

## 용접 열영향부 미세조직 및 재질예측 모델링: II. Fe-C-Mn 강에서 페라이트 결정립크기의 영향을 고려한 Austenitization kinetics 및 오스테나이트 결정립크기 예측모델

유종근\* · 문준오\* · 이창희\* · 엄상호\*\* · 이종봉\*\* · 장웅성\*\*\*

\*한양대학교 신소재공학과

\*\*포스코 기술연구소 접합연구 그룹

\*\*\*포항산업과학연구원 용접센터

### Prediction Model for the Microstructure and Properties in Weld Heat Affected Zone: II. Prediction Model for the Austenitization Kinetics and Austenite Grain Size Considering the Effect of Ferrite Grain Size in Fe-C-Mn Steel

Jong-Geun Ryu\*, Joon-Oh Moon\*, Chang-Hee Lee\*, Sang-Ho Uhm\*\*, Jong-Bong Lee\*\*  
and Woong-Sung Chang\*\*\*

\*Div. of Mater. Sci. and Eng., Hanyang Univ., 17 Haengdang-dong, Seongdong-ku, Seoul 133-791, Korea

\*\*POSCO Technical Research Lab, 1, Geodong-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk, 790-785, Korea

\*\*\*RIST WRC, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk, 790-785, Korea

#### Abstract

Considering ferrite grain size in the base metal, the prediction model for  $A_{c3}$  temperature and prior austenite grain size at just above  $A_{c3}$  temperature was proposed. In order to predict  $A_{c3}$  temperature, the Avrami equation was modified with the variation of ferrite grain size, and its kinetic parameters were measured from non-isothermal data during continuous heating. From calculation using a proposed model,  $A_{c3}$  temperatures increased with increasing ferrite grain size and heating rate. Meanwhile, by converting the phase transformation kinetic model that predicts the ferrite grain size from austenite grain size during cooling, a prediction model for prior austenite grain size at just above the  $A_{c3}$  temperature during heating was developed.

\* Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received September 29, 2005)

Key Words : Austenitization kinetics, Avrami equation, Phase transformation, Modelling

#### 1. 서 론

사용 목적에 맞는 재질을 갖도록 제조된 강재는 용접 공정을 거치는 중 극심한 열 사이클을 받게 되며, 이 과정에서 초기 강재가 갖는 성질이 변하게 된다. 특히 용접 도중 발생하게 되는 열영향부는 결정립 조대화 및 저온 취성상의 발생으로 인해 기계적 성질이 취약하며,

이는 용접 후 구조물의 안정성을 떨어뜨리는 주요 인자로 인식되고 있다. 이러한 이유로 용접 열영향부의 미세조직 및 재질예측을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>1,2)</sup>.

이러한 필요성에 대한 인식 하에 본 연구에서는 지난 논문<sup>3)</sup>에서 언급한 바와 같이 용접 가열도중 발생하는 상변태 거동에 대한 연구 결과를 제시할 것이며, 이를 이용하여 Austenitization kinetic 모델 및 오스테나이트 결정립크기 예측모델을 제시하고자 하였다.

용접 시 가열과정에서 발생하는 오스테나이트로의 상변태는  $A_{c3}$  온도 직상에서의 오스테나이트 결정립의 크기(Austenite Grain Size: AGS)에 영향을 미치며, 이는 상온으로의 냉각 시 미세조직 변화의 원인이 될 수 있다. 단, 오스테나이트 결정립 성장이 대부분 1000°C 이상의 고온에서 발생하기 때문에 최고 온도가 1300~1400°C에 이르는 CGHAZ(Coarse Grained Heat Affected Zone)에서는 충분한 결정립 성장으로 인해  $A_{c3}$  직상의 오스테나이트 결정립크기의 영향은 무시할 수 있지만<sup>4)</sup>, 결정립 성장이 크게 일어나지 않는 FGHAZ(Fine Grained Heat Affected Zone)에서는 초기 오스테나이트 결정립크기는 냉각 후 미세 조직에 영향을 미치게 된다. 그러나 기존의 연구는 결정립의 조대화 현상에 의해 기계적 성질의 주된 변화 원인이 되는 CGHAZ에 대한 연구에 집중되어 있으며, 특히 가열 중 상변태 현상은 냉각 시에 비해 무시되어 왔다. 따라서 용접부의 미세조직 및 기계적 성질에 대한 정확한 예측 및 각 HAZ에서의 결정립크기 Mapping을 위해서는 가열 중 발생하는 상변태 거동에 대한 고려가 필요하며, 이러한 이유로 오스테나이트 변태가 완료되는 온도인  $A_{c3}$  온도에 대한 예측모델과 FGHAZ의 미세조직에 영향을 줄 수 있는  $A_{c3}$  온도 직상에서의 오스테나이트 크기에 대해 예측모델을 작성하고자 한다.

이에 본 연구에서는 등온 변태 예측에 보편적으로 사용되는 Avrami equation<sup>5,6)</sup>을 초기 페라이트 결정립 크기를 고려한 식으로 수정하고 가산법칙을 적용하여  $A_{c3}$  온도를 예측하는 Austenitization kinetics 모델을 작성하였으며, 이때 연속 변태 실험 데이터를 이용하여 매개변수  $n$ ,  $k$  값을 구하였다. 또한 냉각 중 결정립크기 예측모델을 가열 과정에 적용하여 초기 페라이트 결정립크기(Ferrite Grain Size: FGS)와 오스테나이트 변태 완료 온도에 의해 결정되는  $A_{c3}$  직상에서의 오스테나이트 결정립크기 예측모델을 작성하였다.

## 2. Avrami equation의 변환

$A_3$ 온도는 가열 중, 페라이트에서 오스테나이트로의 변태가 종료되는 온도이며, 이는 열역학적인 계산으로부터 구할 수 있다. 하지만 용접과 같이 빠른 가열속도를 갖는 공정의 경우,  $A_3$ 는  $A_{c3}$ 로 변하게 되며, 이러한  $A_{c3}$  온도의 예측은 상변태 거동의 해석으로부터 가능하다.

Avrami equation<sup>5,6)</sup>은 냉각 중 등온 상변태 거동의 예측을 위해 보편적으로 사용되며 가열 중의 상변태 거동의 예측을 위해서 제한적으로 이용되어 왔다<sup>7)</sup>. 그러나 가열과정에서 이상영역의 구간이 100~150°C 정도의 온도 차에 불과하기 때문에, 여러 구간으로 나누어

실험하는 것이 힘들다. 이러한 이유로 본 연구에서는 가열과정 중 비등온 Dilatation 데이터를 바로 적용하여 Avrami equation의 매개변수를 구하고자 하였다. 등온 변태 거동은 일반적으로 다음과 같은 Avrami equation에 의해 표현 된다.

