

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.8.647>

과냉각대형액적 충돌예측을 위한 오일러리안 기반 수치 모델링

정성기*, 김지홍*

Eulerian-based Numerical Modeling for Impingement Prediction of Supercooled Large Droplets

Sung-Ki Jung* and Ji-Hong Kim*

ABSTRACT

Supercooled large droplet issues in aircraft icing have been continually reported due to the important safety considerations. In order to simulate the impingement behavior of large droplets, a two-dimensional and compressible Navier-Stokes code was developed to determine the flow field around the test model. Also, the Eulerian-based droplet impingement model including a semi-empirical approach for the droplet-wall interaction process and droplet break-up was developed. In particular, the droplet-wall interactions were considered as numerical boundary conditions for the droplet impingement simulation in the supercooled large droplet conditions. Finally, the present results were compared with the experimental test data and the LEWICE results. The droplet impingement area and maximum collection efficiency values between present results and wind tunnel data were in good agreements. Otherwise, the inclination of collection efficiency of the present result is over-predicted than the wind tunnel data around a lower surface of the NACA 23012 airfoil.

초 록

외부 환경조건에 의한 항공기 위협인자로서 과냉각 대형 액적은 그 중요성이 지속적으로 보고되고 있다. 이러한 대형 액적의 거동은 상대적으로 작은 액적과 달리 그 형태가 변화하며 액적이 표면과 충돌시 파편이 발생하는 등 다양한 물리적 특성을 나타낸다. 이러한 대형 액적의 거동을 시뮬레이션 하기 위해 비정렬 격자계 기반 2차원 압축성 Navier-Stokes 코드와 액적 거동 시뮬레이션 코드를 개발하였다. 또한 대형 액적의 물리적 현상을 모사하기 위해 반경험적 기법에 기반한 액적항력모델과 액적-고체표면 충돌 모델을 기존 액적장 지배방정식의 액적항력계수 및 경계면의 수치적 경계조건으로 적용하였다. 그 결과 풍동 시험과 액적충돌 영역 및 최대 축적율은 매우 유사하게 나타난 반면 NACA23012 익형의 아랫면 주위 축적율의 경향은 풍동 시험보다 다소 크게 나타났다.

Key Words : Supercooled Large Droplet(과냉각 대형 액적), Droplet Impingement (액적 충돌), Eulerian(오일러리안), Droplet-wall Interaction(액적-고체표면 충돌 모델), Droplet Drag Coefficient(액적 항력 계수)

† 2012년 5월 24일 접수 ~ 2012년 7월 18일 심사완료

* 한국항공우주산업(주)

교신저자, E-mail : skjung@koreaaero.com

경남 사천시 사남면 유천리 802 번지

I. 서론

외부 환경조건으로 인한 항공기 안전성 위협 인자 중 하나인 결빙은 상대적으로 습도가 높고 온도가 빙점 이하인 외기 조건에서 비행 할 경우 공기 중의 과냉각 된 액적이 항공기 표면과 충돌 함으로써 결빙이 발생한다. 이러한 결빙에 의한 항공기 사고는 지속적으로 보고되고 있으며 특히 1994년 ATR-72 사고 이후 과냉각된 액적의 크기에 대한 기존 14 CFR Part 25 및 29 Appendix C의 확장이 대두되고 있다.[1] Appendix C의 Continues Maximum 결빙조건에 제시되어 있는 결빙 발생 가능 영역의 액적의 크기는 $20\sim 40\mu\text{m}$ 로 정의되어 있으나 ATR-72 사고 이후 액적의 크기가 $100\mu\text{m}$ 이상인 외부 환경조건에 대한 중요성이 부각되고 있다. 과냉각 액적의 크기가 $40\mu\text{m}$ 이상인 경우 흔히 초냉각 대형 액적 (이하, SLD: Supercooled Large Droplet)으로 표현하며 기존의 액적에서 발생하지 않는 다양한 물리적 특성을 나타낸다. 특히 액적의 형태가 구에서 액적의 지름 증가에 따른 항력 증가로 인해 타원형으로 변화될 수 있으며 액적과 표면의 충돌 시 충돌면에서 액적 파편이 발생하는 등 다양한 형태로 변화될 수 있다. 이러한 액적의 특성 변화 및 거동을 포착하기 위해 다양한 수치해석 기법이 연구되었다.

