

레벨셋 방법을 이용한 액적 충돌에 대한 수치해석

이 상 혁* · 허 남 건**

* 서강대학교 기계공학과

A Numerical Analysis of the Binary Droplet Collision by Using a Level Set Method

Sang Hyuk Lee* and Nahmkeon Hur**

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received April 9, 2010 ; Revised January 27, 2011 ; Accepted January 28, 2011)

Key Words: Binary Droplet Collision(액적충돌), Two-phase Flow(이상유동), Level Set Method(레벨셋 방법), Head-on Collision(정면충돌), Off-center Collision(비중심충돌), Droplet Identity Tracking (액적 성분추적)

초록: 액적 충돌은 물방울 형성 및 분무 유동 등의 현상을 예측하는데 있어 매우 중요하다. 이러한 액적 충돌은 액적 속도, 충돌 파라미터, 액적 크기비에 영향을 받아, 충돌 후 거동 특성이 결정된다. 충돌 후 액적은 반사, 합일, 스트레칭 분리, 리플렉시브 분리와 같은 거동 특성을 갖는다. 본 연구에서는 레벨셋 방법을 사용하여 충돌 후 액적 거동 특성에 대한 이상유동 해석을 수행하였다. 정면충돌 현상에 대한 2차원 축대칭 해석으로부터 합일 및 리플렉시브 분리 현상을, 비중심충돌 현상에 대한 3차원 해석으로부터 합일, 리플렉시브 분리, 스트레칭 분리 현상을 예측할 수 있었다. 이러한 해석 결과는 기존 실험 및 이론적 연구 결과와 일치하는 결과를 보였다. 또한, 초기 액적의 부피비에 대한 수송 방정식을 사용하여 충돌하는 두 액적의 성분을 추적하였다. 이로부터 크기가 다른 두 액적의 정면충돌에 대한 액적 성분 추적을 통해 액적 거동 및 액적 성분에 대해 분석하였다.

Abstract: The prediction of binary droplet collisions is important in the formation of falling drops and the evolution of sprays. The droplet velocity, impact parameter, and drop-size ratio influence the interaction between the droplets. The effect of these parameters results in complicated collision phenomena. Droplet collisions can be classified into four types of interactions: bouncing, coalescence, reflexive separation, and stretching separation. In the present study, the interfacial flow problem of the droplet collision was numerically simulated by using the level set method. 2D axisymmetric simulations on the head-on collisions and 3D simulation on the off-center collisions were performed. The numerical results of droplet behavior after the collision agreed well with the experimental and analytical results. The mixing of the mass of the initial droplets after the collision was also predicted by using different species index of colliding droplets.

1. 서론

액적 충돌 현상(Collision Dynamics)은 대기 중의 물방울 형성이나 내연기관의 연료 분사 장치 등에서 액적의 거동을 예측할 수 있는 매우 중요한 물리적 현상이다. 이러한 충돌 후 액적의 거동은 단일 액적 사이의 충돌 현상뿐만 아니라 스프레이 모델과 같이 분산되어 있는 액적의 거동을 묘사할 수 있는 기반이 될 수 있다.

충돌 후 액적의 거동은 크게 액적 속도와 충돌 파라미터, 액적의 크기비에 직접적인 영향을 받게 된다. 이와 같은 변수의 영향으로 충돌 후 거동은 매우 복잡한 현상을 동반하게 되며, 이러한 현상은 크게 반사(Bouncing), 합일(Coalescence), 스트레칭 분리(Stretching Separation), 리플렉시브 분리(Reflexive Separation)의 특성을 갖는다.

이와 같은 액적 충돌 현상에 대해 분석하기 위하여 그동안 많은 실험적 연구가 수행되어 왔다. Brazier-Smith 등⁽¹⁾은 물방울이 떨어짐에 있어, 충돌 후 거동은 액적의 크기와 속도 및 충돌하는 액적 중심 사이 거리에 직접적인 영향을 받는다

† Corresponding Author, nhur@sogang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 것을 실험을 통해 증명하였다. 또한, O'Rourke와 Bracco⁽²⁾는 실험을 통해 두 액적이 충돌 후 분리되는 리플렉시브 분리에 대해 이론적 상관식을 제안하였다. Ashgriz와 Poo⁽³⁾는 액적 크기비가 1, 0.75, 0.50 일 때 웨버수(Weber number) 1-100에 대한 실험적 연구로부터, 충돌 후 현상인 반사, 합일, 스트레칭 분리, 리플렉시브 분리가 일어나는 영역에 대해 정리하였다. 또한, 스트레칭 분리 및 리플렉시브 분리를 예측하기 위해서 합일이 일어나는 영역과 경계를 갖는 조건에 대한 이론식을 정립하였다. Estrade 등⁽⁴⁾은 탄화수소계열에서 반사와 합일이 발생하는 영역에 대해 실험을 통해 이론식을 제안하였다. 이와 같은 실험적 연구를 기반으로, Post와 Abraham⁽⁵⁾과 Ko와 Ryou⁽⁶⁾ 등은 분산되어 있는 액적들의 거동에서 액적 충돌 현상을 구현할 수 있는 스프레이 모델에 대한 연구를 수행하였다.