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

여기서  $X$ 는 등온에서  $t$  시간 후 변태된 분율,  $k$ 는 가열속도에 무관한 온도의 함수이고,  $n$ 은 핵생성 및 성장 모드, 성장 차수와 관계 있는 반응 상수이다. 본 연구에서는 앞서 언급했듯이 가열 중의 비등온 데이터를 이용하여 상변태 거동을 해석하고자 하였으며, 이에 Eq. (1)을 다음과 같이 변환하였다. 먼저 Eq. (1)을 미분하여 정리하면,

$$dX/dt = nkt^{n-1} \exp(-kt^n) = nkt^{n-1}(1-X) \quad (2)$$

Eq. (1)을  $t$ 의 함수로 정리하고 Eq. (2)에 대입하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

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

이때, Eq. (3)을  $k$ 에 대해 정리하면 최종적으로 다음 식을 얻을 수 있다.

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

여기서, 변태분율  $X$ 와 변태분율 변화율  $dX/dt$ 는 연속가열 중의 실험 데이터로부터 측정이 가능하다. 따라서 만약  $n$  값이 주어진다면  $k$ 값은 연속 가열 중의 실험 값으로부터 계산이 가능하다는 것을 알 수 있다. 한편 일반적인 정의에서  $k$ 값은 핵생성률( $N$ ), 성장률( $G$ )의 곱으로 이뤄진다고 알려져 있으며, Avrami 식의 유도 과정으로부터  $N$ 과  $G$ 를 주어진 온도에서 일정한 온도의 함수로 나타낼 수 있으므로<sup>8-10)</sup>, 본 연구에서는 가열 중 각각의 온도에서 Eq. (4)로부터 계산되는  $k$ 값의 회귀분석을 통해  $k$ 값을 온도의 함수로 표현하고자 하였다.

## 3. $A_{c3}$ 온도 직상에서의 오스테나이트 결정립크기 예측모델

앞서 서론에서 언급한 바와 같이  $A_{c3}$  직상의 초기 오스테나이트 결정립크기는 초기 페라이트 결정립크기나 가열속도에 의해 변화하며, CGHAZ에 비해 상대적으

로 낮은 peak온도로 인해 결정립 성장이 크게 발생하지 않는 FGHAZ에서의 미세조직 및 기계적 성질에 밀접한 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 가열도중 초기 페라이트 결정립크기 및 가열속도의 변화에 따른  $A_{c3}$ 온도의 예측과 더불어  $A_{c3}$  직상에서의 오스테나이트 결정립크기를 예측할 수 있는 모델을 작성하고자 한다. 냉각 중의 상변태 거동에 대해서 M. Suehiro<sup>11)</sup>는 오스테나이트 결정립크기 및 냉각속도의 변화에 따른 변태 온도의 변화와 단위 부피당 페라이트 결정립의 수 및 페라이트 결정립크기의 변화를 표현하였다.

M. Suehiro는 논문에서 단위 부피당 페라이트 결정립의 수와 냉각속도에 의해 변화하는 변태온도의 관계를 Fig. 1과 같이 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 초기 오스테나이트 결정립크기가 같을 때 냉각속도가 증가함에 따라 과냉도도 증가하여 변태 온도가 감소하지만 핵생성 증가로 단위 부피당 페라이트 결정립의 수가 선형적으로 증가하고 있다. 또한 초기 오스테나이트 결정립크기가 커짐에 따라 오스테나이트 결정립계의 면적 감소로 핵생성 위치 밀도도 감소하게 되어 같은 오스테나이트 결정립크기 조건에서 선형적 관계를 보이던 경향들이 부피당 페라이트 결정립의 수가 감소하는 방향으로 이동함을 볼 수 있다. 이러한 관계에서 M. Suehiro는 냉각 중 페라이트 결정립크기에 대한 오스테나이트 결정립크기와 변태온도의 관계를 표현한 다음식을 제시하였다.

$$D_a = \left( \frac{6X_a}{A\pi} \times D_y^{-c} \times \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \right)^{1/3} \quad (5)$$

여기서 T는 변태온도,  $D_a$ 는 페라이트 결정립크기,  $D_y$ 는 오스테나이트 결정립크기,  $X_a$ 는 주어진 온도에서의 페라이트 변태분율, B는 페라이트 핵생성을 위한

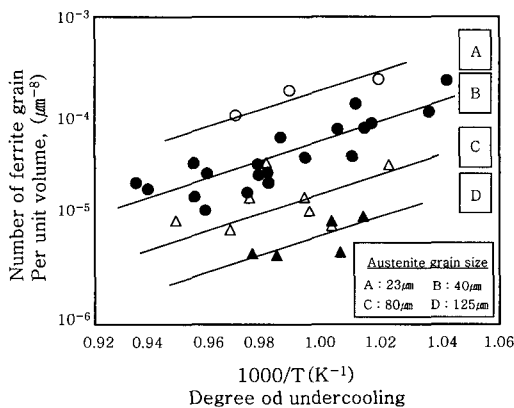


Fig. 1 Relation between number of ferrite grain per unit volume and transformation temperature during cooling<sup>11)</sup>

activation energy, A는 실험적으로 구해지는 비례상수값이다.

M. Suehiro의 연구 결과로부터 가열 중 오스테나이트 결정립크기를 예측하기 위해 먼저 가열 중 오스테나이트 결정립의 크기에 대한 페라이트 결정립크기와 변태온도의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

냉각의 경우 냉각속도가 증가하면 과냉도 증가로 변태온도가 감소하게 되고 핵생성 증가로 결정립의 크기가 작아져서 단위 부피당 결정립 수가 증가하게 되지만, 가열의 경우 가열속도 증가로 Superheating이 증가하여 변태온도도 증가하게 되고 핵생성 증가로 결정립의 크기가 작아져서 단위 부피당 결정립 수는 증가하게 된다. 이를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N_y \propto \exp\left(-\frac{B^*}{T}\right) \quad (6)$$

여기서  $N_y$ 는 단위 부피당 오스테나이트 결정립의 수,  $B^*$ 는 오스테나이트 핵생성을 위한 activation energy, T는 변태 온도를 나타낸다.

또한 냉각의 경우 초기 오스테나이트 결정립크기가 증가하게 되면 페라이트 변태가 일어나는 핵생성 위치 밀도 감소로 단위 부피당 페라이트 결정립 수는 감소하게 된다. 가열의 경우도 냉각의 경우와 마찬가지로 초기 페라이트 결정립크기가 증가하면 오스테나이트 변태를 위한 결정립계의 면적이 감소하여 더 적은 핵이 생성되며, 오스테나이트 결정립이 커지게 되어 단위 부피당 오스테나이트 결정립 수는 감소하게 된다. 이를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N_y \propto D_a^c \quad (7)$$

여기서  $D_a$ 는 초기 페라이트 결정립크기, c는 초기 페라이트 결정립크기의 영향을 나타내는 지수이다

Eq. (6)과 Eq. (7)의 관계를 이용하여 한 개의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N_y = A \times D_a^c \cdot \exp\left(-\frac{B^*}{T}\right) \quad (8)$$

한편, 변태의 초기에 모든 핵생성이 일어나는 Site saturation을 가정하였을 때 결정립이 일정한 속도로 성장을 한다면 결정립은 구형으로 성장할 것이고 이 때