Clift [2] 등은 공기에 의해 둘러싸여 있는 액적에 대한 물리적 특성을 반경험적 기법 (Semi-Empirical Method)을 기반으로 다양한 관계식을 제시하였으며, Bai [3] 등은 액적이 고체 표면과 충돌시 액적의 거동 메커니즘에 대해 점착(Stick), 반발(Rebound), 퍼짐(Spread) 및 파편(Splash)의 4가지로 분류하였다. 이러한 액적의 거동을 수치적으로 모사하기 위해 Honsek [4] 등은 오일러리안 기반 액적장 계산 모듈에 액적 변형에 의한 항력 성분과 액적과 표면의 충돌에 의한 액적 거동 모델 등을 추가하였다. Iuliano [5] 등은 항력 성분 및 액적과 표면의 충돌에 대한 3가지 종류의 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 제시하였으며 Sabri [6] 등은 기 계산된 액적장의 결과로부터 파편 매개변수등을 이용한 SLD 효과를 모사하였다. 본 연구에서는 SLD 조건에서 액적의 거동을 모사할 수 있는 오일러리안 기반 액적 충돌 코드를 개발하였다. 개발된 코드는 본 저자에 의해 제안된 Shallow Water Droplet Model (SWDM) [7] 에 반경험적 기반 대형 액적에 대한 항력 계수 적용 및 액적과 고체면의 충돌에 의한 파편 관계식을 수치적 경계조건으로

적용하였으며 실험 결과와 비교 검증을 통해 본 코드의 적용 가능성을 확인하였다.

II. 지배방정식

대기 중 결빙은 공기와 과냉각 액적이 혼합되어 있는 조건으로 두 개의 상이 존재하는 환경이나 본 연구에서는 액적에 의한 유동장의 변화가 극히 미약하다는 가정 하에 각 상에 대해 독립적으로 지배방정식이 구성된다. 우선 공기의 유동장 계산 결과를 바탕으로 액적에 영향을 미치는 공기의 속도, 밀도 및 점성계수를 액적장에 적용한다. 액적장은 공기의 속도, 밀도 및 점성계수를 바탕으로 액적에 작용하는 항력 및 부력을 계산하며, 대형 액적에 의한 고체 표면 액적 파편 모델은 반경험적 기법을 바탕으로 액적장 방정식의 경계조건에 적용된다.

2.1 압축성 RANS 방정식

순수한 공기에 대한 유동장 방정식으로 압축성 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하였다. 비선형 방정식을 계산을 위한 수치해석 기법으로 공간 차분화를 위해, Roe's Approximate Riemann Solver를 사용하였으며, 정확도 확장을 위해 Green-Gauss 이론 및 제한자로 Venkatakrisnan를 이용하였다. 점성효과를 고려하기 위해 난류모델로 단순하면서도 상대적으로 정확한 값을 제시하는 Spalart-Allmaras 방정식을 적용하였다. 시간 차분화를 위해 5계 Runge-Kutta 기법을 적용하였으며, 방정식을 폐쇄형으로 구성하기 위해 이상기체 방정식을 이용하였다.

2.2 액적충돌 방정식

오일러리안 기반 액적 충돌 방정식은 대기중 분산된 액적을 연속으로 가정한다. 또한 액적장의 밀도가 공기의 0.1% 미만인 경우 액적의 거동에 의한 순수 공기 유동장의 변화는 극히 미미하다는 가정을 전제한다. 액적 상호간의 충돌, 액적 자체의 변형, 열 및 질량변화는 고려하지 않으며 공기에 의한 항력, 액적의 질량에 의한 중력 및 부력만 고려된다. 수식 (1)은 오일러리안 기반 액적 충돌 방정식을 나타낸다.

$$U_t + A_x + B_y = C + D, \quad (1)$$

여기서

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ \rho uv \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \end{bmatrix},$$

$$C = F_{\Psi} \begin{bmatrix} 0 \\ u_g - u \\ v_g - v \end{bmatrix}, D = \rho g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 - \rho_g / \rho_w \end{bmatrix}.$$

수식 (1)에서 ρ 는 단위 체적당 전체 액적의 질량을 나타내며 u 및 v 는 액적의 속도를 나타낸다. $F_{\Psi}(u_g - u)$ 와 $F_{\Psi}(v_g - v)$ 는 순수한 공기 유동장에 의한 액적의 항력이며 $\rho g(1 - \rho_g / \rho_w)$ 는 중력과 부력을 나타낸다. 또한 ρ_g 와 ρ_w 는 공기와 물의 밀도이다. u_g 와 v_g 는 공기의 속도이며 g 는 중력가속도이다. F_{Ψ} 는 수식 (2)에 의해 정의된다.

