

C-Mn-Mo-Ni 압력용기강의 용접 열영향부의 가열시 오스테나이트 결정립 사이트 예측 모델링

(Austenite grain size prediction modeling of C-Mn-Mo-Ni pressure vessel steel HAZ
during welding heating cycle)

서영대, 엄상호, 이창희, 김주학*, 홍준화*
한양대학교 재료공학과
*한국원자력연구소 재료기술개발팀

1. 서론

일반적으로 재료가 용접에 의하여 접합을 할 때 용접 열영향부의 성질은 미세조직과 직접적인 관계를 갖고 있다. 따라서 이러한 미세조직의 정량적인 예측을 위해 결정립 크기 예측 모델링과 이를 바탕으로 한 상변태 예측 모델링을 수행하게 되었다. 용접 가열사이클동안 prior austenite 결정립 성장에 의한 오스테나이트의 결정립 크기는 용접 냉각사이클중의 상변태 거동에 매우 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 냉간 균열, 재가열 균열 등의 여러 가지 취약 성질을 나타내는 인자이기 때문에 용접 조건에 따른 결정립 크기를 예측하는 것은 적정 용접조건을 선택하는데 있어 매우 중요한 연구가 될 수 있다.

결정립 성장을 위한 열사이클 예측은 Rosenthal Equation을 이용하였으며, 이 때 예측된 열사이클에서의 prior austenite 결정립 성장은 등온 결정립 성장 방정식을 이용하였다.

한편, 가열사이클의 상변태 구간인 A₁과 A₃ 온도사이에서의 상변태 현상에 의한 결정립 미세화가 존재한다. 그러나, 기존에 연구된 결과에 의하면, 이러한 미세화에 의한 결정립 성장은 이후 고온의 결정립 성장구역에서의 결정립 성장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 이러한 상변태에 의한 결정립 미세화 효과를 무시하고 A₃ 온도에서 오스테나이트로의 상변태가 완료되고 결정립 성장이 일어난다는 가정을 전제로 결정립 성장 예측 모델링을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 열사이클 예측

Gleeble 실험을 위한 열사이클은 다음과 같은 열방정식 (eq. 1,2,3)을 이용하여 결정하였다.

$$T - T_0 = \Theta_1 \frac{\Delta t}{t} \exp\left(-\frac{\Delta t}{et} \left(\frac{\Theta_1}{T_p - T_0}\right)\right) \quad \text{----- (1)}$$

where, T₀ : Preheat temperature(°C)

T_p : Peak temperature(°C)

e : Natural logarithm(=2.718)

t : Time(sec)

$$\frac{1}{\Theta_1} = \left(\frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0}\right) \quad \text{----- (2)}$$

$$\Delta t_{8-5} = \frac{q/v}{2\pi\lambda\Theta_1} \quad \text{----- (3)}$$

where, q/v : heat input(kJ/cm)

λ : Thermal conductivity

2.2 결정립 성장 예측

일반강에서 용접 열사이클 동안 결정립 크기 변화 거동은 α → γ로의 상변태에 의한 결정립 미세

화와 고온 영역에서의 결정립 성장의 두가지 현상으로 구분할 수 있다. 그러나, 기존 연구된 결과에 의하면, 이러한 미세화에 의한 결정립 성장은 이후 고온의 결정립 성장구역에서의 결정립 성장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 이러한 상변태에 의한 결정립 미세화 효과를 고려하지 않고 A₃온도에서 *autenite*로의 상변태가 완료되고 결정립 성장이 일어난다는 가정을 전제로 결정립 성장 예측 모델링을 수행 하였다.

예측된 열사이클에서의 *prior austenite*의 결정립 성장은 등온 결정립 성장 방정식(eq. 4,5)을 이용 하였다.

$$D = kt^n \quad \text{-----(4)}$$

$$D_2 - D_1 = nk^{\frac{1}{n}}(1/D_1)^{1-\frac{1}{n}} \quad \text{-----(5)}$$

(k : mobility 관련 상수, n : 구동력 관련 상수)

