

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.7.567>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

Leidenfrost 지점 온도 이상에서 액적-벽면 충돌 열전달에 대한 충돌 속도의 영향

박준석* · 김형대** · 배성원** · 김경두**

* 경희대학교 원자력공학과, ** 한국원자력연구원 열수력안전연구부

The Effect of Impact Velocity on Droplet-wall Collision Heat Transfer Above the Leidenfrost Point Temperature

Jun-seok Park*, Hyungdae Kim**, Sung-won Bae** and Kyung Doo Kim**

* Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee Univ.,

** Thermal-Hydraulics Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received January 19, 2015 ; Revised May 20, 2015 ; Accepted May 25, 2015)

Key Words: Droplet Collision(액적 충돌), Infrared Thermometry(적외선 열화상), Leidenfrost Temperature(Leidenfrost 온도), Impact Velocity(충돌 속도)

초록: Leidenfrost 온도 이상으로 가열된 벽면과 충돌하는 액적의 속도가 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 실험 연구를 수행하였다. 동기화된 초고속 가시화 카메라와 적외선 카메라를 이용하여 벽면과 충돌하는 액적의 충돌 특성과 충돌면의 온도 분포를 측정하였다. 획득한 표면온도 분포를 충돌면의 경계 조건으로 이용하여 가열 벽면의 3차원 비정상 열전도 수치해석을 통해 표면 열유속 분포를 얻었다. 수직방향 충돌속도가 증가할수록 최대 액막 직경이 증가하고 가열 벽면과 액막 사이에 존재하는 증기막의 두께가 감소하여 열전달 효율이 증가하였다. 액적은 웨버수가 30보다 작은 경우 되튐현상이 발생하였으며, 큰 경우 작은 액적들로 분쇄되어졌다. 충돌속도에 의한 열전달량의 증가 경향이 되튐영역에서 분쇄영역에서 가면서 약화되었으며, 이는 분쇄현상에 의해 유효 열전달 면적의 확대 효과가 저감되었기 때문으로 해석된다.

Abstract: Single droplet-wall collision heat transfer characteristics on a heated plate above Leidenfrost temperature were experimentally investigated considering the effects of impact velocity. The collision characteristics of the droplet impinged on the heated wall and the changes in temperature distribution were simultaneously measured using synchronized high-speed video and infrared cameras. The surface heat flux distribution was obtained by solving the three-dimensional transient heat conduction equation for the heated substrate using the measured surface temperature data as the boundary condition for the collision surface. As the normal impact velocity increased, heat transfer effectiveness increased because of an increase in the maximum spreading diameter and a decrease in the vapor film thickness between the droplet and heated wall. For $We < 30$, droplets stably rebounded from a heated wall without breakup. However, the droplets broke up into small droplets for $We > 30$. The tendency of the heat transfer to increase with increasing impact velocity was degraded by the transition from the rebounding region to the breakup region; this was resulted from the reduction in the effective heat transfer area enlargement due to the breakup phenomenon.

- 기호설명 -

A : 열전달 면적 [m^2]

C_p : 비열 [$J/kg^\circ C$]

D : 액적의 지름 [m]

D_0 : 액적의 충돌 전 지름 [m]

E : 에너지 [J]

h : 열전달 계수 [$W/m^2^\circ C$]

† Corresponding Author, hdkims@khu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

h'_{fg}	: 잠열 [J/kg]
k	: 열전도계수 [W/m°C]
L_{pixel}	: 단위 픽셀의 길이 [m]
q''	: 열유속 [W/m ²]
$q''_{w, err}$: 표면 열유속의 오차 [W/m ²]
t	: 시간 [s]
t_R	: 액적 충돌 시간 [sec]
T	: 온도 [°C]
V_d	: 액적 속도 [m/s]
We	: 웨버수 [-]
ΔH	: 낙하 거리 [m]
ΔT_{err}	: 최대 오차 온도 [°C]
Δt	: 시간 간격 [s]

로마자

ρ	: 밀도 [kg/m ³]
--------	---------------------------

하첨자

d	: 액적
I	: 초기 조건
f	: 액체
sa	: 사파이어
sat	: 포화
max	: 최댓값
n	: 벽면에 수직인 성분
v	: 증기
w	: 벽면

1. 서론

액적-벽면 상호작용은 액체연료 분사, 잉크젯 프린팅, 분사코딩 등에서 널리 활용되고 있다. 뿐만 아니라 미세한 액적을 활용하여 스프레이 냉각, 화재 방지 등의 다양한 산업 분야에 활용되는 안전계통의 주요 열전달 기구로 활용되고 있다. 특히 고온의 벽면과 액적의 열전달은 금속재료의 열처리 및 원자력 발전소 내에서 과열된 핵연료의 냉각 속도 예측에 있어 매우 중요한 현상으로 현재까지 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 액적의 충돌 거동 및 열전달이 함께 상호 작용하면서 발생하는 현상의 복잡성으로 말미암아 아직까지 충분한 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

벽면에 충돌하는 액적은 매우 짧은 시간 동안 펴짐, 되감김, 되튐, 분열 등의 다양한 현상을 동

반하며 열전달이 발생하므로 높은 시간 및 공간 분해능을 가지는 실험 결과의 획득에 어려움이 많아 왔다. 액적의 가열벽면에 대한 충돌 특성은 액적의 조건(온도, 지름, 속도, 물성치) 및 벽면의 온도에 따라 크게 달라지며, 이는 충돌 시 충돌 시간, 충돌 면적 및 국소 열유속을 변화시켜 열전달량의 변화를 가져온다.

Kendall and Rohsenow⁽¹⁾는 가열 벽면에 매우 소형의 열전대를 삽입하여 액적에 의해 제거되는 열량을 측정하였다. 하지만 액적의 충돌 특성은 정량적으로 측정하지 못해, 액적 거동에 관한 이론적 모델을 활용하여 열전달 효율 및 최대 액적 지름 변화를 예측하였다. Ueda⁽²⁾는 수직한 벽면에 충돌하는 액적의 열전달량 및 액적의 최대 지름, 액적이 충돌 후 분쇄되는 시점을 측정하였다. 액적의 세부적인 충돌 특성을 초고속 가시화 기법을 활용하여 분석한 반면, 열전달량은 Kendall과 동일한 열전대를 이용한 측정 기법을 활용하였다. 이후 다수의 연구자들에 의해 액적의 충돌 후 최대 지름 및 분쇄 기준점과 충돌 특성 가시화 연구가 수행되었다.

Bolle and Moureau⁽³⁾과 Pasandideh-fard⁽⁴⁾는 다중 액적 줄기 실험을 수행하여 각각 액적의 열전달량과 열전달 효율에 관한 실험적 상관식을 개발하였다. Baumeister⁽⁵⁾는 단일 액적의 이론 및 실험을 기반한 열전달계수 모델을 개발하였다. Guo 등⁽⁶⁾은 기존 모델들을 바탕으로 물리적 열전달량 예측 모델을 개발하였다.

