

용접열영향부 오스테나이트 결정립 크기 예측 모델링

Prediction model for prior austenite grain size in low-alloy steel weld HAZ

엄상호*, 문준오*, 이창희*, 윤지현**, 이봉상**

* 한양대학교 재료공학부

** 한국원자력연구소

ABSTRACT The empirical model for predicting the prior austenite grain size in low-alloy steel weld HAZ was developed through examining the effect of alloying element. The test alloys were made by vacuum induction melting. Grain growth behaviors were observed and analyzed by isothermal grain growth test and subsequent metallography. As a result, it was found that the grain growth might be controlled by grain boundary diffusion and the empirical model for grain growth was presented.

1. 서 론

대부분의 철강재료는 구조물의 제작에 있어 용접 공정을 경험하게 되며, 이러한 용접 열 사이클에 의해 미세조직 및 기계적 성질의 변화가 발생하는 열영향부(Heat-affected zone)가 형성된다. 이러한 열영향부의 성질은 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다.

용접에 의한 냉각 사이클 중의 상변태 현상 못지 않게 가열 사이클 중의 오스테나이트의 결정립 성장 현상은 용착금속의 결정립 크기뿐만 아니라 냉각 중의 상변태 속도론(kinetics)에 있어 큰 영향을 미치기 때문에 중요하지만, 대부분 간과되고 있는 실정이다.

결정립 성장은 결정립계(grain boundary)의 에너지 감소를 구동력으로 하는 확산 율속 과정으로, 석출물이 존재하지 않는 경우 일반적으로 등온에서 다음과 같이 표현된다¹⁾.

$$D^{1/n} - D_0^{1/n} = Kt \quad (1)$$

여기서, D_0 는 초기 결정립 크기, n 과 K 는 재료와 온도에 의존하는 상수로 알려져 있으며, 실험 데이터의 분석으로부터 구해진다. 매우 순수한 재료 또는 고온에서 시간지수(time exponent) n 은 이상적인 0.5의 값을 가지지만, 대부분의 경우, 0.1-0.4사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있다^{1,2)}.

대부분의 경우 식(1)은 간단히 식(2)의 형태로 사용되고 있다.

$$D = kt^n \quad (2)$$

결정립계의 운동도(mobility)와 관계있는 상수인 k 는 온도의존성으로부터 다음과 같이 Arrhenius type의 식으로 표현될 수 있으며, 여기서 Q_{app} 는 결정립 성장에 대한 겉보기활성화에너지(apparent activation energy)를 나타낸다.

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Q_{app}}{RT}\right) \quad (3)$$

본 연구에서는 식(2)와 (3)을 기본으로 합금 성분 변화에 따른 등온 결정립 성장 거동을 조사/분석함으로써, 등온 결정립 성장 모델을 작성하고 용접 열 사이클을 미소의 등온 구간의 합으로 간주하는 가산법칙을 적용하여 용접 열 영향부에서의 초기 오스테나이트 결정립 크기 예측 모델을 작성하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 Materials

결정립 성장에 미치는 합금원소의 영향을 분석 및 결정립 성장 모델의 작성을 위해 0.5%Mo-0.26%Si 강을 기준으로 9가지 성분계의 시험 합금을 설계하였다. 진공유도용해방법으로 ingot을 주조하였으며, 용체화처리 및 단조, 오스테나이트화 처리를 실시하였다. Table 1에서는 각 시험합금의 조성을 보이고 있다.

Table 1 Chemical compositions

No	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si
#1	0.081	0.487	0.007	-	0.490	0.253
#2	0.087	0.950	2.04	1.00	0.497	0.270
#3	0.083	1.480	3.98	1.98	0.486	0.258
#4	0.192	0.515	2.03	2.00	0.488	0.269
#5	0.198	1.040	4.00	-	0.493	0.259
#6	0.213	1.470	0.002	1.00	0.493	0.270
#7	0.305	0.540	4.00	0.99	0.489	0.276
#8	0.318	1.010	0.003	2.03	0.499	0.285
#9	0.321	1.510	2.02	-	0.497	0.267