최근 들어, 액적 충돌에 대한 실험 및 이론적 연구와 더불어 액적 충돌시 일어나는 물리적 현상에 대한 이해를 높이기 위한 수치해석적 연구가 활발히 이루어지고 있다. Schelkle과 Frohn⁽⁷⁾은 Lattice Boltzmann 방법을 기반으로 액적 충돌에 대해 수치해석을 수행하였다. 또한, 이상유동 해석을 위한 VOF (Volume of Fluid) 방법을 사용한 액적 충돌에 대한 연구가 진행되어 왔으며, Rieber와 Frohn⁽⁸⁾은 정면 및 비중심 충돌의 특정 조건에 대해 수치해석을 수행하였으며, Nam 등⁽⁹⁾은 VOF 방법을 사용하여 액적비가 1.00과 0.75에 대해 웨버수 5-100 일 때 액적 거동에 대해 분석하였다. 또한, Tanguy와 Berlemont⁽¹⁰⁾는 레벨셋을 이용하여 Ashgriz와 Poo⁽³⁾의 대표적인 실험 조건에 대해 수치적 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 레벨셋 방법이 적용된 일반 비직교 좌표계의 3차원 유동해석 프로그램^(11,12)을 통해, 액적 충돌에 대해 수치해석하였다. 액적 충돌을 크게 정면 및 비중심 충돌로 분리하여, 정면 충돌에 대해서는 2D 축대칭 해석을 비중심 충돌에 대해서는 3D 해석을 수행하였다. 이로부터, 액적 충돌 후 거동 및 위성 액적 생성에 대해 분석하였다. 또한, 충돌 후 두 초기 액적 성분을 추적하기 위한 연구를 진행하였으며, 이를 이용하여 크기가 다른 두 액적의 충돌에 대해 분석하였다.

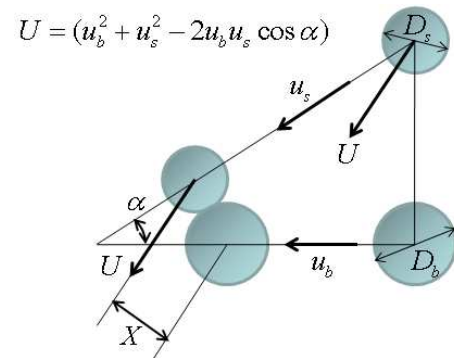


Fig. 1 Schematic of binary droplets collision

2. 액적 충돌 현상

2.1 액적 충돌 현상 및 주요 변수

액적 충돌 현상은 액적의 속도와 크기 및 충돌하는 액적 중심 사이의 거리에 영향을 받는다. 충돌하는 두 액적의 상대속도 및 액적 중심 사이의 거리는 Fig. 1과 같이 정의할 수 있다. 두 액적의 진행방향에 대해 α 만큼 각을 이룰 경우, 상대 속도는

$$U = (u_b^2 + u_s^2 - 2u_b u_s \cos \alpha) \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서, u_b 는 큰 액적의 진행방향 속도, u_s 는 작은 액적의 진행방향 속도를 말한다. 또한, 액적 사이 거리는 상대속도 방향에 수직인 방향의 거리를 나타낸다.

이와 같은 두 액적의 충돌 조건에 대한 충돌 후 거동 양상은 크게 반사, 합일, 리플렉시브 분리 및 스트레칭 분리와 같은 양상을 보인다. 액적 충돌 후 거동에 대한 충돌 조건은

$$We = \frac{\rho_l U^2 D_s}{\sigma}, \quad \Delta = \frac{D_s}{D_b}, \quad x = \frac{2X}{D_b + D_s} \quad (2)$$

와 같이 3개의 무차원수로 일반화 할 수 있다. We 는 웨버수, Δ 는 액적의 크기비, x 는 충돌 파라미터를 나타낸다. 이 때, ρ_l 는 액체의 밀도, σ 는 액체-기체 사이 표면장력, D_b 는 큰 액적의 지름, D_s 는 작은 액적의 지름과 X 는 상대속도에 수직인 두 액적 사이 거리이다.

2.2 액적 충돌 후 거동 양상

액적 충돌 후의 거동은 일반적으로 웨버수와 충돌 파라미터의 도식으로부터 반사, 합일, 리플렉시브 분리 및 스트레칭 분리와 같은 거동 양상을 분류할 수 있다.

액적 충돌시 반사는 두 액적이 합일을 일으키지 않고 서로 밀어내는 현상으로 이는 액적을 둘러싸고 있는 가스층으로 인해 직접적인 접촉이 이루어지지 않는다. 웨버수와 충돌 파라미터가 작은 영역에서 일어나게 된다. 그러나 반사 현상은 일반적인 물방울 충돌에서는 잘 발생하지 않으며 탄화수소 계열 액적 충돌시 나타난다.

