

복사장 내에서 충돌면의 표면조도가 단일액적 증발냉각에 미치는 영향

유 갑 중[†], 박 철 우, 장 충 선*

경북대학교 기계공학부, *경북대학교 대학원 기계공학과

Effects of Surface Roughness on Evaporation Cooling of Single Water Droplet in Radiative Fields

Kap Jong Riu[†], Cheol Woo Park, Chung Sun Jang*

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering Graduate School, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

(Received February 20, 2004; revision received March 30, 2004)

ABSTRACT: This paper presents the results of an experimental investigation for the effect of radiant heat on the evaporation cooling of water droplet in the process of fire extinguishing. The experiments are mainly focused on the surface temperature, the surface roughness and the droplet diameter. The range of surface temperature is $T_s=80-140^\circ\text{C}$, surface roughness is $R_a=0.08-0.64\ \mu\text{m}$ and the droplet diameter is $\phi=3.0\ \text{mm}$ in the radiation. The results show that the evaporation time is shorter for the larger surface roughness and the volume of droplet increased when the surface roughness is $0.64\ \mu\text{m}$ at the surface temperature 127°C . When the surface roughness is $0.64\ \mu\text{m}$, the heat flux is larger than the surface roughness is $0.08\ \mu\text{m}$ at the surface temperature 81°C .

Key words: Radiant heat(복사열), Water droplet(액적), Surface roughness(표면거칠기), Evaporation time(증발시간), Fire extinguishing(소화), Heat flux(열유속)

기 호 설 명

c : 액체의 비열 [J/kg K]

h : 거리 또는 높이 [mm]

k : 열전도도 [W/mK]

q : 열유속 [kW/m^2]

R_a : 표면거칠기 [μm]

t : 시간 [sec]

T : 온도 [$^\circ\text{C}$]

V : 체적 [mm^3]

v : 충돌속도 [m/s]

x : 축방향거리 [mm]

그리스 문자

α : 열확산계수 [m^2/s]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

τ : 총 액적 증발시간, t_i [sec]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-950-5571; fax: +82-2-950-6550

E-mail address: kjriu@kyungpook.ac.kr

\varnothing : 액적의 직경 [mm]

하첨자

o : 초기값

s : 고체 또는 표면

in : 깊이방향

1. 서 론

가열된 표면 위의 액적 증발냉각은 다양성과 높은 공학적 활용도 때문에 철강산업, 핵에너지, 내부연소 엔진의 증발냉각, 터빈날개의 냉각, 전자장 냉각 등의 다양한 분야에서 연구되어 왔다.

특히, 소방 분야에서도 액적 증발냉각에 관한 연구가 효과적인 화재의 냉각과 진압을 목적으로 비중 있게 다루어지고 있는데, 그중에서도 물을 이용한 증발냉각이 중요한 과제이다. 물을 이용한 증발냉각은 고온의 물체를 냉각하는 데 있어서 유지비용이 싸고 효과적으로 다량의 열을 짧은 시간에 제거할 수 있으며, 변질의 우려가 없고 인체에 무해한 장점이 있어 소화제로서 널리 사용된다.

그러나 물을 냉각제로 사용할 경우, 금속재의 부식을 유발하고, 물의 전기전도성에 의한 누전 및 합선과 같은 피해가 있으며, 또한 비중이 커서 한번에 수송 가능한 양이 제한된다는 단점이 있다. 이러한 이유로 최소한의 물로 표면을 원하는 온도로 냉각시키는 기술이 필요하며, 이를 위하여 액적 증발 특성의 예측과 최적의 냉각성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 진행되어져 왔다.⁽¹⁻⁴⁾

액적 증발에 영향을 주는 인자로는 가열 고체의 온도범위나 표면조도, 액적크기, 충돌속도, 액체의 종류 등의 다양한 변수가 존재하며, 기존의 많은 연구자들에 의하여 액체 내에서의 열적 거동과 열전달현상 및 천이기간의 증발현상 등이 연구되었다.

