

복사가열조건에서 표면 거칠기에 따른 액적의 증발 냉각

방창훈[†] · 권진순^{*} · 예용택^{**}

경북전문대학 소방안전관리과 · *태산LCD · **경일대학교 기계공학부
(2004. 4. 12. 접수 / 2004. 9. 8. 채택)

Evaporation Cooling of Droplet due to Surface Roughness under Radiative Heat Input Condition

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

Department of Fire Protection Engineering, Kyungbuk College
*Taesan LCD

**Department of Mechanical Engineering, Gyeongil University
(Received April 12, 2004 / Accepted September 8, 2004)

Abstract : The objective of the present work is to examine evaporation cooling of droplet due to surface roughness under radiative heat input condition. The surface temperatures varied from 80~160°C on aluminum alloy (AL 2024) and surface roughness was 0.18 μm, 1.36 μm. The results are as follows; Regardless of surface roughness under radiative heat input condition, as droplet diameter is larger, the in-depth temperature of solid decreases and evaporation time increases. In the case of 0.18 μm and 1.36 μm of surface roughness, the larger the surface roughness is, the less the evaporation time is and the larger the temperature within the solid is. In the case of Ra = 0.18 μm, evaporation time and time averaged heat flux for radiative heat input case is shorter than for the conductive case.

Key Words : droplet, radiative heat input, surface roughness, evaporation cooling

1. 서 론

산업의 각 분야에서 액적을 이용한 증발 냉각은 다양하게 이용되고 있으며 특히 금속의 열처리, 핵 반응로의 긴급 냉각, 터빈의 냉각, 화재 시 소화제 등의 분야에서 다수 적용되고 있다.

많은 연구자들은 액적을 이용한 증발 냉각의 물리적 현상을 이해하고 최적의 조건을 찾기 위하여 액적의 크기, 종류 및 충돌 속도, 가열면의 온도 및 재질 등의 다양한 인자에 대하여 연구하였다^[1-10].

상기의 연구들은 대부분 고온의 가열체에 부착된 액적에 대하여 전도가열 조건에서 일어나는 액적의 열적특성에 관한 연구가 주로 수행되었다.

하지만 액적은 다양한 열적 조건에서 증발하게 되며 특히 화재 시 소화제로 물액적을 이용할 경우

액적은 복사가열조건에 노출된다. 또한 콘크리트 벽면 및 기계장치의 금속면에서는 다양한 표면 거칠기를 갖고 있으며 이러한 조건에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 다양한 거칠기를 갖는 복사가열조건에서 액적의 증발 냉각특성에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 복사가열조건에서 액적의 증발 냉각 특성을 구명하기 위하여 표면 거칠기, 액적의 크기, 가열체의 표면 온도를 변화시키며 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

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

온도 제어부 ①은 가열 모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도 제어기(Fuji, pxw-9)와 전원 공급기(Spc-101series)로 구성되어 있다. 복사 히터 ②는 가열체 상부 50mm에 설치하였다. 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, 512×480 의 해상도, $1/30\text{s} \sim 1/20,000\text{s}$ 의 노출 시간을 가진다. 조명장치로는 200W의 할로겐 램프를 두 개 사용하였으며, 조명장치에서 나오는 열이 외기 온도에 영향을 미치지 않도록 별도의 케이스 ⑥를 제작하여 영상 처리부를 격리시킨 후, 케이스 후면의 2개의 80mm 팬을 통하여 내부의 가열된 공기를 외부로 배출하도록 하였다. 액적 공급부는 액적을 일정하게 배출해 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 ⑩과 연결된 구리관 ⑪을 설치하여 물을 순환시켰다.

Fig. 2는 가열체의 형상과 열전대의 위치를 나타낸 그림이다.

가열체는 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 비산하는 것을 막기 위하여 표면을 반경 25.25mm의 구형으로 가공하였으며, 표면 거칠기에 따른 액적 증발의 영향을 관찰하기 위하여 표면을 산술 평균 거칠기(Ra) $0.18\mu\text{m}$ 와 $1.36\mu\text{m}$ 로 가공하였다.

2.2. 실험 방법 및 범위

주의의 온도는 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며, 액적의 온도는 $25 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 로 하였다. 증발시 가열면 표면에서 물이 완전히 증발할 때까지의 증발액적의 열

물성치는 Cengel^[1]의 자료를 이용하였다. 실험에 사용한 순수한 물은 종류수를 100°C 까지 가열하여 물 속의 기체를 제거한 후 사용하였다. 또한 실험동안 온도 변화를 열전대를 통하여 측정하고, 시간에 따른 변화는 고속 카메라를 이용하여 기록하였다.

