

용접 열영향부 미세조직 및 재질 예측 모델링:
 IV. Ti-첨가 저합금강에서의 임계 석출물 크기의 영향을 고려한
 용접 열영향부 석출물 조대화 예측 모델

문준오* · 김상훈* · 정홍철** · 이종봉** · 이창희*

*한양대학교 신소재공학과

**포스코 기술연구소 접합연구 그룹

**Prediction Model for the Microstructure and Properties in Weld Heat Affected Zone
 : IV. Critical Particle Size for the Particle Coarsening Kinetics in Weld HAZ of Ti
 Added Low Alloyed Steel**

Joonoh Moon*, Sanghoon Kim*, Hongchul Jeong**, Jongbong Lee** and Changhee Lee*

*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

Abstract

A kinetic model for the particle coarsening behavior was developed. The proposed model considered the critical particle size which can be derived from Gibbs-Thomson equation unlike the conventional approach. In this study, the proposed particle coarsening model was applied to study the coarsening behavior of titanium nitride (TiN particle) in microalloyed steel weld HAZ. Particle size distributions and mean particle size by the proposed model were in agreement with the experimental results. Meanwhile, using additivity rule, the isothermal model was extended to predict particle coarsening behavior during continuous thermal cycle.

*Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received January 29, 2007)

Key Words : Critical particle size, TiN particle, Gibbs-Thomson equation, Coarsening

1. 서 론

용접 도중 발생하는 오스테나이트 결정립 성장은 용접부의 기계적 성질을 저하시키는 주요한 요인 중에 하나이다. 따라서, 용접 중에 발생하는 오스테나이트 결정립 성장을 억제하고자 하는 많은 시도가 있어 왔다¹⁻³⁾. 많은 연구 결과로부터, Ti, Nb, V 등의 합금원소 첨가에 의해 생성되는 석출물에 의한 결정립 억제효과가 효과적이라고 알려져 왔다⁴⁻⁶⁾. 이러한 석출물에 의한 결정립 성장 억제력은 Eq. (1)과 같이 Zener에 의

해서 최초로 유도되었으며, 석출물의 분율 및 크기에 의해서 좌우된다⁷⁾.

$$F_z = \frac{1}{K_z} \gamma \frac{f}{r} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 f는 석출물 (Particle)의 Volume fraction, K_z 는 Zener coefficient, γ 는 석출물과 모재 (Matrix) 사이의 계면에너지, r은 석출물의 크기를 각각 나타낸다. Eq. (1)에서 알 수 있듯이, 석출물에 의한 결정립 성장 억제력은 석출물의 크기에 반비례한다. 한편, 열

사이클 중에 오스테나이트 뿐만 아니라 석출물의 조대화가 발생하게 되며, 이는 Eq. (1)에 의하면 석출물의 결정립 성장 억제력을 감소시킨다.

이러한 이유로, 열처리 도중의 석출물의 조대화 거동을 예측하고자 하는 많은 연구들이 있어왔다^{5,6,8)}. 다음의 Eq. (2), (3)은 각각 등온에서의 석출물 조대화 및 용해 거동을 수식적으로 표현한 Lifshitz, Slyozov and Wagner equation (LSW equation)과 Whelan equation이다.

$$r^3 - r_0^3 = [8 \cdot \gamma \cdot V_m \cdot D \cdot t \cdot C^s] / [9 \cdot R \cdot T] \quad (2)$$

$$r^2 - r_0^2 = -2 \cdot [(C_r - C_m)Dt] / [C_p - C_r] \quad (3)$$

여기서, r_0 는 초기 석출물의 크기, r 은 t 초 후의 석출물의 크기, γ 는 석출물과 모재 사이의 계면에너지, V_m 은 석출물의 molar volume, D 는 solute atom의 diffusivity, t 는 등온 유지시간, C^s 는 모재에서의 solute concentration, R 은 기체상수, T 는 등온 유지 온도, C_r 은 반경 r 을 갖는 석출물의 solute concentration, C_m 은 mean solute concentration, C_p 는 석출물 내에서의 solute concentration을 각각 의미한다.

대부분의 기존의 모델들은 모재 내에 존재하는 모든 석출물들의 지속적인 성장만을 고려하고 있다. 하지만, 잘 알려진 Gibbs-Thomson 식¹¹⁾에 의하면, 석출물의 조대화는 작은 입자들의 용해반응을 수반하고 있으며, 이에 본 연구에서는 석출물의 조대화 시 성장도 용해도 하지 않는 석출물의 크기를 임계 석출물 크기로 정의하였다¹²⁾.

본 연구에서는, 임계 석출물 크기를 이론적으로 유도했으며, 이를 통해 임계 석출물의 개념을 적용한 등온 석출물 조대화 예측 모델을 제안하였다. 실험 결과와의 비교를 통해 예측 모델의 신뢰성을 확인하였으며, 예측 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다. 한편 가산법칙을 이용하여 연속 열사이클 중의 석출물 거동을 예측하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다.

