

GTA 용접부에서 편석거동의 수치해석적 모델링 : Part II

(Numerical Modeling of Segregation Behavior in GTA Weld)

박준민, 안상곤*, 이창희, 윤의박
한양대학교 금속공학과

* 포항제철 기술연구소 스테인레스 연구팀

1. 서론

합금의 응고시 그 합금을 구성하는 원소들이 고상으로 변했을 때 균질하게 분포하지 않고 용질 재분배에 의해 어느 부분에서 용질의 농도가 높아지는 편석(macro/micro segregation) 현상이 발생한다. 이런 편석 현상은 비평형 제 2상이나 기공(porosity), 균열 등을 형성시키고 금속 제품의 기계적 특성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 용접 역시 단순한 접합이 아니라 열에 의한 용융 및 응고 process가 포함되므로, 용접조건에 따라 편석이 일어나 용접부의 기계적·화학적 특성을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 이러한 편석에 대한 정량적인 예측을 하기위해 수치해석 모델링¹⁻⁷⁾을 하고자 한다.

2. 수치해석 모델

2차원 해석영역의 설정

성장하는 수지상의 횡단면에서 2차 수지상뿐만 아니라 1차 수지상을 동시에 2차원 해석영역으로 설정하였다. 이렇게 설정한 영역을 x축 방향과 y축 방향으로 등간격의 미소영역으로 분할하고 FDM으로 계산을 하였다.

성장 패턴 함수의 정의

1차 수지상의 성장은 계산상의 효율을 위해 평면성장으로 가정하였다. 2차 수지상의 경우에는 그 성장 형태를 수학적인 패턴함수를 도입하여 성장하는 수지상의 형상을 다음과 같은 다항식으로 표현하였다.

$$f(x) = al_2 \left[3 \left(\frac{x}{\beta \lambda_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{\beta \lambda_2} \right)^3 \right]$$

여기서, $l_2 = 0.36 \lambda_1$, $\lambda_1 = 6(kD_L \Gamma \Delta T_0)^{1/2} G^{-1/2} R^{-1/2} \left[1 - \left(\frac{D_L G}{kR \Delta T_0} \right) \right]^{1/2}$,

$$\lambda_2 = \left(\frac{-128 D_L \Gamma \ln(C_I^m / C_0) t_f}{m_L (1-k) (C_I^m - C_0)} \right)^{1/2}$$

지배방정식의 차별화

농도 계산에 있어서는 액상 내의 완전 혼합을 가정하였으므로 액상의 용질 확산은 무시하였다. 고상에서의 확산 계산을 위해 다음의 2차원 물질전달 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, C 는 농도, 그리고 D 는 확산계수를 나타낸다.

● 초기조건(Initial condition)

Al-Cu	:	$C_0 = 4.9\text{wt}\%$	
		$C_0 = 119\text{wt}\%$	
Fe-Cr	:	$C_0 = 189\text{wt}\%$	at $t=0$
		$C_0 = 0.5\text{wt}\%$	
Fe-Ni	:	$C_0 = 2.0\text{wt}\%$	

● 경계조건(Boundary condition)

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad \text{in } 0 \leq y \leq N, \quad x=0 \text{ and } x=M$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \text{in } 0 \leq x \leq M, \quad y=0 \text{ and } y=N$$

여기서 M 은 x 축으로의 크기이며, N 은 y 축으로의 크기를 나타낸다.

고상의 각 요소에서 앞의 지배방정식 (1)을 전진차분법(explicit method)으로 다음과 같이 차분화하였다.

$$C_S(i, j) = C_{SB}(i, j) + D_S \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \{ C_{SB}(i+1, j) + C_{SB}(i-1, j) - 2C_{SB}(i, j) \} \\ + D_S \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \{ C_{SB}(i, j+1) + C_{SB}(i, j-1) - 2C_{SB}(i, j) \} \quad (2)$$

여기서 C_S 는 현재 시점의 농도, C_{SB} 는 이전 시간의 농도, D_S 는 고상에서의 확산 계수, 그리고 i 와 j 는 각각 x 축 방향의 요소 위치, y 축 방향의 요소 위치를 나타낸다.

