

고체 표면에 충돌하는 뉴턴 액적에 대한 최대 액막 직경 모델 검토[§]

안 상 모^{*†} · 이 상 용^{**}

* 한국원자력연구원, ** 한국과학기술원 기계공학과

Assessment of Maximum Spreading Models for a Newtonian Droplet Impacting on a Solid Surface

Sang Mo An^{*†} and Sang Yong Lee^{**}

* Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

** Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

(Received January 4, 2012; Revised March 8, 2012; Accepted March 8, 2012)

Key Words: Drop Impact(액적 충돌), Newtonian Fluid(뉴턴 유체), Solid Surface(고체 표면) Maximum Spreading (최대 퍼짐)

초록: 최대 액막 직경은 액적이 표면에 충돌한 이후에 최대로 퍼질 수 있는 정도를 의미하며, 분무기술과 관련된 다양한 응용분야에서 분무성능을 결정하는 중요한 인자 중의 하나이다. 본 연구에서는 고체 표면에 충돌하는 뉴턴 액적에 대한 기존의 최대 액막 직경 모델들을 $4 \leq Re \leq 11700$, $23 \leq We \leq 786$, $37.9^\circ \leq \theta_s \leq 107.1^\circ$ 범위에 해당하는 본 연구의 실험결과와 비교하여 검토하였다. 실험결과, 유체의 점도 및 충돌 속도에 비하여 표면 젖음성이 최대 액막 직경에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 한편, 기존의 모델 중에서 Roisman (2009) 모델은 최대 액막 직경에 대한 실험데이터의 80%를 $\pm 5\%$ 이내로 예측함으로써 가장 우수한 예측성능을 보였다.

Abstract: The maximum spreading is the maximum extent to which a drop can spread after impacting on a surface. It is one of the crucial factors determining the spraying performance in many applications. In this study, the existing maximum spreading models for a Newtonian liquid droplet impacting on a dry solid surface were reviewed and compared with the experimental results over the ranges of $4 \leq Re \leq 11700$, $23 \leq We \leq 786$, and $37.9^\circ \leq \theta_s \leq 107.1^\circ$. The surface wettability was found to have only a minor influence on the maximum spreading, compared to the liquid viscosity and impact velocity. Among the models tested, the Roisman (2009) model showed the best agreement with the experimental results, matching 80% of the measured data within $\pm 5\%$.

- 기호설명 -

d	: 액적 직경	[m]	β_{max}	: 무차원 최대 액막 직경 ($=D_{max}/d$)	[-]
D_{max}	: 최대 액막 직경	[m]	θ_d	: 동접촉각	[°]
n	: 실험 데이터 수	[-]	θ_s	: 정접촉각	[°]
V	: 액적의 충돌 속도	[m/s]	μ	: 점도	[Pa·s]
Re	: 레이놀즈 (Reynolds) 수 ($=\rho Vd/\mu$)	[-]	ρ	: 밀도	[kg/m ³]
We	: 웨버 (Weber) 수 ($=\rho V^2d/\sigma$)	[-]	σ	: 표면장력	[N/m]
Oh	: 오네조계 (Ohnersorge) 수 ($=We^{0.5}/Re=\mu/(\rho d\sigma)^{0.5}$)	[-]			

1. 서론

액적이 고체 표면에 충돌하는 현상은 분무 도장 및 코팅, 잉크젯 프린팅, 분무 냉각, 직접 분사식 내연기관 등의 여러 산업분야에서 광범위하게 나타나며, 이와 관련된 연구는 산업적으로 매우 중요한 의미를 갖는다. 액적의 충돌과 관련된 연구

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, sangmoan@kaeri.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 주된 관심사 중의 하나는 충돌 이후 액적의 최대 변형 정도를 대변하는 최대 액막의 크기를 예측하는 것이다. 최대 액막의 크기는 분무 냉각에서는 냉각효율을, 분무도장 및 잉크젯 프린팅 등에서는 표면품질을 결정하는 중요한 인자 중의 하나이다.⁽¹⁻¹³⁾ 뿐만 아니라, 최대 액막 상태에서의 액적의 표면에너지는 이후 수축을 위한 가용한 에너지의 크기를 결정하므로, 수축과정에서 리바운드(rebound) 거동을 예측하기 위해서는 최대 액막 크기에 대한 정보가 필수적이다.⁽⁶⁾

