

고온 벽면과 충돌하는 단일 액적의 거동에 관한 연구

강 보 선* · 이 동 환**

(1998년 11월 30일 접수)

A Study on the Behavior of a Droplet Impacting onto a Heated Surface

Bo-Seon Kang and Dong-Hwan Lee

Key Words : Impinging Droplet(충돌 액적), Impaction Angle(충돌각), Breakup(분열), Vapor Layer(기체층), Wetting(부착), Rebound(되튐)

Abstract

In this paper an experimental study is presented of the problem of dynamic behavior of a water droplet impinging upon a heated surface. The experiments are mainly focused on the effects of impinging angle of a droplet and surface temperature on the impact dynamics of the droplet. It is clarified that the droplet exhibits much different behavior depending on the normal momentum of an impinging droplet before impact. At surface temperature in the nucleate boiling regime, the disintegration of a droplet doesn't occur, whereas the deforming droplet adheres to the surface. The spreading and contraction of the liquid film is repeated a couple of times for the horizontal surface but the expanded droplet just slips without noticeable contraction for the inclined surfaces. In the film boiling regime, the impinging droplet spreads over the surface as a liquid film which is separated from the surface by produced vapor. Depending on the magnitude of the normal momentum of the droplet the disintegration into the several irregular shapes of liquid elements occurs for the horizontal and 30o-inclined surfaces, whereas the impinging droplet for the 60o-inclined surface doesn't break up and tends to recover the original spherical shape.

1. 서 론

액체 분무가 고체 벽면과 충돌하는 현상은 분무 냉각, 분무 도장, 분무 코팅 등, 다양한 분야에서 응용되고 있다. 최근에는, 디젤 엔진의 배출 가스 중 환경오염물의 저감을 위한 연구로써, 분사되는 연료 분무의 벽면 충돌을 이용하는 방식도 연구되고 있다. 이러한 충돌 분무의 특성을 미시적인 관점에서 연구하기 위해서는, 단일 액적이 고체 평면과 충돌할 때, 발생하는 현상에 대한 연구가 필요하다. 즉, 액적은 고체 표면의 온도 및 액적의 속도, 크기에 의해 결정되는 We 수($= \rho D_0 V_0^2 / \sigma$)에 따라서 복잡한 현상을 보이게 된다. Bai와 Gosman⁽¹⁾의 분류 예를 보면, 벽면 온도의 핵비등 영역에서는 We 수 증가에 따라서 부

착(stick), 확장(spread), 분열되며 튀김(splash)현상을 보이게 되고, 막비등 영역에서는 되튐(rebound), 되튐면서 분열(rebound with breakup), 분열(breakup), 분열되며 튀김(splash) 현상이 나타나게 된다. 단일 액적의 고체 표면과의 충돌 거동에 대한 연구는, 내연기관 연소 현상의 수치해석에 있어서, 분사된 연료 분무와 실린더를 비롯한 고체 벽면과의 상호 관계 모델을 정립하는데도 필수적으로 필요할 뿐만 아니라, 분무 냉각, 열 분무 코팅 등의 이해 및 모델링을 위해서도 필수적이기 때문에, 이에 대한 폭넓은 연구가 수행되고 있다.

단일 액적의 고온 벽면과의 충돌 현상에 대한 연구는 액적이 벽면과 수직 방향으로 충돌하는 경우에 대한 연구⁽²⁻⁶⁾가 주로 수행되었고, 경사각을 가지고 충돌하는 경우에 대한 연구는 많지 않은 편이다. 액적이 경사각을 가지고 충돌하게 되면, 수평 방향 속도를 가지고 있기 때문에, 수직으로 충돌하는 경우와는 다른 특성을 나타내게

* 회원, 전남대학교 자동차공학부

** 회원, 전남대학교 대학원 자동차공학부

된다. 이와 관련된 주요 연구 결과는 다음과 같다. Ko와 Chung⁽⁷⁾은 *n*-decane을 사용하여 벽면 온도, 층돌 속도, 층돌각, 액적의 크기 등이 액적의 분열 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 전체 액적 중 절반이 분열되는 경우인 50% 분열 확률에 대하여, 액적의 직경이 증가함에 따라 액적의 속도는 선형적으로 감소하고, 층돌각 80° 주변에서 가장 낮은 층돌 속도를 갖는 최적의 층돌각이 존재함을 제시하였다. Yao와 Cai⁽⁸⁾는 가열된 회전 원판의 회전 속도를 조절함으로써, 층돌하는 액적의 층돌각을 변화시켜 주면서, 층돌 각도와 액적의 We 수에 따라, 액적의 분열과 분열이 발생하지 않는 조건을 파악하였다. 이 방법은, 액적의 층돌각을 자유롭게 조정하기는 쉽지만, 층돌 액적이, 회전 원판 위에 형성된 경계층의 영향을 받게 되는 단점이 있다. Mundo와 Sommerfield⁽⁹⁾도 Yao와 Cai⁽⁸⁾가 사용한 회전 원판 방법을 이용하였으며, 액적의 뒤튀김과 부각 현상의 경계를 파악하기 위하여, $K=Oh Re^{1.25}$ 로 정의되는 K 값을 사용하였으며, 층돌 표면 거칠기의 영향도 고려하였다.