합일 현상은 두 액적이 충돌을 일으켰을 때 하나의 액적으로 합쳐지는 현상을 말한다. 이 때, 합일 영역 내에서 결합된 하나의 액적은 진동을 하면서 하나의 액적으로 계속 유지된다. 이와 같은 합일 현상은 액적 주변에 형성되어 있는 가스 필름을 극복할 수 있는 운동 에너지를 가져야 하기 때문에 반사 현상을 일으키는 조건보다 웨버수가 큰 경우에 발생하게 된다.

합일이 이루어진 두 액적이 서로 양방향으로 나아가려는 힘이 커짐에 따라 분리현상이 발생하게 되며, 이와 같은 분리현상은 크게 충돌 파라미터가 작은 리플렉시브 분리와 충돌 파라미터가 큰 스트레칭 분리로 분류된다.

작은 충돌 파라미터에서 발생하는 리플렉시브 분리는 충돌하는 두 액적이 하나의 액적으로 합쳐지게 되며, 합쳐진 두 액적은 다시 기존의 위치로 돌아가게 되면서 양방향으로 변형을 이루게 되며, 이 때 멀어지는 힘이 표면장력보다 큰 경우 분리가 일어난다. Ashgriz와 Poo⁽³⁾는 충돌시 하나로 합쳐진 액적의 가상 액적에서의 운동에너지와 표면에너지 간의 관계로부터 유효 리플렉시브 에너지를 유도하여, 리플렉시브 분리와 합일이 일어나는 경계를

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

와 같이 얻었다.

큰 충돌 파라미터에 발생하는 스트레칭 분리는 두 액적의 이동방향에 대해 중심이 크게 일치하지 않는 비중심 충돌에서 발생하게 된다. 액적이 충돌치 이동방향에 대해 겹치는 영역이 작기 때

문에 합쳐진 두 액적은 기존의 진행방향으로 계속 이동하게 되며, 이 때 나아가려는 힘이 표면장력보다 큰 경우 분리가 일어난다. Ashgriz와 Poo⁽³⁾는 충돌시 운동에너지에 대해 상호작용하는 겹치는 영역에 대해 유효 운동에너지를 이용하여, 스트레칭 분리와 합일이 일어나는 경계에 대해

$$We = \frac{4(1+\Delta^3)^2[3(1+\Delta)(1-x)(\Delta^3\phi_s+\phi_b)]^{1/2}}{\Delta^2[(1+\Delta^3)-(1-x^2)(\phi_s+\Delta^3\phi_b)]} \tag{4}$$

와 같이 제안하였다.

본 연구에서는, 액적 충돌 현상 중에 물방울의 충돌시 발생하는 합일, 리플렉시브 분리 및 스트레칭 분리에 대해 수치해석을 통해 분석하였다.

3. 수치 해석

액적 충돌 현상을 수치해석 하기 위해서는 2차원 또는 3차원의 상경계면을 갖는 액적의 거동에 대해 이상 유동을 해석하여야 한다. 허남건 등⁽¹¹⁾은 유한 체적법, 비엇물림 격자계를 사용하여 일반 비직교 좌표계에서 3차원 유동해석 프로그램을 개발하였다. 또한, 손기현과 허남건⁽¹²⁾은 이상 유동에 대한 수치해석을 위해 허남건 등⁽¹¹⁾이 개발한 유동해석 프로그램에 상경계면 추적법으로 레벨셋 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 액적 충돌 현상에 대한 수치해석을 위해서 위와 같이 개발된 3차원 유동 해석 프로그램인 NUFLEX를 사용하였다.

3.1 지배 방정식

본 연구에서는 액적 충돌 현상 구현을 위해 상경계면을 갖는 이상유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 기상과 액상의 유체가 상경계면으로 인해 서로 섞이지 않으며 비압축성 유체라고 가정하여, 다음과 같은 이상 유동에 대한 질량 및 운동량 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [(\nabla \bar{u}) + (\nabla \bar{u})^T] + \rho \bar{g} - \sigma \kappa \nabla H \tag{6}$$

여기서, σ 는 표면장력, κ 는 상경계면의 곡률, H 는 체적비에 대한 함수(Indicator Function)이다.

3.2 상경계면 추적 모델

상경계면을 갖는 이상 유동에 대한 수치해석에서 상경계면을 추적하는 모델로써, VOF (Volume Of Fluid) 방법과 LS (Level Set) 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 액상의 체적비를 사용하는 VOF 방법은 각 상의 체적이 잘 보존되는 장점이 있지만, 미분이 불연속인 VOF 함수를 사용하기 때문에 상경계면의 곡률을 정확하게 계산하기 어려운 단점이 있다. VOF 방법의 이와 같은 단점을 개선하기 위해서, Sussman 등⁽¹³⁾은 상경계면으로부터 거리로 정의된 LS 함수를 사용하여 상경계면을 계산하는 LS 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 액적 충돌시 이상 유동에 대한 상경계면을 추적하는 방법으로 LS 방법을 사용하였다.

