

전기적으로 대전된 액적의 스프레드-리바운드 거동 영역에 대한 기초 연구

류성욱* · 이상용†

Preliminary Investigation on Spread-Rebound Regime of an Electrically Charged Droplet

Sung Uk Ryu and Sang Yong Lee

Key Words : Single Drop Impact(단일 액적 충돌), Electrically Charged Droplet(대전 액적), Spread-Rebound Regime(스프레드-리바운드 영역)

Abstract

Understanding of the impinging behavior of an electrically charged spray is essential in determining appropriate operating conditions for electro-spraying of paints, surface coating materials and insecticides. In the present work, as an initial step, the wall impact of an electrically charged droplet has been experimentally investigated. The charged drops were directed on the surface of a paraffin wax, and the impinging behavior was visualized and recorded using a CCD camera to identify the impingement regime. The spread-rebound boundary for the charged drop turned out to be smaller compared to that for an electrically neutral droplet under the same surface condition. The shift of the transition criterion is considered to be due to the discrepancy between the maximum spread ratio of the electrically charged droplet and that of the neutral droplet.

기호설명		
D	액막 직경	[m]
d	액적 직경	[m]
E	에너지	[J]
Re	레이놀즈 수($=\rho_l \cdot V_{b,n} \cdot d / \mu_l$)	[-]
t	충돌 후 경과 시간	[ms]
V	액적 속도	[m/s]
We	웨버수 ($=\rho_l \cdot V_{b,n}^2 \cdot d / \gamma_{L,V}$)	[-]
Greek		
α	토러스(torus) 직경에 대한 림 (rim) 두께의 비	[-]
β	퍼짐율	[-]
γ	계면장력	[N/m]
θ	정적 접촉각	[°]
μ	점도	[mpa·s]
ρ	밀도	[kg/m ³]

Superscripts

† 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr
TEL: (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

* 한국과학기술원 기계공학과

* 무차원

Subscripts

b 충돌 전
crit 임계
ERE 초과 리바운드 에너지
h 수평 방향(horizontal)
L, V 액체와 기체
l 액체
max 최대
n (평판에) 수직(normal)
v 수직 방향(vertical)

1. 서론

전기적으로 대전된 액적의 벽면 충돌 현상은 정전 분무를 이용한 도장(electrostatic spray painting), 정전 분무를 이용한 박막 제조(electrostatic spray deposition), 연속 분사 방식(continuous jet)의 잉크젯 프린팅 기술, 정전 분무를 이용한 농약 살포 등의 여러 응용 분야에서 관찰되는 현상으로 적합한 작업 조건의

선정을 통한 기술력의 향상을 피하기 위해서는 분무 액적의 벽면 충돌에 대한 이해는 필수적으로 수행되어야 할 주제로 인식된다. 특히, 정전 분무를 이용한 박막제조 기술이나 잉크젯 프린팅 기술은 평판 디스플레이나 태양열 전지의 박막, RFID(Radio Frequency Identification) 태그, 임플란트(implant) 등을 제조하는 분야에서 높은 경쟁력을 갖춘 대체 기술로 평가 받기 때문에 관련 기술의 작업 조건을 선정하기 위한 기본 연구들이 신속하게 진행되어야 할 것으로 판단된다.

정전 분무를 이용한 도장, 박막 제조 등의 분야에서 관심의 대상이 되는 내용 중 가장 의미를 갖는 사항은 대전된 액적이 부착 대상물에 충돌한 후의 수력학적 거동 영역을 결정하고 각 영역간의 경계 조건을 예측할 수 있는 정보들을 파악하는 것이다.

