

## 계면활성제를 첨가한 액적의 증발냉각

유갑종<sup>†</sup> · 방창훈\* · 김현우\*\*

(2002년 6월 17일 접수, 2003년 2월 10일 심사완료)

### Evaporation Cooling of a Droplet containing a Surfactant

Kap-Jong Riu, Chang-Hoon Bang and Hyun-Woo Kim

**Key Words:** Evaporation Cooling(증발냉각), Surfactant(계면활성제), Droplet(액적), Contact angle(접촉각)

#### Abstract

The evaporation cooling phenomenon of a droplet containing a surfactant on a heated surface has been studied experimentally. The two kinds of heater modules made of brass and Teflon™ were tested to investigate the cooling characteristics of droplet. Solutions of water containing Sodium Lauryl Sulfate(0 ppm, 100 ppm, 1000 ppm) were tested in the experiments. The results showed that the contact angle decrease as the concentration of surfactant increases. The tendency did not vary with different heated solid materials. As initial temperature of the heated surface becomes high, time averaged heat flux increases and evaporation time decreases with the denser concentration of surfactant. Therefore, water with denser concentration of surfactant could be effective to cool flammable materials. However, the effect of surfactant becomes low as the material temperature is higher than the boiling temperature of water.

#### 기호설명

- c : 비열 [J/kg °C]
- h : 깊이 [m]
- k : 열전도도 [W/m °C]
- t : 시간 [sec]
- T : 온도 [°C]
- $\alpha$  : 열확산계수 [m<sup>2</sup>/s]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\theta$  : 접촉각 [deg]
- q : 시간 평균 열유속 [kW/m<sup>2</sup>]

#### 하첨자

- o : 초기값
- s : 고체표면

#### 1. 서론

소화제에 사용되는 첨가제는 물소화제 사용시 발생하는 동결을 방지하고, 액적의 표면장력, 점도, 열전도도 등의 물성치를 변화시킨다. 또한 분무된 소화제 액적의 접촉력 증가는 액적의 표면장력을 감소시켜 고체 표면에 접촉면적을 증가시킨다. 접촉면적의 증가는 곧바로 열전달의 향상을 유발시킨다.

따라서 최근 새로운 첨가제에 대한 관심이 증가하면서 이에 따른 냉각능력 변화에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

특히 액적의 접촉각 변화는 열전달 향상에 크게 영향을 줌으로 많은 연구가 진행되고 있으며 이와 관련된 연구로, Dimarzo 등<sup>(4)</sup>은 액적이 증발하는 동안 접촉각은 연속적으로 감소하며, 액적의 접촉면적은 일정하다고 가정하였으며, Simmon 등<sup>(5)</sup>은 액체와 고체의 접촉직경이 일정하다는 가

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부  
E-mail : kjriu@knu.ac.kr  
TEL : (053)950-5571 FAX : (053)950-6550

\* 회원, 경북전문대학 소방안전관리과

\*\* 회원, 경북대학교 대학원

정은 항상 정확한 것은 아니며, 접촉각은 후퇴 접촉각(receding contact angle)이라 불리는 최소값 이하로는 감소할 수 없다고 보고하였다. Sadhal 등<sup>(6)</sup>은 액체-증기의 상호 접촉면의 온도가 주위 온도와 같고 전체 증발 과정 동안 접촉각이 일정하다고 가정하여 수치해석을 수행하였다. Petke 등<sup>(7)</sup>은 다양한 폴리머 표면에 부착된 다양한 유체의 온도에 따른 접촉각 변화를 실험적으로 연구하였다. 이들은 5°C ~ 160°C 범위의 표면 온도 변화에 따라 나타나는 다양한 진진 접촉각(advancing contact angle)과 후퇴 접촉각에 대한 결과를 나타내었다.

건축재료의 다양화로 인하여 화재시 고온에 노출되는 재료의 열전도도, 표면물성, 기공도 등이 다양화되어 이에 대한 연구 또한 진행되고 있다.<sup>(8)</sup>

국내의 유사한 연구로는 이동환 등<sup>(9)</sup>은 가열된 경사평면에 충돌하는 단일 액적의 증발냉각을 고속카메라를 이용하여 연구하였으며, 유 등<sup>(10)</sup>은 가열된 고체표면에 부착된 단일 액적의 증발냉각 특성을 가열 고체의 재질과 액적의 크기를 변화시켜 실험적으로 연구하였다.