Gottfried et al.⁽⁵⁾은 증발유체로 물 및 다수의 탄화수소화합물을 이용하여 스테인레스 스틸 표면 위에서 LFP를 실험적으로 연구하였다. Bonacina et al.⁽⁶⁾은 다중 액적 시스템에 대한 연구를 수행하여 핵비등이 일어나지 않는 영역에서는 전도가 지배적인 열전달 기구임을 보여주었다. Rizza⁽⁷⁾는

고온 표면 위에서 액적 증발에 대한 수치해석적 연구를 수행하여 고체-액체 접촉면 온도가 일정한 온도로 유지되고 있다고 가정하였다. DiMarzo et al.⁽⁸⁾은 물을 증발유체로 하여 표면온도에 따른 증발시간, 증발체적, 국소 열유속 등에 대한 실험과 수치해석적인 연구를 수행하였다.

Abu-Zaid et al.⁽⁹⁾은 다공질(porous) 및 비다공질(nonporous) 세라믹 표면에 놓인 단일 물 액적의 증발냉각을 실험적으로 연구하였는데 같은 액적 직경 실험조건 하에서 비다공질 고체가 다공질 고체보다 증발시간이 길게 나타났으며, 액적이 영향을 미치는 영역은 다공질 고체가 더욱 크다는 것을 밝혔다.

이러한 대부분의 연구는 전도 가열조건 하에서 금속 또는 세라믹 재질 위에 부착된 액적의 증발현상만을 다루고 있는데, 실제 화재에서는 아직 점화되지 않은 부분으로의 열전달이 복사열에 의하여 높게는 80% 이상까지 이루어지는 것으로 밝혀져 화재에서의 복사에 관한 연구의 중요성을 일깨워 주고 있으나, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

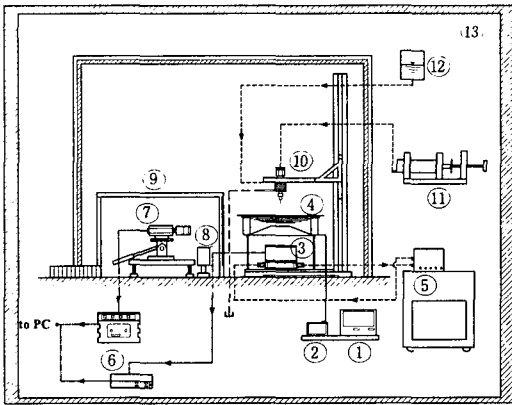
따라서 본 연구에서는 복사 가열조건 하에서 표면조도 변화에 따른 액적 증발냉각 특성에 미치는 영향을 정량적으로 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 액적 증발냉각을 위한 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 히터와 전원 공급부, 가열 모듈부, 데이터 처리부, 영상 촬영부, 액적 공급부, 온도 조절부로 구성되어 있다. 또한 외부 간섭을 막기 위해 모든 실험장치를 향한 항습실(Climatic Chamber)에 설치하였고, 복사 히터에 의한 화재를 방지하기 위하여 실험장치 외부에 석고패널과 스티로폼의 2중 구조의 챔버를 설치하였다.

전원 공급부는 온도제어기 ①과 제어기에서 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기 ②로 구성되어 있다. 가열 모듈부 ③은 복사 히터 ④의 아래로 50mm 위치에 설치하였고, 하단에는 항온조(RBC-10, JFIO TECH)를 연결하여 일정한 온도를 유지하도록 하였다.



- ① Temperature controller
- ② Power supply
- ③ Heating module
- ④ Radiation heater
- ⑤ Refrig-bath circulator
- ⑥ Data acquisition device
- ⑦ High-speed camera
- ⑧ Halogen lamp
- ⑨ Chamber
- ⑩ Droplet generator
- ⑪ Syringe pump
- ⑫ Water tank
- ⑬ Climate Chamber

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

데이터 처리부는 가열체의 온도와 표면에 부착될 물의 초기 온도, 복사 히터의 온도, 가열 모듈 하단의 냉각판의 온도를 측정하는 데이터 수집장치 ⑥(Fluke, NetDaq 2640A)과 제어용 컴퓨터로 구성되어 있다.