단일 액적의 수력학적 거동 영역을 파악하는 연구는 분무-벽면 충돌 현상과 관련된 연구 중 가장 기본적으로 수행되어야 할 주제로 인식되어 온 결과 여러 연구자들에 의해 오랜 기간 동안 연구가 진행되어 왔다.^(1, 2) 상온의 건조 기판에 액적이 충돌할 경우 액적의 운동량 및 물성치 조건 등에 따라 그림 1에 표현된 바와 같이 스틱(stick), 리바운드(rebound), 스프레드(spread), 스플래시(splash) 현상이 나타날 수 있다.⁽¹⁾

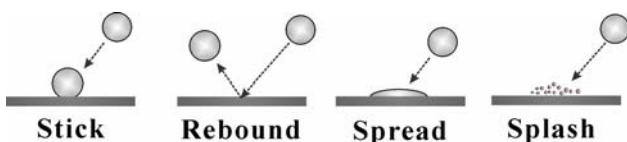


Fig. 1 Impingement regimes of a single drop impacting a unheated dry wall.

Bai 와 Gosman⁽³⁾은 상온의 건조한 표면에 액적이 충돌할 경우 스틱, 스프레드, 스플래시 현상만이 나타난다고 주장하였으나, Mao 등⁽⁴⁾과 Ryu 와 Lee⁽⁵⁾는 표면의 적습률(wettability) 특성에 따라 리바운드 현상이 나타날 수 있다는 것을 실험적으로 보였다.

그러나, 현재까지 진행되어 온 연구들의 공통점은 전기적으로 중성(electrically neutral)의 상태인 액적이 벽면에 충돌한 후의 결과라는 점이며, 이로 인해 기존 연구 결과들을 통해 대전된 액적들의 충돌 후 거동 특성을 예측하기에는 한계가 있다. 액적이 전기적으로 대전된 경우에는 전하에 의한 표면에너지가 추가적으로 생성되어 액적의 충돌 에너지가 변화하며 또한 기판과 접촉

하는 과정에서 전하의 역할에 의해 액적의 퍼짐(spreading) 및 회복 과정(recoil)이 비대전 액적의 충돌 과정과는 달라질 것으로 예상되기 때문이다.

본 연구에서는 상온의 건조 기판에 전기적으로 대전된 액적이 충돌할 경우에 생성되는 거동 영역을 가시화 기법을 통해 살펴보았으며, 또한 스프레드와 리바운드 영역을 구분하는 것이 조건의 변화 여부 및 원인을 구체적으로 살펴 보았다.

2. 실험 장치 및 방법

액적의 충돌 후 거동 영역을 파악하기 위해 그림 2에 표현된 것과 같은 실험장치를 구성하였다.

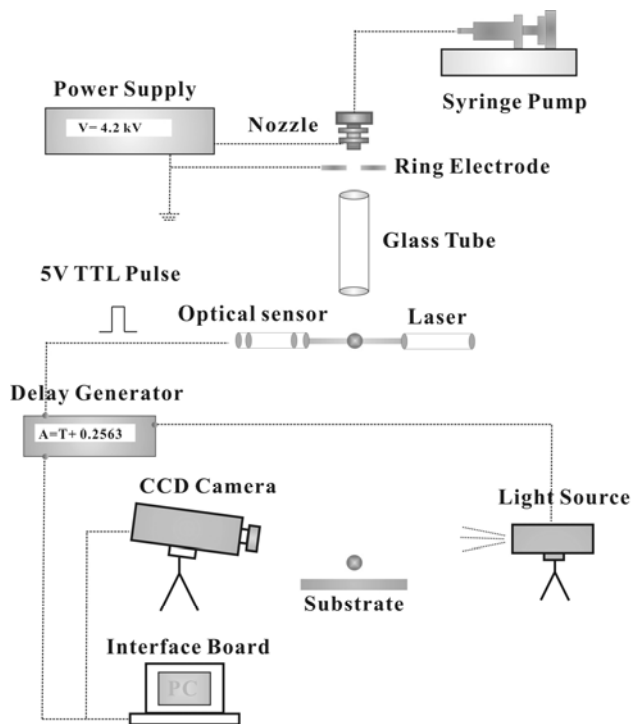


Fig. 2 Experimental setup.

장치는 크게 액적을 생성시키기 위한 분무 장치와 충돌 전, 후 거동을 관찰하기 위한 가시화 장치로 이루어져 있다.