최근 높은 시간 및 공간 분해능을 가지는 다양한 계측 기기들이 개발이 되고 있으며, 이러한 성능을 갖는 대표적인 기기가 적외선 가시화 카메라이다. 최근 송준규 등⁽⁷⁾은 비등 발생 시 가열면의 온도 분포를 고속 적외선 카메라를 이용하여 측정하여 분석하였으며, Chatzikyriakou⁽⁸⁾는 고속 적외선 카메라를 활용하여 액적과 부딪힌 벽면의 온도변화를 계측하여 액적에 의해 제거되는 열전달량의 측정이 가능함을 보고 하였다.

본 연구에서는 높은 공간 및 시간 분해능을 갖는 적외선 열화상 기법을 활용하여 Leidenfrost 이상의 온도를 가지는 벽면과 단일 액적의 충돌 시 액적의 속도가 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 실험을 수행하였다. 초고속 카메라와 적외선 카메라를 동기화하여 활용하여 액적의 충돌 거동 및 열전달 특성을 동시에 측정하여 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치 및 측정 방법

2.1.1 실험장치 구성

Fig. 1은 액적-벽면 열전달 측정 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험은 대기압 및 상온 조건에서 수행되었다. 충돌 표면의 온도 분포 및 액적의 거동 특성을 동시 측정하기 위하여, 동기화된 적외선 카메라 및 고속 카메라를 활용하였다. Table 1은 동기화된 고속 카메라(HSV) 및 적외선 카메라(IR)의 측정 조건을 나타낸다.

액적은 약 25 °C의 순수물로 31 게이지의 주사 바늘을 활용하여 형성하였으며, 이때 형성되는 액적은 평균 2 mm의 지름을 가졌다. 형성된 액적의 지름은 Phantom v7.3을 활용하여 측정하였으며, 측정 오차는 최대 64 μm이다. 액적의 충돌 속도(V_d)는 Fig. 2와 같이 수평하게 놓인 시편과 수직인 주사 바늘 끝단 사이의 거리를 조절하여 제어하였으며, 시편과 충돌 직전 액적의 연속한 두 이미지를 고속카메라로 촬영하여 다음 식을 이용하여 계산하였다. 측정된 액적의 수직방향 충돌 속도 범위는 0.2 - 1.5 m/s이었다.

$$V_d = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서 ΔH , Δt 는 각각 액적의 연속 이미지에서 액적의 낙하 거리 및 시간을 나타낸다.

Fig. 3은 벽면의 온도 조절 및 표면 온도 분포를 측정하기 위한 시편의 개략도이다. 실험에 사용된 시편은 적외선과 가시광선에 대한 투과성이 우수한 사파이어 기판을 사용하였다. 시편 위에는 적외선이 투과할 수 없는 백금을 지름이 20 mm이고 두께가 100 nm인 원형 형태로 증착하였다. 또한, 윗면과 아랫면에 백금피를 증착하여 증착된 백금피에 전압을 인가하여 벽면을 425 °C로 유지하였다.

2.1.2 벽면 온도 분포 측정

액적에 의해 변화하는 벽면 온도 분포는 적외선을 투과시키는 사파이어를 통해 100 nm의 백금 뒷면 방향에서 온도분포를 가시화하였다. 백금은 방사율이 400 °C 이상일 때 0.1보다 낮은 값을 갖고 있으며 적외선을 차폐하기 때문에 적외선 카메라로 촬영 시 사파이어와 경계부분의

Table 1 Experimental condition

	HSV	IR
Pixel resolution (μm)	32	77
Window size (pixel ²)	255×255	112×112
Frequency (Hz)	1800	1800
Integration time (ms)	-	0.013

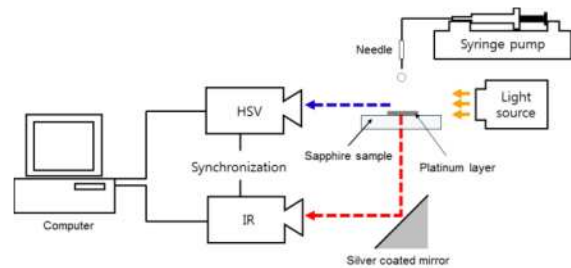


Fig. 1 Schematic of the experimental facility

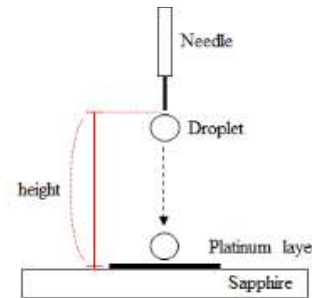


Fig. 2 Control of droplet velocity

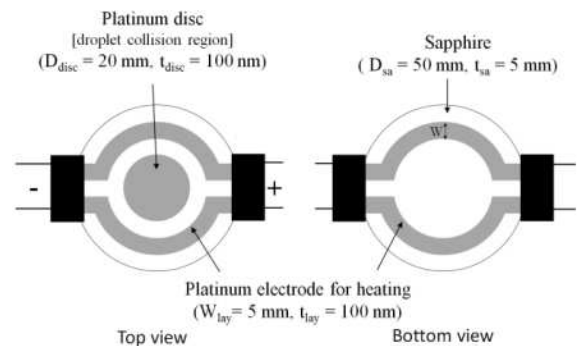


Fig. 3 Schematic of sapphire sample

온도가 측정된다. 백금은 100 nm로 매우 얇아 온도가 액적에 의한 온도 변화 시 표면과 경계부분의 온도는 같다고 볼 수 있다. 시간에 따라 변화하는 벽면의 온도는 고속 적외선 카메라인 FLIR사의 SC6000 모델을 사용하였으며, 8.6 × 8.6 mm²의 면적을 관측 시 77 μm의 공간 분해능을 가졌다. 적외선 카메라를 통해 얻어진 적외선 강

도는 사전에 실험을 통해 얻은 적외선 강도-표면 온도간 보정식을 이용하여 온도 정보로 변환된다.

2.2 데이터 분석

2.2.1 열유속 분포

적외선 카메라를 통해 측정된 시편 표면의 시간에 따른 온도 분포를 경계조건으로 활용하여 사파이어 기관에 대한 3차원 과도 열전도 계산을 수행하여 윗표면의 열유속 분포를 얻게 된다.

Fig. 4는 계산에 사용된 사파이어 시편의 기하학적 구조 및 각 면의 경계조건의 설정을 보여준다. 적외선 카메라로부터 얻어진 온도 정보를 반영하기 위해, 윗면에는 12544(112×112)개의 노드를 구성하였다. 다음은 계산에 사용된 지배방정식 및 초기조건을 나타낸다. 여기서 ρ 는 시편의 밀도, k_{sa} 는 사파이어 시편의 열전도계수, C_p 는 시편의 비열을 뜻한다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho C_p}{k_{sa}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{초기조건} \quad T(x, y, z, t)_{t=0} = T_i \quad (3)$$

경계조건

$$\text{윗면 (z=H)} \quad T(x, y, z, t) = T_{\text{exp}}(x, y, t) \quad (4)$$

$$\text{밑면 (z=0)} \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\text{측면 (x=0 ; x=W)} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$(y=0 ; y=L) \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

실험과 동일한 상황을 모사하기 위하여, 과도 열전도를 계산하기 전에 사파이어 기관의 초기 온도가 T_i 인 정상상태 열전도 계산을 먼저 수행하였다. 수행된 결과를 토대로 과도 열전도 해석 시, 사파이어 시편의 액적 충돌부인 윗면의 경계조건은 실험을 통해 측정된 시간별 온도 분포를 적용하였다. 기관의 밑면은 공기에 의한 자연대류로 인해 열손실이 발생하지만 충돌에 따른 열전달계수보다 매우 작으므로 단열조건으로 가정하였다. 시편의 측면은 시편의 중심 부분의 일부를 측정하였으므로 수평방향으로 대칭 조건이라 가정하였다.