본 연구에서는 고온 벽면의 온도가 액적의 핵비등 영역과 막비등 영역으로 유지되고 있고, 단일 액적이 고온 벽면에 대하여 수직 또는 경사각을 가지고 층돌하면서 나타나는 거동 특성을, 고속촬영카메라를 이용하여, 가시화하였다. 이를 통하여, 고온 벽면의 온도 및 액적의 층돌각의 변화에 따라서 나타나는, 여러 가지 거동 특성들을 관찰, 분석하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

실험 장치의 구성도를 Fig. 1에 도시하였다. 실험 장치는 크게 고온벽, 고온벽 온도 측정 및 제어기, 고속촬영카메라 시스템, 광원, 액적생성부로 구성된다. 고온벽은 직경 110 mm, 높이 60 mm의 원통형이며, 벽면 온도의 균일한 분포를 위하여, 열전도도가 좋은 구리를 이용하여 제작하였고 하부에 100 W 카트리리지 히터 4 개를 삽입, 가열하였으며, 석면 테이프 및 테프론 튜브 등의 단열재를 사용, 양 벽면으로의 열손실을 최대한 방지하였다. 고온 벽면의 온도 측정 및 온도 조절을 위하여, 직경 1.7 mm K형 열전대가, 층돌면에서 하부 2 mm되는 위치부터 3 mm 간격으로 3 개가 삽입되었다. 고온 벽면의 온도 조절

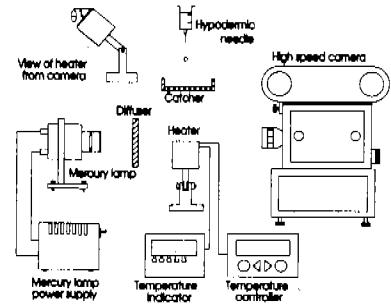


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

은, 입력된 온도와 현재 고온 벽면의 온도와 차이에 비례하여 히터에 공급되는 전류의 양을 조절함으로써 온도를 일정하게 유지하였다.

고속촬영카메라(NAC사, 모델E-10)의 촬영 속도는 초당 2000과 3000 프레임으로 하였으며, 1 kHz로 찍히는 타임 마크를 이용, 실제 프레임 시간 간격을 재확인하였다. 액적 이미지의 확대를 위하여 50 mm 렌즈에 확장 링을 사용하였으며, 촬영 후 실제 길이와 이미지 길이와의 비율을 나타내는 확대 계수를 계산하기 위하여, 지름 0.63 mm인 주사 바늘을, 벽면의 상부에 설치하였다. 사용한 광원은 초고압 수은램프(USHIO사, 모델 HB-101A)이며, 램프 출구에 볼록 렌즈를 장착, 직경 10 cm 내외의 빛을 형성한 후, 반투명 아크릴판을 통과시켜 산란시킴으로써, 이미지의 배경이 균일하게 밝도록 하였다. 액적의 생성은 주사기 끝에 내경이 0.254 mm인 주사 바늘을 장착하여 바늘의 끝 부분에서 중력의 힘에 의하여 액적을 자유 낙하시키는 방법을 사용하였다.

2.2 실험 조건

사용한 액체는 고온 벽면의 오염을 방지하기 위하여 증류수를 사용하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 액적의 직경과 낙하 높이에 따른 액적 층돌 속도를 예측한 후, 액적의 We 수가 60 정도가 되도록, 고온 벽면과 주사 바늘 간의 거리를 조정하였으며, 촬영 후 이미지 분석을 통하여 정확한 액적의 직경, D_0 와 층돌 직전의 속도, V_0 를 구하였다. 액적이 고온 벽면과 충돌 시, 벽면과 이루는 층돌각의 영향을 알아보기 위하여, 고온 벽면의 기울기, θ 를 수평($\theta=0^\circ$), 30° , 60° 기울어진 경우에 대하여 실험을 수행하였다. We_w 은 액적의 벽면과의 수직 속도 성분을 가지고 계산한 We 수이다. 고온 벽면의 온도, T_w

는 물의 핵비등 영역과 막비등 영역에 해당이 되는 125°C와 280°C로 일정하게 유지되었다.

Table 1 Test conditions.

No.	D_o (mm)	V_o (m/s)	We	We_n	θ ($^\circ$)	T_w ($^\circ$ C)
1	2.23	1.33	57	57	0	125
2	2.30	1.36	59	51	30	
3	2.28	1.36	58	29	60	
4	2.33	1.35	58	58	0	
5	2.17	1.39	58	50	30	280
6	2.29	1.34	57	28	60	

3. 결과 및 고찰

3.1 $T_w=125^\circ\text{C}$ 인 경우

Figure 2는 벽면 온도가, 물의 핵비등영역에 해당되는 125°C로 유지되고 있을 때, 고온 벽면의 기울기의 변화에 따른 충돌 후 액적의 거동을 보여 주는 사진들이다. 전체적으로, 핵비등영역에서는 액적이 벽면과 부착한 후, 수평인 경우는 확산과 수축이 반복되고, 경사진 벽면과 충돌하는

