액적 충돌 현상에 관한 수치해석

남 현 우[1], 백 제 현[*2]

A NUMERICAL ANSLYSIS ON THE COLLISION BEHAVIOR OF WATER DROPLETS

Hyun Woo Nam[1] and Je Hyun Baek[*2]

A numerical simulation of the binary collision dynamics of water drops for size ratios of 1 and 0.75, for the Weber number range of 5 to 100, and for all impact parameter is reported. Two different types of separating collisions, namely reflexive and stretching separations, are identified. A numerical method is based on a fractional-step method with a finite volume formulation and the interface is tracked with Volume of Fluid(VOF) method, including surface tension. Numerical sresults for size ratios 1 and 0.75 are reasonablely compared with Ashgriz and Poo's experimental results.

Key Words: 합일(Coalescence), 스트레칭 분리(Stretching separation), 리플렉시브 분리(Reflexive separation), 위성액적(Satellite droplet), 액적 충돌(Droplet collision)

기호설명(Nomenclature)

d : 지름
F_s : 체적력으로 바뀐 표면 장력
f : 체적 비율
$\tilde{f}$: 평활 체적 비율
h : 두 액적의 상호 작용 높이
K : 커널
K_r : 유효 리플렉시브 에너지
$\hat{n}$: 계면의 단위 법선 벡터
$\widehat{n_f}$: 셀 면에서의 계면 법선 벡터
P : 압력
Re : Reynolds 수
S_{si} : 두 액적이 겹치는 부분의 표면 에너지
U : 질량 중심 좌표상의 두 액적간 상대속도
u : 충돌 액적간의 상대속도
u_c : 셀 중심에서의 속도
u_L : 큰 액적의 속도
u_S : 작은 액적의 속도
V : 부피
We : Weber 수
X : 충돌 파라미터
x : 무차원화된 충돌 파라미터

그리스문자

α : 충돌각
△ : 액적의 크기비
δ : Dirac delta 함수
μ : 점도
ρ : 밀도
σ : 표면장력 상수

하첨자

g : 기체
L : 큰 액적
l : 액체
li : 충돌시 상호작용하는 부분(큰 액적측)
S : 작은 액적
si : 충돌시 상호작용하는 부분(작은 액적측)
1,2 : 유체 1, 2

접수일: 2006년 6월 12일, 심사완료일: 2006년 8월 11일.
1 정회원, 한라공조주식회사
2 정회원, 포항공과대학교 기계공학과
* Corresponding author E-mail: jhbaek@postech.ac.kr

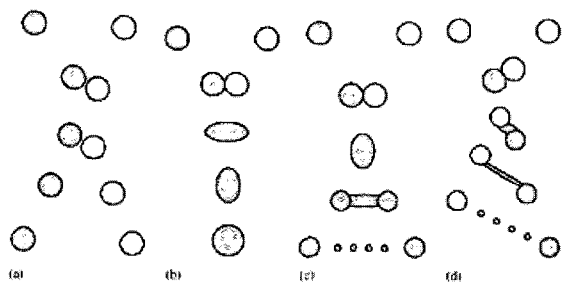

Fig. 1 Diagram of collision regimes: (a)bouncing (b)coalescence (c)reflexive separation (d)stretching separation

1. 서 론

액적 충돌(droplet collision) 현상은 빗방울의 형성, 분무(spray) 거동 등을 예측할 수 있는 매우 중요한 현상이다. 특히, 최근에는 내연기관의 연료 분사 시스템이나 표면 처리 등의 산업 분야에서 중요하게 사용되는 분무의 형성과정에서 액적 충돌은 속도와 충돌 각도에 따른 액적 크기의 변화에 직접적인 영향을 주게 되기 때문에 액적 충돌현상에 대한 물리적 이해를 높이는 것은 매우 중요하다.

이러한 액적 충돌은 매우 복잡한 유동 현상을 동반하는데 충돌 이후의 거동을 크게 나누어 보면 Fig. 1에서와 같이 반사(bouncing), 합일(coalescence), 스트레칭 분리(stretching separation), 그리고 리플렉시브 분리(reflexive separation) 영역으로 구분할 수 있다. 충돌 거동은 작동 유체의 종류에 따라서 큰 영향을 받게 되는데, 반사 영역은 하이드로 카본(hydrocarbon) 계열의 액적 충돌에서 주로 발생하며 물 액적의 충돌에서는 거의 나타나지 않는 것으로 알려져 있다. 이러한 액적 충돌 이후의 거동은 We 수, 액적의 크기비, 충돌 파라미터(impact parameter) 등에 따라서 결정된다.

