

# 고온표면에 부착된 액적의 증발형상 변화

방 창 훈

경북전문대학 소방안전관리과  
(2005. 1. 4. 접수 / 2005. 3. 14. 채택)

## The Evaporation Shape of Deposited Droplet on the Hot Surface

Chang-Hoon Bang

Department of Fire Protection Engineering, Kyungpook College  
(Received January 4, 2005 / Accepted March 14, 2005)

**Abstract :** The objective of the present work is to examine the evaporation shape of deposited droplet on the hot surface. this paper performed the experiments as following conditions: (a) the surface temperature is within the range between 80 °C and 95 °C in the conduction and radiation, (b) droplet diameter is 3.0mm. The results are as follows; while droplet evaporates, droplet's radius is kept changelessly to 70% evaporation time and droplet's shape is kept changelessly after. In case use Constant radius model, about 10% is appearing high than value that time-averaged heat flux applies Inverse heat conduction.

**Key Words :** constant radius model, constant shape factor model, inverse heat conduction, time-averaged heat flux

### 1. 서 론

산업에서 액적 증발 냉각의 응용 분야는 다양하며 공학적으로 활용도가 매우 높은 분야이다. 이러한 증발 냉각의 연구는 일반적으로 철강산업, 핵에너지 산업, 터빈 날개의 냉각, 전자장치 냉각 등의 다양한 분야에서 주로 진행되어 왔다.

특히 소방 분야에서 액적을 이용한 증발 냉각은 고온의 물체를 냉각하는데 있어서 유지비용이 싸고, 효과적으로 다량의 열을 제거할 수 있어서 가연물의 냉각과 화염진압의 목적으로 널리 사용된다. 그러나 물을 소화제로 사용할 경우 2차 수순 피해와 비중이 커서 한번에 수송 가능한 양이 제한된다는 점도 무시할 수 없다. 이러한 이유로 최소한의 물로 표면을 원하는 온도로 냉각시키는 기술이 필요하며, 이를 위하여 액적 증발 특성의 예측과 최적의 냉각 성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 계속 진행되어 왔다<sup>1)</sup>.

액적의 형상은 증발냉각 시 열유속 변화에 가장 큰 영향을 주는 변수이다. 그러나 현재까지 근사모

델로 제시되고 있는 액적 모델은 Zhang<sup>2)</sup>이 제시한 등반경모델(Constant radius model)과 Sadhal<sup>3)</sup>이 제시한 등형상모델(Constant shape factor model)이 있으나 평균 열유속을 정확하게 계산하기에는 다소 오차가 있는 것으로 나타나고 있으며 전도역산을 통해 얻은 열유속 값과 상이한 값을 나타내고 있다. Riu 등<sup>4)</sup>은 금속 표면에 K-acetate의 경우 30%에서 50%까지, NaBr의 경우 10%에서 30%까지를 변화시키며 접촉각 변화를 실험한 결과 첨가물이 증가할수록 접촉각이 일정한 상태에 도달하는 시간이 짧아진다는 것을 보여주었고 Chandra 등<sup>5)</sup>의 결과에서도 계면활성제의 첨가량이 증가할수록 접촉각이 일정한 상태에 도달하는 시간이 짧아진다는 것을 보여주었다. 따라서 액적의 형상이 증발기간 전체를 통해 일정한 직경을 유지하거나 일정한 형상을 유지하는 것으로 가정할 경우 열유속 계산에서 오차를 유발하게 된다.