위 조건들을 토대로 계산한 결과로부터 각 시간별 고체 사파이어 시편 내부의 3차원 온도 분포를 얻게 되며, 충돌 표면에서의 열유속은 다음

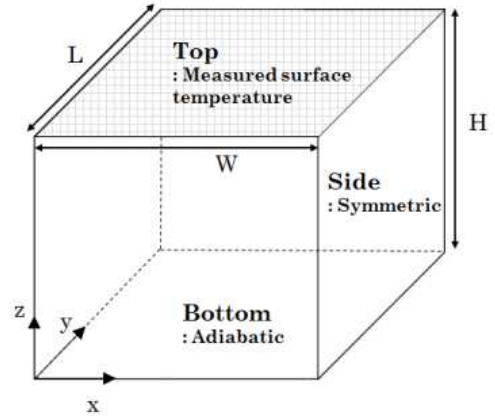


Fig. 4 Geometry and boundary conditions of the heated plate for three dimensional transient heat conduction analysis

과 같이 계산할 수 있다.

$$q''_w(t) = -k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} \quad (8)$$

2.2.2 열전달 효율

액적의 제거 에너지(E_d)는 앞서 구해진 시간별 열유속을 충돌시간에 대해서 적분하여 얻을 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

$$E_d = \int_{t_{in}}^{t_{end}} q''_w(t) A(t) dt \quad (9)$$

$$= \sum_{j=F_{ini}}^{F_{end}} q''_{w,j} A_j(t) \Delta t$$

여기서 q''_w 는 시간 t 일 때 평균 열유속, t_{in} 는 액적이 충돌하기 시작하는 시간, F_{ini} 는 액적이 충돌하는 순간의 프레임수, F_{end} 는 액적이 벽면을 이탈하기 직전의 프레임수를 나타낸다.

액적의 열전달 효율은 앞서 구해진 액적의 제거 에너지와 액적이 모두 증발하는데 필요한 에너지(E_{max})의 비로써 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{E_d}{E_{max}} = \frac{E_d}{\rho_f \frac{\pi D_0^3}{6} h_{fg}} \quad (10)$$

2.2.3 증기막 두께

액적은 Leidenfrost 온도 이상의 벽면과 충돌 시 증기막을 통한 전도 및 복사 열전달에 의해 열전달이 일어난다. 복사에 의한 열전달은 전도 열전달 대비 1% 미만의 낮은 비율을 차지하므로 무시할 수 있다. 따라서 액적은 증기막을 통한 전

도 열전달만 일어난다고 가정하였다. 따라서 Leidenfrost 온도 이상의 벽면과 충돌하는 액적의 열전달의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$q''_w = \frac{k_v}{L}(T_w - T_s) \quad (11)$$

여기서 k_v 는 증기막의 열전도도, L 은 증기막의 두께를 나타낸다. T_s 는 증기막과 액적 사이의 경계면 온도를 나타내며, 포화온도라고 가정하였다.

시간 t 일 때 증기막의 두께는 식 (11)을 토대로 다음과 같이 재구성하여 얻어진다.

$$L(t) = \frac{k_v}{q''_w(t)}(T_w - T_{sat}) \quad (12)$$

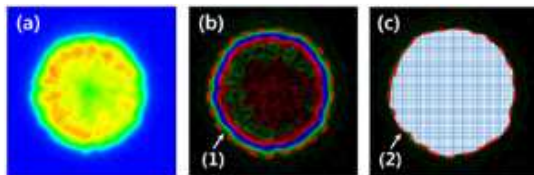
여기서 k_v 는 액적 표면의 온도와 벽면 온도의 산술평균 온도인 262.5 °C의 값을 활용하였다.

2.2.4 열전달 면적

액적의 열전달 면적은 열유속 분포를 활용하여 얻어진다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 액적-벽면 충돌 열유속($\sim 10^6$ W/m²)은 자연대류 영역의 열유속($\sim 10^5$ W/m²)과 비교하여 확연히 크다. 따라서 열전달 면적은 열유속의 구배를 통해 정의할 수 있다. Fig. 5는 Sobel edge detection 방법을 이용하여 열전달 면적을 결정하는 절차를 보여준다.

2.3 불확실도 분석

적외선 카메라를 활용하여 가열된 벽면의 온도 변화를 측정하기 위하여 일정한 온도 조건에서 사파이어 시편에 증착된 백금으로부터 방출되는 적외선의 강도에 대한 보정 곡선을 획득하였다. 보정 실험 시 시편의 온도 측정에 사용된 K형 열전대는 ± 0.5 °C의 오차를 가졌으며, 실험에서 활용한 적외선 카메라 자체는 ± 0.02 °C의 매우 작은 측정 오차 값을 가져 무시할 수 있다. 이로



(1) Determine the outline of effective heat transfer area
(2) Extract effective heat transfer area

Fig. 5 Illustration of the calculation procedures for effective heat transfer using surface heat flux distribution: (a) heat flux data, (b) Sobel edge detection method, (c) detection of effective heat transfer area

부터 적외선 카메라를 이용하여 측정한 표면온도는 ± 0.5 °C의 오차를 가진다고 판단할 수 있으며, 다음과 같은 식에 의해 열유속의 오차를 계산할

