# 막비등 영역에서 액적-벽면 충돌 시 충돌각도가 열전달에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

박준석\* • 김형대†

# Experimental Study of Collision Angle Effects on Heat Transfer During Droplet-wall Collision in Film Boiling Regime

Junseok Park and Hyungdae Kim

Key Words: Droplet collision(액적 충돌), Leidenfrost temperature(Leidenfrost 온도), Collision angle(충돌 각도), Film boiling(막 비둥)

### Abstract

Effects of collision angle on heat transfer characteristics of a liquid droplet impinging on a heated wall above the Leidenfrost point temperature were experimentally investigated. The heated wall and droplet temperatures were 506°C and 100°C, respectively, and the impact angle varied from 20° to 90° while the normal collision velocity was constant at 0.27 m/s. The droplet collision behaviors and the surface temperature distribution were measured using synchronized high-speed video and infrared cameras. The major physical parameters influencing upon droplet-wall collision heat transfer, such as residence time, wall heat flux, effective heat transfer area, heat transfer amount, were analyzed. It was found at the constant normal collision velocity that the residence time, wall heat flux and effective heat transfer area were hardly not changed, resulting in the almost constant heat transfer amount.

### 기호설명

A : 열전달 면적 [m<sup>2</sup>] C<sub>p</sub> : 비열 [J/kg°C] D<sub>d</sub> : 액적의 지름 [m] E<sub>d</sub> : 액적의 제거 에너지 [J] E<sub>max</sub> : 액적이 완전 증발 시 필요한 에너지 [J] Fr : Froude 수 = V/√gD h'<sub>fg</sub> : 잠열 = h<sub>g</sub> + C<sub>p</sub>(T<sub>sat</sub> - T<sub>d</sub>) [J/kg]

(Recieved: 28 Apr 2017, Recieved in revised form: 3 Jul 2017, Accepted: 29 Jul 2017) "경희대학교 원자력공학과 <sup>\*</sup>책임저자, 회원, 경희대학교 원자력공학과 E-mail : hdkims@khu.ac.kr TEL : (031)201-3322 

 ks
 : 사파이어의 열전도계수 [W/m°C]

 R
 : 액적의 반지름 [m]

 q"<sub>w</sub>
 : 표면 열유속 [W/m<sup>2</sup>]

 T<sub>d</sub>
 : 액적 온도 [°C]

 T<sub>w</sub>
 : 벽면 온도 [°C]

 t<sub>R</sub>
 : 액적 충돌 시간 [sec]

 V<sub>d</sub>
 : 액적의 충돌 속도 [m/s]

 We<sub>n</sub>
 : 웨버수 = ρ<sub>d</sub> V<sup>2</sup><sub>n</sub>D/σ

### 로마자

ρ : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
 σ : 표면 장력 [N/m]
 ε : 열전달 효율 [-]
 μ<sub>ν</sub> : 증기의 점섬도 [Ns/m<sup>2</sup>]

### 하첨자

- d : 액적
- s : 퍼짐(Spreading)
- v : 증기

### 1. 서 론

액적-벽면 충돌 열전달은 분무 냉각(Spray cooling)의 가장 기본적인 현상으로 액적의 증발 잠열을 활용하기 때문에 큰 열전달 효과를 만들 수 있어서 다양한 산업 에서 활용되고 있다. 특히 원자력 발전소에서 액적-벽면 충돌 열전달은 사고 대처 및 안전에 있어 매우 중요한 현상으로 다루어지고 있다. 벽면이 Leidenfrost 온도<sup>(1)</sup> 이상으로 가열된 경우 액적과 벽면간의 열전달 시 급격 한 증발에 의해 형성된 증기막을 통한 전도 열전달에 의해 발생한다. 액적-벽면 충돌 열전달은 벽면의 온도, 액적의 지름, 온도, 충돌 속도 및 충돌 각도 등에 의해 변화하는 액적의 벽면 충돌 거동 및 열전달 특성을 동 시에 분석해야하기 때문에 어려움이 존재하고 따라서 아직까지 현상에 대한 충분한 이해가 되어있지 못한 상 태이다.