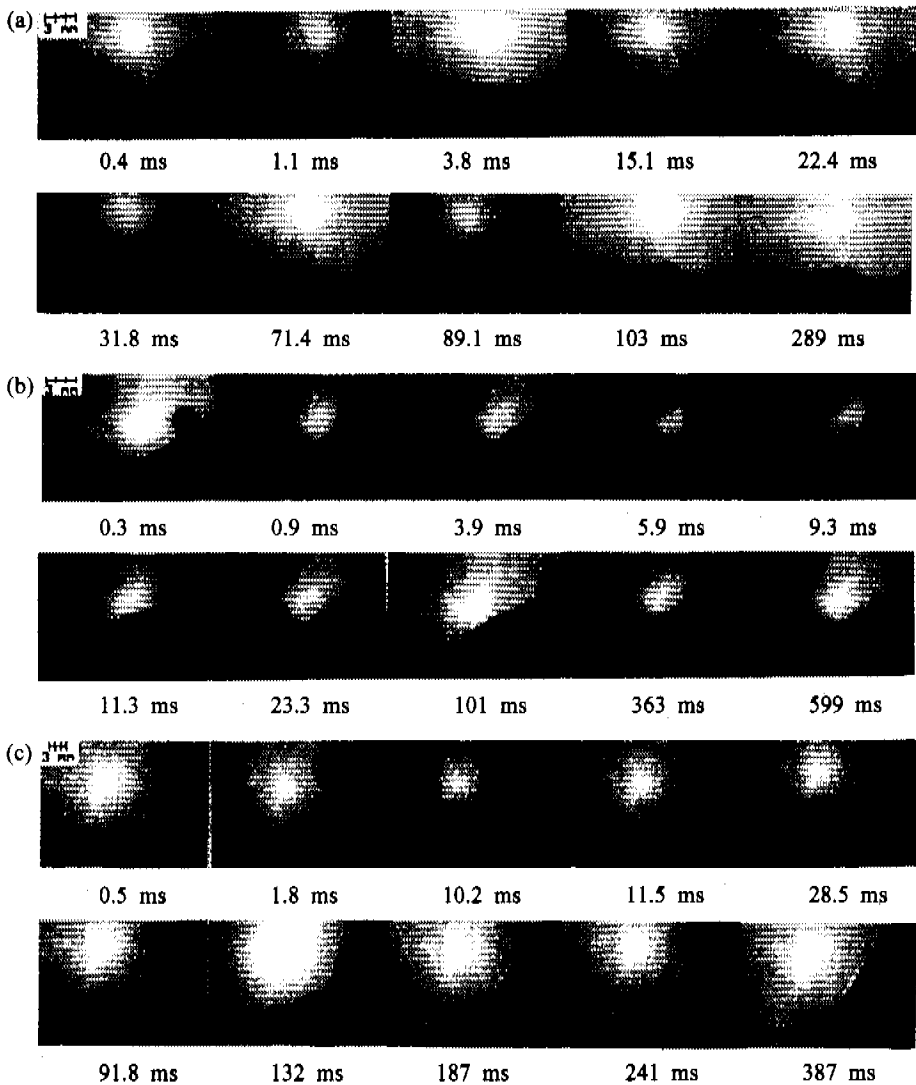


Fig. 2 Photographic time history of a droplet on the heated surface for $T_w=125^\circ\text{C}$; (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=30^\circ$, (c) $\theta=60^\circ$.

경우는 액막이 미끄러지면서, 비등 현상이 시작, 격렬해지고, 모든 액체가 증발되는 과정을 보여 주고 있다. 벽면이 수평인 경우(Fig. 2(a)), 액적이 벽면에 충돌한 직후에는, 중심부는 반구형(0.4 ms)을 이루고, 반구 주위로 얇은 막이 외곽으로 퍼져 나간다. 시간이 지나면서 중심부의 반구의 높이가 점점 낮아지고(1.1 ms), 결국 원판 형태의 액막이 고온 벽면 위에 형성된다. 액막이 외부로 퍼져 나가는 관성력이 벽면의 마찰력과 액막의 표면장력에 의하여 줄어들게 되면서, 액막의 확산 속도는 점점 줄어들게 되고, 액막은 최대 직경에 도달하게 된다(3.8 ms). 이후에는 표면 장력의 영향으로 다시 수축하게 되면서, 액막의 중심부가 다시 종 모양으로 높아진다(15.1 ms). 이처럼 액체의 관성력과 표면 장력, 벽면과의 마찰력에 의해서, 액막이 넓게 퍼진 후 다시 수축되는 현상은 몇 차례 반복되지만, 수축시 액막 중심부 높이는 액막의 퍼짐과 수축이 반복될수록 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 액막의 확산, 수축 과정에서 고온 벽면으로부터, 액막으로의 열전달량도 더욱 증가하게 되고, 액막이 최대 직경에 도달한 후 수축되는 시점을 전후하여, 액막 표면에서의 증발이 시작되고, 이어서 액막 하부 및 가장자리 부근으로부터 비등이 활발해지면서 기포가 생기고 액막이 불안정해지기 시작한다(71.4 ms). 이후 액막의 비등 현상이 액막 전체로 파급되고 비등 현상이 더욱 격렬해지면서, 기포의 폭발로 인하여 수많은 작은 액적들이 액막으로부터 튀어 나가게 된다. 이러한 격렬한 비등 현상이 계속된 후, 443 ms에 고온 벽면 위의 모든 액적은 사라지게 된다.

기울어진 벽면의 경우에는 액체의 관성력, 표면장력, 벽면에서의 마찰력 등의 영향을 받던 수평의 경우와는 달리, 경사진 방향으로의 중력이 추가되어, 벽면 위에 형성된 액막의 미끌림 현상이 관찰된다. 벽면 기울기가 30°인 경우(Fig. 2(b)), 액적의 충돌 후 초기 거동은 벽면이 수평인 경우와 거의 유사하지만(0.9 ms), 이후부터는 경사면을 따라 미끄러지면서 액막의 선단은 유체가 편중되어 점차 두께가 두꺼워지고 반대쪽은 얇아진다(3.9 ms). 액막이 최대 확장한 후, 표면 장력에 의하여 수축 현상이 진행될 때도, 액막의 중심부가 상승했던 수평인 경우와는 다르게, 유체가 많이 몰려 있는 선단 앞부분이 벽면의 직각

방향으로 상승됨을 관찰할 수 있다(9.3 ms). 액막의 선단 부분이 최대 상승한 후, 액막의 미끌림 현상은 액막과 벽면 사이의 마찰력으로 인하여 멈추고, 상승했던 부분이 다시 내려오면서 웬즈 모양의 액막을 형성한다. 이후 다시 수축되었던 수평인 경우와 달리, 액막이 미끄러지는 관성력이 수축하려는 표면 장력보다 크기 때문에 더 이상 수축되지 못하고, 액막 선단부가 볼록한 형태를 갖춘 후(23.3 ms), 수평인 경우와 유사한 비등 현상이 진행, 627 ms에 모든 액적이 사라진다.