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

본 실험에서 측정된 온도의 불확실도는 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 이고, 제어되는 히터의 온도는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는 $\pm 0.25\text{mm}$ 정도이다. 시간의 불확실도는 고속 카메라의 기본 측정 시간인 $1/30\text{s}$ 이고, 최대오차는 0.17%로 나타났다.

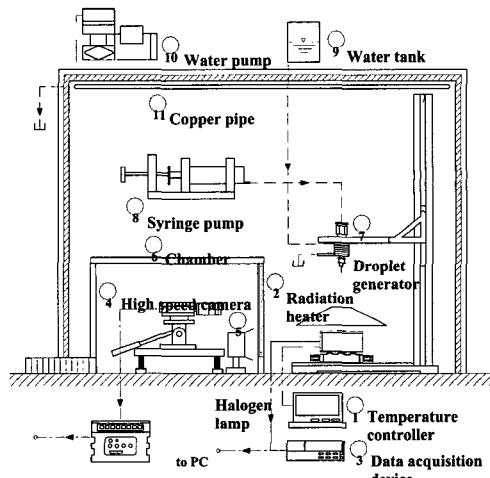


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

Unit(mm)

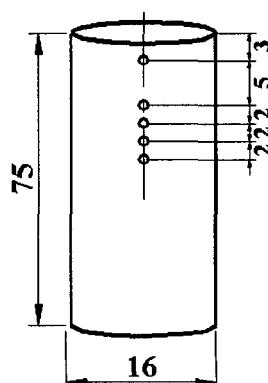


Fig. 2. Schematic diagram of solid element

Table 1. Parameters and experimental ranges for droplet experiments

Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding : $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ Initial droplet : $25 \pm 0.3^\circ\text{C}$
Surface temperature	$80^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$
Heater surface temp.	$173^\circ\text{C} \sim 351^\circ\text{C}$
Radiative heat flux	$1,363\text{W/m}^2 \sim 6,603\text{W/m}^2$
Surface material	Aluminum alloy (AL 2024)
Droplet diameter	2.4mm, 3.0mm
Surface roughness	$0.18\mu\text{m}, 1.36\mu\text{m}$

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 복사가열조건에서 표면 거칠기가 $0.18\mu\text{m}$ 이고 액적의 지름이 3.0mm와 2.4mm, 가열체 표면의 초기 온도가 80°C , 120°C , 150°C 일 때, 시간의 경과에 따른 가열체 내부의 온도를 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)는 가열체 표면의 초기 온도가 80°C 일 때를 나타낸 그림으로 가열체 내부의 온도는 액적이 부착시 순간적으로 온도가 조금 하락한 후 일정한 기울기로 하락하다가 다시 상승한다. 초기 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 가열면에 부착시 발생되는 냉각면의 확대로 나타나는 현상이며 이후 액적이 증발하면서 지속적으로 냉각되어 최소값을 나타낸다. 다시 온도가 상승하는 것은 액적의 증발이 거의 완료되어 액적에 의한 냉각 효과는 없어지고 복사히터로부터의 열전달로 인하여 온도가 상승하기 때문이다.

깊이에 따른 온도경향은 유사하며, 액적의 지름이 3.0mm인 경우가 2.4mm인 경우보다 낮은 온도를 나타낸다. 이는 지름이 큰 액적이 상대적으로 열용량이 크기 때문이다.

Fig. 3(b)는 가열체 표면의 초기 온도가 120°C 일 때를 나타낸 그림으로 가열체 내부의 온도는 액적이 표면에 부착된 후 액적 직경에 따라 약 $2^\circ\text{C} \sim 4.5^\circ\text{C}$ 정도 급격히 하락하였다가 다시 상승하여 초기 표면 온도로 회복한다. 이는 접촉면 온도가 물의 비등점보다 높아서 핵비등이 발생하여 액적의 증발시간이 짧아지기 때문이다.

