

점열탄소성 이론에 의한 용접후열처리에 대한 수치해석
Numerical Analysis of Post Welding Heat Treatment
base on The Thermal Creep Elastic-Plastic Theory
 조선대학교 방한서 대학원 · 노찬승, 김증명

1. 서론

용접을 수행하면 용접이음부에는 필연적으로 용접잔류응력과 재질의 경화가 발생되어진다. 이들 용접잔류응력과 용접이음부의 재질의 경화는 용접이음부에 균열을 발생시켜 구조물에 치명적인 손상을 초래하는 경우가 자주 보고 되어지고 있다.

따라서, 재질의 연화 및 용접잔류응력의 완화를 목적으로 용접후열처리를 수행하고 있다. 그러나 지금까지 국내에서는 용접후열처리에 대한 체계적이고 과학적인 연구보다는 실험과 경험에 의존하고 있는 실정이며, 이론적인 연구가 국외에 비교하여 그다지 활발하지 않는 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 용접후열처리시의 용접잔류응력 완화에 대한 역학적 특성을 정도 높고 손쉽게 규명 할 수 있도록 2차원 점열탄소성 이론을 정식화하여 유한요소법에 의한 수치해석용 컴퓨터프로그램을 개발하고자 한다. 또한 개발된 프로그램의 타당성을 입증하고 아울러 수치해석을 수행하여 용접후열처리시의 용접구조체의 용접잔류응력에 대한 역학적 특성을 규명하고자 한다.

2 탄소성 크립구성식 및 크립속도

용접후열처리 조건은 용접후열처리 중에는 새로운 열응력이 발생되지 않도록 시험체전체가 일정하게 온도가 상승하도록 승온속도를 100°C/h로 하였다. 또한 유지온도는 600°C로 하고 유지시간은 1시간 및 3시간 두가지의 경우로 하였다. 재료는 가장 일반적으로 사용하고 있는 연강(SS41)을 사용하였으며, 강재의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도의존성 및 열탄소성 크립해석에서 사용한 크립정수를 Fig.1에 나타내었다. 또한, 평면변형 열탄소성 크립해석에서 사용한 크립법칙은 아래식에 나타내었다.

- (1) 천이 크립법칙(변형도 경화법칙) : 천이크립속도가 정상크립속도보다 클 경우 사용

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

- (2) 정상 크립법칙 : 천이 크립속도가 정상 크립속도보다 작게된 후에 사용

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = 3/2 \beta \sigma^n \{\sigma'\}$$

여기서,

$\{\dot{\epsilon}^c\}$: 크립변형도속도,

$\bar{\epsilon}^c$: 상당크립변형도

$\{\sigma'\}$: 편차응력

$\bar{\sigma}$: 재료의 상당응력

A, m, γ, β, n : 물리적 정수^(Fig.1)이다.

또한, 400℃이하의 온도역에서는 크립변형도 (Creep Strain)가 너무나 적어서 400℃ 이하에서는 크립변형도가 발생하지 않는 것으로 하였다. 더우기 용접금속, 열영향부 및 모재의 크립속도는 전부 동일하게 취급하였다.

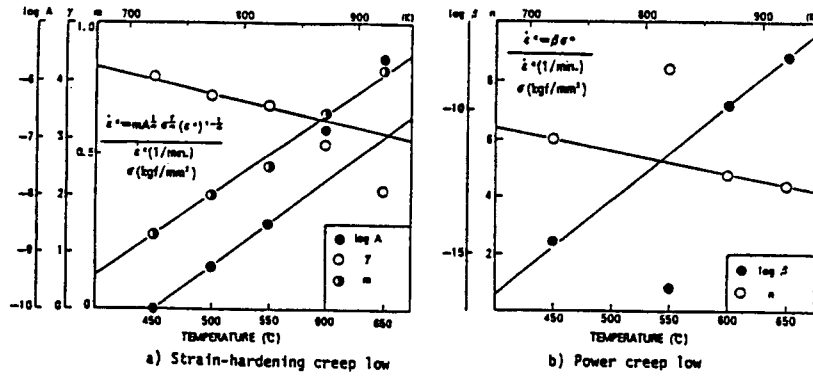


Fig.1 Creep coefficient

1) 탄소성 구성식

탄성구성식

$$\{d\sigma\} = [D_T^e] \{ \{d\epsilon\} - \{d\epsilon^T\} - \{d\epsilon^c\} \} + d[D^e] \{d\epsilon^e\} \quad (1)$$

