

표면 젖음성이 스프레드-스플래시 영역 간 천이 조건에 미치는 효과

류성욱* · 이상용†

Surface Wetting Effect on Spread-Splash Transition Criterion

S. U. Ryu and S. Y. Lee

Key Words: Spread regime(스프레드 영역), Splash regime(스플래시 영역), Surface wettability(표면 젖음성), Transition criterion(천이 조건), Single droplet impact(단일 액적 충돌)

Abstract

In the present work, surface wetting effect on spread-splash regime and transition criterion of the water and ethanol droplets impacting an unheated dry wall has been experimentally investigated. The droplet was directed on a polished STS plate and a glass slide, and the impinging behavior was visualized and recorded using a CCD camera. Droplet diameter and velocity approaching the wall were measured as well. The critical Sommerfeld number representing the spread-splash boundary for the ethanol droplet impinging on the substrates turned out to be smaller compared to that for the water droplet impinging on the substrates with the surface roughness condition remained unchanged. The shift of the transition boundary is considered to be due to the effect of the surface wettability represented by static contact angle and surface tension of droplet.

기호설명

d	diameter of droplet	[m]
K	Sommerfeld number (= $We^{0.5} Re^{0.25}$)	[-]
K'	modified Sommerfeld number (= $We^{0.8} Re^{0.4}$)	[-]
La	Laplace number (= $\rho_l \sigma d / \mu_l^2$)	[-]
Re	drop Reynolds number based on normal velocity (= $\rho V_{b,n} d / \mu$)	[-]
V	droplet velocity	[m/s]
We	drop Weber number based on normal velocity (= $\rho V_{b,n}^2 d / \sigma$)	[-]

Greeks

σ	surface tension	[N/m]
θ	static contact angle	[degree]
λ	surface roughness	[m]
μ	liquid density	[Pa · s]
ρ	liquid viscosity	[kg/m ³]

Superscripts

- average

Subscripts

b	before
c	critical
l	liquid
n	normal direction
nd	non-dimensional

(2007년 11월 23일 접수 ~ 2007년 12월 5일 심사완료)

*책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

*한국과학기술원

1. 서 론

단일 액적의 벽면 충돌에 관한 연구들 중 액적의 거동 영역을 구분하고 경계조건을 파악하는 것은 여러 분야(분무 도장, 분무 코팅, 분무 냉각, IC 엔진)에서의 응용 가능성으로 인해 분무/벽면 간섭 현상(spray-wall interaction)과 관련된 연구들 중 가장 기본적으로 수행되어야 할 연구 주제로 인식되어 왔다⁽¹⁾. 이러한 이유로 기존의 연구자들은 충돌 후의 액적의 거동 영역을 구분하고 각 영역간의 경계 조건들을 여러 무차원 변수들을 이용하여 제시하였다. 상온의 건조한 기판에 액적이 충돌할 경우 액적의 운동량 및 물성치 조건 등에 따라 Fig. 1에 표현된 바와 같이 스틱(stick), 리바운드(rebound), 스프레드(spread), 스플래시(splash) 현상이 나타날 수 있다⁽¹⁾. 이 중, 스프레드와 스플래시 영역은 많은 응용 분야에서 실질적으로 나타나는 영역으로 두 영역간의 경계 조건을 정량화하기 위한 연구가 오랜 기간 동안 수행되어 왔다. 특히 액적의 퍼짐(spreading) 현상에 의해 발생하는 액막은 내연기관의 연소 효율 및 배기물 생성량과 밀접한 관련을 가지므로 경계 조건에 대한 정확한 정보를 획득하는 것은 응용 분야에서 중요한 의미를 지닌다.

