

저합금강 용접열영향부 페라이트 변태 거동 예측 모델링

(Modelling the transformation kinetics for austenite to ferrite in a low alloyed steel in weld HAZ)

김상훈*, 문준오*, 이창희*, 정홍철**, 이종봉**

* 한양대학교 신소재공학부

** 포스코 기술연구소 접합연구그룹

1. 서 론

구조재로 사용되는 저합금강은 다양한 구조물의 특성에 따라 다양한 기계적 성질을 갖도록 제조된다. 그러나 구조물의 제작 시에 필연적으로 거치게 되는 용접과정 중의 극심한 열사이클에 의해서 처음 제조 시에 가지는 기계적 특성을 잃게 되며 이러한 현상에 의해 구조물은 안정성에 큰 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 많은 연구자들에 의해서 용접열영향부의 재질을 예측하고자 하는 연구가 수행되어 왔다.

본 연구에서는 실험적 접근 방법을 통해 용접열영향부의 페라이트 변태 거동 예측 모델을 작성하고자 하였다. 이를 위해 등은 변태에 대한 속도론적 모델로 주로 사용되고 있는 Avrami 방정식을 이용하여 모델을 작성하고자 하였으며, 본 연구에 이용된 Avrami 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 X는 변태분율, t는 등은 변태 시간을 나타내며, n은 반응 상수로 핵생성 및 성장 모드, 성장 차수와 관계있는 인자이다. 또한 k는 핵생성 속도와 성장 속도에 의존하는 값이다.

본 연구에서는 기존의 변태 속도 예측 모델에서의 적용 범위의 제한성을 극복하기 위해 변태 거동에 대한 합금 성분과 초기 오스테나이트 결정립 크기 변화의 영향을 포함하는 예측 모델을 작성하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위해서 저합금강 성분 범위에 해당하는 시험합금을 설계하고 진공유도 용해를 통해 제작하였다. 시험합금의 성분은 표 1과 같다. 표에 나타난 바와 같이 페라이트 변태 거동에 미치

는 합금성분의 영향을 살펴보기 위해 Si의 함량을 고정하고, C 와 Mn의 함량을 조절하였다.

표1 Chemical compositions of experimental steels (wt%)

Alloys	C	Si	Mn	P	S
A	0.046	0.137	0.99	<0.002	<0.002
B	0.102	0.141	1.07	<0.002	<0.002
C	0.142	0.137	1.05	<0.002	<0.002
D	0.054	0.136	1.59	<0.002	<0.002
E	0.102	0.138	1.60	<0.002	<0.002
F	0.151	0.139	1.61	<0.002	<0.002

제작된 시험합금의 등은 변태 실험은 Dilatometer를 이용하여 수행하였으며, 실험 열사이클은 그림1과 같다.

등온 변태 실험은 초기 오스테나이트 결정립 크기의 영향을 살펴보기 위해 1200도에서 각각 0, 20, 200초 유지 후 등은 변태 온도로 냉각하였으며, 이 때 각 유지시간에 따른 초기 오스테나이트 결정립 크기는 합금성분에 관계없이 평균적으로 90, 150, 310 μ m 였다.

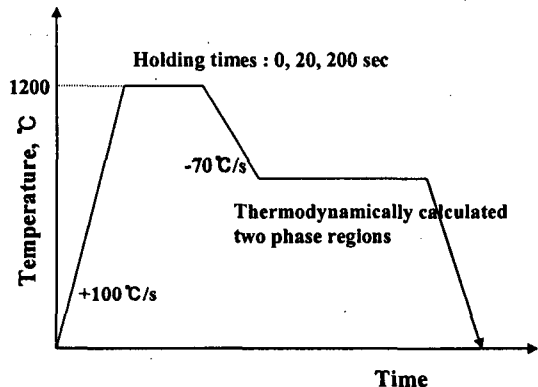


Fig.1 Thermal cycle for isothermal heat treatment

등온 변태 온도 구간은 780도에서 640도까지 20도 간격으로 하였고 등온 유지 시간은 3000 초로 유지하였다. 초기 오스테나이트 결정립과 등온 변태 후의 조직은 광학현미경을 통해 관찰하였다.