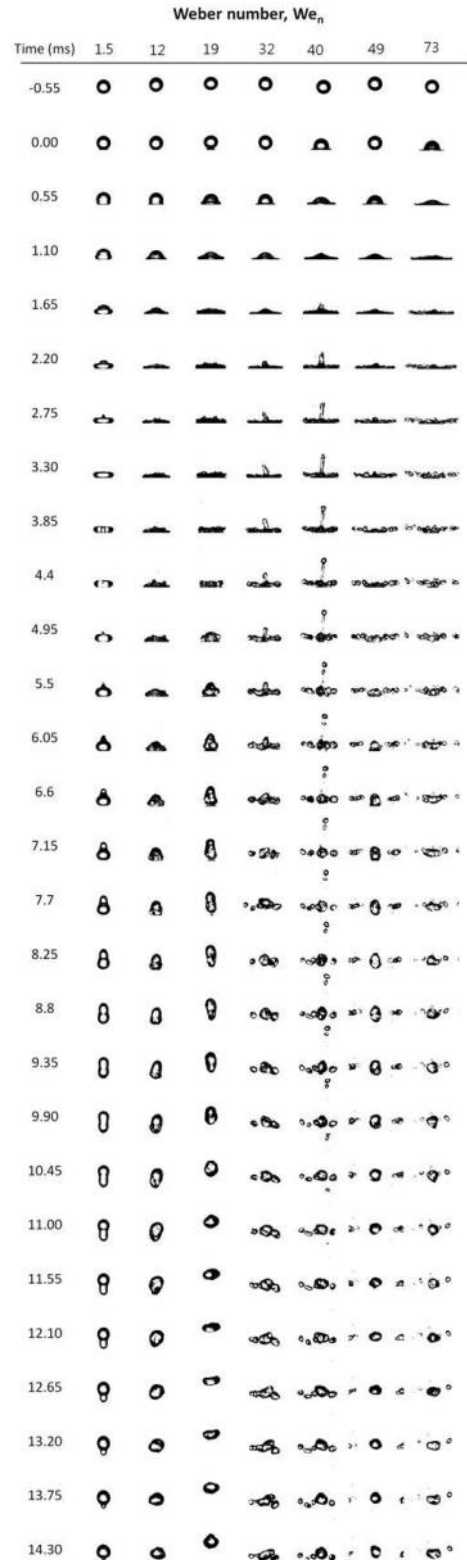


Fig. 6 Dynamics of impinging droplet

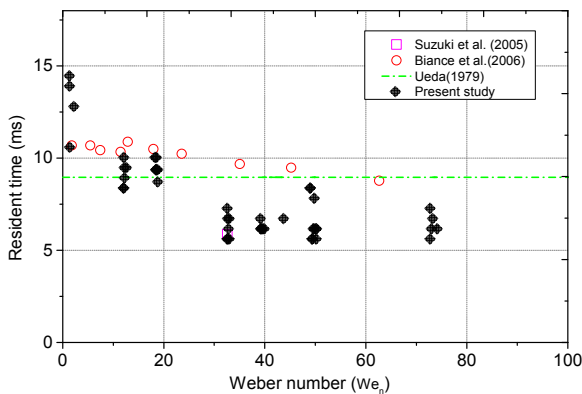


Fig. 7 Droplet resident time ($D_0 = 2 \text{ mm}$)

수 있다. 이때, 계산된 표면 열유속의 오차는 최대 300 kW/m^2 정도로 계산되었다.

$$q''_{w, err} = \frac{k_{sa}}{L_{pixel}} (\Delta T_{err}) \quad (13)$$

여기서 L_{pixel} 은 $77 \mu\text{m}$, ΔT_{err} 는 최대 오차인 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 값을 활용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 충돌 특성

Fig. 6은 시편의 온도가 $425 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때 수직방향 충돌속도에 따른 액적의 충돌 특성 변화를 나타낸다. 30보다 낮은 웨버수를 갖는 액적은 되튀 현상이 발생하지만, 높은 경우에는 벽면과 충돌 후 여러 개의 미세 액적으로 파쇄되었다. Wachters and Westerling⁽⁹⁾과 Hamdan 등⁽¹⁰⁾은 Leidenfrost 온도 이상의 벽면과 액적의 충돌 시 액적의 형태 변형에 관해 연구를 수행하였다. 이들은 30 이하의 We_n 를 갖는 액적이 벽면과 충돌 시 분쇄없이 되튀어 오름을 관측했다. 본 연구의 결과는 기존 연구 결과와 일치함을 알 수 있다.

3.1.1 충돌 시간

액적의 열전달량은 벽면과 충돌하는 시간이 얼마나 지속되는냐에 따라 달라진다. 따라서 액적의 열전달 특성을 알기 위해서는 충돌시간에 대한 이해가 필요하다.

기존의 많은 연구에서는 액적의 충돌시간을 예측하기 위한 모델들을 개발하였다. Ueda⁽²⁾ 및 Rayleigh⁽¹¹⁾가 제안한 모델이 가장 널리 사용되고 있다. 이 모델은 액적이 분사되었을 때 구형으로 토출된 액적이 진동하면서 다시 구형으로 돌아오

는데 걸리는 시간을 기반으로 개발된 모델이다.

$$t_R = \pi \sqrt{\rho_f D_0^3 / (16 \sigma)} \quad (14)$$

Fig. 7은 약 2 mm 의 지름을 갖는 액적이 가열된 벽면과 충돌 시 갖는 충돌시간을 나타낸다. 충돌시간은 충돌하는 순간을 0 ms 라고 했을 때 액적이 벽면으로부터 이탈하게 되는 시간을 측정하는 것이다. 웨버수가 30 보다 큰 액적의 경우, 충돌시간은 분쇄된 이후 중심부에 존재하는 액적이 벽면을 이탈하는 순간의 시간을 측정하였다.

액적의 충돌시간은 웨버수가 30인 지점까지 감소하였으며, 이후 일정하게 유지되었다. 웨버수가 30 미만인 경우, 충돌속도의 증가는 빠른 형태 변형을 야기시켜 진동의 주기에 영향을 미치게 된다. Biance 등⁽¹²⁾과 Chandra and Avedisian⁽¹³⁾도 이러한 충돌속도에 의한 영향을 보고하였다.

웨버수가 30 보다 큰 경우 액적은 액적의 형태를 유지할 수 있는 최대 표면 에너지를 초과하여 충돌 후 분쇄되게 된다. Fig. 7의 웨버수가 49일 때 분쇄가 일어난 이후인 5.5 ms 경우를 보면, 분쇄가 일어난 이후 액적의 일부는 벽면에 접촉하고 있다. 이후 이 과정에서 액적은 에너지를 손실하기 때문에 더 이상 충돌시간이 감소하지 않게 된다. 하지만 Ueda 예측 모델은 액적의 형태 변형에 대한 고려 및 속도의 증가에 따른 에너지 변화가 고려되어 있지 않아 높게 예측하였다.

3.1.2 충돌 최대 지름

액적-벽면 열전달의 정확한 예측을 위해서 충돌 시 열전달 면적의 정보가 필요하다. 열전달 면적을 예측하기 위해 몇몇 연구에서는 액적의 지름 변화에 대한 모델을 개발하였다. Table 2는 이전 연구들의 실험 조건 및 모델을 요약한 것이다. Biance 등⁽¹²⁾ 및 Hatta 등⁽¹⁴⁾은 We_n 의 함수로 실험적 모델을 개발한 반면, Ueda 등⁽²⁾ 및 Karl and Frohn⁽¹⁵⁾는 다음과 같은 에너지 평형에 의거하여 액적의 최대 지름 예측 모델을 개발하였다. 최대 지름 모델은 액적을 원통형으로 가정하여 초기 액적의 운동 에너지와 표면장력 에너지의 합이 충돌 후 최대 지름을 가졌을 때 액적이 갖는 표면장력 에너지와 충돌 시 소멸되는 에너지가 같다는 가정을 기반으로 개발되었다. Ueda⁽²⁾는 소멸되는 에너지 및 원주면의 표면장력은 없다고 가정하여 단순 모델을 제안한 반면, Karl and Frohn⁽¹⁵⁾는 모든 항을 고려한 모델을 개발하였다.

