

표면 거칠기에 따른 액적의 증발 냉각

방창훈[†] · 권진순* · 예용택**

경북전문대학 소방안전관리과 · *태산LCD · **경일대학교 기계공학부
(2003. 4. 18. 접수 / 2003. 8. 8. 채택)

Evaporation Cooling of Droplet due to Surface Roughness

Chang-Hoon Bang[†] · Jin-Sun Kwon* · Yong-Taeg Yea**

Department of Fire Protection Engineering, Kyungbuk College · *Taesan LCD

**Department of Mechanical Engineering, Kyungil University

(Received April 18, 2003 / Accepted August 8, 2003)

Abstract : The objective of the present work is to examine evaporation cooling of droplet due to surface roughness on a heated surface. The surface temperatures varied from 80~160°C on aluminum alloy (AL 2024) and surface roughness was 0.18 μ m, 1.36 μ m. The results are as follows; Regardless of surface roughness, as droplet diameter is bigger, the in-depth temperature of solid decreases and evaporation time increases. In the case of same initial temperature on the heated surface, as droplet diameter is smaller and small surface roughness is bigger, evaporation time decreases and time averaged heat flux increases.

Key Words : droplet, surface roughness

1. 서 론

액적을 이용한 증발 냉각은 금속의 열처리, 전자 장치 냉각, 핵반응로의 긴급 냉각, 터빈의 냉각, 화재시 소화제 등의 분야에서 적용될 수 있다.

액적 증발 냉각에 영향을 주는 인자로는 액적의 크기 및 충돌 속도, 가열면의 온도 및 재질, 가열 방법 및 외부 조건 등의 다양한 변수가 존재하며, 많은 연구자들에 의하여 액적 증발 현상과 최적의 냉각성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 수행되어왔다¹⁻⁷⁾.

액적은 대부분의 경우 임의의 속도로 고체 표면에 충돌하여 증발한다. 따라서 다양한 표면조건에서 증발하게 되며 특히 표면의 거칠기는 고체와 액적 사이 계면에서의 열전달에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 표면 거칠기가 액적의 증발 냉각특성에 미치는 영향에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 표면 거칠기에 따른 액적의 증발

냉각 특성을 구명하기 위하여 표면 거칠기와 액적의 크기, 가열고체의 표면 온도 등을 변화시켜 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

온도 제어부 ①은 가열 모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도 제어기(Fuji, pxw-9)와 전원 공급기(Spc-101series)로 구성되어 있다. 가열 모듈 ②는 가열고체와 히터로 이루어져 있으며 유리섬유로 단열처리 하였다. 데이터 처리부 ③은 가열 모듈에 부착된 K형 열전대의 데이터를 처리하기 위한 데이터 처리장치(Fluke, 2640A)로 이루어져 있다.

영상 처리부는 고속카메라 (FASTCA M, Super 10KC)④와 조명장치 ⑤, 영상처리용 컴퓨터로 구성되어 있다. 고속카메라에는 영상 확대용 확대렌즈가 부착되어 있으며, 512×480의 해상도, 1/30s ~ 1/

[†]To whom correspondence should be addressed.
bch@mail.kbc.ac.kr

20,000s의 노출 시간을 가진다. 조명장치로는 200W의 할로겐램프를 두 개 사용하였으며, 조명장치에서 나오는 열이 외기 온도에 영향을 미치지 않도록 별도의 케이스 ⑥을 제작하여 영상 처리부를 격리시킨 후, 케이스 후면의 2개의 80 mm 팬을 통하여 내부의 가열된 공기를 외부로 배출하도록 하였다. 액적 공급부는 액적을 일정하게 토출해 주도록 제작된 액적 발생기 ⑦와 일정한 양의 물을 공급해주는 Syringe pump ⑧로 구성되어 있다. 또한 액적 발생기 액적의 온도를 일정하게 유지시켜주기 위한 냉각수 제어부 ⑨는 액적 발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량 조절 밸브, 열 교환기로 구성되어 있다.

실험장치내의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 상부에 펌프 ⑩와 연결된 구리관 ⑪을 설치하여 물을 순환시켰다.