3. 실험방법

Al-4.9wt%Cu의 일방향 용고실험

내화벽들을 주형처럼 사용하고 서로 다른 높이에 열전대를 위치시켰다. 내화벽들을 시료의 용융온도 이상으로 예열하고 아래쪽의 구리 냉각판을 수냉한 상태에서 용탕을 위에서부터 주입하였다. 냉각에 의해 떨어지는 온도를 열전대로 측정하였다. 용고 종료 후 고온에서의 고상 확산을 방지하기 위하여 전체의 온도가 Al-Cu 2원계의 공정 온도 이하로 떨어지는 순간 물로 급냉하였다.

냉각속도 측정실험

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)용접기로 강판을 용융시키면서 일정한 속도로 이동시킨다. 이때 용융부에 R type 열전대를 장착하여 시간에 따른 온도의 변화를 측정하여 냉각속도를 구하였다. 용접속도를 13, 20, 35cm/s로 달리하여 각각 냉각속도를 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Al-Cu의 일방향용고

Fig. 1은 실험한 조건중 용고시간이 가장 짧은 경우(11.4sec)에 대한 수치해석 결과로써 2차 수지상 영역에서 변화하는 용질의 농도를 3차원으로 나타낸 것이다. x축은 half secondary dendrite arm spacing, y축은 half primary dendrite spacing이고, z축은 농도를 나타낸다. 시간이 지나면서 성장패턴함수를 따라 2차 수지상이 성장하고 이동하는 계면을 따라 용질재분배 현상에 의해 고상에서 액상으로 용질을 배출하는 과정을 잘 보여주고 있다. 2, 6, 9sec를 지나는 동안 성장 패턴함수를 따라 액상의 Cu농도가 6.5, 9.7, 17.4wt.%로 증가하고 있다. 용고 종료 시간인 11.4sec에는 공정조성인 33.2wt.%까지 도달하고 있음을 보여준다.

Fig. 2는 2차원 해석의 결과를 1차원적 관점에서 분석하고 검증하기 위해 2차 수지상 절반 높이에서 폭 방향으로의 농도분포 변화를 나타낸 것으로 EPMA로 분석한 농도와 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것이다. 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

4.2 Fe-Ni강의 GTA용접부

Fig. 3 ~ Fig. 4는 Fe-2.0wt.%Ni에서 국부용고시간이 가장 짧은 경우(0.0108sec)와 가장 긴 경우(0.1523sec)에 대한 결과로 2차 수지상 영역에서 변화하는 용질의 농도를 3차원으로 나타낸 것이다. 국부용고시간이 0.0108sec의 경우에는 0.002, 0.006, 0.008sec를 지나는 동안 액상의 Ni의 농도가 2.37, 3.13, 3.51wt.%로 증가했고, 용고종료시의 고상의 농도는 3.18wt.%이었다. 국부용고시간이 0.1523sec의 경우에는 0.03, 0.06, 0.12sec를 지나는 동안 Ni의 농도가 2.35, 2.71, 3.39wt.%로 증가했고, 용고종료시의 고상의 농도는 3.01wt.%이었다.

Fig. 5는 Fe-2.05wt.%Ni에서 국부용고시간이 가장 짧은 경우(0.0108sec)와 가장 긴 경우(0.1523sec)에 대한 등농도 분포를 비교한 것이다. 경향을 비교하기 위해 같은 크기의 축으로 맞추어 나타내었다. 용고시간이 가장 긴 (b)의 경우 용질이 확산하는 거리는 길지만 확산할 시간이 충분히 많기 때문에 (a)의 경우보다 수지상 중심으로 확산이 더 많이 진행되어 있음을 알 수 있다.

