$ 순으로 나타났다.
- 2) 개선각의 변화에 따른 후열처리의 응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.
- 3) 플레이트 폭방향 및 두께방향성분 즉, ϵ'_y 및 ϵ'_z 가 음의 값을 나타냈다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 용접후열처리의 용접이음부 형상변화(두께 및 개선각)에 따른 역학적 차이점은 동일하며, 이들 결과에 의하여 최적 용접이음부 형상은 개선각이 40° (최소)일 때라고 사료된다. 따라서, 실제 작업이 가능한 한도 내에서는 개선각을 최소화하는 것이 바람직하다는 것이 판명되어졌다고 사료된다.