

Ti 첨가 저합금강에서의 용접 열영향부 석출물 거동 및 오스테나이트 결정립 성장 예측 모델

(Prediction model for particle behavior and austenite grain growth in Ti added low alloyed steel HAZ)

문준오*, 엄상호, 이창희, 안영호**, 이종봉

* 한양대학교 신소재 공학부

**포스코 기술 연구소 접합 연구 그룹

ABSTRACT 석출물의 용해 온도보다 낮은 온도에서의 석출물의 야금학적인 거동을 예측하였다. 평균 사이즈 석출물의 지속적인 성장만을 고려하는 기존의 모델과 달리, 본 연구에서 제안된 모델의 경우에는, Gibbs-Thomson equation으로부터 유도되는 critical particle size를 고려하였다. 제안된 모델을 이용해서 TiN석출물의 거동을 예측하였으며, 이를 실험 결과 및 기존의 모델에 의한 예측 값과 비교하였다. 석출물들의 분포는 전형적인 log-normal 분포를 따르는 것으로 관찰되었으며, 본 연구에서 제안된 모델이 기존의 모델에 비해서 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

일반적인 구조용 강들은 그 사용목적에 맞도록 합금 설계 및 제작된다. 하지만 구조물의 제작에 있어서 필연적으로 용접 공정을 거치게 되고, 이러한 용접 공정 중에 발생하는 HAZ는 구조물의 안정성을 떨어뜨린다고 알려져 있다. 이는 용접 열사이클 중의 오스테나이트 결정립 성장에 기인한다. 그러므로, 석출물을 이용해서 용접 열사이클 중의 결정립 성장을 억제하고자 하는 많은 노력이 수행되어 왔다. 이 때, 석출물의 결정립 성장 억제 효과는 석출물의 크기에 영향을 받는다. 그러므로 합리적인 용접 열영향부 결정립 성장 예측 모델의 작성을 위해서 석출물의 거동을 예측할 필요가 있다. 이전의 대부분의 연구들은 석출물의 용해 온도 이하에서 단지 평균 사이즈를 갖는 입자의 지속적인 성장만을 고려하였다. 하지만 Oswald ripening의 관점에서 볼 때, 석출물의 성장은 작은 크기를 갖는 석출물들의 용해를 수반한다. 이때, 안정한 석출물의 크기가 존재하며, 이를 Critical particle size라고 정의할 수 있다.

본 연구에서는 Oswald ripening으로부터 Critical particle size를 이론적으로 계산하였으며,

이러한 critical particle size를 고려한 경우의 석출물 조대화 모델을 제안하였으며, 이를 실험결과와 비교함으로써 모델의 신뢰성을 평가하였다.

2. Critical particle size

Gibbs-Thomson equation에 의하면, particle과 matrix간의 계면에서의 solute atom의 농도는 particle의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. Gibbs-Thomson equation은 다음과 같다 ⁽¹⁾.

$$C_r = C_\infty \exp\left(\frac{2\gamma V_m}{RT r}\right) \quad (1)$$

Gibbs-Thomson equation을 통해서 알 수 있듯이, 작은 입자일수록 particle/matrix의 계면에서의 solute 농도는 높다. 그림1은 모재 내에 서로 다른 크기를 갖는 석출물이 존재할 때의 concentration profile을 개략적으로 보여주고 있다.

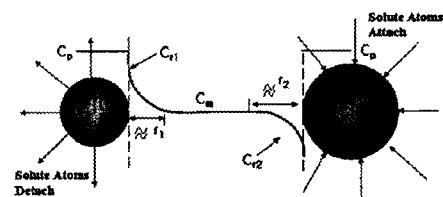


그림1. Solute concentration에 대한 개략도⁽²⁾

그림에서 보는 바와 같이 보다 높은 계면 농도를 갖는 작은 입자들에서 solute atom들이 빠져 나와 큰 입자로 공급되게 되며, 이를 통해 전체 평균 입자 사이즈는 증가하게 된다. 한편 일반적으로 잘 알려진 석출물의 조대화 및 용해 거동은 다음과 같은 식에 의해 표현된다 (3,4).

