

**용접부 응고편석의 수치해석 모델링**  
**Numerical Modeling of Microsegregation in Weld Pool**  
 박진우\*, 윤의박\*, 이창희\*, 안상곤\*\*, 이용득\*\*  
 \*한양대학교, \*\*포스코기술연구소

**1. 서론**

응고중의 용질재분배에 의해 조직에 나타나는 미시편석(microsegregation) 현상은 제 2상이나, 균열, porosity등을 형성시키는 등 기계적 특성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 특히, 용접 등과 같은 급용융, 급냉각의 상황하에서는 편석의 영향은 지배적일 수 있다. 이러한 미세조직과 편석현상을 정량적으로 예측하려는 연구는 이전부터 많이 진행되었다. 최근에는 금속내부의 편석량을 보다 정확하고 효율적으로 예측하기 위해 컴퓨터 수치해석 기법의 적용[1-6]이 시도되고 있다.

용접과 같은 복잡한 상황하에서의 편석현상을 이해하기 위해서는 우선 가장 기본적으로 단순한 조건하에서의 현상을 이해해야 한다. 따라서 본연구에서는 용융부의 편석을 기본적인 응고과정에서 이해하고 접근하기 위해, dendrite 조직의 관찰이 용이한 Al-Cu의 2원계 합금의 경우를 해석하였다. 기존의 1차원 해석 모델을 바탕으로 새로운 2차원 수치해석 모델을 제안하였다. Al-4.9wt.%Cu의 일방향응고실험을 통해 수치해석모델의 타당성을 검증하였으며, 이를 용접 상황에 적용할 수 있는 기초로 삼고자 하였다.

**2. 수치해석 방법**

**2.1 2차원 해석 모델**

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 성장하는 dendrite의 횡단면에서 primary arm과 secondary arm 전체를 2차원 해석영역으로 설정하였다. dendrite 성장에 대해 Fig. 1과 같이 primary 성장단계와 secondary 성장단계의 두단계로 나누고, primary arm 성장에 의한 편석계산을 우선 선행하였다. primary arm의 성장은 계산상의 효율을 위해 planar 성장으로 가정하였고, secondary arm의 경우에는 일반적인 dendrite의 조직의 최종형상에서 유추하여 성장형태를 가정하는 pattern함수를 도입하는 새로운 방법을 제시하였다. 즉, 이동하는 고/액 경계면 위치와 모양을 가정하는 함수를 식(1)와 같이 3차 polynomial형태로 정의해보았으며, 그 형태를 Fig.2에 나타내었다. Fig. 2의 성장 pattern 함수는 x축방향의 크기를  $\alpha$ , y축 방향의 크기를  $\beta$ 로 잡는 경우 다음 식(1)을 얻는다.

$$f(x) = 3\beta\left(\frac{x}{\alpha}\right)^2 - 2\beta\left(\frac{x}{\alpha}\right)^3 \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 를 1로 고정하고  $\beta$ 를 0에서 1까지 변화 시키면 secondary dendrite arm이 y방향으로 성장하는 패턴이 얻어진다.  $\beta$ 를 1로 고정하고  $\alpha$ 를 1에서 0으로 줄여나가면 y축으로 1까지 성장한 arm이 팽창하는 형태의 성장 패턴을 얻을 수 있다.

**2.2 지배방정식의 차별화**

기존의 1차원 물질전달 방정식을 확장하여 식(2)과 같은 2차원 물질전달 방정식을 사용하였다.

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

위의 지배방정식을 전진 차분법으로 차분화하여 확산계산을 하였다. 그리고 고상과 액상의 계면에서는 식(3)과 같이 상태도 상의 평형상태를 유지시키면서 계면의 고상과 액상농도를 각각 구하였다.

$$C_S = k \cdot C_L \quad (3)$$

기존의 연구에서는 식(3)의 분배계수를 상수로 가정하고 해석하는 경우가 일반적이다. 본 연구에서는 이를 개선하여, 실제적인 상태도 데이터를 입력하여 분배계수를 온도와 성분에 따라 변화하는 값을 사용하였다. 또한, 용질의 확산계수도 온도에 따른 변수로 처리하였다.

고/액 계면의 이동은 확산에 의해 구해지는 온도와 실제로 측정된 온도가 균형을 이루면서 진행하도록 처리하였다. eutectic이 있는 합금계의 경우 온도가 eutectic 온도에 도달하면 모든계산을 종료하고 남아 있는 액상영역을 모두 eutectic으로 처리하였다. 이상의 방법으로 편석을 예측하는 프로그램을 작성하였으며 프로그램의 개략적인 flow chart를 Fig.3 에 나타내었다.