Table 1은 두 영역간의 경계 조건을 정량화하는 관계식들을 정리한 것이며, Fig. 2는 경계 조건에 대한 실험

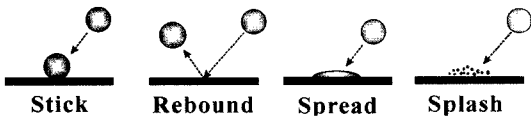


Fig. 1 Impingement regimes of a single drop impacting unheated dry wall

Table 1. Spread-splash transition criteria for unheated dry wall

Reference	Non-dimensional Numbers	Spread-Splash Criterion		
Bai and Gosman ⁽²⁾	We, La ($La = \rho\alpha l/\mu^2$)	$We_c = A \cdot La^{-0.18}$		
	Surface roughness (average height) $\bar{\lambda}$ (μm)	0.05	0.84	122
	A	5264	2634	2634
Mundo <i>et al.</i> ⁽³⁾	K	$K = 57.7$		
Cosalli <i>et al.</i> ⁽⁴⁾	K' ($=K^{1.6}$)	$K' = 649 + 3.76\lambda_{nd}^{-0.63}$		

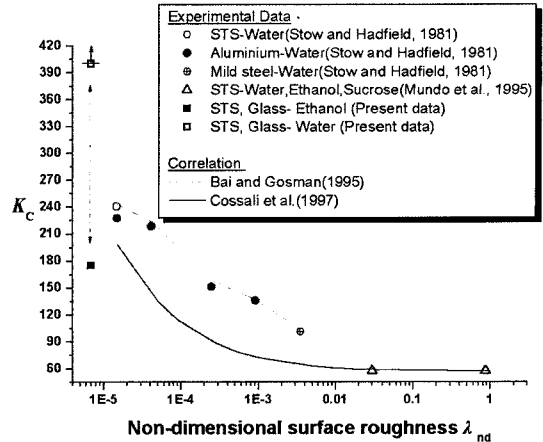


Fig. 2 Variation of spread-splash transition criterion (K_c) for a dry wall with the normalized surface roughness

결과들과 관계식들을 좀머펠트 수와 무차원 표면 조도를 양 축으로 하는 선도에 표현한 것이다. 좀머펠트 수와 무차원 표면 조도는 각각 식 (1)과 (2)와 같이 정의된다.

$$K = We^{0.5} Re^{0.25} = \left(\frac{\rho V_{b,n} d}{\sigma}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho V_{b,n} d}{\mu}\right)^{0.25} \quad (1)$$

$$\lambda_{nd} = \bar{\lambda}/d \quad (2)$$

Bai와 Gosman⁽²⁾의 관계식은 Stow 와 Hadfield⁽⁵⁾의 실험 결과를 바탕으로 제시되었으며, Cossali 등⁽⁴⁾의 관계식은 Stow와 Hadfield⁽⁵⁾, Mundo 등⁽³⁾의 실험 결과들을 바탕으로 제시되었다. 그들의 관계식들은 표면 조도의 크기 특성을 고려하였기 때문에 표면 조도 크기가 다른 여러 벽면 조건에서 스플래시 현상의 발생 조건을 예측하는데 활용할 수 있었다. 그러나, 위의 관계식들은 표면 조도 크기 외에 충돌 후 거동에 영향을 줄 수 있는 여러 표면 특성(표면 조도의 형상 및 표면 젖음성 등)의 영향을 고려하지 않은 결과 스플래시 현상의 예측에 있어 여전히 많은 한계점을 지니고 있다.

Rioboo 등⁽⁶⁾은 표면조도의 파장(roughness wavelength)이 달라지면, 표면조도의 크기(roughness amplitude)가 동일하더라도 스플래시의 발생조건이 달라짐을 실험적으로 보였으며, Moita 와 Moreira^(7, 8), Range와 Feuillebois⁽⁹⁾는 표면의 젖음성 특성이 스플래시의 발생 조건에 미칠 수 있는 영향을 살펴보았다. 그들은 액체-벽면 조합이 달라질 경우, 표면조도의 크기가 동일하더라도 스플래시의 발생조건이 변화할 수 있다고 보고하였다. 이러한 경향은 Fig. 2의 Stow 와 Hadfield⁽⁵⁾의 실

험결과에서도 확인할 수 있다. 실험 결과 중 무차원 표면조도가 1.47×10^{-5} 인 경우, 표면 재질이 다른 STS과 Aluminium의 두 경우에 대해 스프레드-스플래시 영역간의 경계조건이 달라짐을 확인할 수 있다.