Brazier-smith 등[1]과 Ashgriz와 Poo[2]는 물 액적 간의 충돌 실험을 통해 일시적으로 합쳐진 액적들의 분리가 발생되는 임계조건을 제시하였으며 리플렉시브와 스트레칭 분리의 영역을 나누는 곡선을 이론적으로 유도하였다. Jiang[3]등과 Qian와 Law[4]등은 하이드로 카본 액적들에 대한 다양한 실험 데이터와 영역구분을 위한 관계식을 제시하였다. 그리고 Schelkle과 Frohn[5]은 크기가 같은 액적의 충돌을 Lattice Boltzmann 방법으로 수치적 해석을 하였으며 Rieber 와 Frohn[6]은 삼차원 volume-of-fluid(VOF) 방법을 이용하여 동일한 크기의 액적에 대한 중심 충돌(central collision), 비중심 충돌(noncentral collision)에 대한 수치적 해석을 하였다. 그러나 위에 언급된 수치적 해석 결과는 다양한 조건에서의 결과를 보여주기 보다 대표적인 몇 개의 실험적 결과를 계산하는데 그쳤다.

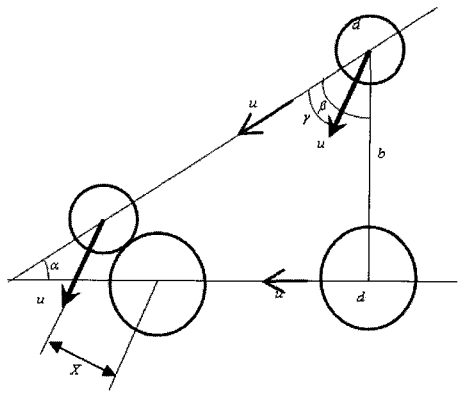

Fig. 2 Schematic of the collision two moving drops

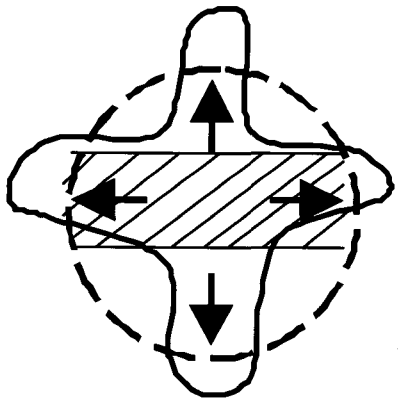

Fig. 3 The nominal spherical drop which represents the energy state of the combined mass throughout the collision process.

따라서 본 연구에서는 액적 충돌의 수치적 해석을 통해 합일, 리플렉시브 분리, 스트레칭 분리와 같은 액적 충돌 후의 거동, 위성 액적의 개수, 크기와 임계조건을 분석하고 실험 및 이론적 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 액적 충돌의 수치적 해석을 위해 Volume-of-fluid(VOF)방법을 이용한 자유표면 유동 해석 코드[7,8]를 사용하였고, 표면장력을 고려해 주기 위해 Brackbill[9]의 Continuous Surface Force(CSF) 모델을 적용하였다.

2. 액적 충돌 이론

2.1 액적 충돌 현상 및 무차원수

운동하는 두 액적이 충돌할 때 가장 중요한 파라미터 중 하나는 상대속도 u이다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 충돌하는 두 액적의 상대속도를 일반화하면 다음과 같다.

$$u = \left(u_L^{\,2} + u_S^{\,2} - 2u_L u_S \cos\alpha\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

α 는 충돌각, u_L 은 크기가 큰 액적의 속도, u_S 는 크기가 작은 액적의 속도를 나타낸다. 그리고 충돌 후 액적의 거동을 지배하는 또 다른 파라미터는 충돌 파라미터(impact parameter)로, 충돌 파라미터는 액적 중심에서 또 다른 액적의 중심에 위치한 상대속도 벡터까지의 거리이며 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 이 두 개의 파라미터를 사용하여 차원 해석을 하면 액적 충돌 현상에서 다음과 같은 4개의 무차원 수를 얻을 수 있다.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho d_L u}{\mu} \tag{2}$$

$$We = \frac{\rho d_S u^2}{\sigma} \tag{3}$$

$$\Delta = \frac{d_S}{d_L} \tag{4}$$

$$x = \frac{2X}{d_L + d_S} \tag{5}$$

Re 는 레이놀즈 수, We 는 웨버 수, Δ 는 액적의 크기비, x 는 무차원화된 충돌 파라미터을 나타낸다. 그리고 ρ, μ 는 액적의 밀도, 점도를 σ 는 표면장력 상수를 나타내고, d_L 은 큰 액적의 지름, d_S 는 작은 액적의 지름을 각각 나타낸다.