2. 임계 석출물 크기의 정의 및 유도

석출물의 조대화 및 용해 반응에 대한 기존의 이론들은 석출물의 조대화와 용해 반응을 구별하여 취급하고 있으며, 개개 석출물의 거동이 아니라 평균적인 석출물의 거동을 취급하고 있다. 하지만 잘 알려진 Gibbs-Thomson equation (Oswald ripening)에 의하면¹¹⁾, 석출물의 조대화 반응은 상대적으로 작은 입자의 용해 반응을 수반하고 있으며, 이 때문에 평균적인 입자의

일방적인 성장만이 아니라 개개 입자의 성장 및 용해를 동시에 고려해야 한다고 생각한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 기존의 석출물 조대화 모델과 달리 석출물의 조대화 반응에 있어서 작은 입자의 용해를 동시에 고려하기 위해, Gibbs-Thomson equation으로부터 임계석출물크기 (Critical particle size)를 수식적으로 유도했으며, 이를 석출물의 등온 조대화 모델에 적용하였다.

모재 내에 존재하는 석출물은 다양한 크기를 갖는다. 이 때, 각각의 석출물과 matrix와의 계면의 Solute atom의 농도는 그 크기에 따라서 결정되며, 그것은 다음과 같은 Gibbs-Thomson equation에 의해서 구해진다¹¹⁾.

$$C_r = C_\infty \exp\left(\frac{2\gamma W_m}{RTr}\right) \quad (4)$$

여기서, C_∞ 은 planar한 계면을 갖는 석출물과 모재와의 평형 solute 농도이다. 즉, Eq. (4)에 의하면 서로 다른 반경을 갖는 석출물들은 서로 다른 석출물/모재 간의 계면 농도를 갖게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 모재 내에는 다양한 크기의 석출물이 존재한다. 만약, 서로 다른 크기를 갖는 석출물들 사이의 거리가 가까워지면, Gibbs-Thomson equation에 의한 석출물과 모재 사이의 diffusion field가 겹치게 되고 이들 사이의 평형 관계에 따라 다음의 Fig. 1과 같은 농도 프로파일이 발생한다. 다음의 Fig. 1은 이러한 석출물들간의 농도차를 개략적으로 보여주고 있다¹²⁾. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 Eq. (1)에 의하면 상대적으로 작은 크기를 갖는 입자는 큰 입자에 비해, 높은 계면 농도를 갖게 되며, 이에 따라 그림에서 나타난 농도 프로파일에 의해 solute atom이 빠져나가 큰 입자로 공급해주게 되며, 이러한 반응에 의해 큰 입자는 점점 성장하고, 작은 입자들은 점점 수축하게 된다. 이와 같은 반응에 대한 구동력은 시스템 전체의 계면에너지를 낮추기 위함이다.

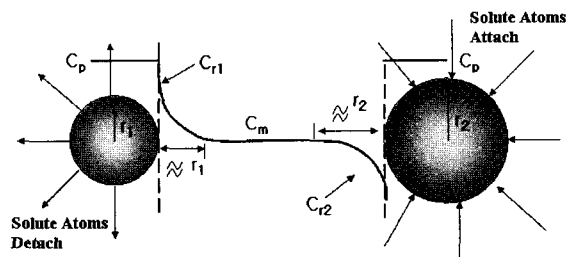


Fig. 1 Schematic concentration profile between large and small particles¹²⁾

이 때, 만약 모재와 평형을 이루는 석출물의 사이즈가 존재한다면, 이를 임계석출물크기 (Critical particle size) 라고 정의 할 수 있으며, 이러한 크기를 갖는 입자는 더 이상의 성장도 용해도 일어나지 않게 된다. 일반적인 입자의 성장 및 용해 반응에 대한 식으로 알려진 LSW equation와 Whelan equation은 다음과 같은 일반화된 형태의 식에 대한 적분형태로부터 얻어진다¹³⁾.

$$\frac{dr}{dt} = -k \left(\frac{D}{r} \right)^n \quad (5)$$

위 식에서 n 은 driving force exponent를 의미한다. 이 때, k 는 다음과 같이 표현된다¹³⁾.

$$k = \frac{C_r - C_m}{C_p - C_r} \quad (6)$$

Eq. (6)에 의하면, 항상 $C_p > C_r$ 이므로, $C_r > C_m$ 인 경우 ($k > 0$), 석출물은 용해되며, $C_r < C_m$ 인 경우 ($k < 0$), 석출물은 성장한다. 한편, $C_r = C_m$ 인 경우 ($k = 0$) 석출물은 더 이상 용해되거나 성장하지 않는 안정한 사이즈를 갖게 되며, 이러한 사이즈를 임계석출물크기라고 할 수 있다. 이러한 임계석출물크기 (r_{cr})는 다음의 Eq. (7)과 같이 Gibbs-Thomson equation에서 임계석출물크기 (r_{cr})를 갖는 석출물의 계면농도가 앞의 가정에 의해서 모재의 mean solute concentration (C_m)과 같다는 가정으로부터 구할 수 있다.

$$C_m = C_\infty \exp\left(\frac{2\gamma W_m}{RT r_{cr}}\right) \quad (7)$$

위 식을 변환시키면 다음과 같이 임계석출물크기를 구하는 식을 얻을 수 있다¹²⁾.

$$r_{cr} = \frac{2\gamma W_m}{RT} \left(\ln\left(\frac{C_m}{C_\infty}\right) \right)^{-1} \quad (8)$$

이 때, 각각의 변수들이 주어지면 주어진 온도에서의 임계석출물크기를 구할 수 있다.