산업에서 활용되는 분무 노즐은 형태 및 액적의 분사 방법에 따라 다양한 분사 각도를 가지고 있어 분사된 액적은 벽면과 충돌할 때 다양한 충돌 각도를 가지게 된다. 뿐만 아니라 액적 충돌 열전달이 발생하는 원자력 발전소 내 안전 관련 설비에서 액적의 충돌 각도의 변 화는 설비의 성능에 큰 영향을 줄 수 있다. 원자력 발전 소의 노심 내부에 있는 냉각재가 방출되는 사고가 발생 하게 되면 핵연료봉은 과열과 함께 부풀어 올라 유로의 형태 및 크기의 변형을 초래하게 된다<sup>(2)</sup>. 부풀어진 핵연 료봉은 노심 하부에서 발생하는 액적들이 증기와 함께 상부로 이동할 때 충돌하는 각도를 변화시켜 핵연료의 냉각 특성에 영향을 주게 된다.

사고 시 원자력 발전소 핵연료와 같이 Leidenfrost 온 도 이상으로 과열된 벽면에 대한 액적의 충돌 열전달에 대한 다양한 실험적 연구<sup>(3-14)</sup>가 수행되어 왔다. Pedersen<sup>(3)</sup>은 실험을 통해 다양한 벽면 온도 조건에서 액적이 벽면에 충돌할 때 액적의 충돌 속도가 가장 중요한 인 자임을 확인하였다. Fujimoto<sup>(4)</sup>는 벽면의 온도가 500°C 일 때 45-90°까지 충돌 각도를 변화시키면서 실험을 수 행하였으며, 액적의 벽면에 수직한 속도 성분이 액적의 동적 거동을 좌우하는 중요한 인자인 반면 액적의 크기 에는 영향을 받지 않는다고 보고하였다. Castanet *et al.*<sup>(5)</sup>, Kang과 Lee<sup>(6)</sup>, Shi<sup>(7)</sup>, 그리고 Pournaderi와 A. R. Pishevar<sup>(8)</sup>는 액적의 속도를 고정한 상태로 충돌 각도 변화에 따른 해석을 통해서 충돌 시간은 충돌 각도에 무관하며 열전달량은 수직방향의 충돌 속도의 증가에 의해 증가 함을 확인하였다. Celata<sup>(9)</sup>는 과냉 액적(20°C)를 활용한 충돌 각도(45-90°)가 동적 Leidenfrost 온도에 미치는 영 향을 실험적으로 평가하여 충돌 각도가 중요한 인자임 을 확인하였다.

기존의 연구 결과들은 Leidenfrost 온도 이상의 막비 등 조건에서 액적이 벽면에 충돌 시 충돌 각도의 영향 에 대한 실험이 제한적인 각도 범위에 대해서 수행되었 고, 각도 이외의 다른 인자들(예를 들어 액적 온도 및 수직방향 속도)을 일정하게 고정한 조건에서 실험이 수 행되어지지 못하여서 여러 가지 오차의 원인을 가지고 있음을 문헌조사를 바탕으로 확인하였다.

따라서 본 연구는 단일 포화 액적이 Leidenfrost 온도 이상으로 가열된 벽면에 충돌할 때 충돌 각도가 액적의 열전달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 관측하고자 한다. 충돌 각도의 영향만을 도출하기 위하여 막비등 상 황이 유지될 수 있는 벽면온도, 액적의 직경, 온도, 수직 방향 충돌 속도를 모두 일정하게 유지하는 상태에서 충 돌 각도를 20-90° 범위에서 변화시키면서 액적의 충돌 및 열전달 특성을 분석하였다.