2.2 리플렉시브 분리(Reflexive separation)

충돌 파라미터가 작은 경우, 충돌 후 합쳐진 액적이 큰 충돌 에너지에 의해 분리되는 현상을 리플렉시브 분리라고 한다. Ashgriz와 Poo[2]는 두 액적이 충돌 후 합쳐진 부피를 충돌 전 두 액적의 부피합과 같은 가상의 구형 액적을 Fig. 3과 같이 가정하였다. 그리고 가상 액적에서의 운동 에너지와 표면 에너지간의 관계식으로 다음과 같은 유효 리플렉시브 에너지를 유도하고

$$K_r = \sigma\pi d_l^2\left[(1+\Delta^2) - (1+\Delta^3)^{\frac{2}{3}} + \frac{We}{12\Delta(1+\Delta^3)^2}(\Delta^6\eta_1 + \eta_2)\right] \tag{6}$$

$$\eta_1 = 2(1-\xi)^2(1-\xi^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \tag{7}$$

$$\eta_2 = 2(\Delta-\xi)^2(\Delta^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}} - \Delta^3 \tag{8}$$

$$\xi = \frac{1}{2}x(1+\Delta) \tag{9}$$

유효 리플렉시브 에너지가 가상 표면 에너지의 75%이상일 때 리플렉시브 분리가 발생된다고 가정하였다. 그렇게 되면 리플렉시브 분리가 되기 위한 조건으로

$$K_r \geq 0.75\sigma\pi(d_L^3 + d_S^3)^{\frac{2}{3}} \tag{10}$$

가 됨을 제시하였다. 식 (10)을 식 (6)에 대입하여 정리하면

$$\frac{We}{\Delta(1+\Delta^3)^2}\left(\Delta^6\eta_1 + \eta_2\right) + 3\left[4\left(1+\Delta^2\right) - 7\left(1+\Delta^3\right)^{\frac{2}{3}}\right] = 0 \tag{11}$$

이 되고 이 식이 합일과 리플렉시브 분리의 경계선이 된다.

2.3 스트레칭 분리(Stretching separation)

Ashgriz 와 Poo[2]는 스트레칭 분리의 임계조건을 유도하기 위해 충돌시 두 액적 사이에 상호작용하는 체적을 기하학적 가정에 의해 다음과 같이 유도하였다.

$$V_{si} = \phi_s V_S \tag{12}$$

$$V_{li} = \phi_l V_L \tag{13}$$

$$\phi_s = \begin{cases} 1 - \dfrac{1}{4\Delta^3}(2\Delta-\tau)^2(\Delta+\tau) & for \quad h > \dfrac{1}{2}d_s \\ \dfrac{\tau^2}{4\Delta^3}(3\Delta-\tau) & for \quad h < \dfrac{1}{2}d_s \end{cases} \tag{14}$$

$$\phi_l = \begin{cases} 1 - \dfrac{1}{4}(2-\tau)^2(1+\tau) & for \quad h > \dfrac{1}{2}d_s \\ \dfrac{\tau^2}{4}(3-\tau) & for \quad h < \dfrac{1}{2}d_s \end{cases}$$

$$\tau \equiv (1-x)(1+\Delta) \tag{15}$$

여기서 상호작용 높이는 $h=0.5(d_L+d_S)(1-x)$ 이다. 이 때 스트레칭 운동에너지와 표면 에너지는 다음과 같이 표현하였다.

$$K_{si}=\frac{1}{2}\rho U^2 V_L^2\left\{\frac{\Delta^3}{(1+\Delta^3)^2}\left[(1+\Delta^3)-(1-x^2)(\phi_s+\Delta^3\phi_l)\right]\right\} \quad (16)$$

$$S_{si}=\sigma\left[2\pi V_L d_L \tau(\Delta^3\phi_s+\phi_l)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

