액적 충돌에 동반된 열전달에 관한 수치적 연구

김 성 일† · 손 기 헌*

Numerical Study of Heat Transfer Associated with Droplet Impact

Sungil Kim and Gihun Son

Key Words: Droplet Impact(액적 충돌), Level Set Method(Level Set 방법), Advancing Contact Angle(퍼짐접촉각), Receding Contact Angle(수축접촉각)

Abstract

Numerical analysis of the heat transfer associated with droplet impact on a hot solid surface is performed by solving the mass, momentum and energy equations for the liquid-gas region. The deformed droplet shape is tracked by a level set method which is modified to achieve volume conservation during the whole calculation procedure and to include the effect of contact angle at the wall. The numerical method is validated through test calculations for the cases reported in the literature. Based on the numerical results, the effects of advancing/receding contact angle, impact velocity and droplet size on the heat transfer during droplet impact are quantified.

1. 서 론

액적-벽면 충돌문제는 디젤엔진과 직접 분사식 가솔린엔진의 액체연료 분사, 잉크제트 프린팅, 부식 방지를 위한 물체표면의 분사코팅 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히, 분사 냉각은 액체를 미립화함으로써 표면적을 증가시켜 질량 및 열전달을 크게 하는 방식으로 열교환기, 탱크의 외벽면, 철강재, 저장 창고의 지붕, 터빈 날개의 냉각 등에 사용되고 있다. 액적이 벽면에 충돌할 때 액적은 매우 짧은 시간에 퍼짐, 되감김(recoil), 되튐(rebound), 분열 등으로 심하게 변형되기 때문에 실험만으로 충분히 해석하기 어렵다. 이러한 액적-벽면 충돌거동에 대한 이해를 넓히기 위해서 실험방법 외에 현상을 지배하는 질량 및 운동량 보존법칙을 수치적으로 직접 해석하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

액적-벽면 충돌에 관한 수치해석은 Marker-and-Cell 기법을 사용한 Harlow와 Shannon[1]에 의해서 처음으로 수행되었다. 그들의 수치해석에서는 점성과 표면장력의 영향이 고려되지 않았기 때문에 충돌 초기에 일어나는 액적의 퍼짐에 대한 결과만 얻었다. Trapaga와 Szekely[2]는 Hirt와 Nichols[3]에 의하여 제안된 Volume-of-Fluid(VOF) 방법을 사용하여 액적-벽면 충돌문제를 해석하였다. 계산에 점성 및 표면장력의 영향이 고려되었으나 액적이 퍼진 후 되감기는 현상에 대한 결과는 얻을 수 없었다. 뜨거운 고체표면에 충돌하는 액적의 냉각효과는 수정된 VOF 방법을 이용한

† 서강대학교 대학원 기계공학과
* 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과
E-mail : gihun@ccs.sogang.ac.kr
TEL : (02)705-8641 FAX : (02)712-0799

Pasandideh-Fard 등[4]에 의해 계산되었다. 액적-벽면 충돌에 대한 실험데이터와 일치하는 계산결과는 점성과 표면장력의 영향뿐만 아니라 퍼짐접촉각(advancing contact angle) 및 수축접촉각(receding contact angle)을 고려한 Fukai 등[5,6]에 의해 얻어졌다. 그러나, Fukai 등이 사용한 유한요소법은 액적의 되튐, 분열과 같이 액적이 복잡하게 변형하는 경우에 적용하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Bussman 등[7,8]은 Hirt와 Nichols[3]의 VOF 방법보다 상경계면을 정확하게 결정할 수 있도록 개선된 PLIC(Piecewise Linear Interpolation Calculation) VOF 방법을 사용하여 수평벽면뿐만 아니라 경사벽면에 충돌하는 액적거동을 해석하였다. Bussman 등의 수치해석에서도 접촉각의 영향이 고려되었으나, Fukai 등[5,6]과 달리 접촉각은 액적-기체-벽면의 접점속도의 함수라는 모델을 사용하였다.

