

용접부 잔류응력해석을 위한 상변태 모델에 관한 연구

A Study on the Phase Transformation Model for the Analysis of Residual Stress in Weldment

조 시 훈*, 김 재 응**

* : 영남대학교 대학원 기계공학과, ** : 영남대학교 기계공학부

1. 서론

일반적으로 용접현상은 국부적으로 급가열, 급냉 과정을 동반하기 때문에 용접시공시 용접변형, 용접잔류응력의 발생은 피할 수 없다. 용접에 이와 같이 발생하는 용접잔류응력과 변형은 용접구조물의 제작시 여러 가지 장애를 유발할 뿐만 아니라 그 구조물의 사용중에 있어서도 파괴 발생 또는 파괴의 전파에 직·간접적으로 기여하여 악영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 용접구조물의 안전성을 해치는 용접잔류응력 문제를 해결하기 위해 우선적으로 용접부위의 잔류응력분포를 정확히 이해하고 해석하며 더 나아가 보다 신뢰성과 경제성이 있는 새로운 예측법과 방지법이 요구된다. 또한 용접접합부 및 그 주변부는 응고 현상 및 냉각과정을 수반함으로써 모재와 다른 조직이 된다. 따라서 조직변태가 유발되는 접합부는 모재와 다른 기계적 성질을 가지게 되어 용접후 변형 및 잔류응력에 영향을 미칠 수 있는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 과거의 연구결과를 조사하여 상변태 해석모델을 개발하였으며 이를 이용하여 아크용접에서 발생하는 잔류응력을 수치적으로 해석하는 방법을 제시하였다. 계산과정에서 먼저 열유동해석이 선행되었으며, 열유동해석 결과를 기초로 용접부 잔류응력의 해석을 시도하였다. 잔류응력의 해석시 소재에 따른 상변태 현상 및 응력의 분포를 비교하기 위해 중탄소강인 AISI1045와 저탄소강인 AISI1020을 이용하였다.

2. 해석모델 및 연구방법

2.1 열유동해석

용접부의 온도분포를 구하기 위한 열유동해석은 용접진행방향으로의 한 단면을 절단한 후 준정상상태(quasi steady state)를 고려한 2차원 열유동해석을 수행하였다. 해석은 모델의 대칭성을 고려하여 모델의 1/2을 해석대상으로 선정하였다. 대상으로 한 용접공정은 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접공정이며 사용된 소재는 이후 상변태를 고려한 열응력의 해석에 있어 상변태효과를 확인하기 위해 중탄소강인 AISI1045와 저탄소강인 AISI1020을 사용하였다.

2.2 잔류응력해석

본 연구에서는 상변태를 고려한 유한요소해석 모델을 이용하여 용접공정에서 수반되는 잔류응력을 해석하였다. 유한요소법을 이용한 열탄소성 해석에 있어 일반적인 해석을 위해 재료의 등방성을 고려하여 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 재료물성치(young's modulus, yield stress, thermal expansion coefficient)의 온도 의존성 및 가공경화(strain hardening) 현상을 고려하였다.

2.3 상변태 모델

모재에 열을 가하면 상변태가 일어나서 재료의 결정구조가 BCC구조(페라이트+펄라이트)에서 FCC구조(오스테나이트)로 변하게 되면서 체적감소가 일어난다. 그리고 냉각속도가 매우 빠를 경우에는 FCC구조에서 BCT(마텐사이트)로 변하여 부피팽창을 유발한다. BCC구조에서 FCC구조로 변화는 Ac1에서 Ac3구간 일어나므로 스트레인 팽창량을 감소시킴으로 체적감소를 고려하였고, FCC구조에서 BCT구조로 변화할 때는 체적이 증가하므로 부피팽창량을 증가시켜야 한다. 따라서 이러한 부피팽창량은 각 결정구조의 격자상수(lattice parameter)를 이용해서 구할 수 있다. 마텐사이트 조직의 생성은 냉각속도의 영향을 크게 받는다. 따라서 냉각속도에 따른 마텐사이트의 생성분율을 계산하였으며, 이 관계를 Fig. 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열유동해석

용접조건 160A, 18V, 5mm/sec의 조건으로 수행한 열유동해석 결과 용접부의 온도분포는 Fig. 2 과 같다. 그림에서 보듯이 해석결과의 용융부폭 및 깊이는 실험치와 상당히 근접한 결과를 보인다. 그러나 열영향부는 약간의 오차를 보이고 있는데, 이것은 실제 열영향부의 측정에 있어 정확히 열영향부를 구분하기가 어려움으로 인해 오차를 포함하고 있으며, 해석시 물성치를 등방성으로 고려한 것도 오차의 원인으로 여겨진다. Fig. 12는 용접부 표면에서 용접부 중심 및 용접부 폭방향으로 0.84mm, 1.64mm, 2.88mm, 4.84mm 떨어진 위치에서 시간 따른 용접부의 온도이력을 나타낸 것으로 용접부 중심에서 급격한 온도구배를 확인할 수 있다. 특히 1500℃부근과 850℃부근에서 변곡선이 나타나는 것은 상변화(용융, 오스테나이트 변태)에 따른 잠열효과를 고려했기 때문이다

3.2 잔류응력해석

잔류응력 해석은 크게 상변태를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 각각 수행하였다. Fig. 3은 AISI1045에서 길이방향의 잔류응력분포를 상변태를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 나타낸 것으로 용접부에서 잔류응력분포는 실험결과에 비해서 약 30MPa 정도 높은 응력값을 보이고 있으나 상변태를 고려하지 않은 경우에 비해 약 30MPa정도 낮은 응력값을 보이고 있다. Fig. 4는 앞서 AISI1045와 마찬가지로 AISI1020의 길이방향의 잔류응력분포를 상변태를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 나타낸 것으로, AISI1020의 경우 고온에서 상변태를 하는 원인으로 인해 상변태 이후의 급격한 응력회복으로 상변태를 고려하지 않은 경우 비해 거의 차이를 보이고 있지 않다.

