

Fe-C-Mn 강의 용접 가열 과정중 상변태 거동에 미치는 초기 결정립크기의 영향

The effects of initial grain size on the austenitization kinetics during heating process of welding in Fe-C-Mn steel

유종근*, 김상훈*, 이창희*, 안영호**, 이종봉**

* 한양대학교 신소재공학부 신소재 하이브리드 프로세스 연구실

** 포스코 기술 연구소

1. 서 론

용접 중 가열되는 모든 강은 A₃ 온도 이상에서 Austenite로 변화한다. 여기서 A₃ 온도는 초기 조건 grain size 나 heating rate 등에 의해 변화하며, 변화된 A_{c3} 온도는 Austenite 성장 거동에 영향을 주어 냉각 후 최종조직의 기계적 성질에 영향을 주게 된다. 이러한 영향에도 불구하고 heating 중 상변태나 A_{c3} 온도 거동에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들다. 그러므로 본 연구에서는 A_{c3} 온도에 대한 ferrite grain size (FGS)와 heating rate의 영향에 대해 살펴볼 것이며, Additivity rule^[1] 개념을 적용한 연속 가열 data를 이용하여 변태에 대한 Avrami equation^[2,3]의 kinetic parameter를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한 상변태 거동에 영향을 주는 grain size의 영향을 예측 식에 적용하여 계산된 A_{c3} 값과 실험 값을 비교하여 신뢰도를 평가할 것이다.

2. Avrami equation 의 변환

등온 변태 거동은 Avrami 에 의해 제안된 다음 식에 의해 표현할 수 있다.

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad [1]$$

여기서 X는 t 시간후 변태된 분율, k는 thermal cycle에 무관한 온도와 상변태 모드의 함수이고, n은 변태 모드의 함수로 유일한 변태모드나 같은 조성에 대해서는 상수로 주어진다.

Eq.[1]을 가산법칙에 적용하기 위해서는 transformation rate가 상태에 의해 결정되어야 하며 thermal path 에 무관해야 한다.^[4,5] 따라서 Eq.[1] 을 변태된 분율에 대해 정리하면 다음과 같다. 먼저 Eq.[1]을 미분하여 정리하면,

$$\begin{aligned} dX/dt &= nkt^{n-1} \exp(-kt^n) \\ &= nkt^{n-1}(1-X) \end{aligned} \quad [2]$$

Eq.[1]을 t의 함수로 정리하고 Eq.[2]에 대입하면,

$$dX/dt = nk^{1/n}(1-X)[\ln 1/(1-X)]^{(n-1)/n} \quad [3]$$

이때, Eq.[3]을 k에 대해 정리하면 최종적으로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$k = \left(\frac{dX}{dt} \right)^n n(1-X)^{-n} \left[\ln \left\{ \frac{1}{(1-X)} \right\} \right]^{1-n} \quad [4]$$

Eq.[4]에서 k는 변태 분율 X, 변태율 dX/dt의 함수임을 알 수 있다. 한편 n 값이 주어진다면 k값은 실험값으로부터 계산이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 k값은 thermal path에 무관한 온도의 함수이기 때문에 n 값이 적절하게 주어졌을 때, heating rate를 달리하여도 k값에는 변화가 없을 것이다.

3. 실험 방법

Austenitization에 대한 FGS의 영향을 보기 위해 준비된 시편 (0.08wt%C 0.25wt%Si, 1.4wt%Mn)을 길이 10mm, 직경 3mm로 제작하여 고온 holding을 통해 grain size가 다른 시편을 준비하였다. 열처리 조건과 FGS는 table 1과 같다.

Table 1 FGS and heat treatment condition.

Specimen	Heat condition	FGS (μm)
FGS 1	Non-heat treated	16
FGS 2	Hold at 1300°C for 18min	46.5
FGS 3	Hold at 1300°C for 2hours	110

Austenitization kinetics에 미치는 heating rate의 영향을 보기 위해서 table 1과 같은 열처리를 통

해 제작된 시편을 각각 dilatometer에서 10, 20, 30°C/sec의 heating rate로 1100°C까지 가열하여 dilatation data를 얻었다. dilatation data를 이용하여 각 FGS 조건에 대한 Ac3 온도를 구하여, Ac3 직상 온도까지 100°C/s로 가열 후 quenching하여 AGS를 측정하였다. 조직 관찰을 위해 열처리된 시편은 polishing 하여 chemical etching 하였다.

