

Fe-Ni 이원계합금 용접응용부의 응고편석에 관한 수치해석
Numerical Modeling for microsegregation behavior of Fe-Ni binary alloy weld metal

박종민, 이창희
한양대학교 금속공학과

제 1 장 서 론

합금의 비평형 응고시의 용질재분배는 미시편석을 야기하여 비평형 제2상이나 기공, 균열 등을 발생시켜 금속 제품의 기계적 특성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 특히 용착금속의 응고는 용접공정의 특성상 급격한 열이력에 의한 빠른 냉각과 빠른 결정 성장 때문에 평형응고에서 상당히 벗어나게 된다. 이러한 용접부의 응고현상에 대해서는 1940년대부터 주로 용접부의 열전달 현상에 대한 연구에서 시작하여 1980년대부터 weld pool내의 convection현상에 대한 해석이 같이 이루어졌다. 현재는 다양한 용접방법에 대해 용접부의 열 및 유동과 용접부의 형상에 대한 다양한 컴퓨터 수치해석 연구 결과가 보고되어 있다. 그러나 용접부에서의 미세조직이나 미시편석 현상에 대한 수치해석적 모델링은 아직까지 미흡한 상태이므로 이에 대한 많은 연구가 시급히 요구된다.

용접부의 응고는 모재의 종류 및 용접조건에 따라서 planar, cellular 또는 dendrite 성장을 하게 된다. 본 연구에서는 이러한 결정성장 모양을 고려하여 cellular 성장인 경우에는 1차원 성장을 가정하였고, dendrite 성장 시는 기존의 모델들에서는 전혀 고려되지 않은 1차 수지상과 2차 수지상 가치를 동시에 2차원 해석영역으로 설정하였다. 2차원 해석영역의 크기는 수지상 간격(dendrite arm spacing)을 표현한 이론식 중 최적의 식을 결정하여 예측하였다. 1차 수지상의 성장은 평면성장(planar growth)으로 가정하고, 특히 2차 수지상의 성장에 대해서는 수학적인 성장 패턴함수를 도입한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 고상에서의 용질이동은 확산 방정식을 유한차분법(FDM)으로 차분화하여 계산하였다. 고액 계면에서는 상태도 상의 평형상태를 유지시켜 주고, 상태도 상에서 구한 온도와 측정된 실제 온도가 균형을 이루면서 계면이 이동하도록 처리하였다.

새로운 미시편석 모델의 타당성을 검증해 보기 위해 다양한 용접조건 하에서 예측한 농도 분포를 Fe-Ni 이원계에서 실제 측정된 결과와 비교해 보았다. 또한 결정 성장시 Gibbs-Thomson effect에 의한 Tip 전방의 과냉의 효과를 고려하여 보았다.

제 2 장 Theory

가 정 (Assumption)

성장 모델로 편석을 해석하기 위해 사용한 수치해석 상의 기본 가정은 다음과 같다.

- 1차원(cellular) 또는 2차원(dendrite) 비정상(transient)상태로 해석한다.
- 해석영역 온도는 위치에 관계없이 전체에서 균일하다.
- 응고 중의 고상내로의 확산을 고려고 액상은 완전혼합이라 가정한다..
- 고상과 액상의 계면에서는 상태도 상의 평형상태를 유지한다.
- 조대화(coarsening)에 의한 용질 변화는 무시한다.
- 부피 수축 효과는 무시한다.
- 응고계면은 연속 이동이 아니라 나누어진 요소 단위로 단계적 이동을 한다.

지배 방정식

미시편석을 수치해석으로 계산하는 일반적인 방법은 열전달과 물질전달을 동시에 고려하는 것이다. 1차원의 경우, 고상과 액상 내부에서는 식 (1)과 같은 열전달 방정식과 식(2) 같은 물질전달식을 지배방정식으로 한다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

편석 문제를 해석하는 또 다른 특징 중의 하나는 이동하는 고/액 계면의 위치를 추적하면서 계면에서는 상태도 상의 국부적인 평형을 유지해야 한다는 점이다. 이것은 식 (3)의 온도 관계와 식 (4)의 농도 관계로서 표현할 수 있다. 또한, 식 (5)와 같은 열보존(heat balance)과 식 (6)과 같은 물질보존(mass balance)의 관계도 동시에 유지시켜 주어야 한다.

$$T_s = T_L = T^* \quad (3)$$

$$C_s = k C_L \quad (4)$$

$$\Delta H_f \rho_L \frac{\partial h}{\partial t} = \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) - \left(k_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$(C_L - C_s) = \left(D_s \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) - \left(D_L \frac{\partial C_L}{\partial x} \right) \quad (6)$$

그리고, 고/액 계면에서 온도와 조성의 열역학적인 관계가 다음과 같이 주어진다.

$$T^* = T_0 - m C_L \quad (7)$$

본 연구에서도 위의 관계식을 바탕으로 하고 컴퓨터 수치해를 구하기 위한 새로운 미시편석 모델을 연구하였다.

제 3 장 실 험

Fe-Ni 이원계 합금계에서는 초기 조성이 일정할 때 용접속도에 따른 편석의 경향을 보기 위하여 먼저 일정한 Ni 함량을 갖는 Fe-Ni 이원계합금을 SS41강위에 일정한 양의 순수 Ni foil을 spot 용접하여 고정시킨 후 고입열량(전류 300A, 속도10cm/min) GTAW로 용접하여 약 17.3%Ni의 합금을 만들었다. 표면을 grinding 하여 표면의 산화막을 제거한 후 용접속도(15, 30, 50, 80cm/min)를 변화시키면서 용접을 실시하였다.