$$F_{\Psi} = \frac{0.75 \cdot \rho \cdot C_{D_v} \cdot Re_{\Psi} \cdot \mu}{\rho_w \cdot MVD^2}, \quad (2)$$

여기서

$$Re_{\Psi} = \frac{\rho_g \cdot MVD \cdot |\Psi_g - \Psi|}{\mu}, \quad \Psi = [u, v]^T.$$

수식 (2)에서 Ψ 는 속도 벡터이며 Re_u 및 Re_v 는 액적의 레이놀즈 수이다. μ 는 공기의 동점성계수이며 C_{D_v} 는 구로 가정한 액적의 항력계수이다. 항력계수는 Lapple [8]에 의해 제안된 레이놀즈 수와 항력계수의 상관관계식을 이용하였다.

$$C_{D_v} = \frac{24}{Re} (1 + 0.125 Re_{\Psi}^{0.72}), \quad Re < 1000. \quad (3)$$

2.3 액적 항력 모델

과냉각 대형 액적은 액적의 크기에 의해 수식 (2)의 항력계수를 만족하지 않는 조건이 발생한다. 특히 공기력과 액적의 상호작용에 의해 액적의 형상은 완전한 구 형상이 아닌 디스크 형태와 구 형태가 복합적으로 존재하는 양상을 나타낸다. 과냉각 대형 액적에 대한 항력계수는 이를 반영하여 다시 정의될 필요가 있다.

$$C_{D_{Droplet}} = C_{D_{Sphere}} + e(C_{D_{Disk}} - C_{D_{Sphere}}), \quad (4)$$

여기서

$$e = 1 - \frac{1}{(1 + 0.007 \sqrt{We})^6}, \quad We = \frac{\rho_g \cdot V^2 \cdot MVD}{\sigma}$$

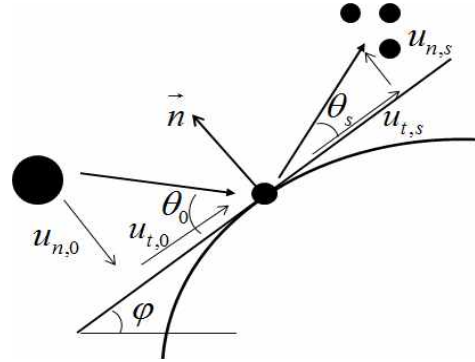


Fig. 1. Droplet-wall interaction

We 는 Weber 수이며 σ 는 액적의 표면장력이다. 수식 (4)에서 디스크 및 구에 해당하는 항력계수는 레이놀즈 수의 범위에 의해 정의되는데 본 연구에서는 참고문헌 [2]에 제시된 항력계수를 이용하였다. 수식 (4)에 의해 도출된 항력계수는 수식 (3)의 항력계수를 대체한다.

2.3 액적-고체표면 충돌 모델

액적의 고체표면 충돌 전·후, 액적에 대한 메커니즘을 설명하기 위해 예상 가능한 액적의 물리적 현상을 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1에서 액적은 고체 표면의 수직 벡터를 기준으로 수평 벡터와 액적의 진입경로 사이 진입각 (θ_0)과 충돌 후 액적의 파편 경로와 고체 표면의 수평벡터 사이 진출각 (θ_s) 및 잔여 액적이 고체표면에 부착되는 액적의 메커니즘을 나타낸다. 하첨자 0 과 s는 액적이 고체 표면과 충돌 전·후를 나타낸다.

이러한 액적과 고체표면 충돌에 대한 메커니즘은 더욱 세분화 되어 Bai [3] 등에 의해 Weber 수의 범위에 따라 액적은 점착, 반발, 퍼짐 및 파편 메커니즘이 제안되었다. 수식 (5)는 Weber 수의 영역에 따른 액적-고체표면 충돌 전·후의 질량비와 속도비를 나타낸다.

$$\begin{aligned} f_m = f_u = 0 & \quad \text{if} \quad We \leq 2, \\ f_m = 1, f_u = f_V^R & \quad \text{if} \quad 2 < We \leq 10, \\ f_m = f_u = 0 & \quad \text{if} \quad 10 < We \leq 1320 La^{-0.183}, \\ f_m = f_m^S, f_u = f_V^S & \quad \text{if} \quad 1320 La^{-0.183} < We, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 La 는 Laplace 수이며 액적 파편의 경우, 액적의 질량비에 대해 본 연구에서는 Truiillo [9] 등에 의해 제안된 파편 모델을 이용하였다.

