

< 논문 >

고온 표면에 부착된 증발 액적에 의한 열유속 변화 추정

신운철* · 배신철*

(2007년 4월 18일 접수, 2007년 7월 27일 심사완료)

The Evaluation of Heat Flux by Evaporating Droplet on the Hot Surface

Woon-Chul Shin and Sin-Chul Bae

Key Words: Evaporation(증발), Green's Function(그린함수), Inverse Heat Transfer(전도역산)

Abstract

The objective of the present work is to evaluate the evaporation heat flux of deposited droplet on the hot surface by using of inverse heat transfer technique. On the basis of measured temperature, a integral form solution is determined for the transient temperatures beyond the two positions by using Green's function technique. This method first approximates the temperature data with a half polynomial series of time. we compared this result with constant radius model in single phase regime, nucleate boiling regime, film boiling regime respectively. this paper performed the experiments as following conditions: (a)the surface temperature is within the range between 80°C and 160°C in the conduction, (b) droplet diameter are 2.4 and 3.0mm. (c) surface roughness is 0.18 μ m

기호설명

- a : Eq. (4)의 변수
- c_p : 정압비열 [J/kg K]
- F : 정상상태 온도분포
- L : 전체길이 [m]
- q : 열유속 [W/m²]
- T : 온도 [°C]
- t : 시간[s]
- α : 열확산계수 [m²/s]
- κ : 열전도계수 [W/m°C]
- λ : 증발잠열 [J/kg]

- I : 시작시점
- o : 초기값, 정상상태
- r : 복사
- t : 전체 증발시간
- s : 표면
- ∞ : 주위

1. 서론

액적 증발 냉각에 대한 연구분야는 아주 다양하며 공학적으로 활용도가 매우 높은 분야이다. 이러한 증발냉각의 연구는 일반적으로 철강산업, 핵에너지 산업, 내부연소엔진의 증발 냉각, 터빈 날개의 냉각, 전자장치 냉각 등의 다양한 분야에서 연구되어 왔다.

철강분야에서는 금속의 담금질 열처리로 사용되어져 왔으며, 핵에너지 산업에서는 액체 금속 열전달 시스템에서 사용되어져 왔다. 분무냉각과 관계되어진 장치로서는 증기 발생 보일러 튜브와 터빈 날개 냉각에서 사용되어져 왔다. 또한 우주 왕복선 주위의 제어 시스템에서 이 방법이 사용

하첨자

- d : 액적
- ev : 증발
- f : 종결시점

† 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과
 E-mail : s88119@kosha.net
 TEL : (032)510-0786 FAX : (032)518-0867
 * 단국대학교 기계공학과

되어진다.⁽¹⁻⁶⁾

그러나 무엇보다 액적 증발 냉각은 소방 분야에서 화재의 냉각과 진압을 목적으로 비중 있게 다루어지고 있다. 그 중에서도 물을 이용한 증발 냉각이 중요한 과제이다. 물을 이용한 증발 냉각은 고온의 물체를 냉각하는데 있어서 유지비용이 저렴하고 효과적으로 다량의 열을 제거할 수 있으며, 변질의 우려가 없고, 인체에 무해하여 소화제로 널리 사용된다. 그러나 물을 냉각제로 사용할 경우 금속체의 부식 유발, 물의 전기 전도성에 의한 누전 및 합선과 같은 피해와 화재 발생시 화재를 막기 위하여 사용한 물에 의하여 생기는 2차 피해가 있으며, 또한 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 냉각성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 계속 진행되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾

액적 증발에 영향을 주는 인자로는 가열 고체의 온도범위나 표면조도, 액적 크기, 충돌 속도, 액체의 종류 등의 다양한 변수가 존재하며, 지금까지 많은 연구자들에 의하여 각각의 경우에 대한 액체 내에서의 열적 거동과 열전달 현상 그리고 천이기간의 증발 현상 등을 연구하였다. 그러나 이러한 대부분의 연구는 열전달에 따른 온도 변화, 액적의 형상, 첨가제의 영향 등에 한정되어 있고 화재연구 특성상 화염이 가해지는 면에서 직접 온도를 측정할 수 없으므로 간접 측정값을 통한 표면온도 및 열유속을 추정하여야 하나 이에 대한 연구는 미비한 상황이며 가열면의 조건이 복잡하여 일반적인 전도 역산 방식으로 해결하기 매우 힘든 실정이다.

