

## 고온평판에 충돌하는 비균일혼합액적의 동적거동 특성

이충현\* · 김경천†

### Dynamic Behavior of Heterogeneous Impinging Droplets onto High Temperature Plate

Choong Hyun Lee and Kyung Chun Kim

**Abstract.** In this experiment, a heterogeneous droplet consisted of de-ionized water and olive oil was made through two 31G injection needles. The injection flow rate was 50  $\mu$  l/min and the droplet size was 2 mm. The droplet was impinged onto a sapphire plate which was heated up to 300 °C by a heater. Two high speed cameras were used for visualization, and the frame rate was 20,000 fps. A 150W metal halite lamp was used for illumination. The dropping height was fixed to 20 mm and the corresponding Weber number was 10.6 based on water. Due to different boiling points of two liquids, partial boiling features of heterogeneous droplet was observed. At the Leidenfrost condition, micro explosion phenomenon has occurred.

**Key Words :** Heterogeneous droplet (혼합액적), Dynamic behavior (동적 거동), Leidenfrost phenomenon (라이덴프로스트 현상)

#### 1. 서론

고온 평판에 충돌하는 액적의 형태는 표면의 온도, 속도 및 액적의 종류에 따라 다양한 형태로 관찰된다. 막비등 영역에서의 단일액적의 동적 거동은 접촉면에서 기화로 인해 증기막이 형성된다. 이러한 증기막은 액적과 고온 평판과의 열전달율을 감소 시켜 냉각효율의 저하로 이어지는 문제점을 야기한다.<sup>[1]</sup> 단일 액적의 충돌에 관한 연구는 많은 연구가 수행되어 왔으나, 두 종류의 액체로 이루어진 비균일 액적의 충돌에 관한 연구는 수행되지 않았다.

두 종류의 서로 혼합되지 않는 액체로 형성된 액적이 고온 평판에 충돌할 경우, 각각의 액적이 단일 액적으로 충돌할 경우와 비교하여 어떤 새로운 특성을 보이는가에 대해 가시화 기법으로 연구하였다. 이러한 현상은 에멀전 상태의 연료를 사용하는 대형 디젤 엔진에서 분사된 액적이 엔진실 벽면에 충돌할 때 발생할 수 있다. 특히 막비등 영역에서의 고온 평판에 충돌할 경우, 두가지 액체로 이뤄진 액적의 충돌에 대한 열전달 특성 및 냉각효율의 물리적

특성을 이해하기 위해 액적의 충돌로 인한 동적 거동의 이해가 필요하다.

액적의 고온 표면에서의 거동은 핵비등, 천이비등, 막비등 영역으로 구분되어 진다. 막비등 영역에서의 액적은 표면과의 접촉면에 증기막을 형성하여 라이덴프로스트 현상이 관찰된다. 라이덴프로스트 온도는 Baumeister<sup>[2]</sup>에 의해 다음 수식으로 정리 되었다.

$$T_{Leid} = T_f + \frac{0.844 T_c \left\{ 1 - \exp \left( -0.016 \left[ \frac{(\rho_s)^{1.33}}{At} \right]^{0.5} \right) \right\}}{\exp(3.066 \times 10^6 \beta) \operatorname{erfc}(1758 \sqrt{\beta})} - T_f \quad (1)$$

#### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에서의 실험 장치를 나타낸다. 표면에서의 액적의 동적 거동을 촬영하기 위해 초고속 카메라를 사용하였으며, 표면은 투과성이 좋고 내열성이 높은 사파이어 윈도우를 사용하였다. 표면은 황동주물히터를 이용

† 부산대학교 기계공학부  
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 일반대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부

하여 300°C까지 가열하였으며, 표면의 온도 측정을 위해 K타입의 열전대를 사용하였으며, 이때 오차는 ±2°C 이다.