2.2 등은 결정립 성장 실험

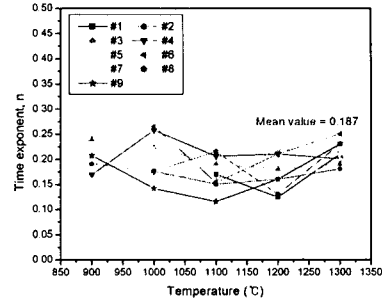
등은 결정립 성장 실험은 dilatometer를 이용하여 일정온도 및 시간에서 항온 유지한 후 질소 가스 퀀칭(quenching) 후 오스테나이트 결정립 크기를 측정하는 방법을 사용하였다. 등은 결정립 성장 실험에서 가열온도는 900 -1300℃까지 100℃간격으로 변화시켰으며, 가열시간은 가열 온도에 도달한 후 0, 20, 60, 120, 300초 조건으로 변화시켰다. 퀀칭된 시편들은 마운팅(mounting), 폴리싱(polishing)을 거쳐 에칭 후 image analyzer를 이용하여 평균 결정립 크기를 측정하였다.

한편, 초기 조직 및 각 가열 온도에서의 석출물의 존재여부를 조사하기 위한 TEM 분석(Carbon replica)을 실시하였다.

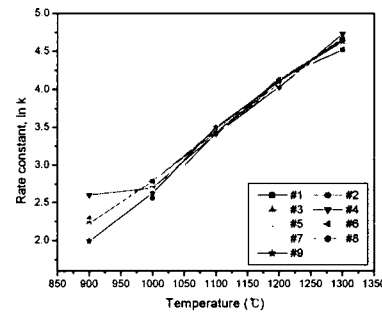
3. 실험 결과

3.1 등은 결정립 성장 분석 결과

Fig. 1은 각 시험시편 9종에 대한 각 온도에서의 등은 유지 시간 변화에 따른 초기 오스테나이트 결정립 크기를 측정 후 식(2)의 형태로 fitting함으로써 측정된 n과 k값의 거동을 보이고 있다. 시간지수 n의 경우, 합금원소 및 온도에 따른 특정한 경향성이 관찰되지 않아 평균값인 0.187을 취하였다. 한편, k의 경우 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며, 기울기로부터 측정되는 결보기활성화에너지의 경우 대략 96-120kJ/mol 범위의 값을 갖는다. 이러한 활성화에너지는 오스테나이트에서의 철이 금속의 체적 확산(interdiffusion)에 대한 활성화에너지(=260kJ/mol)³⁾보다 낮지만, 문헌상⁴⁾의 Cr의 결정립계 확산에 대한 활성화에너지(109kJ/mol)와 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다.



(a) Time exponent, n



(b) Rate constant, ln k

Fig. 1 Kinetic constant for grain growth

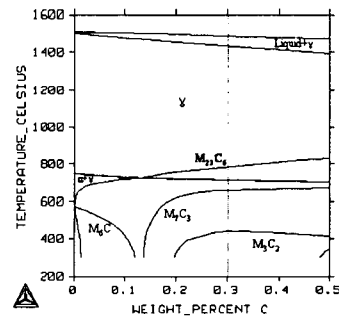


Fig. 2 Phase diagram for Fe-0.3C-0.26Si-0.5Mo-1.5Mn-2Cr-4Ni

이러한 결정립계의 이동에 대한 활성화에너지는 매우 빠른 확산속도를 갖는 침입형 원소인 탄소보다는 치환형 원소의 영향이 지배적일 것으로 보이며, 침입형 원자인 탄소는 탄화물 형성에 의해 결정립 성장에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 하지만, Fig. 2의 상태도에서 보듯이 존재가능한 탄화물인 M₂₃C₆의 평형 용해 온도가 약 800℃로 비교적 낮아 용접 열 사이클에 의한 과열(superheating)을 고려하더라도 주된 결정립 성장 온도 범위에서는 거의 용해되어 결정립 성장 억제 효과가 없을 것으로 판단된다. 따라서,

