

용사 공정에서 용융 금속 액적의 충돌현상과 응고 과정 해석

하 응 지* · 김 우 승**

A Study on the impact and solidification of the liquid metal droplet in the thermal spray deposition

Eung-Ji Ha and Woo-Seung Kim

Key Words: Thermal spray(용사), Liquid droplet(금속 액적), Free surface(자유표면), Solidification(응고), Thermal contact resistance(접촉 열저항)

Abstract

In this study, numerical investigation has been performed on the spreading and solidification of a droplet impacting onto a solid substrate in the thermal spray process. The finite difference method with volume-of-fluid approach is used to analyze the free surface flow and the source-based enthalpy method is employed to model the latent heat release during the solidification. In this work, the numerical model is validated through the comparison of the present numerical result with experimental data available for the flat substrate.

<p>기호설명</p> <p>c_p : 비열</p> <p>F : 표면장력에 의한 체력항</p> <p>f : 체적 분율 함수</p> <p>g : 액상 분율</p> <p>H : 혼합엔탈피</p> <p>ΔH : 응고 잠열</p> <p>\vec{n} : 법선 벡터</p> <p>p : 압력</p> <p>T : 온도</p>	<p>α : 열확산 계수 (m^2/s)</p> <p>x : 곡률 (m^{-1})</p> <p>ν : 동점성 계수 (m^2/s)</p> <p>ρ : 밀도 (kg/cm^3)</p> <p>σ : 표면장력 계수 (N/m)</p>
---	---

1. 서론

용사법은 비교적 최근에 발달한 표면피복기술로서 플라즈마, 가스화염 또는 아크열원을 이용하여 금속 또는 비금속 재료를 용융 혹은 반용융 상태로 모재에 고속으로 분사하여 충돌 적층시켜 피복하는 공정이다. 용사과정에서의 열 및 유동 해석은 크게 스프레이 영역과 모재와의 충돌 영역으로 나누어져 진행되어 왔다. 특히 용융 액적의 적층과정에 의한 코팅과정을 올바로 이해하기 위해서는 개개의 액적이 모재와 충돌시 거동이 어떻게 되는가를 알아야 하며, 액적과 코팅 모재

그리스문자

* 회원, 한양대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학과

와의 충돌 과정은 분사 성형(spray forming)에서도 중요한 문제가 되기 때문에 이에 대한 연구가 많이 요구되고 있다.

Trapaga 등⁽¹⁾은 충돌과정을 유한차분법을 사용하여 해석하였다. 이들은 모재가 등온이라고 가정하였으며, 접촉열저항은 무시하였다. 최근에는 Pasandideh-Fard 등⁽²⁾은 유한차분법을 사용하여, 액적과 모재사이의 일정한 접촉 열저항을 고려한 유동과 응고현상을 해석하고 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 향상된 수치해석 방법을 이용하여 단일 용융액적과 모재의 충돌과정에서의 유동과 응고를 해석하였다. 자유표면유동해법의 검증을 위하여, 응고가 일어나지 않는 경우의 유동을 해석하였으며, 모재 내에서의 열전달의 고려가 응고와 유동형태에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 접촉열저항과 최종 응고 스플렛의 크기의 상관관계를 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 해석대상

단일 용융액적이 모재와 충돌하여 응고되는 과정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 고속으로 입사된 액적은 모재와 충돌하여 점성과 표면장력의 상호작용으로 모재 표면에서 반경방향으로 퍼지게 된다. 또한 동시에 모재와의 열전달을 통한 급속한 응고에 의하여 모재표면에 부착된다. 본 연구의 열유동해석을 위해 도입한 가정은 다음과 같다.