최근 German 과 Bertola,⁽¹⁴⁾ Marengo 등⁽¹⁵⁾은 뉴턴 액적에 대한 기존의 최대 액막 직경 모델을 정리하여 보고한 바 있다. 본 연구에서는 건조한 고체 표면에 충돌하는 뉴턴 액적에 대하여 기존에 보고된 최대 액막 직경 모델들의 예측성능 및 적용범위를 실험결과와 비교하여 검토하고자 한다. 이를 위하여 젖음성이 다른 여러 기관에 다양한 속도로 충돌하는 뉴턴 액적의 충돌과정을 가시화하여 최대 액막 직경을 측정하였으며, 이후 여러 모델들과 함께 비교, 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

액적의 충돌실험 및 실험유체의 물성측정은 모두 상온에서 수행되었다. Figure 1은 충돌 후 시간에 따른 액적의 형상변화를 관찰하기 위한 실험장치이다.⁽¹⁶⁾ 시린지 펌프로부터 일정한 유량으로 공급된 유체가 내경이 0.41 mm인 바늘(gauge 22)을 통과하면 균일한 크기의 단일 액적이 생성된다. 이후 생성된 액적은 자유 낙하하여 표면에 수직인 방향으로 충돌하는데, 액적의 충돌 전후의 시간에 따른 액적의 형상 변화를 초고속카메라(Phantom

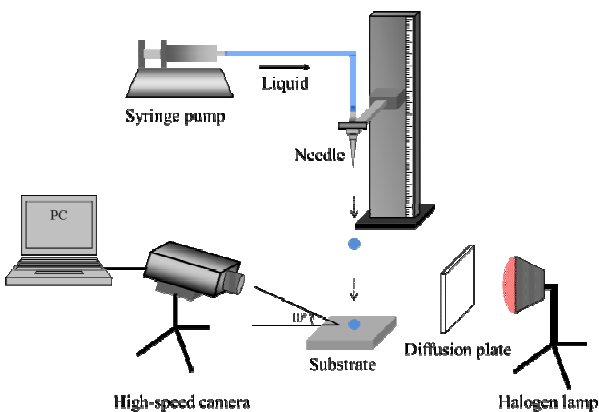


Fig. 1 Experimental setup⁽¹⁶⁾

V7, Vision Research, Inc.)를 이용하여 7200 frames/s의 속도로 가시화하였다. 이때, 기관과 카메라와의 각도를 10° 로 고정하였으며, 기록된 일련의 사진들로부터 충돌 직전의 액적의 직경, 충돌속도 및 최대 액막 직경을 측정하였다.

실험유체는 증류수(water) 및 세 종류의 글리세린(glycerin) 수용액이, 충돌 기관으로는 유리(glass), 스테인리스 스틸(STS) 및 파라필름(parafilm-M) 기관이 사용되었다. 각 실험유체의 점도는 회전식 레오미터(Mars, Haake)로 측정하였으며, 표면장력은 자동식 계면 장력계(Sigma 700, KSV Instrument Ltd.)를 이용하여 측정하였다. 그 밖에 실험유체의 밀도는 매스 실린더와 저울을, 각 실험유체 및 기관의 조합에 따른 정접촉각은 접촉각 분석기(Phoenix 300 plus, CEO)를 이용하여 측정하였다. 이와 같이 측정된 모든 실험유체의 밀도(ρ), 표면장력(σ) 및 점도(μ)를 Table 1에 정리하였으며, 정접촉각의 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다.(Table 1에서 ‘G’는 글리세린 수용액을 의미하며, 숫자는 글리세린의 질량 혼합 비율(wt%)을 나타낸다.) Table 1과 Fig. 2로부터 실험유체 별 밀도, 표면장력

Table 1 Properties of test liquids

Test liquids	ρ [kg/m ³]	σ [mN/m]	μ [Pa·s]
Water	997	71.97	8.9×10^{-4}
G88	1145	65.76	0.11
G96	1204	65.09	0.34
G100	1231	64.97	0.67