Fig. 3(c)는 가열체 표면의 초기 온도가 150°C 일 때를 나타낸 그림으로 가열체 내부의 온도는 액적 부착시 액적직경에 따라 약 $1^\circ\text{C} \sim 1.5^\circ\text{C}$ 하락한 후

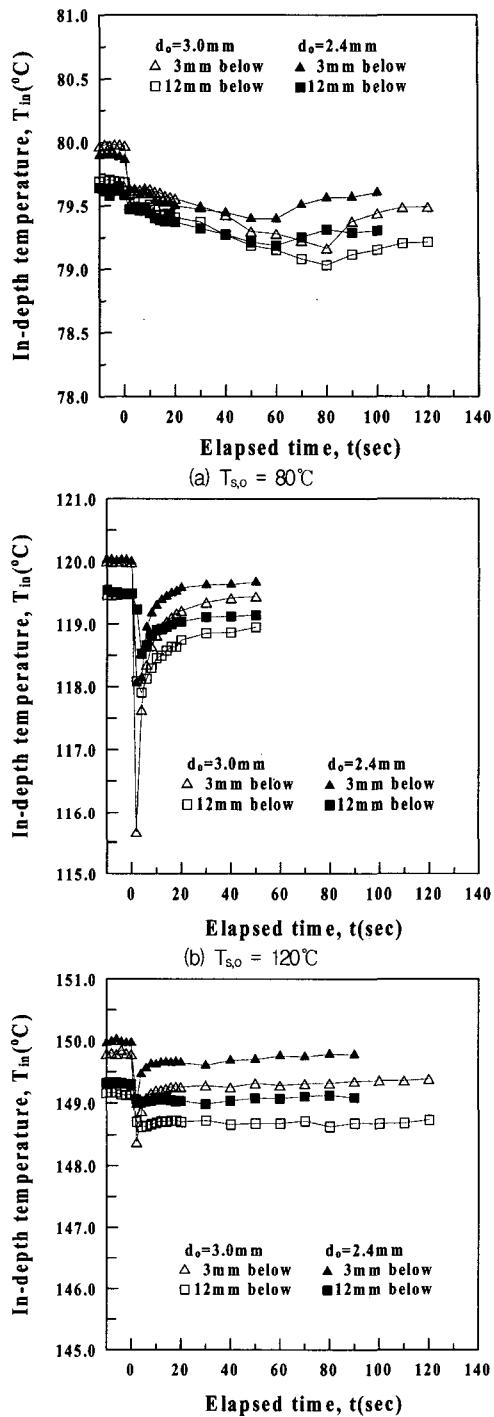


Fig. 3. In-depth temperature versus elapsed time under radiative condition, $\text{Ra} = 0.18\mu\text{m}$

매우 완만하게 상승하여 초기 온도로 회복한다. 이

는 가열체 표면의 온도가 막비등이 일어나는 구간이기 때문에 액적과 가열체면 사이에 증기막이 형성되어 열전달을 막기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

Fig. 4는 복사가열 조건에서 가열체 표면의 초기 온도가 80°C, 120°C, 150°C이고 표면 거칠기가 0.18 μm, 1.36 μm일 때 시간의 경과에 따른 가열체표면의 온도를 초기 표면 온도로 나눈 무차원 온도 ($T_s/T_{s,0}$)를 나타낸 그림이다.

Fig. 4(a)는 가열체 표면의 초기 온도가 80°C일 때의 그림으로 무차원 온도는 액적 부착 후 급격히 하강 후 다시 상승하고 이후 시간이 지남에 따라 낮아져서 최소값을 나타내고 상승한다.

액적의 크기에 관계없이 무차원 온도는 표면 거칠기 1.36 μm인 경우가 표면 거칠기 0.18 μm보다 낮게 나타난다. 이는 거칠기가 클수록 액적과 가열면의 접촉 전열면이 증대되고 이에 따라 열유속이 증가하여 낮은 무차원 온도를 나타내기 때문으로 사료된다.

Fig. 4(b)는 가열체 표면의 초기 온도가 120°C일 때의 그림으로 액적이 부착된 후 무차원 온도는 급격하게 낮아졌다가, 바로 초기 온도로 회복되었으며, 표면 거칠기에 대한 영향이 증가하고 있다. 이는 표면 거칠기가 낮은 경우 사용 횟수가 증가하면 거칠기의 요철부가 비등의 핵역할을 하지 못하기 때문이다¹²⁾.