Fig. 2는 가열고체의 형상과 열전대의 위치를 나타낸 그림이다.

가열고체는 직경 16mm, 길이 75mm의 알루미늄 합금(AL2024)을 사용하였다. 온도를 측정하기 위해 k형 열전대를 표면으로부터 깊이 3mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm에 각각 5개 부착하였으며, 온도 제어용 열전대는 깊이 50mm에 1개 설치하였다.

액적이 외부로 튀어나가는 것을 막기 위하여 표면을 반경 25.25mm의 구형으로 가공하였으며, 표면 거칠기에 따른 액적 증발의 영향을 관찰하기 위하여 표면을 산술 평균 거칠기(Ra) 0.18 μ m와 1.36 μ m로 가공하였다.

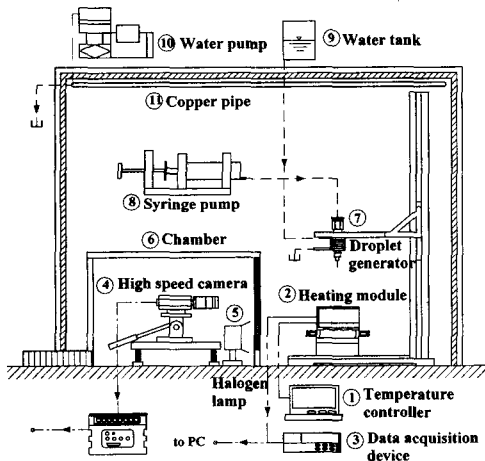


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

Unit (mm)

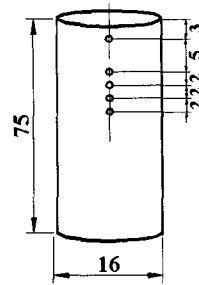


Fig. 2. Schematic diagram of heating element

Table 1. Parameters and experimental ranges for droplet experiments

Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding : 25±0.5°C Initial droplet : 25±0.3°C
Surface temperature	80°C ~160°C
Surface material	Aluminum alloy (AL 2024)
Droplet diameter	2.4mm, 3.0mm
Surface roughness	0.18 μ m, 1.36 μ m

2.2. 실험 방법 및 범위

주위의 온도는 25±0.5°C로 설정하였으며, 액적의 온도는 25±0.3°C로 하였다. 증발시 고체 표면에서 물이 완전히 증발할 때까지의 증발액적의 열 물성치는 Cengel⁸⁾의 자료를 이용하였다. 실험에 사용한 순수한 물은 증류수를 100°C까지 가열하여 물속의 기체를 제거한 후 사용하였다. 또한 실험동안 온도 변화를 열전대를 통하여 측정하고, 시간에 따른 변화는 고속 카메라를 이용하여 기록하였다.

액적의 직경은 표면에 떨어질 때를 촬영하여 측정하고 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 무게를 측정하였다. 측정결과 ±3% 이내로 매우 잘 일치하였다.

본 실험에서 측정된 온도의 불확실도는 ±0.25°C이고, 제어되는 히터의 온도는 ±0.2°C이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는 ±0.25mm정도이다. 시간의 불확실도는 고속 카메라의 기본 측정 시간인 1/30s이고, 최대오차는 0.17%로 나타났다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 표면 거칠기가 0.18 μ m이고 액적의 지름이 3.0mm와 2.4mm, 가열고체 표면의 초기 온도가

80.0°C, 120.3°C, 150.4°C일 때, 시간의 경과에 따른 가열고체 내부의 온도를 나타낸 것이다.

Fig. 3 (a)는 가열 고체 초기 표면 온도가 80.0°C 일 때를 나타낸 그림으로 고체 내부의 온도는 액적 부착시 급격히 하강한 후, 서서히 감소하여 최소값에 도달한 후 증가하여 가열 고체 표면의 초기 온도로 회복되고 있다. 급격한 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 부착 후 고체 표면이 액적에 의하여 냉

각되어 나타나는 현상이며 이후 액적에 의하여 지속적으로 냉각되어 최소값을 나타낸다. 다시 온도가 상승하는 것은 액적의 증발이 거의 완료되어 액적에 의한 냉각 효과는 없어지고 주위 고체로부터의 전도열전달로 인하여 온도가 상승하기 때문이다.