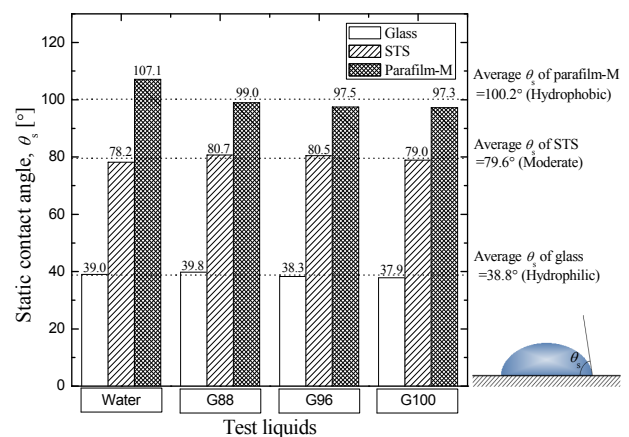


Fig. 2 Static contact angles (θ_s) on glass, STS and parafilm-M substrates

및 동일한 기관에서의 접촉각의 차이는 점도의 차이에 비하여 미미함을 알 수 있다. 또한, 유리 및 파라필름 기관은 각각 친수성 및 소수성을, 스테인리스 스틸 기관은 중간의 젖음 특성을 보였다. 따라서, 최대 액막 직경에 영향을 미치는 인자로서 유체의 점도와 더불어 표면 젖음성의 독립적인 영향을 살펴보는 것이 가능하다.

액적의 충돌속도는 기관과 바늘 사이의 거리를 각각 5, 15, 30, 50, 70, 110 cm로 조절함으로써 변화시켰으며, 각 높이에서 측정된 충돌 직전의 액적의 속도는 0.8, 1.6, 2.1, 2.9, 3.5, 4.0 m/s 였다. 또한, 실험유체의 물성치에 따른 액적 형성과정의 차이로 인하여 액적의 직경은 미미한 차이를 보였는데, 증류수 액적의 경우 2.62 mm, 그리고 G88, G96, G100 액적의 경우 각각 2.44 mm, 2.52 mm, 2.59 mm 였다. 한편, 모든 액적의 물성치, 직경, 충돌속도 및 기관의 특성으로부터 확인된 본 연구에서의 충돌실험의 범위는 $4 \leq Re \leq 11700$, $23 \leq We \leq 786$, $37.9^\circ \leq \theta_s \leq 107.1^\circ$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 최대 액막 직경 측정 결과

Figure 3은 유체의 점도, 충돌속도 및 표면 젖음성에 따른 최대 액막 직경에 대한 모든 실험결과를 액적의 초기 직경으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 동일한 유체 및 충돌속도 조건에서 각 기관 별 최대 액막

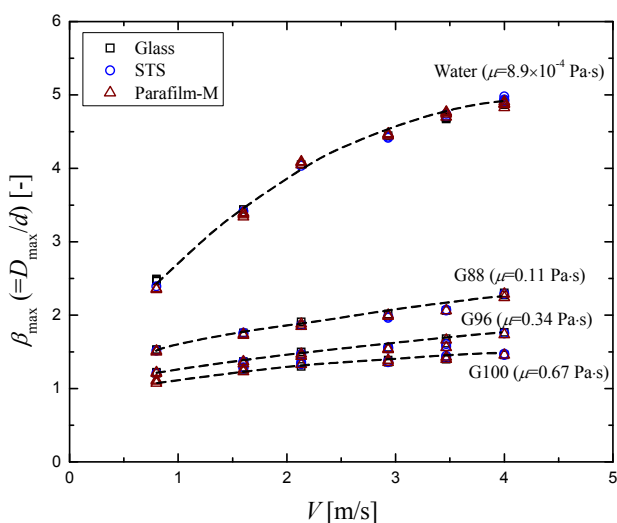


Fig. 3 Variation of maximum spreading diameter with liquid viscosity, impact velocity and surface wettability

직경의 차이는 미미하였다.(즉, 유리, 스테인리스 스틸, 파라필름 기관에 대한 결과가 거의 충족되어 있다.) 다시 말하여, 표면 젖음성이 최대 액막 직경에 미치는 영향은 미미하였으며, 이와 같은 실험결과는 기존의 여러 연구자들^(4-6,12,16-18)의 결과와 일치하였다. 한편, 모든 기관에 대하여 유체의 점도가 감소하고 충돌속도가 증가함에 따라 최대 액막 직경은 뚜렷한 증가 경향을 보였다. 또한, 충돌속도의 증가에 따른 최대 액막 직경의 증가 정도는 유체의 점도가 낮을수록 보다 크게 나타났다. 따라서, 액적이 고체 표면에 충돌할 때 충돌 이후 최대 액막 상태에 도달하기까지의 전개과정은 액적의 충돌 관성력과 점성력의 영향을 지배적으로 받는 반면, 표면 젖음성의 영향은 상대적으로 미미함을 알 수 있다.