# 2.실 험

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 액적-벽면 열전달 측정용 실험장치의 개략도 를 나타낸다. 액적의 충돌 시 거동 및 벽면 온도 변화를



Fig. 1 Schematic of the experimental setup



Fig. 2 Method for controlling the collision angle

고속 카메라(High Speed Video, HSV)와 적외선 카메라 (Infra-Red, IR)를 통해 이용하여 동시에 측정하였다. 실 험은 대기압 조건에서 수행되었으며, 벽면 온도는 506°C로 고정하고, 액적은 원통형 수조에 담겨진 순수 물을 밴드 히터로 100°C(포화 온도)로 가열한 후 31 게 이지의 주사 바늘을 활용하여 형성시켰다<sup>(10)</sup>. 고속 카메 라를 통해 측정된 액적의 평균 지름은 2 mm이며, 측정 오차는 최대 85 μm이다.

액적의 충돌 각도는 Fig. 2와 같이 시편의 기울기를 조절하여 20-90° 범위 내에서 설정하였다. 액적의 초기 속도(V<sub>d</sub>)는 충돌하기 직전의 두 프레임에서 액적이 이동 한 거리(Δh)에 시간 간격(Δt)을 나눠서 구하였다. 이때 액적의 벽면에 수직한 속도 성분(V<sub>n</sub>)은 V<sub>d</sub>sin(90-θ)로 구할 수 있다. 본 실험에서는 액적의 충돌 속도가 0.27 m/s으로 같도록 설정하였다.

### 2.2 결과 분석

국소 열유속(q"<sub>w</sub>)은 적외선 카메라를 통해 측정된 표 면온도를 시편 상부 표면의 경계조건으로 활용하여 3차 원 과도열전도 해석을 통해 계산된 벽면 내부 온도 분 포로부터 얻어진다<sup>(10-12)</sup>. 액적의 열전달률( $\dot{Q}$ )은 유효 열전달 면적 내 열유속을 적분하여 얻어진다. 최종적 으로 액적에 의해 제거된 열전달 에너지( $E_d$ )는 유효 열전달 면적( $A_{eff}$ ) 내 열유속을 시간에 대해 적분하여 얻어진다.

$$q''_{w}(x,y,t) = -k_{s} \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z}\Big|_{z=H}$$
(1)

$$\dot{Q}(t) = \int_{A_{eff}} q''_{w}(x, y, t) dA$$
<sup>(2)</sup>

$$E_{d} = \int_{0}^{l_{R}} \int_{A_{eff}} q''_{w}(x, y, t) dA dt$$
 (3)

한국액체미립화학회지 제22권 제3호(2017)/ **131** 

Parameter	Method	Accuracy
ρ	Property table <sup>(16,17)</sup>	0.02%
$k_s$	Property table <sup>(18)</sup>	0.02%
$T_d$	measurement	± 1°C
$T_w$	measurement	$\pm 0.2^{\circ}C$
$D_d$	measurement	$\pm~0.0425~mm$
$t_R$	measurement	$\pm 0.82 \mbox{ ms}$

Table	1	Accuracy	of	parameter
raute		riccuracy	UI.	parameter

### 2.3 불확실도 분석

Table 1은 각 인자별 정확도를 나타낸 것으로 결과 해 석에 활용되는 각 인자들의 불확실도는 McLintock<sup>(15)</sup>에 의해 제안된 아래의 식으로부터 계산할 수 있다. 각 인 자들의 최대 불확실도는 국소 열유속 2%, 열전달 에너 지 6%였다.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial w_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$
(4)

# 3. 실험 결과

### 3.1 액적의 동적 특성

본 실험은 중력 방향으로 액적을 토출시켜 기울어진 벽면에 충돌하는 액적을 관측하였다. Froude 수는 액적 의 관성력과 중력의 관계를 나타내는 무차원수이다. 본 실험의 조건은 Froude 수가 약 1.93으로, 액적의 거동은 중력에 의한 영향보다는 관성력이 지배적이다. Fig. 3은



중력이 액적에 미치는 영향을 평가하기 위해 측정한 액 적의 입사각과 반사각의 관계를 나타낸다. 충돌 후 벽면 으로부터 이탈하는 액적은 입사각보다 최대 3°정도 작 게 반사되었으나, 그 변화는 미비하다고 볼 수 있다. 따 라서 본 실험의 조건에서 중력에 의한 영향은 배제할 수 있다고 판단되어진다.