영상 처리부는 부착된 액적의 영상을 얻기 위한 고속카메라 ⑦(FASTCAM, Super 10KC)과 조명장치 ⑧ 및 영상처리용 컴퓨터로 구성되어 있다. 또한 고속카메라에는 영상 확대용 확대렌즈가 부착되어 있으며, 512×480의 해상도와 1/30~

1/20,000 s의 노출시간을 가진다.

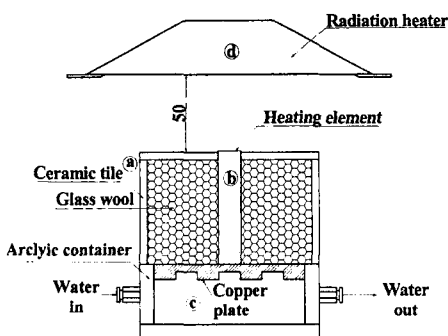
액적 공급부는 액적을 일정하게 토출해 주도록 제작된 액적 발생기 ⑩과 일정 양의 물을 공급해주는 Syringe pump ⑪로 구성되어 있다.

Fig. 2는 가열 모듈의 형상을 나타낸 그림이다. 케이스 ③a는 세라믹 타일을 사용하여 가공하였으며, 내부에는 grass wool을 채웠다. 가열체 ⑥는 하부를 등온으로 유지하기 위하여 등온 모듈에 접촉하도록 위치시켰다. 등온 모듈 ③c는 가열체와의 열전달이 잘 일어나도록 상부에 열전도도가 좋은 동판을 사용하였고, 외부는 아크릴판을 사용하여 제작하였다. 히터 ④는 가열체 표면 위쪽에 복사 히터를 설치하였고, 열유속은 복사 히터에서 가열체 표면으로 전달된다.

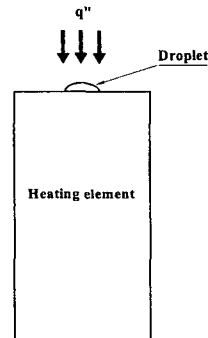
2.2 실험방법 및 범위

표면에 부착되기 전의 액적의 초기온도는 가열면과 복사 히터에서 발생한 열에 의하여 온도가 상승하므로 냉각수를 이용하여 감소시키고, 외기온도는 항온 항습실을 일정한 온도(25.5℃)로 작동시켜 유지시킨다.

액적 크기는 표면에 떨어질 때 촬영으로 얻은 화상을 분석하여 직경을 계산하고, 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 무게를 측정하였다. 측정결과 ±3% 이내로 잘 일치하였다. 또한 고속카메라를 이용하여 액적의 총 증발시간과 변화를 관찰하였으며, 데이터 획득장치로부터 온도데이터를 얻었다. 데이터의 해석 방법은 Kline et al.⁽¹⁴⁾과 Moffat^(15,16)에 의해 제시된 해석 방법을 이용하였다. Table 1에 액적 실험의 변수



(a) Heating condition



(b) The direction of heat flux

Fig. 2 Schematic diagrams of heating module (unit: mm).

Table 1 Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & Initial droplet temperature	Surrounding : $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ Initial droplet : $25 \pm 0.3^\circ\text{C}$
Surface temperature	80~140 $^\circ\text{C}$
Heater temperature	173~307 $^\circ\text{C}$
Heat flux of heater	1.796kW~5.969kW/m ²
Surface material	Stainless steel (SUS 304)
Droplet diameter	$\Phi=3.0$ mm
Surface roughness	$R_a=0.08, 0.18, 0.64$ μm

와 범위를 요약하여 나타내었다.

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 ± 0.25 mm이며, 질량의 불확실도는 ± 0.0001 g이다. 시간의 불확실도는 고속카메라의 기본 측정시간인 0.0167 s로 나타났다. 이와 같은 기본적인 파라미터들의 불확실도로부터 특정조건에 대해 계산된 불확실도는 온도의 경우 $\pm 0.32^\circ\text{C}$ 이고, 길이의 경우 ± 0.2501 mm이다.