단위부피당 오스테나이트 결정립의 수는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$N_v = \left( \frac{V_v}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_v}{2}\right)^3} \right) \frac{1}{V_{tot}} \tag{9}$$

여기서  $N_v$ 는 단위부피당 오스테나이트 결정립의 수,  $D_v$ 는 오스테나이트 결정립의 크기 그리고 분모부분은 구형으로 성장한 개별 오스테나이트 결정립의 부피를 나타내며,  $V_v$ 는 변태된 오스테나이트의 전체부피,  $V_{tot}$ 은 전체부피이다. 즉 변태된 오스테나이트 결정립의 전체부피  $V_v$ 에서 개별 오스테나이트 결정립의 부피를 나누면 오스테나이트 결정립의 개수가 얻어지고 이 것을 전체 부피로 나누면 단위 부피당 오스테나이트 결정립의 수가 얻어지는 것을 식은 표현하고 있다. 최종적으로 Eq. (8)과 Eq. (9)의 관계에서부터 오스테나이트 결정립크기를 도출하는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$D_v = \left( \frac{6X_v}{A\pi} \times D_a^{-c} \times \exp\left(\frac{B^*}{T}\right) \right)^{1/3} \tag{10}$$

여기서  $X_v$ 는 주어진 변태온도의 오스테나이트 변태 분율로  $V_v/V_{tot}$ 로부터 얻어지며 실험적으로 얻을 수 있는 값이다. 식의 각 상수들은 실험 데이터의 분석을 통하여 얻을 수 있으며, 최종적으로 도출된 식을 이용하여  $A_{c3}$  온도에서의 오스테나이트 결정립크기의 예측이 가능하다.

#### 4. 실험 방법

Table 1은 실험에 사용한 강재의 화학 조성을 보여 주고 있다. 가열 중 Austenitization kinetics에 대한 페라이트 결정립크기의 영향을 보기 위해 Table 2에

Table 1 Chemical composition of test specimen

C	Si	Mn	S	P
0.14 wt%	0.25 wt%	1.4 wt%	0.001 wt%	0.002 wt%

Table 2 FGS and heat treatment condition

Specimen	Heat condition	FGS ( $\mu\text{m}$ )
FGS 1	Base metal	16
FGS 2	Hold at 1300°C for 18min in dilatometer	48
FGS 3	Hold at 1300°C for 2hours in vacuum furnace	110

나타낸 바와 같이 열사이클의 변화를 통해 서로 다른 페라이트 결정립크기를 갖는 세 종류의 시편을 얻었다. 열처리 시, 특히 펄라이트나 다른 상들의 영향을 최소화하기 위해 최대한 느린 속도로 냉각하였다. 열처리한 시편은 3% Nital 용액 (Nitric acid (3ml) + Ethanol (100ml))을 이용하여 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 그 후 결정립크기의 측정을 위해서 광학현미경 조직사진을 이미지분석기를 이용하여 측정하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.

$A_{c3}$ 온도와  $A_{c3}$  직상에서의 오스테나이트 결정립크기에 대한 가열속도 및 페라이트 결정립크기의 영향을 보기 위해 페라이트 결정립크기를 달리한 각각의 시편들을 Dilatometer를 이용하여 10, 50, 100 °C/sec의 속도로 각각 가열하였다. 얻어진 Dilatation 자료를 Fig. 2에 개략적으로 설명된 방법을 통해 변태 분율로 계산하였으며 그 방법은 다음과 같다. 그림에서  $L_v$ 는 실험으로부터 얻어진 Dilatation 곡선,  $L_i$ 는 페라이트에서 오스테나이트로의 변태 없이 페라이트만이 계속 존재할 때의 직선,  $L_f$ 는 페라이트로의 변태 없이 오스테나이트만이 계속 존재할 때 직선이다. 이 때  $T^*$ 라는 온도에서의 변태 분율은 Lever rule과 동일한 다음 관계식으로 표현할 수 있다.

$$X = \frac{L_i - L_v}{L_i - L_f} \tag{11}$$

Eq. (11)을 이상영역 온도범위에 대해 확장 적용하여 분율을 계산하였으며, 이때 변태가 시작되는 온도  $A_{c1}$ 은 변태 분율  $X$ 가 0.05인 되는 지점, 변태가 종료되는 온도  $A_{c3}$ 는 변태 분율  $X$ 가 0.95되는 지점으로 결정하였다.

오스테나이트 결정립 관찰을 위하여 비등 Picral 용

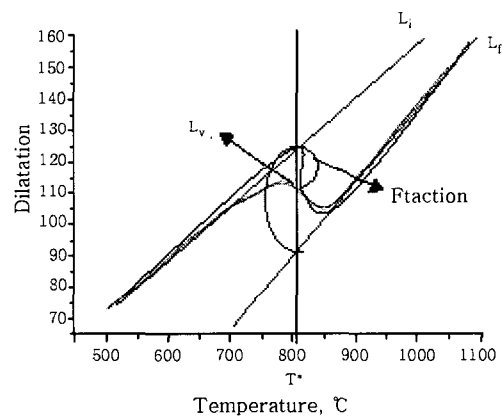


Fig. 2 Method for calculating austenite fraction directly from dilatation data

액(Picric acid (4g) + H<sub>2</sub>O (200ml) + HCl (1.5ml) + Dodecylbenzen (4ml))을 사용하여 에칭하였고, 결정립 크기 측정을 위하여 페라이트의 경우와 마찬가지로 이미지분석기를 이용하였다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 가열 중 상변태에 대한 가열속도 및 FGS의 영향

가열속도와 FGS 변화에 의한 변태 분율의 영향을 살펴보면 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 같은 페라이트 결정립 크기 조건에서 가열속도를 변화시켰을 때 변태가 높은 온도방향으로 지연되는 것을 보여주고 있다. 이것은 연속 가열과정을 등온의 합으로 보는 가산법칙<sup>12)</sup>의 측면에서 볼 때 가열속도가 빨라질수록 각 온도 구간에서의 등온 유지 시간이 줄어들어 원자확산을 위한 시간이 충분히 주어지지 않기 때문에 변태가 지연되었음을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 가열속도의 영향이 없는 경우 페라이트 결정립 크기에 의한 변태 분율의 변화를 보여

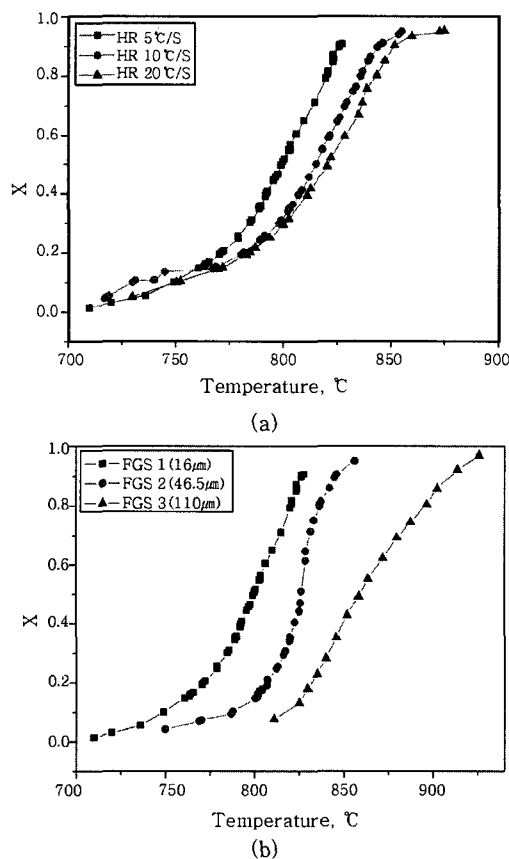


Fig. 3 Variation of the fraction of austenite, (a) Same FGS, different heating rate (b) Same heating rate, different FGS