3. 실험결과

3.1 페라이트 등온 변태 거동 분석

서론에서 미리 밝힌 바와 같이 등온 변태에 대한 속도론적 모델로 주로 Avrami 방정식을 사용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 Avrami 방정식의 적용성을 높이기 위해 합금원소의 영향과 초기 오스테나이트 결정립 크기의 영향을 포함하는 Avrami 방정식을 이용하여 페라이트 등온 변태 거동을 분석하였다¹⁻³⁾. 이는 다음의 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = 1 - \exp(-Kd_\gamma^m t^n) \quad (2)$$

여기서, d_γ 는 오스테나이트 결정립 크기를 나타내며, m 은 변태 모드와 핵생성 site에 의존하는 것으로 알려져 있다.

우선 반응상수(n)은 등온 변태 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 $\ln(\ln(1/(1-X)))$ vs. $n \ln t$ 의 형태의 그래프를 작성하고 이 때 그래프에 나타난 직선의 기울기를 통해 n 값을 얻을 수 있었다. 이렇게 해서 평균적으로 0.99 값을 얻을 수 있었다. 이를 그림2에 나타내었다.

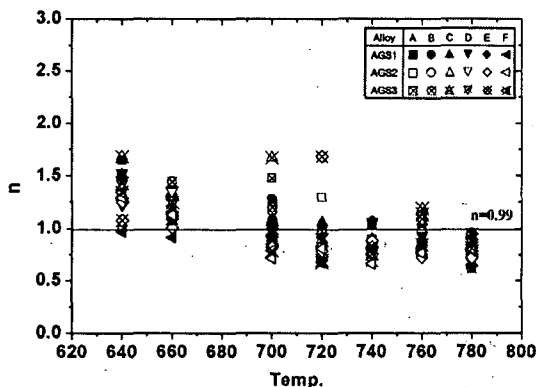


Fig.2 Reaction constant, n

한편, 오스테나이트 결정립 크기에 영향을 미치는 상수 m 은 결정립 크기에 따른 거동분석을 통해 $n \ln t$ vs. $\ln d_\gamma$ 형태의 그래프로 나타내어 이 때 얻어지는 직선의 기울기를 통해 얻을 수 있

다. 여기서 t 는 50%의 변태가 일어난 시간을 이용하였으며, 이때의 m 값은 평균 -1.21 을 가졌다. 이는 오스테나이트 결정립이 커질수록 페라이트의 변태 속도가 늦어지는 것을 의미하며, 기존의 연구에 의해 얻어진 값과 유사함을 알 수 있었다⁴⁾. 이에 대한 결과를 그림3에 나타내었다.

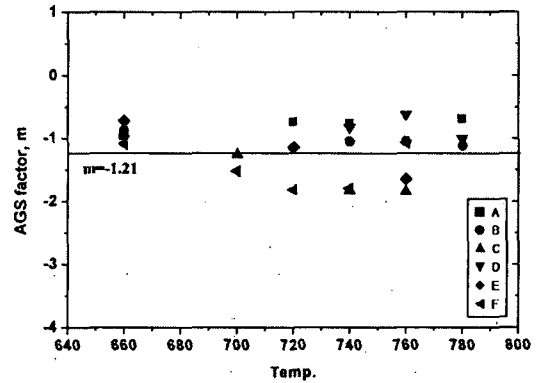


Fig.3 Austenite grain size factor, m

앞에서 분석을 통해 n, m 은 변태 온도와 합금 조성에 무관한 상수로 얻을 수 있었다. 그러나 실제 값과 얻어진 상수 값 사이에는 차이가 존재하며 이는 K 값을 통해 보정된다.

K 값은 Avrami 방정식을 K 에 대해 나타내고 이때 10, 50, 90% 변태에 도달하는 시간과 오스테나이트 결정립 크기 인자의 값 등을 대입하여 얻을 수 있다. 그 결과를 그림4에 나타내었다.

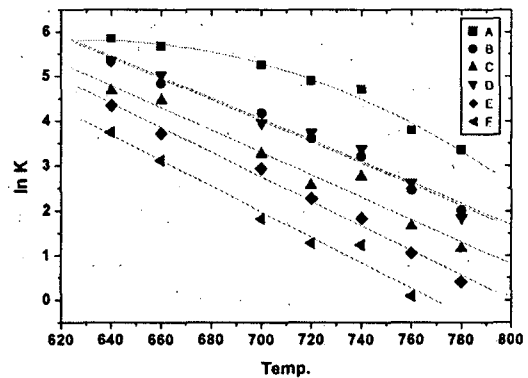


Fig.4 Rate constant, K

위의 그림에서 볼 수 있듯이 합금 원소가 첨가됨에 따라 $\ln K$ 값이 감소함을 알 수 있으며, 이를 통해 합금 원소가 많아질수록 페라이트 변태가 늦춰짐을 알 수 있다.