2.3 표면온도와 열유속의 이론적인 해석

본 실험에서 표면온도와 표면 열유속 변화는 물체 내의 측정온도로부터 열전달이나 열유속을 구하는 전도역산을 이용하여 계산하였다.⁽¹⁶⁾

이를 위해 Fig. 3과 같이 물체 내부의 두 점의 온도 $T_1=f(t)$, $T_2=g(t)$ 는 열전대를 통하여

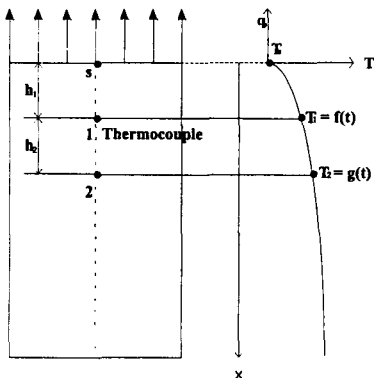


Fig. 3 1-dimensional transient heat transfer through semi-infinite model.

측정하였다. 여기서 h_1 은 가열고체 표면 s 로부터 1지점 열전대까지의 깊이방향 길이(1.3 mm), h_2 는 1과 2지점 사이의 깊이방향 길이(2 mm), T_s 는 가열고체 표면온도, T_1 과 T_2 는 각각 1, 2지점의 온도를 나타낸다.

1지점에서의 1차원 열전도방정식은 다음과 같이 식(1)로 나타낸다.

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

위 식(1)을 차분 표시하면 다음과 같은 식(2)가 된다.

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

여기서 온도변화가 미소하여 열물성치는 전체에 걸쳐 일정하다고 가정한다. 식(2)로부터 표면온도 T_s 는 식(3)과 같이 구하였다.

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

또, 표면 열유속 q 는 식(4)와 같이 구하였다.

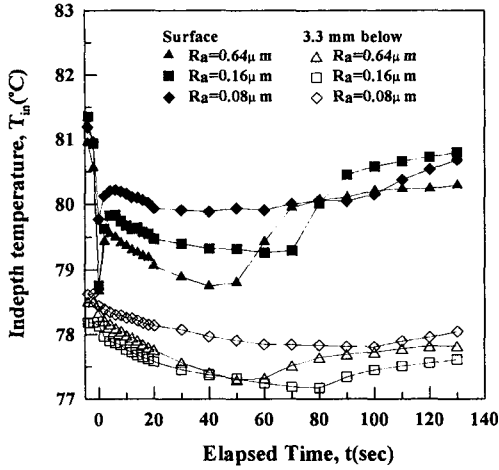
$$q = \left(\frac{k}{h_2}\right)(T_1 - T_2) + \alpha \left(\frac{2h_1 + h_2}{2}\right) \frac{dT_1}{dt} \quad (4)$$

여기서, dT_1/dt 는 전향 차분법으로 하였고, 계산시 수렴 안정성을 위해 $\Delta t \geq 0.3 h_1^2/\alpha$ 인 조건을 만족하도록 하였다.

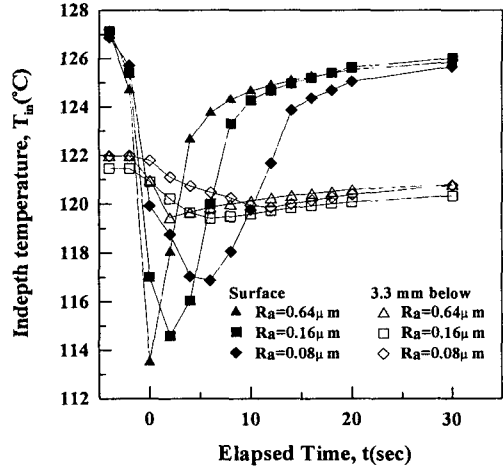
3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면조도 변화에 따른 증발냉각

Fig. 4는 액적 직경이 $\Phi=3.0$ mm, 충돌속도가 $v=1.2148$ m/s, 그리고 복사히터의 열유속이 각각 $q=2.026$ kW/m²와 4.338 kW/m²일 때, 표면조도



(a) $T_{s,o}=81^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{s,o}=127^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 Surface temperature versus elapsed time at $\Phi=3.0\text{ mm}$.