(1) 유동은 중심축을 기준으로 대칭을 이루며, 비

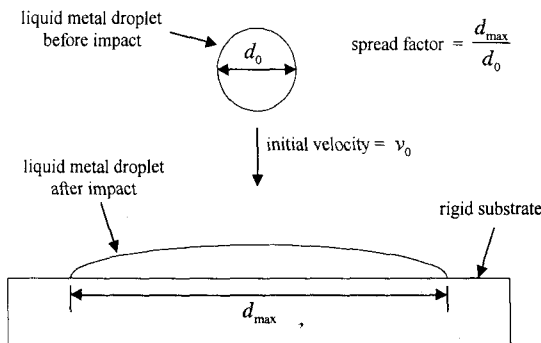


Fig. 1 Schematic of the overall impact problem.

압축성 종류이다.

(2) 용융액적은 모재 표면에서 슬립을 일으키지 않는다.

(3) 용융액적의 자유표면을 통한 외부와의 대류 열전달과 복사열전달은 무시한다.

(4) 열역학적 물성치는 액상과 고상에서 동일하다.

2.2 지배방정식

용융액적의 유동과 응고를 해석하기 위해서는 시간의 경과에 따라 자유표면의 위치와, 액상과 고상의 경계면을 추적할 수 있는 수치해법이 필요하다. 본 논문에서는 고정격자계에서 자유표면 유동을 해석하기 위하여 유체체적법 알고리즘을 적용한 유한 차분법⁽³⁾을 이용하였으며, 엔탈피법을 사용하여 액상과 고상의 경계면을 추적하였다. 2.1절의 가정에 따라 2차원 축대칭 좌표계에서의 비정상 상태 해석을 위한 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + Au + \frac{1}{\rho} F_r \\ & + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Av + \frac{1}{\rho} F_z \\ & + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g_y \end{aligned} \quad (3)$$

유체체적 방정식

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial rfu}{\partial r} + \frac{\partial fv}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial r} + v \frac{\partial H}{\partial z} = \\ \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 식 (2)와 (3)의 F_r , F_z 는 연속표면력(Continuum Surface Force) 모델⁽⁴⁾에 의하여 계산되어지는 표면장력에 의한 등가 체적력(body force)을 나타낸다. 그리고 Au , Av 항은 응고영

역에서의 속도감쇠를 모델링하기 위한 Darcy 생성항이다. 또한 혼합 엔탈피 H 는 온도와 액상분율을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = c_p T + g \Delta H \quad (6)$$

2.3 압력 및 속도 풀이 방법

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 압력 p 와 유체 체적함수 f 값은 제어체적의 중앙에 위치시키고, 속도성분은 제어체적 면에 위치시키는 엇갈린 격자계를 사용하였다. 엇갈린 격자계에서의 속도와 압력을 구하기 위해서는 먼저 이단계 투사법(two-step projection method)을 이용하여 연속방정식과 운동량방정식으로부터 다음과 같은 압력 Poisson 방정식을 구한다.

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho^n} \nabla p^{n+1} \right] = \frac{\nabla \cdot \vec{V}^n}{\Delta t} \quad (7)$$

압력 Poisson 방정식의 계산에는 수렴성을 높이기 위하여 ICCG법(incomplete Cholesky conjugate gradient method)⁽³⁾을 사용하였다.

2.4 자유표면의 추적

본 연구에서는 하나의 제어체적에 점유되어 있는 유체 체적분율의 함수를 이용하는 유체체적법(volume-of-fluid method)을 사용하여 시간과 위치에 따라 변화하는 자유표면을 추적하였다. 유체 체적분율의 함수 $f(r, z, t)$ 는 유체에 의해 완전히 채워진 셀에서는 1의 값을, 빈 셀에서는 0의 값을 가지며, 자유표면을 포함하는 일부가 유체에 의해 채워진 셀에서는 0과 1사이의 값을 가진다. 유체체적법에서는 식(4)와 같은 함수 f

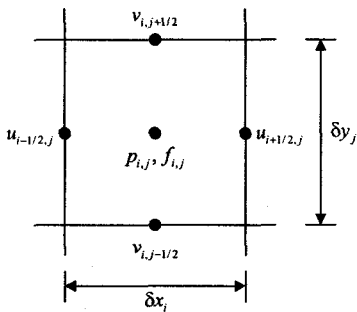


Fig. 2 Location of variables in a typical mesh cell.