현재까지의 연구 결과들을 바탕으로 액체-벽면 조항이 다른 여러 경우에 대해 스프레드-스플래시 영역간의 경계 조건을 정확하게 예측하는 것은 어려운 실정이다. 응용분야에 따라 벽면이나 액적 조건은 다양하게 변화하기 때문에 특정 벽면-액적 조건에 대한 경험적 관계식들을 일반적으로 사용하기에는 무리가 있다.

본 연구에서는 젖음성 특성이 다른 기판 조건에서의 액적의 충돌 후 형상 변화 과정을 가시화하고 스프레드-스플래시 영역간 천이조건의 변화 여부 및 원인을 파악하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 실험 결과들을 바탕으로 스프래시 현상의 발생에 영향을 주는 인자들을 파악하고, 스프레드-스플래시 영역간의 천이조건을 정량화하기 위해서 추후 수행되어야 할 연구 내용들을 살펴보도록 하겠다.

2. 실험 장치

액적의 충돌 후 형상 변화 과정을 파악하기 위해 Fig. 3에 표현된 것과 같은 실험장치를 구성하였다. 장치는 크게 액적을 생성시키기 위한 분무 장치와 충돌 전, 후 거동을 관찰하기 위한 가시화 장치로 이루어져 있다. 시린지 펌프(syringe pump)를 이용하여 공급되는 일정량의 유체는 스테인리스 스틸 재질의 노즐팁을 통과한 후 일정 크기의 액적들로 분열되며, 액적의 크기는 공급되는 유체의 유량과 노즐 팁의 크기에 의해 결정된다. 본 실험에는 내경이 838 mm(18G)인 노즐 팁을 사용하였으며, 생성된 액적의 직경은 2.9 mm이다. 액적의 속도는 노즐과 기판 사이의 수직 거리를 바꾸어줌으로써 자유낙하 거리에 따라 결정되며, 1.51~5.63 m/s의 범위 내에서 실험을 수행하였다. 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

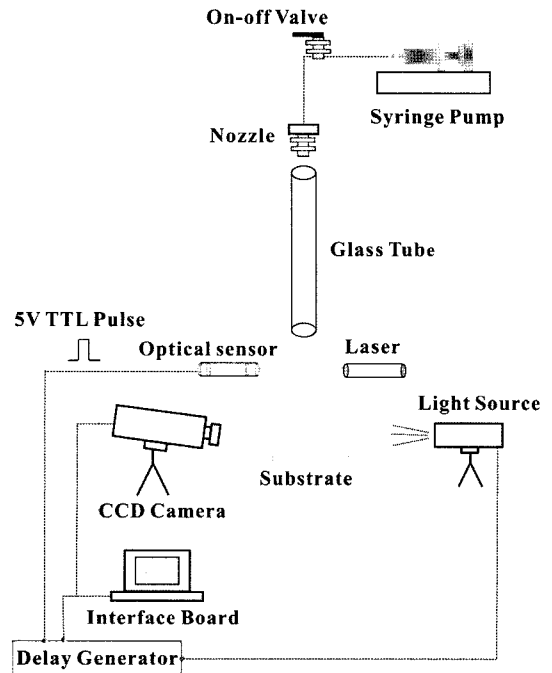


Fig. 3 Experimental setup



Fig. 4 Three different drop images at same delay time. (Delay time: 18.5 ms)

(DG-535, SRS)가 구동하게 된다. Delay 신호 생성기는 액적이 빔을 통과한 후 일정 시간 후에 CCD 카메라(Sensicam, PCO)와 광원이 구동하게끔 임의의 시간에 신호를 내보내는 역할을 한다. 이러한 일련의 시스템을 통해 충돌 경과 시간에 따른 액적의 형상 변화 과정을 상세하게 기록하는 것이 가능하게 된다. Figure 4는 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.