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

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

이때, 위의 식들은 다음과 같은 일반적인 형태의 식으로 표현될 수 있다 (4).

$$\frac{dr}{dt} = -k \left(\frac{D}{r} \right)^n \quad (4)$$

이 때, 식에서의 k값은 다음과 같이 표현된다.

$$k = \frac{C_r - C_m}{C_p - C_r} \quad (5)$$

위의 식에서 $C_r > C_m$ 인 경우에는 $k > 0$ 이 되고, 석출물은 용해가 일어난다. 반면에, $C_r < C_m$ 인 경우에는 $k < 0$ 이 되고, 석출물의 성장이 발생한다. 한편, $C_r = C_m$ 인 경우에는 석출물은 더 이상 상장이나 용해가 일어나지 않으며, 안정한 사이즈를 갖게 된다. 이때, 이러한 안정한 석출물의 크기를 critical particle size로 정의 할 수 있으며, 이는 식(1)과 식(5)의 결합을 통해서 다음과 같이 표현 할 수 있다 (6).

$$r_{cr} = \frac{2\sigma V_m}{RT} \left(\ln \left(\frac{C_m}{C_\infty} \right) \right)^{-1} \quad (6)$$

그러므로, 식(6)의 각각의 변수들이 주어지면, Critical particle size가 이론적으로 계산된다.

3. 실험 방법

본 연구에서 사용된 합금의 화학조성은 표1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 Ti와 N의 비율은 Stoichiometric ratio보다 낮은 Hypo-stoichiometric ratio를 나타내고 있다.

C	Si	Mn	Al	Ti	N, ppm
0.15	0.12	1.49	0.06	0.017	100

표1. Chemical composition (wt%)

석출물 거동을 관찰하기 위한 등은 열처리 실험은 He gas quenching system을 갖춘 Dilatometer

를 이용하였으며, 실험 열사이클은 그림2와 같다.

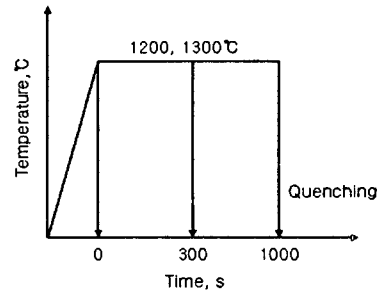


그림2 Heat treatment for isothermal test

그림에서 보는 바와 같이 석출물의 거동을 관찰하기 위해서 TiN의 열역학적인 고용온도(1510°C) 보다 낮은 1200, 1300°C에서 등은 실험을 수행하였으며, 가열중의 석출물의 조대화를 막기 위해 100°C/s의 빠른 속도로 가열하였다. 열처리 후, 시편내의 석출물을 관찰하기 위해서 Carbon replica technique를 이용해서 TEM관찰을 수행하였으며, 석출물의 크기는 Image analyzer를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

그림3는 초기 시편에서 관찰된 TiN을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 TiN은 rectangular한 형태를 나타내고 있으며, TiN의 크기는 약 5 nm을 보이고 있다.

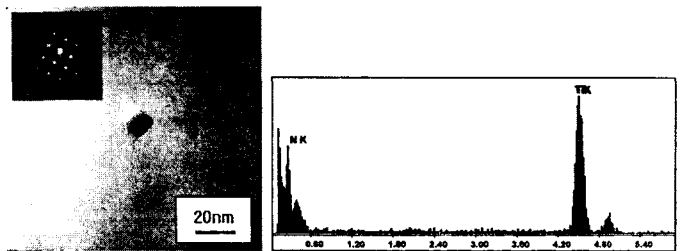


그림3 TEM micrograph of TiN

그림4와 5에서는 각각 1200, 1300°C 에서 등은 실험을 통해 TiN의 조대화 거동을 관찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 평균적으로 석출물들은 성장하고 있음을 알 수 있다. 하지만 아주 작은 크기를 갖는 석출물들의 경우에는 작아지는 것도 일부 관찰할 수 있다.

