

급격한 열사이클시의 용접열영향부 결정립 성장 거동 예측 (Prediction of Grain Growth Behavior under Thermal Excursion in the HAZ)

안홍조, 이창희
한양대학교 금속공학과

1. 서론

구조물을 용접에 의해 결합하게 되면, 극심한 열사이클의 결과로 용융부 주위에 모재와는 다른 미세구조와 기계적 성질을 갖는 열영향부(Heat Affected Zone)가 발생하게 된다. 이 열영향부에서는 미세조직 변화에 따른 기계적 성질 변화로 취성파괴, 응력부식, 피로파괴 등으로 인해 구조물의 안전성과 수명에 치명적인 영향을 미치게 된다. 구조용강의 적절한 재료선택, 적정용접조건 설정, 용접부 결합예측, 보수용접시기 파악 등을 위해서는 재료의 성분 및 용접조건에 따른 열사이클을 예측하고, 이에 따른 미세조직의 변화와 기계적 성질을 예측하는 것이 중요하다. 열사이클 예측은 기존의 Rosenthal 방정식에 의존하던 것을 탈피해 유한차분법(FDM)으로 접근하고, 열사이클의 결과를 바탕으로 결정립 미세화를 유발시키는 상변태 모델과 고온영역에서의 결정립 성장 모델을 개발하였다.

2. 본론

2.1 열사이클 모델링

용접 열사이클 해석을 위해서 해석하고자 하는 용접부의 형태를 해석모델로 설정한 후, 모델 전체를 meshing 과정을 통해 미소구간으로 구분하여 3차원적인 모델을 만들었다. 각 절점에 대해서는 여러 경계조건에 따라 해당하는 차분화 방정식을 적용시켜, 반복계산 프로그램을 작성하여 용접조건(입열량, 재료 물성치)에 따라 용접부 각 위치에서의 시간에 따른 열사이클을 계산할 수 있게 하였다.

지배방정식은 식(1)과 같은 고전적인 열전도 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{----- 식(1)}$$

(ρc : thermal capacity, λ : thermal conductivity)

식(1)로 표현된 지배방정식을 유한차분법(FDM)을 이용하여 각 경계조건에 따른 차분화 방정식을 유도하여, 이 차분화된 방정식을 이용하여 시간에 따른 온도 변화를 계산할 수 있는 예측 프로그램을 개발하였다.

2.2 결정립성장 모델링

일반강에서 용접 열사이클 동안 결정립 크기 변화 거동은 $\alpha \rightarrow \gamma$ 로의 상변태에 의한 결정립 미세화와 고온영역에서의 결정립 성장의 두가지 현상으로 구분할 수 있다.

A1~A3온도 사이에서 발생하는 $\alpha \rightarrow \gamma$ 로의 상변태 과정은 탄소의 확산에 지배받는 과정으로서 탄소의 석출이론을 적용시킬 수 있는데, 식(2)는 '58년 Ham이 제시한 등온시의 석출물의 거동을 계산하는 방정식이다.

$$R_{\gamma}(t) = R_0 \left(\frac{C_0 - \bar{C}(t)}{C_{\gamma}} \right)^{1/3} \quad \text{----- 식(2)}$$

($\bar{C}(t)$: 결정립 내부의 평균농도, C_0 : 초기농도, C_{γ} : austenite 농도)

이를 연속 가열동안의 austenite변태로 적용시키기 위하여, 시간에 따른 온도변화를 미소구간으로 구분하고, 순간적인 등온변태라고 고려하여 식(2)를 이용하면, 생성된 austenite의 크

기를 온도에 따른 반복적인 계산을 통하여 상변태 종료후의 austenite의 크기를 계산할 수 있다.