일반적으로 VOF 방법은 각 상의 질량보존이 잘된다는 장점을 가진 반면, 공간상의 이차 미분이 포함되는 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이 문제를 개선하기 위해 Sussman 등[9]은 상경계면으로부터의 거리로 정의된 함수를 사용하는 Level Set(LS) 방법을 제시하였다. 미분이 연속적인 LS 함수는 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 수 있기 때문에 마이크로 스케일 이상유동 해석에 효과적이다. 하지만 LS 방법은 각 상의 체적을 일정하게 유지하지 못하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 질량보존을 위한 알고리즘을 결합한 LS 방법을 바탕으로 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 뿐만 아니라 각 상의 질량을 잘 보존하는 수치기법을 개발하고, 이를 통하여 마이크로 액적-벽면 충돌 시 고체표면으로부터의 열전달 특성을 규명하고자 한다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

액적-벽면 충돌에서의 액적거동을 축대칭, 비압축성과 층류 조건하에서 수치 해석하였다. 고체의 열전도율이 큰 것으로 가정하여 고체표면의 온도는 일정한 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 고체표면 온도를 비등을 일으키지 않는 끓는점 이하로 한정하였다. 기상-액상영역 모두에 적용될 수 있는 질량보존, 운동량보존, 에너지 및 LS 함수를 지배하는 방정식은 다음과 같다.[10]

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\nabla p + \boldsymbol{f}_b + \nabla \cdot \tau \tag{2}$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T \tag{3}$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \tag{4}$$

여기서,

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \tag{5}$$

$$\boldsymbol{f}_b = \rho \boldsymbol{g} - \sigma \kappa \nabla H \tag{6}$$

$$\tau = \mu [\nabla u + (\nabla u)^T] \tag{7}$$

상경계면($\phi = 0$)은 식(4)에 의해 결정되어지고 H와 κ를 정확하게 계산하기 위해 LS 함수를 거리함수($|\nabla \phi| = 1$)가 되도록 식 (14)를 사용하여 보정하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(1 - |\nabla \phi|) \tag{14}$$

여기서, S는 LS 함수의 부호를 나타내며 Sussman 등[9]은 다음과 같이 제안하였다.

$$S = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + h^2}} \tag{15}$$

이론적으로 상경계면($\phi = 0$)에서 S=0이므로 식 (14)는 상경계면을 변화시키지 않는다. 그러나 많은 선행연구에서 차분화된 식 (14)는 상경계면을 변화시키는 경향이 있으며, 이로 인해 각 상의 질량이 일정하게 유지되지 못하는 문제점이 발생된다. 본 연구에서는 상경계면에 바로 인접한 격자점에서 식 (14)를 풀지 않는 방법을 사용함으로 질량손실의 문제를 현저히 개선하였다.

2.2 접촉각 조건

접촉각(θ)은 Fig. 1과 같이 정의된다. 실제 표면

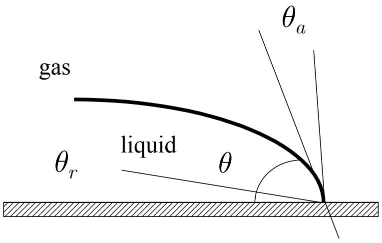

Fig. 1 Definition of contact angle

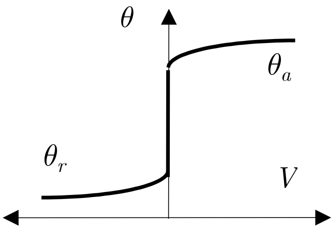

Fig. 2 Variation of contact angle with contact line velocity

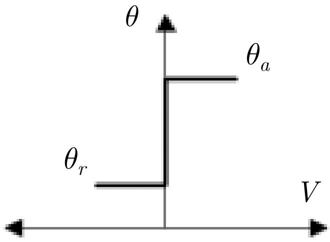

Fig. 3 Models of dynamic contact angle versus contact line velocity proposed by Fukai et al.[5]

에서는 접촉각은 퍼짐접촉각(θ_a)와 수축접촉각(θ_r) 사이에서 변한다($\theta_r \le \theta \le \theta_a$). Dussan[11]은 실험데이터로부터 Fig. 2와 같은 접촉각과 접점의 이동속도(V)에 대한 관계를 제시하였다. 접점의 속도가 양이면 접촉각이 약간 증가하다가 θ_a인 값에서 일정하게 되며, 접점의 속도가 음이면 접촉각은 약간 감소하다가 θ_r로 일정한 값을 갖게 된다. 접점의 속도가 영이면 액적은 고체표면에 붙어 움직이지 않지만 접촉각은 $\theta_r < \theta < \theta_a$로 변하게 된다. Fig. 3은 접촉각의 변화를 수치해석 방법에 적용하기위해 제시된 모델을 나타낸다. Fukai 등[5]은 Dussan[11]의 실험결과에 근접한 Fig. 3과 같은 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 실험결과에 보다 근접하고 θ_a, θ_r의 매개변수만 필요로 하는 Fukai 등의 접촉각 모델을 LS 방법에 적용하였다.