상기 연구들 이외에 액적의 형상에 대한 다수의 연구가 있었으나 이를 체계적으로 연구한 논문은 매우 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 액적의 증발 동안 액적의 형상변화를 가시화 방법으로 측정하고, 측정된 액적

의 형상과 증발시간을 이용하여 기존의 모델로 계산한 값과 가열체 내부의 온도변화를 측정하고 전도역산으로 계산한 열유속 값을 비교하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 액적 증발 냉각을 위한 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 히터와 전원 공급부, 가열 모듈부, 데이터 처리부, 영상 촬영부, 액적 공급부, 온도 조절부로 구성되어 있으며, 외부 간섭을 막기 위해 모든 실험장치를 항온 항습실에 설치하였다. 전원 공급부는 온도제어기 ① (Fuji, PXW-9 : 220V, 4~20mA)와 제어기에서 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기 ② (YJP-2 series)로 구성되어 있다. 가열 모듈부 ③는 복사 히터 ④의 아래로 50mm 위치에 설치하였다. 하단에는 항온조 ⑤ (Refrig-Bath circulator, RBC-10, JFIO TECH)를 연결하여 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 데이터 처리부는 표면온도를 측정하는 데이터 수집장치 ⑥ (Fluke, NetDaq 2640A)와 컴퓨터로 구성되어 있다.

영상 처리부는 부착된 액적의 영상을 얻기 위한 고속카메라 ⑦ (FASTCAM, Super 10KC)와 조명장치 ⑧, 영상처리용 컴퓨터로 구성되어 있다. 조명장치로는 200W의 할로겐램프를 두 개 사용하였고 조명장치에서 나오는 열이 외기 온도에 영향을 미치지 않도록 별도의 케이스 ⑨를 이용하여 조치하였다.

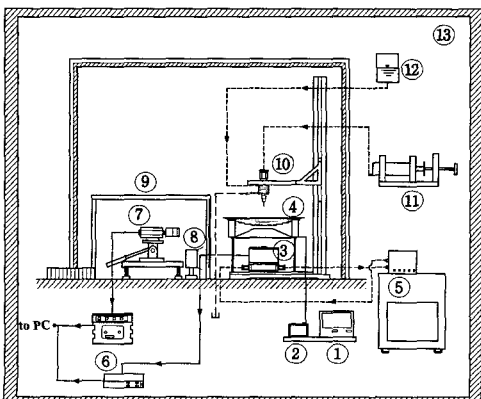
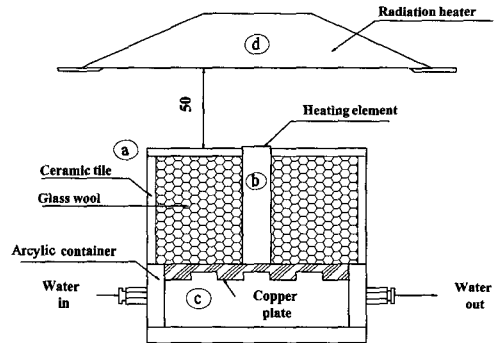
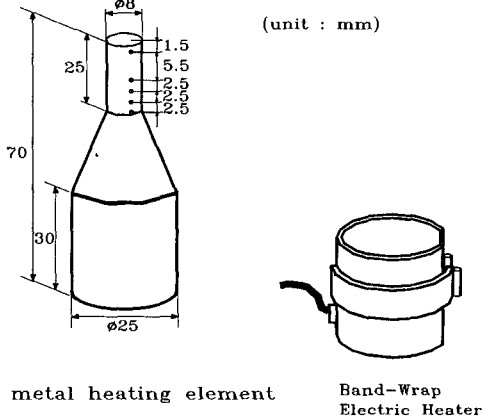


Fig. 1. Schematic diagram of all apparatus of droplet experiment



(a) Radiation Heating Module  
(unit : mm)



(b) Conduction Heating Module  
Fig. 2. Schematic diagrams of Heating Module

액적 공급부는 액적발생기 ⑩와 Syringe pump ⑪로 구성되어 있다. 냉각수 탱크 ⑫를 이용하여 액적의 온도를 일정하게 유지시킨다.

Fig. 2는 본 실험에 사용한 가열모듈의 형상을 나타낸다. (a)는 복사가열시 사용한 복사 가열모듈을 (b) 전도가열시 사용한 전도 가열모듈을 나타낸 그림이다.