스트레칭 분리가 일어나기 위해서는 전체 유효 스트레칭 에너지가 두 액적이 겹치는 부분의 표면 에너지보다 크게 되므로 $K_{si}\geq S_{si}$ 이 되고 이를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$We=\frac{4(1+\Delta^3)^2\left[3(1+\Delta)(1-x)(\Delta^3\phi_s+\phi_l)\right]^{\frac{1}{2}}}{\Delta^2\left[(1+\Delta^3)-(1-x^2)(\phi_s+\Delta^3\phi_l)\right]} \quad (18)$$

한편 Park[10]은 두 액적이 부딪히는 부분에서의 표면장력과 각 운동량의 평형을 고려하여 We 수와 무차원 충돌 파라미터와의 관계식을 유도하였다. 이 관계식을 위에서 유도했던 변수들로 표현하면 다음과 같다.

$$x=\left(\frac{12}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{(\Delta^2-\Delta+1)^{\frac{1}{2}}}{\Delta\, We^{\frac{1}{2}}}\left[\frac{(1+\Delta^5)(\Delta^2-\Delta+1)}{5\Delta^3}+\frac{(1+\Delta)}{2}\right]\left[4-\left[x(1+\Delta)-\frac{(1-\Delta)}{x}\right]^2\right]^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

Brazier-Smith등[1] 은 합쳐진 가상 액적으로부터 스트레칭에 의해 두 개의 액적으로 분리되기 위해서는 회전 에너지(Rotational energy)가 표면 에너지를 초과해야 한다고 생각하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$x=\left(\frac{24}{5We}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{(1+\Delta^3)^{\frac{11}{6}}}{(1+\Delta)\Delta^{\frac{5}{2}}}\left[1+\Delta^2-(1+\Delta^3)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

그리고 Arkhipov 등[11] 은 일정한 각속도를 가지고 회전하는 시스템을 생각하여 이 시스템의 최소 포텐셜 에너지의 변화량을 가지고 스트레칭 분리와 합일의 경계를 결정하는 관계식을 유도하였다. 그 관계식은 식 (21)과 같다.

$$x=\frac{1}{\Delta^3}\left(\frac{6(1+\Delta^3)}{We}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

3. 수치해법

3.1 지배방정식 및 이산화 방법

계면이 존재하는 이상유동(two-phase flow)을 계산하기 위하여 VOF (Volume of Fluid)가 사용되며, 각 셀에 주어진 체적비율(volume fraction)을 이용하여 상 (phase)을 구분한 두 유체를 각각 1, 2 라고 했을 때 각 셀에서 정의되는 체적비율은 그 셀의 부피에 대한 그 셀을 차지하고 있는 유체1(또는 유체2)의 부피의 비로 나타낸다.

VOF 방법에서 계면의 위치를 계산하기 위한 체적비율 전달방정식은 유체의 질량 보존 식으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\nabla\cdot(\mathbf{u}_c f)=0 \quad (22)$$

여기서

$$f=\begin{cases}1 & in\ fluid\ 1\\ 0 & in\ fluid\ 2\end{cases} \quad (23)$$

본 연구에서 두 유체는 각각 섞이지 않는 비압축성 유동이라고 가정하였으며 다음과 같이 비압축성 유동의 Navier-stokes 방정식으로 표현된다.

$$\nabla\cdot\mathbf{u}_c=0 \quad (24)$$

$$\rho\left[\frac{\partial\mathbf{u}_c}{\partial t}+\nabla\cdot(\mathbf{u}_c\mathbf{u}_c)\right]=-\nabla p+\nabla\cdot\mu\nabla\mathbf{u}_c+\mathbf{s} \quad (25)$$

위 식에서 $\mathbf{u}_c$ 는 유체의 속도이며, P 는 압력을 나타낸다. $\mathbf{s}$ 는 운동량 계면에서의 표면장력을 계산할 경우 표면장력에 의하여 첨가되는 생성항이다.