LS 함수 ϕ 는 경계면에서부터 격자 중심까지의 거리를 나타내며, 경계면에서 $\phi=0$, 액상에서 $\phi>0$, 기상에서 $\phi<0$ 의 값을 갖는다. 유동을 비압축성으로 가정하면, 위와 같이 정의된 LS 함수의 이류를 지배하는 방정식은

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{u} \phi = 0 \quad (7)$$

와 같다. 이로부터 얻은 상경계면 ($\phi=0$)을 거리 함수 ($|\nabla \phi|=1$)가 되도록

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S_t(1 - |\nabla \phi|) \quad (8)$$

$$S_t = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0 + h_n^2}} \quad (9)$$

와 같은 식을 사용하여 보정함으로써, LS 함수 ϕ 를 사용하여 기상과 액상을 구분하는 체적비 H 와 상경계면의 곡률 κ 를

$$H = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi \leq -1.5h_n \\ 0 & \text{if } \phi \geq +1.5h_n \\ \frac{1}{2} + \frac{\phi}{3h_n} + \frac{\sin(2\pi\phi/3h_n)}{2\pi}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (11)$$

와 같이 얻을 수 있다. 여기서, h_n 은 상경계면에 수직인 방향의 격자 간격으로, 체적비 H 를 계산할 때 상경계면 두께를 $3h_n$ 으로 확장하여 불연속성을 완화하였다.

검사체적 내의 밀도 ρ 와 점성 μ 는 체적비 H 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)H, \quad \mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)H \quad (12)$$

3.3 액적 성분 추적 방법

본 연구에서는 두 액적 충돌 시 초기 상태 액적 성분을 추적하기 위하여, 두 액적 성분에 대한 체적비 H_1, H_2 에 대한 다음과 같은 수송 방정식을 사용하였다.

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho H_1}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho H_1 (\bar{u} \cdot \bar{n}) dS = 0 \quad (13)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho H_2}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho H_2 (\bar{u} \cdot \bar{n}) dS = 0 \quad (14)$$

위와 같은 각 액적 성분에 대한 수송 방정식을 UDS를 사용하여 이산화하였고, 시간에 대해서 Explicit 한 방법을 적용하여 이전 시간에서 구한 값을 사용하였다.

식 (13)와 (14)에서 얻어진 액적 1과 2의 체적함은 전체 액상의 체적함과 일치하여야 하기 때문에 각 격자 내 액적 1과 2의 체적비는

$$H = H_1 + H_2 \quad (15)$$

를 만족하여야 한다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서는 큰 액적의 지름이 $800\mu\text{m}$ 인 물방울 충돌에 대해 수치해석하였다. 밀도 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 과 점성 $0.001137\text{kg}/\text{ms}$ 인 물과 밀도 $1.226\text{kg}/\text{m}^3$ 과 점성 $1.78 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{ms}$ 인 공기 사이의 표면 장력 $0.072\text{kg}/\text{s}^2$ 과 같은 물성치를 사용하여 물과 공기에 대한 이상 유동을 해석하였다.

액적 충돌 현상은 크게 정면 및 비중심 충돌로 분류할 수 있다. 정면 충돌에 해당하는 충돌 파라미터 $x=0$ 일 경우에는 2D 축대칭 해석 ($1.5\text{D} \times 6\text{D} (250 \times 1000\text{cells})$)을 수행하였으며, 두 액적 중심이 일치하지 않는 충돌 파라미터 $x>0$ 일 경우에는 3D 해석 ($3\text{D} \times 1.5\text{D} \times 6\text{D} (120 \times 30 \times 240\text{cells})$, $4\text{D} \times 3\text{D} \times 6\text{D} (80 \times 60 \times 120\text{cells})$)을 수행하였다.

4.1 해석격자 타당성 검증

액적 충돌 현상에 대해 수치해석 함에 있어, 액적 충돌시 상경계면이 갑자기 큰 변형을 하며 액적 내부 및 주변에서 유동의 변화가 심하게 일

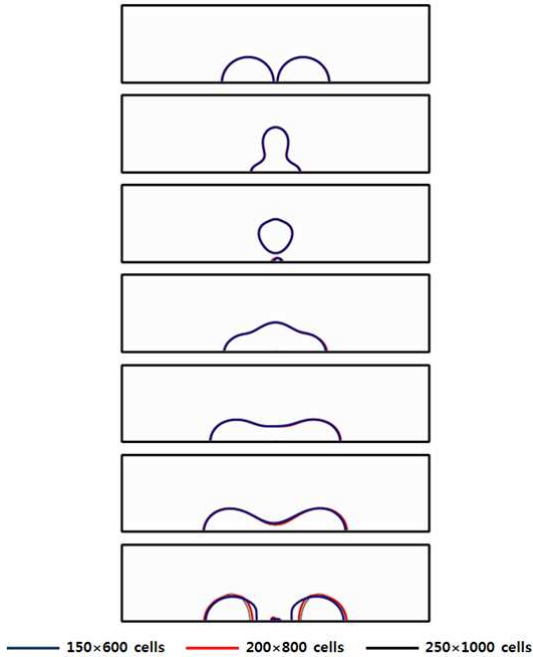


Fig. 2 Numerical results with various grid densities ($\Delta=1$, $We=25$ and $x=0$)

어나기 때문에 충돌 현상에 대한 타당한 결과를 얻기 위해서는 해석 격자의 검증이 필요하다. 본 연구에서는 크기가 같은 두 액적이 웨버수 25인 정면충돌에 대해 격자수를 다르게 하여 수치해석을 수행하였다.