주고 있으며 페라이트 결정립 크기가 커짐에 따라 전체적인 변태가 높은 온도 방향으로 지연되는 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 결정립 크기가 커짐에 따라 결정립계 면적이 감소하며 이에 따라 핵생성 위치밀도가 줄어들어 변태가 지연되기 때문이다<sup>13)</sup>.

#### 5.2 Austenitization kinetic 모델

##### 5.2.1 Kinetic parameter (n)의 결정

일반적으로 Avrami equation의 Kinetic parameter 인 n과 k값은 등은 변태 실험으로부터 얻을 수 있는 변태분율에 대한 실험 데이터의 회귀분석으로부터 얻을 수 있다. 하지만 본 연구에서는 앞서 설명했듯이 가열 과정에서의 제한성으로 인해 비등온 열처리를 수행하였으며, 따라서 기존의 방법과는 다른 방법으로 n값을 측정하였다. 즉, 본 연구에서는 기존의 문헌의 결과로부터 야금학적 의미를 갖는 n값의 범위를 선택한 후, 이를 Eq. (4)에 대입함으로써 가열속도의 변화에 관계없이 일정한 k값을 갖도록 하는 n값을 선택하였다. 앞서 2절에서 언급하였듯이 k 값은 핵생성율(N)과 성장을(G)의 곱으로 이뤄지고, N과 G가 각 온도에서 일정한 상수의 값을 갖는 온도의 함수이기 때문에 k 역시 각 온도에서 일정한 값을 갖는 온도의 함수임을 알 수 있다. 따라서, Eq. (4)에 적절한 n값 및 실험데이터 (분율 X와 변태 분율 변화율 dX/dt) 값이 주어지면, 가열속도의 변화에 상관없이 각 온도에서 일정한 k값이 얻어질 것이다.

한편 Umamoto<sup>14)</sup>는 냉각 중, 변태 초기에 site saturation의 핵생성이 일어난 경우, 핵생성 위치에 따라 Avrami 식의 반응상수 n이 1/2(grain boundary surface), 1(grain edge), 3/2(grain corner)의 값을 갖는다는 사실을 이론적으로 증명하였는데, 이러한 결과와 더불어 가열 과정에서 페라이트와 오스테나이트의 변태가 탄소의 Diffusion으로 결정된다는 사실 및 Site saturation이 일어난 경우를 고려하여 n 값에 1/2, 1, 3/2를 각각 대입하여 k 값의 거동을 확인하였다. 이때 k값들이 가열속도와 상관없이 일정한 온도 의존성을 보이면, 그 때의 n값을 적합한 n값으로 결정하였다.

Fig. 4는 n값을 변화시켜 k값들의 거동을 확인하는 과정이다. 여기에서 페라이트 결정립 크기 조건의 영향이 없는 경우에 대한 k값의 거동을 확인하기 위하여 FGS 1 조건만을 이용하여 n값에 의한 k값들의 거동을 확인하였다. 그림에서 850°C이상의 온도에서는 n 값과 관련없이 발산이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 온도 증가에 따라 결정립 성장이 계속 진행되어 서로간

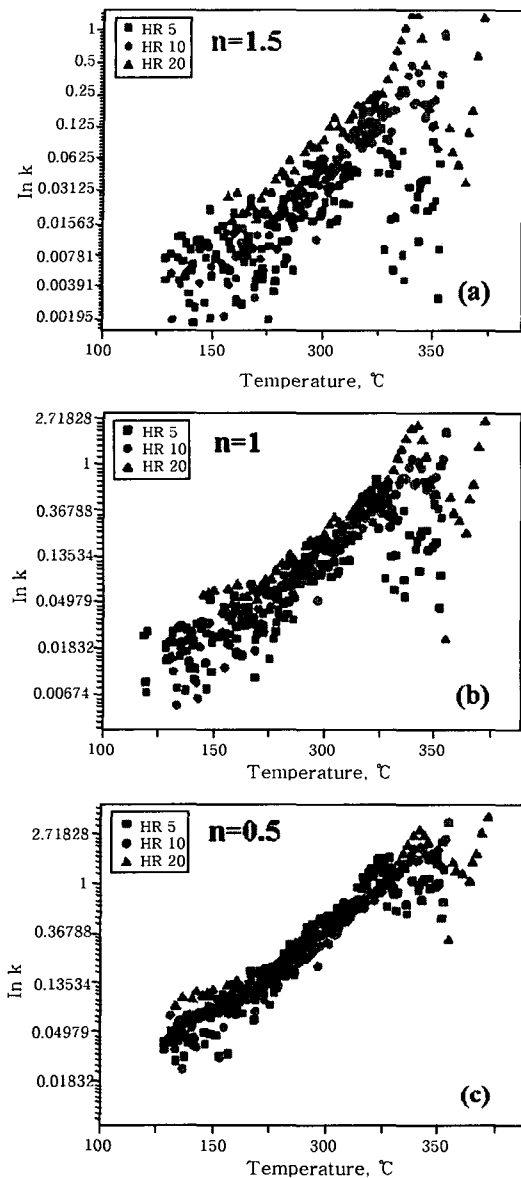


Fig. 4 Distribution of calculated  $\ln k$  against temperature with different values of  $n$  (a)  $n=1.5$ , (b)  $n=1$ , (c)  $n=0.5$  under various heating rate

의 간섭을 일으키는 Impingement 효과 때문이라고 생각되며, 변태율이 92% 이상의 영역이기 때문에 모델에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 간주 하였다.