$$f_m = \frac{3.8 \{ 1 - \exp[-f^*^{-0.375} (K^{0.5} - K_{Cr}^{-0.3125})] \}}{\sqrt{f^*^{-0.375} \cdot K^{0.5}}}, \quad (6)$$

여기서

$$f^* = 1.5 \left(\frac{LWC}{D_p} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$K = \left(\frac{\rho_p^3 D_p^3 V_{n,p}^5}{\sigma_p^2 \mu_p} \right)^{0.25}, K_{C_v} = 540 \left(\frac{Rs}{D_p} \right)^{-0.35}.$$

수식 (6)에서 Rs 는 최대 표면 거칠기 높이이며 f^* 는 무차원 액적 진동수이다. 수식 (6)에 의해 액적과 고체표면의 충돌시 질량비는 폐쇄형으로 구성할 수 있으며, 수식 (5)의 미지수인 f_V^R 및 f_V^S 는 수식 (7)에 의해 유도된다. 본 연구에서 반발 모델은 Bai 등의 모델을 이용하였으며 파편 모델은 Truiillo 모델을 적용하였다.

$$f_V^{Bound} = \begin{cases} f_u = \frac{u_{t,s}}{u_{t,0}} = \frac{5}{7}, \\ f_v = \frac{u_{t,s}}{u_{t,0}}, \end{cases} \quad (7a)$$

여기서

$$\frac{u_{n,s}}{u_{n,0}} = -[0.993 - 0.0307(0.5\pi - \theta_0) + 0.0272(0.5\pi - \theta_0)^2 - 0.0086(0.5\pi - \theta_0)^3],$$

또한

$$f_V^{Splash} = \begin{cases} f_u = 0.85 + 0.0025\theta_0, \\ f_v = -(0.12 + 0.0025\theta_0). \end{cases} \quad (7b)$$

수식 (7)을 통해 유도된 액적의 속도는 수치해석을 위한 고체 표면의 경계조건으로 활용된다.

III. 수치해석 기법

3.1 HLLC-type Riemann Solver

수식 (1)에서 정의된 오일러리안 기반 액적 충돌 모델은 Bourgault [10] 등에 의해 제안된 모델로서 엄격히 Hyperbolic 보존법칙을 만족하지 않는데, 이는 기존에 알려진 Riemann Solver를 적용할 수 없는 단점이 있다. 또한 액적장의 특징으로 음영 (Shadow) 영역과 비음영 (Non-shadow)영역이 계산 도메인에 같이 존재한다. 음영영역에서 액적의 밀도는 매우 낮고 비음영 영역에서는 상대적으로 높은 밀도 분포를 나

타낸다. 이를 수치해석적으로 모사하기 위해 Shallow Water Equations 에 많이 적용되고 있는 HLLC-type (Harten-Lax-van Leer-Contact) Riemann Solver를 본 연구에 적용하였다. HLLC 기법은 Toro [11]에 의해 제안되었으며 저밀도 문제 (Low Density Problem)에 적용되어 수치해석 기법의 정확성과 강건성 측면에서 우수한 특징을 나타낸다. 본 연구에서는 엄격히 Hyperbolic 보존법칙을 만족하지 않는 수식 (1)에 대해 수정된 방정식 (Shallow Water Droplet Equations: 이하 SWDEs)을 제안하고 수정된 방정식에 HLLC 기법을 적용한 계산한 결과를 제시하였다. 수식 (8)은 SWDEs에 대한 이차원 x 축 단면을 나타낸다.

$$U_t + P_x = S, \quad (8)$$

여기서

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho \psi \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + \rho g d \\ \rho u \psi \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ (\rho g d)_x \\ 0 \end{bmatrix}.$$

수식 (8)에 대해 $u - (gd)^{0.5}$, u , $u + (gd)^{0.5}$ 으로 독립된 세 개의 고유치와 각 고유치에 해당하는 고유벡터가 존재하므로 수식 (8)은 엄격히 Hyperbolic 보존 법칙을 만족하며, 또한 기존에 알려진 HLLC 기법을 적용하는데 있어 제약사항이 존재하지 않는다. 수식 (8)에 대한 HLLC 기법 적용은 본저자에 의해 참고문헌 [12]에 자세히 소개되어 있으며 본 논문에서는 HLLC를 적용한 최종 형태를 간략히 소개한다.