이상에서와 같이 액적의 증발은 고체 표면의 재질, 온도 및 접촉각 변화에 따라 영향을 받으므로, 이에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 계면활성제가 첨가된 액적의 증발냉각현상을 고체표면의 재질과 계면활성제의 농도에 따라 자세히 규명하려 한다.

## 2 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험 장치의 구성에 대한 보다 자세한 자료는 참고문헌(10), (11)과 같다.

Fig. 2는 가열 고체의 형상과 열전대의 위치와 히터의 기하학적 형상을 나타낸 그림이다.

가열고체가 황동일 때, 전체 길이를 70 mm로 목부분 직경이 8 mm, 하부 직경이 25 mm인 원통형으로 제작하였다. 열전대는 가열 고체의 표면으로부터 깊이 방향으로 5개 부착하였으며 온도 제어용 열전대는 깊이 68 mm에 1개 설치하였다. 테프론은 열전도도가 낮기 때문에 축대칭의 2차원 열전도를 고려하여 Fig. 2(b)와 같이 전체

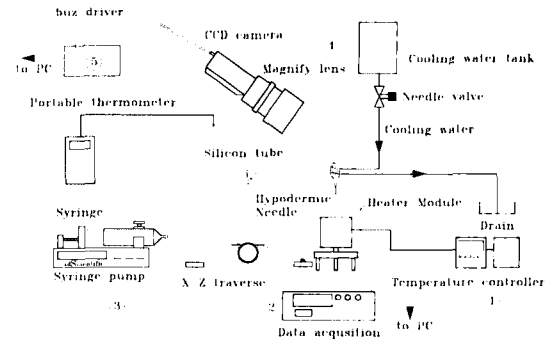


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

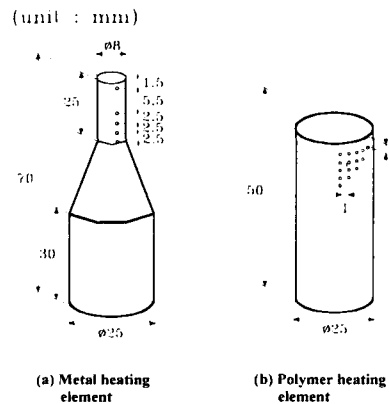


Fig. 2 Schematic diagram of metal and Teflon heating elements

길이가 50 mm이고 직경이 25 mm인 원통형으로 하였다. 열전대는 중심축에서 깊이방향으로 1mm 간격으로 5개를 심고, 중심축에서 반경방향으로 1mm씩 떨어진 곳에 깊이 방향으로 1개씩 덜 심어 총 15개를 심었다.

### 2.2 실험 방법 및 실험 범위

주위의 온도는 25.5±0.5°C로 설정하였고, 액적의 온도는 25.5±0.25°C로 하였다. 가열 고체의 재질로는 황동과 테프론을 사용하였다. 순수한 물에 첨가된 계면활성제로는 성능이 우수하고 최근 많이 사용하는 황산나트륨(Sodium Sulfate (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>CH<sub>2</sub>OSO<sub>3</sub>Na))를 사용하였으며, 농도에 따른 영향을 규명하기 위하여 농도를 0 ppm, 100 ppm, 1000 ppm(중량비, w/w)으로 하였다. 이때 계면활성제의 농도는 물의 물성치를 변화시키지 않을 만큼의 미소한 양으로 하였다.<sup>(12)</sup>

**Table 1** Parameters and experimental ranges for droplet experiments

Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding : $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ Initial droplet : $25 \pm 0.25^\circ\text{C}$
Surface temperature	$70^\circ\text{C} \sim 116^\circ\text{C}$
Surface material	Brass, Teflon
Droplet diameter	2.5 mm

**Table 2** Surface tension of solutions

Solution(w/w)	Concentration (ppm)	Surface tension (dyne/cm)
Pure water	0	73.4
Sodium Sulfate	100	30.8
	1,000	26.6

또한 액적의 열 물성치는 Cengel<sup>(13)</sup>의 자료를 이용하였다.