액적의 지름이 3.0mm 인 경우가 2.4mm인 경우보다 낮은 온도를 나타내며 이는 액적의 물함유량이 많기 때문에 고체 표면에서의 냉각이 다소 많이 일어나기 때문이다. 따라서 고체내부의 온도하강이 조금 더 일어난다.

Fig. 3(b)는 가열고체 표면의 초기 온도가 120.3°C일 때를 나타낸 그림으로 액적이 표면에 부착된 후 표면 온도가 최저 온도로 하락하였다가 약 50초에 초기 표면 온도로 회복되며, 액적의 직경이 작을수록 회복되는 시간이 짧다. 이는 고체표면의 초기 온도가 물의 비등점을 초과하여 핵비등이 발생하기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 3(c)는 가열고체 표면의 초기 온도가 150.4°C일 때를 나타낸 그림으로 액적 부착시 고체내부의 온도는 급격히 하강한 후 완만하게 상승하여 초기 온도로 회복한다. 이는 액적이 표면과 충돌하는 동시에 액적 주위를 둘러싼 증기막이 형성되어 액적과 고체 표면사이의 열전달을 막기 때문이다. 즉 액적이 고체 표면 위의 증기층에 구의 형태로 떠있는 막비등 현상으로 사료된다.

Fig. 4는 가열고체 표면의 초기 온도가 80.0°C, 120.3°C, 150.4°C이고 표면 거칠기가 0.18 μ m, 1.36 μ m 일 때 시간의 경과에 따른 고체표면의 온도를 초기 표면 온도로 나눈 무차원 온도 ($T_s/T_{s,0}$)를 나타낸 그림이다.

Fig. 4(a)는 가열고체 표면의 초기 온도가 80.0°C 일 때의 그림으로 액적의 직경이 3.0mm인 경우 초기 접촉 온도는 표면 거칠기가 0.18 μ m일 때 가장 낮다. 초기 접촉 온도는 액적이 표면에 충돌하면서 퍼지는 면적에 영향이 크다. 즉 표면 거칠기가 작을수록 액적의 확장이 용이하여 넓은 면적으로 열전달이 일어나기 때문에 초기 접촉 온도가 낮게 나타난다.

표면 거칠기가 1.36 μ m일 때 온도가 조금 낮게 나타나며 증발시간도 조금 빠르다. 이는 표면 거칠기가 클 경우 표면과 액적 사이에 갇혀있는 공기층에 의한 단열효과가 상대적으로 작아지며, 표면의 돌기에 의하여 액적의 내부까지 열이 잘 전달되기 때문이다.