### 3. 실험 방법

예측한 편석량을 검증하기 위해 dendrite 조직을 관찰하기 쉬운 Al-4.9wt% Cu 일방향 응고실험을 하였다. iso-brick에 상하방향으로 지름 10mm의 구멍을 뚫은 mold를 준비하고 서로다른 높이에 thermocouple을 위치시켰다. iso-brick을 시료의 용융온도 이상으로 예열하고 아래쪽의 copper chill은 수냉한 상태에서 용탕을 위에서 부터 주입하였다. 아래에서부터 냉각에 의해 떨어지는 온도를 thermocouple로 측정하고, 온도가 Al-Cu 2원계의 eutectic 온도에 도달하는 순간 water quenching 시켰다. 측정된 온도는 프로그램의 입력데이터로 사용하였다. 정확히 thermocouple의 위치에서 시편을 채취하며, 냉각속도가 다른 총 10개의 시편을 얻었다. 채취한 시편은 응고 시간별로 분류를 하고 광학 현미경으로 조직을 관찰하였다. 조직사진을 통해 primary dendrite와 secondary dendrite arm spacing, secondary arm의 높이 등을 여러번 측정하여 평균을 구하였다. 그리고 이것을 프로그램의 입력데이터로 사용하였다. 농도분석을 위해 SEM EPMA를 이용하였으며, eutectic fraction은 조직사진을 image analyser로 측정하였다. 10개의 각 시편마다 여러장의 조직사진을 촬영하고 이를 반복 분석하여 평균 데이터를 구하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4과 Fig. 5는 secondary arm영역에서 응고가 진행되면서 변화하는 용질의 농도를 시뮬레이션하여 3차원으로 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라 고/액 계면에서 액상으로 용질을 배출하는 과정을 잘 보여주고 있다. 최종응고시에 마지막 남은 eutectic 조성의 액상영역 element는 모두 합하여 eutectic fraction으로 계산하였다. Fig. 6에는 응고가 완전히 종료된 후의 등농도분포를 primary와 secondary arm 영역에 대해 나타내었다. 응고시간이 가장 긴 (b)의 경우에 dendrite 내부로 용질이 더 확산됨을 보여주고 있다. 2차원 해석의 결과를 기존의 1차원 해석에의 한 관점에서 분석하고 검증하기 위해 secondary arm 절반 높이에서 폭방향으로의 자른 농도분포와 EPMA에 의한 실측치를 Fig. 7에 나타내었다. 응고시간이 가장 빠른 1번과 느린 10번에 대한 결과를 나타냈다. 시뮬레이션 결과와 실험결과가 모두

잘 일치하였다. 또다른 검증방법으로 시뮬레이션에 의해 예측한 eutectic fraction과 image analyser로 측정한 eutectic fraction을 서로 비교해 보았으며 이를 Fig.7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 결과가 10개의 시편 전반에 걸쳐 비교적 잘일치하였다.

## 5. 결론

새로운 2차원 미시분석 모델을 개발하고 2원계 Al-Cu 합금에 적용해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- i) EPMA에 의한 용질원소 Cu의 농도측정 결과와 시뮬레이션에 의한 예측결과가 잘 일치하였다.
- ii) 시뮬레이션으로 예측한 eutectic fraction이 Image analyser로 측정한 eutectic fraction과 잘 일치하였다.
- iii) 위의 ii) iii)의 결과에서 본 연구에서 제안한 성장 pattern 함수의 도입이 타당성이 있음을 확인하였다.

## 6. 참고문헌

- [1] I. Ohnaka : Transactions ISIJ, 1986, vol.26, pp.1045
- [2] A.Roosz, E.Halder, H.E.Exner : Mat.Sci.Technology, 1985, vol.1, pp.1057
- [3] A.J.W.Ogilvy and D.H.Kirkwood : App.Sci. Reaserch, 1987, vol.44, pp.43
- [4] F. Masuda, H. Nakagawa and J.B.Lee : Transaction JWRI, 1989, vol.18-1, pp.107
- [5] T.P.Battle and R.D.Pehlke : Metall. Trans. 1990, vol.21B, pp.357
- [6] S.Sundarraj and V.R.Voller : Int. J. of Heat Mass Transfer, 1994, vol.21, No.2, pp.189