따라서 복잡한 형태로 열이 유입되고 있는 상황 하에서 내부의 온도변화를 측정하여 표면의 열유속과 온도를 역산하는 것에 대한 체계적인 연구가 더욱 필요하다.

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

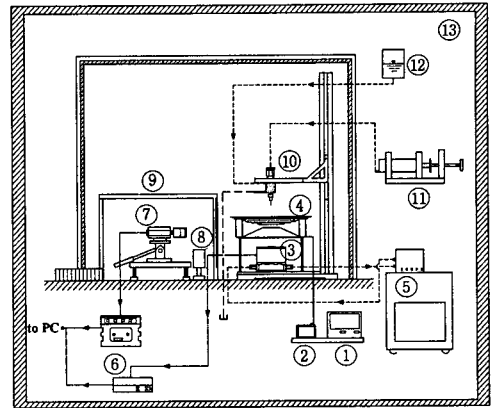


Fig. 1 Schematic diagram of all apparatus of droplet experiment

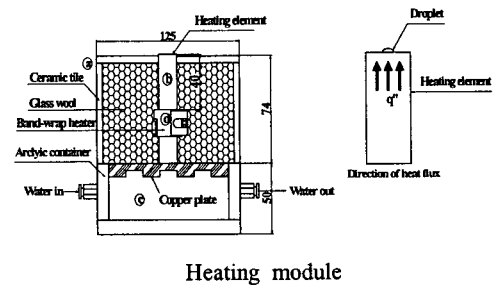


Fig. 2 Schematic diagrams of test apparatus

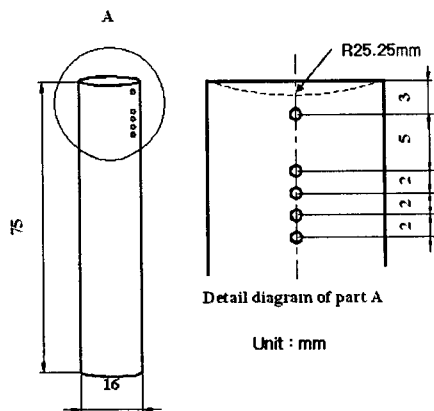


Fig. 3 Schematic diagrams of heating element

영상 촬영부, 액적 공급부, 온도 조절부로 구성되어 있으며, 외부 간섭을 막기 위해 모든 실험장치를 향온 항습실에 설치하였다.

전원 공급부는 온도제어기 (Fuji, PXW-9 : 220V 구동, 4~20mA 출력)와 제어기에서 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기 (YJP-2

series)로 구성되어 있다. 실험조건은 히터 안쪽에 부착된 열전대의 온도를 제어기에서 측정하여 설정된 온도까지 전원 공급기를 작동시켰다가 설정 온도에 다다르면 전원을 차단하고 온도변화가 발생하면 다시 가열하는 방식으로 0.5℃ 오차범위에서 일정한 온도를 유지하도록 하였다.

액적 공급부는 액적을 일정하게 토출해 주도록 제작된 액적발생기와 일정한 양의 물을 공급해주는 소유량 펌프(Syringe pump)로 구성되어 있다. 액적 발생기의 하단에는 액적의 크기를 일정하게 하기 위하여 니들(MN22G-15, MN28G-15)이 부착되어 있다.

Fig. 2는 가열 모듈의 자세한 형상을 나타낸 그림이다.

가열 모듈은 케이스 ㉔와 케이스 내부의 가열체 ㉕, 등은 모듈 ㉖, 밴드 히터 ㉗로 구성되어 있다. 케이스 ㉔는 세라믹 타일을 사용하여 외부치수 125 mm × 125 mm × 40 mm로 가공하였으며 내부에는 유리섬유(grass wool)를 채웠다. 가열체 ㉕는 하부를 등은으로 유지하기 위하여 등은 모듈 ㉖로 항온조(RBC-10, JEIO TECH)를 연결하였다. 히터 ㉗는 밴드히터(OMEGA 주문형)를 가열체 표면의 선단에서 40 mm 아래에 부착하였다. 이와 같이 밴드히터를 중심부에 부착한 것은 열전대로 측정되는 부위의 온도분포가 반경방향으로 일정하게 나타나고 가열블록의 온도가 일정하게 유지되도록 선정한 것이다. 따라서 열전대가 삽입된 부위의 온도분포를 1차원적으로 해석이 가능하다.