에 대한 전달방정식을 풀어서 자유표면을 추적할 수 있다. 식(4)를 이용하여 자유표면을 정확하게 추적하기 위해서는 함수 f 값의 수치적 확산을 방지하며, 자유표면의 형태와 셀 표면을 지나는 유량 δV 를 제대로 예측할 수 있는 차분방법의 도입이 필요하다. 본 논문에서는 기존의 기증자-수해자 도식보다 더욱 정확하게 자유표면의 형태를 결정할 수 있는 PLIC 도식(piecewise linear interface calculation method)⁽⁵⁾을 사용하였다. PLIC 도식에서는 자유표면이 기울기 β 를 가지는 직선으로 나타내어지며, 이 기울기는 인접한 아홉 셀의 정보로부터 얻어진다. 그리고 셀에서의 f 값은 이 직선에 의해 분할되는 다각형 셀의 면적으로 정의된다.

2.5 표면장력과 벽부착력

자유표면에서의 점성효과를 무시하고 표면장력 계수가 상수라고 가정하면, 자유표면에서의 표면장력에 의한 압력조건은 다음과 같이 간략하게 표면압력 p_s 로 나타낼 수 있다.

$$p_s = \sigma \kappa \quad (8)$$

그리고 자유표면의 곡률 κ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\kappa = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[\left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot \nabla \right) |\vec{n}| - (\nabla \cdot \vec{n}) \right] \quad (9)$$

실제의 경우에서 불연속적으로 바뀌는 유체의 경계면은 수치해석상에서 연속적인 천이영역으로 대체된다. 따라서 경계면에서 표면장력에 의한 압력도약(pressure jump)을 적용하는 것은 적절치 않으며 수치적 불안정을 일으키는 요인이 된다. 반면에 연속표면력모델에서는 천이영역내의 모든 곳에서 표면장력이 작용한다고 고려하여 표면장력을 체적력으로 변환하여 다음과 같이 계산한다.

$$\vec{F}(\vec{x}_s) = \sigma \kappa(\vec{x}_s) \nabla f \quad (10)$$

이렇게 구해진 표면장력은 운동량 방정식에서 단위체적당 힘에 포함되어 계산된다.

2.6 응고과정에 대한 모델링

본 연구에서는 상변화면의 위치 계산과 잠열처리를 위하여 Swaminathan과 Voller⁽⁶⁾가 제안한 생성항 처리 엔탈피법을 적용하였다.

밀도와 비열이 온도에 관계없이 각 상에서 일정하고 고상의 속도가 0인 주상형 수지구조 (columnar dendrite)인 경우, 식(6)을 식(5)에 대입하면, 에너지 방정식을 온도방정식으로 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{\Delta H}{c_p} \frac{\partial g}{\partial t} \quad (11)$$

식(11)의 $\frac{\Delta H}{c_p} \frac{\partial g}{\partial t}$ 항을 응고 잠열에 의한 생성항으로 처리하여 제어체적에 대하여 적분하면, 다음과 같은 차분식을 얻을 수 있다.

$$a_P T_P^{m+1} = \sum_{nb} a_{nb} T_{nb}^{m+1} + d_P V [g_P^{old} - g_P^{m+1}] \quad (12)$$

여기서 a_P, a_{nb}, d_P 는 차분식에 의한 계수를 나타내며, V 는 제어체적의 부피를 나타낸다. 그리고 상첨자 old는 전 시간단계의 값, 그리고 $m+1$ 은 반복단계를 표시한다. 식(12)에서 g_P^{m+1} 은 Talyor series 전개를 이용하여 이전 반복단계의 값으로 다음과 같이 선형화시킬 수 있다.

