

용접 열영향부에서의 복합 석출물의 조대화 거동 예측 모델 Kinetic model for the coarsening of complex particle in weld HAZ

문준오*, 김상훈*, 이창희*, 정홍철**, 이종봉**

* 한양대학교 신소재 공학과

** 포스코 기술 연구소 집합연구 그룹

ABSTRACT A kinetic model for particle coarsening behavior in the weld heat affected zone (HAZ) was proposed. Unlike the conventional approach, where the mean-sized particle is considered to grow continuously, the proposed model considered the critical particle size which can be derived from the Gibbs-Thomson equation. In this study, the proposed particle coarsening model was applied to study the behavior of (Ti, Nb)(C, N) complex particle in the weld HAZ. The predicted particle size distributions using the proposed model were in agreement with the experimental results.

1. 서 론

용접 도중 발생하는 용접열영향부는 높은 가열 온도에 의한 결정립 성장 및 이에 따른 취약상의 발생으로 인해 구조물의 기계적 성질을 떨어뜨린다. 따라서 용접 도중 발생하는 결정립 성장을 억제하고자 하는 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 연구를 통해 석출물을 이용한 결정립 성장 억제 효과가 보고되고 있다.

석출물에 의한 결정립 성장 억제 효과는 석출물의 크기에 크게 의존한다. 잘 알려진 Zener equation[1]에 의하면, 석출물에 의한 결정립 성장 억제력은 석출물의 크기에 반비례함을 알 수 있으며, 따라서 용접부에서의 석출물 크기 변화를 예측하고자 하는 연구가 이루어져 왔다.

이에 본 연구에서는 최근에 많이 연구되고 있는 (Ti, Nb)(C, N) 복합 석출물의 등온 조대화 Kinetic 모델을 작성하였다. 기존의 모델과 달리 본 연구에서는 임계 석출물 크기(Critical particle size)개념을[2] 적용하여 모델을 작성하였으며, 개별 입자의 크기 분포 관찰을 통해 모델의 신뢰성을 확인하였다. 한편, 가산법칙[3]을 적용하여 등온 모델을 연속 열사이클 모델로 변환하였으며, 작성한 모델을 통해 용접 열영향부에서의 석출물 크기를 예측하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 합금의 화학조성은 표1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 (Ti, Nb)(C, N) 복합 석출물을 얻고자 Ti와 Nb를 첨가하였다.

Table 1. Chemical composition (wt%)

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

석출물 거동을 관찰하기 위한 등온 열처리 실험은 Dilatometer를 이용하였으며, 실험 열사이클은 그림1과 같다.

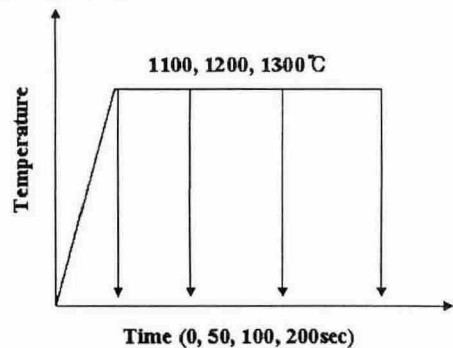


Fig. 1 Heat treatment for isothermal test

열처리 후, 시편내의 석출물을 관찰하기 위해서 Carbon replica technique를 이용해서 TEM 관찰을 수행하였으며, 석출물의 크기는 Image

analyzer를 이용하여 측정하였다.