일정 유량의 유체가 실린지 펌프(syringe pump)를 이용하여 공급되며, 전원 공급기를 이용하여 스테인리스 스틸 재질의 노즐과 링 형태의 전극 사이에 전압 차를 발생시키면 액적은 전기적으로 대전된 상태로 분열된다. 액적의 크기는 공급되는 유체의 유량과 노즐 팁의 크기, 인가된 전압의 크기에 의해 결정된다. 실험에는 내경이 140(gage 30),

241(gage 26), 292(gage 24), 838(gage 18) 마이크론인 네 종류의 노즐 팁을 사용하였다.

노즐로부터 생성된 단일 액적은 유리관과 적외선 레이저 빔(LTC100-B, Thorlabs)을 통과한 후 기판에 충돌하게 된다. 유리관은 공기 유동의 간섭 현상을 방지하기 위한 목적으로 설치하였으며 레이저 빔은 액적이 통과하는 시각을 감지하기 위한 목적으로 구성하였다.

액적이 레이저 빔을 통과하게 되면 광학 센서(PDA50B-EC, Thorlabs)로부터 5 V 변위의 TTL 신호가 생성되며, 이 신호에 의해 디지털 delay 신호 생성기(DG-535, SRS)가 구동하게 된다. Delay 신호 생성기는 액적이 빔을 통과한 후 일정 시간 후에 CCD 카메라(Sensicam, PCO)와 광원이 구동하게끔 임의의 시간 후에 신호를 내보내는 역할을 한다. 이러한 일련의 시스템을 통해 충돌 경과 시간에 따른 액적의 형상 변화 과정을 상세하게 기록하는 것이 가능하게 된다. 그림 3은 액적이 레이저 빔을 통과한 후 동일 시간에 촬영한 사진들로 실험기법의 정확성을 확인하기 위한 목적으로 촬영하였다. 결과들로부터 알 수 있듯이 실험에 이용된 장치 및 방법이 충돌 시간 경과에 따른 액적의 형상 변화 과정을 관찰하기에 적합함을 확인할 수 있다.



Fig. 3 Three different drop images at same delay time. (delay time : 18.5 ms; drop size : 1.93 mm)

CCD 카메라는 변형된 액적의 형상을 자세히 관찰하기 위해 회전이 가능한 광학대(GOH-60A50, Sigma KOKI) 위에 설치하였다. 충돌 직전의 액적의 직경과 속도는 CCD 카메라를 통해 촬영한 충돌 가시화 이미지를 통해 측정하는 것이 가능하다. 액적은 완전 구형이 아니기 때문에 식 (1)과 같이 액적의 수평방향 길이(d_h)와 수직방향 길이(d_v)를 모두 측정하여 액적의 등가 직경을 구하였다. 식 (1)은 액적이 수직축에 대해 회전방향으로 대칭이라는 가정하에 계산되는 등가 직경식이다.

$$d = (d_h^2 d_v)^{1/3} \quad (1)$$

충돌 직전의 액적속도는 그림 4와 같이 다중 노출로 촬영된 액적 충돌 가시화 이미지를 통해 측정하였다. 연속된 노출 사이의 시간 간격과 이미지를 통해 측정된 액적의 수직방향 이동거리로

부터 액적의 충돌 전 수직 방향 속도를 계산하는 것이 가능하다.

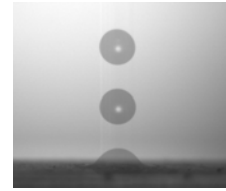


Fig. 4 Multi-exposed image of a colliding water droplet. (Time interval: 2 ms; drop size: 3.15 mm)

실험유체로는 상온 상태의 증류수를 이용하였으며 기판은 직사각형 형상의 파라핀 왁스 평판이 사용되었다. 액적의 충돌로 인해 기판 위에 형성되는 액막은 에어 블로워로 제거하여 기판은 항상 건조 상태를 유지하도록 하였다. 대전된 액적의 충돌로 인해 기판 위에는 전하층이 형성될 가능성이 있으며, 이는 액적의 충돌 후 거동 영역 및 특성에 영향을 주는 인자가 될 수 있다. 본 연구에서는 전하층의 영향을 배제하기 위해 액적의 충돌 실험 전에 접지된 금속 재질의 원통을 기판의 표면에 접촉하여 전하들을 제거하였다.