5. 참고문헌

1. H. D. Brody and M. C. Flemings : Trans. TMS-AIME, 1966, vol.236, pp.615
2. T. W. Clyne and W. Kurz : Metall. Trans. A, 1981, vol.12A, pp.451
3. A. Roos, E. Halder, H. E. Exner : Materials Science and Technology, 1986, vol.2, pp.1149
4. M. Rappaz and V. R. Voller : Metall. Trans., 1990, vol.21A, pp.749
5. S. Sundarraj and V. R. Voller : Int. J. of Heat Mass Transfer, 1994, vol.21, No.2, pp.189
6. I. Ohnaka : Transactions ISIJ, 1986, vol.26, pp.1045
7. F. Masuda, H. Nakagawa and J. B. Lee : Transaction JWRI, 1989, vol.18-1, pp.107

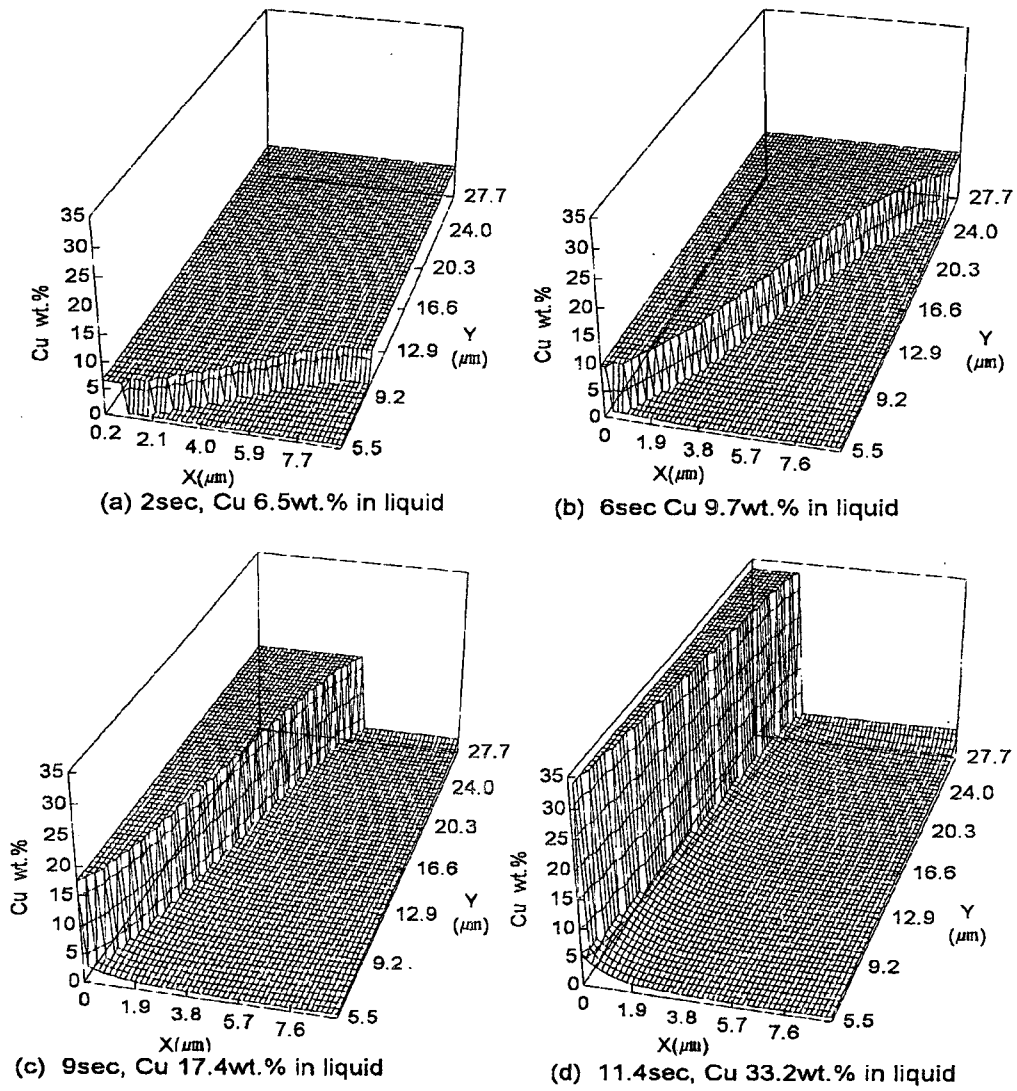


Fig. 1 Variation of concentration predicted by growth pattern function during solidification in case of local solidification time 11.4sec

