

가열 표면에서 액적의 증발열전달에 관한 실험적 연구

김 영 찬[†]

Experimental Study on Evaporative Heat Transfer of Single Droplet on Heated Surface

Yeung Chan Kim

Key Words: Evaporation(증발), Heat transfer(열전달), Droplet(액적), Surface roughness(표면조도), Cooling technique(냉각기술)

Abstract

In the present study, experiment on the evaporation of pure water droplet on heated surface was conducted, and the evaporative heat transfer coefficients were calculated from experimental results. The pure water droplet of about 10 μl was applied onto the heat transfer surface, then the shape of the droplet was analyzed during the evaporation. In addition, the effect of surface roughness on the evaporative heat transfer was also investigated. Experimental results showed that the evaporative heat transfer coefficients increased rapidly along with the increase of surface temperature and the heat transfer coefficients increased with the increase of surface roughness.

기호설명

- A : 액적의 접촉면적 [m^2]
- c : 액체의 비열 [$\text{J/kg } ^\circ\text{C}$]
- L_v : 액체의 증발열 [J/kg]
- h : 열전달계수 [$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]
- k : 열전도계수 [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]
- q : 열유속 [W/m^2]
- T_d : 액적의 온도 [$^\circ\text{C}$]
- T_s : 전열면의 온도 [$^\circ\text{C}$]
- V_d : 액적의 체적 [m^3]
- Δt : 증발시간 [sec]
- ρ : 액체의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

액적의 증발현상은 연료분사 및 연소장치에 있어서 오래전부터 매우 중요한 학문분야로 다루어지고 있다⁽¹⁾. 또한 금속재료의 열처리, 열교환 및 냉각장치, 분무도장(spray painting) 등의 산업분야에서도 그 중요성이 강조되고 있으며 이와 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다⁽²⁻⁵⁾. 액적이 물체 표면에 부착되어 증발하는 경우 물체 표면의 온도, 조도 등이 액적의 증발에 영향을 미치고 현상이 복잡하기 때문에 증발속도 또는 증발열전달의 예측을 더욱 어렵게 만드는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 가열된 표면에 부착된 크기가 약 10 μl 인 액적을 이용하여 증발과정을 관찰하고, 실험결과에 기초하여 액적의 증발 열전달계수를 산출하였다. 그리고 전열면의 조도가 액적의 증발열전달에 미치는 영향을 파악하였다.

(Received: 03 February 2014, Received in revised form: 28 February 2014, Accepted: 03 March 2014)

[†]책임저자, 회원, 안동대학교 기계자동차공학과
E-mail : yeung@andong.ac.kr
TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험 장치는 선행연구⁽⁶⁾와 유사하며, 증발과정에 있어서 액적의 형상분석을 위해 독일 Krüss사의 분석장비(DSA100)를 활용하였다. 실험은 우선 전열면의 표면 온도를 일정하게 유지시킨 후, 전열면에 약 10 μl 의 시판용 증류수인 순수 물 액적을 공급하고 증발과정을 촬영하였다. 그리고 기록된 영상을 분석하여 액적의 직경, 부피, 접촉각을 산출하는 방법으로 진행하였으며 이 측정결과를 이용하여 액적의 증발 열전달계수를 계산하였다. 전열면은 직경이 약 9 mm인 원통형 구리로 제작하였다. 구리블록에 용량이 220W인 카트리지 히터를 9개 장착하여 전열면의 온도를 조절하였다. 전열면의 표면으로부터 약 1.0 mm 아래에 K Type 열전대($\phi=0.5$ mm)를 장착하였으며, 전열면의 온도는 이 지점에서 측정된 온도와 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 전열면의 온도와 증발열전달의 관계뿐만 아니라 표면조도가 증발열전달에 미치는 영향에 대해서도 실험적으로 연구하였다. 이를 위해 전열면을 #2000, #400, #60의 3종류의 샌드페이퍼로 연마하여 실험에 이용하였다. 실험이 수행되는 동안에 초음파 가습기를 이용하여 실험실의 상대습도를 일정하게 유지하였다.