냉각후 조직관찰은 optical microscope를 이용하였으며, 각 조건에 대한 grain size의 측정은 image analyzer를 이용 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Austenitization 에 대한 Heating rate 와 FGS의 영향

heating rate 와 grain size 에 의한 변태분율의 영향을 살펴 보면 fig.1 과 같다.

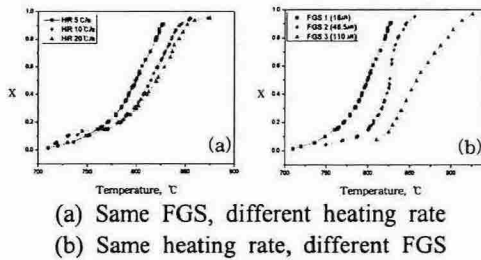


fig.1 Variation of the fraction of austenite

fig.1 (a) 의 경우 같은 FGS 조건에서 heating rate 를 변화 시켰을 때 변태가 높은 온도방향으로 지연되는 것을 확인할 수 있고, 이는 연속 가열과정을 등온의 합으로 보는 가산법칙의 측면에서 볼때 heating rate가 빨라질수록 각 온도 구간에서의 등온 유지 시간이 줄어들어 원자 확산을 위한 시간이 충분히 주어지지 않기 때문이라 설명할 수 있다. fig.1 (b)의 경우는 heating rate의 영향이 없는 경우 FGS에 의한 변태 분율의 변화를 보여준 그래프인데, 여기서 grain size가 커짐에 따라 전체적인 변태가 높은 온도 방향으로 지연된다. 그 이유는 grain size 가 커지면 nucleation site 가 줄어들어 변태가 지연되기 때문이다.^[6]

4.2 Kinetic parameter 의 측정

앞 서 언급 했듯이 k 값은 상태의 함수로서 n 값이 적절하게 주어진다면 thermal path에 무관한 함수로 표현되기 때문에 각각의 n 값에 대한 k값을 비교하였다.

fig.2에서 보면 heating rate에 무관하게 일정한 k값을 갖게 하는 n 값이 0.5 임을 알 수 있다.

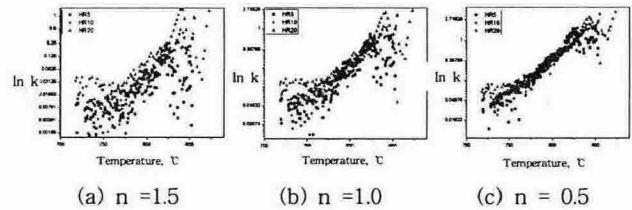


fig.2 Distribution of calculated lnk against temperature with different values of n under various heating rate

4.3 FGS 영향이 반영된 k 함수의 표현

k를 온도와 FGS의 함수로 표현하기 위해 heating rate 가 같을때 각 FGS 조건에 대한 k 값을 비교하였다. fig.3에서 보는 것처럼 heating rate가 같은 경우 FGS가 변화하면 변태 시작이 높은 온도 방향으로 지연되는 경향을 보인다. 이것은 k 값이 Eq.[4]에서 보는 바와 같이 X 와 dX/dt에 의해 결정되는 상태 함수이기 때문이며, 변태 분율과 변태율의 변화의 경향과 같은 경향을 보인다.

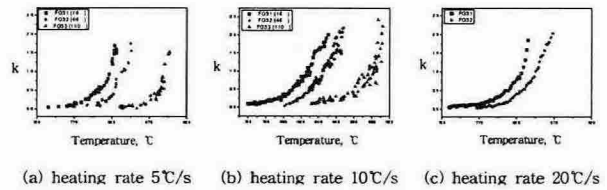


fig.3 Behavior of k against temperature under same heating rate with different FGS

fig.3 으로부터 k 의 거동을 관찰할 때, k는 온도에 대한 exponential 함수 (Arrhenius type) 형태로 표현할 수 있다.

Cahn, Umemoto et al.^[7,8] 은 불균일 핵생성에 의한 변태 속도식을 이론적으로 전개하여 grain size가 표현된 Avrami equation 에 대해 다음과 같이 표현 하였다.

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{K}{D^m} t^n\right) \quad [5]$$

이 식에서 D 값은 grain size 이며, m 값은 grain size의 영향 지수로써 변태 기구와 핵생성 장소에 의해 결정되는 상수이다.

k 값에 대해 grain size 효과를 표현하기 위해서 우리는 k 를 온도 영향에 의한 함수 f(T) 와 grain size 의 영향에 의한 함수 D^m로 다음과 같이 표현했다.

$$k = D_a^m \cdot f(T) \quad [6]$$

여기서 grain size 효과가 반영되지 않은 $f(T)$ 는 FGS에 관계없이 수렴할 것이며, 이러한 유추에서부터 FGS에 무관하게 수렴하게 하는 m 값을 다음 fig.4와 같이 찾을 수 있다.