Fig. 3은 가열체에 대한 그림으로서 전체적인 형상과 열전대 위치의 세부도를 함께 나타내었다. 가열체는 일반적으로 많이 쓰이는 알루미늄 합금(2024)을 사용하였고, 직경 16 mm, 길이 75 mm의 원기둥형으로 가공하였으며 액적의 막비등으로 인하여 액적이 외부로 튀겨져 나가는 것을 방지하기 위해 표면을 반경 25.25mm의 곡면으로 가공하였다. 온도를 측정하기 위해 k형 열전대를 표면중심에서 수직하방으로 1.7 mm, 11 mm에 두개를 심었다.

또한 액적의 형상변화를 가시적으로 측정하기 위하여 고속카메라(FASTCAM, Super 10KC)를 설치하여 시간에 따른 변화와 증발종료 시간을 측정하였다.

Table 1 Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & Initial droplet Temperature	Surrounding : 25.5 ± 0.5 °C Initial droplet : 25.5 ± 0.3 °C
Surface temperature (calculated)	80 °C ~ 160 °C
Surface material	Aluminum (2024)
Droplet size (gage)	Φ 3.0 mm (22 gauge) Φ 2.4 mm (28 gauge)
Surface roughness	Ra = 0.16 μm

2.2 실험방법 및 범위

액적의 증발냉각에 영향을 미치는 기본적인 인자는 액적의 크기, 가열면의 온도, 가열면의 열물성치, 부착되는 액적의 열물성치 등이다.

Table 1에 실험범위와 조건을 요약하여 나타내었다.

표면에 부착되기 전의 액적의 초기온도는 냉각수를 이용하여 온도를 일정하게 유지시킨다. 또한 외기의 온도는 항온 항습실을 일정한 온도(25.5℃)로 작동시켜 유지시킨다. 계산된 표면 온도는 80℃ ~ 160.2℃ 까지 이고, 액적의 직경은 3.0 mm (22 gauge), 2.4 mm (28 gauge), 표면 조도(Ra)는 0.16 μm이다.

액적의 크기는 표면에 떨어질 때를 촬영하여 얻은 화상을 동일 거리에 직경이 일정한 볼베어링(Φ=3mm)을 놓고 촬영한 영상을 비교하여 직경을 계산하고 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 전자저울로 무게를 측정하였다. 측정 결과 ±3% 이내로 잘 일치하였다. 고속카메라를 이용하여 액적의 총 증발시간과 변화를 관찰하였고, 데이터 획득장치(Fluke, NetDaq 2640A)를 이용하여 온도데이터를 얻었다. 실험에 사용한 물은 증류수를 다시 100℃까지 서서히 가열하면서 교반시켜 내부의 가스를 제거하여 사용하였다.

2.3 이론적 해석

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 표면온도나 열유속

을 구할 때 널리 이용된다.

또한 일정하지 않은 초기조건 및 경계조건을 가지는 비균일 비정상 열전도 문제에 전도역산법을 적용할 경우 일반적인 방법보다 그린함수를 이용한 방법이 보다 직접적으로 해석해를 구할 수 있어 매우 편리하다.

식 (1)은 초기조건 및 경계조건이 일정하지 않은 경우에 대한 열전도 방정식을 보여준다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad 0 < x < L, t > 0 \quad (1)$$

$$T = T_o f(t) \quad x=0, t > 0$$

$$T = T_L \quad x=L, t > 0$$

$$T = F(x) \quad t=0, 0 \leq x \leq L$$

여기서 실제 발생하는 열전달 현상은 2차원 비정상 열전도 현상이지만 실험된 범위에서 작은 액적의 직경이 2.4mm이고 액적이 부착된 후 액적이 퍼짐에 따라 부착된 액적의 형상은 Zhang⁽⁸⁾ 등이나 Sadhal⁽⁹⁾ 등의 연구 결과에서 나타난 것처럼 반원형태나 원반형태가 되어 직경이 최소 4.5mm가 된다. 또한 Fig. 1에서처럼 가열블록은 측면이 단열되어 있고 표면에서 액적이 부착되지 않은 면은 대류에 의해 외기로 열전달이 발생한다. 그러나 정상상태에서 대류열량을 미리 계산하고 액적이 부착된 후 변화량만을 고려하므로 열유속의 변화는 순수하게 액적에 의해 발생한 것으로 가정할 수 있다. 또한 가열체의 재질이 알루미늄으로 대류나 증발에 의해 발생하는 열저항보다 상대적으로 미소하여 1차원 비정상 열전도 방정식을 사용하였다.