단일액적과 혼합된 액적에 대하여 실험을 하였고 단일 액적은 정제수를 혼합된 액체는 정제수와 olive oil을 사용하였다. 이 때 사용된 물의 표면장력은 72mN/m, 올리브 오일은 38mN/m 로 측정되었다. 액적의 낙하 높이는 20 mm로 고정하였으며, 물을 기준으로 한 Weber수는 10.6 이었다.

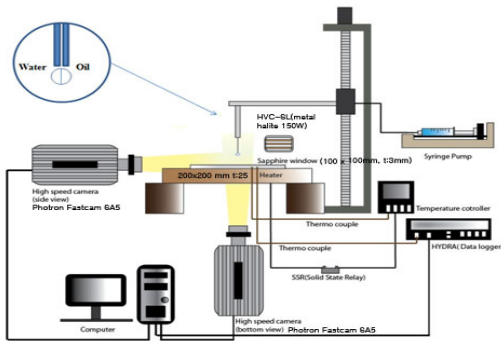


Fig. 1 Experimental setup

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 단일액적과 혼합 액적이 25°C 표면에서의 동적 거동에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다. 단일액적은 충돌 후 표면에 부착된 상태에서 진동운동을 하면서 운동 에너지를 소실하는 형태를 보인다. 혼합액적도 비슷한 거동을 보이나, 물과 올리브 오일의 분리 현상이 관찰되고 올리브 오일의 높은 점성효과로 인하여 최대퍼짐직경이 물에 비해 줄어들어 관찰되었다. 최대퍼짐직경에 도달한 이후 recoil과정에서 혼합액적은 균일액적보다 높이가 증가했으며, 이는 올리브오일이 물위에 분리되어 존재하기 때문이다. 액적의 최종부착 형상도 혼합액적의 경우가 순수 물의 경우와는 다르게 중심부가 평탄해짐을 알 수 있다.

Fig. 3는 단일액적과 혼합 액적이 150°C 표면에서의 동적 거동에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다. 물의 비등점 보다 표면의 온도가 높기 때문에 단일액적은 충돌 후 표면에 부착된 상태에서 핵비등 현상이 일어나고 있음이 관찰된다. 비등과 더불어 진동운동을 하면서 운동 에너지를 소실하는 형태를 보인다. 혼합액적의 경우에는 올리브 오일의 높은 비등점으로 인해 비등 현상이 나타나지 않는다. 올리브 오일의 비등점은 220°C 이다. 상온의 경우와 비교해보면 혼합액체의 온도 상승으로 점도가 낮아져서

최대퍼짐 직경은 조금 증가하는 현상을 보인다.

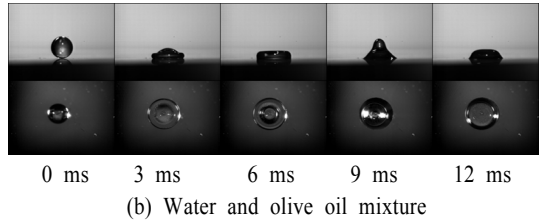
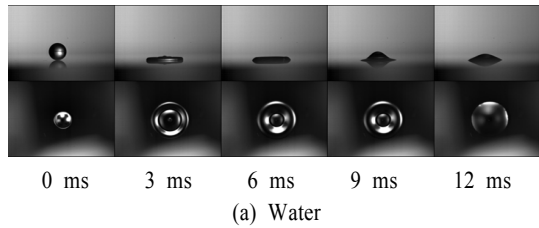


Fig. 2 Water droplet and heterogeneous droplet impinging on 25°C surface

Fig. 4는 단일액적과 혼합 액적이 200°C 표면에서의 동적 거동에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다. 물의 비등점 보다 표면의 온도가 훨씬 높기 때문에 단일액적은 충돌 후 표면에 퍼져나가면서 바로 핵비등 현상이 일어나고 있음이 관찰된다. Recoil 상태에서는 미세 폭발로 미립 액적이 튀어 오름이 관찰된다.[3] 충돌 후 24 ms 이후에서 액적은 되튀어 오르지 않지만 충돌 직전의 구형 형상으로 돌아옴이 관찰된다. 한편 혼합액적의 경우에는 비등 현상이 전혀 나타나지 않는다. 표면 온도 상승으로 점도가 낮아져서 최대퍼짐 직경이 더욱 증가하며, Recoil 이후 상당히 높은 액체 기둥을 형성한다.