평판의 접촉각은 액적의 충돌 후 형상 및 거동을 결정하는 주요 인자이므로 접촉각 측정기(G10, KRÜSS GmbH)를 이용하여 정적 접촉각(static contact angle)을 측정하였다. 측정된 파라핀 왁스 평판의 정적 접촉각은 118° 이다.

3. 실험 결과

3.1 대전된 액적의 거동 영역

대전된 액적의 경우, 수직 웨버수가 13.4와 38.4 사이의 범위(레이놀즈 수의 실험 범위는 1105 ~ 1880)에서 기판에 충돌하는 액적의 형상 변화 과정을 CCD 카메라를 이용하여 관찰하였으며, 비교를 위한 자료를 확보하기 위해 비대전 액적의 충돌 실험도 병행하여 수행하였다.(비대전 액적의 수직 웨버 수 범위: 16.1 ~ 46.8, 레이놀즈 수 범위: 1505 ~ 2773)

그림 5는 파라핀 왁스 평판 위에 충돌하는 비대전 액적의 형상 변화 과정을 충돌 시간의 경과에 따라 표현한 것으로 그림 (a)는 충돌한 액적이 기판으로부터 분리되지 않는 스프레드(spread) 현상을 촬영한 것이며, 그림 (b)는 액적의 일부가 기판으로부터 분리되는 부분 리바운드(partial re-

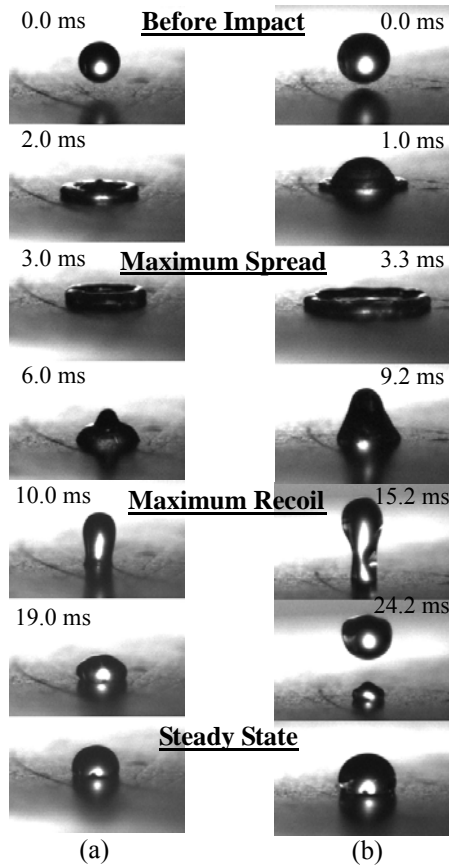


Fig. 5 Impact of an electrically neutral droplet on paraffin wax substrate:

- (a) Spread: $d = 1.93$ mm, $V_{b,n} = 0.97$ m/s
- (b) Partial Rebound: $d = 2.37$ mm, $V_{b,n} = 1.17$ m/s

bound) 현상을 나타낸 것이다. 본 논문에서 서술한 부분 리바운드 영역은 분열된 액주의 상단부만이 기관과 분리되고, 하단부는 기관과 접촉 상태를 유지하는 현상으로 기존 연구에서 관찰되었던 리바운드(rebound)나⁽⁶⁻⁸⁾ 분열을 동반한 리바운드(rebound with breakup)⁽⁶⁻⁷⁾ 현상과는 최대 회복 과정 후에 나타나는 액적의 형상이 다르다. 액적의 충돌 에너지가 증가할수록 스프레드 영역에서 부분 리바운드 영역으로 변화하는 경향이 나타났다.