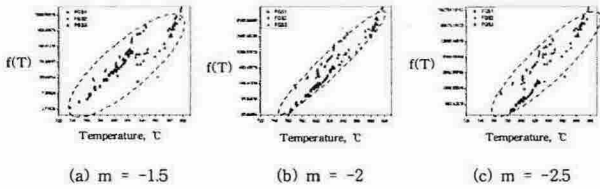


fig.4 Convergence of $f(T)$ by m values

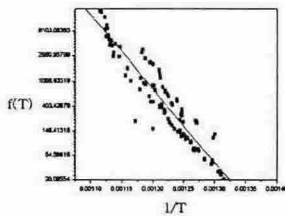


fig.5 Function of temperature $f(T)$

또한 온도에 대한 함수인 $f(T)$ 는 분석결과 fig.5와 같이 온도의 역수에 대한 일차함수 형태를 가지며 data에 대한 linear fit을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

$$f(T) = 7.7 \times 10^{23} \times \exp\left(-\frac{53414}{T}\right) \quad [8]$$

앞서 계산된 grain size에 대한 함수를 포함하여 k 값에 대해 표현 하면 다음과 같은 k 함수가 얻어진다.

$$k = D_a^{-2} \times 7.7 \times 10^{23} \times \exp\left(-\frac{53414}{T}\right) \quad [9]$$

4.4 작성된 모델의 신뢰도

신뢰도 평가를 위해 각각 다른 FGS에서 실험치에 의해 계산된 k 값과 Eq.[9]에 의해 예측된 값을 비교한 결과를 보였다.

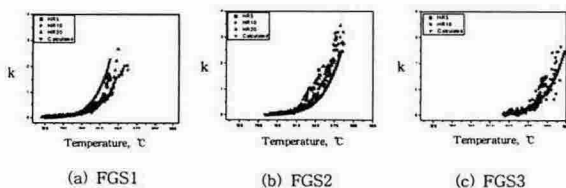


fig.6 Compare calculated k with measured k

fig.6에서 예측된 k 값은 FGS와 heating rate 변

화에 상관없이 각 온도에서 잘 일치됨을 볼 수 있다. 그리고 가산법칙에 의해 변태 분율 X 가 1이 되었을 때, 즉 fully austenite 상태일 때의 A_{c3} 온도를 계산한 결과와 실험값의 비교는 다음과 같다.

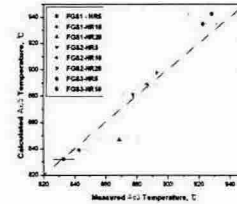


fig.7 Compare calculated A_{c3} with measured A_{c3}

A_{c3} 에 대한 예측 역시 모든 FGS와 heating rate에 대해 좋은 신뢰도를 보이고 있다.

5. 결론

1. Heating rate가 커지면 변태가 높은 온도 방향으로 지연되는 경향을 보였는데, 이것은 heating rate가 커짐에 따라 각 온도의 등온 시간이 줄어들기 때문이다.
2. FGS가 커지면 변태 시작과 종료가 지연되는 경향을 보인 것은 nucleation site의 감소의 영향이다.
3. Avrami parameter k 값은 온도에 대해 arrhenius type의 exponential 함수 형태를 보였고, arrhenius type의 k 값이 포함된 Avrami equation의 A_{c3} 온도 예측은 높은 신뢰도를 보였다.

후기

본 연구는 포스코 기술연구소의 재정적인 지원하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. E. Scheil : Arch. Eisenhuettenwes, 8(1935), 565
2. W. A. Johnson and R.F. Mehl : Trans. AIME, 125 (1939), 416
3. M. Avrami : J. Chem. Phys., 7 (1939), 1103
4. J.W. Cahn : Acta Metall., 4 (1956) 572-575
5. J.W. Christian : The Theory of Transformation in Metals and Alloys, 2nd ed, Pergamon Press, Oxford U.K, (1975), 535-48
6. M. Umemoto, et al : Effect of cooling rate on grain size of ferrite in a carbon steel, The Institute of Metals. 3 (1987), 249-255
7. J.W. Cahn : Acta Metall., 4(1956), 449
8. M. Umemoto : Control and Prediction of Structure and Property, ISIJ, Tokyo, Japan, (1998), 105