초기조건, 경계조건 및 그린함수를 이용하여 식 (1)에 대한 해석해를 구하면

$$\begin{aligned} T(x,t) = & \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha\beta^2 t} \sin\beta x \int_{x=0}^L \sin\beta x F(x) dx \\ & + \alpha \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha\beta^2 t} \beta \sin\beta x T_o \int_{\tau}^t e^{\alpha\beta^2 \tau} f(\tau) d\tau \\ & - \alpha \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-\alpha\beta^2 t} \beta \sin\beta x \int_{\tau}^t e^{\alpha\beta^2 \tau} T_L d\tau \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 $\beta = \frac{m\pi}{L}$, $m = 1, 2, 3, \dots$ 이고 T_L 는 가열면 하부의 히터가 부착된 곳의 설정 온도를 나타낸다. 또한 실험조건으로부터 액적이 가열면에 부착되기 전의 상태에 대한 정상상태 전도 방정식으로부터 식 (3)과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$F(x) = \frac{q_o}{k} (L-x) + T_L \quad (3)$$

여기서 q_o 는 정상상태 전도방정식의 데이터로부터 계산할 수 있다. 또한 미지의 함수에 대한 추정을 위해 함수 $f(t)$ 를 식 (4)와 같이 추정하였다.

$$f(t) = \sum_{n=0}^N a_n t^{-\frac{n}{2}} \quad (4)$$

식 (4)와 같이 함수를 추정한 것은 일차원 열전도 방정식의 일반적인 해가 $T = f(x/\sqrt{\alpha t})$ 로 나타나기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 여기서 시간에 대한 함수를 임의의 다항식으로 추정한 것으로 본 실험에서는 함수의 값이 N=8 이후로 거의 변동이 없어 N값을 8로 하였다.

식 (2)에서 $x=0$ 을 대입하여 표면온도를 구하면

$$T_s = \alpha \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha\beta^2 t} \beta \sin\beta x \int_{\tau=0}^t e^{\alpha\beta^2 \tau} f(\tau) d\tau \quad (5)$$

식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하고 각각 1과 2 지점에서 열전대로부터 얻은 데이터를 $T(x,t)$ 에 대입하면 미지의 함수 $f(t)$ 를 구하게 되는데 1과 2지점에서 얻은 데이터로 구한 미지의 함수 $f(t)$ 는 조금 차이가 나게 된다.

또한 위와 같은 방식으로 해를 얻어도 그 해에 포함된 오차를 감소시킬 방법이 필요하다. 이를 위하여 두 개의 위치($x=1.7, 11\text{mm}$)에서 측정된 온도 데이터로부터 추정한 표면온도를 비교하고 이에 대한 오차가 발생할 경우 a_n 을 변경하여 두 개에서 얻어진 데이터의 차가 최소화 되도록 한다.

$$\int_{t_i}^{t_f} [T_{w,1}(t, a_{n,1}) - T_{w,2}(t, a_{n,2})]^2 < \epsilon \quad (6)$$

즉, 여기서 $a_{n,1}$ 은 1의 위치($x=1.7\text{mm}$)에서 측정
한 온도를 이용하여 식 (4)의 a_n 값을 추정
한 값이고 $a_{n,2}$ 는 2의 위치($x=11\text{mm}$)에서
측정한 온도를 이용하여 식 (4)의 a_n 을
추정한 값이다. 또한 ϵ 값은 해의 수렴성
이나 계산 시간을 고려하여 0.001로 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 액적직경이 3.0mm이고 계산된 초기
표면온도가 80°C일 때, 액적 부착 후 시간에
따른 온도변화와 전도 역산으로 구한 열유속
변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정 위치는
접촉면에서 깊이 방향으로 고체의 중심선을
따라 1.7mm, 11mm이다. 여기서 표면온도
는 내부의 측정된 온도를 이용하여 역산을
하고 동시에 표면온도 측정기를 이용하여
측정한 가열체의 표면온도이다.

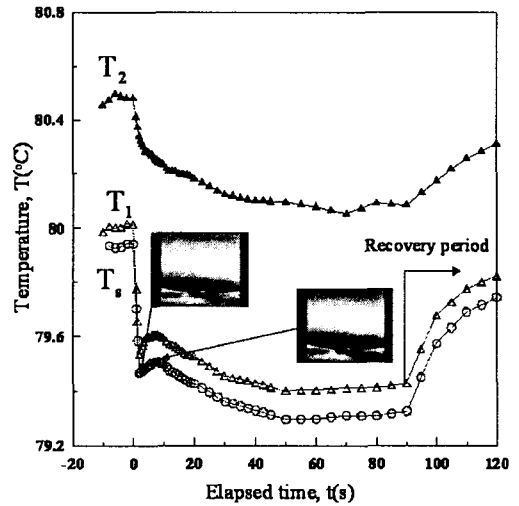
Fig. 4(a)는 측정된 2개소의 온도와 이로부터
계산된 표면온도를 증발시간에 따라 나타낸
그림이다.