증발시간은 고체 표면에서 물이 완전히 증발할 때까지로 하였고, 온도 변화는 열전대를 통하여 측정하였으며 시간에 따른 변화는 CCD카메라를 이용하여 기록하였다.

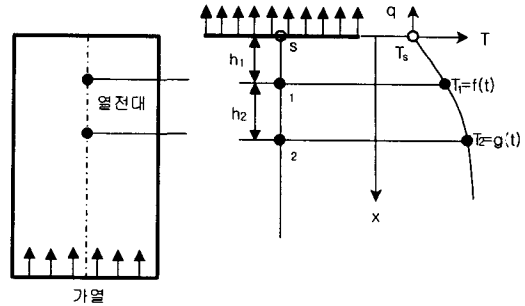
본 실험에서 측정된 온도의 불확실도는  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 이고, 제어되는 히터의 온도는  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는  $\pm 0.25\text{ mm}$  정도이고, 질량의 불확실도는  $\pm 0.0001\text{ g}$ 이다. 시간의 불확실도는 CCD카메라의 기본 측정 시간인 1/30 S이고, 최대오차는 0.17%로 나타났다. 화상 데이터의 불확실도는  $\pm 7\mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한 온도와 증발시부터 계산된 증발 열유속은 최대  $\pm 9\%$ 로 나타났다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 나타내었으며, 각 수용액의 표면장력은 Table 2에 나타내었다.

**2.3 열전도의 역산**

본 실험에서는 표면온도와 표면 열유속 변화를 전도역산을 통하여 계산하였다.

이를 위해 Fig. 3과 같이 물체 내부의 2점의 온도  $T_1 = f(t)$ ,  $T_2 = g(t)$  를 열전대를 통하여 측정하였다.  $h_1$ 은 가열고체 표면 s로부터 1지점 열전대까지의 깊이방향 길이(1.5mm),  $h_2$ 는 1과



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

2지점 사이의 깊이방향 길이(5.5mm),  $T_s$ 는 가열고체 표면온도,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 1, 2지점의 온도이다.

Fig. 3은 가열고체가 황동일 때에 적용하고 테프론은 2차원 전도역산을 수행하여 구하였다. 1지점에 있어서 1차원 열전도 방정식을 식 (1)로 나타내고 이를 차분표시하면 식 (2)가 된다.

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

$$\left(\frac{1}{\alpha}\right) \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_2 - T_1)/h_2 - (T_1 - T_s)/h_1}{(h_1 + h_2)/2} \quad (2)$$

온도변화가 미소하여 열물성치는 전체에 걸쳐 일정하다고 가정한다. 식 (2)로부터 표면온도  $T_s$ 는 식 (3)과 같이 구해진다.  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $\alpha$ 는 각각 가열고체의 밀도, 비열, 열전도도, 열확산계수이다.

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

또 표면의 열유속 q는 식(4)로 구해진다.

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

여기서  $dT_1/dt$ 는 전향차분법으로 하였다. 또한 계산시 수렴안정성을 위해  $\Delta t \geq 0.3 h_1^2/\alpha$ 인 조건을 만족하도록 하였다.