#### 3.1.1 가시화 결과

Fig. 4는 시편의 온도가 약 506°C이고 수직 방향의 충 돌속도(V<sub>n</sub>)이 약 0.27 m/s일 때 충돌각도에 따른 액적의 충돌 특성 변화를 나타낸다. 액적은 충돌 각도에 상관없 이 모두 되튐현상이 일어났으며 액적의 거시적 거동은 유사하게 나타났다. 충돌 각도가 90°와 같이 큰 경우, 액적은 한 위치에서 충돌한 후 되튀어 올라왔으나, 충돌 각도가 90°에서 60°로 작아짐에 따라 충돌 위치에서 퍼 짐 현상이 시작되어 조금씩 벽면을 따라 이동하였으며,



 $(D_d = 2 \text{ mm}, We_n = 2.4, T_w = 506^{\circ}C)$ 



되감김 기간 동안 이동하는 거리가 증가하였다. 60°보 다 작은 경우, 액적은 벽면을 이동하면서 퍼짐과 되감김 현상이 일어났다.

### 3.1.2 충돌시간

가열된 벽면과 충돌하는 액적의 열전달량은 벽면과 충돌하는 시간과 밀접한 관련이 있다. 이로 인해 기존의 많은 연구<sup>(11-15)</sup>에서는 액적의 충돌시간을 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 모델들은 식 (5)와 같은 형태로 서 로 상수만 다르며, 액적의 지름과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다.

$$t_R = C_{\sqrt{\frac{\rho_d D_d^3}{16\sigma}}}$$
(5)

여기서 *D*<sub>d</sub>는 액적의 지름, *ρ*<sub>t</sub>는 액적의 밀도, σ는 표 면 장력을 나타낸다.

Fig. 5는 액적의 충돌 각도에 따른 충돌시간을 나타낸 것으로, 충돌 시간은 충돌각도 55°를 기점으로 오차범 위 내에서 작은 각도의 경우 9.2 ms, 높은 각도의 경우 10.8 ms 내외의 일정한 값을 가졌다.

기존 모델과 비교하였을 때, Guo의 모델<sup>(11-14)</sup>은 55° 미만의 결과와 유사하였으며, Biance 모델<sup>(15)</sup>은 55° 이 상의 결과에 근접한 경향을 보였다. 모델들에서 이러한 차이는 충돌시간을 예측하는 식 (5)의 상수값(C)을 실험 적으로 결정하였기 때문이며, Guo<sup>(13)</sup>는 π를, Biance<sup>(15)</sup>는 3.747을 제시하고 있다.

3.2 열전달 특성

3.2.1 벽면 온도 Fig. 6은 최소 벽면 온도 변화의 시간에 따른 변화를



Fig. 6 Histories of minimum surface temperature

나타낸다. Fig. 3에서 보듯이, 액적은 20°와 같이 작은 충돌 각도를 가지는 경우 충돌 초기에 움직이지 않고 퍼지기 시작(Spreading)하였다. 이 과정에서 최소 벽면 온도는 감소하기 시작하였다. 2.46 ms부터 액적은 벽면 을 따라 긴 이동 거리를 움직이면서 되감김 과정(Recoil process)을 거치며 아직 냉각되지 않았던 영역을 냉각시 켰다. 이 과정에서 액적은 되감기면서 벽면으로부터 상 승하기 시작하여 벽면에 수직한 힘이 감소하게 되고 최 소 온도가 증가하였다. 반면, 90°와 같이 충돌 각도가 큰 경우의 액적은 한 지점에서 지속적인 냉각이 발생하 여 벽면의 최소 온도가 낮아졌다. 충돌 각도가 45° 이상 인 경우, 액적은 한 지점에서 퍼짐 과정이 이루어진 이 후 벽면을 미끄러져 움직였다. 45° 미만인 경우, 액적은 퍼짐과정과 함께 벽면을 따라 냉각되지 않은 영역으로 이동하였다. 이러한 차이로 인해 최소 벽면 온도에 도달 하는 시간과 온도 값에 차이를 보이게 되었다.