그림 6은 전기적으로 대전된 액적의 형상 변화 과정을 표현한 것으로 모든 실험 조건에서 부분 리바운드 현상만이 관찰되었다. 이는 비대전 액적의 경우 실험 조건 내에 스프레드와 부분 리바운드 영역을 구분하는 경계 조건이 존재하여 두 거동 영역이 모두 나타났으나 대전 액적의 경우 전하의 영향으로 경계 조건이 변화하여 부분 리바운드 영역만이 나타났음을 의미한다. 액적이 기관에 충돌한 후 형상이 변형되는 과정은 비대전 액적의 경우와 마찬가지로 충돌 전(before impact), 최대 퍼짐(maximum spread), 최대 회복(maximum recoil) 과

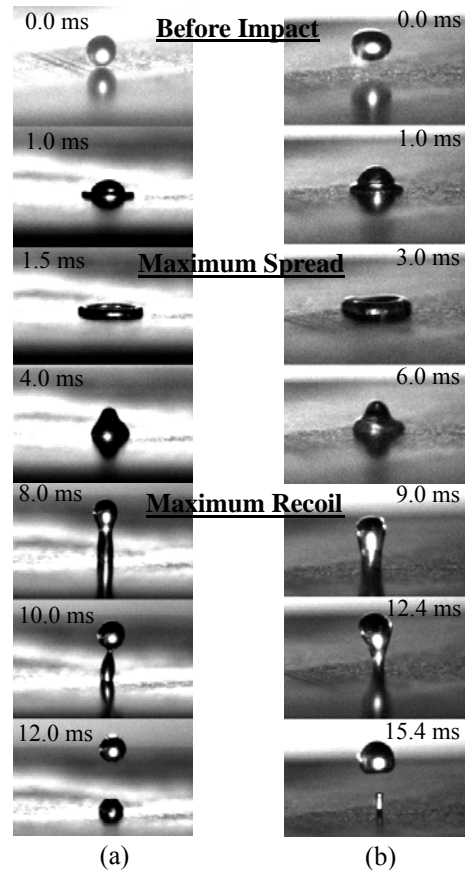


Fig. 6 Impact of an electrically charged droplet on paraffin wax substrate:

- (a) Partial Rebound: $d = 1.35$ mm, $V_{b,n} = 1.26$ m/s
- (b) Partial Rebound: $d = 1.58$ mm, $V_{b,n} = 0.85$ m/s

정을 거쳐 이루어졌으며 최대 회복 과정 후에 분열된 액적이 기관과 분리되는 현상이 관찰되었다. 그러나, 액적이 분열된 후의 형상은 액적의 대전 상태에 따라 차이를 보였다. 비대전 액적의 경우, 분리된 상단부가 약간의 시간(약 10 ms)이 경과한 후 하단부의 액적과 합쳐지며 정상 상태(steady state)로 회복하였으나 대전 액적의 경우에는 상단부가 충분한 에너지를 갖고 충돌 지점으로부터 튕겨 나가는 경향을 보였다. 이는 대전된 액적의 경우, 퍼짐(spreading)과 회복(recoil)과정에서의 에너지 소산 과정이 비대전 액적의 경우와는 달라져 초기 충돌 에너지에 대한 액적의 최종 운동 에너지의 비가 변화했기 때문에 나타난 결과로 예상된다.

3.2 대전된 액적의 스프레드/리바운드 천이조건

그림 7은 액적의 스프레드, 리바운드 영역의 천이조건을 파악하기 위해 각 실험 조건에서의 거동 영역을 액적의 수직 웨버수와 레이놀즈 수를 양

축으로 하는 선도에 표현한 것이다. 이는 리바운드와 스프레드 영역이 액적의 웨버수와 레이놀즈수에 의해 주요하게 결정된다고 알려져 있기 때문이다.^(1,4) (정적 접촉각으로 정량화할 수 있는 기관의 젖음 특성도 거동 영역을 결정하는 주요 인자이나 실험에서는 θ 값이 118° 인 경우에 한정하였다.)