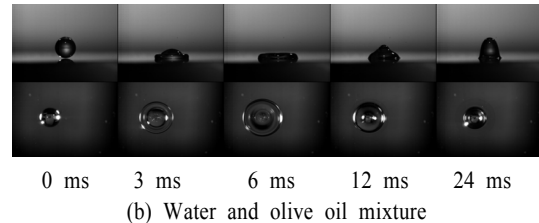
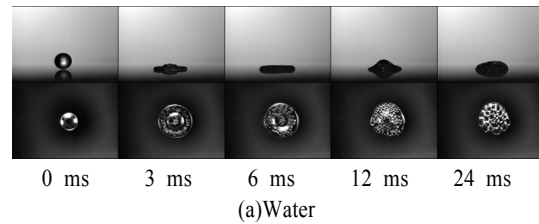


Fig. 3 Water droplet and heterogeneous droplet impinging on 150°C surface

Fig. 5는 단일액적과 혼합 액적이 250°C 표면에서의 동적 거동에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다. 이 표면 온도는 물의 라이텐프rost 온도 부근이므로 단일액적은 충돌 후 표면에 퍼져나가면서 천이 또는 막비등 현상이 일어나고 있음이 관찰된다. Recoil 직후에 미세 폭발로 미립 액적이 튀어 오름이 관찰된다. 충돌 후 24 ms 이후에서 액적은 되튀어 오르지않지만 충돌 직전의 구형 형상으로 돌아옴이 관찰된다. 혼합액적의 경우에는 올리브 오일의 비등점 이상의 표면 온도이므로 최대퍼짐 조건에서 부분적인 비등 현상이 관찰된다. 이는 혼합 액적 속의 물이 비등하여 생기는 현상으로 볼 수 있다. Recoil 과정에서는 물이 접촉된 표면에서는 미세 폭발이 보이고, Recoil 최종 단계에서도 물과 올리브 오일의 서로 다른 점성계수로 구형의 액적이 생성되지 않음을 볼 수 있다. 올리브 오일의 높은 점도로 재반등은 관찰되지 않는다.