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. 실험유체로는 상온 상태의 증류수와 에탄올을 이용하였으며 기판은 유리와 표

Table 2 Static contact angle and surface roughness of the substrates

	STS ($\bar{\lambda} = 0.02 \mu\text{m}$)	Glass ($\bar{\lambda} = 0.02 \mu\text{m}$)
Water	*P(85.6°)	**H (23.3°)
Ethanol	**H (17.8°)	**H (10.2°)

*L: Poorly wettable ($\theta > 80^\circ$)

**H: Highly wettable ($\theta < 25^\circ$)

면 조도값이 다른 2종류의 STS 평판을 사용하였다. 액적의 충돌로 인해 기판 위에 형성되는 액막은 에어 블로워로 제거하여 기판은 항상 건조 상태를 유지하도록 하였다. 평판의 접촉각과 표면 조도는 액적의 충돌 후 형상 및 거동을 결정하는 주요 인자이므로^(4,5,10) 접촉각 측정기(G10, KRÜSS GmbH)와 표면 조도 측정기(SJ400, Mitutoyo)를 이용하여 정적 접촉각과 중심선 평균 거칠기를 측정하였다. Table 2는 측정된 결과들을 정리한 것이다. 물-STIS 조합의 경우, 정적 접촉각이 85.6° 비교적 커서 낮은 젖음성 특성을 보이는 반면, 나머지 세 경우(물-Glass, 에탄올-STIS, 에탄올-Glass)는 정적 접촉각이 25° 이하로써 매우 높은 젖음성 특성을 보였다.

3. 실험 결과

3.1 액적의 충돌 후 거동 관찰

수직 웨버수가 100과 1430 사이의 범위(레이놀즈 수의 실험 범위는 2860~16300)에서 기판에 충돌하는 액적의 형상변화 과정을 CCD 카메라를 이용하여 가시화하고 각 충돌 조건에서의 거동 영역을 결정하였다. Figure 5는 유리판 위에 충돌하는 에탄올 액적의 형상 변화 과정을 보여주는 것으로 그림 (a)는 충돌한 액적이 기판으로부터 분리되지 않고 액막을 생성하는 스프레드 현상을 촬영한 것이며, (b)는 코로나(왕관 모양의 액막)의 분열로 인해 이차 액적들이 생성되는 코로나 스프래시 현상을 촬영한 것이다.

본 실험에서 관찰된 모든 스프래시 현상은 액적이 벽면에 충돌한 직후(0.1 ms 이내) 코로나가 생성되는 현상을 보였으며, 이는 사용한 유리판과 STS 판이 상대적으로 표면 조도가 작은 매끄러운 판에 해당하기 때문에 발생한 결과로 파악된다. 이러한 내용은 스프래시 현상이 표면 조도의 크기에 따라 corona와 prompt 영역으로 구분된다고 보고한 Rioboo 등⁽⁶⁾의 결과를 뒷받침하는

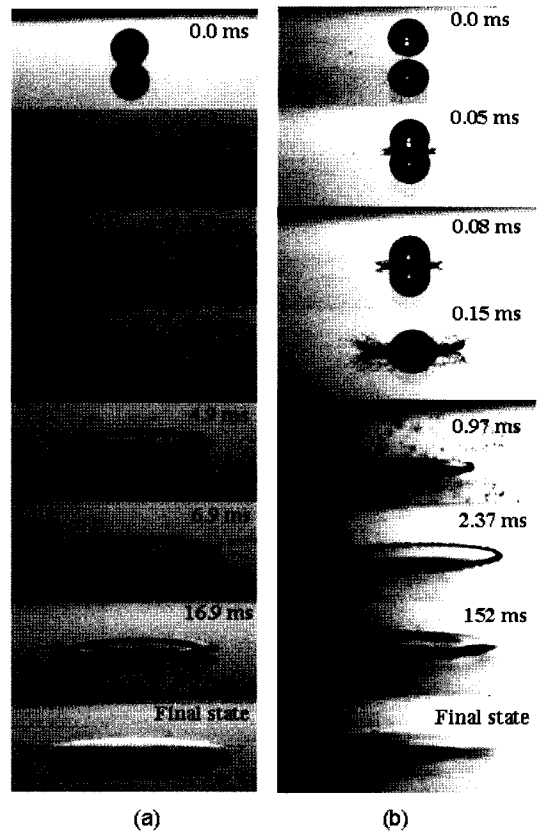


Fig. 5 Impact of an ethanol droplet on glass slide
(a) Spread: $d = 2.9 \text{ mm}$, $V = 2.1 \text{ m/s}$ ($We=450$)
(b) Splash: $d = 2.9 \text{ mm}$, $V = 3.7 \text{ m/s}$ ($We=1430$)