복사와 전도조건을 비교하기 위하여 두 실험에서 제어조건을 표면온도로 하여 실험조건을 설정하였다.

### 2.2. 실험 방법 및 실험 범위

액적의 증발냉각에 영향을 미치는 기본적인 인자는 액적의 크기, 가열면의 온도, 가열면의 열물성치, 부착되는 액적의 열물성치 등이다. Table 1에 실험 범위와 조건을 요약하여 나타내었다.

표면에 부착되기 전의 액적의 초기온도는 가열면과 복사히터에서 발생한 열에 의하여 온도가 상승하므로 냉각수를 이용하여 일정하게 유지시킨다. 또한 외기의 온도는 항온 항습실을 조정하여 유지시

Table 1. Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & Initial droplet Temperature	Surrounding : 25.5±0.5℃ Initial droplet : 25.5±0.3℃
Surface temperature	80℃, 95℃
Heater temperature	173℃, 198℃
Heat flux of heater	14.65 W/m <sup>2</sup> , 300.8W/m <sup>2</sup>
Surface material	Stainless steel (SUS 304)
Droplet size	∅3.0mm

킨다. 가열면의 표면 온도는 80℃, 95℃로 하였고 heater의 온도는 173℃, 198℃로 가열하였다.

그때의 복사히터의 열유속은 14.65 W/m<sup>2</sup>, 300.8 W/m<sup>2</sup>이다. 액적의 직경은 3.0mm이다.

액적의 크기는 표면에 떨어질 때를 촬영하여 얻은 화상을 분석하여 직경을 계산하고 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 무게를 측정하였다.

측정 결과 ±3% 이내로 잘 일치하였다. 고속카메라를 이용하여 액적의 총 증발시간과 변화를 관찰하였고, 데이터 획득장치를 이용하여 온도데이터를 얻었다. 실험에 사용한 물은 필터를 통과시켜 내부 불순물을 제거한 증류수를 다시 100℃까지 서서히 가열하면서 교반시켜 내부의 가스를 제거하여 사용하였다.

### 2.3. 전도역산

물체의 표면에서 열적 환경조건이 주어지고, 열전도방정식에 의해 물체내부의 온도를 구하는 것이 통상의 열전도문제(순문제)이지만, 이것과는 반대로 물체내의 온도가 먼저 주어지고, 그에 대응한 표면의 열적 조건을 구하는 문제를 열전도의 역문제라고 한다. 역문제는 전열 실험에 있어서 물체내의 측정온도로부터 표면의 열전달이나 열유속을 구할 때 널리 이용된다.

다음은 표면온도와 표면 열유속 변화를 전도역산을 통해 구한 식이다.

Fig. 3에 나타난 물체 내부의 두 점의 온도 T<sub>1</sub>=f(t), T<sub>2</sub>=g(t)를 열전대로 측정하였다. 점 1에서의 열전도 방정식은 아래와 같다.

$$\left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=h_1} = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]_{x=h_1} \quad (1)$$

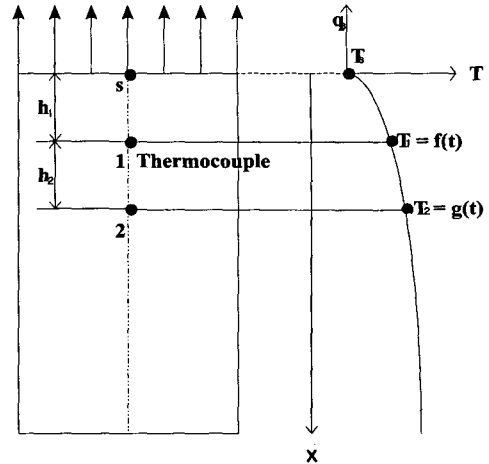


Fig. 3. Transient heat transfer through Semi-infinite Model

식 (1)을 차분표시하면, 아래와 같은 식이 된다.