최종적으로  $n$ 값이 0.5일 때,  $k$ 값은 가열속도에 무관하게 각각의 온도에서 일정한 경향을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 그 때의  $n$ 값, 0.5를 Eq. (4)에 대입하여  $k$ 값을 계산할 수 있었다. 이 때 계산된  $k$  값들은 가열속도에 무관한 온도의 함수의 형태로 표현될 수 있다. 물론 본 연구에서 사용된 강재의 경우, 등은 변태 실험을 통해서  $n$ 값을 측정하면, 다른 값(0.5~1.0)을 가질 수 있으리라 생각된다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 연속 가열 중의 실험 데이터로부터 Avrami

equation의 parameters를 측정하고자 하였으므로 실험 데이터로부터 직접적으로  $n$ 값을 측정할 수 없었으며, 이러한 이유로 위에서 설명한 바와 같이 Fig. 4의 결과로부터  $n$ 값을 0.5로 결정하였다. 이 때, 실제와 다소 차이가 나는  $n$ 값에 의한 실험값과 예측값 사이의 오차는  $n$ 을 0.5로 대입한 후 계산되는  $k$ 값의 회귀 분석을 통해 보정될 수 있다. Umemoto<sup>14)</sup>에 의하면,  $n=0.5$  일 때 변태 초기 Grain surface에서 핵이 생기고 이러한 결정립이 한 방향으로 성장함을 알 수 있다. 본 연구에서  $n$ 값이 0.5로 측정된 결과를 살펴볼 때, 연속 가열 중에 빠른 가열속도로 인해 오스테나이트 핵생성 후 변태 초기에 핵이 인접한 두 개의 페라이트 결정립 중 보다 Orientation mismatch가 큰 결정립의 한 방향으로 성장하며, 변태 종료 시점에 가까워질수록 변태 분율의 증가에 의한 결정립들간의 Impingement에 의해 결정립이 성장할 수 있는 방향이 잔류해 있는 페라이트 결정립 내부의 한 방향으로 제한되기 때문으로 판단된다.

### 5.2.2 초기 페라이트 결정립크기의 영향 및 Kinetic parameter ( $k$ )의 도출

이 절에서는 기존 Avrami식에 초기 페라이트 결정립크기의 영향을 포함하여  $A_{c3}$  온도 예측을 위한 Austenitization kinetic 모델을 작성하고자 하였으며, 우선 앞 절에서 결정한  $n$ 값 (0.5)을 Eq. 4에 대입하고 일정한 가열속도 조건에서 페라이트 결정립크기 변화에 의한  $k$  값의 거동을 비교하여 식으로 표현하고자 하였다. Fig. 5에 보이는 것처럼 가열속도가 같은 경우 페라이트 결정립크기가 증가하면 변태 시작이 지연되는 경향을 보였는데 이것은  $k$  값이 Eq. (4)에서 보는 바와 같이 변태분율과 변태분율 변화율에 의해 결정되는 상태 함수이기 때문이며, 페라이트 결정립크기 변화에 의한 변태 분율 변화와 같은 경향을 보인다. 또한 같은 온도조건에 대해 다른  $k$ 값을 보이는 것은 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯이 페라이트 결정립의 크기가 커질수록 변태의 시작이 지연되고 이로 인해 동일한 온도에 도달하기 전까지 변태된 분율이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.  $k$ 함수의 형태는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 온도와  $k$ 값이 페라이트 결정립크기 조건에 상관없이 일정한 곡선 형태를 가진다는 점과  $k$ 의 함수를 구성하고 있는 핵생성과 성장이 일반적으로 Arrhenius 식의 형태로 표현된다는 점에서 다음과 같이  $k$ 값에 대한 온도의 영향을 Arrhenius 형태의 식으로 표현하였다.

$$f(T) = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{T}\right) \tag{12}$$

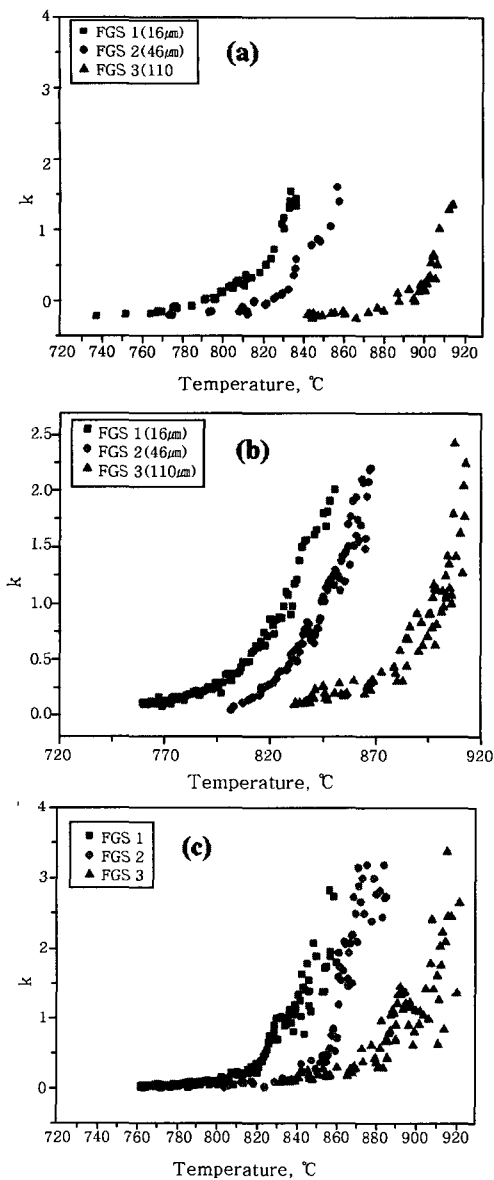


Fig. 5 Behavior of  $k$  against temperature under same heating rate with different FGS (a) Heating rate 5°C/sec (b) Heating rate 10°C/sec (c) Heating rate 20°C/sec.

여기에서  $f(T)$  는  $k$ 의 함수 중 온도의 영향을 표현한 함수이며, 이후 포함될 페라이트 결정립크기의 영향은 제외된 함수이다. a, b는 선형회귀분석으로 구할 수 있는 상수들이다.

한편, Cahn<sup>15,16)</sup>, Umemoto<sup>17,18,19)</sup> et al. 는 불균일 핵생성에 의한 변태 속도식을 이론적으로 전개하여 결정립크기의 영향을 포함하여 Avrami식을 다음과 같이 표현하였다.

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{K}{D^m} \cdot t^n\right) \quad (13)$$

이 식에서  $D$ 값은 결정립크기며,  $m$ 값은 결정립크기의 영향 지수로써 변태기구와 핵생성 장소에 의해 결정되는 상수이다<sup>16)</sup>.  $k$ 값에 결정립크기 효과를 포함하기 위해서 본 연구에서는  $k$ 를 온도 영향에 의한 함수  $f(T)$  와 결정립크기의 영향에 의한 함수  $D_\alpha^m$ 을 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$k(T, D_\alpha) = \frac{f(T)}{D_\alpha^m} \quad (14)$$

$$f(T) = D_\alpha^m \cdot k(T, D_\alpha) \quad (15)$$

결정립크기의 영향 함수와 온도의 영향 함수를 모두 포함한 Eq. (14)의  $k(T, D_\alpha)$ 와 달리, Eq. (15)의  $f(T)$ 는 Eq. (12)에서 표현한 바와 같이 페라이트 결정