것이다. Rioboo 등⁽⁶⁾이 보고한 prompt 스프래시 현상은 코로나가 생성되지 않고, 벽면과 접촉한 액막의 립(주위 테두리) 부분이 이차 액적들로 직접 분열하는 현상을 일컫는다. 코로나 스프래시 현상이 발생할 경우(Fig. 5 (b)), 코로나 부분은 이차 액적들로 분열하여 기판으로부터 분리되지만 액적 윗 부분의 둥근 부분(dome)은 스프레드 현상에서 나타나는 액적의 형상 변화 과정과 유사한 과정을 거쳐 최종 상태에 도달한다.

3.2 스프레드-스플래시 영역 간 천이조건

Figure 6은 액적의 스프레드, 스프래시 영역의 천이조건을 파악하기 위해 무차원 표면 조도 λ_{nd} 가 6.9×10^{-6} 인 조건(Table 2에서 $\bar{\lambda} = 0.02 \text{ mm}$)에서의 충돌 후 거동 영역을 액적의 수직 웨버수와 레이놀즈 수를 양 축으로 하는 선도에 표현한 것이다. 이는 무차원 표면 조도가 동일할 경우, 수직 웨버수와 레이놀즈 수의 함수인 좀머펠트 수가 일정한 조건에서 두 영역간의 천이 조건이

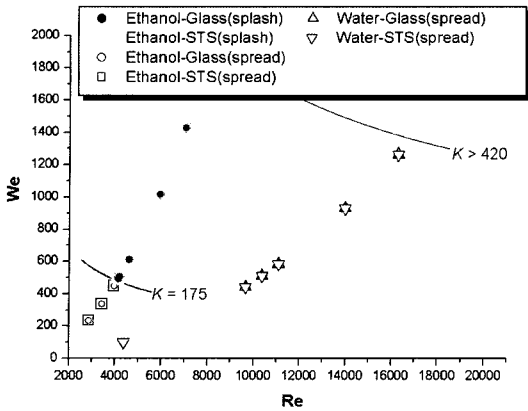


Fig. 6 Transition criterion between the spread and splash regimes ($\lambda = 0.02$ mm, $\lambda_{nd} = 6.9 \times 10^{-6}$)

결정된다고 알려져 있기 때문이다.

Figure 6(또는Table 2)과 같이 무차원 표면 조도가 동일한 조건에서 액적과 기판의 조합이 다른 4개의 경우를 살펴본 것은 정적 접촉각과 액적의 표면 장력이 스플래시 현상의 발생 조건에 미치는 효과를 독립적으로 살펴보기 위해서이다. 먼저, 에탄올-Glass와 에탄올-STG 조합에 대한 스플래시 영역의 발생 조건을 Fig. 6에서 살펴보면, 두 경우 모두 줌퍼펠트 수가 약 175이상인 조건에서 스플래시 현상이 발생함을 확인할 수 있는데, 이는 정적 접촉각이 유사하고 아울러 표면 장력 조건도 동일했기 발생한 결과이다.

다음으로, 에탄올-STG와 물-Glass 조합을 비교해보면 전자의 경우는 줌퍼펠트 수가 175 근처에서 스플래시 현상이 발생하지만, 후자의 경우는 400 이상(본 실험 영역에서 최대한 높일 수 있는 조건)의 높은 줌퍼펠트 수 조건에서도 스프레드 현상 만이 발생하였다. 이러한 결과는 두 경우에 있어 비록 정적 접촉각 조건은 유사하였지만(모두 highly wettable 조건) 액적의 표면 장력이 크게 다르기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 즉, 액적의 표면 장력은 접촉각 특성과는 별개로 스플래시 현상에 영향을 미치는 독립적인 인자로 판단된다.