소성구성식

$$\{d\sigma\} = [D_T^e] \{ \{d\epsilon\} - \{d\epsilon^T\} - \{d\epsilon^p\} - \{d\epsilon^c\} \} + d[D^e] \{d\epsilon^e\} \quad (2)$$

여기에서,

탄성matrix가 온도의존성을 포함할 때 증분관계

$$[D_T^e] = [D^e] + (d[D^e]/dT)$$

$$d[D^e] = (d[D^e]/dT)dT$$

열변형량 증분

$$\{d\epsilon^T\} = \{\alpha\}dT$$

\{\alpha\} : 순간 열팽창계수

dT : 온도증분

소성변형 증분

$$\{d\epsilon^p\} = d\epsilon_i^p \{n\}$$

$d\epsilon_i^p$: 소성변형증분의 크기

\{n\} : 응력점에서 항복곡면에 접한 외향법선 방향단위 벡터

$$\{n\} = \{ \partial f / \partial (\sigma - \theta) \} / f_i'$$

$$f_i' = | \{ \partial f / \partial (\sigma - \theta) \} |$$

$$= (\{ \partial f / \partial (\sigma - \theta) \}^T \{ \partial f / \partial (\sigma - \theta) \})^{1/2}$$

크립변형 증분

$$\{d\epsilon^c\} = \{ \epsilon^c \} dt$$

$\{\dot{\epsilon}^c\}$: 크립 속도
 dt : 증분시간

3. 해석모델

해석모델은 Fig.2에 나타난 것처럼 용접시 용접부의 역학적조건 즉, 시험편이 수축 및 팽창을 받지않는 (두한판의 역학적 조건) 최소크기 즉, 폭 B=400mm, 길이 L=700mm, 두께 t=20mm, 개섩각 70° 로 하고 재질은 일반적으로 강구조물에서 가장 많이 사용되는 구조용 재료인 연강을 채택하였다.

용접시 전류 490A, 전압 40V 의 조건을 사용하여 순간열원으로 다층용접시 열전드해석을 하여였으며 이를 바탕으로 열을 증가하증으로써 열탄소성해석을 수행한 결과의 잔류응력을 열처리시의 초기조건으로 사용하였다.

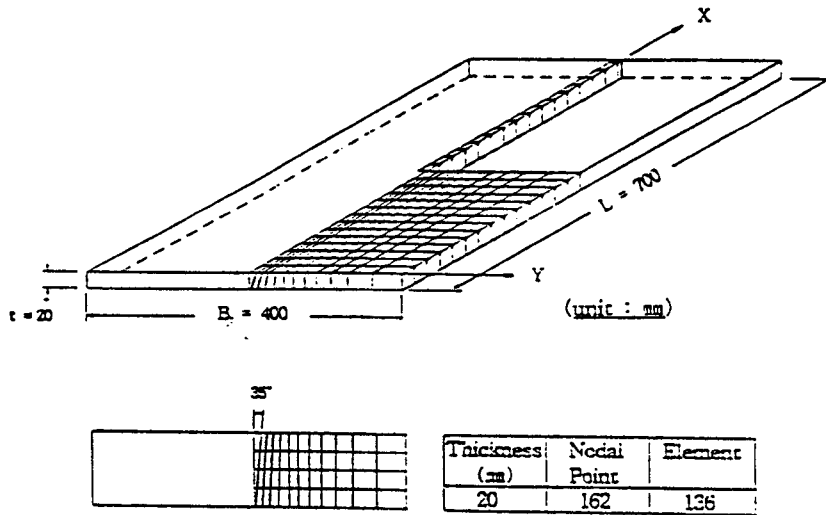


Fig.2 FEM model for PWHT

4. 수치해석 결과

다층용접시 용접이 선행된부분은 다음용접시 열처리의 효과에 의하여 응력이 다소 완화되므로, 잔류응력이 가장 크게되는 표면에 대하여 열처리시의 응력완화 과정을 온도에 따라서 한요소대 한 응력완화과정을 Fig.3에 나타내었고 폭방향에 따른 응력완화과정을 알아 보기위하여 400℃, 500℃, 600℃에서의 완화응력을 Fig.4에 나타내었다.