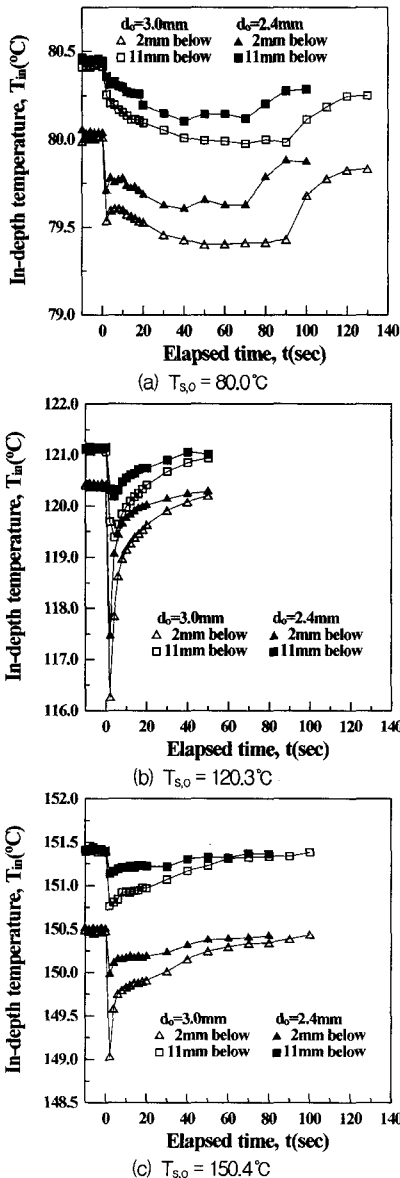
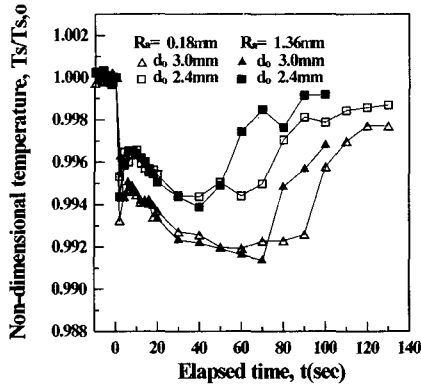
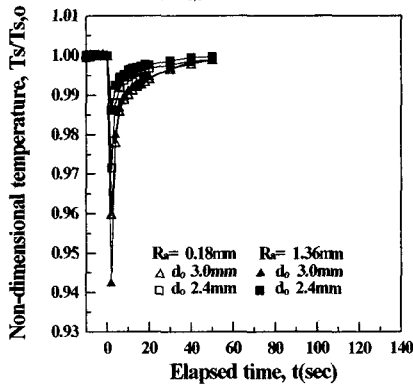


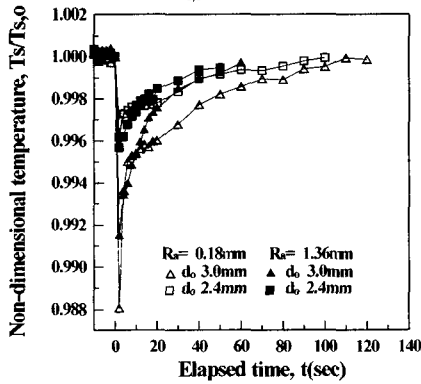
Fig. 3. In-depth temperature versus elapsed time under conductive condition at $Ra = 0.18\mu\text{m}$



(a) $T_{s,0} = 80.0^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{s,0} = 120.3^{\circ}\text{C}$



(c) $T_{s,0} = 150.4^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Non-dimensional temperature versus elapsed time with surface roughness under conductive condition

Fig. 4(b)는 가열고체 표면의 초기 온도가 120.3°C 일 때의 그림으로 액적이 부착된 후 온도가 급격하게 낮아졌다가, 바로 초기 온도로 회복되었다. 액적 직경이 3.0mm 이고 표면 거칠기가 1.36µm (a) $T_{s,0} = 80.0^{\circ}\text{C}$ 일 때 온도는 가장 낮게 나타났으며, 이는 핵비동에 의하여 액적의 증발이 빠르게 완료되었기 때문이다.

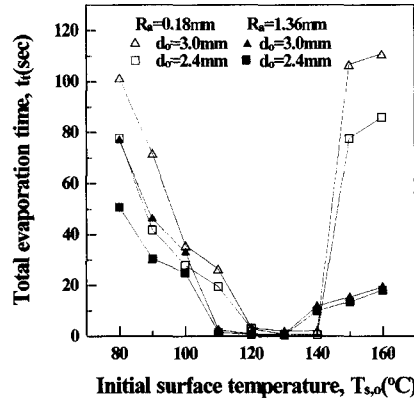


Fig. 5. Total evaporation time versus initial surface temperature under conductive condition

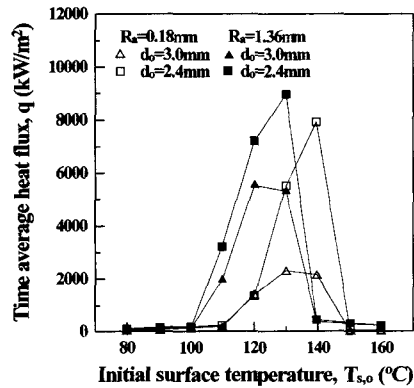


Fig. 6. Time-average heat flux versus initial surface temperature under conductive condition