Guo<sup>(13)</sup> 및 Lelong<sup>(20)</sup>는 액적의 동적 특성과 증기막의 형성에 대해 질량, 운동량 그리고 에너지 보존 법칙을 바탕으로 식 (6)과 같은 형태의 예측 모델을 개발하였다. 이 모델에 따르면, 열전달은 벽면 온도와 액적 온도간의 차이의 3/4승에 비례한다. Fig. 7은 이 관계를 기반으로 온도차의 변화를 나타낸 것이다. 충돌 각도가 다를 때 나타나는 최대 차이는 약 0.5°C로 나타났다. 이러한 차 이는 열전달량에 영향을 미치나 매우 미비하였다.

$$q''_{w} \approx \left[\frac{4\rho_{d}\rho_{v}h'_{fg}(2V_{n}/t_{R})R_{d}^{3}}{9\mu_{v}k_{v}(T_{w}-T_{sal})R_{s}^{4}}\right]^{1/4}(T_{w}-T_{sal})$$
(6)

3.2.2 열유속 분포

Fig. 8은 충돌 각도에 따라 변화하는 열유속 분포를 나타낸다. 90°인 경우, 액적은 한 지점에서 충돌이 발생





Fig. 7 Maximum temperature difference



Fig. 8 Heat flux distribution  $(D_d = 2 \text{ mm}, \text{ We}_n = 2.4, T_w = 506^\circ\text{C})$ 

#### 134 /JOURNAL OF ILASS-KOREA VOL. 22 NO. 3 (2017) -

하여 액적의 수직한 힘이 액적이 퍼지는 힘으로 천이되 면서 약해지기 때문에 열유속은 서서히 감소하게 되고 이후 열전달 면적 및 열유속값이 감소하는 경향을 보였 다. 이러한 경향은 충돌 각도가 감소하더라도 동일하게 나타났으며, 90°인 결과와 달리 충돌 각도가 감소함에 따라 액적의 이동과 함께 열전달 영역의 이동이 발생하 였다. 이때 열전달 영역의 이동 거리는 충돌 각도가 감 소함에 따라 길어지는 경향을 보였다. 그럼에도 열유속 값은 유사한 값을 띄었는데, 이는 벽면 온도가 매우 미 비한 영향을 주었다는 결과에 부합하는 결과이다.

### 3.2.3 열전달 면적

액적과 벽면간의 열전달에 있어 열전달 면적은 중요 한 인자이다. Fig. 8에서 보듯이 액적-벽면 충돌 열유속 (~10<sup>5</sup> W/m<sup>2</sup>)은 자연대류 영역의 열유속(~10<sup>4</sup> W/m<sup>2</sup>) 대 비 10배 이상 크기 때문에, 유효 열전달 면적은 열유속 구배를 이용하여 정의될 수 있다<sup>(11,12)</sup>. 열유속 구배를 기 준으로 Sobel edge detection 방법<sup>(21)</sup>을 활용하여 열전달 면적을 측정하였다.

Fig. 9는 위 기법을 기반으로 측정된 충돌 각도에 따 른 유효 열전달 면적을 나타낸 것이다. 시간에 따른 유 효 열전달 면적은 퍼짐과정동안 증가하여 최대 퍼짐 지 름에 도달 후 되튐 과정동안 감소하는 동일한 경향성을 보였다. 열전달 면적은 충돌 각도의 변화에 따라 크게 변화하지 않았으며, 30° 결과에서 다소 낮은 결과를 보 였다. 실험 결과의 불확실도를 고려하면 거의 같은 수치 이다.