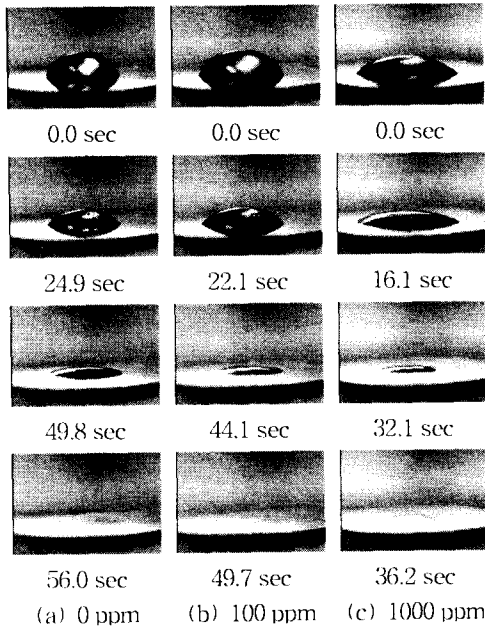


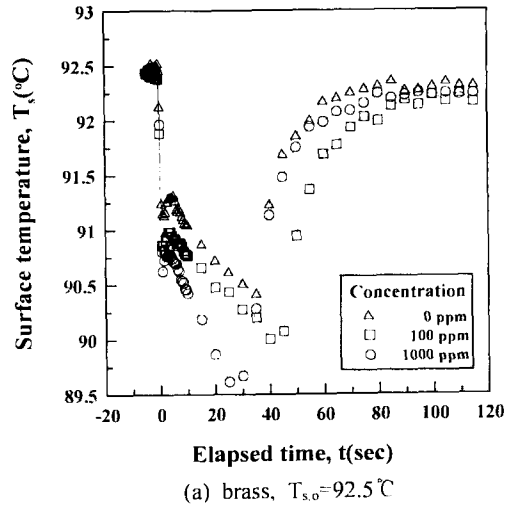
Fig. 4 Evaporation of droplets of surfactant solutions(0 ppm, 100 ppm, 1000 ppm) on brass,  $T_{s,0}=92.5^\circ\text{C}$ ,  $d_0=2.5\text{ mm}$

### 3. 실험결과 및 고찰

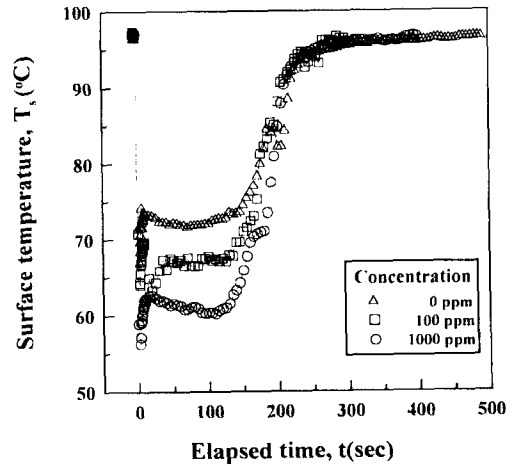
Fig. 4는 가열 고체의 재질이 황동일 때, 가열 고체표면의 초기온도에 따른 액적의 증발현상용 시간에 따라 촬영한 그림중의 일부이다.

그림은 각각의 가열 고체 표면의 초기 온도에서 액적이 부착되는 순간으로부터 증발이 완료되는 시점까지 4단계로 나누어 나타내었으며, 각 그림의 하부에는 액적의 증발시작으로부터 경과한 시간을 표시하였다. 즉 0 ppm일 때 증발 완료시간은 56 초, 100 ppm일 때 증발 완료시간은 49.7 초, 1000 ppm일 때 증발 완료시간은 36.2 초이다.

계면활성제를 포함한 용액에서 그 농도가 증가하면 표면에 계면활성제가 흡착하고 표면장력은 감소한다.<sup>(14)</sup> 이에 따라 접촉각이 작아지며 접촉면적은 증가한다. 이에 따라 고체와 액적 사이의 열전달이 활발히 일어나서 증발시간이 짧아진다. 그러나 Table 2에서처럼 표면장력은 0 ppm에서 100 ppm까지 42.6 dyne/cm 감소한 반면 100 ppm에서 1,000 ppm까지는 4.2 dyne/cm 감소하였다. 따라서 증발시간에 영향을 미치는 접촉각은



(a) brass,  $T_{s,0}=92.5^\circ\text{C}$



(b) Teflon,  $T_{s,0}=97.5^\circ\text{C}$

Fig. 5 The variation of in-depth temperature versus elapsed time for surfactant solutions. [(a) brass,  $T_{s,0}=92.5^\circ\text{C}$ , (b) Teflon,  $T_{s,0}=97.5^\circ\text{C}$ ]

액체의 표면장력에만 의존하는 것은 아닌 것으로 생각되며 이에 대한 연구는 계속 수행할 예정이다.