(R_a)를 $0.08\ \mu\text{m}$, $0.16\ \mu\text{m}$, $0.64\ \mu\text{m}$ 로 변화시켰을 경우, 경과시간에 따른 가열 고체의 표면온도와 3.3 mm 아래의 내부온도를 나타낸 그림이다. 여기서 가열고체의 표면온도는 식(3)을 이용하여 매 시간 계산하였다.

Fig. 4(a)는 가열체의 표면온도가 물의 비등점보다 낮은 증발영역을 나타낸 그림이다. 전체적인 가열체의 표면온도 변화는 액적이 부착된 직후 급격히 하강한 후 증가하여 서서히 감소하며 액적 증발이 거의 완료된 후에 다시 상승하여 초기온도로 회복된다.

수직방향의 깊이에 따른 가열체 깊이방향의 온도차는 표면온도가 3.3 mm 아래의 내부온도보다 2.7°C 가량 높고, 액적이 부착된 후 표면온도는 2.5°C 정도 하락한다.

또한 3.3 mm에서의 내부온도는 0.3°C 정도 하락한 후 서서히 감소하고 액적의 증발이 끝난 후 다시 서서히 초기온도로 회복된다. 이는 가열체가 열전도도가 낮은 스테인리스강($k=15\ \text{W/m K}$)이기 때문에 표면에 부착된 액적이 하부에까지 전도 열전달이 잘되지 않기 때문이다.

표면조도가 $0.08\ \mu\text{m}$, $0.16\ \mu\text{m}$, $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때 모두 유사한 성향을 보이고 있으며, 표면조도 $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때가 표면조도 $0.08\ \mu\text{m}$ 일 때보다 온도가 먼저 상승한다. 이는 표면조도가 크면 가열체 표면의 돌기가 액적의 내부까지 침투하여 가열체 표면과 액적 표면 간의 접촉면적이 증가하여 액

적으로 열전달이 잘 일어나기 때문이다.

Fig. 4(b)는 가열체의 표면온도가 물의 비등점보다 높은 비등영역일 때를 나타낸 그림이다. 표면조도가 $0.08\ \mu\text{m}$, $0.16\ \mu\text{m}$, $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때 모두 시간이 경과함에 따라 가열체 표면의 온도는 액적이 표면에 부착된 후 최대 13.5°C 정도까지 하락한 후 곧 회복한다. 이는 초기 액적온도와 초기 표면온도의 차이가 커 물의 비등점보다 13°C 이상 초과하기 때문에 액적 경계면에서 핵비등이 발생하여 액적 내부에서의 열전달이 활발하게 일어나므로 증발시간이 크게 감소한다.

표면조도가 $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때가 표면조도 $0.08\ \mu\text{m}$ 일 때보다 온도감소량이 크고, 증발시간이 짧은 것은 표면조도가 $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때의 접촉각은 41.6981° 이고, 표면조도가 $0.08\ \mu\text{m}$ 일 때의 접촉각은 62.7232° 로 나타나므로, 표면조도에 의한 유효 접촉각이 작아져 기포 핵 생성을 위한 자유에너지가 커지기 때문이다.⁽¹⁷⁾

Fig. 5는 가열체의 표면온도가 증발영역인 81°C 와 비등영역인 127°C 일 때, 무차원 시간에 대한 무차원 체적으로 나타낸 그림이다. 가열체의 표면온도가 증발영역인 81°C 에서는 표면조도에 관계없이 액적의 부피가 일정하고 미소하게 감소하였으나, 표면온도가 비등영역인 127°C 에서는 액적 부피가 오히려 증가하였다. 특히, 표면조도가 $0.08\ \mu\text{m}$ 일 때보다는 표면조도 $0.64\ \mu\text{m}$ 일 때, 초기의 액적보다 약 7.5배까지 증가하였다. 이는 표