2. Critical particle size 계산

크기가 다른 두 입자가 모재 내에 존재할 때, 입자와 모재와의 계면에서의 Solute농도는 잘 알려진 Gibbs-Thomson equation에 의해서 결정되며, 식에 의하면 계면에서의 Solute 농도는 입자의 크기에 반비례함을 알 수 있다. 즉, 입자의 크기가 작을수록 높은 계면 농도를 가지고, 이에 따라 크기가 다른 두 입자가 존재할 때, 입자들 사이에 농도 구배가 발생하며, 이러한 농도 구배에 의해 석출물의 조대화/용해가 발생한다. 이때, 높은 Solute농도를 가지는 작은 입자에서 큰 입자로 Solute atom이 이동하며 이로 인해 작은 입자는 작아지고 큰 입자는 커지게 된다. 이 때, 성장이 일어나는 큰 입자와 용해가 일어나는 작은 입자의 크기에 대한 경계가 Critical particle size이며, 이는 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

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

여기서 r_{cr} 은 Critical particle size로써 등온에서 일정한 값을 갖는다. 즉, 등온에서 식(1)에 따라 계산된 Critical particle size보다 큰 입자는 성장하고 작은 입자는 용해한다.

다음의 그림 2는 실험에 사용된 시편에 대해 식(1)에 의해 Critical particle size를 온도에 따라 계산한 결과이다.

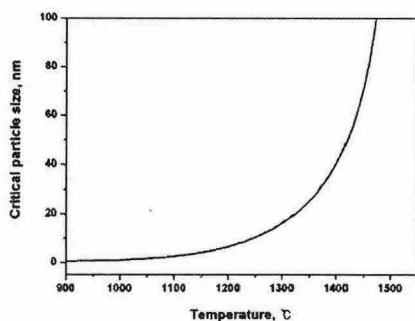


Fig. 2 Calculated critical particle size with increase in temperature

계산 결과에 의하면, r_{cr} 은 온도가 증가함에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

다음의 그림 3은 초기 모재에 존재하는 석출물의 분포를 보여주고 있다.

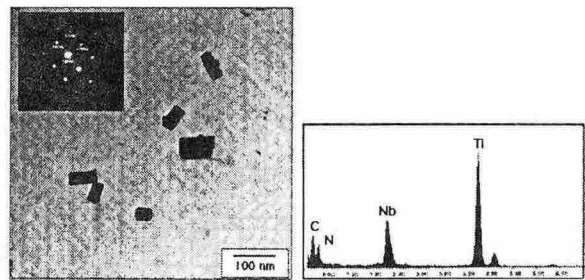


Fig. 3 Particle size distribution in the base metal

SAD pattern 및 EDS분석 결과, (Ti, Nb)(C, N)복합석출물임을 확인할 수 있었다. 다음의 그림 4는 실험온도인 1300°C에서 등온 유지 시간의 증가에 따른 석출물의 크기 변화를 보여주고 있다.

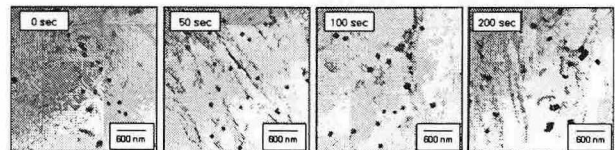


Fig. 4 TEM micrographs, Isothermal (Ti, Nb)(C, N) particle coarsening behavior at 1300°C

그림에서 볼 수 있듯이, 석출물의 크기는 등온 유지 시간의 증가에 따라 커짐을 알 수 있다. 한편 다음의 그림 5는 그림 4를 통해 측정된 석출물의 크기 분포를 그래프로 나타낸 것이다.

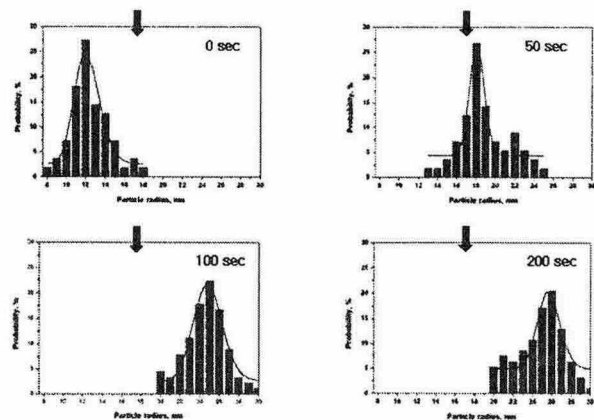


Fig. 5 Size distribution change with increasing holding time of (Ti, Nb)(C, N) particle at 1300°C