3.2 실험결과와 모델과의 비교

최대 액막 직경에 대한 실험결과와의 비교를 위해서 기존에 보고된 대표적인 최대 액막 직경 모델들을 연도순으로 정리하여 Table 2에 나타내었다. 표로부터 각 모델은 레이놀즈 수(Re), 웨버 수(We) 및 오네조계 수(Oh)의 무차원 변수들로 구성됨을 알 수 있다.

Kurabayashi-Yang⁽¹⁹⁾ 모델은 기관의 가열여부가 고려된 관계식으로, 본 연구에서는 액적 및 기관의 온도가 모두 상온이므로 $\mu_{\text{drop}}/\mu_{\text{wall}} = 1$ 인 경우에 해당된다. 이들의 모델은 이후 Healy 등⁽²⁰⁾에 의하여 표면 젖음성의 영향을 고려한 모델로 개선되었다. Madejski⁽²¹⁾ 모델은 충돌 직전과 최대 액막 상태 간의 에너지 보존 관계식으로부터 유도된 이론적인 관계식으로 $Re > 100$ 이고 $We > 100$ 인 조건에 한하여 유용한 모델이다. 이후 Bennett 과 Poulikakos⁽³⁾는 충돌 전 액적의 초기 표면에너지를 추가로 고려함으로써 Madejski⁽²¹⁾ 모델을 개선하였다. Asai 등⁽⁴⁾은 수백 μm ~ 수 mm 크기의 액적을 대상으로 하는 대부분의 기존 연구들과는 달리, 44 ~ 81 μm 크기의 상대적으로 작은 잉크 액적을 대상으로 모델을 제시하였으며, Scheller와 Bousfield⁽⁵⁾는 비교적 넓은 점도범위($0.001 \leq \mu \leq 0.3$ Pa.s)에 해당하는 실험데이터의 회귀분석을 통하여 실험식을 제시하였다. 이후 Mao 등⁽⁶⁾과 Ukiwe와 Kwok⁽⁹⁾은 각각 동접촉각(θ_0)으로 표현되는 Chandra와 Avedisian⁽²²⁾ 모델 및 Pasandideh-Fard 등⁽²³⁾의 모델을 정접촉각 (θ_s)의 함수로 나타내었다. Roisman⁽¹²⁾은

Table 2 Maximum spreading models

Researchers	Formula
Kurabayashi-Yang ⁽¹⁹⁾	$\frac{We}{2} = \frac{3}{2} \beta_{\max}^2 \left[1 + \frac{3We}{Re} \left(\beta_{\max}^2 \ln \beta_{\max} - \frac{\beta_{\max}^2 - 1}{2} \right) \left(\frac{\mu_{\text{drop}}}{\mu_{\text{wall}}} \right)^{0.14} \right] - 6$ <p>- μ_{drop} : viscosity of a drop at bulk temperature - μ_{wall} : viscosity of a drop at wall temperature</p>
Madejski ⁽²¹⁾	$\frac{3\beta_{\max}^2}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\beta_{\max}}{1.2941} \right)^5 = 1$
Bennett and Poulikakos ⁽³⁾	$\frac{(\beta_{\max}/1.2941)^5}{Re} + \frac{3[(1 - \cos \theta_s) \beta_{\max}^2 - 4]}{We} = 1$
Asai et al. ⁽⁴⁾	$\beta_{\max} = 1 + 0.48We^{0.5} \exp(-1.48We^{0.22} Re^{-0.21})$
Scheller and Bousfield ⁽⁵⁾	$\beta_{\max} = 0.61(Re^2 Oh)^{0.166}$
Mao et al. ⁽⁶⁾	$\left[\frac{1}{4}(1 - \cos \theta_s) + 0.2 \frac{We^{0.83}}{Re^{0.33}} \right] (\beta_{\max})^3 - \left(\frac{We}{12} + 1 \right) (\beta_{\max}) + \frac{2}{3} = 0$
Healy et al. ⁽²⁰⁾	$\beta_{\max} = \beta_{\max, KY} \times \left(\frac{45}{\theta_s} \right)^{0.241}$ <p>- $\beta_{\max, KY}$: calculated value by the Kurabayashi-Yang⁽¹⁹⁾ model</p>
Ukiwe and Kwok ⁽⁹⁾	$(We+12)\beta_{\max} = 8 + \beta_{\max}^3 \left[3(1 - \cos \theta_s) + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}} \right]$
Roisman ⁽¹²⁾	$\beta_{\max} = 0.87Re^{1/5} - 0.4Re^{2/5} We^{-1/2}$
German and Bertola ⁽¹⁴⁾	$\left[\frac{1}{4}(1 - \cos \theta_s) + \psi \frac{We^{0.83}}{Re^\kappa} \right] (\beta_{\max})^3 - \left(\frac{We}{12} + 1 \right) (\beta_{\max}) + \frac{2}{3} = 0$ <p>- $\psi = 0.07We^{0.2}$, $\kappa = 0.45Oh^{0.05}$</p>