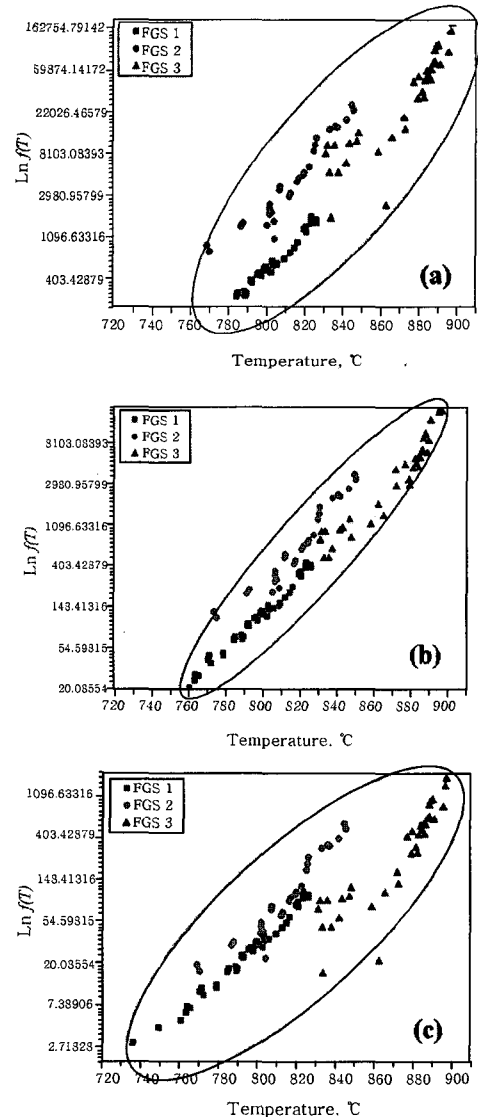


Fig. 6 Convergence of  $f(T)$  with different  $m$  values (a)  $m = 2.5$ , (b)  $m = 2$ , (c)  $m = 1.5$

립크기 효과( $D_a^m$ )가 제외된 온도만의 함수로 k값들의 형태를 나타내며 Fig. 5에서 보인 바와 같은 페라이트 결정립크기에 의한 곡선의 이동은 제외되기 때문에 f(T)의 값들은 페라이트 결정립크기에 무관하게 수렴하는 경향을 보일 것이다. 이러한 가정으로부터 역으로 미지의 상수인 m값에 의해 변화하는 f(T)의 값들의 수렴 여부를 Fig. 6과 같이 확인하였다. 이 때 선택한 m 값은 Christian<sup>16)</sup>의 연구 결과 중 변태가 확산에 지배되는 경우의 m 값 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2를 각각 대입하여 확인하였으며, 이러한 Fig. 6의 결과로부터 가장 잘 수렴하는 m값을 2로 결정하였다. 이 때의 m값 2는 Christian<sup>16)</sup>의 연구에 의하면 작은 영역에서 핵생성이 줄어들면서 성장하는 경우에 해당된다. 계산된 m값을 Eq. (15)에 대입하여 계산된 f(T)의 값들을 Fig. 7과 같이 온도의 역수에 대해 표현한 후 회귀분석하였고 이를 통해 Eq. (16)와 같이 온도만의 함수로 표현된 다음 식을 얻을 수 있었다.

$$f(T) = 7.7 \times 10^{23} \times \exp\left(-\frac{53414}{T}\right) \quad (16)$$

앞서 계산된 결정립크기에 대한 함수를 포함하여 k 값에 대해 표현하면 다음과 같이 k에 대한 식을 얻을 수 있으며,

$$k = \frac{7.7 \times 10^{23}}{D_a^2} \times \exp\left(-\frac{53414}{T}\right) \quad (17)$$

이를 Avrami 식에 적용하여 표현하면 다음과 같다.

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{7.7 \times 10^{23}}{D_a^2} \times \exp\left(-\frac{53414}{T}\right) \times t^{0.5}\right) \quad (18)$$

Eq. (18)은 이후 오스테나이트 결정립크기 예측모델에 사용되는  $A_{c3}$ 온도를 예측 하는데 사용하며, 이 때

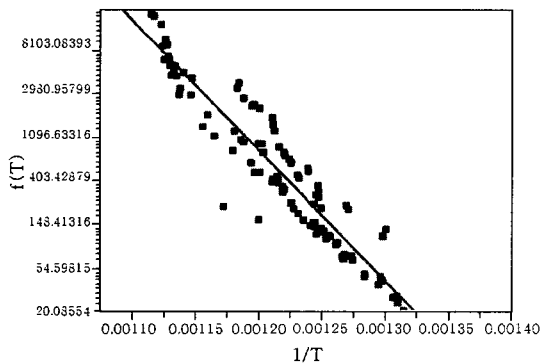


Fig. 7 Function of temperature f(T)

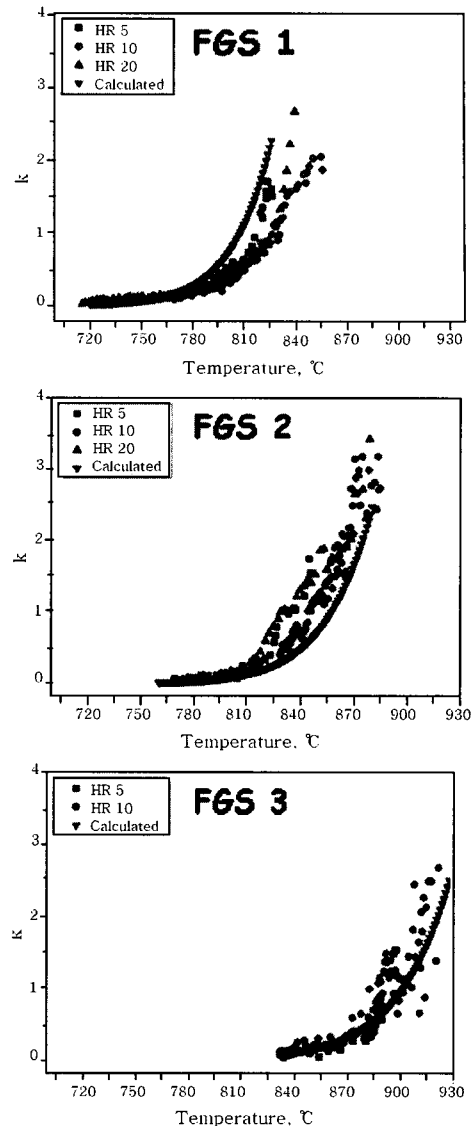


Fig. 8 Comparison of calculated k with measured data

가산법칙을 적용하여 각각의 온도 구간에서 구해진 변태 분율들의 합이 1이 되는 순간을  $A_{c3}$  온도로 결정할 것이다.

먼저 Eq. (17)의 k함수에 대한 신뢰도 확인을 위해 페라이트 결정립 조건과 가열속도 조건을 달리한 실험 결과와 식으로부터 계산된 k값을 연속적인 온도에 대해 비교하여 Fig. 8에 나타내었고, Eq. (18)로 표현된 austenitization kinetic 모델(Eq. (18))의  $A_{c3}$ 온도 예측에 대한 신뢰도 확인을 위해 식으로부터 계산된  $A_{c3}$ 온도를 실제 실험에서 얻어진 각 경우의  $A_{c3}$  온도와 비교하여 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 직선은 실험 값과 계산 값의 일대일 대응을 나타내며, 데이터들이 선에 가까울수록 신뢰도가 높은 것을 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9를 통해 작성된 모델의 신뢰도를 확인할 수 있었다.