기울기가 60°인 경우(Fig. 2(c))에는, 기울기의 영향이 더욱 강하게 나타난다. 경사진 방향으로 치우쳐 생성된 반구가 점차 사라지면서 기울기가 30°인 경우와 마찬가지로, 선단 부분의 두께가 두껍고 반대 방향은 얇은 액막이 형성된다. 표면장력에 의한 수축 단계에서, 기울기가 30°인 경우와는 다르게 액막 선단의 상승 부분이 고온 벽면과 비스듬히 경사진 각도로 상승하고 있음을 관찰할 수 있다(10.2 ms). 또한, 기울기가 30°인 경우에는 액막의 선단이 최대 상승하면서, 더 이상 액막의 미끌림 현상이 나타나지 않았지만, 이 경우에는, 상승한 액막 선단이 다시 하강하여 고온 벽면과 접촉하며, 계속하여 미끌림 현상이 나타나고 있다. 액막의 미끌림은 비등이 시작된 이후에야 멈추고, 액막 전체의 격렬한 비등 현상을 얼마간 지속한 후, 516 ms에 모두 증발하게 된다.

액적이 충돌 후 벽면에 부착(wetting)되어 변형되는 현상(Fig. 2)을 정량적으로 분석하기 위하여, Fig. 3에 정의된 것과 같이, 액적이 벽면과 충돌 후 벽면에 부착되어 확산되어 나가는 액막의 직경과 높이를 측정하였다. 확산하는 액막의 직경 d 는 벽면 위 액막의 최대 직경이고, h 는 벽면에서부터 액막의 최고 높이까지이다.

액적이 충돌 후 벽면에 부착되어 확산되는 액막의 직경 변화에 벽면의 기울기가 미치는 영향을 Fig. 4에서 보여 주고 있다. 액막 직경 변화를

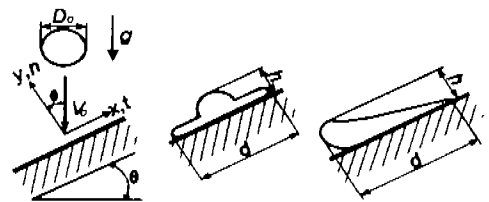


Fig. 3 Definition of spreading diameter and height of expanding liquid film.

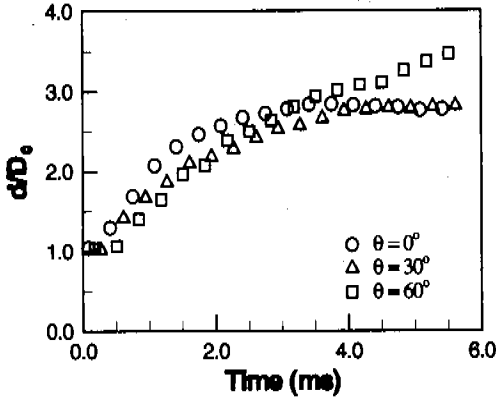


Fig. 4 Time history of the spreading diameter for $T_w=125^\circ\text{C}$ and different inclination angle of the surface.

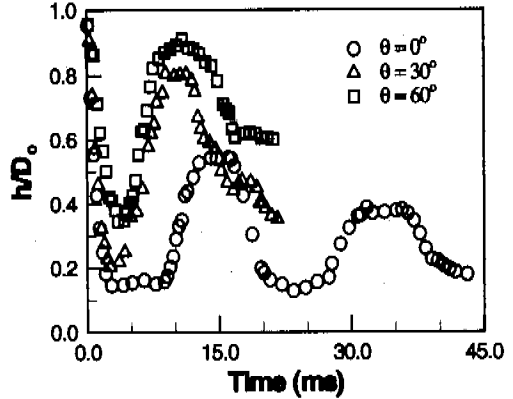


Fig. 5 Time history of the height of liquid film for $T_w=125^\circ\text{C}$ and different inclination angle of the surface.

살펴 보면, 액막이 벽면과 충돌하여, 반구가 생성되고, 반구의 높이가 줄어들면서, 액막이 형성되기까지인 2.0 ms까지는, 액막 직경이 벽면의 경사각이 클수록 수평인 경우보다 작음을 알 수 있다. 이러한 경향은 충돌 초기에는 벽면으로부터의 열전달이 액막 확산에 큰 영향을 미치지 않고, 액적의 충돌 전, 수직 방향으로의 관성력의 크기가, 액막 확산에 영향을 미치고 있음을 의미한다. 즉, 수직 방향의 관성력이 벽면과의 충돌로 인하여 방향이 바뀌고, 크기가 감소된 후 액막의 관성력에 의한 확산을 지배하게 된다. 충돌 액적의 수직 방향 관성력의 힘은 벽면의 기울기가 클수록 감소하게 되므로, 벽면이 수평인 경우가 가장 넓게 액막이 확산되게 되고, 기울기가 30° 인 경우가 가장 적게 액막이 확산된다. 하지만 이 시간 이후부터는 충돌 전 관성력의 영향은 없어지고, 벽면 기울기의 영향이 강해지기 시작하여, 기울기가 30° 인 경우는 4.0 ms 이후부터 수평인 경우와 액막 직경이 거의 같아지고, 기울기가 60° 인 경우는 2.1 ms 이후부터 수평인 경우보다 더 확산됨을 알 수 있다.

액적이 고온 벽면과 충돌 후 생성된 액막의 높이 변화에 벽면의 기울기가 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 액적의 초기 충돌 과정에서는, 액막의 직경 변화와 마찬가지로 액적의 수직 속도 성분의 크기에 따라서 반구 높이의 감소 경향을 예측할 수 있다. 즉, 수직 방향의 관성력이 가장 큰 수평의 경우가 가장 빨리 반구의 높이가 낮아지면서, 가장 낮은 높이를 유지하다가 다시

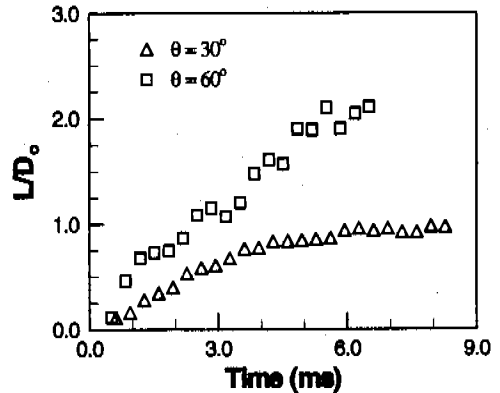


Fig. 6 Effect of inclination angle on the slip length of liquid film for $T_w=125^\circ\text{C}$.