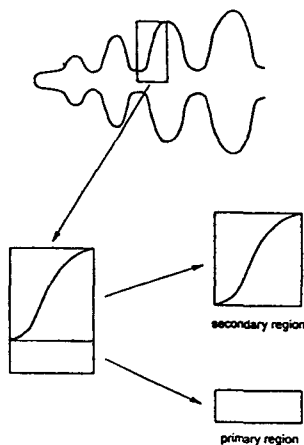


Fig. 1 Schematic illustration of two dimensional model in this study

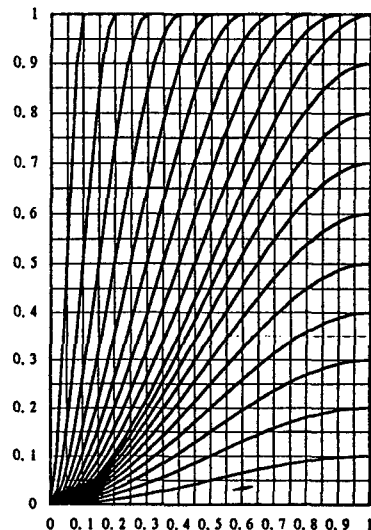


Fig. 2 Definition of growth pattern function by 3rd order polynomial in secondary dendrite arm.

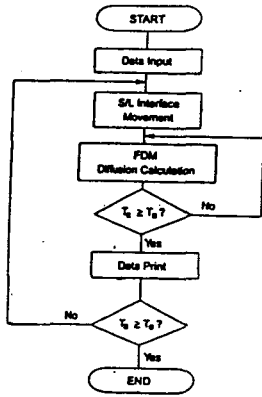


Fig. 3 Flow chart of calculating program

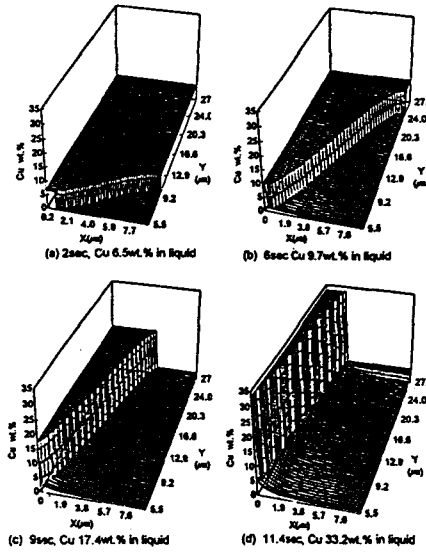


Fig. 4 Variation of concentration predicted by growth pattern function during solidification in specimen 1

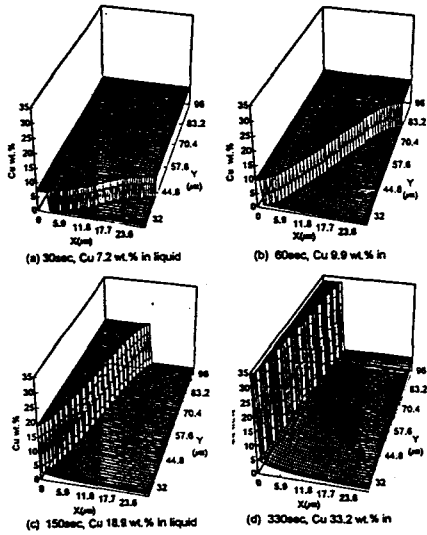


Fig. 5 Variation of concentration predicted by growth pattern function during solidification in specimen 10

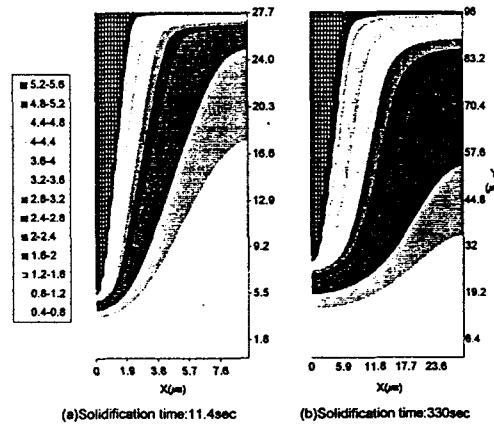


Fig. 6 Concentration profile after solidification in Specimen 1 and 10

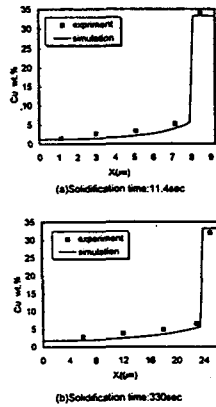


Fig. 7 Comparison of simulated concentration and measured concentration in specimen 1 and 10

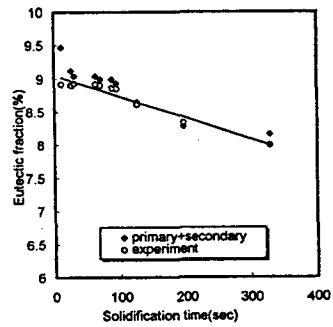


Fig. 8 Comparison of simulated eutectic fraction and measured eutectic fraction