Fig. 5는 액적 부착 후 시간에 따른 고체표면의 온도 변화를 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다.

전체적인 온도분포는 고온체와 액적의 초기 접촉에 의한 급속 감소대와 이후 액적의 점자적인 증발에 의한 완만 감소대 그리고 초기온도로 회복하는 지수적 증가대로 구분할 수 있다.

Fig. 5(a)는 가열 고체의 재질이 황동이고, 초기 표면온도가 92.5℃일 때의 표면온도변화를 나타낸 그림이다. 표면온도는 액적이 부착된 고체 표면의 중심점에서 깊이 방향으로 1.5 mm, 7.0 mm 인 두 곳에서 측정된 온도로부터 전도를 역산하여 구하였다.<sup>(15)</sup>

액적 부착 후 고체표면의 온도는 급격히 하강하여 약 1℃ 상승 후 다시 서서히 낮아져서 최소 값에 도달한 후 상승하여 초기 온도로 회복된다. 또한 최소 온도에 도달하는 시점은 1,000 ppm이 100 ppm과 0 ppm보다 약 15초 빨리 나타난다.

계면활성제의 농도에 따른 영향으로 100 ppm과 1000 ppm은 0 ppm(순수한 물)에 비하여 온도 감소가 다소 크게 나타났다. 이는 액적에 첨가된 계면활성제에 의하여 액적의 표면 장력이 감소하였기 때문에 접촉각이 감소하고 접촉면적이 증가하여 액적이 고체 표면을 빨리 냉각시키기 때문이다. 또한 100 ppm과 1000 ppm을 비교하면 1000 ppm의 경우 100 ppm보다 액적 부착 초기 넓은 접촉면적에서 고체 표면을 많이 냉각시키기 때문에 100 ppm보다 조금 더 낮은 온도로 된다.

Fig. 5(b)는 가열 고체의 재질이 테프론이고, 초기 표면온도가 97.5℃일 때를 나타낸 그림이다. 표면온도는 깊이 방향으로 1.0 mm, 2.0 mm에서 측정된 온도를 이용하여 전도역산으로 구하였다.

액적 부착 초기 온도는 급강하 한 후 다시 5~6℃ 회복한 후 서서히 감소하여 최소 값을 나타낸 후 초기 온도로 회복한다. 전반적으로 Fig. 5(a)에 비하여 계면활성제의 첨가에 따른 영향이 크게 나타나고 있다. 이는 테프론의 열전도도가 작아 열이 확산되는 영역이 액적 접촉 영역으로 한정되고, 계면활성제에 의하여 물의 표면 장력이 약화되어 저 표면에너지의 테프론 표면에서 접촉면적이 증가하여 나타난 결과로 사료된다.

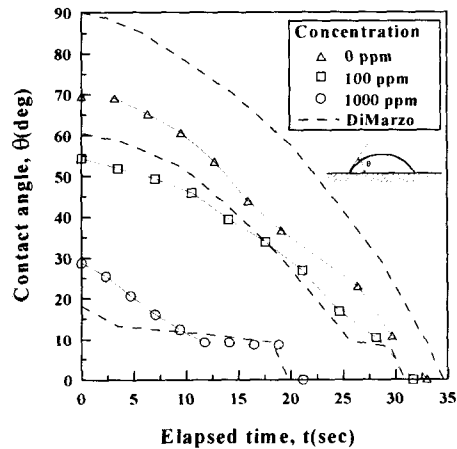
Fig. 6은 액적 부착 후 시간에 따른 접촉각 변화를 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다. 접촉각은 고체-액체-기체 접촉점에서 액체표면에 접선을 그을 때 접선과 고체 사이의 각도로 정의하였다.<sup>(16)</sup>

Fig. 6(a)는 가열 고체의 재질이 황동이고, 초기 표면온도가 92.5℃일 때의 접촉각 변화를 나타낸 그림이다.