$$a \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_2 - T_1)}{h_2} - \frac{(T_1 - T_s)}{h_1} \quad (2)$$

여기서 온도변화가 미소하여 열물성치는 전체에 걸쳐 일정하다고 가정한다. 식 (2)로부터 표면온도, T<sub>s</sub>는 아래와 같은 식이 구해진다.

$$T_s = T_1 + \left(\frac{h_1}{h_2}\right)(T_1 - T_2) + (ah_1) \left(\frac{h_1 + h_2}{2}\right) \frac{dT_1}{dt} \quad (3)$$

또, 표면의 열유속 q<sub>s</sub>는 아래와 같은 식이 구해진다.

$$q = \left(\frac{k}{h_2}\right)(T_1 - T_2) + a \left(\frac{2h_1 + h_2}{2}\right) \frac{dT_1}{dt} \quad (4)$$

여기서  $\frac{dT_1}{dt}$ 는 전향차분법으로 하였다. 또한 계산시 수렴안정성을 위해  $\Delta t \geq 0.32^2/a$ 인 조건을 만족하도록 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 가열 고체의 재질이 스테인레스 스틸일 때, 가열 고체 표면의 초기 온도에 따른 액적의 증발 현상을 시간에 따라 촬영한 사진중의 일부이다. 또한 사진 촬영 시 액적 증발 기간동안의 고체의 내부온도를 측정하였다.

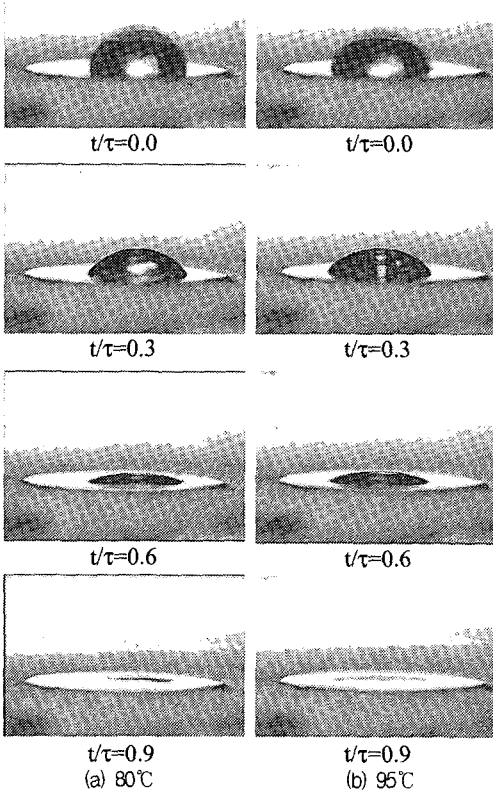


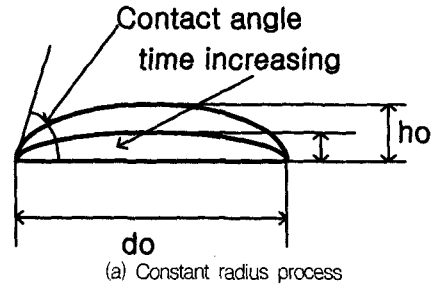
Fig. 4. Evaporation of droplets of water as initial surface temperature (a) 80°C, (b) 95°C on stainless steel

사진은 각각의 가열 고체 표면의 초기 온도에서 액적이 부착되는 순간으로부터 증발이 완료되는 시점까지 4단계로 나누어 나타내었으며, 각 사진의 하부에는 액적의 증발단계를 나타내는 무차원 시간을 표시하였다.