수치해석 결과⁽²⁴⁾로 얻어진 액막 내부의 속도 분포에 대한 해석 및 기존의 실험결과를 이용하여 모델을 제시하였다. 마지막으로, German 과 Bertola⁽¹⁴⁾는 상대적으로 점도가 높은 액적을 대상으로 하여 Mao 등⁽⁶⁾의 모델을 수정하였다.

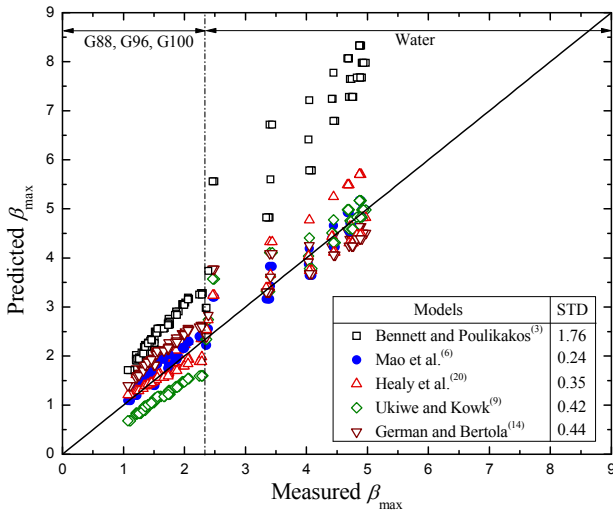
한편, Table 2에서 Bennett 와 Poulikakos,⁽³⁾ Mao 등,⁽⁶⁾ Healy 등,⁽²⁰⁾ Ukiwe 와 Kwok⁽⁹⁾ 및 German 과 Bertola⁽¹⁴⁾ 모델들은 정접촉각으로 대변되는 표면 젖음성의 영향을 포함하고 있는 반면, 나머지 모델들은 표면 젖음성과 무관한 식의 형태로 주어졌음을 알 수 있다.

Figure 4는 최대 액막 직경에 대한 측정결과와 Table 2의 각 모델을 이용한 예측결과와 비교한 것으로, Fig. 4(a)는 표면 젖음성의 영향이 고려된 모델들과의 비교를, Fig. 4(b)는 표면 젖음성의 영향이 고려되지 않은 모델들과의 비교를 나타낸 것이다.

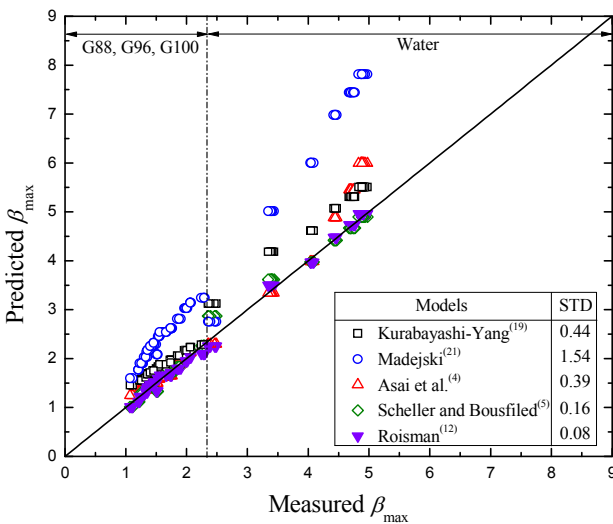
한편, 실험결과에 대한 각 모델 별 예측성능을 비교하기 위하여 다음의 식으로 정의되는 측정치와 예측치와의 표준편차 (STD)를 그림에 함께 나타내었다.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum (\text{Predicted } \beta_{\max} - \text{Measured } \beta_{\max})^2}{n}} \quad (1)$$

