

용접 후 열처리에 의한 잔류응력 완화의 수치해석

Numerical Analysis of Post Weld Heat Treatment for the Residual Stress Relaxation

이 규 태* · 김 재 응**

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 공과대학 기계공학부

1. 서 론

용접은 현재 대표적인 구조물의 접합방법으로 사용되고 있다. 그러나, 구조물의 용접시 용접부는 국부적인 가열과 냉각으로인해 열응력이 발생하고 용접후에는 용접잔류응력과 변형, 용접부 재료의 경화가 발생된다. 이들 용접잔류응력이 집중되는 이음부와 재료의 경화가 발생되어지는 곳에 주로 균열이 발생되어 구조물에 치명적인 손상을 가져온다. 특히, 인장 잔류응력이 집중되어지는 용접부 주위 표면은 구조물의 강도에 직접적인 영향을 주기 때문에 일반적으로 잔류응력을 완화하여 사용한다. 이러한 잔류응력의 완화를 목적으로 용접후 열처리(Post weld heat treatment :PWHT)와 기계적 응력제거(MSR)등을 수행한다.

지금까지 용접후열처리 및 응력완화에 대한 연구는 해석적이기 보다는 실험과 경험에 의존하고 있는 실정이고, 국내¹⁾에서는 이론적이고 해석적인 연구가 국외²⁾에 비교하여 활발하지 않은 상태이다. 따라서, 보다 발전된 연구를 위하여 PWHT시 용접부 잔류응력 완화에 대하여 역학적 특성을 고려한 이론적모델을 정식화하고 나아가 해석적인 방법으로 잔류응력완화 특성을 보이는 것이 필요하다.

PWHT는 용접이후 잔류응력의 완화를 위하여 실시되는 방법으로 목적, 재료, 온도등 여러 조건에 따라서 방법이 모두 다르지만 공통적인 조건은 PWHT 중에는 새로운 열응력이 발생되지 않는 조건으로 일정한 온도를 상승시키고, 또한 일정온도를 유지시킨다.

용접후 냉각되어진 상태에서 보여지는 잔류응력분포는 재료전체가 동일한 온도로 상승하여 유지하므로 열탄소성 해석만으로는 응력이 완화되는 현상을 설명할 수가 없다. 따라서, 점열탄소성 이론 (Thermal visco elasto-plastic theory)을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 점열탄소성이론을 통하여 이론모델을 수식화하고, 유한요소법을 이용하여 용접부 잔류응력 분포의 완화특성을 보였다. 그리고, 여러 온도조건

(600F, 900F, 1000F, 1200F)에서의 잔류응력 완화특성에 대한 실험값과 해석값을 비교하였고, 유한요소 해석결과 본 연구에서 제시한 이론모델을 통한 해석 결과가 실험결과와 잘 맞는 것을 확인하였다.

2. 잔류응력 해석

2.1 해석모델

일반적으로 용접부 잔류응력해석은 3차원으로 할 경우 해석 및 계산에 필요한 시간이 상당히 요구된다. 따라서, 2차원 평면 변형을 이론을 사용한 해석이 많이 시도되었고, 지금도 많은 연구자들이 사용하고 있다. 그러나 응력분포이후의 응력완화해석을 할 경우에 2차원 해석의 결과는 의미있는 결과를 주지 못한다.

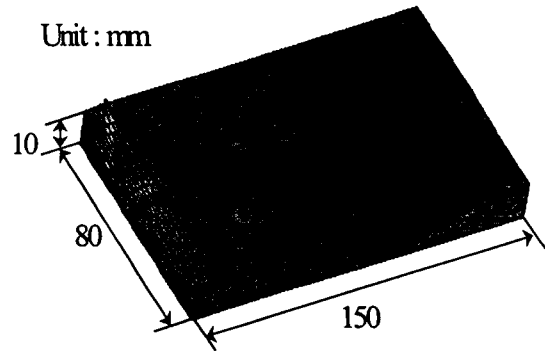


Fig. 1 Finite element mesh used for analysis

따라서, 본 연구에서는 용접선을 중심으로 대칭인 3차원 해석모델을 선정하였고, 사용된 유한요소모델은 Fig. 1과 같다. 요소분할(mesh generation)은 온도구배가 심한 용접부의 주변에는 보다 미세하게 하였고 일반적으로 3차원 열 유동 해석 시에 사용되는 8 node solid element를 이용하여 구성하였다. 절점 개수는 1,275개이고 요소개수는 860개이다.

용접부는 가열 및 급냉의 열 이력을 겪게 되므로 이

를 해석하기 위해서는 온도에 따른 재료의 물성변화를 고려하여야 한다.