비압축성 유동 해석을 위하여 지배방정식 (24)과 (25)를 셀 중심 격자계(cell centered grid)에서 시간에 대하여 2단계로 분리한 fractional-step method를 이용하였으며, 운동방정식의 대

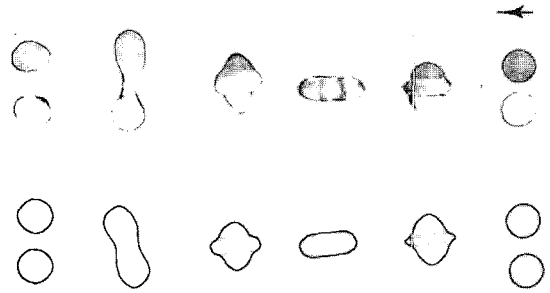

Fig. 4 Reflexive separation with no satellite for △=1, We=23, and x=0.05 (Up : experimental results[2], Down : nume rical results)

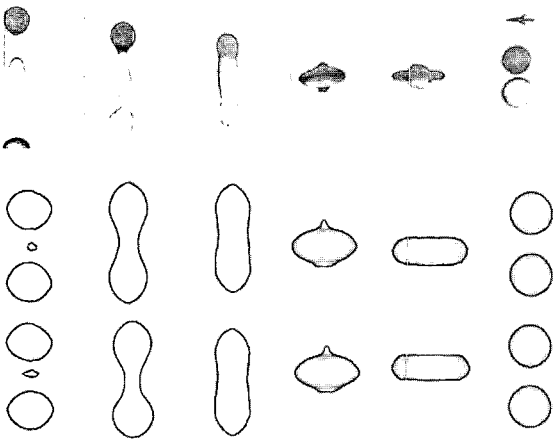

Fig. 5 Three-drop reflexive separation at △=1, We=40, and x=0 (Up : experimental results[2], Middle : numerical results (coarse grid), Down : numerical results(fine grid))

류항과 점성항 각각에 Adams-Bashforth 방법과 Crank-Nicolson 방법을 적용하여 이산화하였고 지배방정식의 공간에 대한 이산화를 위해서 유한 체적법을 사용하였다[7,8].

3.2 Continuum Surface Force(CSF) 모델과 커널(kernel)

표면장력을 적용하기 위해 CSF 모델[9]을 사용하였다. CSF 모델에서는 매우 작은 영역에서의 부피 적분은 면적분과 근사하다는 가정을 사용하여 표면력(surface force)을 부피력(volumetric force) $\mathbf{F}_s$로 표현하였다.

체적력으로 바뀐 표면장력, $\mathbf{F}_s$는 식 (26)과 같이 표현될 수 있으며 이 값은 운동방정식 (25)의 생성항에 포함되어 계면에서의 표면장력을 나타낸다.

$$\mathbf{F}_s = \sigma\kappa\nabla\tilde{f} + [\nabla\sigma|\nabla\tilde{f}| - (\frac{\nabla\tilde{f}}{|\nabla\tilde{f}|}\cdot\nabla\sigma)\nabla\tilde{f}] \tag{26}$$

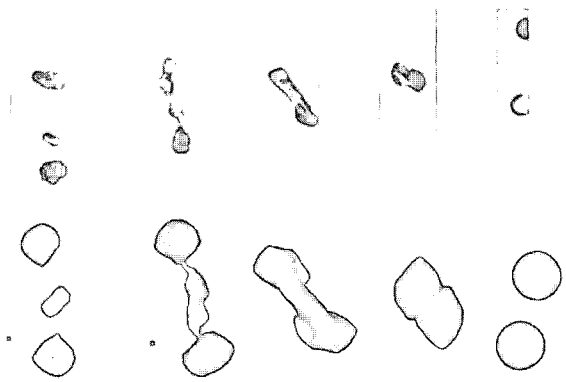

Fig. 6 One-satellite stretching separation at △=1, We=83, and x=0.34(Up : experimental results[2], Down : numerical results)

이 때, 평활체적비율(smoothed volume fraction) $\tilde{f}$은 식 (27)과 같이 체적비율 f와 kernel $k(\mathbf{x})$을 이용하여 구한다.

$$\tilde{f}(x) = \int_s f(x')K(x'-x)dx' \tag{27}$$

여기서 s는 계면을 나타내고, 평활체적비율을 이용하여 표현된 계면은 kernel에 의해서 일정하게 지지(finite support)된다. 현재 개발된 코드는 평활체적비율을 구하기 위해서 Peskin[12]이 제안한 kernel을 사용하였다.