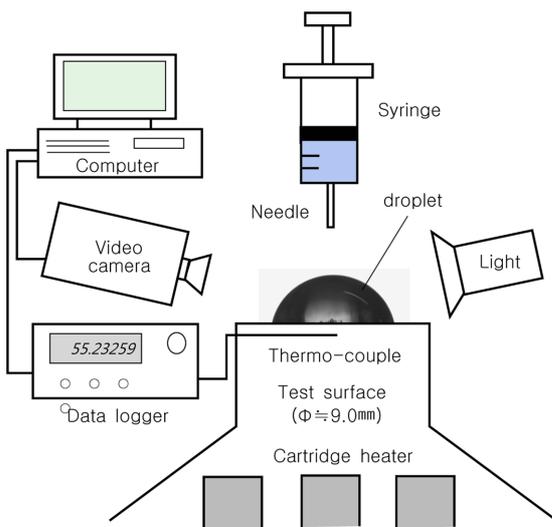


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 5~30W 범위의 전력을 카트리지 히터에 공급하여 전열면의 정상상태 온도를 측정하였다. 앞

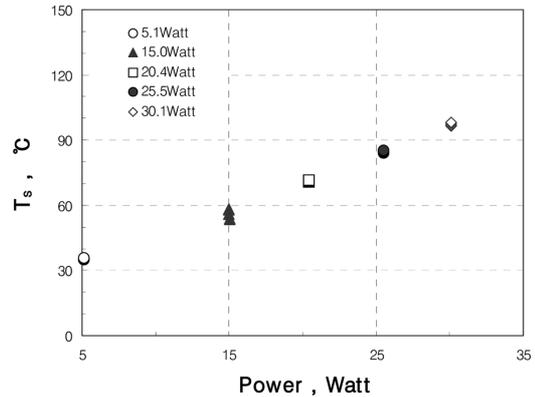
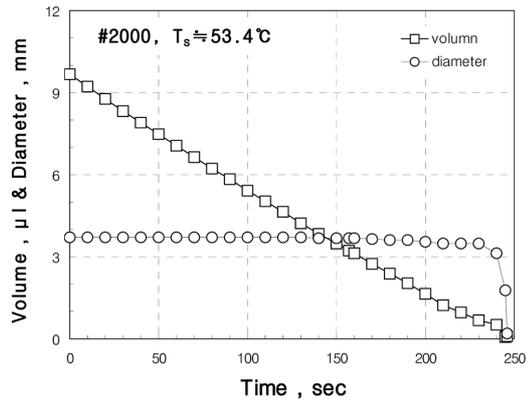
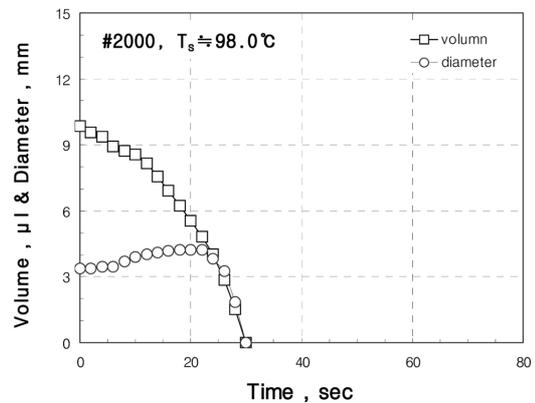


Fig. 2 Surface temperature vs. power



(a) $T_s=53.4^\circ\text{C}$ (#2000)



(b) $T_s=98.0^\circ\text{C}$ (#2000)

Fig. 3 Time history of droplet volume & diameter

서 설명한 바와 같이 전열면의 온도는 측정된 온도와 아래의 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다.

$$q = \frac{k(T_m - T_s)}{l} \quad (1)$$

위 식에서 l 은 전열면과 열전대가 설치된 위치와의 거리이며, T_m 은 열전대에 의해 측정된 온도를 나타낸다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 전열면의 온도는 50~98°C의 범위에서 전력이 증가할수록 전열면의 온도도 점차 증가하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 액적이 증발하는 동안에 전열면의 온도는 거의 일정하게 유지되고 있음을 확인하였다.