초기 표면온도와 관계없이 전체 증발시간 동안 액적은  $t/\tau=0.6$ 까지는 액적의 직경을 거의 일정하게 유지하고 있다가  $t/\tau=0.9$ 에서는 액적의 직경이 감소한 것으로 나타나고 있다. 따라서 기존의 등반경 모델이나 등형상모델이 실제 증발현상을 제대로 설명할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 등반경 모델은 열유속 값 계산 시 근사적인 모델이 될 수 있고 등형상 모델은 수치해석 시 적용하기 용이하다는 장점도 있다.

Fig. 5는 액적의 증발 과정을 나타낸 그림이다. 액적 증발 과정은 기본적으로 두 가지 현상으로 구분 지을 수 있다. 첫 번째 현상은 액적의 증발 과정 동안에 습윤 면적은 일정하게 유지되며, 접촉각이

Zhang 등<sup>2)</sup>



Sadhal 등<sup>3)</sup>

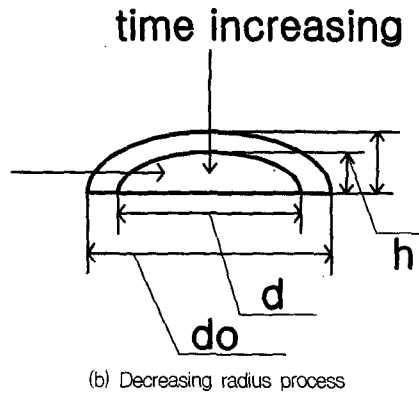


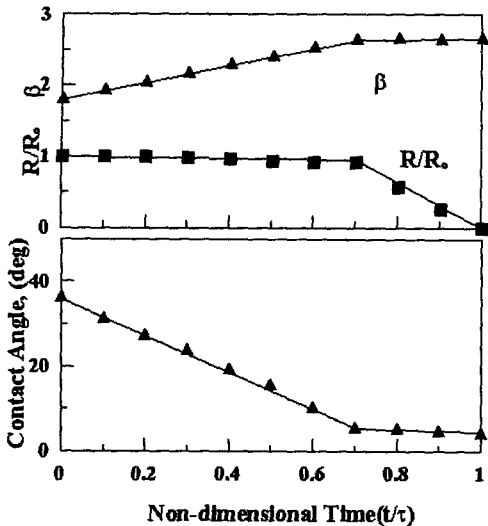
Fig. 5. Reported evaporation shape model of deposited droplet on the hot surface

서서히 감소하는 경우, 즉 그림 (a)와 같으며, 두 번째 현상은 접촉각이 일정하게 유지되며, 접촉면적이 감소하는 경우, 즉 그림 (b)와 같은 경우이다.

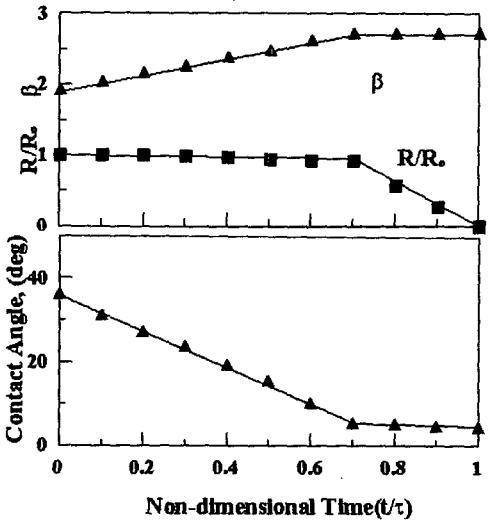
기존의 연구자 중 Zhang<sup>2)</sup> 등은 그림 (a)와 같은 상태를 제시하였으며, Sadhal<sup>3)</sup> 등은 그림 (b)와 같은 상태를 제시하였다.