Table 2 Conditions of previous studies for maximum spreading diameter

	Present study	Ueda et al. ⁽²⁾	Biance et al. ⁽¹²⁾	Hatta et al. ⁽¹⁴⁾	Karl and Frohn ⁽¹⁵⁾
Diameter (mm)	2.0	0.9 - 3.0	0.8 - 2.00	0.3 - 0.7	0.07 - 0.26
Substrate material	Platinum-coated sapphire	Copper Stainless steel	Silicon	Inconel alloy 625	Chromium plated copper or steel
Wall temperature (°C)	425	300	280	500	327
Collision angle (°)	90	-	-	90	$\theta < 60$
Weber number (-)	$1.5 < We < 73$	$10 < We < 200$	$8 < We_n < 40$	$10 < We_n < 200$	$0 < We_n < 25$
Geometric condition	Vertical surface	Vertical surface	horizontal surface	Horizontal surface	Inclined surface
D_{max}/D_0 ratio	-	$\frac{D_{max}}{D_0} = 0.87 \sqrt{\left(\frac{We}{6} + 2\right)}$	$\frac{D_{max}}{D_0} = We^{0.25}$	$\frac{D_{max}}{D_0} = 0.093 We^{0.74} + 1$ { $We_n < 40$ }	$\frac{D_{max}}{D_0} = \left[\frac{We_n \left(\frac{1+r_n^2}{2} \right) + 2}{6} \right]^{0.5}$ $r_n = 1 - 0.263 We_n^{0.257}$

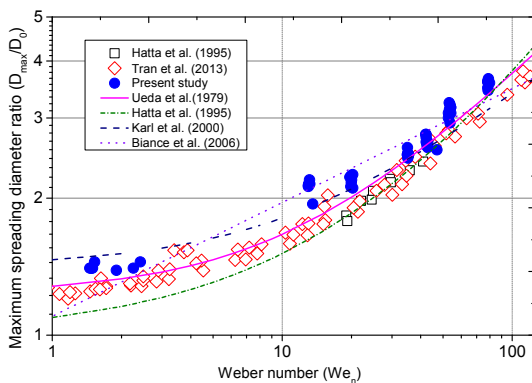


Fig. 8 Maximum droplet spreading diameter as a function of We number in vertical collision

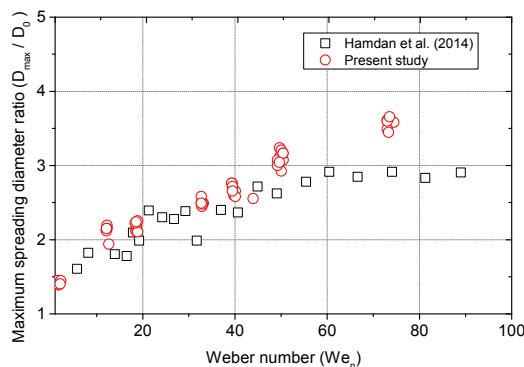


Fig. 9 Maximum droplet spreading diameter of droplet with $D_0 = 2$ mm

Fig. 8은 수직 낙하하는 액적과 벽면의 상호 작용 시 액적의 최대 지름을 나타낸 것이다. Hatta,⁽¹⁴⁾ Tran 등⁽¹⁶⁾ 그리고 본 실험의 결과는 Ueda 상관식과 잘 부합하였다. Tran⁽¹⁶⁾은 2.2 mm의 액적을 600 °C의 실리콘 웨이퍼 표면과 충돌

시킨 반면, 본 실험에서는 약 2 mm의 액적을 425 °C의 백금 표면과 충돌시켰다. 유사한 지름을 갖는 액적을 사용했음에도 불구하고 본 실험의 결과가 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 벽면의 온도, 벽면의 재질 그리고 표면의 거칠기에 따른 복합적인 원인에 의해 발생하였다. Karl and Frohn⁽¹⁵⁾은 구리와 철로써 벽면의 재질을 변경한 실험을 통해서 벽면의 재질보다는 수직성분의 속도항이 더 지배적임을 확인한바 있다. 따라서 본 실험의 결과가 더 높게 나타난 것은 벽면의 온도에 의한 영향으로 해석된다.

Fig. 9는 지름이 약 2 mm인 액적의 충돌 최대 지름을 나타낸 것이다. 웨버수가 30 이하인 경우, 차이를 보이지 않았으나 30 이상일 때 Hamdan⁽¹⁰⁾은 거의 일정한 비를 가졌다. Hamdan⁽¹⁰⁾의 실험 결과는 400 °C 이상의 구리 벽면과 충돌각도를 갖는 액적의 충돌 실험을 통해 얻어졌는데, 본 실험과 차이점은 벽면의 재질과 충돌각도였다. 벽면의 재질은 충돌 최대 지름에 큰 영향을 미치지 않으므로, 이러한 차이를 보이는 것은 충돌각도에 의한 영향으로 추측된다.

3.2 열전달 특성

3.2.1 온도 분포

Fig. 10은 액적의 웨버수에 따라 변화하는 시간별 샘플 표면의 온도 변화를 나타낸다. 얻어진 벽면의 온도는 식 (8)을 활용하여 열유속 분포를 얻는데 활용되었다.

Fig. 11은 시간별 벽면의 최소 온도를 나타낸

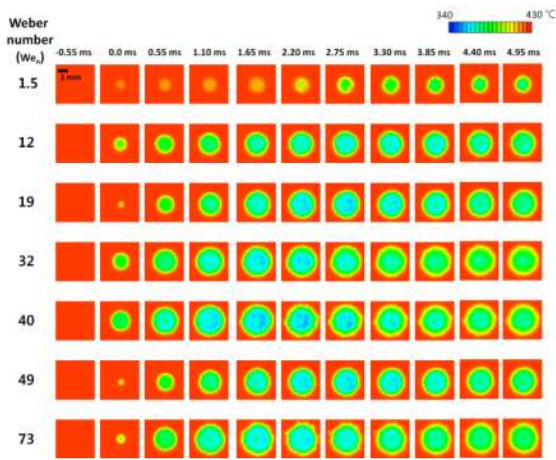


Fig. 10 History of surface temperature distribution

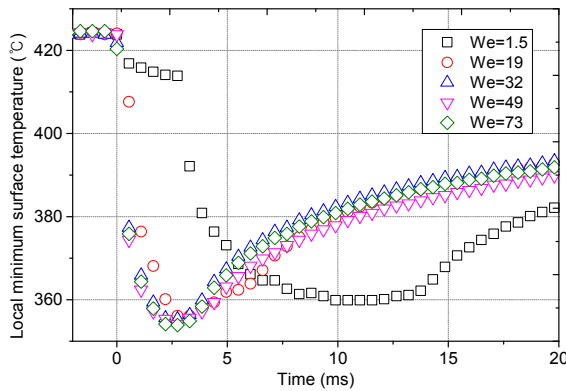


Fig. 11 History of local minimum temperature

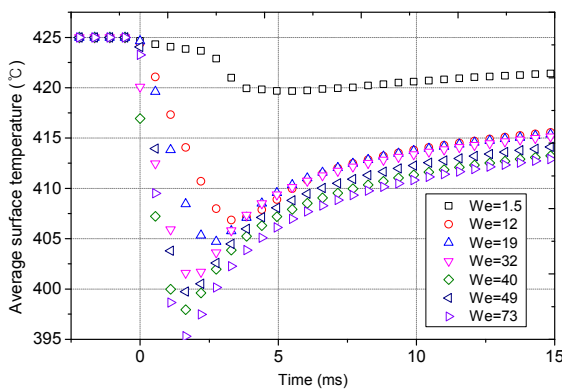


Fig. 12 History of average surface temperature

다. 벽면의 국소적 온도 변화는 웨버수가 73일 때 약 71 °C로 가장 컸으며, 웨버수가 1.5일 때 가장 낮은 65 °C의 온도 강하를 보였다.