충돌 해석을 위한 $1.5D \times 6D$ 의 영역에 대해 150×600 , 200×800 , 250×1000 개의 2D 축대칭 격자를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 다양한 격자수를 사용하였을 때의 액적 거동에 대한 결과이다. 두 액적이 충돌하여 합일되어 충돌하는 축의 바깥 방향으로 변형될 때까지는 거의 비슷한 액적 형상을 갖는다. 이 후, 다시 중심으로 모이게 되며 양방향으로 변형이 일어남에 따라 격자수의 차이는 결과에 차이를 발생시키게 된다. 250×1000 개의 격자로 부터의 결과와 액적 파괴 및 분리된 액적의 지름을 비교하여 볼 때, 150×600 개의 격자 사용시 0.02% 오차를, 200×800 개의 격자 사용시 0.01%의 오차를 보였다. 거동에 대해서도 150×600 개의 격자 사용시에는 다소 오차를 가졌지만, 200×800 과 250×1000 개 격자 사용한 때에는 비슷한 상경계면을 갖는 것을 볼 수 있다.

4.2 액적 정면충돌 (Head-on Collision)

액적 크기가 같은 두 액적이 충돌로 발생하는

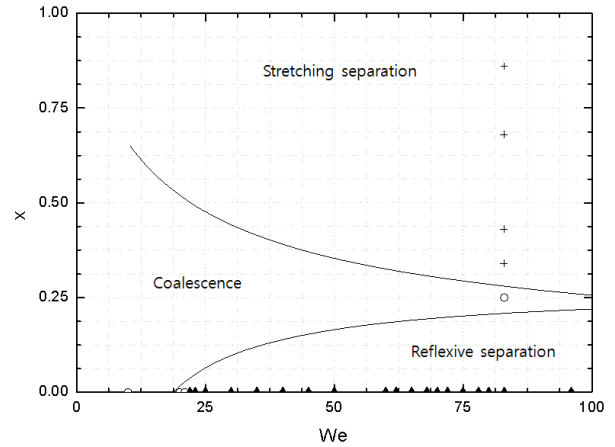
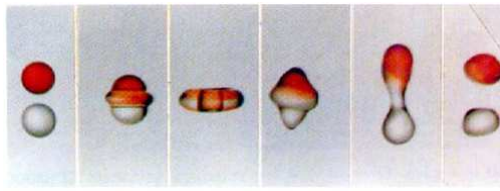


Fig. 3 Comparison of numerical results with the analytical results⁽³⁾ for the drop ratio $\Delta=1$ (○ : coalescence, ▲ : reflexive separation, + : stretching separation)

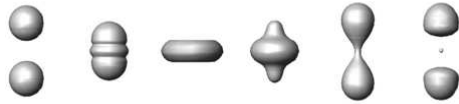
현상은 Fig. 3과 같이 웨버수와 충돌 파라미터를 이용하여 합일, 리플렉시브 분리 및 스트레칭 분리로 나눌 수 있다. 본 연구에서 수행한 액적 충돌에 대한 수치해석 결과를 볼 수 있으며, 이 결과는 기존 실험을 통한 연구로부터 얻은 각 현상 사이 경계에 대한 이론식에 부합하는 것을 볼 수 있다.

충돌 파라미터 0인 정면충돌 현상에 대한 해석 결과를 기존 실험 결과들과 비교해 보았다. Fig. 4는 웨버수가 23인 정면충돌에 대한 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 두 해석 결과 모두 충돌로 인해 충돌하는 축에 대해 바깥방향으로 변형을 일으키며, 충돌 후에 양 방향으로 늘어나게 되며, 늘어나려는 힘이 표면장력을 극복함에 따라 액적은 분리 현상을 보이게 된다. 또한 수치해석 결과에서는 양 방향으로 분리되는 중간에 위성액적이 하나 생겨나는 것을 볼 수 있다. 실험 결과에서는 위성액적이 생성되지 않았으나 이는 충돌 파라미터가 0.1이기 때문에 위성액적이 발생하지 않은 것으로 보인다. 또한, Fig. 5는 웨버수가 40인 정면충돌 현상의 결과를 보여준다. 이 경우에도 충돌 현상이 리플렉시브 분리가 발생하는 영역으로 액적 충돌 후에 양 방향으로 액적이 분리되게 된다. 또한, 액적 분리시 위성액적이 생성되며, 이 때 발생한 위성 액적은 웨버수가 23일 때 발생한 위성액적 보다 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같이 기존 실험 결과와 수치해석 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다.