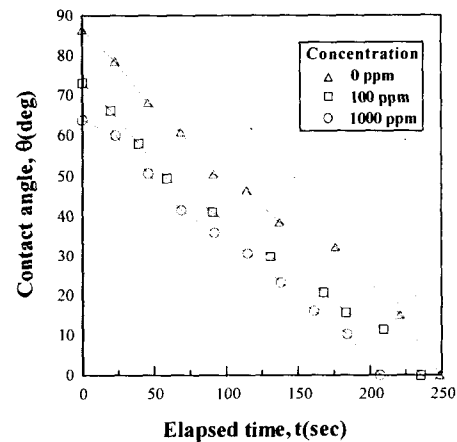
계면활성제의 농도가 증가할수록 접촉각이 작게 나타나며, 0 ppm(순수한 물)일 때는 초기 접

촉각이 약 70°, 100 ppm일 때는 55°, 1000 ppm일 때는 28° 정도로 나타났다. 또한 0 ppm, 100 ppm의 경우 시간에 따라 일정하게 접촉각이 감소하고 있으나, 1000 ppm의 경우는 일정하게 감소하다 접촉각의 변화가 거의 없는 기간이 존재한다. 이때의 접촉각이 후퇴접촉각이며 이러한 성향은 기존의 연구결과<sup>(4)</sup>와 잘 일치한다.

접촉각이 일정하게 감소하는 것은 접촉면적의 변화 없이 액적의 표면에서 증발이 순차적으로 일어나는 것을 의미하며,<sup>(17)</sup> 증발기간 동안에 접촉각이 일정한 것은 접촉면적이 줄어들면서 증발하기 때문이다.<sup>(6)</sup>



(a) Brass,  $T_{s,0}=92.5^{\circ}\text{C}$



(b) Teflon,  $T_{s,0}=97.5^{\circ}\text{C}$

Fig. 6 The variation of contact angle versus elapsed time for surfactant solutions, [(a) brass,  $T_{s,0}=92.5^{\circ}\text{C}$ , (b) Teflon,  $T_{s,0}=97.5^{\circ}\text{C}$ ]

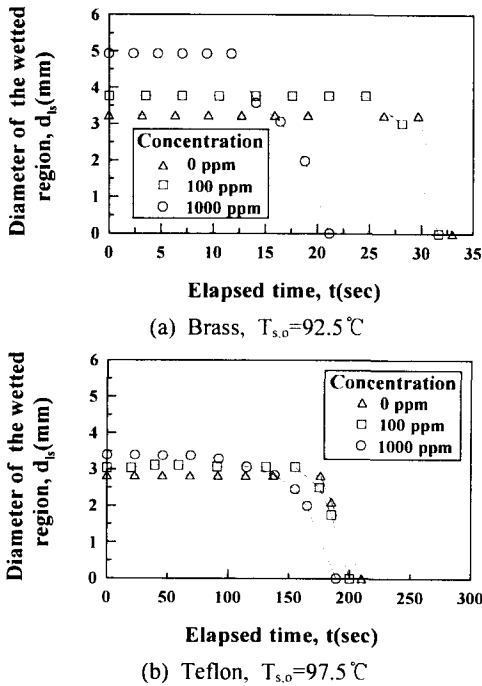


Fig. 7 The variation of diameter of the wetted region versus elapsed time for surfactant solutions. [(a) brass,  $T_{s,o}=92.5^{\circ}\text{C}$ , (b) Teflon,  $T_{s,o}=97.5^{\circ}\text{C}$ ]

Fig. 6(b)는 가열 고체의 재질이 테프론, 초기 표면온도가  $97.5^{\circ}\text{C}$ 일 때의 접촉각 변화를 나타낸 그림이다.

Fig. 6(a)와 같이 시간이 지남에 따라 접촉각은 일정하게 감소하고 있으며, 계면활성제의 농도의 차에 따라 접촉각의 차는 작게 나타난다. 이는 테프론이 저 표면에너지에 갖고 있기 때문이다. 또한 시간에 따른 접촉각의 감소는 황동과 비교하여 작게 나타난다. 이는 테프론의 열전도도가 매우 작아 표면온도가 낮고 증발동안 표면온도 변화가 작기 때문에 나타난 현상으로 생각된다.