전체적으로 고체내부 T_2 온도는 액적이
표면에 부착된 이후 약간의 시간지연(약0.5초)
후 감소하고 있으며 표면온도와 T_1 의 온도는
액적이 부착된 후 바로 감소하고 어느 정도
에서 다시 온도가 상승하여 서서히 감소하고
있다. 이와 같이 표면온도와 T_1 의 온도가
액적이 접촉 후 일부 증가하는 이유는 고속
카메라로 촬영한 결과 액적이 표면과 접촉
시 충돌에너지에 의해 옆으로 평평해졌다
다가 다시 형상을 회복함에 따라 접촉면의
감소로 인한 것으로 사료된다.

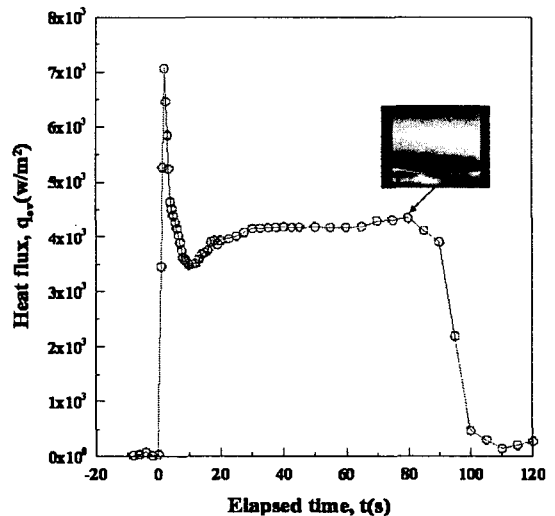
또한 T_1 과 계산된 표면온도는 거의 유사한
경향을 나타내지만 T_2 의 온도는 완만하게
변화하고 있다. 이는 T_1 에서 측정된 온도
로부터 표면온도의 변화를 직접 추정할 수
있음을 의미하지만 T_2 에서 측정된 온도는
내부온도가 높고 고체 자체의 열용량에
의하여 표면에 액적이 부착된 이후 냉각에
의한 온도감소가 내부로 침투하여 내부
온도를 감소시키는데 시간이 좀 더 필요하여

표면의 온도변화를 추정하기 힘들게 된다.
따라서 열전대의 측정위치 선정이 전도 역산
에 중요한 의미를 갖게 된다. 또한 1개소의
측정에서 발생하는 오차는 보정하기 힘들
지만 2개소에서 측정함으로써 추정한 온도
를 보정함으로써 역산해석에서 발생하는
오차를 감소시킬 수 있다.

Fig 4(b)는 계산된 표면온도를 이용하여
계산한 표면 열유속을 시간에 따라 나타낸
그림이다.



(a) Temperature (T_1, T_2, T_s) variation



(b) Surface heat flux variation

Fig. 4 Temperatures and surface heat flux variation of heated block versus elapsed time for a 3.0mm water droplet at calculated surface temperature 80°C

전체적으로 액적이 부착된 후 표면 열유속이 급격히 증가한 후 감소하다 다시 약간 증가하는 추세를 보여주고 있으며 액적이 부착된 후 약 80 초까지 조금씩 증가하여 액적이 모두 증발한 후 초기의 상태로 돌아온다.

10초 이하에서 발생하는 변동은 앞의 온도변화와 동일한 사유로 발생하고 있으나 약80초 부근에서 발생하는 온도변화는 액적의 형상이 급격히 줄어들면서 액적의 선단부의 증발이 가속되어 액적과 접촉면적이 변동하기 때문으로 사료된다.

또한 추정된 열유속은 온도변화에 매우 민감하고 이에 따른 오차가 쉽게 발생할 수 있어 온도 측정을 6회 반복하여 얻은 데이터를 평균하여 사용하였다. 다만 온도측정 시간은 짧은 시간간격으로 받을 경우 저장할 노이즈 발생이 증가하고 고주파 성분을 필터링함에 따른 오차도 발생할 수 있어 본 연구에서는 급격한 변화구간에는 0.5 초 간격으로 측정하였고 변화가 심하지 않는 구간은 2.5초로 측정하였다.