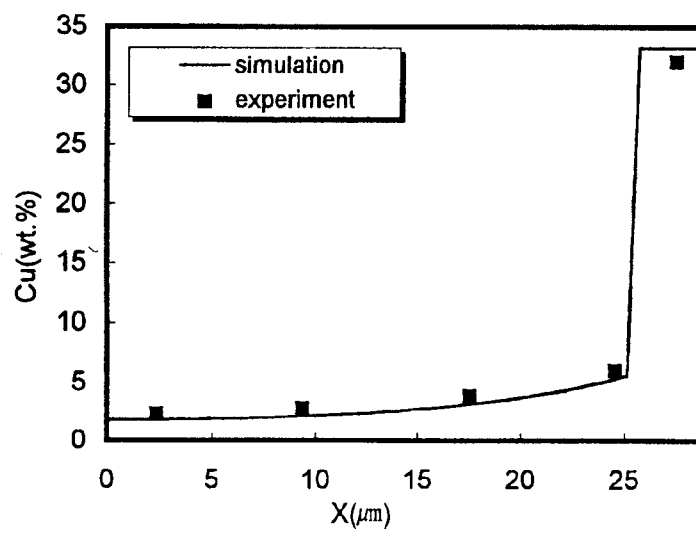
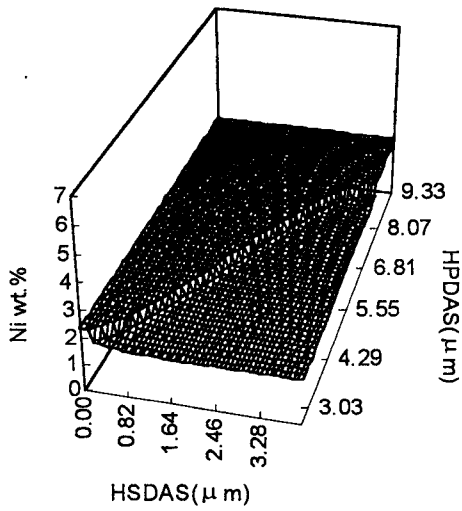
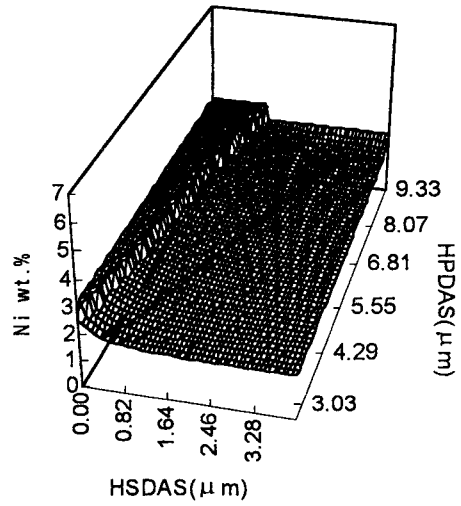


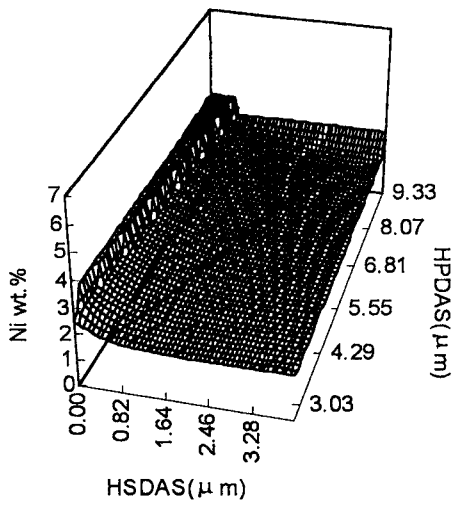
Fig. 2 Comparison of simulated concentration with measured data in case of local solidification time 330sec