따라서, 온도에 의존하는 재료의 열적물성치와 기계적 물성치들을 사용하였다.

2.2 온도해석

아크용접을 묘사하기 위한 정규분포형태의 열원(Gaussian distribution heat source)모델을 온도 분포해석에 사용하였고, 식(1)에 나타내었다.

$$q_s = \frac{3Q_s}{\pi(r_b)^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (1)$$

where, r = 열원 중앙으로부터의 거리(mm)

r_b = 전 열유속의 95%가 들어가는 반경(mm)

용접조건으로는 250A, 17V와 용접속도 5mm/s의 조건으로 z 축을 따라 이동하는 이동열원을 적용하였다.

온도분포 해석에 필요한 경계조건으로 초기에 주어지는 모든 절점의 온도를 대기온도와 동일하게 20°C로 하였다. 열 손실은 주로 모재로의 열전도와 모재표면에서의 대류에 의해 이루어지고, 복사에 의한 손실의 정도는 미소한 것을 가정하여 경계조건으로 대류만을 고려하였다.

대칭면에서는 단열조건을, 기타 대기와 접하고 있는 부분에는 자연대류조건을 적용하였다. 단열과 대류경계조건의 기본식은 각각 식(2),(3)과 같다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad : \text{대칭면} \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) : \text{대기와 접한 면} \quad (3)$$

여기서, T_0 는 대기온도(°C), h 는 대류열전달 계수(J/m²s°C), k 는 열전도율(J/ms°C), n 은 표면에 수직방향 벡터이다.

2.3 응력해석

온도 분포 해석결과를 이용하여 잔류응력 해석을 수행하였다. 잔류응력해석시 경계조건은 대칭면인 $y-z$ 평면은 x 방향으로 구속을 주고 용접부 끝단을 z 와 y 으로 각각 구속하였다.

잔류응력 해석결과 $y=10$ 인 표면에서 중심으로부터 떨어진 거리에 대한 잔류응력분포를 나타내면 Fig. 2와 같다. 대칭면에서의 구속이 x 축 방향이고 끝단의 모서리점을 제외하고는 y 축으로는 구속이 되어 있지 않으므로 자유롭게 변형을 할 수가 있다. 따라서, σ_{yy} 값은 거의 나타나지 않는다.

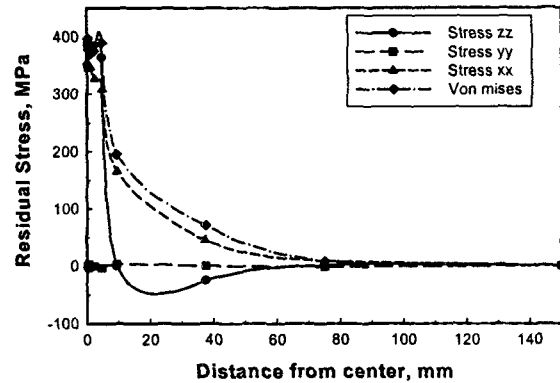


Fig. 2 Residual stress distributions at $y=10, z=40$

3. 응력완화 모델 및 결과

용접후 열처리해석을 위한 점열탄소성 이론은 크게 변형경화 모델 (strain hardening model)과 시간경화 모델 (time hardening model), 하이퍼사인모델 (hyperbolic sine law model) 3가지로 나뉜다. 각 모델간의 결과값의 차이는 거의 없으나 변형을 (strain)의 변화가 심한경우에 변형경화모델이 주로 사용되고, 작은 시간동안의 크리프(creep)의 변화나 크리프의 변화가 거의 없는 시간에서의 변형률도 고려할 경우에는 시간경화모델을 주로 사용해왔다.

잔류응력의 완화 특성은 열처리온도와 밀접한 관계를 가진다. 열처리 유지온도가 높을 수록 재료의 항복 응력값이 떨어지고, 온도에 따른 크리프 변형률 속도의 값이 커서 응력완화의 정도가 매우 크게 나타남을 그 동안의 여러 연구를 통하여 알수 있다.

따라서, 본 연구에서는 대표적인 열처리 유지온도 (316°C, 482°C, 538°C, 649°C)에 따르는 시간경화 모델의 변수를 반복적인 방법을 통하여 설정하였다.

Fig. 3은 열처리 온도와 시간에 따른 응력완화의 영향을 실험자료³⁾와 본 연구의 수치해석자료와 비교한 결과를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 높은 경우에 큰 응력완화특성을 볼수 있고, 온도가 낮은 경우에는 응력완화특성이 매우 작고, 일정 응력까지 완화가 된 후 시간이 많이 지난 후에도 응력의 변화가 매

우 작게 나타난다.