상변태가 종료 후 고온의 영역을 거치게 되면 결정립이 성장하게 되는데. 이를 고려하기 위하여 등온시의 결정립 성장을 나타내는 식(3)을 이용하였다.

$$D = kt^n \quad \text{----- 식(3)}$$

(k : mobility 관련 상수, n : 구동력 관련 상수)

이를 연속적인 온도변화 동안의 결정립 성장에 적용시키기 위하여, 상변태 모델의 내용과 유사한 방법으로 미소온도구간 동안의 등온성장이라고 고려하여 식(3)을 이용하면, 각 온도에서의 결정립 크기의 반복 계산을 통하여 austenite의 결정립 크기변화를 예측할 수 있게 된다. 이때 상수 n, k 값은 각 온도 구간에서의 등온 실험을 통해 구하였다.

열사이클과 결정립 성장의 예측은 C언어 프로그래밍을 통하여 수행하였고, 이는 차후에 소프트웨어로 개발하고자 함에 그 목적이 있다.

3. 요약과 결론

입열량을 3kJ/sec로 했을 때의 FDM에 의한 열전도 해석의 결과를 Fig.1에 나타내었다. 용접선에서 거리가 가까워질수록 peak 온도가 증가하며, peak 온도가 증가할수록 가열속도 및 냉각속도가 증가하는 결과가 실제의 경향을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 현재 고려된 모델에서는 point heat source, 물성치는 상수, 용융부도 고상이라 가정하였기 때문에 실제의 현상을 고려하기 위해서는 더욱 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

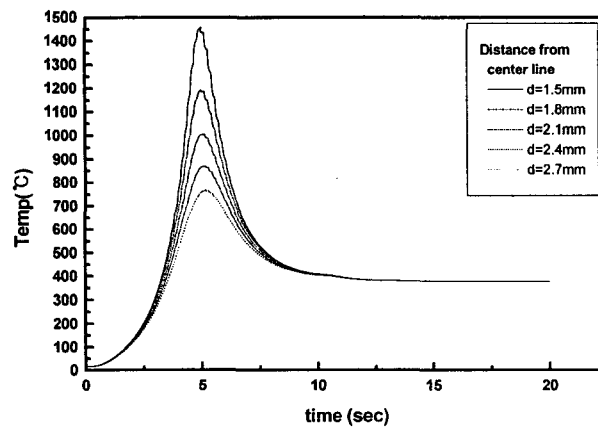


Fig. 1 The result of welding thermal cycle predicted by FDM analysis
(Heat Input : 3kJ/sec)

결정립 성장 모델링의 결과는 Fig.2에 나타내었다. 점으로 표시된 실제 실험의 결과와 선으로 표시된 모델링의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 변태에 의한 결정립 미세화를 고려하지 않고 모재의 상태에서 결정립 성장을 예측한 결과를 보면, 결정립 성장영역에서는 상변태를 고려하지 않아도 결정립 성장을 예측할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 상변태 고려의 결과로 결정립 미세화 영역까지도 예측이 되어짐을 확인할 수 있었고, 상변태 모델링 연구내용은 결정립 미세화를 위한 열처리 등에 응용할 수 있을 것이다.

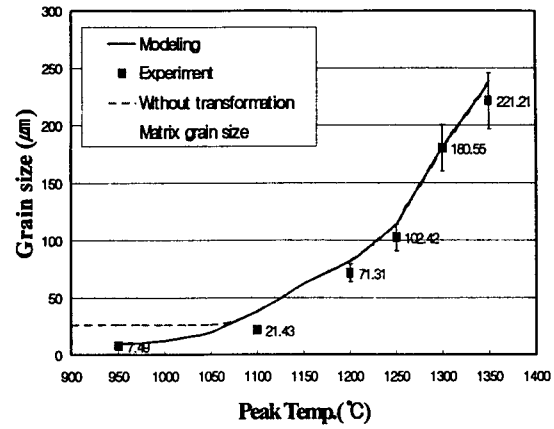


Fig. 2 Grain size results at various peak temp.
(Heat Input : 50kJ/cm)

4. 참고문헌

- (1) Adrian Bejan, 이상우 옮김 : Heat Transfer (1996) p210.
- (2) F. S. Ham : J. Phys. Chem. Solids, 6(1958) P335.
- (3) Hsun Hu, B.B. Rath : Metallurgical Transactions, 9(1970) p3181.