또한 위에서 얻은 K값에 합금원소의 효과를 정량적으로 나타내기 위해 다중회귀분석을 수행하였으며, 다음 표와 같은 결과를 얻었다.

표2 Coefficients for rate constant.

	a_c	a_{Mn}	$a_{Const.}$
A	29497.1	3978.201	-67.7454
B	-82.79	-11.08	0.222567
C	0.053951	0.007919	-0.000162

$$\ln K = A + BT + CT^2$$

3.2 등온 변태 모델의 신뢰성

등온 변태 실험 결과의 분석을 통해 얻어진 인자들을 통해 계산된 페라이트 변태 거동 데이터와 실제 등온 변태 실험을 통해 얻은 페라이트 변태 거동데이터를 비교하였으며, 그 결과를 그림5에 나타내었다.

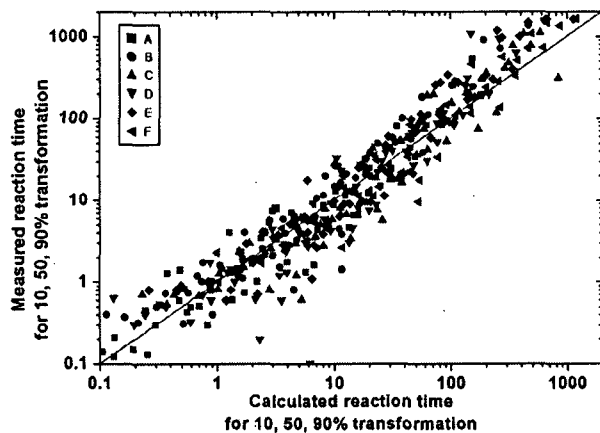


Fig.5 Comparison of calculated data with experimental data for isothermal transformation.

위 그림에서 볼 수 있듯이 예측 결과가 실험결과와 대부분 잘 일치하고 있다. 그러나 10% 변태시간과 고온에서의 변태시간의 경우 측정에 대한 오차로 인해 일부분 불일치를 보였다.

3.3 페라이트 연속 변태 거동 예측모델

페라이트의 연속 변태 거동을 등온 변태 실험을 통해 얻어진 인자들을 통해 예측하기 위해서 Additivity rule을 적용하여 계산하였다⁵⁾. A합금의 AGS1 조건에 대해 Additivity rule을 적용하여 작성한 CCT curve를 그림6에 나타내었다.

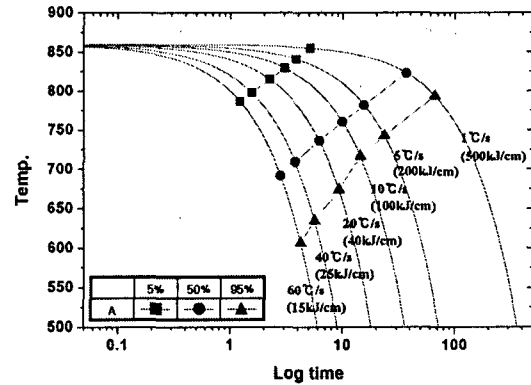


Fig.6 Calculated CCT curve for alloy A at AGS1.

4. 결 론

본 연구에서는 용접열영향부의 재질 예측 모델 개발의 일부로서 페라이트 변태 거동 예측 모델을 작성하였다. 등온 변태 실험을 통해 얻어진 데이터와 초기 오스테나이트 결정립 크기의 효과를 포함하는 Avrami 방정식을 이용하여 페라이트 등온 변태 거동 예측 모델을 작성하였고, 이에 Additivity rule을 적용하여 페라이트의 연속 변태 거동 예측 모델을 작성하였다.

후 기

본 연구는 포스코로부터 재정적인 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Umemoto, K. Horiuch and I. Tamura : Trans. ISIJ, 22(1982), 855
2. M. Umemoto, N. Komatsubara and I. Tamura : J. heat Treating, 1(1980), 57
3. A. Matsuzaki and H. K. D. H. Bhadeshia : Mater. Sci. Technol., 15(1999), 519
4. Chanwoo Lee, Sangho Uhm, Kyungmin Kim, Kyungjong Lee and Changhee Lee : ISIJ Int., 41(2001), 1383
5. E. Scheil : Arch. Eisenhuettenwes, 8(1935), 565