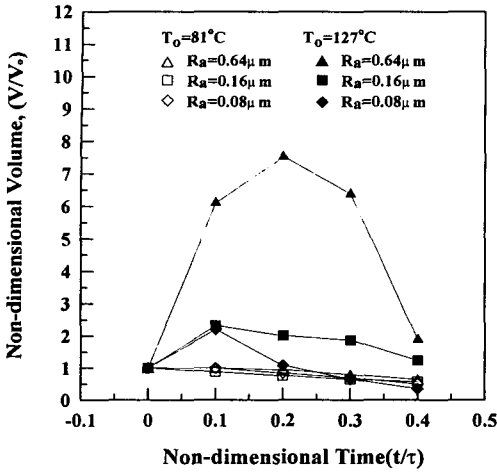


Fig. 5 Non-dimensional volume (V/V_0) versus non-dimensional time (t/τ).

면 온도가 증발영역인 81°C에서는 액적이 표면에 완전히 부착되어 있고, 가열체 표면온도가 물의 비등점(100°C)보다 작기 때문에 액적 내부의 유동은 자연대류 형태이고, 표면온도가 비등영역인 127°C에서는 가열체 표면온도가 물의 비등점(100°C)보다 높기 때문에 액적과 발열체 경계면에서 비등이 일어나고, 이때 발생한 증기의 일부분은 액적의 바깥쪽 표면장력 때문에 액적의 내부에서 순환한다. 이러한 현상이 액적의 부피를 증가시키게 되는 것이다. 또, 표면조도가 클수록 계면에서 발생한 증기량이 많아져 표면조도가 0.08 μm 일 때보다 표면조도가 0.64 μm 일 때가 액적의 부피를 더욱더 증가시킨 것이다. 이러한 현상은 고속카메라로 촬영한 영상자료에서 확인하였다.

Fig. 6는 표면조도가 0.08 μm, 0.16 μm, 0.64 μm 일 때, 초기 표면온도에 따른 총 증발시간을 나타낸 그림이다. 전체 증발시간은 액적이 표면에 부착된 후 발열체면에서 액적이 완전히 증발하는 가열체의 표면온도가 증가함에 따라 전체 증발시간은 감소하였다. 이는 표면온도가 증가하면서 증발률이 증가하기 때문이다. 또한 표면조도가 클수록 증발시간이 짧아진다. 이는 액적과 가열체 경계면의 접촉면적 증가로 인하여 액적으로의 열 전달이 증가하였기 때문이다.

그런데 표면처리된 금속표면은 방사율이 약 0.17로 복사 열유속이 금속 표면을 통해 공급되는 양은 액적 상부 표면을 통하여 유입되는 양에 비해

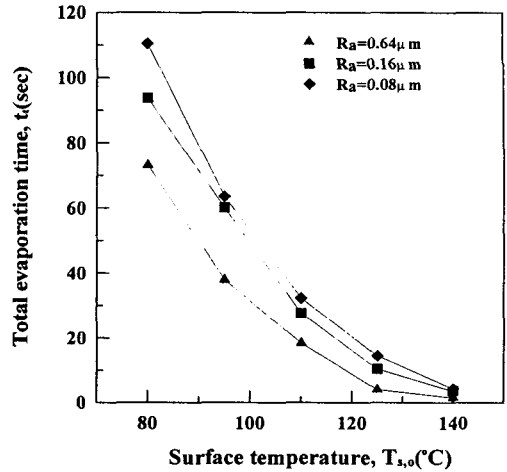


Fig. 6 Total evaporation time versus surface temperature.