본 논문에서 형상 계수( $\beta$ )는 가열체 표면에 떨어진 후 증발 과정 동안 액적의 습윤 면적 반지름과 가열체 표면 위의 액적과 동일한 체적을 갖는 구형 액적을 가정해서 그 구형 액적의 반지름의 비로 정의하였고, 무차원 반지름( $R/R_0$ )은 증발이 일어나는 동안에 습윤 면적과 최초 습윤 면적의 비로 나타내었다. 그리고 접촉각(Contact angle)은 가열체 표면과 가열체에 부착된 액적 표면에 대한 접선과의 각으로 정의하였다.

Fig. 6는 가열조건이 전도일 때, 형상 계수( $\beta$ ), 무차원 반지름( $R/R_0$ ), 및 접촉각(Contact angle)을 무차원 시간에 따라 나타낸 그림이다.



(a)  $T_{s,o} = 80^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{s,o} = 95^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Shape Factor( $\beta$ ), Normalized radius ( $R/R_0$ ), and contact angle(deg) versus Non-dimensional time( $t/\tau$ ) at conduction heating condition

액적 형상 계수( $\beta$ )는 액적이 가열체 표면에 부착된 후 증발이 일어나는 과정동안 무차원 증발 시간이 0.7부근까지 증가하다가 이후 일정하게 유지된다. 액적의 무차원 반지름( $R/R_0$ )은 무차원 증발 시간 0.7부근까지 거의 일정하게 유지되다가 감소하고, 접촉각은 무차원 증발 시간 0.7부근까지 감소되다가 일정한 값을 유지한다.

이는 무차원 증발 시간 0.7부근까지가 액적의 증발 초기상태로서 액적이 가열체 표면에 부착된 직후 습윤 면적은 줄어들지 않고 액적의 높이가 접촉각만

줄어드는 Fig. 5의 그림 (a)와 같은 상태이고, 무차원 증발 시간 0.7부근이후부터가 액적의 증발 후기상태로서 액적 가장자리의 표면 장력이 깨어지면서 서서히 습윤 면적이 후퇴하고 접촉각이 일정하게 유지되는 Fig. 5의 그림 (b)와 같은 상태이다. 이는 고속카메라로 촬영된 영상 자료에서도 확인되었다.

Fig. 7는 전도 가열 조건과 복사 가열 조건에서 액적 직경이 3.0mm일 때, 무차원 시간에 대한 액적의 형상 계수( $\beta$ )를, 표면온도에 따라 각각 나타낸 그림이다.

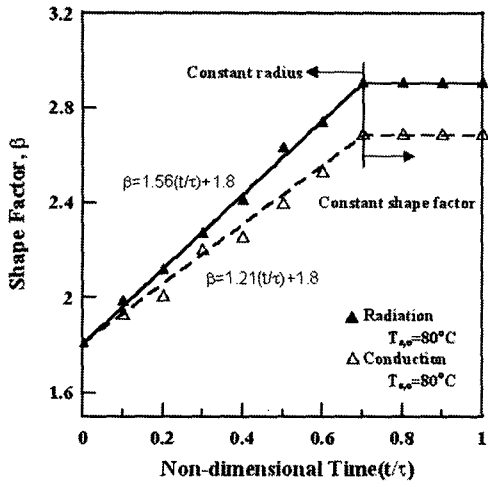
그림 (a)는 가열체 표면 온도가 80°C일 때 액적의 형상 계수는 전도 및 복사조건에 상관없이 무차원 시간이 0.7이 될 때까지 계속 증가하다가 0.7이후로 일정한 값을 유지하고 있다.

그러나 액적이 가열체 표면에 떨어진 후 증발이 끝날 때까지 복사 가열 조건일 때가 전도 가열 조건일 때보다 0.1에서 0.3까지 높게 나타났다. 이는 액적의 아래에서 전달되는 전도 가열 조건일 때와는 달리, 복사 가열 조건일 때는 액적의 외부에서 액적으로 직접적으로 전달되는 열을 흡수하고, 액적의 표면으로 흡수된 열은 액적의 온도를 상승시켜서 액적의 표면 장력을 감소시킨다. 액적의 표면 장력 감소는 가열체 표면에 부착된 액적의 높이를 감소시키기 때문에 액적의 형상계수는 복사 가열 조건일 때가 전도가열 조건일 때보다 조금 크다.