충돌 파라미터가 0인 정면충돌에서는 크게 합

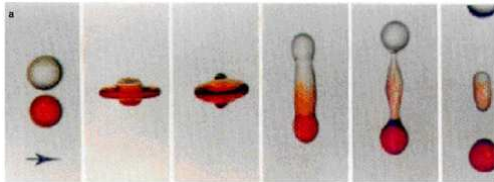


(a) Experimental results⁽³⁾

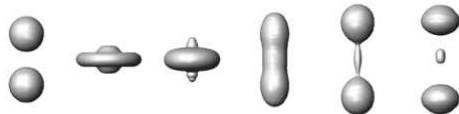


(b) Numerical results

Fig. 4 Comparison the numerical results with the experimental results ($\Delta=1$, $We=23$ and $x=0.05(\text{Exp.})/x=0(\text{Num.})$)



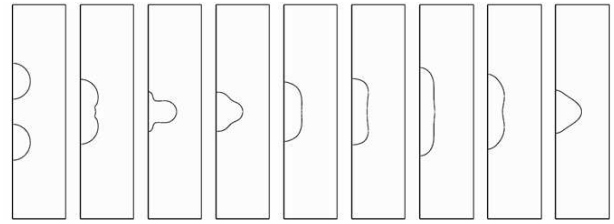
(a) Experimental results⁽³⁾



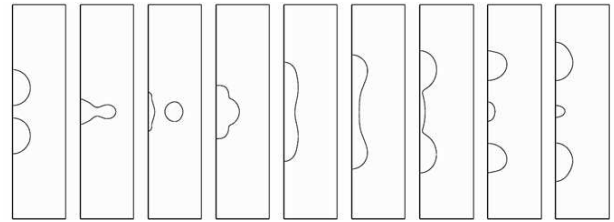
(b) Numerical results

Fig. 5 Comparison the numerical results with the experimental results ($\Delta=1$, $We=40$ and $x=0$)

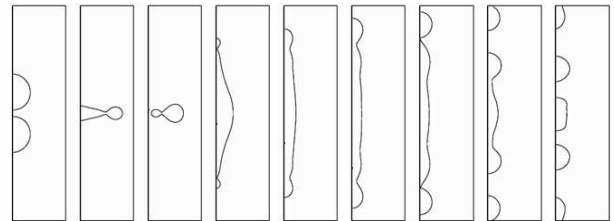
일과 리플렉티브 분리 현상이 일어나게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 정면충돌에 대해 웨버수를 10~83으로 하여 분석하였다. Fig. 6은 웨버수가 10, 50, 80일 때의 충돌 현상에 대해 보여주고 있다. 정면충돌하는 두 액적은 서로 충돌로 인해 운동에너지의 충돌이 발생하게 되고, 이로 인해 충돌하는 축의 바깥 방향으로 디스크나 링 형태로 변형하게 된다. 이와 같이 변형된 에너지는 다시 액적 충돌방향으로 액적을 밀어내며, 양방향으로 밀려나는 액적은 중간에 목을 형성하면서 변형을 일으키게 된다. 이 때, 웨버수가 작은 경우에는 밀려나는 힘이 표면장력보다 작기 때문에 다시 가운데로 모이게 되며 진동하면서 합일되는 현상을 보인다. 웨버수가 큰 경우에는 밀려나는 힘이 표면 장력보다 크기 때문에 리플렉티브 분리되는 현상을 보이게 되며, 분리시 위성액적을 발생시킬 수 있다.



(a) $We=10$



(b) $We=50$



(c) $We=80$

Fig. 6 Head-on collisions with various Weber number

4.3 액적 비중심충돌 (Off-center Collision)

크기가 같은 두 액적의 비중심충돌은 합일, 리플렉티브 분리 및 스트레칭 분리와 같은 현상으로 일어나게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 액적의 비중심충돌에 대해 웨버수 83일 때, 충돌 파라미터가 0.25, 0.34, 0.43, 0.68, 0.86에 대해 수치해석하였다.

비중심 액적 충돌에 대한 수치해석의 결과를 기존 실험 결과와 비교해 보았다. 실험 결과로 제시되어 있는 충돌 파라미터가 0.34와 0.43일 때 수치해석과 실험 결과는 Fig. 7과 8과 같다. 이러한 충돌 파라미터를 갖는 조건에서 액적은 서로 충돌을 하게 되면서 충돌하는 축에 대해 바깥 방향으로 변형을 하게 된다. 그러나 충돌함에 있어서 서로 겹치는 부분이 적기 때문에 두 액적은 충돌 후에도 계속 진행 방향으로 나아가려고 하고, 이때 진행 방향으로 나아가려는 힘이 표면장력보다 크게 작용하면 스트레칭 분리 현상이 일어나게 된다. 수치해석 결과도 실험 결과와 같이 스트레칭 분리 현상이 일어나는 것을 볼 수 있고 분리시 생성되는 위성액적의 개수도 동일하였다.