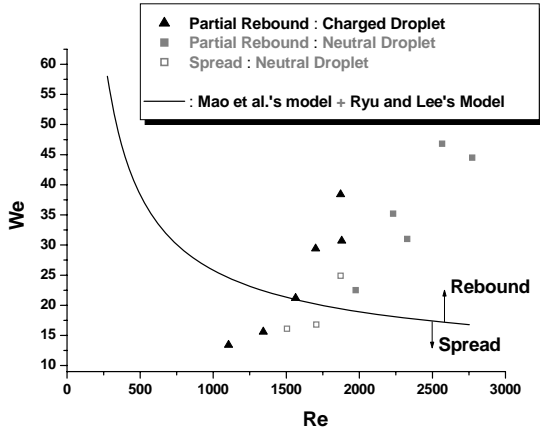


Fig. 7 Transition criterion between the spread and rebound regimes.

Mao 등⁽⁴⁾은 이론적인 해석과 실험 결과를 통해서 식 (2)와 같이 정의되는 무차원 에너지를 도입하고 이 값이 0 보다 커지는 조건에서 리바운드 현상이 발생한다고 주장하였다. 식 (2)의 β_{max} (maximum spreading ratio) 항은 액적의 직경과 액막의 최대 직경의 비를 의미하는 것으로 Ryu 와 Lee⁽⁵⁾의 예측식 (4)와 (5)에서와 같이 액적의 웨버수와 레이놀즈 수, 정적 접촉각의 함수로 표현할 수 있다. (식에서의 α 항은 두 식을 연결하는 매개 변수에 불과하다.)

$$E_{ERE}^* = \frac{1}{4}\beta_{max}^2(1-\cos\theta) - 0.12\beta_{max}^{2.3}(1-\cos\theta)^{0.63} + \frac{2}{3}\beta_{max}^{-1} - 1 > 0 \quad (2)$$

$$\beta_{max} = \frac{D_{max}}{d} \quad (3)$$

$$\left\{ \alpha(1-\alpha) \left(\frac{\pi}{2} - \cos\theta \right) + 0.39 \frac{We^{0.71}}{Re^{0.31}} \right\} (\beta_{max})^2 - \left(\frac{We}{12} + 1 \right) = 0 \quad (4)$$

$$(\beta_{max})^3 = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)}, \quad 0 < \alpha < \frac{2}{3} \quad (5)$$

식 (2)의 정적 접촉각 θ 항에 현재의 실험 조건인 118° 를 대입하여 무차원 에너지가 0 이 되는

β_{crit} 조건을 계산하면 약 1.88 의 값을 얻을 수 있으며, 이러한 사실은 β_{max} 의 값이 1.88 이상이 되는 조건에서 리바운드 현상이 발생한다는 것을 의미한다.

그림 7 의 실선은 정적 접촉각이 118° 인 조건에서 β_{max} 가 1.88 이 되는 조건을 Ryu 와 Lee⁽⁵⁾의 예측식 (4)와 (5)를 이용하여 표현한 것이며, 비대전 액적의 거동 영역에 대한 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그러나, 대전된 액적의 경우에는 실선 아래쪽에서도 부분 리바운드 영역이 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 Ryu 와 Lee⁽⁵⁾의 β_{max} 에 대한 모델을 이용한 예측값이 대전된 액적의 실제 β_{max} 값을 과소평가하기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

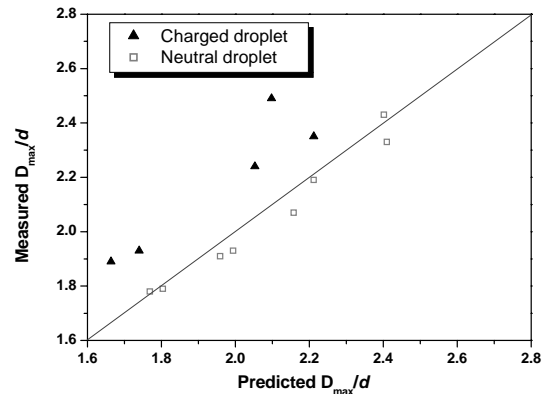


Fig. 8 Comparison of the calculated maximum spreading ratio between the Ryu and Lee's model⁽⁵⁾ and the present experimental data.