이를 연속적인 온도변화 동안의 결정립 성장에 적용하기 위하여, 미소온도구간 동안의 등온성장이라고 고려하여, 각 온도에서의 결정립 크기의 반복계산을 통하여 *austenite*의 결정립 크기변화를 예측할 수 있게 된다. 이 때 상수 n, k 값은 온도가 변함에 따라 값이 변하기 때문에 실제 계산시에 사용하기 위하여 각 온도에서 등온 결정립 성장실험을 통하여 값을 구하였는데 그 방법은 다음과 같다. Eq. (4)에서 고려했던 결정립 성장 방정식에서 상수 n, k 값은 다음과 같은 방법으로 해석할 수 있다. Eq. (4)에서 양쪽항에 자연로그를 취하면 eq. (6)으로 표현된다.

$$\ln D = n \ln t + \ln k \quad \text{-----(6)}$$

Eq. (6)에서 보면 $\ln t$ 와 $\ln D$ 의 관계는 기울기를 n으로 절편을 $\ln k$ 로 취함을 확인할 수 있다. 즉, 어느 특정온도에서의 등온 결정립 실험 결과의 직선관계를 회귀분석을 하게 되면, 상수 n, k 값을 결정할 수 있게 되며, 프로그램상에서 보간법을 이용하여 각 온도의 중간값에서도 상수 n, k 값을 결정할 수 있도록 하였다.

3. 실험방법 및 결과

본 연구에서 사용한 시편은 원자로 압력경계재료로 사용되는 SA 508-cl.3이며, 열영향부를 재현하기 위해 thermo-mechanical simulator인 Gleeble 1500 System과 Dilatometer를 이용하였고, image analyzer와 광학현미경을 이용하여 조직을 분석하였다.

3.1 등온 결정립 성장실험

결정립 성장을 예측하기 위한 상수 n, k값을 결정하기 위해 각 온도에서 시간의 변화에 따른 등온 결정립 성장 실험을 수행 하였다. 이러한 등온 결정립 성장 실험은 Table (1)의 조건에 따른 열사이클을 통해 수행 하였다.

T _p	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅
900~1350°C (step : 50°C)	1	20	60	120	300

Table 1. Isothermal Grain Growth Test Conditions (sec)

3.2 A₁, A₃ 온도 결정 실험

용접 공정의 빠른 가열 속도는 초기 모재의 조직에서 오스테나이트로의 변태가 평형온도보다 높은 온도에서 일어나게 된다. 따라서, 결정립 성장 예측시에 정확한 변태온도 구간을 결정하기 위하여 몇

개의 가열 속도 조건에서 A₁, A₃ 온도를 측정하여 실제 계산시에 가열속도에 따른 상변태 온도의 상승효과를 고려할 수 있도록 하였다.

3.3 용접 열영향부 조직 재현 실험

예측된 결정립 크기 결과와 비교하기 위하여, 같은 조건에서 fig. (1)의 조건과 같이 용접 열영향부의 각 세부영역에 대한 열사이클에 따라 결정립 성장 실험을 수행하였다. 결정립 성장 영역은 4개의 peak온도로 구분하여 각각의 실험을 수행하였고, 결정립 미세화 영역은 2개의 peak 온도로 구분하여 실험을 수행하였다. 또한 입열량에 대한 효과를 고려하기 위하여 다양한 입열량에 대해서 각각의 열영향부 열사이클 조건으로 실험을 수행하여 모델링의 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 그리고, 냉각도중의 고온변태상의 생성은 새로운 결정립을 생성하여 austenite의 결정립 크기 측정이 어려워지기 때문에, 냉각사이클에서는 800℃에서 급냉을 하여 austenite의 결정립 형태에 큰 변화가 없는 저온변태상의 생성을 유도하였다.

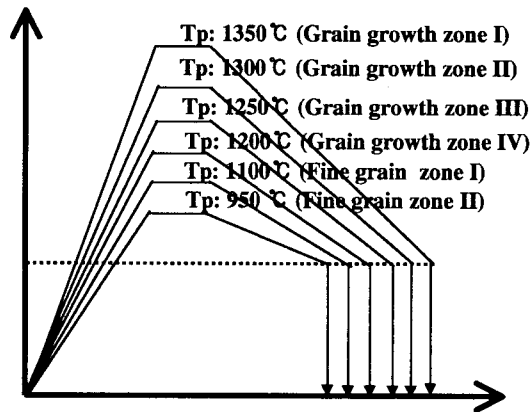


fig 1. HAZ Microstructure Simulation Thermal Cycle

3.4 결정립 성장 예측모델 결과

Fig. (2)에서는 Heating rate가 200℃/sec일때의 결정립 성장 예측결과와 조직 재현실험을 통해 주어진 온도에서 측정된 오스테나이트 결정립 크기를 보이고 있다. 각각의 peak온도에서의 결정립 크기가 실제와 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