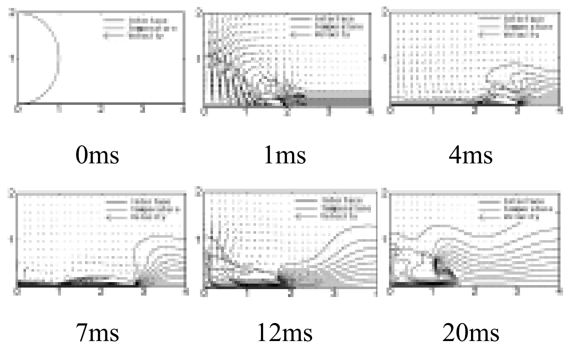

Fig. 4 Evolution of droplet shape, temperature field and streamline for $\theta_a = 70^\circ$ and $\theta_r = 37^\circ$

2.3 경계조건

· 대칭면 ($r = 0,\ R$):

$$u = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \qquad (15)$$

· 고체의 밑면 ($y = 0$):

$$u = v = 0,\ T = T_w,\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\cos\theta \qquad (16)$$

· 계산영역의 윗면 ($y = Y$):

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \qquad (17)$$

3. 계산결과 및 검토

3.1 액적 거동과 국소 열전달량

액적-벽면 충돌에서 액적반경이 1mm이고 충돌속도가 1m/s인 경우에 대하여 액적거동, 온도장 및 속도를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 초기 고체표면의 온도는 100℃이고 액적의 온도는 20℃이며 액적의 물성치는 온도에 따라 일정하다고 가정하였다. 액적-벽면 충돌과정의 초기에는 관성력에 의해 얇은 액막이 벽면에 형성된다. 액적-기체-벽면의 접점이 반경 바깥방향으로 이동하는 동안 접촉각은 θ_a로 유지되어 선단부분이 볼록하게 된다. t=3.79ms에서 액막은 최대반경 3.00에 도달하게 되고 t=4.90ms가 될 때 일정한 θ_r을 유지하며 축적된 표면장력의 탄성에너지에 의해 되감기기 시작한다. 온도장은 액적이 퍼질 때까지 벽면을 따라 수평하게 형성되어 있다가 액적이 되감기기 시작하면서부터 변형되기 시작한다. 액막이 퍼질 때, 액막 내의 유동속도는 액적의

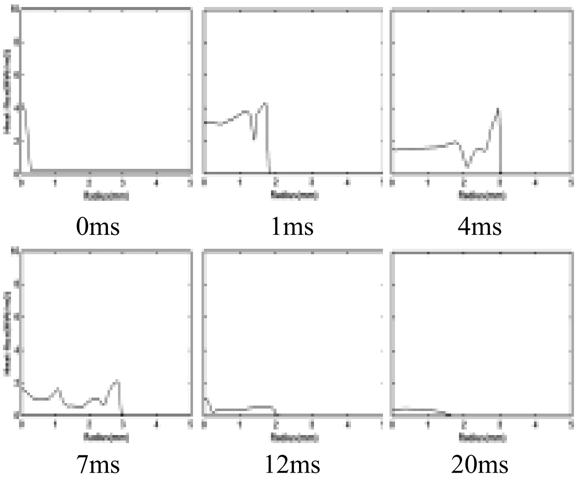

Fig. 5 Substrate heat flux distribution for $\theta_a = 70^\circ$ and $\theta_r = 37^\circ$