$$g_P^{m+1} = g_P^m + \left(\frac{dg}{dT} \right)_P^m dT \quad (13)$$

식(11)의 해는 예측-수정(predictor-corrector) 과정을 이용한 반복계산법으로부터 얻을 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응고가 일어나지 않는 경우의 유동해석

본 절에서는 PLIC 도식과 연속표면력 모델을 사용한 자유표면 유동 해법의 검증을 위하여, 응고현상이 일어나지 않는 경우의 유동해석을 수행하고 기존의 실험결과⁽²⁾와 비교하였다. 해석에 사용된 용융금속과 모재(substrate)는 각각 주석(tin)과 스테인레스 스틸(stainless steel)이며, 이에 대한 물성치와 초기조건을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 급격한 속도구배와 온도구배가 예상되는 모재표면 부근에 격자를 밀집시킨 비균일 격자계를 사용하였다. 또한 모재와 용융금속과의 상호열전달을 해석하기 위하여 모재영역을 계산영역에 포함시켰다.

Fig. 3에 수치적으로 해석한 액적충돌 과정을

Table 1 Material properties and initial condition of molten tin droplet and stainless steel substrate.⁽²⁾

Tin	
Density (kg/m ³)	7000
Kinematic viscosity (m ² /s)	2.64 × 10 ⁻⁷
Surface tension coefficient (N/m)	0.544
Thermal diffusivity (m ² /s)	1.714 × 10 ⁻⁵
Thermal conductivity (W/m·K)	30
Latent heat of fusion (J/kg)	6.07 × 10 ⁴
Melting temperature (°C)	232
Impact velocity (m/s)	1.6
Droplet diameter (mm)	2.1
Initial temperature (°C)	240
Stainless Steel	
Thermal diffusivity (m ² /s)	3.95 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity (W/m·K)	14.9

진행시간에 따라 나타내었다. 액적은 모재에 충돌한 후 반경방향으로 퍼지면서, 약 3ms에서 최대 스프레트를 형성하게 된다. 액적 직경에 대한 최대 스프레트 직경의 비는 3.29로 실험에서 구한 3.3과 거의 일치하였다. 4ms이후에는 표면장력이 충돌속도에 의한 관성력을 상쇄시키면서 스프레트가 다시 액적의 중심으로 모이는 것을 볼 수 있다. 액적이 퍼져나가는 동안의 예측결과는 실험결과와 잘 일치하고 있으나, 액적이 다시 중심에서 모아져서 수직방향으로 튀어 오르는 시간은 실험결과보다 1ms 정도 빠르게 나타났다. 이는 실험에서는 3차원 현상인 용융 주석과 공기의 밀도차에 의한 Rayleigh-Taylor instability의 결과로 액적의 가장자리에서 파동형태가 만들어져 유동형태에 영향을 미치는데 반해서 본 연구에서는 2차원 축대칭 좌표계를 사용하였기 때문에 R-T instability의 영향을 고려할 수 없는 결과로 보인다. 그러나 최대 스프레트의 크기와 시간 진행에 따른 유동형태는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 확인 할 수 있다.