Fig. 12는 액적의 We_n 에 따른 시간별 관측 표면의 평균온도를 나타낸다. We_n 가 1.5인 경우, 2.75 ms일 때 액적 중심부의 뒤늦은 충돌로 인해, 벽면의 온도는 한번 더 온도 강하가 발생하였다. We_n 가 1.5 이상인 경우, 평균온도는 액적의 충돌

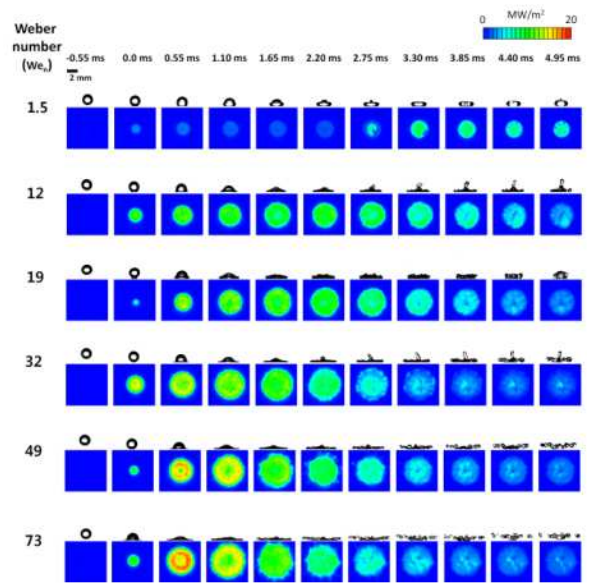


Fig. 13 Droplet behaviors and local heat flux

속도 증가에 따른 impact energy의 증가로 충돌초기에 급격히 감소하였다. 하지만, 그 기울기는 서서히 감소하였다. 최소 평균온도는 충돌속도가 증가할수록 감소하였다. We_n 가 30 이하일 때는 속도가 증가할수록 표면의 평균 온도가 최소값에 도달하는 시간이 감소한 반면, 30 이상인 경우 최소 평균 온도는 약 2 ms일 때 도달하였다.

3.2.2 열유속 분포

Fig. 13은 액적의 웨버수에 따라 변화하는 시간별 액적의 형태 변화 및 열유속장을 나타낸다. 웨버수가 1.57인 액적은 벽면에 충돌 후 2.75 ms 동안 약 8 MW/m²의 열유속을 가졌으며, 이후 중심부 상단의 액체가 뒤늦게 벽을 강타하면서 열유속이 급격히 증가하였다. 웨버수가 19 및 49인 경우 액적의 국소 최대 열유속은 1.5일 때보다 더 높은 값을 나타내었다. 이는 충돌 속도의 증가가 충돌 시 액적이 갖는 운동에너지를 증가시켜 형성되는 증기막의 두께를 얇게 하는 효과를 만들기 때문인 것으로 추측된다.

3.2.3 열전달 면적

Fig. 14는 액적이 벽면과 충돌 시 갖는 열전달 면적의 시간에 따른 변화를 보여준다. 전반적으로 열전달 면적은 액적이 충돌하여 퍼짐으로 인해 증가하다가 액적이 원래의 형태로 돌아오기 시작하면서 감소하는 경향을 보인다. 흥미롭게도 액적이 벽면으로부터 이탈한 이후에도 열전달 면

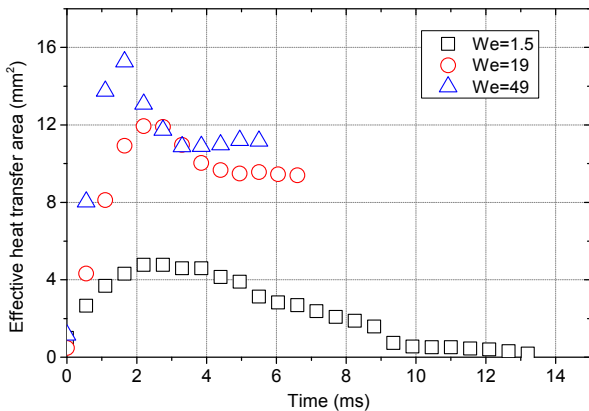


Fig. 14 History of effective heat transfer area

적이 존재하는 현상을 보이는데, 이는 충돌이 액적이 만드는 난류 유동에 의한 효과이거나 또는 충돌 시 표면에 흡착된 얇은 액막이 기화하면서 냉각을 일으킬 수 있다고 추측되나 정확한 원인의 분석을 위해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 보인다.

수직 방향의 충돌 에너지가 약한 $We_n = 1.5$ 인 경우 충돌 초기 액적은 천천히 퍼져나가면서 열전달 면적을 증가시킨다. 2.2 ms 부근에서 최대 열전달 면적을 보이며, 이후 액적이 벽면과 밀착된 상태로 수축하면서 열전달 면적도 함께 감소한다. $We_n = 19$ 로 증가한 경우 전체적인 경향성과 최대 면적이 나타나는 시간은 같으나 최대 열전달 면적이 거의 3배가량 증가한 값을 보인다. $We_n = 49$ 로 증가한 경우 충돌 초반 가장 빠른 열전달 면적 증가 경향을 보이다가 이전보다 빠른 1.7 ms에 최대 열전달 면적이 나타난다. 바로 이후 이미지부터 열전달 면적이 급감하기 시작하는데 이때 열전달 영역 주위로 분무(splashing)가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 분무의 발생은 액적의 파쇄 현상과 밀접한 연관이 있다고 보이며, 이로 인해 최대 열전달 면적은 $We_n = 19$ 인 경우 보다 30% 정도의 증가만을 보이고 빠르게 감소하다 소멸해 버린다.

3.2.4 시간에 따른 평균 열전달률 변화

Fig. 15는 시간에 따른 평균 열전달률을 나타낸다. 웨버수가 1.5인 경우 액적은 충돌 직후 약 2 ms간 매우 낮은 열전달률을 가졌으며 이후 열전달률이 증가하였다. 이는 액적의 중심부가 서서히 벽면에 밀착되면서 한 번 더 벽면을 강타하여 열전달이 향상된 것으로 해석된다.