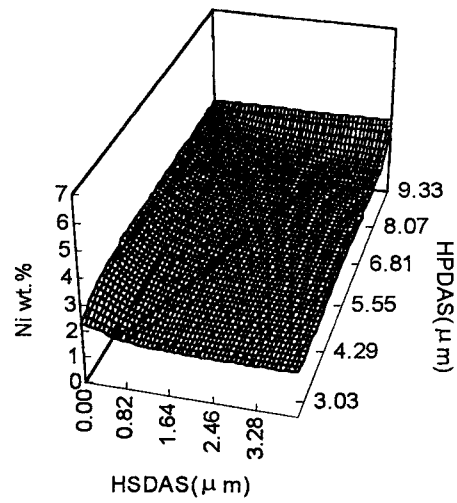
(a) 0.002sec, Ni 2.372wt.% in Liquid



(b) 0.006sec, Ni 3.133wt.% in Liquid

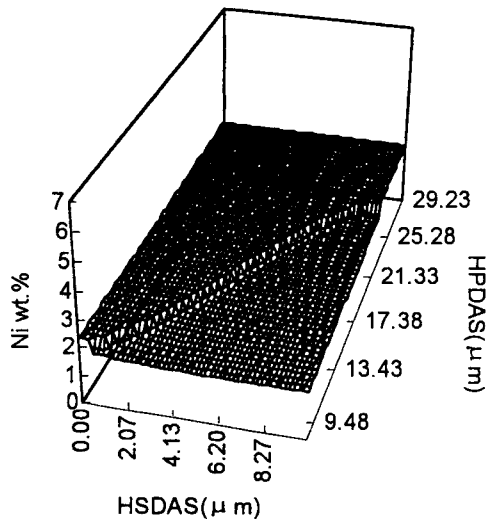


(c) 0.008sec, Ni 3.505wt.% in Liquid

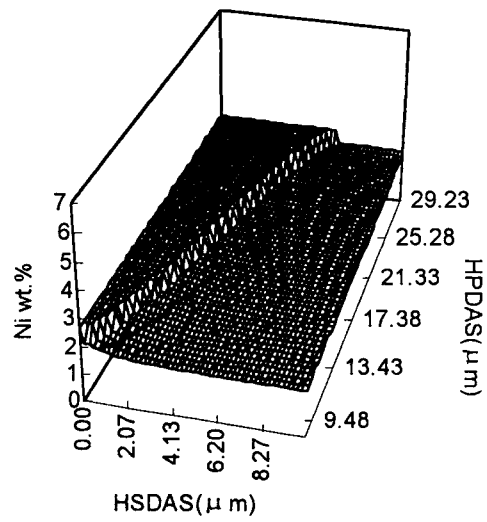


(d) 0.0108sec, Ni 3.184wt.% in Solid

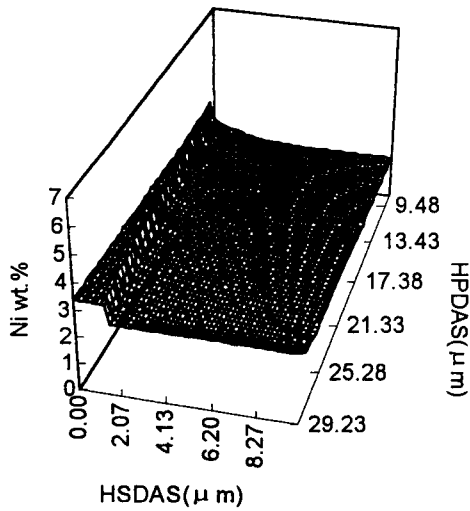
Fig. 3 Variation of concentration predicted by growth pattern function during solidification in case of cooling rate $605\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ in Fe-2.0%Ni (Local solidification time 0.0108sec)