본 실험에서 정적 접촉각이 스플래시 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해 물-Glass와 물-STG 조합의 경우를 관찰하였으나, Fig. 6과 같이 실험 영역에서 모두 스프레드 현상 만이 발생하여 그 영향을 정확하게 판별하기가 어려웠다. 그러나, 이러한 결과는 접촉각 특성이 미치는 영향이 없다는 보다는 표면조도가 아주 작은 매끄러운 판의 조건에서 실험이 이루어 졌기 때문이며, 훨씬 높은 줌퍼펠트 수의 조건에서는 스플래시 현상이나

타날 것으로 예상된다. Range와 Feuillebois⁽⁹⁾의 실험 결과에서도 표면장력이 동일한 액적이 충돌하더라도 기판이 달라지면(표면 조도는 동일) 스플래시의 발생 조건은 달라짐을 확인할 수 있다. 그들은 위의 경향을 액적과 벽면의 조합이 달라져서 나온 결과라고만 설명하지만, 이러한 결과는 구체적으로 액적의 벽면에 대한 젖음성 특성인 정적 접촉각의 영향이라고 해석할 수 있을 것이다.

현재까지의 결과를 종합해보면 표면 조도의 크기가 동일하더라도 액적과 벽면의 조합이 달라질 경우 천이 조건은 크게 변화함을 확인할 수 있었다. 현재의 천이 조건을 Fig. 2에 나타내보면, 무차원 표면 조도 λ_{nd} 가 6.9×10^{-6} 으로 동일하더라도 줌퍼펠트 수가 약 175인 지점부터 400 이상인 조건까지 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 표면조도의 크기뿐만 아니라 액적의 벽면에 대한 젖음성 특성이나 액적의 표면 장력이 스플래시 현상의 발생에 중요한 영향을 미치는 인자임을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 액적의 표면 장력과 벽면에 대한 젖음성 특성 모두 코로나의 생성 및 분열 과정에 영향을 주는 인자로 작용했음을 의미한다. 액적의 벽면에 대한 젖음성 특성이나 표면장력을 고려하여 새로운 경계조건을 정량화하기 위해서는 코로나의 생성 및 분열에 관한 기구를 정확하게 이해하고 젖음성 특성과 표면장력이 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

Levin 과 Hobbs⁽¹¹⁾는 Fig. 7에 표현한 것과 같이 실선 화살표 방향으로 작용하는 액적의 표면 장력이 액막의 반경 방향(점선 화살표)으로의 관성력에 비해 상대적으로 큰 경우 코로나가 생성된다고 주장하였다. 그러나, 본 연구의 실험 결과, 동일한 기판 조건에서 표면장력이 더 작은 에탄올 액적이 증류수에 비해 코로나 스플래시의 발생에 더 유리했으며, 이러한 결과는 Levin과 Hobbs⁽¹¹⁾의 시나리오만으로는 경향을 설명하기에 한계가 있음을 의미한다. 스프레드와 스플래시 영역 간의 천이 조건에 대해 현재까지 많은 연구 결과가 진행되어 왔음에도 불구하고 스플래시 현상의 발생 기구에 대한

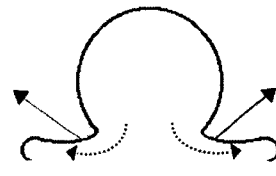


Fig. 7 Scheme of radial flow and resultant force due to surface tension (Levin and Hobbs⁽¹¹⁾)

이해의 부족으로 인해 액적-벽면 조합이 다른 임의의 조건에서 영역간의 천이 조건을 정확하게 예측할 수 없는 것으로 판단된다.

따라서, 추후 연구를 통해 Rioboo 등⁽⁶⁾이 보고한 corona와 prompt 스플래시 영역이 발생하는 표면 조건을 분류하고 각각의 스플래시 현상이 발생하는 과정 및 생성 원인을 파악해야만 액적의 벽면에 대한 젖음성 특성이나 표면장력을 고려한 일반화된 천이조건을 제시하는 것이 가능할 것이다.