Table 1 Chemical composition of experimental steel (Weight percent)

C	Si	Mn	Al	Ti	B (ppm)	N (ppm)
0.15	0.12	1.49	0.06	0.017	10	100

3. 실험 방법

Table 1은 실험에서 사용한 강의 합금성분을 보여주고 있다. Ti와 N의 함량은 hypo-stoichiometric ratio ((3.42)를 따르고 있다. 석출물 거동 관찰을 위한 등은 열처리하는 Dilatometer를 이용하였으며, 다음의 Fig. 2는 열사이클을 보이고 있다. 상용화된 열역학 소프트웨어인 Thermo-calc를 이용한 계산 결과에 의하면, 실험 강재의 합금 성분계에서의 TiN 석출물의 용해온도가 1540°C이므로, 열처리하는 Fig. 2와 같이 석출물의 조대화 거동의 관찰을 위해서 그보다 낮은 온도인 1200, 1300°C에서 수행되었다. 미세조직 관찰을 위해서 미세연마 한 후, Nital etchant를 이용해서 에칭 한 후, 광학현미경을 이용해서 조직을 관찰하였다. 한편, 석출물 관찰을 위한 TEM시편을 제작하기 위해서 먼저 열처리된 시편을 Methanol (80%), Perchloric acid (20%) 용액에서 1차 에칭한 후, 표면에 Carbon film을 입힌 후, 동일 에칭액 내에서 2 Volt의 전압을 가하여 Carbon film을 추출하였다. 추출된 Carbon film은 TEM (JEOL 2010, 2000)을 이용해서 관찰하였다. 한편 관찰된 석출물의 크기는 화상분석시스템 (Image analyzer)를 이용하여 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

1) 초기 TiN 석출물 분포

Fig. 3은 초기 모재 내에 존재하는 TiN석출물을 보여주고 있으며, SAD pattern 및 EDS분석 결과 FCC

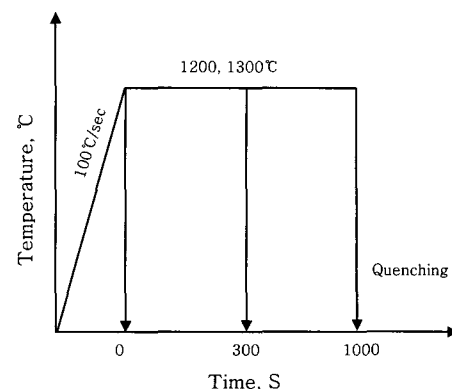


Fig. 2 Schematic illustrations of isothermal heat treatment

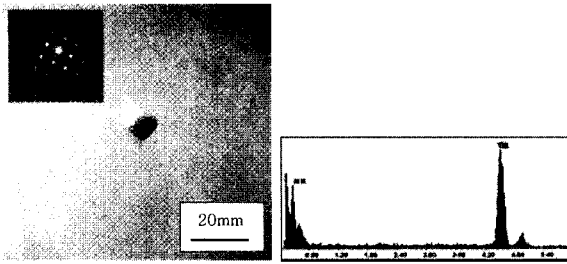


Fig. 3 TEM Micrograph, SAD pattern and EDS analysis of TiN particle¹²⁾

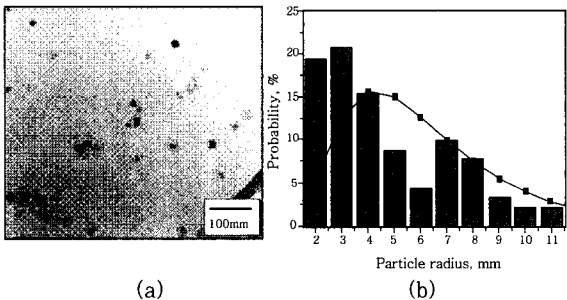


Fig. 4 TiN particle size distribution in the base metal (a) TEM micrograph, (b) Size distribution¹²⁾

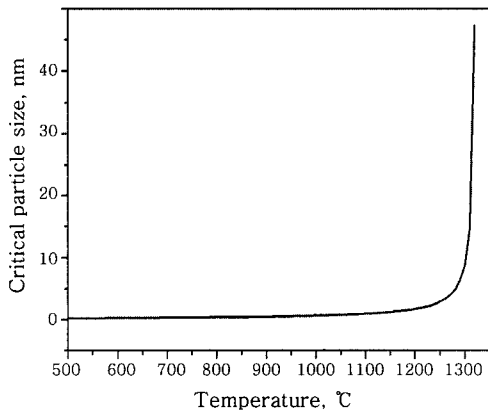


Fig. 5 Calculated critical particle size with increase in temperature¹²⁾

구조의 입방형태를 띠는 TiN 석출물임이 확인되었다. 한편, Fig. 4는 초기 모재에 존재하는 TiN의 분포를 보이고 있다. 석출물 분포의 관찰 결과, 석출물은 Fig. 4(b)와 같이 전형적인 Log-normal 형태의 크기 분포를 띄고 있음을 확인할 수 있었으며⁹⁾, 그 평균 크기(반지름)는 약 5nm로 측정되었다.