3.2.4 열전달률

Fig. 10은 액적 충돌 시 시간에 따른 열전달률의 변화



Fig. 9 Effective heat transfer area



Fig. 10 Heat transfer rate as a function of normalized collision time

를 나타낸다. 열전달률은 각도에 상관없이 모든 결과가 동일한 경향성을 보였으며, 시간의 따른 변화는 열전달 면적에 비례하였다. 이는 열전달 면적이 열전달률을 좌 우하는 중요한 인자임을 뜻한다. 75°의 경우, 열전달 면 적의 변화는 차이가 없으나 열전달률이 높게 나타났다. 이는 액적 온도가 포화온도에 가까운 상태로 떨어졌으 나 액적 온도의 미세한 변화는 벽면과 충돌하는 과정에 서 생성되는 증기를 억제하기 때문에 열전달에 크게 영 향을 준다<sup>(10)</sup>. 이로 인해 열전달률이 증가했을 것으로 판단된다. 즉, 충돌 각도는 열전달 면적의 변화를 초래 하여 열전달률 변화에 영향을 주지만 그 경향성은 매우 미비하다는 결과를 얻었다.

#### 3.2.5 열전달 에너지

Fig. 11은 Wen이 2.4일 때 액적이 충돌하는 동안 벽면 을 통해 얻은 에너지를 나타낸 것으로, 충돌 각도에 상



Fig. 11 Heat transfer energy

관없이 거의 일정한 경향을 보였다. 이는 열전달 면적 및 충돌 시간, 열유속이 충돌 각도에 상관없이 일정하게 나타났기 때문이다.

## 4. 결 론

Leidenfrost 온도 이상으로 가열된 벽면에 충돌하는 포화 액적의 충돌 동안 충돌 각도에 따른 열전달 특성 의 변화에 대해 실험을 수행하였다. 충돌 시 수직방향 웨버수(We<sub>n</sub>)가 2.4로 일정하게 유지되는 조건에서 충돌 각도를 20-90° 범위에서 변화시키며 획득한 관찰 결과 는 다음과 같다.

(1) 충돌 각도가 변화함에 따라 액적의 충돌 시간, 열 유속 및 유효 열전달 면적은 거의 일정하였으며, 이로 인해 열전달 에너지량 또한 일정하게 나타났다.

(2) 액적의 충돌 각도는 벽면에 수직한 속도 성분이 작은 경우 액적이 벽면을 따라 이동하는 거리에 변화를 주지만 열전달 특성에 영향을 주지는 않았다. 하지만 실 제 다양한 산업에서 활용하고 있는 분무 냉각은 대체적 으로 액적의 충돌 속도가 빠르다. 따라서 충돌 속도가 증가할 때 충돌 각도가 액적의 거동 및 열전달 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 평가가 필요하다.

본 연구는 막비등 시 액적-벽면 충돌 열전달을 예측 하기 위한 모델의 개발을 위한 연구의 일환이다. 이후 연구에서는 충돌 속도, 충돌 각도 및 벽면 온도의 복합 적 영향을 반영한 열전달 특성에 대한 열전달 맵을 제 작하고, 막비등 영역에서 각 인자들이 열전달 특성에 미 치는 영향을 분석할 예정이다.

# 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으 로 한국연구재단-원자력연구개발사업의 지원을 받아 수 행된 연구임(No.NRF-2015M2B2A9031597).

# 참고문헌

 J. G. Leidenfrost, "A tract about some qualities of common water", Int. J. Heat Mass Transfer, 9, 1966, pp. 1153~1166. 한국액체미립화학회지 제22권 제3호(2017)/ 135