비중심 액적 충돌의 경우, 액적의 거동 양상은 충

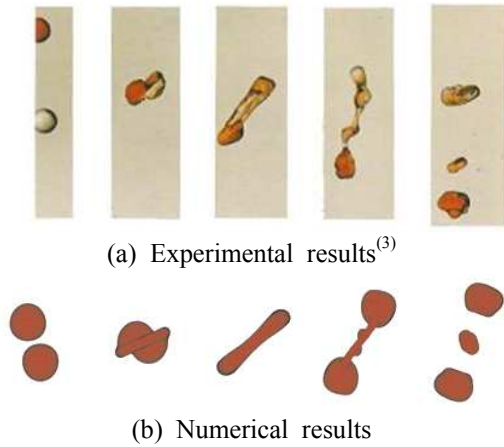


Fig. 7 Comparison the numerical results with the experimental results ($\Delta = 1$, $We = 83$ and $x = 0.34$)

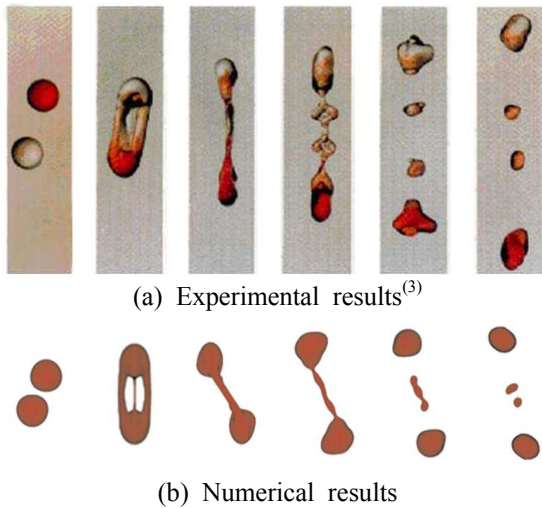


Fig. 8 Comparison the numerical results with the experimental results ($\Delta = 1$, $We = 83$ and $x = 0.43$)

둘 파라미터에 따라 다양하게 나타난다. 충돌 파라미터가 작은 경우에는 정면충돌에서의 결과와 같이 충돌 후에 변형된 하나의 액적이 양 방향으로 다시 늘어남에 따라 분리가 일어나는 리플렉시브 분리 양상을 갖는다. 그러나 충돌 파라미터가 더 커짐에 따라 충돌 후 양방향으로 늘어나는 성향이 줄어들고 이는 액적을 분리시키지 못하고 합일되는 결과를 갖는다. 그러나 이보다 큰 충돌 파라미터의 경우 서로 스쳐지나 가면서 Fig. 7과 8의 결과와 같이 합쳐진 두 액적은 양방향으로 진행하게 되며 스트레칭 분리가 일어나게 된다. 이 때, 위성액적을 생성시키는데, 수치해석 결과 실험 결과와 같이 충돌 파라미터가 0.34일 때는 1개, 0.43일 때 2개를 갖으며 이보다 큰 충돌 파라미터 0.68과 0.86에서는 다시

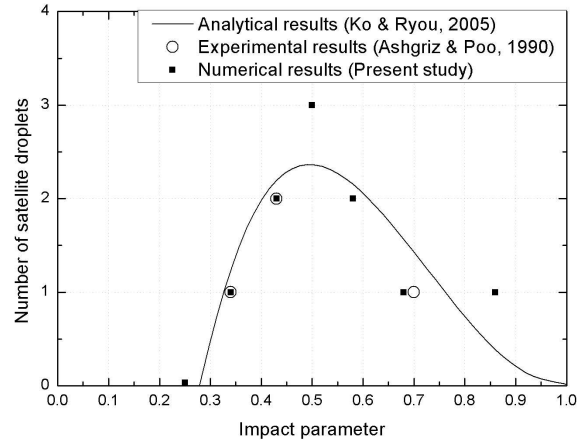


Fig. 9 Comparison of the satellite droplets number with the experimental⁽³⁾ and analytical⁽⁶⁾ results ($\Delta = 1$ and $We = 83$)



Fig. 10 Droplet identities after the collision ($\Delta = 1.0$, $We = 56$ and $x = 0$)



Fig. 11 Droplet identities after the collision ($\Delta = 0.5$, $We = 56$ and $x = 0$)

하나의 위성액적이 생성되게 된다. 이와 같은 위성액적의 생성 개수에 대한 결과는 Fig. 9과 같이 위성액적 생성에 대한 실험 결과⁽³⁾와 이론적 상관식⁽⁶⁾과 부합하는 결과를 갖는다.