2) 임계 석출물 크기의 계산

TiN 석출물의 조대화 거동에 있어서의 임계석출물 크기의 영향을 살펴보기 위하여, 앞서 유도한 Eq. (8)을 통해 실험온도에서의 임계석출물 크기를 계산 하였다. Eq. (8)의 C_m 은 다음의 Eq. (9)와 같은 lever rule

을 통해 간단히 구할 수 있다¹³⁾.

$$C_m = \frac{C_0 - fC_p}{1 - f} \tag{9}$$

위 식에서 C_0 는 초기 Solute concentration이다. 이 때, 석출물의 분율 f 는 매우 작은 값으로써 거의 0에 가깝기 때문에 Eq. (9)는 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$C_m = C_0 \tag{10}$$

위의 Eq. (10)을 Eq. (8)에 대입하면 다음과 같이 식을 변환할 수 있다¹²⁾.

$$r_{cr} = \frac{2\gamma W_m}{RT} \left(\ln \left(\frac{C_0}{C_\infty} \right) \right)^{-1} \tag{11}$$

본 연구에서 사용된 합금의 C_0 는 0.017 이며, TiN의 경우 γ 는 석출물/모재 간의 계면에너지로써 $800 \times 10^{-7} \text{J/cm}^2$ 이며, V_m 은 석출물의 molar volume으로써 TiN의 경우 $11.53 \text{cm}^3/\text{mol}$ 이다¹⁾. 한편 C_∞ 는 solute의 평형 농도로써 본 연구에서는 상용화된 열역학 프로그램인 ThermoCalc를 이용하여 계산하였다.

Fig. 5는 Eq. (11)에 각각의 변수를 대입한 후, 온도의 변화에 따라서 계산된 임계석출물 크기를 보인 것이다. 그림에서 보듯이, 임계석출물 크기는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 석출물의 안정성이 감소하고 이에 따라 모재 내에 존재하는 Solute atom의 평형농도 (C_∞ in Eq. (11))가 증가하게 되며, 그에 따라 r_{cr} 이 커지기

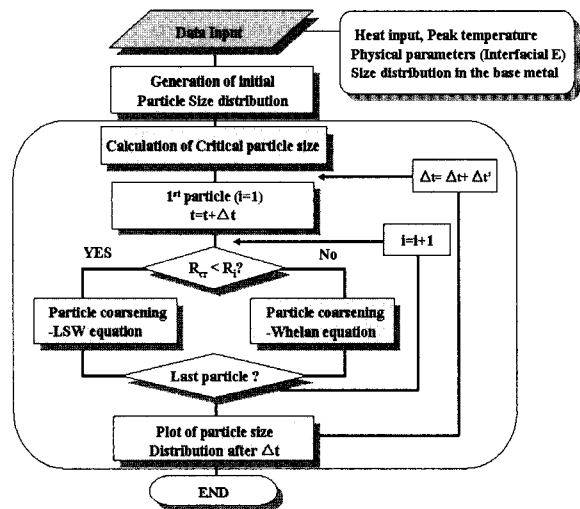


Fig. 6 Flowchart for isothermal coarsening model

때문이다. 한편, 실험온도인 1200, 1300℃에서 계산된 임계석출물크기는 각각 2.8nm, 8.2nm 이며, 등온에서는 일정한 값을 갖는다¹²⁾.

3) 모델 알고리즘

등온 모델은 다음과 같은 Flow chart를 따라서 구성되었다.

먼저, 실험적으로 측정된 각각의 석출물 크기를 입력해준다. 다음으로 모델의 계산에 있어서 필요한 상수들(계면에너지, Molar Volume 등)이 인식된다. 다음으로 계산 온도를 입력해주면, 주어진 온도에서의 임계석출물크기를 계산한다. 이 때, 각각의 석출물들은 임계석출물크기와 비교해서, 그보다 클 경우에는 LSW equation에 의해서 등온 유지 시간 동안 Coarsening되며, 만약 임계석출물크기보다 작을 경우에 있어서는 Whelan equation에 의해서 등온 유지 시간 동안 Dissolution된다. 이처럼 각각의 개별 입자에 대해서 등온 유지 시간 후의 사이즈를 계산한 후, 그 평균 크기를 출력하게 된다. 이 때, 만약 등온 유지 시간 중에 임계석출물크기 이하의 크기를 갖는 석출물들이 모두 Dissolution된 후에는 석출물의 성장은 멈추게 된다. Fig. 7은 이러한 사실을 개략적으로 보여주고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 임계석출물크기 이하의 크기를 갖는 석출물들이 모두 Dissolution된 후에 있어서도 석출물들 간에 농도 프로파일은 존재한다. 하지만 이 때, 각각의 석출물들의 모재와의 계면 농도는 모재의 mean solute concentration 이하이므로 solute atom들이 모재를 통해서 이동하지 못하게 된다. 한편, 모재에서도 mean solute concentration를 유지하고 있으므로 모재에서 석출물로의 직접적인 atom의 공급도 발생하지 않게 된다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델에 있어서는 등온 거동의 계산에 있어서 더 이상의 성장이 일어나지 않는 시점을 임계석출물크기를 갖는 석출물의 용해가 끝나는 시간으로 정했으며, 그 용해시