매우 미소하다. 따라서 복사장 내에서는 대부분의 열에너지가 액적 표면을 통해 흡수되는 것으로 생각된다. 즉, 표면에 부착된 액적으로 입사되는 열유속의 약 90% 이상이 액적으로 흡수되며, 나머지는 액적에서 고체로 전도되어진다. 또한 액적이 부착되지 않은 면으로 입사되는 열유속은 액적이 부착된 중심부로 전도되어지는 것으로 판단된다.

3.2 경과시간에 따른 열유속 분포

Fig. 7은 액적 직경이 3.0 mm이고 표면조도가 0.08 μm, 0.16 μm, 0.64 μm 일 때, 경과시간에 따른 액적과 가열면의 경계면에서 순수하게 증발에 의해 증가된 액적증발에 따른 열유속 변화만을 나타낸 그림이다.

Fig. 7(a)는 가열체의 표면온도가 물의 비등점보다 낮은 81°C일 때, 경과시간에 따른 열유속을 나타낸 그림이다.

액적이 부착된 직후 가열체의 열유속은 증가하여 최대값을 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 것으로 사료된다.

열유속은 표면조도 0.64 μm 일 때가 크게 나타

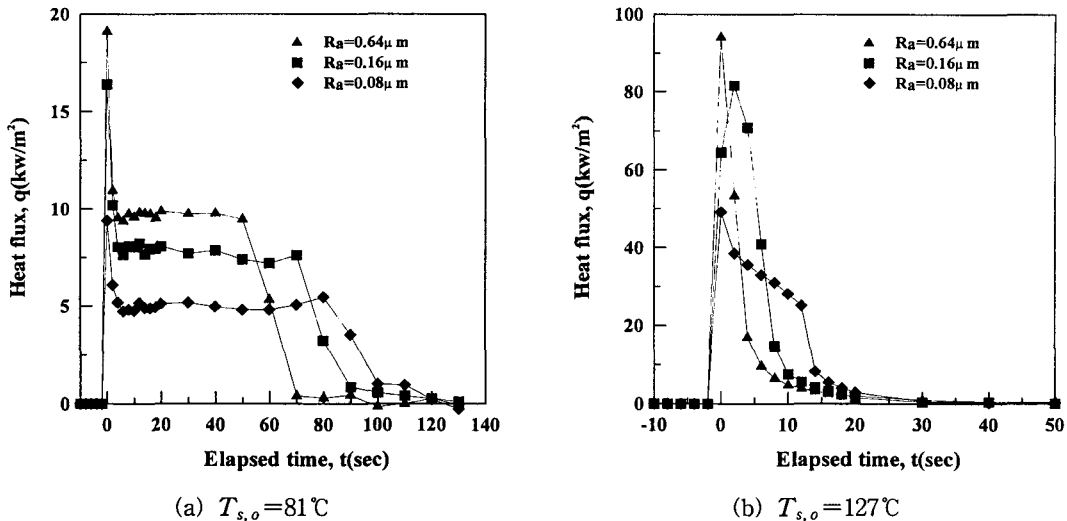


Fig. 7 Time-averaged heat flux with initial surface temperature at $\phi=3.0$ mm.

나고, $0.08 \mu\text{m}$ 일 때가 작게 나타났다. 이는 표면 조도가 클수록 액적과 가열체 표면과의 접촉면적이 커 액적으로 전달되는 열전달량이 증대하기 때문이다. 이것은 증발시간과도 연관되므로 표면 조도가 클수록 증발시간이 짧아지는 것은 앞의 Fig. 4의 성향과 같다.

Fig. 7(b)는 가열체의 표면온도가 물의 비등점보다 높은 127°C 일 때, 경과시간에 따른 열유속을 나타낸 그림이다.

액적이 부착된 직후 가열체의 열유속은 급격히 증가한 후 다시 감소한다. 이는 가열체의 표면온도가 물의 비등점보다 높은 핵비등 영역으로 액적이 접촉한 후 비등이 일어나므로 액적과 가열체 표면과의 열전달이 활발히 일어나기 때문이다.