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t \sum_{i=1}^N H^n \Delta s, \quad (9)$$

셀(Cell)의 좌·우 접촉면에서 HLLC 플럭스는 수식 (10)과 같다.

$$H^n = \begin{cases} H_L & \text{if } 0 \leq S_L, \\ H_{*L} & \text{if } S_L < 0 \leq S_*, \\ H_{*R} & \text{if } S_* < 0 \leq S_R, \\ H_R & \text{if } 0 \geq S_R, \end{cases} \quad (10)$$

여기서

$$H_{*L/R} = H_{L/R} + S_{L/R} (U_{*L/R} - U_{L/R}),$$

$U_{*L/R}$ 및 $S_{L/R}$ 은 수식 (11)에 주어진다.

$$U_{*L/R} = \rho_* \left(\frac{S_{L/R} - u_{L/R}}{S_{L/R} - S_*} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ S_* \\ \psi_{L/R} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

여기서

$$S_{L/R} = u_{L/R} \mp a_{L/R} q_{L/R}, a_{L/R} = \sqrt{gd},$$

중간파 속도(Middle Wave Speed), S_* 및 q_K 는 다음 수식 (12)에 주어진다.

$$S_* = \frac{S_L \rho_R (u_R - S_R) - S_R \rho_L (u_L - S_L)}{\rho_R (u_R - S_R) - \rho_L (u_L - S_L)}, \quad (12)$$

$$q_{L/R} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\rho_*}{\rho_{L/R}}} & \text{if } \rho_* > \rho_{L/R}, \\ 1 & \text{if } \rho_* \leq \rho_{L/R}. \end{cases}$$

수식 (11, 12)의 ρ_* 는 Depth Positivity 조건으로부터 수식 (13)에 정의된다.

$$\rho_* = \frac{1}{2}(\rho_L + \rho_R) - \frac{1}{4}(u_R - u_L) \frac{\rho_L + \rho_R}{a_L + a_R}. \quad (13)$$

수식 (8)의 우측항은 수식 (1)의 우측항에 포함되어 선형 보간을 통해 접촉면의 플럭스를 계산한다. 또한 본 연구에서는 외재적 시간 전진법으로 5계 Runge-Kutta 기법을 이용하였으며, 정확도 향상을 위한 고차 기법으로 Green-Gauss 이론 및 Venkatakrisnan 제한자를 이용하였다.

3.2 고체 표면 경계조건

액적의 고체표면 충돌 유·무에 따른 물리적 경계조건을 수치해석을 위한 경계조건으로 적용하였다. 수식 (14)는 액적의 속도와 고체 표면의 수직벡터의 관계에 따른 고체 표면의 경계조건을 나타낸다. 수식 (14)에서 액적이 표면에 충돌할 경우 고체 표면에서 액적의 밀도와 속도는 액적-고체표면 충돌 모델로부터 각 경우에 대한 관계식에 의해 고체 표면의 경계조건으로 적용되며 수식 (15)는 최종 형태를 나타낸다.

$$\begin{aligned} U_{wall} &= 0 \text{ if } \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} \geq 0, \\ U_{wall} &= \mathbf{U} \text{ if } \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} < 0. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\rho_{wall} = (1 - f_m) \rho_{in}, u_{wall} = f_u, \text{ if } \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} < 0. \quad (15)$$

IV. 적용

4.1 유동장 검증

과냉각 대형 액적 조건에 대해 개발된 코드를 적용하기 위해 NASA Glenn IRT(Icing Research Tunnel) [13] 에서 수행된 결빙 풍동 시험 자료를 이용하였다. 또한 시험 결과와 시뮬레이션 결과 비교를 위해 NASA에서 개발된 LEWICE 코드[13, 14] 결과와 본 연구에서 개발된 코드의 결과를 비교하였다. LEWICE 코드는 유동장 계산을 위해 패널기법을 이용하며 고체표면과 액적의 충돌을 모사하기 위해 Lagrangian 기법을 이용한다. 시험 모델은 NACA23012 익형이며 시위선의 길이는 0.9144m 이다. 전산해석을 수행하기 위한 전처리 단계로서 시험 모델 주위 비정렬 격자를 생성하였다. 격자수는 16,385이며 Fig. 2는 모델 주위 격자를 나타낸다.