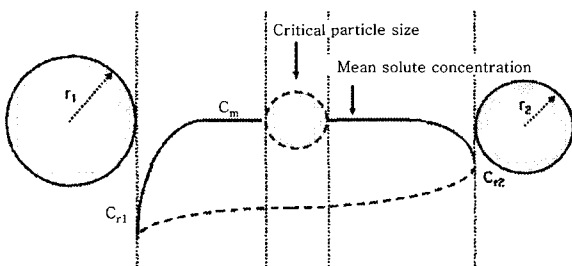


Fig. 7 Concentration profile after all particles that are smaller than critical particle size dissolved¹²⁾

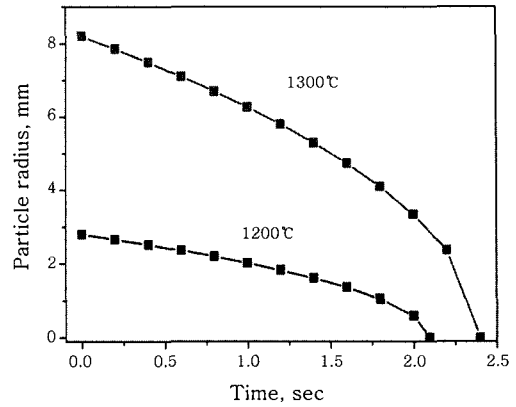


Fig. 8 Dissolution kinetics of particle that has critical particle size¹²⁾

간 (Dissolution time, t_d)은 Whelan equation을 변형함으로써 다음과 같이 구할 수 있다⁴⁾.

$$t_d = \frac{r_{cr}^2}{2\alpha D} \tag{12}$$

여기서 α 는 dimensionless supersaturation으로써 다음의 Eq. (13)과 같이 구해진다⁴⁾.

$$\alpha_{Ti} = \frac{C_r(Ti)}{C_p(Ti)} \tag{13}$$

다음의 Fig. 8은 실험 온도인 1200℃와 1300℃에서 임계석출물크기를 갖는 석출물이 Dissolution되는 거동을 Whelan equation에 따라서 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 각각의 온도에서 약 2~2.5초 안에 임계석출물크기보다 작은 석출물들은 모두 용해된다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델에 있어서는 그 시간 이후에 있어서 더 이상의 성장이나 용해 반응을 계산하지 않았다.

4) 등온 석출물 성장 거동

Fig. 9와 10은 각각 1200, 1300℃에서 등온 유지 시간의 변화에 따른 TiN 석출물의 크기 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 등온에서의 유지 시간이 길어질수록 석출물의 크기는 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험 온도가 TiN의 용해 온도 이하로써 TiN 석출물의 조대화가 일어나기 때문이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라서 작은 크기의 입자들의 존재 확률이 작아지는 반면에 큰 입자들의 존재 확률은 증가하고 있다.