측정된 활성화에너지로부터 치환형 합금원소의 영향을 정량화하기 위해 합금원소의 첨가는 활성화에너지에 영향을 미치며 그 크기는 합금원소의 첨가량에 비례한다는 가정하에서 다음과 같은 형태의 식을 다중회귀분석을 통해 도출하였다.

$$Q_{app} = 98116.28 + 2405.45[Mn] + 5269.05[Cr] + 231.95[Ni]$$

여기서, [X]는 합금 첨가량(wt%)을 나타낸다. 위의 분석에 의하면, 활성화에너지에 대해 Cr, Mn, Ni의 순으로 영향 정도가 큰 것으로 보이며, 이는 각 원소의 결정립계로의 편석(segregation) 정도 및 체적확산에 대한 활성화에너지에 대한 경향과 일치한다.

3.2 열사이클에 따른 결정립 예측 모델

등온 결정립 성장 거동의 분석을 통해 다음과 같은 등온 결정립 성장 모델을 작성하였으며, 가산법칙을 적용하여 용접 열 사이클에 따른 결정립 예측 모델을 작성하였다.

$$D = 3.45969 \times 10^5 \exp\left[-\frac{(98116.28 + 2405.45[Mn] + 5269.05[Cr] + 231.95[Ni])}{RT}\right] t^{0.187}$$

Fig. 3은 위의 등온 결정립 성장 모델의 정합성을 평가하기 위해 각 시편에 대해 측정된 결정립 크기와 모델에 의해 계산된 결정립 크기를 함께 나타낸 것이다.

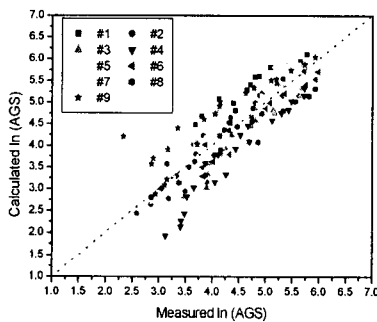


Fig. 3 Reliability of isothermal grain growth model

Fig. 4는 SA508-cl.3 (Fe-0.2C-0.26Si-1.34Mn-0.15Cr-0.86Ni-0.49Mo)에 대해 용접 입열량 40kJ/cm의 조건에서 각 peak 온도를 경험하는 지역에서 예측된 초기 오스테나이트 크기와 측정 결과를 함께 나타낸 것이다. 어느 정도 오차를 포함하고 있지만 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

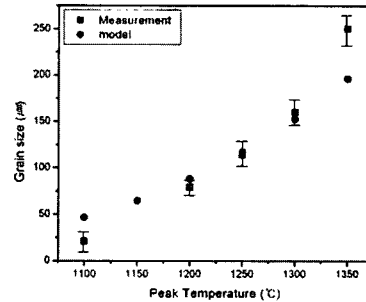


Fig. 4 Comparison of prediction with measured grain size for SA508-cl.3 at 40kJ/cm

4. 결 론

1) 결정립 성장에 대한 활성화에너지 측정 결과 합금원소의 체적확산보다는 결정립계 확산이 우속 과정인 것으로 보인다.

2) 결정립 성장에 미치는 치환형 합금원소의 영향은 큰 차이는 없었지만, Cr, Mn, Ni의 순으로 결정립 성장 억제 효과를 보이는 것으로 관찰되었다.

3) 분석을 통해 등온 결정립 성장 모델을 작성하였으며, 가산법칙을 통해 용접 열 사이클에 따른 초기 오스테나이트 결정립 성장 모델을 작성하여 SA508-cl.3의 조성으로 신뢰성을 평가한 결과 비교적 일치하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년 한국원자력연구소의 “파괴 특성평가 및 향상기술개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. B. B. Rath and H. Hu : Trans. TMS-AIME, 245(1969), 1243
2. W. C. Leslie : The Physical Metallurgy of Steels (4th ed.), Elsevier Science, 1982
3. E. A. Brandes and G. B. Brook : Smithells Metals Reference Book (7th ed.), Butterworth-Heinemann Ltd., 1992
4. P. J. Alberry, B. Chew and W. K. C. Jones : Metals Technology, 4(1977), 317