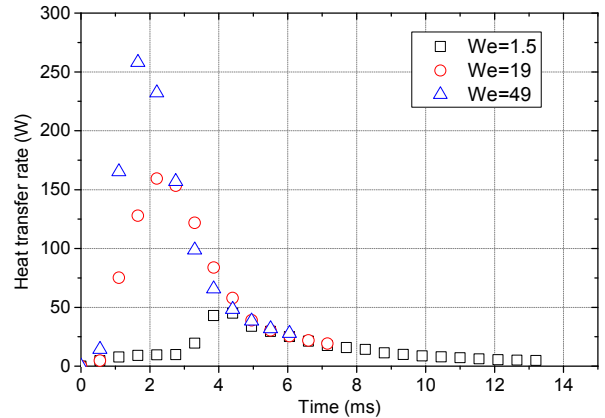


Fig. 15 History of heat transfer rate during collision

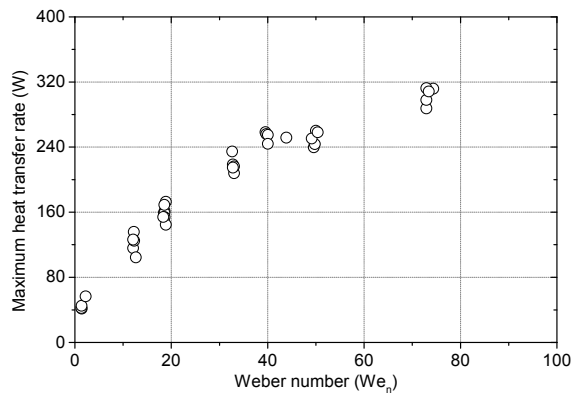


Fig. 16 Maximum instantaneous heat transfer rate

반면 웨버수가 19와 49인 경우 액적은 충돌함과 동시에 급격히 열전달률이 증가하였다. 웨버수가 49인 경우 국소 최대 열유속을 갖는 시점은 0.55 ms였다. Fig. 13에서 보듯이, 1.1 ms일 때 최대 열유속은 0.55 ms에 비해 낮지만, 열전달 면적의 증가 및 액적 중심부의 열전달 향상효과로 인해 열전달률이 급격히 증가하였다.

Fig. 16은 충돌기간 동안 수직방향 충돌속도에 따른 액적의 최대 열전달률을 나타낸다. 액적의 최대 열전달률은 웨버수가 30인 지점까지 충돌 속도에 비례하여 증가하였으며, 이후 증가율이 감소하였다.

웨버수가 30보다 작은 경우, 최대 평균 열유속의 증가는 열전달 면적 내 국소 최대 열유속 분포의 충돌속도에 따른 증가로 인한 것이다. 반면 30보다 큰 경우 액적은 국소 최대 열전달 면적이 증가하지만 액적이 빠르게 퍼져나감으로써 중심부에 의한 열전달 향상효과가 감소하였다. 이로 인해, 액적의 최대 열유속은 충돌속도에 따른 증가율이 감소하는 경향을 보였다.(Fig. 13 참조)

Table 3 Conditions of previous studies for heat transfer effectiveness on hot surfaces

	Present study	Kendall and Rohsenow ⁽¹⁾	Pedersen et al. ⁽¹⁷⁾	Dunand et al. ⁽¹⁸⁾	Lelong et al. ⁽¹⁹⁾
Diameter(mm)	2.0	0.22	0.2 - 0.4	0.18	0.165
Velocity(m/s)	0.2 - 1.5	0.91 - 3.0	2 - 10	10	5 - 7 (normal)
Collision angle(°)	90	30 - 70	90	10 - 80	30
Substrate material	Platinum	Copper or Steel	Copper	Nickel	Nickel
Wall temperature(°C)	425	100 - 400	621	540	550

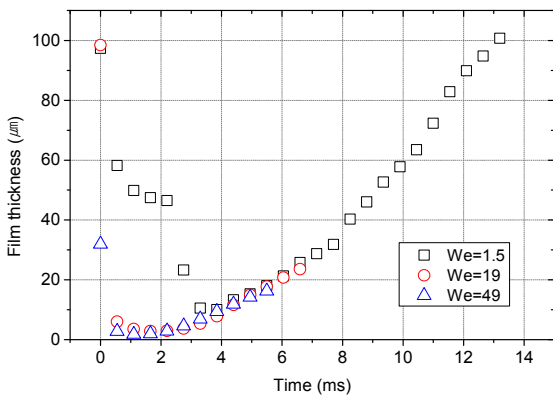


Fig. 17 History of average vapor film thickness

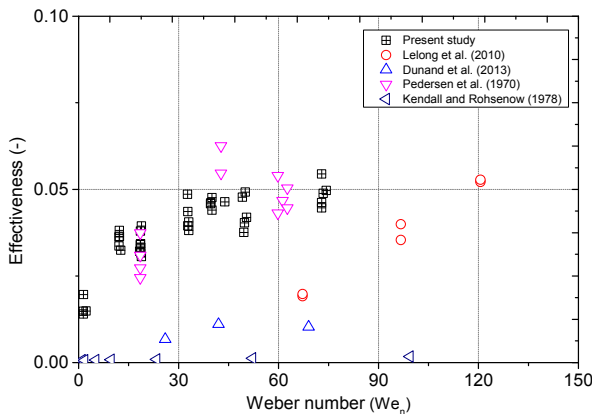


Fig. 18 Relation of heat transfer effectiveness with normal We number

3.2.4 증기막 두께

Fig. 17은 시간에 따라 변화하는 증기막의 두께를 나타낸다. 증기막의 두께는 식 (11)을 통해 계산되었다. 액적의 속도에 따라 충돌직후 약 3 ms 간 증기막의 두께가 변화하였으며 이후 유사한 증가율로 두께가 증가함을 보였다. 충돌속도는

충돌초기부터 증기막의 두께를 크게 감소시켜 증기막을 통해 전달되는 열전달량을 증가시키는 원인이 된다. 하지만 일정 속도 이상에서 증기막의 최소 두께는 더 이상 얇아지지 않고 일정한 값을 유지하였다.

3.2.5 열전달 효율

Fig. 18은 열전달 효율을 나타낸 것으로 액적의 표면에 충돌하는 각도에 따라 크게 두 가지 분류로 나뉜다. Pederson 등⁽¹⁷⁾ 및 본 연구는 액적을 벽면과 수직되게 충돌시키며 실험한 반면, 나머지 경우들은 90°보다 낮은 충돌 각도에 대해 수행된 실험 결과들이다. Table 3은 각 연구의 실험 조건을 정리한 것이다.

Dunand 등⁽¹⁸⁾은 액적의 속도를 10 m/s로 고정해 놓고 각도에 따라 변화하는 수직방향 충돌속도의 영향을 평가하였다. 열전달 효율은 수직방향의 충돌속도가 증가함에 따라 증가하지만 열전달량의 절대적인 양은 작게 나타났다. Lelong 등⁽¹⁹⁾은 30°의 충돌각도를 갖는 액적의 속도를 바꿔가며 충돌 속도에 대한 영향을 평가하였다.