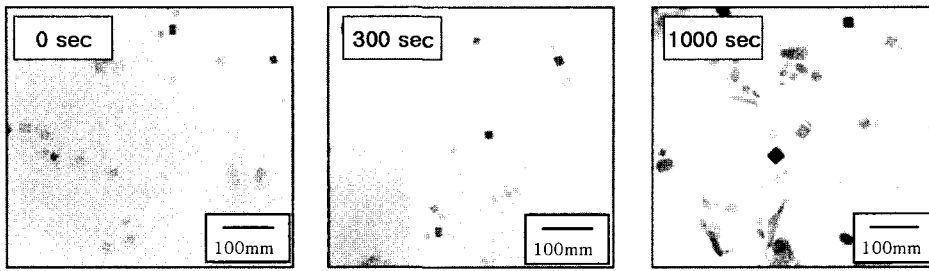


Fig. 9 Isothermal TiN particle coarsening behavior at 1200°C¹²⁾

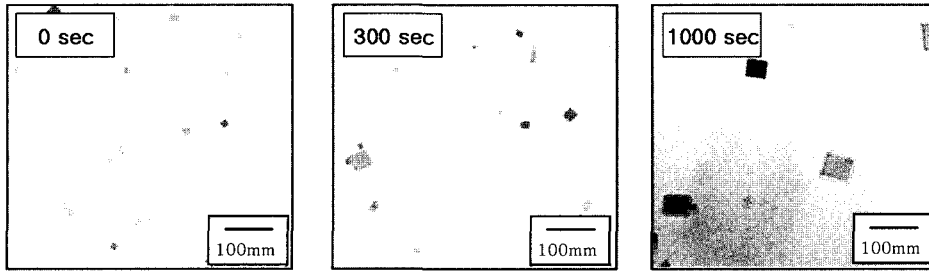


Fig. 10 Isothermal TiN particle coarsening behavior at 1300°C¹²⁾

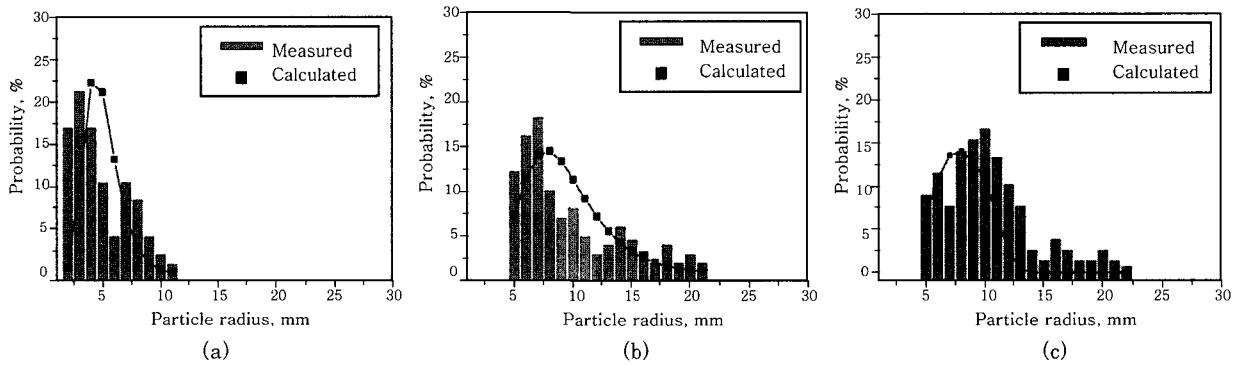


Fig. 11 Size distribution change with increasing holding time of TiN particle at 1200°C. Holding time : (a) 0 sec (b) 300 sec (c) 1000 sec¹²⁾

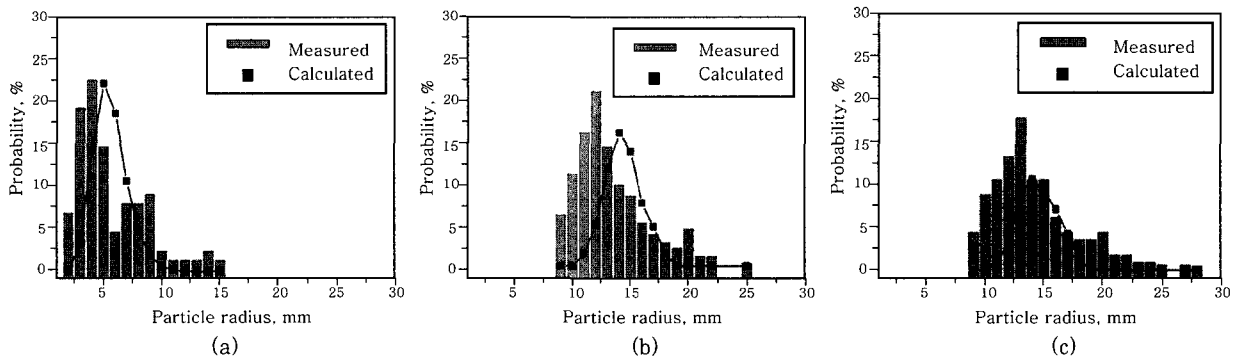


Fig. 12 Size distribution change with increasing holding time of TiN particle at 1300°C. Holding time : (a) 0 sec (b) 300 sec (c) 1000 sec¹²⁾

5) 등은 모델의 신뢰도

작성된 모델에 의해 계산된 값을 실험값과 비교함으로써 모델의 신뢰성을 확인하였다. Fig. 11과 12는 실험값과 계산값을 함께 나타낸 것으로서 모델에 의한 계

산값과 실험값의 경향이 잘 일치한다. 다음으로 또한 작성된 모델에 따라서 계산된 석출물크기의 변화를 기존의 모델에 의해서 계산된 값과 비교함으로써 모델의 신뢰성을 확인하였다. Fig. 13은 실험온도에서 모델의 신뢰성을 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이

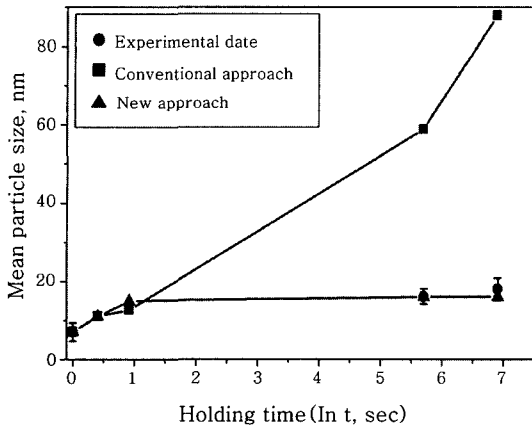


Fig. 13 The reliability of particle coarsening model during isothermal aging at 1300°C