다층용접의 경우 잔류응력의 분포의 값이 작게 나타나는 원인은 응력완화특성과 밀접한 관계가 있다. 따라서, 다층용접에 따른 잔류응력 분포를 해석하기 위하여 본 연구에서 제시한 열점탄소성 모델을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

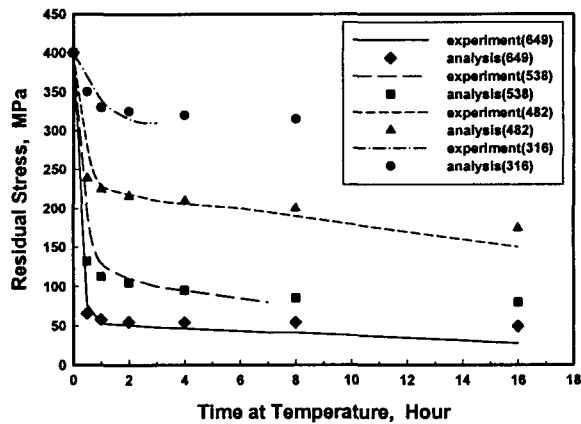


Fig. 3 Influence of temperature and time on stress relaxation with experiment & analysis

Fig. 4는 용접후의 von mises stress분포와 각 열처리 온도에 따른 수치해석결과의 차이를 보여준다. 열처리 온도가 649℃일 경우 완화특성이 가장 크게 나타나고 316℃의 경우 가장 작게 나타났다. 따라서, 실제 용접후 응력제거 어닐링 같은 경우 일반적으로 600℃~700℃에서 큰 효과를 본다. 또한, 열처리 온도를 상승시키는 속도와 유지 시간에 따라서도 큰 영향을 받는다.

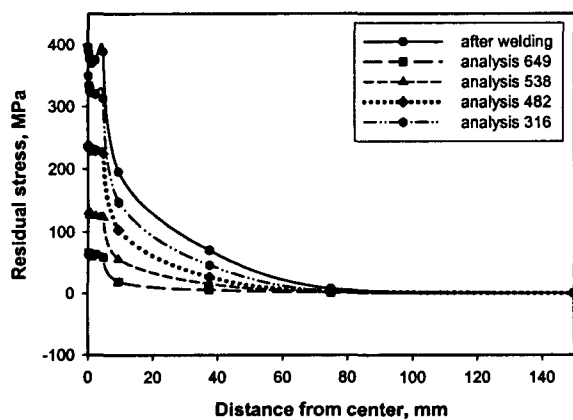


Fig. 4 Comparison of PWHT temperature

4. 결 론

본 연구에서는 점열탄소성이론을 통하여 이론모형을 수식화하고, 유한요소법을 이용하여 용접부 잔류응력분포의 완화특성을 보였다. 열처리 온도에 따른 잔류응력완화특성을 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접후 열처리를 하였을 경우에 잔류응력의 완화특성을 수치해석적인 방법으로 규명하기 위해서 열점탄소성이론을 적용하여야 하며, 점성에 대한 시간경화모형을 제시하였다.
- 2) creep strain rate 모델중 시간경화모형을 사용하여 각각 다른 열처리 온도조건(600F, 900F, 1000F, 1200F)에서의 잔류응력 분포에 대해 실험값과 해석값을 비교하였고, 유한요소 해석결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.
- 3) 용접후 열처리에 의한 응력완화가 이루어지는 온도는 낮은 온도에서도 일부 가능하지만 기대효과를 거두기 위해서는 적어도 1000F이상으로의 승온이 필요함을 알 수 있다.
- 4) 용접후 열처리에 의한 응력완화는 용접시 잔류응력이 큰 쪽의 응력완화가 용접잔류응력이 적은 쪽보다 상대적으로 크게 감소하는데 이는 열점탄소성 이론의 역학적 관계에 기인한다고 보인다.
- 5) 열처리를 위한 승온시간과 유지시간이후에는 시간이 길어질 수록 응력완화 수치가 크게 감소함을 알 수 있다.

참고문헌

1. H.S.Bang, S.W.Gang, G.S.Kim, J.M.Kim and C.S.Ro : A Study on the Mechanical Characteristics by the Change of Bevel Angle of Welding Joint during PWHT, Journal of KWS, Vol.15, No.2(1997)64-71
2. K. Nakacho, Ueda, Y. : A Simple Estimation Method for Reduction of Welding Residual Stresses in Thick Welded Joint From Stress-Relief Annealing, Transactions of the ASME, 118-3, (1996), 343-350
3. George E. Linnert : Welding Metallurgy Third Edition, Vol. 2, AWS, (1966), 141-188
4. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS Standard User's Manual, Version 5.7(1997)