본 연구와 Pederson⁽¹⁷⁾의 경우 유사한 경향을 보인 반면, 기타 연구들은 낮은 값을 나타냈다. 90°로 부딪히는 경우, 열전달 효율은 액적의 속도가 증가함에 따라 서서히 증가하였다. Dunand⁽¹⁸⁾의 경우, 액적의 충돌각도를 제외한 나머지 인자들은 고정을 시킨 후 충돌각도를 10 - 80°로 변화시켜 수직한 충돌속도 성분이 증가함에 따라 열전달효율이 증가함을 보였다. Lelong⁽¹⁹⁾은 충돌 속도만을 변화시켜 충돌각도가 30°일 때 수직한 속도 성분이 증가할수록 열전달 효율이 증가함을

보였다.

4. 결 론

본 연구는 시간적으로 동기화된 고속 카메라와 적외선 카메라를 이용하여 액적-벽면 충돌 시 액적의 거동 특성과 표면의 온도 분포를 측정하여 열전달 특성을 실험적으로 조사하였다. 실험은 대기압 조건에서 425 °C로 가열된 벽면에 2 mm의 지름을 갖는 액적을 0.2 - 1.5 m/s의 범위 내 수직방향 충돌속도로 충돌시킨 실험 결과를 분석에 활용하였다. 실험을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 액적은 수직 방향의 웨버수가 30 미만일 때 충돌속도가 증가할수록 빠르게 뒤튐 현상이 발생하였다. 웨버수가 30 이상일 때 액적은 미세 액적들로 분쇄되기 시작하였다.

(2) 액적의 충돌시간은 웨버수가 30보다 작을 경우 충돌속도가 증가할수록 감소하며, 30보다 커질 경우 일정해졌다.

(3) 라이덴 프로스트 온도 이상의 벽면에 충돌한 액적의 최대 지름은 충돌속도가 증가할수록 증가하였다.

(4) 액적의 충돌속도 증가에 따른 충돌 에너지의 증가로 증기막의 평균두께는 감소하지만 일정 속도 이상에서는 더 이상 얇아지지 않고 일정한 두께를 유지하였다.

(5) 충돌속도가 증가할수록 평균 증기막 두께가 감소하고 열전달 면적이 증가하여 최종적으로 열전달량은 증가하였다. 웨버수가 30 이하인 뒤튐 영역에서 충돌속도 증가에 의한 열전달의 증가가 두드러졌으나 30 이상인 경우 액적의 분쇄로 인해 증가율이 감소하였다.

향후 충돌각도가 액적-벽면 열전달의 열전달 특성에 대한 실험 연구를 추가적으로 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2014년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2012M2B2A6029183)

참고문헌 (References)

(1) Kendall, G.E. and Rohsenow, W. M., 1978, "Heat

Transfer to Impacting Drops and Post Critical Heat Flux Dispersed Flow," Technical Report No. 85694-100, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

(2) Enomoto, T., Kanetsuki, M. and Ueda, T., 1979, "Heat Transfer Characteristics and Dynamic Behavior of Saturated Droplets Impinging on a Heated Vertical Surface," *Bulletin of the Japan Soc. Mech. Eng.*, Vol. 22, No. 167, pp. 724~732.

(3) Bolle, L. and Moureau, J. C., 1978, "Spray Cooling of Hot Surface," *Multiple Science and Technology*, pp. 76~90.

(4) Aziz, S. D., Chandra, S., Mostaghimi, J. and Pasandideh-Fard, M., 2001, "Cooling Effectiveness of a Water Drop Impinging on a Hot Surface," *Int. J. Heat and Fluid flow*, Vol. 22, pp. 201~210.

(5) Baumeister, K. J., Mamill, T. D., Schoessow, G. J. and Schwartz, F. L., 1966, "Film Boiling Heat Transfer to Water Drops on a Flat Plate," *Chemical Engineering progress symposium series*, No. 64, Vol. 62, pp. 52~61.

(6) Guo, Y. and Mishima, K., 2002, "A Non-equilibrium Mechanic Heat Transfer Model for Post-dryout Dispersed Flow Regime," *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 26, pp. 861~869.

(7) Kim, H. D., Jung, S. B., Park, J. S. and Song, J. K., 2014, "Experimental Study on Heat Flux Partitioning in Subcooled Nucleate Boiling on Vertical Wall," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 6, pp. 465~474.

(8) Chatzikiyiakou, D., Hale, C. P., Hewitt, G. F. and Walker, S. P., 2011, "The Measurement of Heat Transfer from Hot Surfaces to Non-wetting Droplets," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 1432~1440.

(9) Wachters, L.H.J. and Westering, 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.

(10) Hamdan, K. S., Kim, D. E. and Moon, S. K., 2014, "Droplets Behavior Impacting on a Hot Surface above the Leidenfrost Temperature," *Int. J. Nuclear Thermal Hydraulics and safety*.

(11) Rayleigh, L., 1879, "On the Capillary Phenomena

- of Jets," *Proceedings of the Royal Soc. London, Philosophical Transactions of the Royal Society*, pp. 71~99.
- (12) Bianco, A. E., Chevy, F., Clanet, C., Lagubeau, G. and Quere, D., 2006, "On the Elasticity of an Inertial Liquid Shock," *J. Fluid Mech.*, Vol. 554, pp. 47~66.
- (13) Avedisian, C. T. A. and Chandra, S., 1991, "On the Collision of a Droplet with a Solid Surface," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 432, pp. 13~41.
- (14) Fujimoto, H., Hatta, N., Kinoshita, K., Takahashi, O. and Takuda, H., 1995, "Collision Dynamics of a Water Droplet Impinging on a Rigid Surface above the Leidenfrost Temperature," *Int. Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 35, pp. 50~55.
- (15) Frohn, A. and Karl, A., 2000, "Experimental Investigation of Interaction Processes between Droplets and Hot Walls," *Physics of fluids*, Vol. 12, pp. 785~796.
- (16) Tran, T., Staat, H. J. J., Susarrey-Arce, A., Foertsch, T. C., Houselt, A., Gardeniers, H. J. G. E., Lohse, D. and Sun, C., 2013, "Droplet Impact on Superheated Micro-structured Surfaces," *Soft Matter*, Vol. 9, pp. 3272~3282.
- (17) Pedersen, C. O., 1970, "An Experimental Study of the Dynamic Behavior and Heat Transfer Characteristics of Water Droplets Impinging Upon a Heated Surface," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 369~381.
- (18) Dunand, P., Castanet, G., Gradeck, M. and Lemoine, F., 2013, "The Heat Transfer Characteristics of a Small Droplet Impinging Upon a Hot Surface," *Int. J. Japan Soc. Mech. Eng.*, No. 1, Vol. 31, pp. 105~111.
- (19) Gradeck, M., Lelong, F., Maillet, D. and Seiler, N., 2010, "Experimental Study of Heat Transfer Between Droplets and Wall in Leidenfrost Regime," *7th Int. conference on Multiphase flow*.