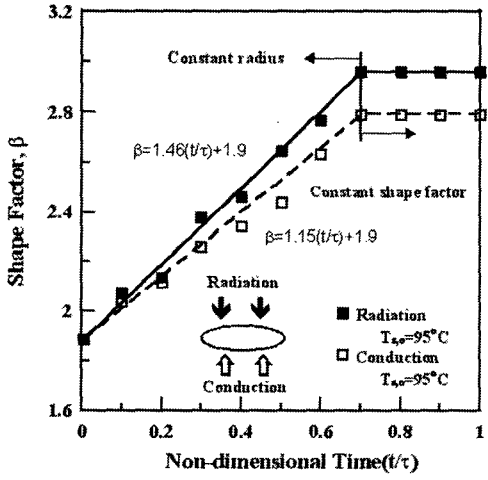
여기서 액적의 형상 계수가 크다는 것은 액적 형상의 높이가 낮아 액적의 형상이 더 얇아지는 것을 의미한다. 액적의 형상이 더욱더 얇아지면, 가열체 표면으로부터 액적으로의 더욱더 큰 전도 열유속이 증가한다. 열유속의 증가는 가열조건에 따른 액적의 증발시간을 변화시킨다. 이로 인하여 액적의 증발시간은 복사 가열 조건일 때가 전도 가열 조건일 때보다 짧아지는 원인되는 것이다.

그림 (b)는 가열체 표면 온도가 95°C일 때이다. 그림 (a)의 성향과 같으나, 가열체의 표면 온도가 80°C일 때보다 액적의 형상 계수가 0.1에서 0.2정도 높게 나타난다. 이는 가열체의 표면 온도가 95°C일 때가 가열체의 표면 온도 80°C일 때보다 열유속이 높아 증발량이 커져서 액적 부피의 감소로 인하여 액적의 형상계수가 약간 높게 나타났다.

전체적으로 표면온도 및 가열조건에 관계없이 액적의 증발형태는 무차원 온도가 0.7까지는 표면에 부착된 액적의 직경이 일정하게 유지되다 0.7 이상에서는 액적의 직경이 급격히 감소하면서 동일한 형상계



(a)  $T_{s,o} = 80^\circ\text{C}$



(b)  $T_{s,o} = 95^\circ\text{C}$

Fig. 7. Shape Factor versus Non-dimensional time

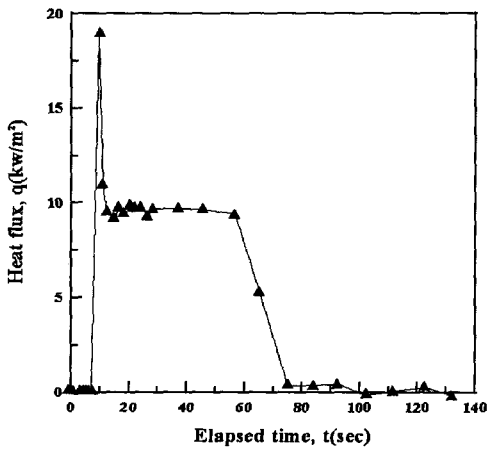


Fig. 8. Heat flux with elapsed time  $d_0 = 3.0\text{mm}$

수를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 표면온도에서 무차원 시간에 따른 액적의 형상변화는 복사 가열조건에서 크게 변화하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 액적 직경이 3.0mm일 때, 경과 시간에 따른 액적과 가열면의 경계면에서 열유속 변화를 나타낸 그림이다. 가열체의 표면 온도는 물의 비등점보다 낮은  $80^\circ\text{C}$ 이고 액적이 부착되기 직전의 초기 정상상태의 열유속을 0으로 하였다.