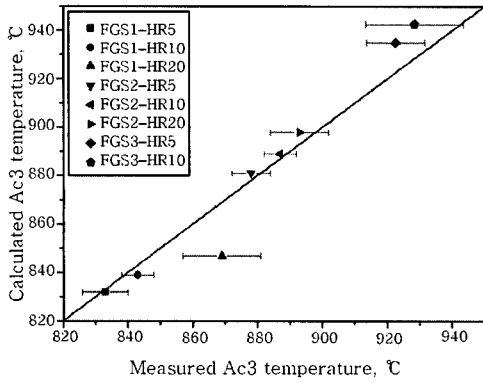


Fig. 9 Reliability of proposed model for Ac3 temperature prediction

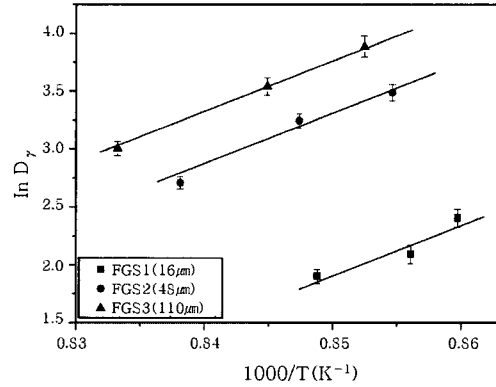


Fig. 10 The relationship between austenite grain size, transformation temperature and ferrite grain size during continuous heating

### 5.3 AGS예측모델의 작성

이 절에서는 앞 절의 Ac<sub>3</sub> 온도 예측모델에 이어, 가열 중 Ac<sub>3</sub> 온도 직상 오스테나이트 결정립크기 예측모델 작성을 위해 앞서 설명한 Eq. (10)의 변수를 실험적으로 구하였다.

$$D_\gamma = \left( \frac{6X_\gamma}{A\pi} \times D_\alpha^{-c} \times \exp\left(\frac{B^*}{T}\right) \right)^{1/3} \quad (10)$$

위 식은 오스테나이트 결정립크기(D<sub>γ</sub>)에 영향을 주는 두 가지 변수, 페라이트 결정립크기(D<sub>α</sub>)의 함수와 변태 온도(T)의 함수로 이루어져 있다. 각각의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D_\gamma \propto D_\alpha^{-c/3} \quad (19)$$

$$D_\gamma \propto \left( \exp\left(\frac{B^*}{T}\right) \right)^{1/3} \quad (20)$$

Eq. (19)에서 페라이트 결정립크기의 지수가 음수인 것은 Eq. (10)의 유도 과정에서 기인하며, 변수 c의 부호와는 무관하다. 또한 Eq. (19)와 Eq. (20)에 포함되지 않은 부분 중 X<sub>γ</sub>는 주어진 변태온도에서의 오스테나이트 분율이며 Ac<sub>3</sub> 직상의 온도를 다루는 본 실험에서는 1에 해당한다.

Eq. (10)의 변수를 실험적으로 구하기 위해 페라이트 결정립크기를 달리한 시편을 각각 다른 가열속도로 가열하여 오스테나이트 결정립크기와 변태 온도의 관계를 얻었으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다.

페라이트 결정립크기가 증가하면 가열 과정 중 오스테나이트로의 변태가 일어날 때 페라이트 결정립계의 면적 감소로 핵생성 위치밀도가 감소되며, 결과적으로

오스테나이트 결정립크기는 커지게 된다. 이 경향은 같은 페라이트 결정립크기 조건들을 연결한 직선의 평행 이동으로 표현되며, Fig. 10을 통해 페라이트 결정립크기 증가와 함께 초기 오스테나이트 결정립크기가 증가함을 확인할 수 있다. 반면 같은 페라이트 결정립크기 조건에서 가열속도가 증가하면 Superheating이 증가하여 변태온도는 증가하지만 핵생성이 촉진되며 더 많은 결정립의 발생으로 인해 오스테나이트 결정립크기는 감소하는 경향이 나타나게 된다. 이 경향은 각각의 페라이트 결정립크기 조건에 대해 선형적으로 표현할 수 있었으며 각 경우에 대해 일정한 기울기의 경향을 보임을 확인하였다. Eq. (10)의 변수를 구하기에 앞서 Fig. 10을 선형 분석을 하면 다음 형태의 식이 얻어진다.

$$Y = B \cdot X + C \quad (21)$$

Fig. 10에서 X축은 1000/T (K<sup>-1</sup>)로, Y축은 ln D<sub>γ</sub>로 표현되며, Eq. (10)의 재배열하여 1차 함수의 형태로 표현한 후 변수를 구하였다. 먼저 Eq. (10)의 양변에 자연로그를 취하면,

$$\ln D_\gamma = \frac{1}{3} \ln\left(\frac{6}{A\pi}\right) - \frac{c}{3} \cdot \ln D_\alpha + \frac{B}{T} \quad (22)$$

Fig. 10의 함수와 같은 형태로 표현하면,

$$\ln D_\gamma = \frac{B}{T} + \left[ \frac{1}{3} \ln\left(\frac{6}{A\pi}\right) - c \cdot \ln D_\alpha \right] \quad (23)$$

즉 Y축이 ln D<sub>γ</sub>, X축이 1/T, 기울기 B, Y절편이  $\left[ \frac{1}{3} \ln\left(\frac{6}{A\pi}\right) - \frac{c}{3} \cdot \ln D_\alpha \right]$ 인 함수의 형태로 정리할 수 있으며, 위 식과 Fig. 10의 선형 분석 결과를 비교하고 최

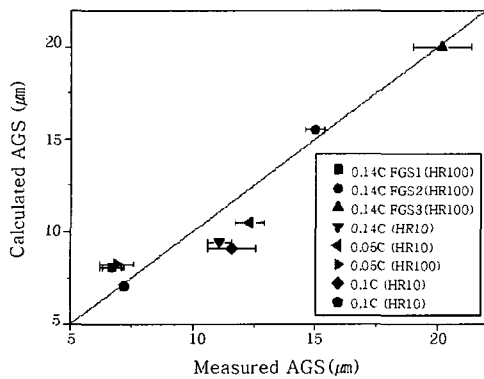


Fig. 11 Reliability of proposed model for austenite grain size prediction

종적으로 변수를 구하여 다음과 같은 식을 완성하였다.

$$D_{\gamma} = \left( 7.96 \times 10^{-16} \times D_{\alpha}^{1.9} \times \exp\left(\frac{42520}{T}\right) \right)^{1/3} \quad (24)$$

최종적으로 완성된  $A_{c3}$  직상 오스테나이트 결정립 크기 예측모델의 적용을 위해, 먼저 Austenitization kinetic 모델(Eq. (18))에서 계산된  $A_{c3}$  온도를 Eq. (24)에 대입하고 이로부터 계산된 각 경우에 대한 실험 결과와 비교하여 신뢰도를 확인하였으며 Fig. 11의 결과를 통해 그 신뢰성을 확인할 수 있다.