Fig. 7은 액적 부착 후 시간에 따른 액적의 접촉직경 변화를 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다.

Fig. 7(a)는 가열 고체의 재질이 황동이고, 초기 표면온도가  $92.5^{\circ}\text{C}$ 일 때의 접촉직경 변화를 나타낸 그림이다.

전반적으로 액적이 부착된 후 일정 기간 동안 액적의 직경은 일정하게 유지되며, 이후 급격히 감소한다. 즉 일정기간 접촉 직경의 변화가 없는

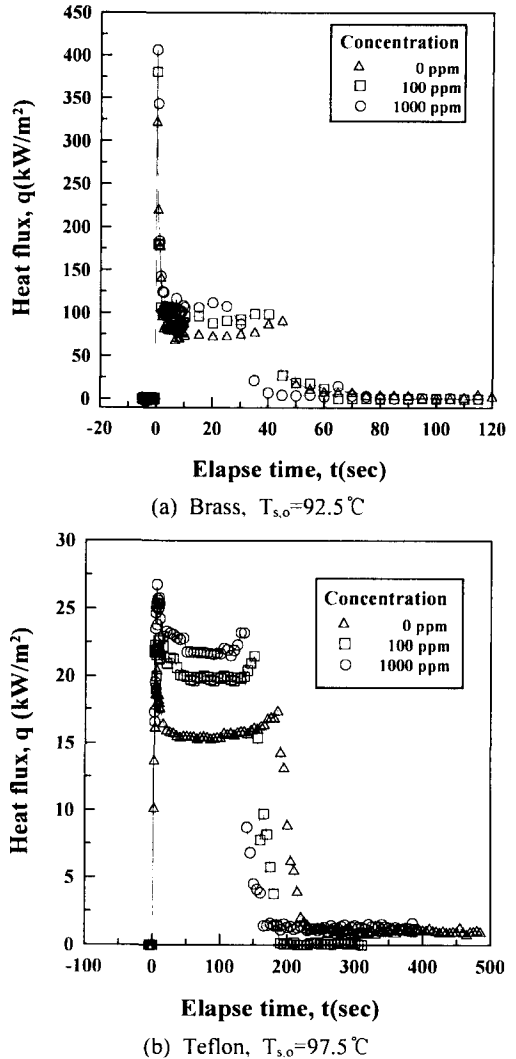


Fig. 8 Time-averaged heat flux with initial surface temperature for surfactant solutions. [(a) brass, (b) Teflon]

것은 액적의 표면 장력과 액적과 고체 표면과의 경계면 장력이 균형을 이루고 있기 때문이며, 이후 급격히 감소하는 기간이 발생하는데 이는 증발 후기에 액적이 급격히 증발하면서 나타난 현상이며 사진 촬영 실험에서도 확인할 수 있었다.

동일한 액적 직경에 대하여 0 ppm의 경우가 가장 작은 접촉직경을 나타내었으며 증발기간 동안 접촉각의 변화는 거의 없다. 1000 ppm의 경우에 가장 큰 접촉 직경을 나타내었다.

Fig. 7(b)는 가열 고체의 재질이 테프론이고, 초

기 표면온도가 97.5℃일 때의 접촉직경 변화를 나타낸 그림이다.

계면활성제의 농도가 1000 ppm의 경우에 가장 큰 접촉직경을 나타내지만 Fig. 6(a)와 비교하여 접촉직경의 차이가 크게 나타나지 않는다.

Fig. 8은 액적 부착 후 시간에 따른 가열 고체 표면 열유속을 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다. 시간에 따른 열유속은 전도역산을 통하여 구하였다.

Fig. 8(a)는 가열 고체의 재질이 황동이고 초기 표면온도가 92.5℃일 때의 시간에 따른 열유속 변화를 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다.

액적 부착 후 고체의 열유속은 급격히 증가하여 최대 값을 나타낸 후 급속히 감소하여 일정한 값을 유지하고 표면온도가 최소가 되는 지점에서 약간 증가 후 감소한다.