Fig. 4(c)는 가열고체 표면의 초기 온도가 150.4°C 일 때의 그림으로 액적 직경이 3.0mm 의 경우, 표면 거칠기가 0.18µm 일 때 온도는 초기 접촉 온도에서 서서히 증가하여 초기 표면 온도로 회복된다. 반면 표면 거칠기가 1.36µm 일 때는 증발 시간이 짧고, 온도 회복도 비교적 빨리 이루어진다. 이는 표면 거칠기가 작을 경우 표면에서 액적이 완전한 막비등을 형성하여, 표면에서 액적으로 전달되는 열이 작아진다. 따라서 온도가 서서히 상승하게 된다. 반면 표면 거칠기가 클 경우 표면의 돌기들이 액적 주위의 증기층을 통과하여 액적 내부로의 직접적인 열 전달이 이루어져서 온도의 회복이 빨리 일어난다.

Fig. 5는 가열고체 표면의 초기 온도 변화에 따른 전체 증발 시간을 나타낸 그림이다.

초기 표면 온도가 상승함에 따라 증발시간이 일정하게 감소하다가 표면 거칠기가 0.18µm 인 경우 초기 표면 온도 120°C 에서 핵비등이 시작되어 증발

시간이 매우 짧아지며, 약 140°C에서 막비등이 발생하면서 증발 시간이 길어진다. 또한 표면 거칠기가 1.36 μm인 경우는 핵비등이 110°C, 막비등은 150°C 부근에서 시작되었다.

Fig. 6는 가열고체 표면의 초기온도 변화에 대한 시간 평균 열유속(time-average heating flux)⁶⁾을 나타낸 것이다.

시간 평균 열유속은 액적의 크기가 작고 표면 거칠기가 클수록 동일한 초기 표면 온도에서 시간 평균 열유속이 크게 나타났다.

표면 거칠기가 1.36 μm일 때 초기 표면 온도 약 100°C에서 시간 평균 열유속은 급격히 증가하여 이 구간에서 핵비등이 일어남을 알 수 있다. 또한 약 140°C에서는 막비등으로 인하여 열유속이 작게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면 거칠기에 따른 액적의 증발 냉각 특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 표면 거칠기에 상관없이 액적의 직경이 클수록 가열고체 내부의 온도는 낮게 나타나고, 증발시간은 길게 나타났다.

2) 동일 가열고체 표면 온도에서 증발 시간은 액적의 직경이 작고 표면 거칠기가 클수록 작게 나타났다.

3) 시간 평균 열유속은 동일 고체 표면 온도에서 액적의 직경이 작고 표면 거칠기가 클수록 크게 나타났다.

4) 고체-액체 계면에서 액적의 핵비등에서 막비등으로의 변화는 표면 거칠기가 클수록 빨리 발생하였다.

참고문헌

- 1) Bonacina, C., DelGiudice, S., Comini, G., "Dropwise Evaporation", J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 441~446, 1979.
- 2) Rizza, J., "A Numerical Solution to Dropwise Evaporation", J of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 501~507, 1981.
- 3) Seki, M., Kawamura, H., Sanokawa, K., "Transient Temperature Profile of a Hot Wall due to an Impinging Liquid Droplet", Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, Series C, J. of Heat Transfer, Vol. 100, pp. 167~169, 1978.
- 4) Michiyoshi, I., Makino, K., "Heat Transfer Characteristics of Evaporation of a Liquid Droplet on the Heated Surfaces", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 21. pp. 605~613, 1978.
- 5) Makino, K., Michiyoshi, I., "Discussions of Transient Heat Transfer to a Water Droplet on Heated Surfaces under Atmospheric Pressure", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 30. No. 9, pp. 1895~1905, 1989.
- 6) DiMarzo, M., Evans, D. D., "Evaporation of a Water Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface", J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 210~213, 1989.
- 7) 방창훈, 양창호, "액적의 Weber 수에 따른 냉각 특성의 변화", 산업안전학회지, 제18권, 제1호, pp. 33~37, 2002.
- 8) Cengel Y. A., Boles M. A., Thermodynamics, McGraw-Hill, Int. ed, 1994.