4. 결 론

액적의 수직 웨버수가 100과 1430 사이의 범위에서 표면 조도가 동일한 STS 평판과 유리판에 충돌하는 액적의 형상변화 과정을 가시화하고 거동영역을 결정하였다. 실험 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 무차원 표면조도가 동일하더라도, 액적과 기판의 조합이 달라질 경우 스프레드-스플래시 영역간의 천이 조건을 표현하는 줌퍼펫수가 변화하였다. 에탄올 액적과 기판(STS 평판과 유리판) 조합에서는 줌퍼펫수가 약 175인 조건에서 경계조건이 형성되었지만, 증류수의 경우 본 실험에서 최대한 높일 수 있는 줌퍼펫수 조건인 400 에서도 스프레드 현상만이 관찰되었다.

2) 본 실험을 통해 표면조도의 크기뿐만 아니라 액적의 표면 장력과 정적 접촉각 특성이 스플래시 현상의 발생에 중요한 영향을 미치는 인자임을 확인할 수 있었다. 특히, 액적의 표면 장력은 접촉각 특성과는 별개로 스플래시 현상에 영향을 미치는 독립적인 인자로 판단된다.

3) 액적과 벽면 조합이 다른 임의의 조건에서 스프레드-스플래시 영역간의 천이 조건을 정확하게 예측하기 위해서는 스플래시의 발생 과정(생성 및 분열 과정) 및 생성 원인을 파악하기 위한 연구가 선행되어야 한다.

후 기

본 연구는 선체블럭 내부도장 및 전처리 자동화시스템 기술개발사업의 연구비지원과 교육인적자원부의 BK-21 사업, CERC(Combustion Engineering Research Center) 사업의 출연금 일부에 의하여 수행되었다. 또한, 본 논문은 ILASS-Asia 2007국제학술대회(Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia)

에서 발표된 내용을 기준으로 작성되었다.

참고문헌

- (1) S. Y. Lee and S. U. Ryu, "Recent progress of spray-wall interaction research," J. Mechanical Science and Technology, Vol. 20, 2006, pp.1101~1117.
- (2) C. Bai and A. D. Gosman, "Development of methodology for spray impingement simulation," SAE 950283, 1995.
- (3) C. Mundo, M. Sommerfeld and C. Tropea, "Droplet-wall collisions: experimental studies of the deposition and breakup process," Int. J. Multiphase Flows, Vol. 21, 1995, pp.151~173.
- (4) G. E. Cossali, A. Coghe and M. Marengo, "The impact of a single drop on a wetted solid surface, Experiments in Fluids, Vol. 22, 1997, pp.463~472.
- (5) C. D. Stow, and Hadfield, M. G., "An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface," Proc. R. Soc. Lond.-A, Vol. 373, 1981, pp. 419~441.
- (6) R. Rioboo, C. Tropea and R. Marengo, "Outcome from a drop impact on solid surfaces," Atomization and Sprays, Vol. 11, 2001, pp.155~165.
- (7) A. S. Moita, and A. L. Moreira, "Experimental study on fuel drop impacts onto rigid surfaces: morphological comparisons, disintegration limits and secondary atomization," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, 2007, pp.2175~2183.
- (8) A. S. Moita and A. L. Moreira, "Drop impacts onto cold and heated rigid surfaces: morphological comparisons, disintegration limits and secondary atomization," International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, 2007, pp.735~752.
- (9) K. Range and F. Feuillebois, "Influence of surface roughness on liquid drop impact," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 203, 1998, pp.16~30.
- (10) T. Mao, D. C. S. Kuhn and H. Tran, "Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces, AIChE Journal, Vol. 43, 1997, pp.2169~2179.
- (11) Z. Levin and P. V. Hobbs, "Splashing of water drops on solid and wetted surfaces: hydrodynamics and charge separation," Phil. Trans. R. Soc.-A, Vol. 269, 1971, pp. 555~585.