중심을 기준으로 반경방향으로 갈수록 증가한다. 하지만, 선단의 융기가 시작되는 지점에서는 반경방향으로 향하는 유동과 액적의 끝부분에 부딪혀 돌아오는 유동이 만나게 되어 정체영역을 형성하게 된다. Fig. 5는 시간에 따른 고체표면의 열유속을 나타낸 것이다. 액막 내의 수직/수평 유동속도는 고체표면과 액적사이의 열유속에 밀접한 관계가 있다. 고체면으로 향하는 수직유동은 차가운 액체를 벽면 쪽으로 운반해주는 역할을 하여 접촉면에서 ΔT를 크게 해주고 수평유동은 액막내의 열경계층이 성장하는 것을 막아준다. 선단부분에서 열유속은 다른 곳에 비해 상당히 크다. 이러한 이유는 액적이 벽면을 따라서 퍼질 때, 고체면과 처음으로 만나는 부분이 액적의 선단부분이므로 ΔT에 의한 열전달이 크기 때문이고 선단부분에서 형성되는 순환유동에 의하여 상대적으로 차가운 액막 위부분의 액체가 고체표면과 접촉하기 때문이다. 고체표면과 기체사이의 대류에 의한 열전달은 액체와 비교해볼 때 매우 작기 때문에 Fig. 5에 열유속이 거의 없는 것으로 나타나있다.

3.2 퍼짐 접촉각의 효과

θ_r을 일정하게 유지시켜 θ_a의 변화에 따른 액막의 반지름 및 열전달량을 Fig. 6에 나타내었다. θ_a를 제외한 다른 조건은 Fig. 4와 같다. θ_a가 감소하면 액적의 최대반경과 열유속이 증가하는 것

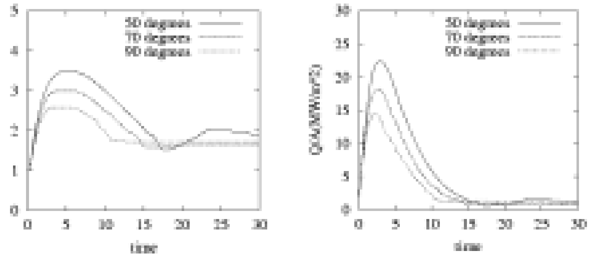

Fig. 6 Effect of advancing angle on splat radius and heat transfer with $\theta_r = 37^\circ$

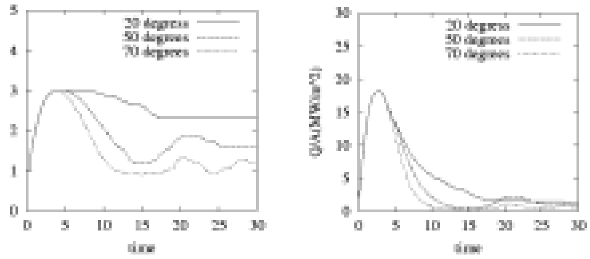

Fig. 7 Effect of receding angle on splat radius and heat transfer with $\theta_a = 70^\circ$

을 볼 수 있다. 액막의 초기 퍼짐은 표면장력보다 액적의 관성력에 의해 지배를 받지만, 액막이 퍼짐에 따라 액적의 운동량이 점성 마찰력에 의해 감소하게 되면 표면장력의 영향이 중요하게 된다는 것을 의미한다. θ_a의 크기가 작아질수록 표면장력의 반경방향 성분이 액적 퍼짐 방향으로 기울어지므로 퍼짐 접촉각이 작아질수록 액막의 최대 반지름은 증가하게 된다. 즉, θ_a가 작아질수록 액적과의 접촉 면적이 증가하게 되고 열유속은 커지게 된다. θ_a가 감소함에 따라 액막의 최대 반경이 증가하는 경향은 일정한 체적을 유지하면서 접촉각을 감소시키면 기하학적으로 액막의 반경은 증가한다는 사실과 일치한다. 또한, 액막의 최대 반경이 증가하여 표면장력의 탄성에너지가 커지는 경우에 액막의 되감김 및 재확장 과정이 더 빠르게 진행된다.