Fig. 4(c)는 가열체 표면의 초기 온도가 150°C일 때의 그림으로 표면 거칠기가 0.18 μm일 때 무차원 온도는 초기 접촉 온도에서 서서히 증가하여 초기 표면 온도로 회복된다. 또한 표면 거칠기가 1.36 μm일 때 무차원 온도가 조금 낮게 나타나며, 초기 회복도 늦게 나타난다. 이는 표면 거칠기가 1.36 μm일 때, 액적과 요철사이의 중기가 가열체 표면과 액적 사이에 단열재 역할을 하기 때문이다.

Fig. 5는 가열체 표면의 초기온도 변화에 따른 전체 증발 시간을 나타낸 그림이다.

표면 거칠기가 0.18 μm인 경우 초기 표면온도가 상승함에 따라 증발시간이 일정하게 감소하다가 표면 온도 120°C에서 핵비등이 시작되어 증발시간이 매우 짧아지며, 약 140°C에서 막비등이 발생하면서 증발 시간이 길어진다.

점선은 가열체에 부착된 액적이 전도가열 조건에 의하여 증발 냉각되는 것을 실험한 Bang¹⁰⁾의 결과와 비교하기 위하여 나타낸 것이다.

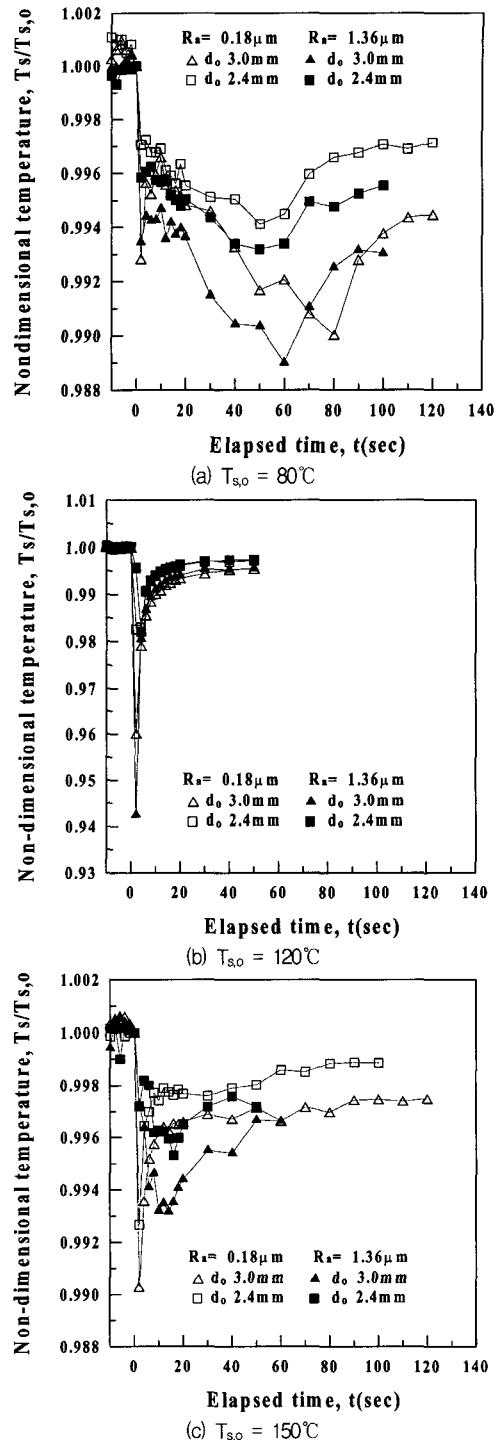


Fig. 4. Non-dimensional temperature versus elapsed time with surface roughness under radiative condition

액적의 증발시간은 액적의 크기에 관계없이 복사

가열 조건이 전도가열 조건보다 짧게 나타난다. 이는 복사가열 조건 시 복사열이 액적표면에 직접 열전달이 발생할 뿐만 아니라 주위 가열체면으로 유입된 열유속의 일부가 액적하부를 가열하기 때문이다.

Fig. 6는 가열체 표면의 초기 온도 변화에 대한 시간 평균 열유속 (time-average heating flux)⁷⁾을 나타낸 것이다.

시간 평균 열유속은 초기 표면 온도 110°C에서 급격히 증가하며 140°C에서 최고값을 나타낸다. 또한 동일한 초기 표면 온도에서 액적의 크기가 작을수록 시간 평균 열유속은 크게 나타났다.