- (2) A. M. Bloch, M. Reyhanoglu and N. H. McClamroch, "Control and stabilization of nonharmonic dynamic system", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 37, No. 11, 1992, pp. 1746~1757.
- (2) B. Biton, P. Ruyer, S. M. Nathalie and M. Gradeck, "Thermal hydraulic across a partially damaged core during the reflood phase of a LOCA", Nuclear engineering and design, Vol. 264, 2013, pp. 187~194.
- (3) C. O. Pedersen, "An experimental study of the dynamic behavior and heat transfer characteristics of water droplets impinging upon a heated surface", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13, 1970, pp. 369~381.
- (4) H. Fujimoto, H. Takuda and R. Doi, "An experimental study on the oblique collisions of water droplets with a smooth hot solid", Journal of Fluids Engineering, Vol. 134, 2012, 071301.
- (5) F. Lemoine, G. Castanet and T. Lienart, "Measurement of the temperature of droplets interacting with a heated wall", 14th Int. Symp. on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10, July, 2008.
- (6) B. S. Kang and D. H. Lee, "On the dynamic behavior of a liquid droplet impacting upon an inclined heated surface", Experiments in Fluids, Vol. 29, 2000, pp. 380-387.
- (7) J. Yu, M. H. Shi and T. C. Bai, "Dynamic behavior and heat transfer of a liquid droplet impinging on a solid surface", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 6, 1993, pp. 202~207.
- (8) A. R. Pishevar and P. Pournaderi, "The effect of the surface inclination on the hydrodynamics and thermaldynamics of Leidenfrost droplets", Journal of Mechanics, Vol. 30, No. 2, 2014, pp. 145~151.
- (9) A. Mariani, G. P. Celata, G. Zummo and M. Cumo, "Visualization of the impact of water drops on a hot surface: effect of drop velocity and surface inclination", Heat Mass Transfer, Vol. 42, 2006, pp. 885~890.
- (10) H. Kim and J. Park, "Effects of Droplet Temperature on Heat Transfer During Collision on a Heated Wall Above the Leidenfrost Temperature", Journal of ILASS-Korea, Vol. 21, No. 2, 2016, pp. 78~87.
- (11) H. Kim and J. Park, "An experimental investigation on dynamics and heat transfer associated with a single droplet impacting on a hot surface above the Leidenfrost point temperature", Kerntechnik, Vol. 81, No. 3, 2016, pp. 1~11.

- (12) K. Kim, H. Kim, J. Park and S. Bae, "The effect of impact velocity on Droplet-wall collision heat transfer above the Leidenfrost point temperature", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 39, No. 7, 2015, pp. 567~578.
- (13) K. Mishima and Y. Guo, "A non-equilibrium mechanistic heat transfer model for post dryout dispersed flow regime", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 23, 2002, pp. 861~869.
- (14) T. Ueda, T. Enomoto and M. Kanetsuki, "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, 1979, pp. 724~732.
- (15) A. E. Biance, C. Clanet, D. Quere, F. Chevy and G Lagubeau, "On the elasticity of an inertial liquid shock", J. Fluid Mech., Vol. 554, 2006, pp. 47~66.
- (16) A. H. Elmahdy and K. Haddad, "Experimental procedure and uncertainty analysis of a guarded hotbox method to determine the thermal transmission coeffi-

cient of skylight and sloped glazing", NRCC-43378, 2000.

- (17) K. Watanabe, "The international association for the properties of water and steam", IAPWS AN1-03 reports.
- (18) A. Prub and W. Wagner, "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use", J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 31, No. 2, 2002, pp. 387~535.
- (19) E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov and V. Pishchik, "Sapphire: materials, manufacturing, applications, Springer", Springer, ISBN 978-0-387-85694-0, 2009.
- (20) F. Lelong, G. Castanet, M. Gradeck, N. Seiler, P. Dunand and P. Ruyer, "Behaviour of liquid droplets bouncing onto a hot slab", 23rd Annular conference on liquid atomization and spray systems, Brno, Czech Republic, september, 2010.
- (21) A. Mittal and S. Bhardwaj, "A survey on various edge detector techniques", Proceedia Technology, Vol. 4, 2012, pp. 220~226.