3.3 수축 접촉각의 효과

수축접촉각(θ_r)의 변화가 액막의 반지름 및 열전달량에 미치는 영향은 Fig. 7과 같다. θ_r이 작아지면 액적의 반경은 최대반경이후 느리게 감소하며 열전달량도 차이가 있는 것을 볼 수 있다. θ_r과 θ_a의 차이가 증가하면 접촉각이 θ_a에서 θ_r로

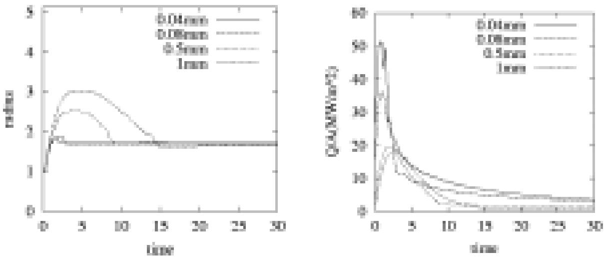

Fig. 8 Effect of radius size on splat radius and heat transfer with $V_0 = 1\,m/s$

변하는 시간 즉 액적-기체-벽면의 접점이 정지해 있는 시간이 늘어나고 θ_r이 줄어들면 액적의 되감김은 표면장력의 반경방향 성분($\cos\theta_r$)의 영향을 받기 때문에 되감김 속도가 작아진다. 그러므로 θ_r이 작을수록 열전달이 일어나는 시간은 길어지고 열전달량은 증가하게 된다.

3.4 액적 크기의 효과

액적의 반경을 변화시켜 액막의 반지름 및 열전달량을 Fig. 8에 나타내었다. 액적반경이 커지면 R/R_0는 증가하지만 열유속의 크기는 작아진다. 예를 들어 액적반경 0.04mm와 1mm를 비교해보면, 액막 반지름이 최대일 때, 열유속은 각각 $51.2MW/m^2$와 $18.2MW/m^2$이다. 체적(V)은 반경의 세제곱에 비례하고 동일체적에 대한 액적의 개수는 이의 역수임이므로 동일 체적에 대한 열전달량은 0.04mm인 경우가 1mm인 경우보다 29.9배정도 크다. 표면적의 증가율은 반경의 역수에 비례하므로 반경이 작아질수록 고체와 접촉할 수 있는 표면적이 커지고 접촉표면적의 증가는 질량 및 열전달을 효과적으로 한다. 스케일이 매크로한 경우, 즉 0.5mm와 1mm의 열전달량의 차이를 비교해보면 동일한 체적에 대하여 액적의 반경에 비례하는 2배정도의 차이를 보인다. 하지만, 스케일이 마이크로한 0.04mm와 0.08mm의 열전달량의 차이는 2.8배이다. 이 값의 차이는 액적의 초기반경이 작아질 경우 Fig. 8에서 보이는 것처럼 R/R_0이 줄어들기 때문에 나타나는 크기이다.

3.5 액적 충돌 속도의 효과

Fig. 9는 액적반경이 1mm인 경우에 대한 액적 충돌속도의 변화가 액적의 반지름 및 열전달량에 미치는 영향을 보여준다. 액적의 충돌속도는

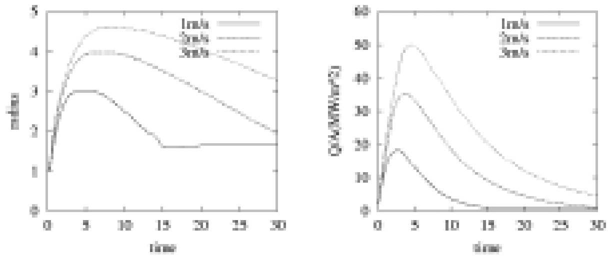

Fig. 9 Effect of impact velocity on splat radius and heat transfer with $R_0 = 1\,mm$

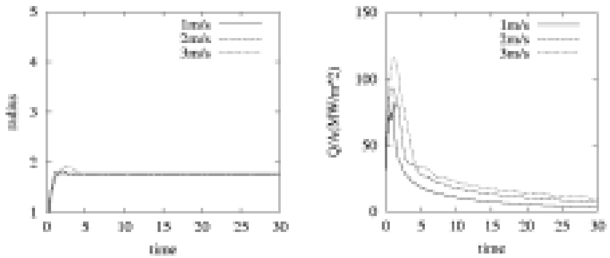

Fig. 10 Effect of impact velocity on splat radius and heat transfer with $R_0 = 20\mu m$