Fig. 5는 액적직경이 2.4mm, 3mm이고 계산된 초기 표면온도가 130℃일 때, 증발시간에 따른 온도변화변화와 표면 열유속 변화를 나타낸 그림이다.

전체적으로 고체의 온도는 액적이 표면에 부착된 후 급격히 감소한 후 짧은 시간(약 20초 이내) 내에 초기 상태로 돌아온다.

이는 Fig. 5에 그래프상에 나타난 사진처럼 액적에 핵비등이 발생하고 순간적으로 액적이 끓어 증발해버린다. 또한 액적이 끓어 작은 액적으로 부서지면서 고온표면과 접촉하는 접촉면적이 급격히 증가하기 때문에 더욱 빠른 시간내에 증발이 완료된다. 이와 같이 급격한 비등현상이 발생하는 경우 온도차가 크게 발생하여 상대적인 오차는 감소하는 반면 계산되는 표면온도는 오차가 조금 증가하는 경향을 갖는다.⁽⁶⁾

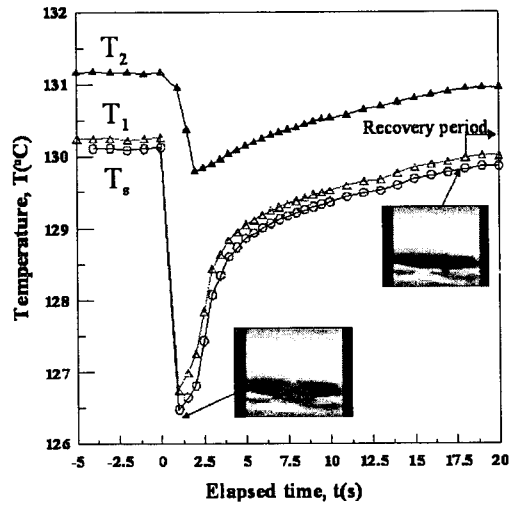
Fig. 5(b)는 액적의 크기가 2.4mm와 3mm이고 계산된 초기 표면온도가 130℃일 때 계산된 표면 온도로부터 얻은 표면 열유속 변화를 나타낸 그림이다.

전체적으로 액적의 크기에 따른 열유속 변화는 유사한 경향을 보여주고 있으며 단지 액적의 크기가 증가함에 따라 표면과의 접촉 면적이 증가하여 최대 증발열유속이 약 20% 증가하고 있다. 그러나 전반적으로 액적이 작은 경우의 열유속값

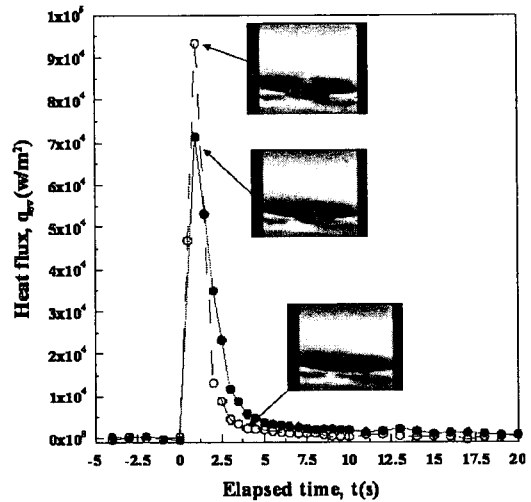
이 약간 크게 나타나므로 평균열유속에는 미소한 차이가 발생할 것으로 사료된다.

사진에 나타난 것처럼 액적이 고온의 표면에서 비등을 하고 일부 액적이 작은 액적으로 나누어짐에 따라 증발이 순간적으로 발생한다.

Fig. 6은 액적직경이 3mm이고 계산된 초기 표면온도가 160℃일 때, 증발시간에 따른 온도변화 변화와 표면 열유속 변화를 나타낸 그림이다.