한요소에서의 온도에 따른 응력완화과정은 400℃전에는 응력의 변화가 나타나지 않고 400℃ 이후에서 점차 감소하기 시작하여 575℃부터 600℃구간에서 보다 큰비율로 완화되는 현상을 보이고 σ_x , σ_y , σ_z 을 비교하여 보면 잔류응력의 정도가 큰 순서 즉, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 의 순으로 보다 응력완화폭이 크게 나타나고 있다. 고찰하여 보면 0℃에서 400℃ 까지는 후열처리 응력완화가 거의 이루지지않는 것을 알 수 있고 575℃을 넘어서면서 잔류응력의 완화정도가 커짐을 알수있으며, 잔류응력이 상대적으로 큰 쪽이 적은 쪽보다 역학적 구속력이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 승온600℃에서 보지시간을 증가시키면 응력의 완화정도도 점점 증가하며 역학적 구속력에 의하여 시험편의 잔류응력 분포는 일정한 형태를 (즉, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$)유지하며 완화됨을 알 수 있다.

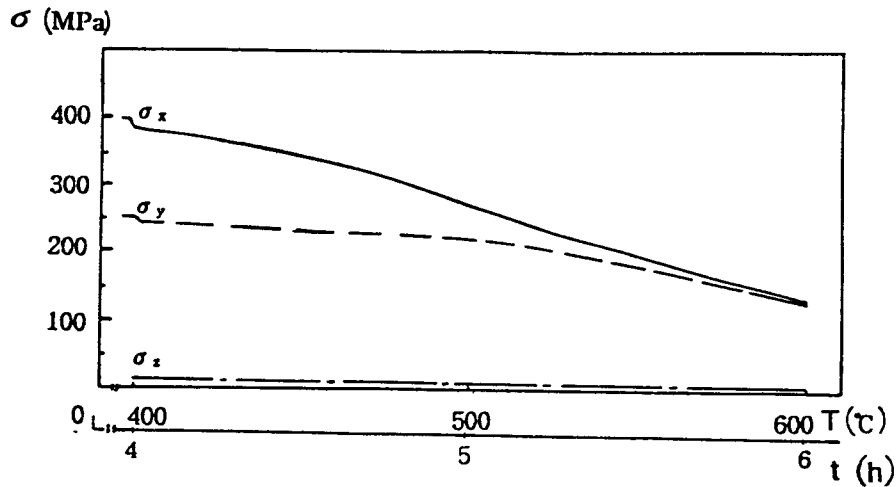


Fig.3 Comparison of Stress relaxation with Weld Metal during PWHT

5. 결론

- 1) 용접후열처리에 의한 응력완화가 이루어지기 시작하는 온도는 400°C임을 알 수 있고 응력완화의 기대효과를 거두기 위해서는 575°C 이상의 승온이 필요함을 알 수 있다.
- 2) 용접후열처리에 의한 응력완화는 용접시 잔류응력이 큰 쪽의 응력완화가 용접 잔류응력이 적은 쪽보다 상대적으로 다소 크게 감소하는데 이는 잔류응력에 의한 역학적 관계에 기인한다고 사료된다.
- 3) σ_x , σ_y , σ_z 를 비교하여 용접후열처리에 의한 응력완화 특성을 고찰하여 보면, 역시 용접 잔류응력이 보다 큰 σ_x , σ_y , σ_z 의 순으로 응력의 감소정도가 크게 나타났다.
- 4) X축을 따라서 열탄소성 해석결과에서 보여주는 잔류응력과 비교하여 보면 열처리 효과에 따른 크기만 완화가 되었을 뿐 정성적인 면에서는 거의 동일하였다.

參 考 文 獻

- 1) 房漢瑞 ; 厚板熔接部の力學的 特性, 大韓熔接學會誌, 10-4(1992), 250-258
- 2) W.Bolliger, R.Varughese, E.Kafumann, W-F.Qin, A.W.Pense, R.D.Stout: The effect of welding and fabrication operation on the toughness of A710 steel, Microalloyed HALA steels, ASM International, (1988), pp.227~290
- 3) 後藤 明信: SR割の發生機構とその對策, 溶接學會誌, 第1券, 第6號, (1992), pp.469~472.
- 4) 松田 福久: 溶接冶金學, 日刊工業新聞社, (1972), pp.186~194
- 5) Z.Daley, P.D.Hibbert, "Computation of Temperature in Actual Weld Design", America Welding Journal, Vol.54, No.11, pp.385-392 (1975)
- 6) Atsushi Seto, Isao Soya, Yoichi Tanaka, "Enhancement and Thickness Effect of Strength in Steel Joints with Improved Weld", 日本造船學會論文集, 第172號, pp 617-626
- 7) 上田 外, "厚板補修溶接部の力學的 特性", 日本溶接學會論文集, 第4券, 第3號, pp.533-539 (1986)
- 8) 上田, 中長: 應力除去焼 なまし 處理後の 殘留應力の 近似推定法 (第 1報), 日本溶接學會 論文集, 1-2, pp174~181