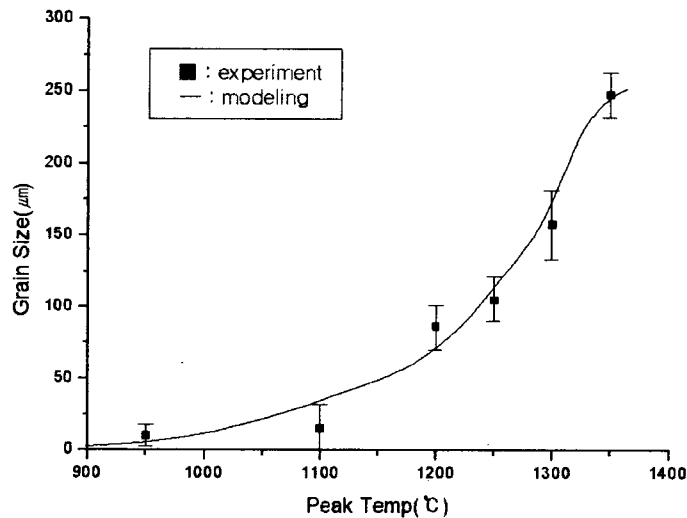


fig 2. Grain Size result in the HAZ (Heating rate : 200℃/sec)

Fig. (3)에서는 peak온도가 1300℃일 때, 입열량 변화에 따른 결정립 크기 예측결과와 조직 재현 실험을 통한 실제 측정 결과를 나타낸다. 입열량이 증가할수록 결정립 크기가 증가하는 경향이 실험결과와 잘 일치함을 보여주고 있으며, 각각의 입열량에서의 예측결과 역시 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

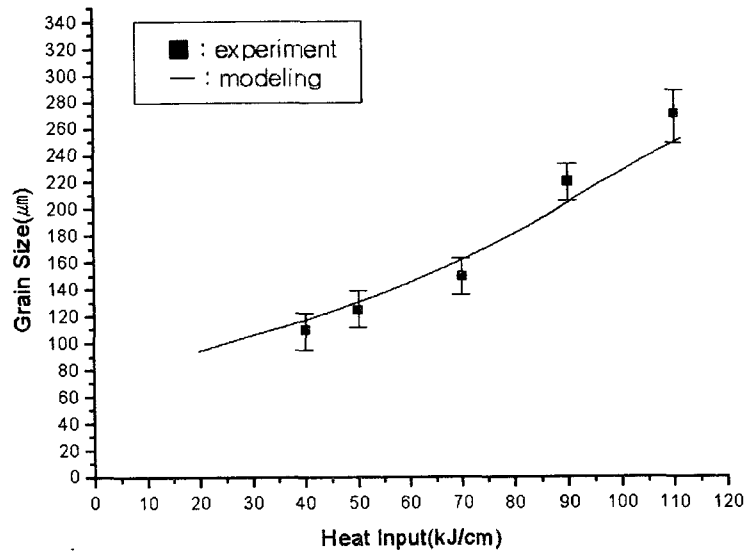


fig 3. Grain size result as heat input varies (Tp=1300℃)

4. 후기

본 연구는 2000년 한국원자력 연구소의 “원자로압력경계재료”의 연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] K.E.Easterling : Introduction to the Physical Metallurgy of Welding , pp23-26, pp112-138
- [2] R.V.Vandermeer,Hsun Hu : On the grain growth exponent of pure iron, acta. metall. , Vol 42, No. 9, p3071
- [3] P.J.Alberry , B.Chew, Prior austenite grain growth in Heat-affected zone of a 0.5Cr-Mo-V steel, Metals Tech. 1977(June),p317
- [4] Hsun Hu, B.B. Rath : On the time exponent in isothermal grain growth , metall. trans, Vol 1, p3181