높아지기 시작한 반면, 기울기가 60° 인 경우는 가장 늦게 반구의 높이가 줄어들면서, 가장 높은 위치에서 다시 상승이 시작되고 있다. 넓은 액막 형태로 확산한 후, 표면 장력에 의하여 수축되면서 액막의 높이는 다시 상승되는 데, 벽면이 기울어진 경우는 중력으로 인하여 액막 선단부가 상승하게 되고, 수축시의 관성력에 중력으로 인한 하강 속도가 추가되어, 기울기가 클수록, 2차 상승 높이가 더 커지고 있음을 관찰할 수 있다.

Figure 6은 벽면 기울기로 인하여 액적이 충돌 후 미끄러질 때, 액막의 중심이 액적의 충돌점에서부터 이동한 거리, L 을 보여 주는 그림으로써, 액막에 비동현상이 격렬해져서 액막의 경계와 중심을 판정하기 어려울 때까지 측정된 결과이다. 기울기가 커질수록 액적 또는 확산 액막의 벽면에 수평 방향으로의 관성력이 커지게 되고, 더할

어 중력까지 추가되므로 더 많이 미끌리게 됨을 알 수 있다. 기울기가 30° 인 경우, 충돌 직후 액막은 수평 방향 관성력과 중력의 영향을 받아서 벽면을 따라서 서서히 미끌리다가, 벽면의 마찰력과 열전달에 의해 생성된 기포에 의해 더 이상 미끌리지 않은 반면, 기울기가 60° 인 경우는 관성력과 중력의 증가로 인하여 충돌 직후부터 액막이 짧은 시간에 많은 거리를 이동했음을 알 수 있다.

3.2 $T_w=280^\circ\text{C}$ 인 경우

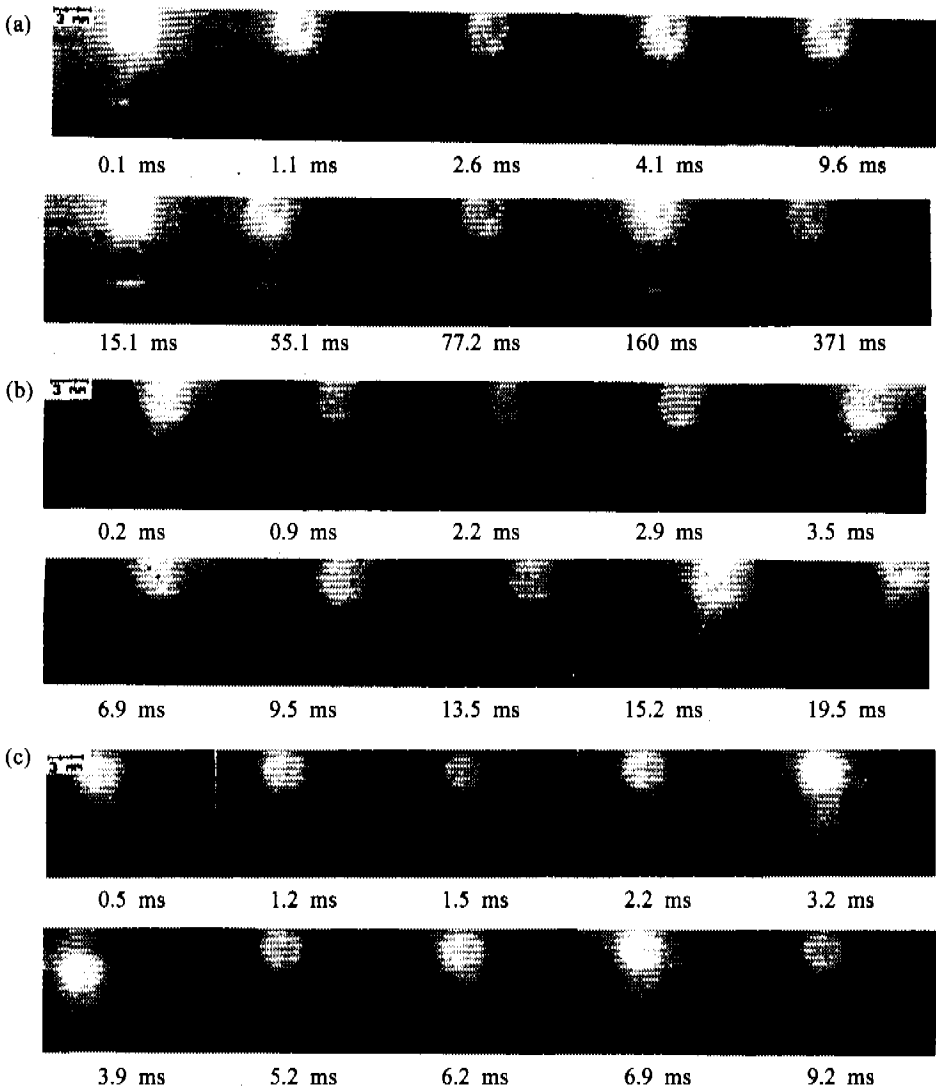


Fig. 7 Photographic time history of a droplet on the heated surface for $T_w=280^\circ\text{C}$; (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=30^\circ$, (c) $\theta=60^\circ$.