3.2 응고가 일어나는 경우의 유동해석

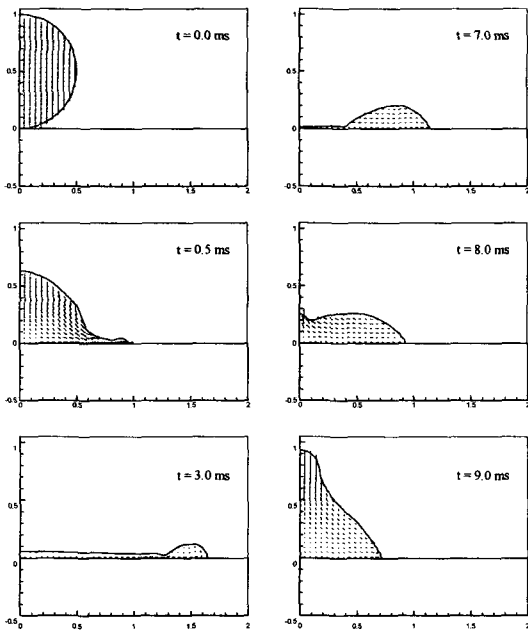


Fig. 3 Splashing sequence of a liquid tin droplet

본 절에서는 모재의 초기온도가 실온인 25 °C로 유지되고 있을 때 용융 주석 액적이 모재와 충돌하여 유동과 응고가 동시에 일어나는 경우의 수치해석을 실험결과와 비교하였다. 응고를 수반한 유동인 경우에는 액적과 모재사이의 접촉열저항이 응고의 진행에 따라 변하기 때문에 국소 열전달 계수가 시간과 공간에 따라 변하게 되며 이는 해석의 어려움을 야기 시킨다. 본 논문에서는 중심부근에서 바깥 부분으로 갈수록 액적표면과 모재표면의 접촉시간이 단축되면서 급속응고로 인해 접촉면적이 작아져서 접촉열저항이 증가한다고 가정하였다. 이러한 가정하에 실험으로부터 구한 액적 충돌지점에서의 모재의 온도변화와 스플릿 직경의 변화로부터 열전달계수를 추정하였으며, 이때의 중심에서의 최대 열전달 계수값은 $h_c=2 \times 10^5 \text{W/m}^2\text{K}$ 이다. 또한 반경방향에 대한 국소 열전달계수의 분포형태를 다음과 같은 가우시안(Gaussian) 분포로 가정하였다.

$$h_c = h_{c, \max} \exp\left(-\frac{a \cdot r^2}{d^2}\right) \quad (14)$$

Fig. 4에 응고가 일어나는 경우의 유동형태 및

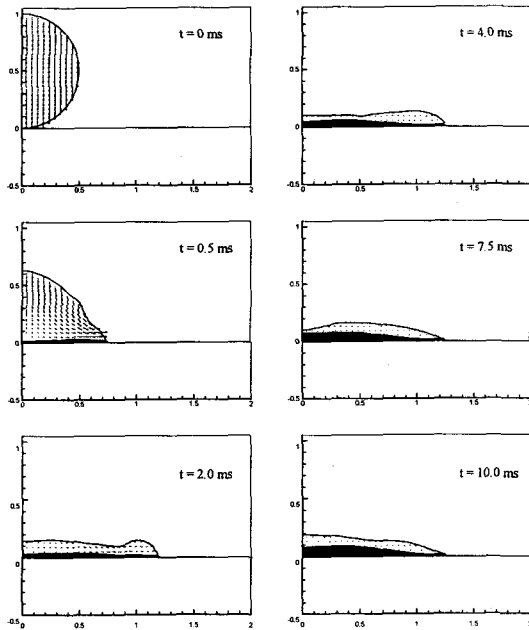


Fig. 4 Splashing and solidification sequence of a liquid tin droplet

응고진행태를 나타내었다. 용융액적으로부터 모재로의 열전달로 인해 액적의 온도가 용융점 아래로 떨어지면서 응고가 진행되는데, 모재 표면과 접촉하는 부분을 따라 응고층이 성장하게 된다. 중심부근에서는 시간이 경과함에 따라 높은 열전달율로 인하여 응고층이 가장 두껍게 나타나게 된다. 4ms이후에 액적의 가장자리에서 응고가 완전히 일어나면, 액적은 더 이상 퍼지지 못하게 되고 응고층 위에 남아있는 용융층만 중심방향으로 되돌아가면서 계속 응고가 진행된다.