4. 계산 결과

4.1 크기가 같은 액적 사이의 충돌, △=1

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 We 수는 5≦We≦100의 범위에서, 그리고 무차원화된 충돌 파라미터 x는 0≦x≦1에서 수행되었다. 그리고 이 때 격자는 120,000개와 220,000개가 사용되었고, 계산영역은 3D×4D×3D, 4D×6D×4D 등이 사용되었다. 기체와 액체의 물성치는 공기와 물의 물성치를 사용하였다. 이 때 적용된 시간간격 은 △t=10E-4이다. 모든 면의 경계조건은 slip wall로 설정하였고, 크기가 작은 액적이므로 중력 영향은 고려하지 않았다.

리플렉시브 분리는 We 수가 증가되면서 더 복잡한 현어나게 된다. 같은 충돌 파라미터를 기준으로 We 수가 증가하면 위성 액적이 생기게 된다. 여기서 위성 액적의 의미는 충돌 후 두 액적이 분리되면서 나타나는 두 액적 중앙에 위치한 작은 액적을 의미한다. 한 예로 x=0.05일 때 계산 결과를 보면 We=23(Fig. 4), We=27일 때는 리플렉시브 분리는 일어나지만 위성 액적은 생성되지 않는다. 그러나 Fig. 5에서 볼 수

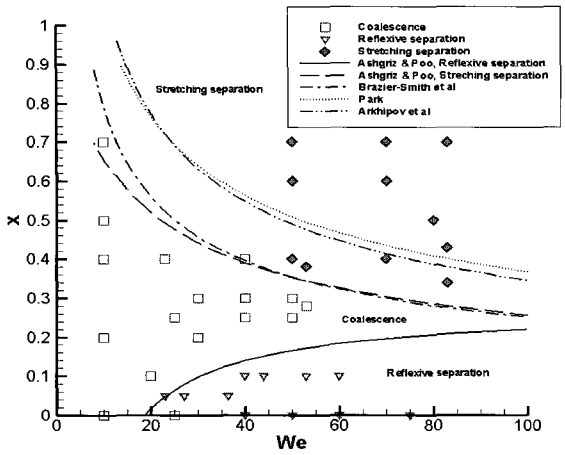

Fig. 7 The comparisons of the numerical results with the ana lytically obtained regions[2] for drop size ratio △=1.

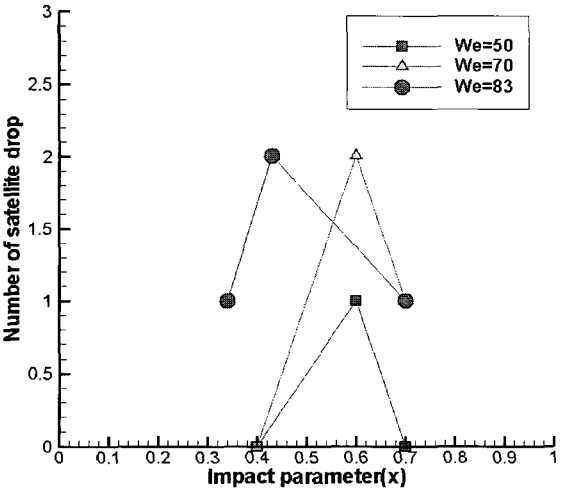

Fig. 8 The number of the satellite droplets after stretching separation of water droplets for △=1

있듯이 We=40 에서는 위성 액적이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이것은 We 수가 증가하면서 충돌 후 생기는 원통형 액적이 길어지기 때문이다. 원통형 액적의 양 끝 부분은 관성력에 의해 양쪽으로 늘어나려는 성질이 생기는 반면 원통형 액적이 길어지게 되면 가운데 부분은 관성력이 없어지게 되어질 것이고, 이 과정에서 원통형 액적의 중앙에 위성 액적이 생성된다.

그리고 We 수가 증가하면 위성 액적의 수가 증가하는 경향을 보인다. 계산 결과에서 보면 정면 충돌의 경우 We=40(Fig. 5)에서는 위성 액적 한 개가 생성되고, Fig. 8에서 볼 수 있듯이, We=83에서는 두 개가 생성됨을 확인되었고 이