Figure 7은 고온 벽면 온도가 물의 막비동 영역에 해당되는 280°C 로 유지되고 있을 때, 벽면의 기울기의 변화에 따른 충돌 후 액적의 거동을 보여 주는 사진들이다. 막비동 영역에서는, 액막이 벽면과 접촉, 변형되었던 해비동 영역과 다르게, 충돌 직후 확산된 액막 하부에 기체층이 형성되어, 액막이 고온 벽면과 분리되고, 액막이 수축되는 과정에서, 액막이 지닌 관성력의 크기에 따라, 수많은 작은 액적들로 분열되기도 하고, 불규칙한 모양의 단일 액적으로 복원되기도 함을 관찰할 수 있다.

수평 벽면인 경우(Fig. 7(a)), 액적은 액비등 영역의 경우처럼 중심부에 반구가 형성되지만, 반구 주변의 액막은 벽면으로부터의 열전달에 의해, 비등 현상이 발생되고, 액체의 증발로 발생한 기체층이 액막을 위로 밀어 올리는 작용을 하여 액막은 외곽에서부터 고온 벽면과 분리됨을 알 수 있다(1.1 ms). 액막이 비등 현상과 함께 최대 확산된 4.1 ms에서는, 기체층에 의해 벽면과 상당히 분리된 액막은 표면 장력에 의한 수축과정을 거치지 못하고, 여러 개로 분열되어 버리고(9.6 ms), 이후 분열된 액적들은 회전하면서, 더 위로 상승하며, 더욱 작은 크기의 액적들로 분열된다(15.1 ms). 분열된 액적들은 분열 당시의 수평, 수직 속도 성분의 크기에 따라, 일부는 외곽으로 사라지기도 하고, 일부는 다시 하강하여 고온 벽면과 충돌, 상승을 반복하기도 하면서 액적 크기가 줄어들게 된다.

기울기가 30°인 경우인 Fig. 7(b)를 보면, 0.9 ms에 이미 액막 하부에 기체층이 형성되고, 비등 현상과 함께 확산되는 액막은 형성되는 기체층으로 인하여, 벽면으로부터 완전히 분리된다(3.5 ms). 수평인 경우와 마찬가지로 불규칙한 모양의 비교적 큰 액적들로 분열된 후(6.9 ms), 시간이 흐르며, 더 작은 액적들로 분열되지만(13.5 ms), 벽면이 수평인 경우와 비교하면, 분열된 액적의 크기도 더 크며, 분열된 액적의 수도 적은 것으로 보아, 분열의 정도가 약화되었음을 알 수 있다. 기울기가 60°인 경우는(Fig. 7(c)), 충돌 초기에는(2.2, 3.9 ms) 이전 두 경우와 유사하지만, 액막이 벽면에서 완전히 분리되고 수축되면서 액막이 분열되지 않고 표면장력에 의해 수축되면서 불규칙한 구형의 형태로 복원되려는 경향을 보여 주고 있다. 이는 충돌 액적의 수직 속도 성분의 감소로 인하여, 관성력이 감소되어, 충돌 직후 액막이 넓게 확산되지 못하고 수축되기 때문으로 생각된다. 또한, 벽면 위에 분리된 액막의 높이도 감소하여 액막의 일부분이 다시 벽면과 접촉한 후(6.9 ms), 벽면 하부로 하강하는 것을 볼 수 있다(9.2 ms).

액적의 충돌 초기에 형성된 반구의 높이가 감소하는 현상에, 벽면 온도와 기울기가 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 수평 벽면의 경우를 보면, 충돌 직후에는($t < 0.7$ ms) 벽면 온도 변화

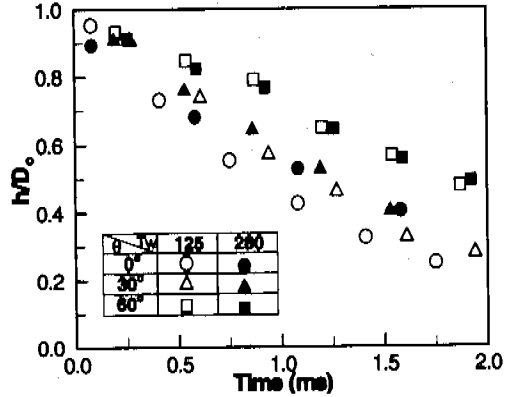


Fig. 8 Time history of the height of liquid film for different temperatures and inclination angle of the surface.

에 따른 높이의 변화가 보이지 않다가, 벽면 온도가 280°C인 경우, 액막 하부에 기체층이 형성되기 시작하면서, 액막이 벽면과 완전히 접촉한 상태인 125°C인 경우보다 액막의 최대 높이가 더 높아지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 벽면 온도가 280°C인 경우, 기체층의 두께가 점점 커질 뿐만 아니라, 수직으로 하강하는 유체에도 완충 작용을 하여, 반구 높이의 감소 속도를 저하시키기 때문이다. 이러한 현상은 기울기가 30°인 경우에도 어느 정도 나타나지만, 기울기가 60°인 경우에는 기울기의 영향으로 인하여 벽면 온도에 따른 차이가 나타나지 않고 있다. 또한, 벽면 온도에 무관하게 기울기가 커질수록, 충돌 액적의 수직 방향 관성력의 감소로 인하여, 높이의 감소 속도가 느리게 나타나고 있다.

Figure 9, 10은 액적이 벽면과 충돌 후 액막 형태로 확산되고, 수축 과정에서 분열이 발생했을 때, 분열된 액적들의 크기와 속도를 측정된 결과를 벽면이 수평인 경우(Fig. 9)와 기울기가 30°(Fig. 10)인 경우에 대하여 나타내었다. $|V_x|$, $|V_y|$, V 는 벽면과 평행, 수직인 방향 속도의 절대값, 속도 크기를 각각 나타내며, 검은 심벌은 각 속도의 평균값을 나타낸다. 액적 이미지는 액막의 액적으로의 분열이 어느 정도 진행되어 더 이상의 분열 현상이 관찰되지 않은 시점의 사진을 선택하였으며, 수평인 경우는 Fig. 7 (a)의 15.1 ms일 때, 기울기가 30°인 경우는 Fig. 7 (b)의 13.5 ms일 때의 액적 이미지들을 사용하였다.