Fig. 5에는 시간에 따른 최대 스플릿 직경비를 실험결과와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 사용한 가우시안 분포형태의 대류열전달계수로 계산한 경우와 각각 $h_c=1 \times 10^5$ 과 $1 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}^{(2)}$ 인 상수로 가정한 경우의 값을 비교하였다. 세가지 해석 경우 중에서 가우시안 분포로 가정한 경우가 가장 실험값에 근접한 스플릿 직경비를 나타내기는 하지만 실험에서 구한 응고완료시점에서의 스플릿 직경비와는 0.2 정도의 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에는 시간에 따른 모재 중심에서의 온도

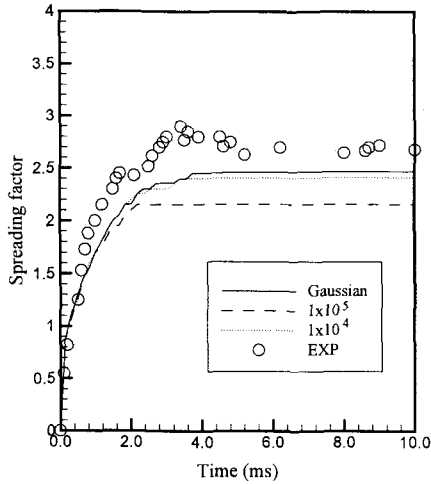


Fig. 5 Evolution of spread factor during impact of tin droplet

분포를 나타내었다. 실험에서는 1ms 이내에 모재의 온도가 25 °C에서 160 °C로 급격히 상승한 후 냉각이 시작되면서 온도가 거의 일정하게 유지된다. 해석 결과에서는 가우시안 분포일 때가 가장 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서 대류 열전달 계수를 반경 방향에 대한 가우시안 분포

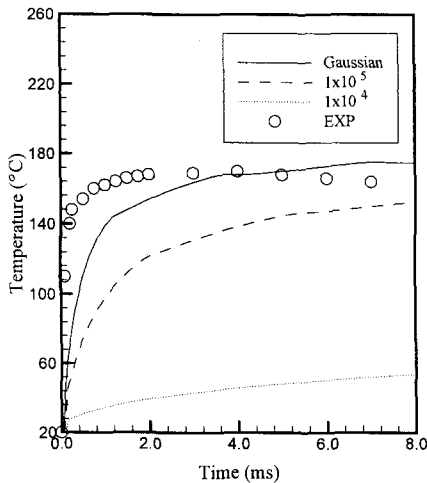


Fig. 6 Temperature variation of the substrate surface temperature during the impact of a molten tin droplet

로 가정한 경우에는 최대 스프레드 직경비와 모재 표면 온도분포를 실험과 유사하게 예측할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 용사과정에서 단일 용융 액적이 모재에 충돌하여 응고되면서 모재 표면에 피복되는 과정을 수치적으로 해석하였다. 실제 용사과정과 같이 응고를 수반한 유동을 해석하는 경우에는 국소 열전달계수에 따라 모재 표면의 온도 변화와 최대 스프레드 직경이 변하게 되므로, 시간과 반경방향에 대하여 국소열전달계수의 분포 형태를 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 반경방향에 대한 가우시안 분포로 대류 열전달계수를 가정하여 타당한 해석 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) Trapaga, G., Matthys, E. F., Valencia, J. J., and Szekely, J., 1992, "Fluid Flow, Heat Transfer, and Solidification of Molten Metal Droplets Impinging on Substrate: Comparison of Numerical and Experimental Results", Metall. Trans. B, Vol. 23B, pp. 701-718
- (2) Pasandideh-Fard, M., et al., 1998, "Deposition of Tin Droplets on a steel plate: Simulations and Experiments", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, pp. 2929-2945
- (3) Kothe, D. C., and Mjolsness R. C., 1992, "RIPPLE: A Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces", AIAA Journal, Vol. 30, pp. 2694-2700
- (4) Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C., 1992, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", J. Comput. Phys., Vol. 100, pp. 335-354,
- (5) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstructing Volume Tracking", J. Comput. Phys., Vol. 141, pp. 112-152
- (6) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1993, "On the Enthalpy Method", Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol. 3, 233-244