그림 8 의 결과에서 확인할 수 있듯이 비대전 액적의 경우, β_{max} (액적의 최대 퍼짐율)의 측정값은 Ryu and Lee⁽⁵⁾의 모델에 의한 예측 값과 5% 이내에서 잘 일치하였지만 대전된 액적의 측정값은 예측 값보다 최대 20% 이상 크게 나타났다. 이는 대전된 액적의 퍼짐(spreading) 과정이 비대전 액적과는 다르며 이로 인해 대전 액적의 퍼짐율을 비대전 액적에 대한 예측 모델로서 설명하기에는 한계가 있음을 의미한다. 따라서, 대전된 액적의 스프레드/리바운드 영역간의 천이조건을 예측하기 위해서는 새로운 β_{max} 에 대한 모델을 제시할 필요가 있다.

4. 결론

대전된 액적의 수직 웨버수가 13.4 와 38.4 사이인 범위에서 파라핀 왁스 평판에 대한 액적의 충돌 실험을 수행하였다. 실험 결과들로부터 다음과

같은 결론을 얻을 수 있다.

- 대전된 액적의 경우, 모든 실험 조건에서 부분 리바운드(partial rebound) 현상만이 관찰되었다. 이는 스프레드와 리바운드 영역의 경계 조건이 전하의 영향에 의해 감소하였기 때문에 나타난 결과로 해석된다.

- 비대전 액적의 경우, β_{\max} (액적의 최대 퍼짐율)의 측정값이 Ryu and Lee⁽⁵⁾의 모델에 의한 예측 값과 5% 이내에서 잘 일치하였지만 대전된 액적의 측정값은 예측값보다 최대 20% 이상 크게 나타났다. 이는 대전된 액적의 퍼짐(spreading) 과정을 비대전 액적의 예측 모델로 설명하기에는 한계가 있음을 의미한다.

추후 연구에서는 전기적으로 대전된 액적의 퍼짐율을 예측하기 위한 최대 스프레드 모델(maximum spread model)을 개발하고 이를 바탕으로 스프레드와 리바운드 거동 영역을 구분하는 경계 조건을 제시할 것이다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원금과 교육인적자원부의 BK-21 사업 출연금 일부에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. Y and Ryu, S. U., 2006, "Recent Progress of Spray-Wall Interaction Research," *Journal of Mechanical Science and Technology* 20, 1101-1117.
- (2) Tropea, C. and Marengo, M., 1999, "The Impact of Drops on Walls and Films," *Multiphase Science and Technology*, Vol. 11, pp. 19-36.
- (3) Bai, C and Gosman, A. D., 1995, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," *SAE 950283*.
- (4) Mao, T., Kuhn, D. C. S. and Tran, H., 1997, "Spread and Rebound of Liquid Droplets upon Impact on Flat Surfaces," *AIChE Journal*, Vol. 43, pp. 2169-2179.
- (5) Ryu, S. U and Lee, S. Y., 2007, "Revisit of Spread-Rebound Transition Criterion in Droplet-Wall Impingement," The 18th International Symposium on Transport Phenomenon, Submitted.
- (6) Wachters, L. H and Westerling, N. A. J., 1966, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," *Chemical Engineering Science*, Vol. 21, pp. 1047-1056.
- (7) Ko, Y. S and Chung, S. H., 1996, "An Experiment on the Breakup of Impinging Droplets on a Hot Surface," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, pp. 118-123.
- (8) D. Richard and D. Quere, Bouncing Water Drops, *Europhysics Letters* 50, 769-775 (2000).