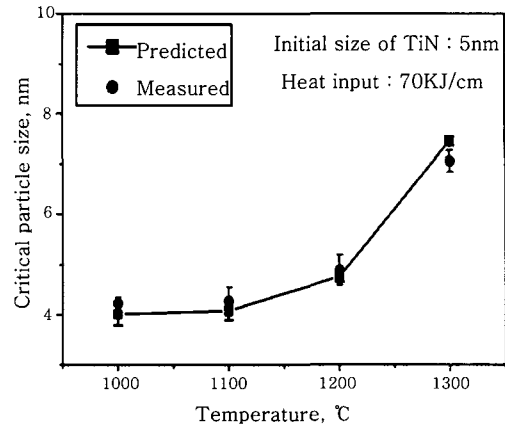


Fig. 14 The reliability of particle coarsening model during continuous thermal cycle

입계석출물크기를 고려한 경우가 기존의 모든 석출물의 일방적인 성장만을 고려한 경우의 모델에 의해서 계산된 경우보다 실험값과 잘 일치하고 있다. 이는 기존의 모델과 같이 작은 입자들의 용해 반응을 무시하고 일방적인 입자의 성장만을 고려할 경우, 실제보다 큰 사이즈를 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 석출물의 조대화 거동을 보다 정확히 예측 하기 위해서는 입계석출물크기를 고려해야 함을 확인 할 수 있다.

6) 연속 열사이클 모델로의 변환

지금까지 등온에서의 석출물의 거동에 대해서 살펴보고 작성된 등온 모델의 신뢰성을 확인하였다. 한편, 이러한 등온 모델을 용접이나, 열처리와 같은 비 등온 조건에 적용하기 위해서 가산법칙(additivity rule)의 사용이 일반적이다¹⁴⁾. 가산법칙은 연속적인 온도 변화를 미소의 등온 구간의 합으로 간주하는 것으로, 각 등온 구간에서의 석출물 크기 변화량을 계산하고, 이들의 합으로부터 전체적인 석출물 크기를 구하는 방법이다.

따라서 본 연구에서 제안된 등온 모델을 다음의 Eq. (14)와 같이 가산법칙을 이용해서 연속 열사이클 중의 석출물 조대화 모델로 변환 시켰다.

$$r^3 - r_o^3 = \int_0^r \frac{8\gamma_m C^s D_m dt}{9RT} \quad (14)$$

한편 용접 열사이클 중의 석출물 거동을 계산하기 위해서 용접 조건 (입열량, Peak온도)에 따른 열사이클을 Rosenthal equation을 이용하여 계산하였다¹⁵⁾.

다음의 Fig. 14는 연속 열사이클 중의 석출물 조대화 예측 모델에 대한 신뢰성을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 예측 결과는 실험결과와 매우 잘 일치한다.

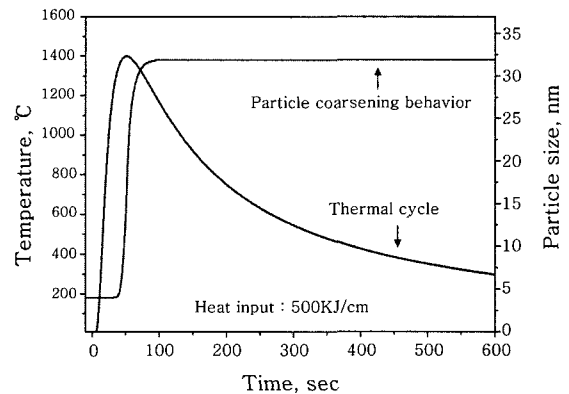


Fig. 15 Predicted particle coarsening behavior with initial particle size difference during continuous heating (Heating rate: 100°C/sec)

다음의 Fig. 15는 500KJ/cm의 입열량 하에서 계산된 연속 열 사이클 동안의 석출물 크기 변화에 대한 예측 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 석출물의 조대화는 대부분 가열 중에 발생한다. 다음의 Fig. 16은 입열량의 변화에 따라 계산된 TiN 석출물 조대화 정도의 차이를 보여준다. Rosenthal equation에 의하면 입열량이 증가할수록 가열 및 냉각 속도가 감소하며, 이로 인해 연속 열사이클 중의 등온 유지 시간이 증가한다. 따라서 입열량이 증가함에 따라 석출물 내의 Ti원자가 확산하기 위해 필요한 시간적 여유를 확보함으로써 석출물의 조대화가 보다 크게 발생한다.

다음의 Fig. 17은 Peak온도의 증가에 따른 석출물 조대화 거동의 변화를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이, Peak온도가 증가할수록 석출물의 조대화가 크게 발생하며, 이는 고온일수록 석출물 조대화를 위한 Ti원자의 확산 속도가 증가하기 때문이다.