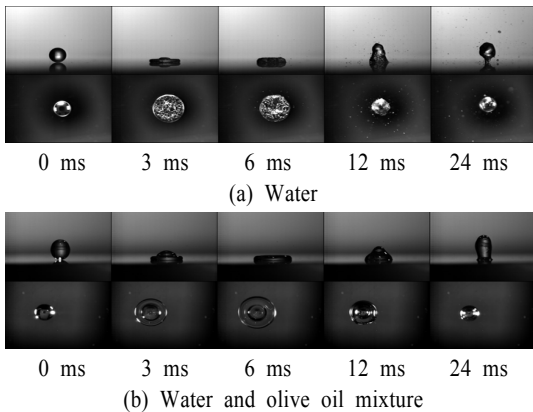


Fig. 4 Water droplet and heterogeneous droplet impinging on 200°C surface

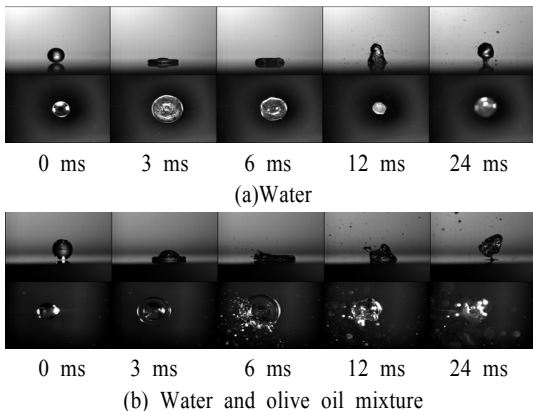


Fig. 5 Water droplet and heterogeneous droplet impinging on 250°C surface

Fig. 6는 단일액적과 혼합 액적이 300°C 표면에서의 동적 거동에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다. 이 표면 온도는 물의 라이텐프rost 온도 이상이므로 단일액적은 충돌 후 표면에 퍼져나가면서 막비등 현상이 일어나고 있음이 관찰된다. 액적과 표면 사이에서 형성된 증기막으로 인해 Recoil 직후에 액체 기둥이 재반등 하면서 구형 액적으로 변화됨을 관찰할 수 있다. 혼합액적의 경우에는 올리브 오일의 비등점 보다 훨씬 높은 표면 온도이므로 최대퍼짐 이후 급격한 비등 현상이 관찰된다. Recoil 이후 액적의 크기가 원래의 액적 보다 크게 보이는 이유는 올리브 오일 속에 물의 증기가 포함되어 있기 때문으로 판단 된다. 접촉된 표면에서 발생한 물 성분의 미세 액적은 사진에서 작은 물방울로 관찰되나, 기화된 올리브 오일은 흰색 연기와 같이 관찰된다. 혼합액적의 재반등은 관찰되지 않았다. 물과 올리브 오일 혼합액적은 순수 물의 액적인 경우보다 라이텐프rost 온도가 높아지며, 미세 폭발 현상이 더욱 격렬하게 진행됨을 발견하였다.

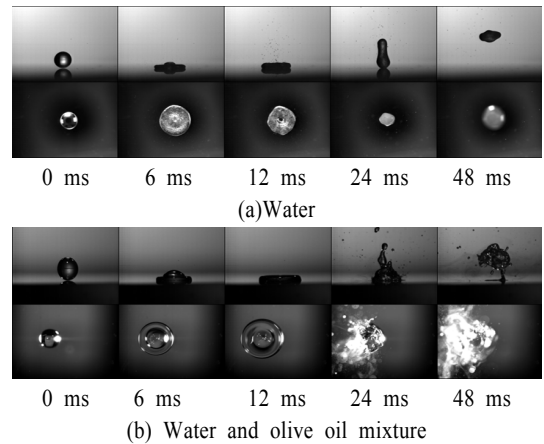


Fig. 6 Water droplet and heterogeneous droplet impinging on 300°C surface

#### 4. 결론

상온부터 300°C의 고온 표면에 충돌하는 단일액적과 혼합액적의 동적 거동에 대하여 초고속 카메라를 이용하여 가시화 실험을 수행하였다. 저온 표면에서 단일액적의 거동 형태는 표면에 부착 되어 진동 운동을 통하여 운동에너지를 소실하는 현상이 관찰되었다. 물의 비등점 이상의 표면 온도에서는 핵비등 현상을 보였고, 라이텐프rost 온도에서는 막비등과 재반등 현상도 보였다. 한편 혼합액적은 표면온도가 200°C 이하에서는 비등현상이 전혀 보이

지 않았다. 250°C 표면에서는 최대피침후 부분적인 비등 현상이 관찰되었고, 300°C 표면에서는 물과 올리브오일이 모두비등하고 미세 폭발이 발생하는 현상을 관찰하였다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) Y. Kikiuchi, T. Hori and I. Michiyoshi, 1984, "Minimum film boiling temperature for cool down of insulated metals in saturated liquid", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 6, pp. 1105~1114
- 2) K. J. Baumeister and F. F. Simon, 1997, "Leidenfrost Temperature-Its Correlation for Liquid Metals, Cryogens, Hydrocabons, and Water". *J. Heat Transfer*, Vol. 95, No. 2 pp. 166~173
- 3) E. Muraa, P. Massolib, C. Jossetc, K. Loubara and J. Bellettrec, 1997, "Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 43, November 2012, Pages 63~70.

1) Y. Kikiuchi, T. Hori and I. Michiyoshi, 1984, "Minimum film boiling temperature for cool down