(a) Temperature (T_1, T_2, T_s) variation

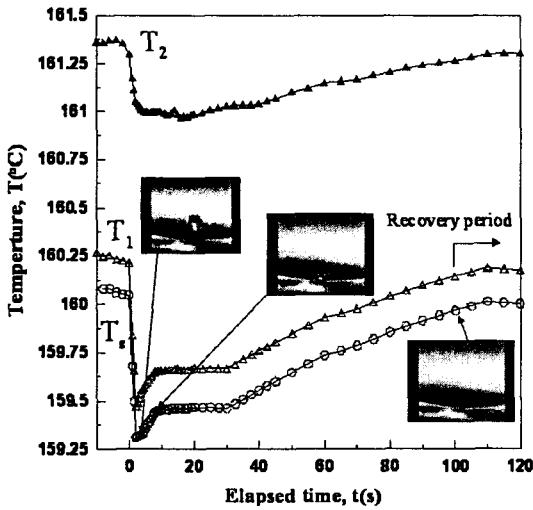


(b) Surface heat flux variation

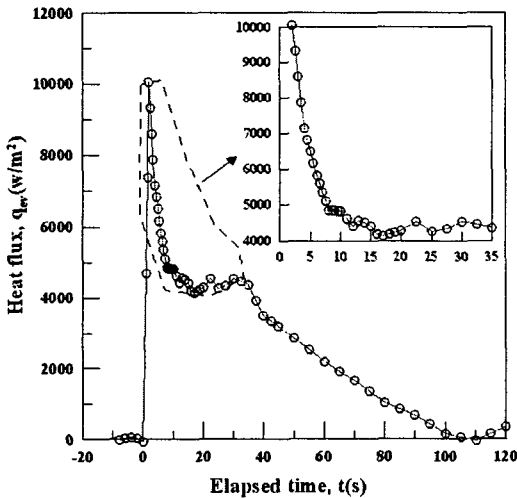
Fig. 5 Temperatures and surface heat flux variation of heated block versus elapsed time for a 2.4mm and 3.0mm water droplet at calculated surface temperature 130 °C

Fig. 6(a)는 증발시간에 따른 온도변화를 나타낸 그림으로 액적이 충돌된 후 표면온도는 급격히 감소한 후 다시 약간 상승하여 약 20초 동안 일정한 온도를 유지하다 다시 상승한다.

이와 같이 액적의 온도가 최소값으로 감소한 것은 액적의 밀부분이 표면과 접촉함에 따라 순간적으로 일부가 비등하여 발생하는 것으로 사진에 액적 밀부분에 증기 기둥이 발생하는 것을



(a) Temperature(T_1, T_2, T_s) variation



(b) Surface heat flux variation

Fig. 6 Temperatures and surface heat flux variation of heated block versus elapsed time for a 3.0mm water droplet at calculated surface temperature 160 °C

확인할 수 있다. 또한 이후 일정한 온도를 유지하는 구간에서는 액적이 증기 위에 떠있고 이에 따라 표면과 액적사이에 증기층에 의한 열저항이 증가하여 일정량이 증발함으로 온도변화가 일정하게 나타난다.

Fig. 6(b)는 증발시간에 따른 표면 열유속 변화를 나타낸 그림으로 액적이 부착된 후 표면 열유속이 급격히 증가한 후 약 15초까지 감소하다 다시 약 30초까지 약간 상승하는 것으로 나타나고 있다. 이는 앞에서 계산된 표면온도와 같이 일정한 구간이 나타나지 않고 약간의 변동이 발생하고 있다. 이는 내부(T_2)의 온도가 높고 열용량이 크기 때문에 내부의 온도로부터 추정된 표면온도와 표면부근에서 측정된 온도(T_1)로부터 추정된 표면온도 사이에 오차가 발생하기 때문으로 추정되나 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 7은 액적의 직경이 2.4, 3.0 mm일 때 계산된 표면온도에 대한 전도역산으로 구한 시간평균 열유속 및 등반경모델로 구한 시간 평균 열유속을 나타낸 그림이다.

여기서 등반경모델로 구한 시간 평균 열유속은 다음과 같이 계산하여 구한 값이다.⁽⁸⁾

$$q_{ev} = (2d_o\rho_t\lambda') / (3t_t) \quad (7)$$

여기서 $\lambda' = \lambda + c_p(T_d - T_\infty)$ 는 유효 증발잠열이고, T_d 는 액적의 시간 평균 온도⁽⁸⁾를, T_∞ 는 외기의 온도를 나타낸다. 또한 t_t 는 전체 증발시간으로 액적의 증발시간을 고속카메라로 촬영하여 구한 값이다.