Figure 3에는 가열된 표면에서 액적이 증발하는 동안에 액적 부피와 직경의 변화를 관찰한 대표적인 결과를 나타내었다. Fig. 3의 (a)에 나타낸 전열면의 온도가 약 53.4°C 정도로 비교적 낮은 경우에는 시간이 경과함에 따라 액적의 부피는 점차 감소하지만 액적의 직경은 증발이 완료될 때까지 거의 일정하게 유지되고 있음을 알

수 있다. 그러나 Fig. 3의 (b)에 나타낸 바와 같이 전열면의 온도가 높은 경우에는 액적의 직경이 증발이 진행됨에 따라 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이와 같이 전열면의 온도가 액체의 포화온도에 가까운 경우에는 전열면에 다량의 기포(bubble)가 발생하고, 이로 인해 증발이 진행됨에 따라 액적이 넓게 퍼지려는 경향이 발생하는 것으로 판단된다. 전열면의 온도가 높은 모든 경우에 있어서 액적의 직경이 증발이 진행됨에 따라 증가하는 것은 아니지만, 이러한 현상의 발생 빈도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 4에는 Fig. 3에 나타낸 동일한 조건의 실험이 진행되는 동안 액적의 형상을 촬영한 사진을 나타내었다. 또한 Fig. 4에는 증발이 진행되는 동안 액적의 형상 변화를 명확히 파악할 수 있도록 액적의 부피, 직경, 접촉각의 측정결과를 사진과 함께 나타내었다. Fig. 4로부터 전열면의 온도가 비교적 낮은 경우에는 시간이 경과함에 따라 액적의 부피는 점차 감소하지만 액적의 직경은 증발이 완료될 때까지 거의 일정하게 유지되고 있음을 재확인할 수 있다. 또한 전열면의 온도가 액체의 포화온도에 가까운 경우에는 증발 초기부터 전열면에 다량의 기포가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 기포 발생으로 인해 위에서 언급한 바와 같이 증발이 진행되는 동안 액적의 직경이 약간 증가하는 것으로 판단된다.

Figure 5에는 각 실험조건에서 4~5회 반복 수행한 액적의 증발실험 결과로부터 액적의 증발 열전달계수를 계산하여 나타내었다. 전열면에서 액적으로 전달된 열은 액적의 온도를 높이고 액적을 증발시키는데 모두 소비된다고 가정하면 다음의 식을 유도할 수 있다.

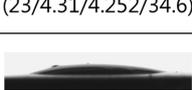
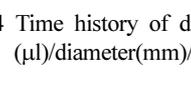
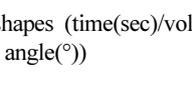
$T_s = 53.4^\circ\text{C}$	$T_s = 98.0^\circ\text{C}$
 (2/9.67/3.723/79.2)	 (2/9.99/3.370/94.1)
 (59/7.40/3.723/67.2)	 (6/8.82/3.492/85.4)
 (99/6.16/3.724/59.3)	 (12/7.99/4.057/63.3)
 (138/4.59/3.704/48.1)	 (18/6.09/4.218/46.2)
 (175/3.23/3.669/37.2)	 (23/4.31/4.252/34.6)
 (218/1.59/3.553/21.6)	 (26/2.12/2.943/18.7)

Fig. 4 Time history of droplet shapes (time(sec)/volume (μ l)/diameter(mm)/contact angle($^\circ$))

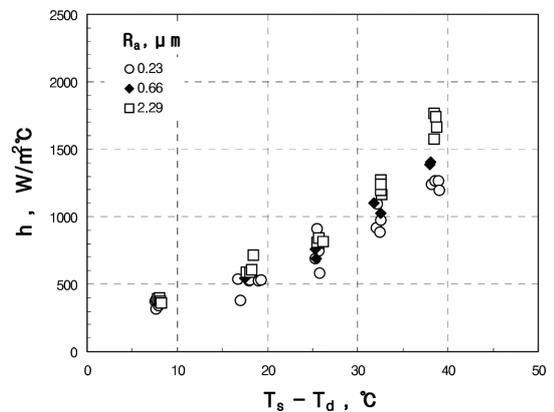


Fig. 5 Effect of surface roughness on evaporative heat transfer of pure water droplet

$$h = \frac{c\rho V_d(T_s - T_d) + \rho V_d L_v}{A(T_s - T_d)\Delta t} \quad (2)$$