1m/s에서부터 3m/s까지 변하고 속도의 증가에 따라 액적의 최대반경은 약 20%정도의 증가세를 보인다. 액적-벽면 충돌속도가 커짐에 따라 고체면으로부터 액막으로 열전달이 잘 일어날 수 있는 접촉면적은 증가하게 된다. 액적반경이 20μm인 경우는 Fig. 10에 나타내었다. 초기 액적반경이 1mm인 경우와 비교해보면, 액막의 반지름은 속도의 변화에 영향을 받기는 하지만 그 차이가 크지 않다. 또한, 열유속의 변화율이 작아진 것을 볼 수 있다. 이는 액적반경이 작아지면 관성력은 R_0^2에 비례하여 작아지지만, 표면장력과 점성력은 R_0에 비례하여 작아지기 때문이다. 즉, 액적의 크기가 작아질수록 관성력보다 표면장력과 점성력에 의한 영향력이 더 커지므로 속도의 변화에 따른 퍼짐반경의 차이가 작아진다. 크기 스케일에 따른 액막반경과 열전달량을 비교해보면, 속도의 증가에 따라 Fig. 9는 일정한 증가율을 보인 반면 Fig. 10은 증가폭이 작아진 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 체적보존을 위해 수정된 LS 방법을 이용하여 액적-벽면 충돌 시 액적거동과 열전달 특성을 수치해석 하였다. 접촉각이 액적거

동과 열전달량에 미치는 영향에 대한 해석을 수행한 결과로부터, 퍼짐접촉각이 감소할수록 표면장력의 반경방향 성분이 액적 퍼짐 방향으로 기울어지므로 액막의 최대 반지름은 증가하게 되어 액막의 퍼짐면적은 커지고 평균 열전달량이 증가하였다. 또한, 수축접촉각이 증가할수록 액막이 되감기는 속도가 커져 평균 열전달량이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 액적의 충돌속도는 퍼짐면적을 크게 함으로써 열전달량을 증가시키지만, 초기 액적반경이 작아지면 속도에 따른 열전달량의 증가폭은 감소하였다. 열전달량은 액적의 반경은 함수이다. 하지만, 액적의 반지름의 스케일이 마이크로해질 경우 단순히 액적 반지름의 증가에 따른 액적 표면적의 증가가 열전달량의 증가율에 비례한다는 가정은 수치해석을 통하여 얻은 열전달량과 차이를 보인다. 이는 액적-벽면 충돌에 의한 열전달은 액적 내의 유동 및 온도차에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 열전달량의 증가량은 액적 반지름의 스케일이 매크로한 경우보다 마이크로한 경우 1.4배정도 더 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Harlow, F. H. and Shannon, J. P., 1967, "The Splash of a Liquid droplet," *J. Appl. Phys.*, Vol. 38 p. 3855~3866.

(2) Trapaga, G. and Szekely, J., 1991, "Mathematical Modeling of the Isothermal Impinging of Liquid Droplets in Spray Processes," *Metall. Trans. B*, Vol. 22, p. 901~914.

(3) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.

(4) Pasandideh-Fard, M., Aziz, S.D., Chandra, S., Mostaghimi, J., 2001, "Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface," *Int. J. Heat and Fluid Flow,* Vol. 22, pp. 201~210.

(5) Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulikakos, D., Megaridis, C. M. and Zhao, Z., 1995, "Wetting Effects on the Spreding of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface," *Phys. Fluids.*, Vol. 7, pp. 236~247.

(6) Fukai, J., Shiiba, Y. and Miyatake, O., 1997, "Theoretical Study of Droplet Impingement on a Solid Surface Below the Leidenfrost Temperature," *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol. 40, pp. 2490~2492.

(7) Bussman, M., Mostaghimi. J., Chandra. S., 1999, "On a Three-Dimensional Volume Tracking Model of Droplet Impact," *Physics of Fluids*, Vol. 11, pp. 1406~1417.

(8) Bussman, M., Chandra. S. and Mostaghimi J., 2000, "Modeling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface," *Physics of Fluids*, Vol. 12, pp. 3121~3132.

(9) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., 1994, "A Level Set Approch for Computing Solution to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146~159.

(10) Son, G. 2001, "Numerical Simulation of Bubble Motion During Nucleate Boiling," *KSME Int. J.* Vol. 25, No.3, pp. 389-396.

(11) Dussan V, E. B. 1979, "On the Spreading of Liquids on Solid Surface: Static and Dynamic Contact Lines," *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol. 11, p. 371~400.