그리고 표면조도가 $0.08 \mu\text{m}$ 인 경우에는 열유속이 급격히 하락하지 않고 있는데, 이는 열전달면적이 작아 전열량이 감소하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 복사장 내에서의 순수한 물의 액적 증발냉각 특성을 조사하기 위하여 가열체의 표면온도를 $T_s = 80 \sim 140^\circ\text{C}$ 의 범위로 가열한 후, 표면조도 $R_a = 0.08 \sim 0.64 \mu\text{m}$, 액적 직경 $\phi = 3.0$ mm일 때, 액적 증발 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증발 경과시간에 따른 가열체의 표면온도

및 내부온도는 표면조도가 클수록 초기 표면온도로 도달하는 시간이 짧았으며, 액적의 전체 증발 시간도 짧았다.

(2) 액적의 부피는 가열체의 표면온도가 비등 영역인 127°C 일 때, 비등의 영향으로 액적 내부에서 증기량이 많이 발생하여 증가하였으며, 표면조도 $0.64 \mu\text{m}$ 일 때가 가장 크게 증가하였다.

(3) 가열체의 표면온도가 81°C 일 경우에서의 열유속은 표면조도 $0.64 \mu\text{m}$ 일 때가 크게 나타나고, $0.08 \mu\text{m}$ 일 때가 작게 나타났으며, 127°C 일 경우에는 표면조도 $0.08 \mu\text{m}$ 일 때 표면조도가 $0.64 \mu\text{m}$ 일 때와 같이 열유속이 급격히 하락하지 않았다.

참고문헌

1. Korea Institute of Fire and Safety, 1997, Technique of Fire Extinguishing, Shinsun Press, pp. 198-201.
2. Kim, B. H., Kim, Y. P., Moon, C. J., Hong, C. H., Yi, H. W. and Choi, H. H., 2003, A study on the performance of water mist spray fire protection system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 15, No. 7, pp. 572-578.
3. Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, H. W., 2001, Evaporation cooling phenomena of droplets

- containing fire suppression agents, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 13, No. 9, pp. 895-904.
4. Kim, S. C. and Ryou, H. S., 2003, A study on the fire suppression characteristics using a water mist, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 15, No. 4, pp. 261-267.
 5. Gottfried, B. S., Lee, C. J. and Bell, K. J., 1966, The leidenfrost phenomenon: Film boiling of liquid droplets on a flat plate, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, pp. 1167-1187.
 6. Bonacina, C., DelGiudice, S. and Comini, G., 1979, Dropwise evaporation, J. Heat Transfer, Vol. 101, pp. 441-446.
 7. Rizza, J. J., 1981, A numerical solution to dropwise evaporation, J. Heat Transfer, Vol. 103, pp. 501-507.
 8. DiMarzo, M. and Evans, D. D., 1989, Evaporation of a water droplet deposited on a hot high thermal conductivity surface, J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 210-213.
 9. Abu-Zaid, M. and Atreya, A., 1994, Transient cooling of hot porous and nonporous ceramic solids by droplet evaporation, J. Heat Transfer, Vol. 116, pp. 694-701.
 10. Kim, C. I., 1998, The study on the fire of radiation heat transfer, Technique of Fire Protection, No. 25, pp. 13-18.
 11. Tartarini, P. and DiMarzo, M., 1994, Dropwise evaporative cooling in radiative field, Experimental Heat Transfer, Vol. 6, pp. 323-329.
 12. Dawson, H. F. and DiMarzo, M., 1995, Multi-droplet evaporation cooling, NIST-GCR, pp. 96-687.
 13. Abu-Zaid, M., 2001 Droplet evaporation on porous and non-porous ceramic solids heated from top, Heat and Mass Transfer, Vol. 38, pp. 203-211.
 14. Kline, S. and McClintok, F. A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, Mechanical Engineering, Jan, pp. 3-8.
 15. Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, J. Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 173-182.
 16. Moffat, R. J., 1988, Describing the uncertainties in experimental results, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp. 3-17.
 17. Lee, S. Y., Kim, B. G. and Kim, M., 1992 Two-phase flow heat transfer, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. IV.1-IV.188.