Fig. 3에서 유동장 해석 코드의 신뢰성 검증을 위해 NACA23012 익형의 압력 분포를 실험결과와 비교하였다. 계산 조건은 마하수 0.23, 레이놀즈 수 4.6e+06이다. 계산 결과 실험결과와 압력계수의 분포 측면에서 정성적으로 매우 유사한 경

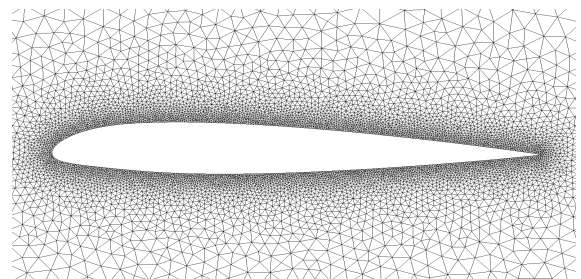


Fig. 2. Aerodynamic grid (N. of cell=16,385)

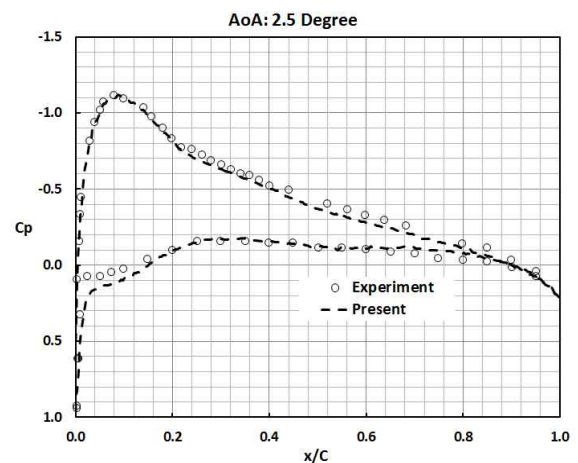


Fig. 3. Comparison of pressure coefficient

향을 나타냈으며, 절대값 측면에서 정량적으로 익형의 앞전 주위 아랫면을 제외한 대부분의 영역에서 일치하는 경향을 나타냈다.

4.2 해석 결과

공기중 액적은 균일한 크기가 아닌 다양한 크기로 분포되어 있으나 이를 효과적으로 제시하기 위해 평균액적지름 (MVD: Mean Volume Diameter) 으로 표현한다. 본 연구에서는 과냉각 액적의 평균 지름, 20, 111 및 $154\mu\text{m}$ 에 대해 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하기 위해 액적이 고체 표면에 충돌하는 비율 및 영역을 제시하는 축적율을 이용하였다. Fig. 4에서 과냉각 대형 액적의 물리적 특성이 나타나지 않는 평균액적지름이 작은 $20\mu\text{m}$ 의 경우 실험, LEWICE 및 개발된 코드의 축적율 결과를 비교한 결과 정성적으로 축적율의 분포 측면에서 매우 유사한 경향을 나타냈으며, 정량적으로 축적율의 최대값 및 결빙 발생 가능 영역이 풍동 시험과 매우 유사함을 확인하였다. 또한 과냉각 대형 액적의 영향성을 고려하지 않은 계산 결과와 비교를 통해 Non-SLD 조건에서 개발된 코드를 적용할 수 있는 코드의 확장성을 확인하였다. Fig. 4의 평균액적지름이 $111\mu\text{m}$ 과 $154\mu\text{m}$ 인 경우 실험결과와 개발된 코드를 이용한 시뮬레이션 결과가 결빙 영역 및 최대 축적율 관점에서 잘 일치함을 확인 할 수 있으나 축적율의 경향성 측면에서 다소 차이를 나타낸다. 이러한 원인으로 과냉각 대형 액적의 지름이 증가 할수록 고체표면과 충돌 후 발생한 파편 등이 익형의 정체점 이후 고체 표면 주위에 집중되어 고체 표면 주위 액적장의 밀도를 국부적으로 실험 대비 다소 과도하게 예측한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5의 액적의 밀도장 분포를 통해 확인할 수 있다. Fig. 5에서 과냉각 대형 액적의 영향성 유무를 액적량 분포를 통해 제시하였는데 익형의 앞전 주위 윗면과 아랫면에서 과냉각 대형액적 효과를 부여한 경우 액적의 파편이 혼재되어 있음을 확인 할 수 있었다. 반면 과냉각 대형액적 효과를 고려하지 않은 경우, 액적의 파편 및 반발 등이 발생하지 않으므로 인해 전 영역에 걸쳐 실험대비 축적율이 크게 발생하였다. LEWICE의 경우 풍동 시험 결과와 비교를 통해 액적의 평균액적지름과 무관하게 축적율의 최대값 측면에서 매우 유사한 결과를 나타낸 반면, 대형액적의 경우 결빙이 발생하는 영역 측면에서 풍동 시험 결과 대비 과도하게 예측하였다.