농도분석을 위하여 SEM 과 EPMA를 이용하여 수지상 혹은 cellular 내의 농도분포를 조사하였다. Fe-Ni 미세조직 현출을 위한 부식액으로는 Kalling's reagent를 사용했으며 그 조성은 CuCl₂ 2g, HCl 40ml, ethanol 40ml이다.

제 4. 장 결과 및 고찰

초기조성 17.3wt% Ni을 용접속도가 15cm/min ~ 80cm/min 인 경우 cellular 성장을 하였다. 따라서 1차원 모델을 적용하여 미시편석을 수치해석하였고 Fig.1에 용접속도의 영향과 cell-tip의 과냉의 영향을 나타내고 있다. (a)의 경우는 과냉을 고려하지 않은 경우로 용접속도 변화에 의한 농도구배 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 γ -Fe-Ni 계에서의 Ni의 확산속도가 느리고 용접시의 응고속도가 매우 빠르기 때문에 고상으로의 확산할 수 있는 시간이 짧기 때문이다. (b)의 경우는 Gibbs-Thomson effect에 의한 과냉효과를 고려한 결과로서 용접속도가 증가할수록 과냉도가 증가하기 때문에 초기의 생성되는 고상의 농도가 증가하고 있다.

증기하고 있다.

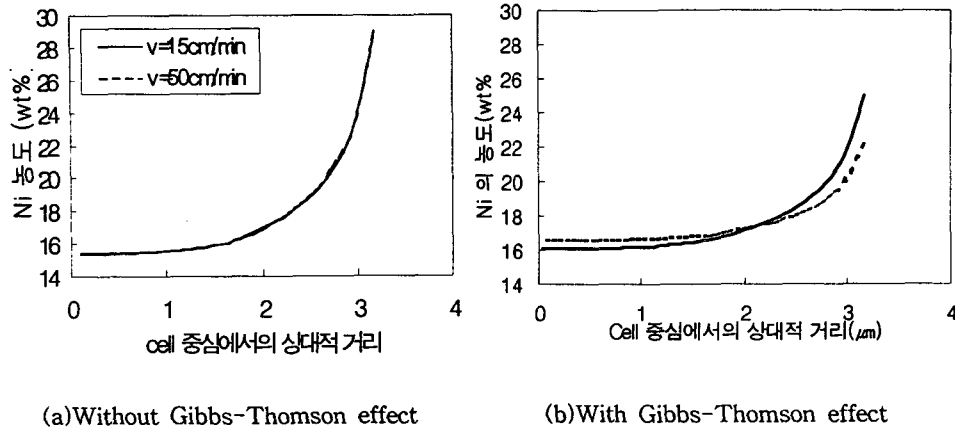


Fig.1 Ni concentration profile with welding speeds

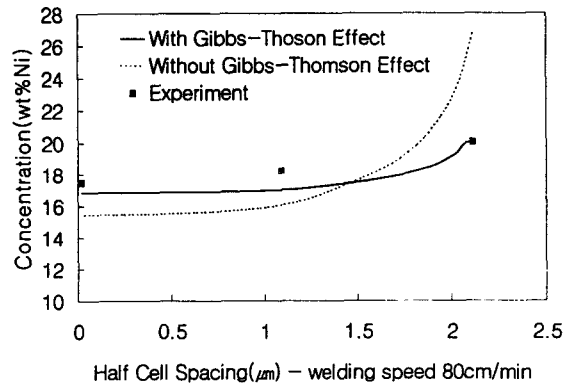


Fig.2 Comparison of the measured and calculated values of C_{Ni} (welding speed 80cm/min)

Fig.2 는 용접속도가 80cm/min인 경우 EPMA 결과와 simulation 결과를 비교하였다. 과냉의 효과를 고려한 것이 실제 실험결과와 가까워지고 있는 것을 알 수 있다. 과냉을 고려하지 않을 경우에 이러한 core의 농도를 갖기 위하여서는 고상에서의 확산속도가 매우 빨라지던가 아니면 냉각속도가 매우 느려져야 된다. 또는 cell의 크기가 매우 작아져야 가능하다. 그러나 이러한 것들은 현실적으로 불가능하므로 용접 시와 같은 빠른 냉각을 하는 경우에는 Tip 전방의 과냉을 고려하여 주어야 한다.

제 5 장. 결론

새로운 미시편석 모델을 개발하여 2원계 Fe-Ni 합금에 적용해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 응고시간이 매우 짧은 용접시는 고상으로의 back-diffusion은 거의 일어나지 않으며 수지상 첨단에 나타나는 과냉의 효과가 크게 나타났다.

2. 용접속도 빠를수록 수지상 침단의 과냉의 정도는 증가하게 되고, 과냉이 증가할수록 응고초기에 생성되는 고상의 농도가 증가하여, 응고마지막 단계의 편석의 정도는 감소하게 된다.

후 기

본 연구는 과학재단(핵심전문과제-961-0801-002-2)의 지원으로 수행되었으며 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박준민,윤의박,이창희; Al-Cu 합금 용접금속부의 미세편석에 관한 해석; 대한금속학회지 Vol36,No5,1998.5; 768-775
2. J.H.Kim, J.W.Park, C.H.Lee, E.P.Yoon; Numerical modeling of microsegregation in binary alloys; Journal of crystal growth; 173; 1997;551-560
3. J. A. Sarreal, G. J. Abbaschian; The effects of solidification rate on microsegregation; Metallurgical transactions A; Vol.17A, November 1986; 2063-2073