분열된 액적들의 크기는 전반적으로 초기 직경

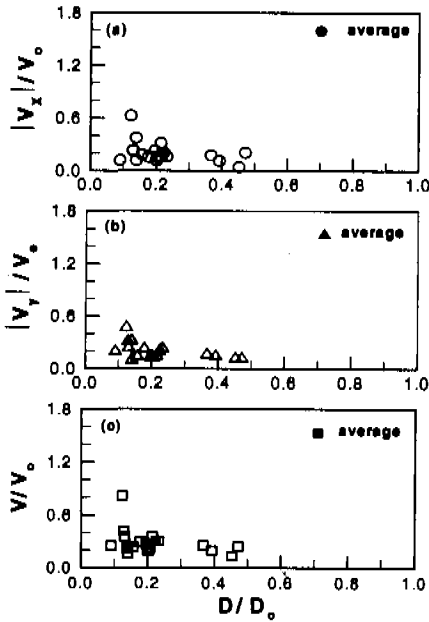


Fig. 9 Distribution of size and velocities of disintegrated droplets for $\theta=0^\circ$, $T_w=280^\circ\text{C}$; (a) horizontal velocities, (b) vertical velocities, (c) droplet speed.

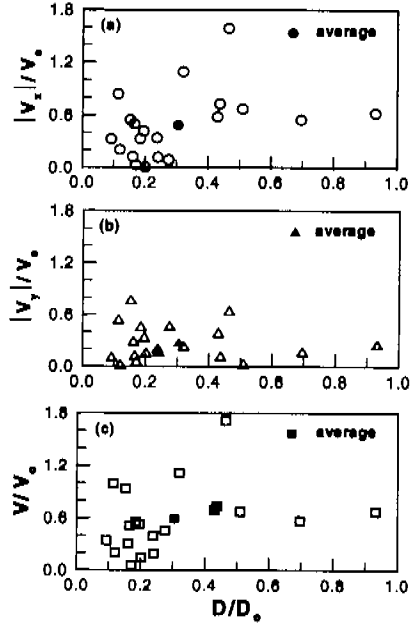


Fig. 10 Distribution of size and velocities of disintegrated droplets for $\theta=30^\circ$, $T_w=280^\circ\text{C}$; (a) horizontal velocities, (b) vertical velocities, (c) droplet speed.

의 0.1~0.9 까지 폭 넓게 분포하고 있으며, 평균 직경은 초기 직경의 0.2~0.3 범위에 있음을 알 수 있다. 수평인 경우는 액적들의 분열이 원활히 이루어져 0.5를 벗어나는 액적들은 생성되지 않았지만, 기울기가 30°인 경우는 분열의 정도가 약화되어 상당히 큰 분열 액적도 존재하고 있다. 분열 액적들의 속도를 살펴보면, 수직 방향 속도는 큰 차이가 없지만, 수평 방향 속도는 수평인 경우에는 대개 초기 속도의 0.4 미만, 평균 속도는 0.21인 반면에, 기울기가 30°인 경우는 최고 속도가 초기 속도의 1.6, 평균 속도도 0.49로 두 배 이상 높게 나타났다. 이는, 벽면과 수직으로 충돌하는 경우는, 액막이 최대로 확산된 시점에서 벽면과 수평 방향 속도가 거의 없어진 상태에서 분열이 이루어지고, 경사지게 충돌하는 경우는, 수 많은 액적들로 분열되기 이전의 액막이 액적의 충돌 전 수평 방향 운동량을 충돌에 의해서 많이 상실하지 않고 있음을 나타낸다.

고온 벽면이 수평인 경우, 확산 액막의 직경 측정 결과와 이전 연구 결과들을 비교한 그림을 Fig. 11에 나타내었다. 본 실험 결과와 비교한 이전 연구 결과와 실험 조건들은 Table 2에 나타내

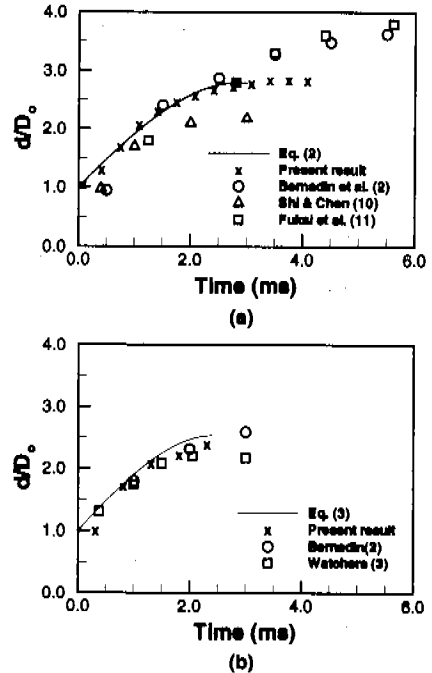


Fig. 11 Comparison of measured spreading diameter with predictions and previous experimental results; (a) $T_w=125^\circ\text{C}$, (b) $T_w=280^\circ\text{C}$.

Table 2 Test conditions of previous researches.

Reference	Surface	T_w (°C)	D_0 (mm)	V_0 (m/s)	We
Bernadin et al. ⁽²⁾	Polished Aluminum	125, 280	3.00	1.21	60
Shi & Chen ⁽¹⁰⁾	Aluminized Glass	Room Temp.	2.48	1.00	34
Fukai et al. ⁽¹¹⁾	Pyrex Glass	Room Temp.	3.72	1.49	58
Watchers Westerling ⁽³⁾	Polished Gold	400	2.30	1.09	38

었다. 확산 액막의 최대 직경에 대한 관계식은 많이 제시되고 있지만, 시간 변화에 따른 확산 액막의 직경에 대한 관계식은 많지 않은 편이며, 본 연구에서는 Shi & Chen⁽¹⁰⁾이 제안한 관계식과 본 실험 결과를 비교하였다.