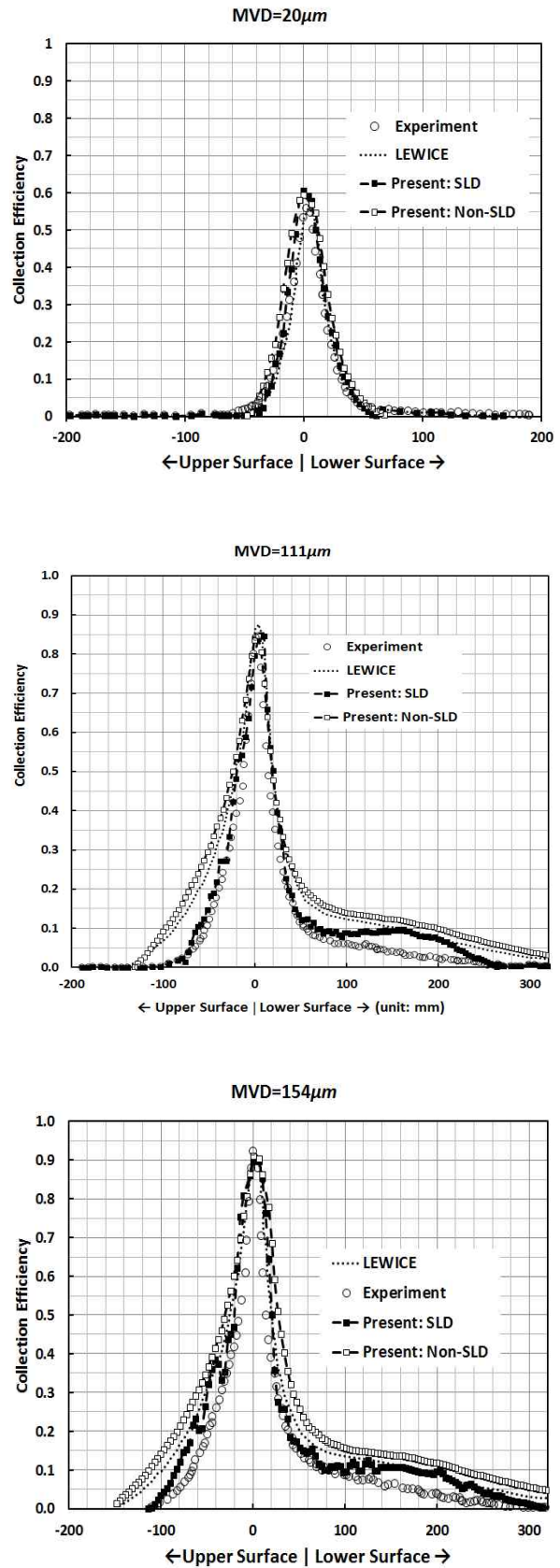


Fig. 4. Comparisons of collection efficiency

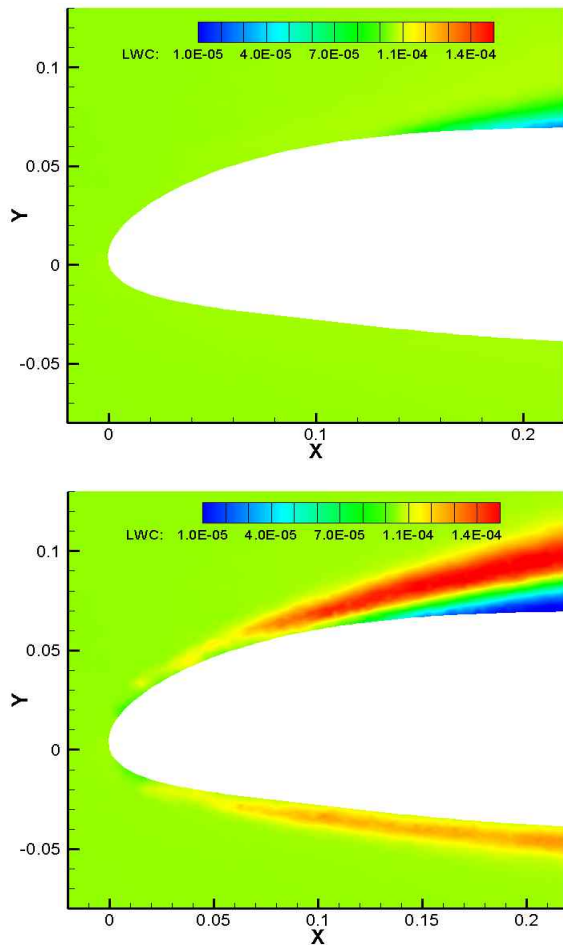


Fig. 5. Comparisons of LWC distributions (MVD=154 μ m, up: non-SLD, down: SLD).