그림에서 화살표로 표시한 부분은 그림 2를 통해서 구한 1300°C에서의 Critical particle size를 나타내며, 그림에서 확인할 수 있듯이, Critical particle size보다 작은 입자들은 시간이 지남에 따라 점점 사라지고 있다. 하지만 어느

정도 시간이 지난 후에 Critical size이하의 입자들의 용해가 모두 종료된 후에는 입자 크기 분포가 거의 변하지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 다른 실험온도인 1100, 1200°C에서도 동일한 결과를 보였다. 이를 통해 입자의 조대화에 대한 Critical particle size의 영향을 확인할 수 있었으며, 이러한 Critical particle size의 개념을 적용하여 석출물의 조대화 Kinetic model을 작성하였다. 모델은 개별 입자의 거동을 고려하였으며, 각각의 온도에서 Critical particle size를 계산하고 이러한 Critical size를 기준으로 그보다 작은 입자들만 성장하며, 그 보다 큰 입자들은 용해된다는 가정 하에 작성되었다. 다음의 그림 6은 작성된 모델을 통해 용접 입열량의 변화에 따라 석출물의 크기변화를 계산한 결과이다.

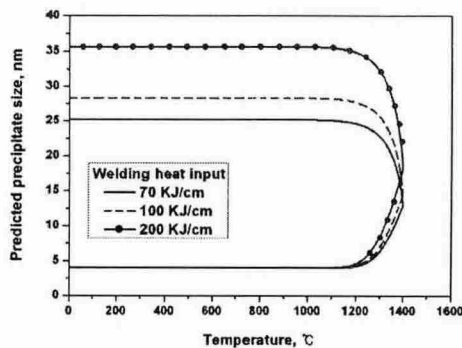


Fig. 6 Prediction result for the (Ti, Nb)(C, N) particle in weld HAZ

그림에서 볼 수 있듯이, 입열량이 증가할수록 가열 및 냉각 속도의 감소에 따라 입자의 성장이 더 조대하게 발생함을 알 수 있다[4]. 한편, 대부분의 입자성장은 1200°C 이상의 고온에서 발생함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

1. 등은 유지 실험으로부터 석출물 조대화 거동에 대한 Critical particle size의 영향을 확인하였다.
2. Critical particle size의 개념을 적용하여 등은 석출물 조대화 모델을 작성하였으며, 모델로부터 계산된 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.
3. 모델로부터 입열량의 변화에 따른 석출물 조대화 거동의 변화를 계산하였으며, 계산 결과 입열량의 증가에 따라 가열 및 냉각 속도의 감소에 의해 조대화가 더 크게 일어났다.

후 기

본 연구는 포스코 기술연구소의 재정적인 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. A. Porter and K. E. Easterling. Phase Transformations in Metals and Alloys, CHAPMAN & HALL, (1992), 45~47
2. Ø. Grong, H.R.Shercliff. Progress in Materials Science 47 (2002), 163-282
3. Sangho Uhm, Joonoh Moon, Changhee Lee, Jihyun Yoon and Bongsang Lee. ISIJ Int 2004, 44, No. 7, p. 1230.
4. Rosenthal, D., 2eme Congress National des Science, Brussels, (1935), 1277

부 록

Nomenclature

- C_0 : initial solute concentration (wt%)
 C_m : mean solute concentration in the matrix (wt%)
 r : particle radius (nm)
 r_{cr} : critical particle size (nm)
 R : universal gas constant (J/mol·K)
 t : isothermal holding time (sec)
 T : isothermal holding temperature (°C)
 V_m : molar volume of particle (cm³/mol)
 σ : interfacial energy of particle/matrix