4. 결론

GTA 용접공정을 이용한 용접부 열유동 및 잔류응력의 해석에 있어 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- 1) GTA 용접공정에 대한 온도해석에 있어 용접진행 방향으로의 열전달을 무시한 2차원 해석을 하였으나 실험결과와 근접한 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 용접중 발생하는 상변화와 이에 따른 열적팽창을 예측할 수 있는 모델을 개발하였으며, 이를 용접부 잔류응력의 해석시 적용하였다.
- 3) AISI1045의 용접부 잔류응력의 해석에 있어 상변태 효과를 고려한 경우가 상변태 효과를 고려하지 않은 경우에 비해서 마텐사이트 조직의 생성으로 인한 압축응력의 증가로 낮은 응력분포를 보이며, 용접부 부근에서의 실험결과에 보다 근접한 결과를 보였다.
- 4) AISI1020의 경우 상변태를 고려한 경우 상변태를 고려하지 않은 경우에 대해 잔류응력의 차이를 거의 보이지 않는다. 이것은 고온에서 상변태가 이루어지고 이후 급격한 응력회복에 의한 것으로 여겨진다.
- 5) AISI1045와 AISI1020의 잔류응력해석결과를 비교해 보았을 때, 고탄소강일수록 상변태 현상이 용접비드 부근의 잔류응력 분포에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

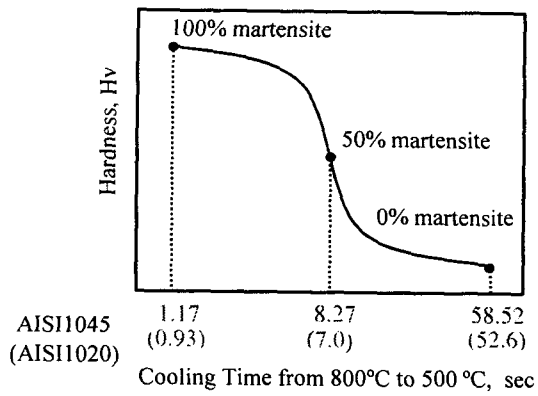


Fig. 1 Cooling rate dependent on martensite fraction

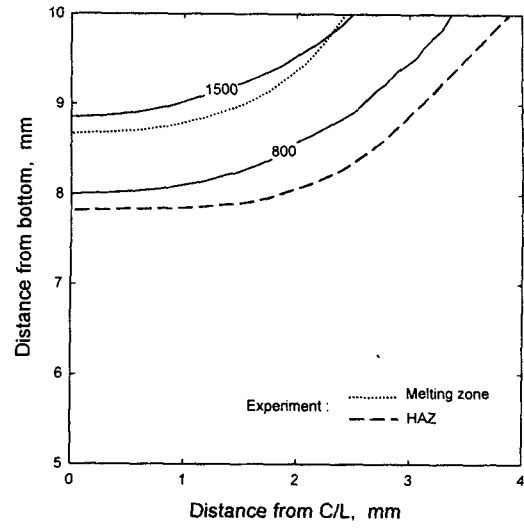


Fig. 2 Shape of calculated and experimental melting zone and HAZ

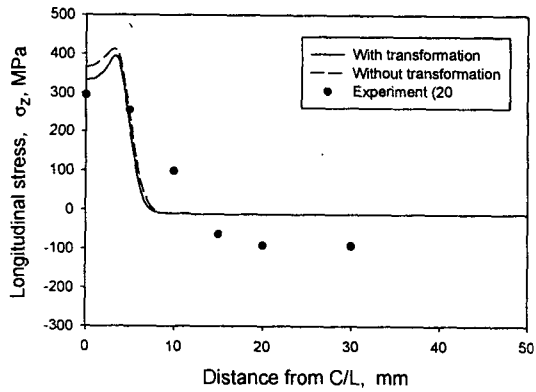


Fig. 3 Longitudinal residual stress distributions with transformation and without transformation on the top surface

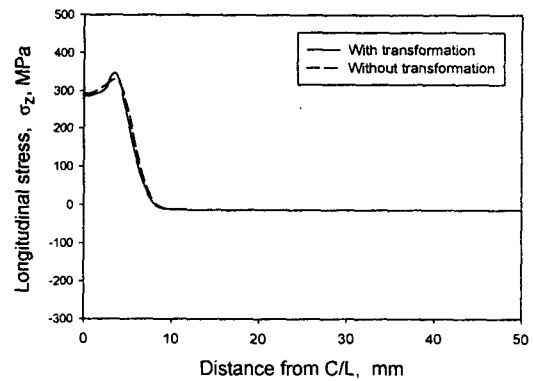


Fig. 4 Longitudinal residual stress distributions with transformation and without transformation on the top surface