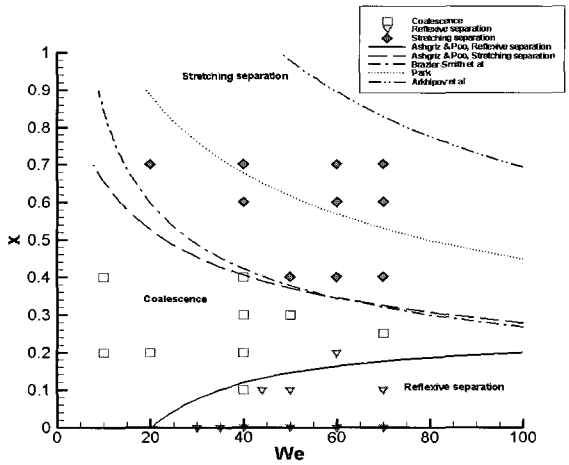

Fig. 9 The comparisons of the numerical results with the analytically obtained regions[2] for drop size ratio △ =0.75

Fig. 10 Reflexive separation at △=0.75, We=70, and x=0

것은 Ashgriz와 Poo[2]의 실험 결과와 일치한다.

Fig. 6에서 보면 스트레칭 분리가 되는 것을 볼 수 있다. 리플렉시브 분리와 비교하여 액적의 변형이 크게 일어남을 확인할 수 있고, 임팩트 파라미터가 커서 두 액적이 회전하면서 분리되는 것도 확인할 수 있다. 분리된 후의 두 액적의 크기를 충돌 전과 비교하면 크기가 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 충돌로 인해 액적 질량이 전달되었다고 볼 수 있다. Ashgriz와 Poo[2]의 실험 결과(Fig. 6, Up)에서도 이 같은 현상을 볼 수 있다.

액적충돌 현상은 계산된 범위에서 위에서 언급한 세 개의 영역으로 분리됨을 알 수 있으며 Fig. 7에 명시되어 있다. 리플렉시브 분리 영역은 작은 충돌 파라미터와 큰 We 수에서 임계값이 나타나며, 스트레칭 분리는 충돌 파라미터가 클 때 발생되는 현상임을 계산 결과를 통해 확인할 수 있었다. 그리고 계산 결과에 의한 영역 분리 결과는 Brazier-Smith 등[1], Ashgriz와 Poo[2]의 이론값 및 실험결과와 대체적으로 잘 일치했으며 Park[10], Arkhipov 등[11]의 이론값과는 일치하지 않았다.

Fig. 8에서 보면 충돌 파라미터가 약 0.4 에서 0.6 사이일 때 위성 액적의 개수가 최대값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 최대값에 이를 때까지는 두 액적 사이에 비껴나가려는 경향

이 커지게 되므로 액적 개수가 증가하게 되고 최대값 이후에는 충돌 작용에 관계되는 상호작용 체적이 감소하기 때문에 위성 액적의 개수가 감소하게 된다. 이것은 Ashgriz와 Poo[2]의 실험 결과와 일치하고, Ko 등[13]의 예측 결과와도 일치한다.

4.2 크기가 다른 액적 사이의 충돌, △=0.75

크기가 다른 액적의 충돌현상이 발생하는 영역이 Fig. 9에 도시되어 있으며 리플렉시브 분리 영역은 Fig. 7에 비해 작아졌음을 알 수 있다.

정면 충돌의 경우 Fig. 10에서와 같이 충돌 후, 작은 액적은 커지고, 큰 액적은 작아지게 된다. 이와 비교하여 두 액적의 크기가 같은 경우(△=1)에는 두 액적의 크기가 유지되었는데 이는 액적의 크기가 다른 경우가 같은 경우에 비해 질량의 전달 현상이 잘 일어남을 의미한다. 이 같은 이유로 리플렉시브 분리 영역이 액적의 크기비가 같은 경우와 비교하여 작아지는 것으로 나타났다.

그리고 리플렉시브 분리 영역과 마찬가지로 동일 크기의 충돌에서의 스트레칭 영역에 비하여 작게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 이것은 같은 We 수를 기준으로 더 큰 충돌 파라미터에서 스트레칭 분리가 일어남을 의미한다. 또한, Fig.9에서 나타나듯이 스트레칭 분리 영역은 Brazier-Smith 등[1], Ashgriz와 Poo[2]의 이론값과 리플렉시브 분리 영역은 Ashgriz와 Poo[2]의 이론값과 비교적 잘 일치하고 있다. 그리고 Park[10]과 Arkhipov 등[11]의 이론값과는 △=1일 때의 경우보다 더 많은 차이를 보이고 있다.