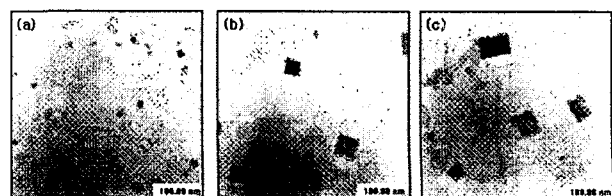


그림4 TiN coarsening at 1200°C, Holding time (a) 0 (b) 300 (c) 1000sec

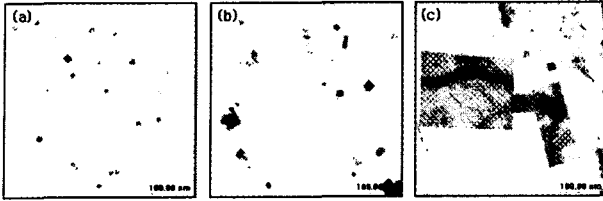


그림5 TiN coarsening at 1300°C, Holding time (a) 0 (b) 300 (c) 1000sec

본 실험에서 사용된 합금 조성 조건에서 1200°C와 1300°C에서 각각 식(6)에 의해서 계산된 critical particle size는 약 2.8nm와 8.1nm이다. 이때, 그림 6은 particle distribution을 각각 1300°C에서 holding에 따라 관찰한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 critical particle size보다 작은 크기들을 갖는 입자들은 점점 작아지다가 사라지는 것으로 관찰되었다. 이로부터 critical particle size가 실제로 석출물의 조대화 거동에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

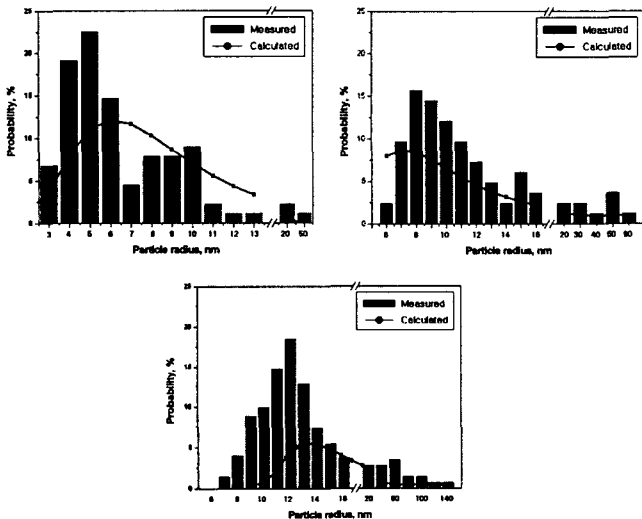


그림6 Particle size distribution at 1300°C, Holding time : (a) 0 (b) 300 (c) 1000sec

다음으로 그림7에서는 critical particle size를 고려한 본 연구에서 제안된 모델과 기존의 모델을 실험결과와 비교하여 제안된 모델의 신뢰성을 평가하였다.

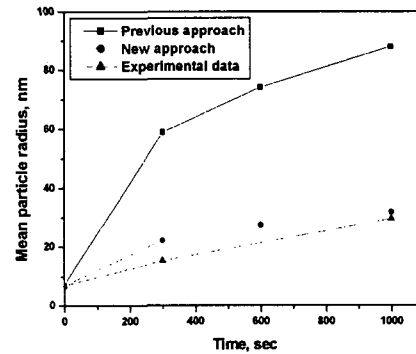


그림7 Reliability of proposed model at 1300°C

그림에서 보는 바와 같이 석출물들의 지속적인 성장만을 고려한 기존의 모델보다 critical particle size를 고려한 경우가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 보다 정확한 석출물의 거동을 예측하기 위해서는 critical particle size를 고려해야 함을 의미한다.

5. 결론

Gibbs-Thomson으로부터 이론적인 critical particle size를 계산하였으며, 이러한 critical particle size를 고려해서 작성한 석출물 조대화 모델의 경우, 기존의 모델들에 비해 그 신뢰성이 높음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 포스코로부터 재정적인 지원을 받아서 수행되었습니다.

참고문헌

- 1.) D. A. Porter and K. E. Easterling : Phase Transformations in Metals and Alloys, CHAPMAN & HALL, (1992), 45~47
- 2.) Stephen Liu, Fang-Chun Liao : Mat Sci & Eng A244 (1998) 273-283
- 3.) P. A. Manohar, D. P. Dunne, T. Chandra and C. R. Killmore : ISIJ Int, 36 (1996), 194
- 4.) Leon M, Cheng, E. Bruce Hawbolt and T. Ray Meadowcroft : Metall Trans, 31A, (2000), 1907
- 5.) Φ. Grong : Metallurgical Modelling of Welding, The Institute of Materials