액적이 충돌 후 고온 벽면과 접촉한 상태에서 확산하는 경우, 즉 핵비등 영역에서의 확산 액막 직경의 시간에 따른 변화에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$d(t) = 1.6 V_0 [t - (10^6 \nu)^{0.1} \frac{4\sigma V_0^{0.6} \rho^{2.95}}{\rho_L D_0^3}] + D_0 \quad (1)$$

또한, 액적이 충돌 후 고온 벽면과 액막 사이에 기체층이 형성되는 막비등 영역에서는,

$$d(t) = 1.6 V_0^{1/2} [t - \frac{6.8\sigma}{\rho_L D_0^3} V_0^{0.25} \rho^{2.95}] + D_0 \quad (2)$$

로 표시된다.

본 연구의 실험 조건을 대입한 관계식과 실험 결과를 비교한 것을 보면, 벽면 온도가 125°C, 280°C인 경우 모두 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

벽면 온도가 125°C인 경우, 다른 실험 결과들과 비교하면, 본 실험에서는 확산 액막의 직경이 초기 직경의 2.7 정도 되어 더 이상의 확산이 진행되지 않았지만, Bernadin⁽²⁾과 Fukai⁽¹¹⁾의 경우는, 3.5~4.0 까지 진행되었다. 이는, 그들의 실험에서 매우 매끄러운 벽면을 사용하여 확산을 방해하는 마찰력의 힘이 약화된 이유로 생각된다. We 수가 34인 Shi & Chen⁽¹⁰⁾의 결과는 예측대로 We 수가 60 주변인 다른 실험 결과보다는 낮은 확산 직경을 보이고 있다. 벽면 온도가 280°C인 경우에는, Bernadin⁽²⁾의 결과는 매끄러운 벽면으로 인해 더

높은 최대 확산 직경을 보이고, Watchers⁽³⁾의 결과는 We 수는 낮지만(38), 높은 벽면 온도(400°C)로 인하여, 본 연구 결과와 비슷한 확산 직경 변화를 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 벽면과 충돌하는 단일 액적의 거동과 비등 현상을 고속촬영카메라를 이용하여 가시화하고 분석하였다. 벽면과 경사각을 가지고 충돌하는 액적의 거동을 관찰하기 위하여, 벽면의 기울기는 수평, 30°, 60°, 온도는 핵비등 영역인 125°C와 막비등 영역인 280°C, 충돌 액적의 We 수는 60 주변으로 유지되었다. 충돌 후 액적의 거동은, 액적의 벽면에 대한 수직 속도 성분외 크기에 따라 매우 다르게 나타났다. 즉, 벽면 기울기가 커질수록 액적의 수직 방향 관성력이 감소하여 충돌 직후 확산되는 액막의 직경이 감소하고 액적 분열의 정도도 감소하였다. 핵비등 영역에서는 모든 경우에 액막이 고온 벽면과 접촉한 상태에서, 벽면 기울기가 수평인 경우는 액막의 확산과 수축이 반복되고, 기울기가 30°, 60°인 경우에는 액막의 미끌림 현상이 관찰되었다. 반면에, 막비등 영역에서는 충돌 후 확산하는 액막 하부에 기체층이 형성되어, 벽면과의 분리된 후, 수축되는 과정에서 기울기가 수평, 30°인 경우에는 수 많은 작은 액적들로 분열되었지만, 60°인 경우는 액막이 분열되지 않고 불규칙한 모양의 구형으로 복원되려는 현상을 나타내었다.

후 기

본 연구는 1997년도 전남대학교 자동차연구소 학술연구(신진연구)비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bai, C. and Gosman, A. D., Development of Methodology for Spray Impingement Simulation, SAE Technical Paper, 950283.
- (2) Bernadin, J. D., Stebbins, C. J., Mudawar, I.,

- 1997, "Mapping of Impact and Heat Transfer Regimes of Water Drops Impinging on a Polished Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 2, pp. 247~267.
- (3) Wachters, L. H. J. and Westerling, N. A. J., 1966, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," *Chemical Eng Science*, Vol. 21, pp. 1047~1056.
- (4) Akao, F., Araki, K., Mori, S., Moriyama, A., 1980, "Deformation Behavior of A Liquid Droplet Impinging onto Hot Metal Surface," *Transaction ISIJ*, Vol. 20, pp. 737~743.
- (5) Chandra, S. and Avedisian, C. T., 1991, "On the Collision of a Droplet with a Solid Surface," *Proc. R. Soc. Lond.*, Vol. 432, pp.13~41.
- (6) Naber, J. D. and Farrell, P. V., 1993, "Hydrodynamics of Droplet Impingement on a Heated Surface," *SAE Technical Paper*, 930919.
- (7) Ko, Y.S. and Chung, S.H., 1996, "An Experiment on the Breakup of Impinging Droplets on a Hot Surface," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, pp. 118~123.
- (8) Yao, S. C. and Cai, K. C., 1985, "The Dynamics and Leidenfrost Temperature of Drops Impacting on a Hot Surface at Small Angles," *ASME 85-WA/HT-39*.
- (9) Mundo, C. Sommerfeld, M. Tropea, C., 1995, "Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 2, pp. 151~173.
- (10) Shi, M. H. and Chen, John. C., 1983, "Behavior of a Liquid Droplet Impinging on a Solid Surface," *ASME 83-WA/HT-104*.
- (11) Fukai, J., Shiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulidakos, D., Megaridis, C. M., Zhao, Z. 1995, "Wetting Effects on the Spreading of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface: Experiment and Modeling," *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 2, pp. 236~247.