5. 결 론

액적 충돌 현상에 관하여 VOF 방법과 CSF 모델을 이용하여 수치적으로 해석하였다. 스트레칭 분리, 리플렉시브 분리, 합일 현상을 We 수 $5 \leq We \leq 100$, 무차원화된 충돌 파라미터 $0 \leq x \leq 1$, 그리고 액적비 1과 0.75의 범위에서 수치적으로 해석하고, 기존의 실험결과 및 이론값과 비교하였으며 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모사한 액적 충돌 현상은 Ashgriz와 Poo[2]의 실험 결과와 잘 일치하였고, 액적의 크기비가 1일 때 스트레칭 분리와 리플렉시브 분리에 의한 위성 액적의 개수는 Ashgriz와 Poo[2]의 실험 결과와 일치하였다.
2. 액적 충돌 현상의 계산 결과는 액적의 크기비가 1, 0.75인 경우 모두 스트레칭 분리, 리플렉시브 분리, 합일의 세 영역으로 나뉘었다. 계산 결과와 비교하여 스트레칭 분리 영역에서는 Brazier-Smith 등[1]과 Ashgriz와 Poo[2]의 이론값과 정성적으로 일치하였고, 리플렉시브 분리 영역은 Ashgriz와 Poo[2]의 이론값과 일치하였다. 그러나 Park[10], Arkhipov 등[11]의 이론값과는 일치하지 않았다.
3. 수치 해석 결과에서 스트레칭 분리로 인해 발생하는 위성 액적의 개수는 We 수에 따라 다르나, 충돌 액적의 크기비가 1인 경우에 충돌 파라미터가 0.4~0.6의 범위에서 최대값을 나타내었다.

액적 충돌 현상 중 스트레칭 분리와 리플렉시브 분리 현상에서 위성 액적의 크기를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 더욱 많은 수의 격자가 필요하다.

후 기

본 연구는 일부 LG 전자(주)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Brazier-Smith, P.R., Jennings, S.G. and Latham, J., 1972, "The Interaction of Falling Water Drops : Coalescence," *Proc.Roy.Soc.Lond.(A)*, Vol.326, p.393-408.

[2] Ashgriz, N. and Poo, J.Y., 1990, "Coalescence and Separation in Binary Collisions of Liquid Drops," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.221, p.183-204.

[3] Jiang, Y.J., Umemura, A. and Law, C.K., 1992, "An Experimental Investigation on the Collision Behavior of Hydrocarbon Droplets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 234, p.171-190.

[4] Qian, J. and Law, C.K., 1997, "Regimes of Coalescence and Separation in Droplet Collision," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.331, p.59-80.

[5] Schelkle, M, Frohn, A., 1995, "Three-Dimensional Lattice Boltzmann Simulations of Binary Collisions Between Equal Droplets," *Journal of Aerosol Science*, Vol.26, p.145-146.

[6] Rieber, M. and Frohn, A., 1995, "Three-Dimensional Navier-Stokes Dimulations of Binary Collisions Between Equal Droplets of Equal Size," *Journal of Aerosol Science*, Vol.26, p.929-930.

[7] 임중혁, 백제현, 2004, "비정렬격자 유한체적법을 이용한 자유표면유동 해석코드의 개발," *석사학위논문*, 포항공과대학교.

[8] 홍인철, 백제현, 2005, "표면장력을 고려한 자유표면유동의 수치적 해석," *석사학위논문*, 포항공과대학교.

[9] Brackbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemach, C., 1992, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", *Journal of Computational Physics,* Vol.100, p.335-354.

[10] Park, R.W., 1970, "Behavior of Water Drops Colliding in Humid Nitrogen," *Ph.D.thesis,* Department of Chemical Engineering, The University of Wisconsin.

[11] Arkhipov, V.A., Vasenin, I.M. and Trofimov, T.F., 1983, "Stabillity of Colliding Drops of Ideal Liquid," *Zh.Prikl.Mekh.Tekh.Fiz*, Vol3, p.95-98.

[12] Peskin, C.S., 1977, "Numerical Analysis of Blood Flow in the Heart," *Journal of Computational Physics*, Vol.25, pp.220-252.

[13] Ko, G.H., Lee, S.H., Ryou, H.S. and Choi, Y.K., 2003, "Development and Assessment of a Hybrid Droplet Collision Model for Two Lmpinging Sprays," *Atomization and Sprays*, Vol.13, p.251-272.