각 모델과의 비교결과, 표면 젖음성이 고려된 모델 중에서는 Mao 등⁽⁶⁾의 모델이, 표면 젖음성의 영향이 고려되지 않은 모델 중에서는 Roisman⁽¹²⁾ 모델이 본 연구의 실험결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다. 특히, Roisman⁽¹²⁾ 모델은 총 166개의 실험데이터의 80%에 해당하는 132개의 실험데이터를 $\pm 5\%$ 이내로 예측함으로써 본 연구의 실험결과를 가장 잘 예측하였다. 반면, Bennett와



(a) Comparison with the models with the surface wettability effect



(b) Comparison with the models without the surface wettability effect

Fig. 4 Comparison of the predicted maximum spreading diameter using the models in Table 2 with the experimental data

Poulikakos⁽³⁾ 모델은 표면 젖음성의 영향을 과대 예측하였을 뿐만 아니라, 전개과정 동안 발생하는 점성 소산에너지를 과소 예측함으로써 실험결과와 가장 큰 차이를 보였으며, Madejski⁽²¹⁾ 모델 또한 점성 소산에너지를 과소 예측하고 표면에너지에 대한 해석의 문제점 등으로 인하여 실험결과와 비교적 큰 차이를 보였다. 따라서, 최대 액막 직경을 예측함에 있어서 무엇보다 중요한 것은 액적의 충돌 이후 전개과정 동안 발생하는 소산에너지 및 최대 액막 상태에서의 표면에너지를 적절히 모델링 하는 것이다.

한편, 표면 젖음성이 고려되지 않은 Scheller 와 Bousfield⁽⁵⁾ 모델 및 Roisman⁽¹²⁾ 모델의 예측능력이 매우 우수함을 고려해 볼 때, 앞서 3.1 절에서 언급한 바와 같이, 표면 젖음성이 최대 액막 직경에 미치는 영향은 매우 미미함을 미루어 짐작할 수 있다. 또한, 수십 μm 크기의 작은 액적들을 대상으로 제안된 Asai 등⁽⁴⁾ 모델과 수 mm 크기의 액적들을 대상으로 하는 본 연구의 실험결과와의 차이가 비교적 크지 않음을 고려하면, Scheller 와 Bousfield⁽⁵⁾ 모델 및 Roisman⁽¹²⁾ 모델을 수십 μm 크기의 작은 액적에 대해서도 적용시킬 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 뉴턴 액적이 건조한 고체 표면에 충돌할 때 최대 액막의 크기를 예측하기 위하여 실험적 연구를 수행하였으며, 기존의 최대 액막 직경 모델들과 비교함으로써 각 모델의 예측능력 및 적용범위를 검토하였다.

액적의 충돌 후 전개과정은 액적의 충돌 관성력과 점성력에 의해 지배되며, 표면 젖음성의 영향은 정점축각이 $37.9^\circ \leq \theta_s \leq 107.1^\circ$ 인 본 연구의 실험범위에서 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 결국, 최대 액막 직경을 적절히 예측하기 위해서는 액적의 충돌 이후 전개과정 동안 발생하는 점성 소산에너지 크기 및 최대 액막 상태에서의 표면에너지를 적절히 예측하는 것이 중요함을 확인하였다. 기존에 보고된 모델들 중에서 Roisman⁽¹²⁾ 모델은 본 연구의 실험결과를 가장 잘 예측하였으며, 이 모델의 적용범위를 수십 μm 크기의 작은 액적을 대상으로 하는 여러 응용분야에도 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원 (KRF-2008-314-D00045)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Collings, E. W., Markworth, A. J., McCoy, J. K. and Saunders, J. H., 1990, "Splat-Quench Solidification of Freely Falling Liquid-Metal Drops by Impact on a Planar Substrate," *J. Mater. Sci.*, Vol. 25, pp. 3677~3682.