액적의 온도는 증발이 진행됨에 따라 증가하기 때문에 본 연구에서는 전열면과 액적의 초기온도와의 평균값을 이용하여 열전달계수를 산출하였다. A는 전열면과 액적이 접촉하는 면적이며, 이 면적은 액적의 증발이 진행되는 동안 액적의 평균 직경을 측정하여 계산하였다. 또한 Fig. 5에는 열전달계수에 대한 표면조도의 영향을 확인하기 위하여 3가지 표면조도에 대한 실험결과를 함께 나타내어 상호 비교하였다. #2000, #400, #60의 샌드페이퍼로 연마한 구리시편의 평균값 R_a 는 각각 0.23 μm , 0.66 μm , 2.29 μm 로 측정되었다⁽⁵⁾. Fig. 5로부터 전열면의 온도가 증가할수록 열전달계수는 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 전열면의 조도가 증가할수록 열전달계수는 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 경향은 전열면의 온도가 높은 영역에서 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 표면조도가 증가할수록 액적의 증발 열전달계수가 증가하는 것은 접촉면적과 기포발생에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 표면조도가 증가하면 실제 고체-액체의 접촉면적은 증가하며 이는 열전달계수의 증가로 이어지는 것으로 판단된다. 그리고 일반적으로 핵비등(nucleate boiling)과 같이 표면온도가 매우 높은 조건에서 표면조도가 증가할수록 기포성장-이탈의 순환이 원활해져 열전달이 촉진되는 것으로 알려져 있다. 본 실험결과에서 전열면의 온도가 증가할수록 표면조도의 영향이 크게 나타나는 것은 이러한 기포성장-이탈과 관련이 있는 것으로 판단하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 가열된 표면에서 액적의 증발과정을 관찰하고, 실험결과에 기초하여 액적의 증발 열전달계수를 산출하였다. 그리고 전열면의 표면조도가 액적의 증발열전달에 미치는 영향을 조사하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 전열면의 온도가 낮은 경우에는 시간이 경과함에

따라 증발이 진행되어 액적의 부피는 점차 감소하지만 액적의 직경은 증발이 완료될 때까지 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 전열면의 온도가 액체의 포화온도에 근접할수록 전열면에 다량의 기포발생이 관찰되었고, 이러한 기포발생으로 인해 증발이 진행됨에 따라 액적의 직경이 약간 증가하는 경향이 있음을 확인하였다.

2) 전열면의 조도가 증가할수록 증발열전달계수는 증가하며 이러한 경향은 전열면의 온도가 증가할수록 더욱 커지고 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011년도 안동대학교 국제학술교류 보조금에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) D. B. Spalding, "The Combustion of Liquid Fuels", Fourth Symposium on Combustion, 1953, pp. 847-864.
- (2) S. Nishio and Y. C. Kim, "Heat Transfer of Dilute Spray Impinging on Hot Surface", Int. J. of Heat & Mass Transfer, vol.41, 1998, pp.4113-4119.
- (3) Y. Tio and S. Sadhal, "Thermal Analysis of Droplet Spray Evaporation from a Heated Solid Surface", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 114, 1992, pp. 220-226.
- (4) T. Lim, S. Han, J. Chung, T. Chung, S. Ko and C. P. Grigoropoulos, "Experimental Study on Spreading and Evaporation of Inkjet Printed Pico-liter Droplet on Heated Substrate", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 52, 2009, pp. 431-441.
- (5) Y. C. Kim, "Effect of surface Roughness on Contact Angle of Nanofluid Droplet", Trans. of the KSME(B), vol. 37-6, 2013, pp. 559-566.
- (6) Y. C. Kim, "Experimental Study of Evaporation of Nanofluid Droplet", Trans. of the KSME(B), Vol. 37-7, 2013, pp. 647-653.