여기서 얻은 표면 열유속은 전도역산을 통하여 얻은 값이다.

액적이 부착된 직후 가열체의 열유속은 증가하여 최대 값을 나타낸 후 다시 감소하여 일정한 값을 유지하며, 다시 액적의 증발이 끝난 후 열유속은 다시 초기 열유속을 나타내고 있다. 초기에 급격한 열유속의 증가는 서로 다른 온도의 물체가 접촉함에 따른 비정상 열전도에 의한 것이고, 증발이 일어나면서 열유속이 일정하게 유지되어 정상적인 열전달이 발생하는 구간으로 사료되며, 다시 열유속이 급속히 감소하는 것은 액적의 직경이 급격히 감소하여 증발이 거의 끝난 상태를 나타낸다.

시간에 따른 액적의 증발열유속으로부터 얻은 평균열유속과 식 (1)을 이용하여 계산한 시간평균열유속은 다소 값에서 차이가 나타나고 있다. 여기서 식 (1)은 등반경 모델을 이용한 계산 값이다.

$$q = (2d_o \rho_l \lambda') / (3t_i) \quad (5)$$

여기서  $\lambda' = \lambda + c_p(T_d - T_\infty)$ 는 유효 증발잠열이고,  $T_d$ 는 액적의 시간 평균 온도를 나타낸다.

전도역산을 이용하여 얻은 열유속의 평균 값은 약  $11.2\text{kW/m}^2$ 로 나타나며 식 (5)를 이용하여 계산한 값은  $12.5\text{kW/m}^2$ 로 나타나  $1.3\text{kW/m}^2$ 의 오차가 나타나고 있다. 따라서 액적의 증발동안 액적의 형상에 대한 모델은 전체 증발시간의 70%동안은 등반경 모델을 적용하고 나머지 30%는 등형상 모델을 적용하여 계산하여야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 액적직경이 3.0mm이고 가열면의 재질이 스테인레스 스틸일 때, 순수물 액적이 가열면 위에 부착되었을 때 액적의 형상에 대한 모델이 액적의 증발에 따른 형상변화에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 액적이 증발하는 동안 액적의 형상은 증발기간의 70%까지는 반경이 일정하게 유지되며 이후에는 액적의 형상이 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

2) 가열면의 가열조건이 복사가열 조건일 때가 전도 가열조건 보다 더욱 급격한 형상변화를 나타내며 일정한 형상에 도달했을 때 형상계수도 높게 나타나고 있다.

3) 등반경 모델을 적용한 근사식을 사용할 경우 전도역산을 통해 얻은 평균 열유속보다 약 10% 높게 나타나고 있다.

### 기호설명

- $C_p$  : 비열 [J/kg°C]
- $d_0$  : 액적의 초기직경 [mm]
- $q$  : 시간평균 열유속 [kW/m<sup>2</sup>]
- $T$  : 온도 [°C]
- $t$  : 시간 [s]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 하첨자

- l : 액적
- t : 총 증발기간
- ∞ : 외기조건

### 참고문헌

- 1) Dawson, H., Di Marzo, M., "An Experimental Study of Multiple Droplet Evaporative Cooling", NIST-GCR 93-624, 1993.
- 2) Zhang, N., Yang, W. J., "Natural Convection in Evaporating Minute Drops", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 656~662, 1982.
- 3) Sadhal, S. S., Plesset, M. S., "Effect of Solid Properties and Contact Angle in Dropwise Condensation and Evaporation", J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 48~54, 1979.
- 4) Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, J. S., Evaporation Cooling of Single Droplet on a Heated Solid Surface, KSME(B), Vol. 25, No. 6, pp. 845~852, 2001.
- 5) Chandra, S., DiMarzo, M., Qiao, Y. M., Tartarini, P., "Effect of solid-liquid Contact Angle on Droplet Evaporation", NIST-GCR-96-687, 1995.