- (2) Chandra, S. and Avedisian, C. T., 1992, "Observations of Droplet Impingement on a Ceramic Porous Surface," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 35, pp. 2377~2388.
- (3) Bennett, T. and Poulikakos, D., 1993, "Splat-Quench Solidification: Estimating the Maximum Spreading of a Droplet Impacting a Solid Surface," *J. Mater. Sci.*, Vol. 28, pp. 963~970
- (4) Asai, A., Shioya, M., Hirasawa, S. and Okazaki, T., 1993, "Impact of an Ink Drop on Paper," *J. Imaging Sci. Tech.*, Vol. 37, pp. 205~207.
- (5) Scheller, B. L. and Bousfield, D. W., 1995, "Newtonian Drop Impact with a Solid Surface," *AIChE J.*, Vol. 41, pp.1357~1367.
- (6) Mao, T, Kuhn, D.C.S. and Tran, H., 1997, "Spread and Rebound of Liquid Droplets Upon Impact on Flat Surfaces," *AIChE J.*, Vol. 43, pp. 2169~2179.
- (7) Shiraz, D. A. and Chandra, S., 2000, "Impact, Recoil and Splashing of Molten Metal Droplets," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 43, pp. 2841~2857.
- (8) Pasandideh-Fard, M., Aziz, S. D., Chandra, S. and Mostaghimi, J., 2001, "Cooling Effectiveness of a Water Drop Impinging on a Hot Surface," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 22, pp. 201~210.
- (9) Ukiwe, C. and Kwok, D. Y., 2005, "On the Maximum spreading diameter of impacting droplets on Well-Prepared Solid Surfaces," *Langmuir*, Vol. 21, pp. 666~673.
- (10) Son, Y., Kim, C., Yang, D. H. and Ahn, D. J., 2008, "Spreading of an Inkjet Droplet on a Solid Surface with a Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynolds Numbers," *Langmuir*, Vol. 24, pp. 2900~2907.
- (11) Vadillo, D. C., Soucemarianadin, A., Delattre, C. and Roux, D. C. D., 2009, "Dynamic Contact Angle Effects onto the Maximum Drop Impact Spreading on Solid Surfaces," *Phys. Fluids*, Vol. 21, 122002.
- (12) Roisman, I. V., 2009, "Inertia Dominated Drop Collisions. II. An Analytical Solution of the Navier-Stokes Equations for a Spreading Viscous Film," *Phys. Fluids*, Vol. 21, 052104.
- (13) Moita, A. S. and Moreira, A. L. N., 2010, "Assessment of Heat Transfer Measurements at Drop/Wall Interactions: Relation with the Impact Condition," *Proc. 23rd Ann. Conf. Liq. At. Spray Syst. Europe (ILASS-Europe) 2010*, Brno, Czech Republic.
- (14) German, G. and Bertola, V., 2009, "Review of Drop Impact Models and Validation with High-Viscosity Newtonian Fluids," *At. Sprays*, Vol. 19, pp. 787-807.
- (15) Marengo, M., Antonini, C., Roisman, I. V. and Tropea, C., 2011, "Drop Collisions with Simple and Complex Surfaces," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, Vol. 16, pp. 292-302.
- (16) An, S. M. and Lee, S. Y., 2012, "Observation of the Spreading and Receding Behavior of a Shear-Thinning Liquid Drop Impacting on Dry Solid Surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 37, pp. 37~45.
- (17) Crooks, R., Copper-Whitez, J. and Beger, D. V., 2001, "The Role of Dynamic Surface Tension and Elasticity on the Dynamics of Drop Impact," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 56, pp. 5575~5592.
- (18) Rioboo, R., Tropea, C. and Marengo, M., 2002, "Time Evolution of Liquid Drop Impact onto Solid, Dry Surfaces," *Exp. Fluids*, Vol. 33, pp. 112~124.
- (19) Yang, W. J., 1975, "Theory on Vaporization and Combustion of Liquid Drops of Pure Substances and Binary Mixtures on Heated Surfaces," Report No. 353, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, pp. 423~455.
- (20) Healy, W. M, Hartley, J. G. and Abdel-Khalik, S. I., 2001, "Surface Wetting Effects on the Spreading of Liquid Droplets Impacting a Solid Surface at Low Weber Numbers," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 44, pp. 235~240.
- (21) Madejski, J., 1976, "Solidification of Droplets on a Cold Surface," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 19, pp. 1009~1013.
- (22) Chandra, S. and Avedisian, C. T., 1991, "On the Collision of a Droplet with a Solid Surface," *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, Vol. 432, pp. 13~41.
- (23) Pasandideh-Fard, M, Qiao, Y. M., Chandra, S. and Mostaghimi, J., 1996, "Capillary Effects During Droplet Impact on a Solid Surface," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 650~659.
- (24) Roisman, I. V., Berberović, E. and Tropea, C., 2009, "Inertial Dominated Drop Collisions. I. On the Universal Flow in the Lamella," *Phys. Fluids*, Vol. 21, 052103.