전체적으로 식 (7)의 등반경모델로 구한 시간평균 열유속이 전도 역산으로 구한 열유속보다 높게 나타나고 있다. 이는 등반경모델이 증발 전체 구간동안 일정한 접촉면적을 유지하고 있다는 가정이 실제적인 현상과 일치하지 않기 때문이다. 또한 표면온도가 높은 경우 전체의 증발시간이 길어지기 때문에 등반경모델과 전도역산에 의해 구한 시간 평균 열유속이 일치하는 것처럼 보인다. 그러나 등반경모델은 저온의 증발구간에서 어느 정도 일치하고 핵비등이나 막비등 구간에 대한 현상은 직접적으로 묘사할 수 없다. 따라서 액적의 증발 냉각에 따른 표면 열유속을 추정하기 위해서는 전도 역산을 통한 표면온도의 추정과 이

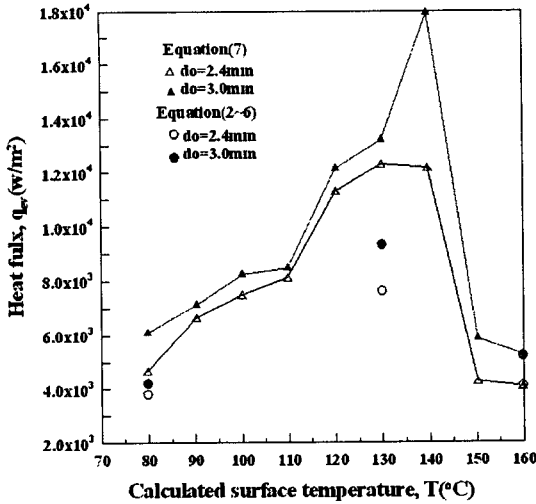


Fig. 7 Calculated surface temperatures versus time averaged surface heat flux using inverse heat conduction and constant radius model

값을 통한 표면열유속의 계산 방법이 액적에 의한 증발 냉각에 따른 열유속을 더욱 잘 추정할 것으로 사료된다.

4. 결론

알루미늄 표면에 부착된 액적에 의한 증발냉각을 실험적으로 조사하고 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 표면온도 및 열유속을 그린함수를 이용하여 추정하고 이를 기존의 등반경모델과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면에 부착되는 액적의 형상변화는 계산된 표면 온도 및 열유속 변화로부터 정성적으로 유추할 수 있다.
- (2) 그린함수를 이용하여 추정한 표면온도변화와 열유속은 막비등이 발생하는 경우 오차가 증가하였다.
- (3) 액적직경이 큰 경우 표면 열유속은 최대값이 증가하지만 지속시간은 감소하여 시간 평균열유속은 차이가 크게 발생하지 않는다.
- (4) 전도역산을 통하여 계산한 시간 평균 표면 열유속이 등반경모델로 구한 표면열유속보다 물

리적 현상을 더욱 잘 설명한다.

참고문헌

- (1) Dawson, H. and Di Marzo, M., 1993, "An Experimental Study of Multiple Droplet Evaporative Cooling," *NIST-GCR 93-624*.
- (2) Zhang, N. and Yang, W. J., 1982, "Natural Convection in Evaporating Minute Drops," *J. of Heat Transfer*, Vol 104, pp. 656~662.
- (3) Sadhal, S. S., and Plesset, M. S., 1979, "Effect of Solid Properties and Contact Angle in Dropwise Condensation and Evaporation," *J. of Heat Transfer*, Vol 101, pp. 48~54.
- (4) Chandra, S., DiMarzo, M., Qiao, Y. M., and Tartarini, P., 1995, "Effect of solid-liquid Contact Angle on Droplet Evaporation," *NIST-GCR-96-687*.
- (5) Bang, C. H., Kim, J. S. and Yea, Y. T., 2000, "An Experimental Study on the Cooling of Unburned Surface due to Water Droplet," *Trans. of Korean Institute of Fire Sci & Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 13~18.
- (6) Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, J. S., 2001, "Evaporation Cooling of Single Droplet on a Heated Solid Surface," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 25, No. 6, pp. 845~852.
- (7) Ozisik, M. N., 1993, "Heat Conduction-2nd ed,"
- (8) Zhang, N. and Yang, W. J., 1982, "Natural Convection in Evaporating Minute Drops," *J. of Heat Transfer*, Vol 104, pp. 656~662.
- (9) Sadhal, S. S. and Plesset, M. S., 1979, "Effect of Solid Properties and Contact Angle in Dropwise Condensation and Evaporation," *J. of Heat Transfer*, Vol 101, pp. 48~54.
- (10) Monde, M., 2000, "Analytical Method in Inverse Heat Transfer Problem Using Laplace Transform Technique," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3965~3975.