4.4 액적 충돌 후 성분 추적

본 연구에서는 충돌 후 초기 액적 성분을 추적하기 위해서 식 (13)와 (14)와 같은 두 액적 체적비에 대한 수송방정식을 사용하여 수치해석하였다. Fig. 10과 11은 정면 충돌하는 크기가 같은 두 액적이 웨버수 56으로 정면 충돌하였을 때 액적 크기비가 1.0과 0.5인 경우에 대해 액적 성분 추적한 결과이다. 액적 크기비가 1.0인 Fig. 10에서는 충돌하는 두 액적은 바깥 방향으로 변형 후 액적을 기존 위치로 밀어내려는 힘으로 합일되었을 때 두 액적 성분이 섞이지 않고 실험 결과와 동일하게 초기 위치로 돌아오게 된다. 그러나 액적 크기비가 0.5인 Fig. 11에서는 두 액적이 충돌하여 합일되었을 때 내부 유동에

의해 성분이 섞이게 되어 초기 작은 액적 성분의 82.2 %는 분리 후 큰 액적으로 17.8 %는 분리 후 작은 액적으로 나뉘게 된다. 이와 같이 다른 크기의 액적 사이 정면 충돌은 크기가 같은 액적에서의 리플렉시브 분리와 달리 큰 액적이 작은 액적을 뚫고 지나가려는 특성으로 인해 합일되었을 때 액적 내부에서 두 액적 성분이 섞이게 되는 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 액적 충돌 현상에 대한 이상 유동을 LS (Level Set) 방법을 사용하여 수치해석하였다. 액적 충돌 현상의 수치해석에 사용한 격자를 구성하기 위해서 균일한 격자의 조밀도를 다르게 하여 액적 거동 현상을 비교하였다. 균일한 결과를 보이는 격자를 사용하여, 액적 충돌 현상에 대해 크게 정면 충돌과 비중심 충돌에 대해 분석하였다. 정면 충돌에 대한 2D 축대칭 해석으로부터 합일과 리플렉시브 분리를, 비중심 충돌에 대한 3D 해석으로부터 합일과 리플렉시브 분리, 스트레칭 분리와 같은 현상을 볼 수 있었다. 또한, 액적의 분리 현상이 발생할 때 위성액적이 생성되는 것도 확인할 수 있었다. 이와 같은 해석 결과는 기존 실험 및 이론적 결과와 일치하는 것을 보였다. 또한, 본 연구에서는 충돌하는 두 액적의 부피비에 대한 수송 방정식을 사용하여 액적 충돌시 초기 액적 성분을 추적하였다. 이와 같은 수치해석으로부터 두 액적이 충돌 후에 기존 액적 성분을 추적할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 ‘다중현상 CFD 연구센터(ERC)’ 과제의 일환으로 수행된 연구임 (No. 20090083510).

참고문헌

- (1) Brazier-Smith, P.R., Jennings, S.G. and Latham, J., 1972, "The Interaction of Falling Water Drops : Coalescence," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, Vol. 326, pp. 393-408.
- (2) O'Rourke, P.J. and Bracco, F.V., 1980, "Modelling of Drop Interactions in Thick Sprays and a Comparison with Experiments," *Stratified Charged Auto Engng Conf., Inst. Mech. Engng.*, pp. 101-116.
- (3) Ashgriz, N. and Poo, J.Y., 1990, "Coalescence and Separation in Binary Collisions of Liquid Drops," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 221, pp. 183-204.
- (4) Estrade, J.-P., Carentz, H., Lavergne, G. and Biscos, Y., 1999, "Experimental Investigation of Dynamic Binary Collision of Ethanol Droplets - a Model for Droplet Coalescence and Bouncing," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 486-491.
- (5) Post, S.L. and Abraham, J., 2002, "Modeling the Outcome of Drop-Drop Collisions in Diesel Sprays," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 997-1019.
- (6) Ko, G.H. and Ryou, H.S., 2005, "Modeling of Droplet Collision-Induced Breakup Process," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, pp. 723-738.
- (7) Schelkle, M. and Frohn, A., 1995, "Three-Dimensional Lattice Boltzmann Simulations of Binary Collisions Between Equal Droplets," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 26, pp. 145-146.
- (8) Rieber, M. and Frohm, A., 1995, "Three-Dimensional Navier-Stokes Simulations of Binary Collisions Between Droplets of Equal Size," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 26, pp. 929-930.
- (9) Nam, H.W., Kim, E.J. and Baek, J.H., 2007, "A Numerical Analysis on the Collision Behavior of Water Droplets," *Parallel Computational Fluid Dynamics 2006*, pp. 43-50.
- (10) Tanguy, S. and Berlemont, A., 2005, "Application of a Level Set Method for Simulation of Droplet Collisions," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, pp. 1015-1035.
- (11) Hur, N., Cho, W.K., Yoon, S.Y. and Kim K.H., 1994, "A Study on the Development of General Purpose Program for the Analysis of 3-D Fluid Flow by using a General Non-Orthogonal Grid System," *Transactions of the KSME (in Korean)*, Vol. 18, No. 12, pp. 3345-3356.
- (12) Son, G. and Hur, N., 2004, "Development of a 3-D CFD Program for Computing Two-Phase Flows with a Level Set Method," *Journal of Computational Fluids Engineering (in Korean)*, Vol. 9, No. 3, pp. 73-80.