V. 결 론

과냉각 대형 액적의 물리적 현상을 전산해석을 통해 모사하기 위해 반경험적 기법에 근거한 액적의 항력모델과 액적-고체표면 충돌 모델을 액적 충돌 방정식의 항력계수와 경계조건으로 적용하여 특정 평균액적지름에 대한 계산을 수행하였다. 그 결과 액적 지름이 작은 경우 계산 결과는 실험 결과 및 LEWICE 결과와 매우 유사한 경향을 나타낸 반면, 액적의 크기가 큰 경우 결빙 발생 영역 및 최대 축적율 관점에서 실험과 유사한 경향을 나타내나, 축적율의 경향성 측면에서 다소 차이를 나타냈다. 반면 LEWICE는 결빙 영역과 축적율의 경향성 측면에서 과도한 예측 결과를 제시하였다. 또한 과냉각 대형액적의 영향성 감안 유무 비교를 통해 영향성을 감안한 경우 결빙 영역 및 축적율의 경향이 실험과 근접

하게 접근함을 확인 하였다. 향후 축적율의 경향성 측면에서 실험결과와 유사한 경향을 제시하기 위해 액적-고체 표면 충돌 모델 및 액적 항력에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업 차세대중형항공기개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) FAA, Airplane and Engine Certification Requirements in Supercooled Large Drop, Mixed Phase, and Ice Crystal Icing Conditions, Federal Register, Vol. 75, No. 124, 2010, pp. 37311-37339.
- 2) Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E., "Bubbles, Drops and Particles," Academic Press, New York, 1978.
- 3) Bai, C., and Gosman, A.D., "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE TR 950283, 1995.
- 4) Honsek, R., Habashi, W.G., and Aube, M.S., "Eulerian Modeling of In-Flight Icing Due to Supercooled Large Droplet," Journal of Aircraft, Vol. 45 No. 4, 2008, pp. 1290-1296.
- 5) Iuliano, E., Mingione, G., Petrosino, F., and Hervy, F., "Eulerian Modeling of Large Droplet Physics Toward Realistic Aircraft Icing Simulation," Journal of Aircraft, Vol. 48 No. 5, 2011, pp. 1621-1632.
- 6) Sabri, F., Octavian, T., and Paraschivoiu, I., "In-Flight Ice Accretion Simulation In SLD Conditions," AIAA 2007-4282, 2007.
- 7) Jung, S.K., Myong, R.S., and Cho, T.H., "Development of Eulerian Droplets Impingement Model Using HLLC Riemann Solver and POD-Based Reduced Order Method," AIAA 2011-3907, 2011.
- 8) Lapple, C.E., "Particle Dynamics," Engineering Research Laboratory, E.I. Dupont de Nemours and Company, Wilmington, Delaware, 1951.
- 9) Trujillo, M.F., Mathews, W.S., Lee, C.F.,

and Peter, J.E., "Modeling and Experiment of Impingement and Atomization of a Liquid Spray on a Wall," *International Journal of Engine Research*, Vol. 1 No. 1, 2000, pp. 87-105.

10) Bourgault, Y., Habashi, W.G., Dompierre, J., and Baruzzi, G.S., "A Finite Element Method Study of Eulerian Droplets Impingement Models," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 29 No. 4, 1999, pp. 429-449.

11) Toro, E.F., *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*, Wiley, 2001.

12) Jung, S.K., *Numerical Modeling of*

Aircraft Icing and Static Fluid-Structure Interaction Using CFD-based Simulation Methods, Ph.D. Thesis, Gyeongsang National University, 2011.

13) Papadakis, M., Rachman, A., Wong, S., Yeong, H., Hung, K.E., Vu, G.T., and Bidwell, C.S., "Water Droplet Impingement on Simulated Glaze, Mixed, and Rime Ice Accretions," NASA/TM-2007-213961, 2007.

14) Papadakis, M., Rachman, A., Wong, S., Yeong, H., Hung, K.E., Vu, G.T., and Bidwell, C.S., "Water Impingement Experiments on a NACA 23012 Airfoil with Simulated Glaze Shape," AIAA 2004-0565, 2004.