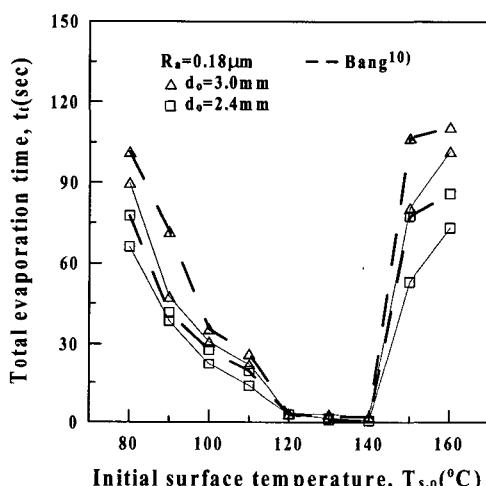


Fig. 5. Total evaporation time versus initial surface temperature under radiative condition

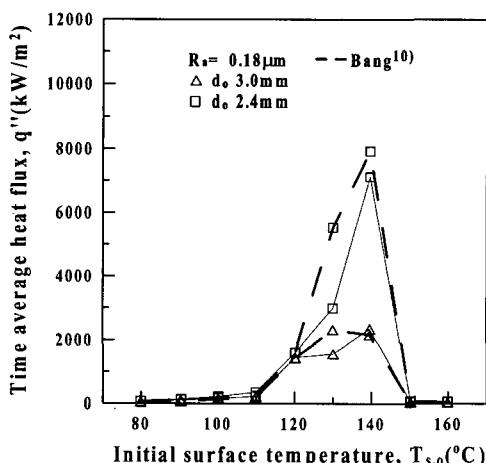


Fig. 6. Time-average heat flux versus initial surface temperature under radiative condition

전도가열 조건인 Bang¹⁰⁾과 비교하면 표면 거칠기가 $0.18 \mu\text{m}$ 인 경우 시간 평균 열유속은 복사가열 조건이 전도가열 조건보다 작게 나타난다.

4. 결 론

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

- 1) 복사가열조건에서 표면거칠기에 관계없이 액적의 직경이 클수록 가열체 내부의 온도는 낮게 나타나고, 증발시간은 길게 나타났다.
- 2) 액적의 증발시간은 동일 가열체 표면 온도에서 액적의 직경이 클수록 길게 나타났다. 또한 표면 거칠기가 $0.18 \mu\text{m}$ 인 경우 증발시간은 복사가열 조건이 전도가열 조건보다 짧게 나타난다.
- 3) 시간 평균 열유속은 동일 가열체 표면 온도에서 액적의 직경이 클수록 작게 나타났다. 또한 표면 거칠기가 $0.18 \mu\text{m}$ 인 경우 시간 평균 열유속은 복사가열 조건이 전도가열 조건보다 작게 나타난다.

참고문헌

- 1) Toda, S., "A Study of Mist cooling 1st Report: Investigation of Mist Cooling", Heat Transfer Jap. Res., col. 1, pp. 39~50, 1972.
- 2) Bonacina, C., DelGiudice, S., Comini, G., "Dropwise Evaporation", J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 441~446, 1979.
- 3) Rizza, J., "A Numerical Solution to Dropwise Evaporation", J of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 501~507, 1981.
- 4) Seki, M., Kawamura, H., Sanokawa, K., "Transient Temperature Profile of a Hot Wall due to an Impinging Liquid Droplet", J. of Heat Transfer, Vol. 100, pp. 167~169, 1978.
- 5) 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.
- 6) Makino, K., Michiyoshi, I., "Discussions of Transient Heat Transfer to a Water Droplet on Heated Surfaces under Atmospheric Pressure", Int. J. of

복사가열조건에서 표면 거칠기에 따른 액적의 증발 냉각

- Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 9, pp. 1895 ~ 1905, 1989.
- 7) 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.
- 8) Abu-Zaid, M., Atreya, A., "Transient Cooling of Hot Porous and Nonporous Ceramic Solids by Droplet Evaporation", J. of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 694 ~ 701, 1994.
- 9) 방창훈, 양창호, "액적의 Weber 수에 따른 냉각 특성의 변화", 산업안전학회지, 제18권, 제1호, pp. 33 ~ 37, 2002.
- 10) 방창훈, 권진순, "표면거칠기에 의한 액적의 증발냉각," 산업안전학회지, 제18권, 제3호, pp. 29 ~ 33, 2003.
- 11) Cengel Y. A., Boles M. A., Thermodynamics, McGraw-Hill, Int. ed, 1994.
- 12) John R. Thome, Enhanced Boiling Heat Transfer, Hemisphere publishing Co.. 1990.