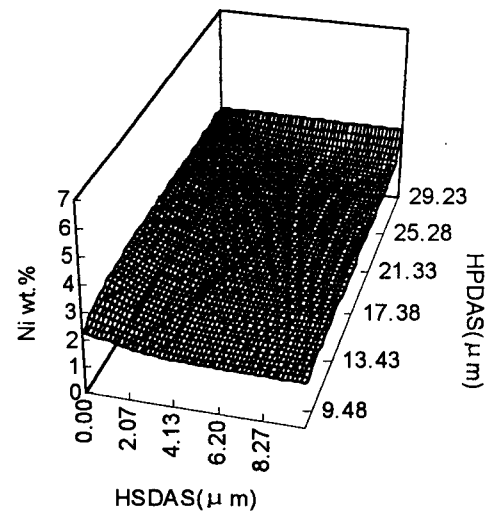
(a) 0.03sec, Ni 2.350wt.% in Liquid



(b) 0.06sec, Ni 2.705wt.% in Liquid



(c) 0.12sec, Ni 3.394wt.% in Liquid



(d) 0.1523sec, Ni 3.007wt.% in Solid

Fig. 4 Variation of concentration predicted by growth pattern function during solidification in case of cooling rate $38\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ in Fe-2.0%Ni (Local solidification time 0.1523sec)

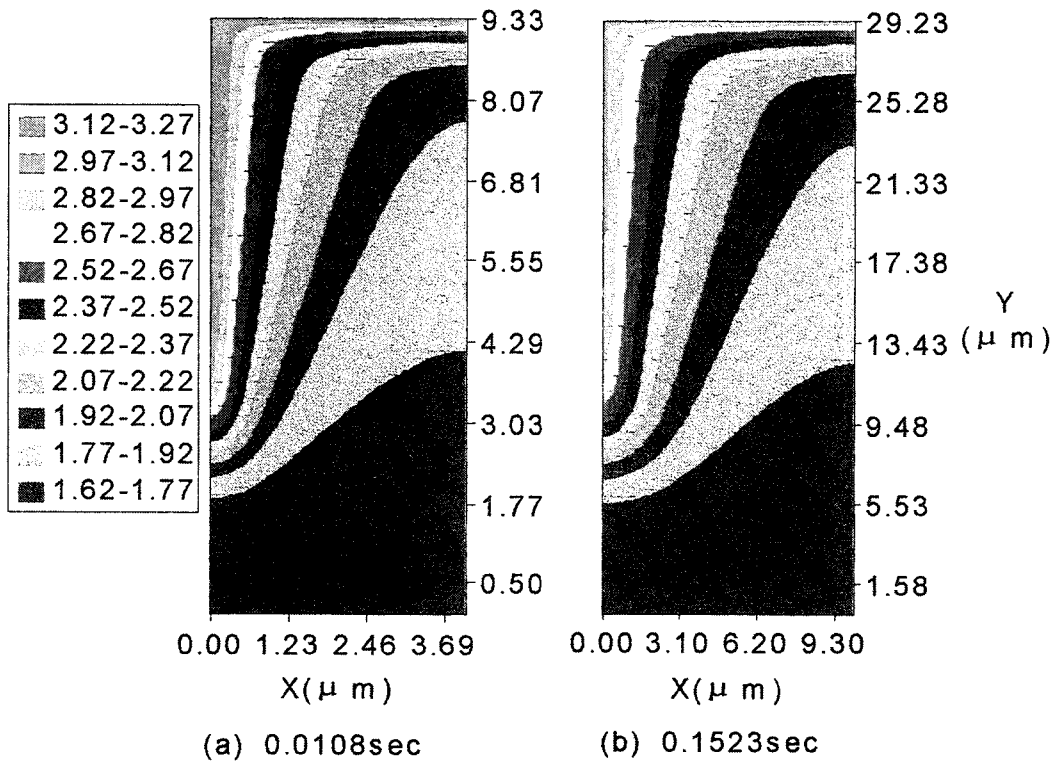


Fig. 5 Concentration profile after solidification in Fe-2.0%Ni
 (a) local solidification time 0.0108sec
 (b) local solidification time 0.1523sec