### 6. $A_{c3}$ 온도 및 $A_{c3}$ 직상 오스테나이트 결정립 크기 예측

앞서 Austenitization kinetic 모델(Eq. (18))과  $A_{c3}$  직상에서의 오스테나이트 결정립 크기 예측모델(Eq. (24))을 작성하였고, 그 신뢰성을 확인하였다. 따라서 이 절에서는 임의의 초기 페라이트 조건이나 가열 속도 조건에 대해 식으로 예측한 결과를 연속적으로 표현하였으며, 그 경향을 비교하였다. Fig. 12는 초기 페라이트

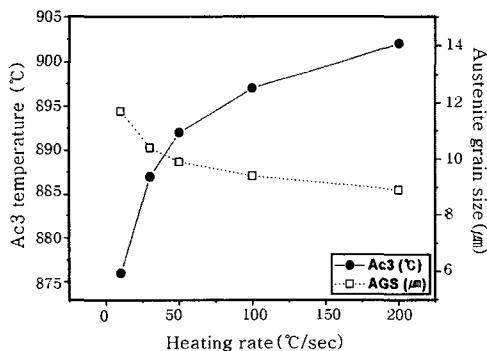


Fig. 12 Predicted austenite grain size and  $A_{c3}$  temperature under various heating rate by austenite grain size prediction model

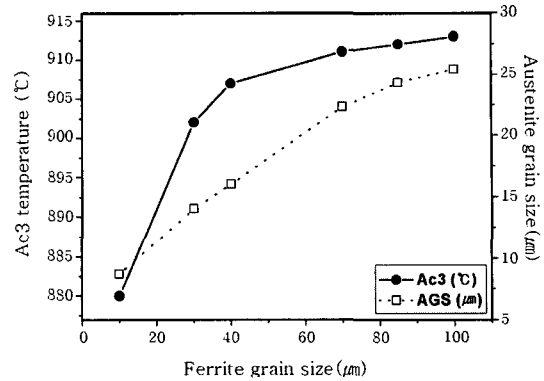


Fig. 13 Predicted austenite grain size and  $A_{c3}$  temperature under various ferrite grain size by austenite grain size prediction model

트 결정립 크기가 FGS1 조건 (FGS: 16 μm) 으로 일정할 때 가열 속도 변화에 따른  $A_{c3}$  온도와  $A_{c3}$  직상의 오스테나이트 결정립 크기를 예측한 결과이다. 예측 결과를 통해 가열 속도가 증가하면  $A_{c3}$  온도가 증가하고 오스테나이트 결정립 크기는 감소하는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 Superheating의 증가 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 13은 가열 속도가 10°C/sec로 일정할 때 초기 페라이트 결정립 크기의 증가에 의한  $A_{c3}$  온도와 오스테나이트 결정립 크기를 예측한 결과이다. 예측 결과를 통해 페라이트 결정립 크기의 증가와 함께  $A_{c3}$  온도와 오스테나이트 결정립 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 페라이트 결정립 크기 증가와 함께 페라이트 결정립계 감소로 핵생성 위치 밀도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

### 7. 결 론

저탄소강의 용접 후, FGHAZ의 기계적 성질에 영향을 줄 수 있는  $A_{c3}$  온도와  $A_{c3}$  직상 오스테나이트 결정립 크기를 예측하기 위한 모델을 작성하였고, 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

1) 가열 속도가 빨라짐에 따라 변태가 높은 온도 방향으로 지연되는 경향을 확인할 수 있었으며, 이는 가열 속도가 높아짐에 따라 각 온도의 등온 유지 시간이 감소하기 때문이다. 또한 페라이트 결정립 크기가 커질수록 변태 시작과 종료 지연되는 경향을 보였으며, 이는 핵생성 위치 밀도 감소의 영향이다.

2) 연속 가열 중의 변태 거동 및 실험 데이터로부터 Avrami 식의 매개 변수  $n$ ,  $k$  값을 측정하였다. 이때  $n$  값은 0.5로 결정하였으며, 이는 연속 가열 중의 빠른

가열속도 및 변태분율에 의한 Impingement에 의한 영향으로 판단된다. 한편 페라이트 결정립크기의 영향을  $k$  값에 포함하여 Austenitization kinetic 모델을 완성하였으며, 작성된 모델의 계산 결과는 실험결과와 유사한 값을 나타내었다.

3) 초기 페라이트 결정립크기 및  $A_{c3}$ 온도의 영향을 포함하는 오스테나이트 결정립크기 예측모델을 작성하였으며, 모델을 통한 계산결과와 실험결과를 비교함으로써 모델의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점 기술개발사업의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. F. Fernandes, S. Denis and A. Simon: Mem. Etud. Sci. Rev. Metall., 83 (1986), 355
2. J. B. Leblond and J. Devaux: Acta Metall., 32 (1984), 137
3. Joonoh Moon, Changhee Lee: Journal of KWS, 23-4 (2005), 17(in Korean)
4. Sangho Uhm, Joonoh Moon, Changhee Lee et al.: Prediction Model for the Austenite Grain Size in the Coarse Grained Heat Affected Zone of Fe C Mn Steels: Considering the Effect of Initial Grain Size on Isothermal Growth Behavior., ISIJ international, 44 (2004), 1230
5. W. A. Johnson and R. F. Mehl: Trans. AIME, 125 (1939), 416
6. M. Avrami: J. Chem. Phys., 7(1939), 1103
7. S. Denis, D. Farias and A. Simon: Mathematical model coupling phase transformations and temperature Evolutions in Steels
8. K. Easterling: Introduction to the Physical Metallurgy of welding, Butterworths, London, 1983, 104- 55
9. C.R. Brook: Principles of the Austenization of Steels, Elsevier Applied Science, 1992, 145-9
10. D.A. Porter and K.E. Easterling: Phase Transformations in Metals and Alloys, Chapman & Hall, 1992, 2nd ed., 287- 90.
11. M. Suehiro, K. Sato, Y. Tsukano: Computer Modeling of Microstructural change and Strength of Low Carbon Steel in 4. Hot Strip Rolling, Transactions ISIJ, 27, (1987)
12. E. Scheil: Arch. Eisenhuettenwes, 8 (1935), 565
13. M. Umemoto et al.: Effect of cooling rate on grain size of ferrite in a carbon steel, The Institute of Metals. 3 (1087), 249-255
14. M. Umemoto: Control and Prediction of Structure and Property, ISIJ, Tokyo, Japan, (1988), 105
15. J. W. Cahn: Acta Metall., 4 (1956), 449
16. J. W. Christian: The Theory of Transformations in Metals and Alloys, Pergamon, (1983)
17. M. Umemoto: Control and Prediction of Structure and Property, ISIJ, Tokyo, Japan, (1988), 105
18. M. Umemoto, K. Horiuchi and I. Tamura: Trans. ISIJ, 22(1982), 855
19. M. Umemoto, N. Komatsubara and I. Tamura: J. Heat Treating, 1 (1980), 57