후 기

본 연구는 포스코기술연구소의 재정적인 지원 하에서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. A. Manohar, D. P. Dunne, T. Chandra and C. R. Killmore: Grain growth predictions in Microalloyed Steels, *ISIJ Int.*, **36** (1996), 194-200
2. S. Jiao, J. Penning, F. Leysen, Y. Houbaert and E. Aernoudt: The Modeling of the Grain Growth in a Continuous Reheating Process of a Low Carbon Si-Mn Bearing TRIP Steel, *ISIJ Int.*, **40** (2000), 1035-1040
3. M. Shome, D. S. Sarma, O. P. Gupta and O. N. Mohanty: Precipitate dissolution and grain growth in the heat affected zone of HSLA-100 steel, *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1431-1437
4. Ø. Grong: Metallurgical Modelling of Welding, The Institute of Materials, 1997, 354-355
5. Stephen Liu and Fang-Chun Liao: Precipitates stability in the heat affected zone of nitrogen enhanced high strength low alloy steels, *Mat Sci & Eng A244* (1998), 273-283
6. Leon M. Cheng, E. Bruce Hawbolt and T. Ray Meadowcroft: Modeling of Dissolution, Growth, and Coarsening of Aluminum Nitride in Low-Carbon Steels, *Metall Trans.*, **31A** (2000), 1907-1916
7. P. A. Manohar, M. Ferry and T. Chandra: Five Decades of the Zener equation, *ISIJ Int.*, **38** (1998), 913-924
8. S. P. Ringer, W. B. Li and K. E. Easterling: On the interaction and pinning of grain boundaries by cubic shaped precipitates particles, *Acta metall.*, **37** (1989), 831-841
9. C. Wagner, *Z. Electrochem.*, **65** (1961), 581-591
10. J. Ågren, *Scand. J. Metall.*, **19** (1990), 2-8
11. D.A. Porter and K.E. Easterling: *Phase Transformations in Metals and Alloys* (2nd Edition), Chapman & Hall, 1992, 45-47
12. Joonoh Moon, Changhee Lee, Sangho Uhm and Jongbong Lee: Coarsening kinetics of TiN particle in a low alloyed steel in weld HAZ: Considering critical particle size, *Acta mater.*, **54** (2006), 1053-1061
13. Ø. Grong and H. R. Shercliff: Microstructural modelling in metals processing, *Progress in Materials Science*, **47** (2002) 163-282
14. Sangho Uhm, Joonoh Moon, Changhee Lee, Jihyun Yoon and Bongsang Lee: 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), 1230-1237
15. K. Easterling: *Introduction to the Physical Metallurgy of welding*, Butterworths, London, 1983, 17-23

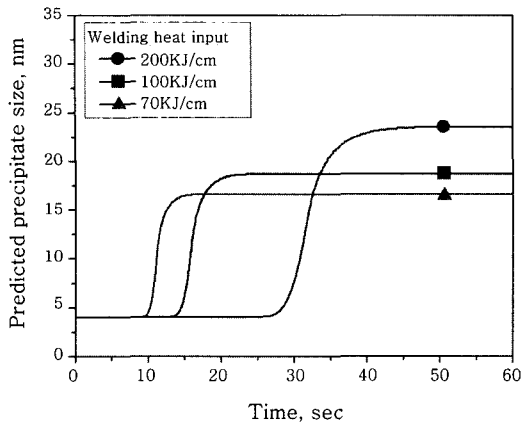


Fig. 16 Calculated particle coarsening behavior with increasing heat input (Peak temp: 1400°C)

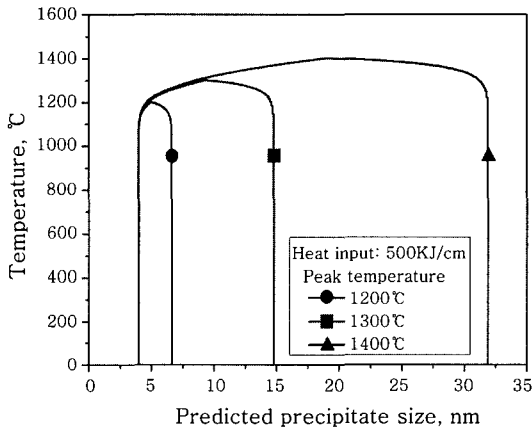


Fig. 17 Calculated particle coarsening behavior with increasing peak temperature

5. 결 론

본 연구에서는 석출물의 등은 거동에 대한 Kinetic 모델을 제안하였다. 기존의 석출물의 조대화에 대한 대부분의 등은 kinetic 모델이 평균입자의 거동을 고려하였으며, 모든 입자의 일방적인 성장만을 고려한 반면에, 본 연구에서 개별 입자의 거동을 고려하였으며, 이를 위해 Gibbs-Thomson equation에 의해 수식적으로 유도된 임계석출물크기의 개념을 적용하였다. 본 연구에서는 임계석출물크기는 등은에서는 일정한 크기로서, 더 이상 성장이나 용해가 일어나지 않은 석출물의 크기로 정의 하였다. 본 연구에서 제안한 모델에 의한 계산 결과를 실험 결과 및 기존의 모델에 의한 계산 결과와 비교함으로써 모델의 신뢰성을 확인하였다. 한편, 등은 모델을 가산법칙을 이용해서 연속 열사이클 모델로 변환하였고, 작성된 연속 모델을 이용해서 입열량 및 초기 석출물 크기에 따른 석출물의 조대화 거동을 예측하였다.