초기에 급격한 열유속의 증가는 서로 다른 온도의 물체가 접촉함에 따른 비정상 열전도에 의한 것이고 이후 일정한 구간은 증발에 의하여 점진적으로 열전달이 발생하는 구간으로 생각된다.

또한 액적의 농도에 따른 변화로 1,000 ppm의 경우 가장 큰 열유속 변화를 나타내는데 이는 초기 접촉면적이 크기 때문에 비정상 열전도가 초기에 가장 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 8(b)는 가열 고체의 재질이 테프론이고 초기온도가 97.5℃일 때의 시간에 따른 열유속 변화를 계면활성제의 농도에 따라 나타낸 그림이다.

초기의 열유속 상승은 황동과 비교하여 크게 나타나지 않으며 일정 열유속 지속시간이 길게 나타나고 있다. 이는 테프론의 열전도도가 낮기 때문에 서로 다른 온도의 반무한 고체의 접촉 시 열전도도가 낮은 경우 열유속이 감소하는 것과 동일한 원리이다. 또한 일정한 열유속 기간동안 황동과 비교하여 낮은 열유속을 나타낸다. 이는 테프론의 열전도도가 작기 때문에 고체로부터 액적으로 전달되는 단위시간당 열량이 작기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 계면활성제가 첨가된 액적의 증발냉각 특성을 실험적으로 연구하였으며, 계면활

성제로는 Sodium Sulfate를, 가열 고체로는 황동과 테프론을 사용하였다. 고체 내부의 온도, 액적의 증발시간, 접촉각 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면활성제의 농도가 증가할수록 접촉각은 감소하고, 열유속은 증가한다.

(2) 표면온도변화는 황동보다 테프론이 더 급격히 나타나고 계면활성제 첨가량에 따라서도 테프론이 표면온도차가 크게 난다.

(3) 가열 고체에 따른 열유속 변화는 황동일 때가 테프론일 때보다 급격히 발생하며 크기도 10배 이상 차이가 난다.

(4) 화재가 전파되지 않은 미가연면을 고려할 경우, 순수물보다 상대적으로 접촉면적이 큰 계면활성제 첨가 소화제가 단시간내에 가연물을 냉각시킬 수 있어서 화재진압에 대한 특성이 더 우수하다.

#### 참고문헌

- (1) Yang, J. C., Donnelly, M. K., Prive, N. C. and Grosshandler, W. L., 1998, "An Apparatus for Evaluating Liquid Fire Suppressants," *Proc. HOTWC-98*.
- (2) Chien, W., Yang, J. C., King, M. and Grosshandler, W. L., 1996, "Evaporation of a Small Aqueous Suppressing Agent Droplet," *Annual Conference on Fire Research* Gaithersburg, Maryland October, pp. 5~6.
- (3) Qiao, Y. M. and Chandra, S., 1995, "Evaporative Cooling Enhancement by Addition of Surfactant to Water Drops on a Hot Surface," *ASME HTD* Vol. 304-2, pp. 63~71.
- (4) DiMarzo M. and Evans D. D., 1989, "Evaporation of a Water Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface," *J. of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 210~213.
- (5) Simmon, F. F. and Hsu, Y. Y., 1971, "Wetting Dynamics of Evaporating Drops on Various Surfaces," *NASA TM X-67913*.
- (6) 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.

- (7) Petke, F. D. and Ray, B. R., 1960, "Temperature Dependence of Contact Angles of Liquids on Polymeric Solids," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 216~227.
- (8) Abu-Zaid, M. and Atreya, A., 1994, "Transient Cooling of Hot Porous and Nonporous Ceramic Solids by Droplet Evaporation," *Trans. ASME*, Vol. 116, pp. 694~701.
- (9) Lee, D. H. and Kang, B. S., 1998, "A Study on the Behavior of a Droplet Impacting onto a Hot Surface," *Proc. KSME 1998 Fall Annual Meeting B*, pp. 575~583.
- (10) Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, J. S., 2001, "Evaporation Cooling of Single Droplet on a Heated Solid Surface", *KSME B*, Vol. 25, No. 6, pp. 845~852.
- (11) Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, H. W., 2001, "Evaporation Cooling Phenomena of Droplets Containing Fire Suppression Agents," *SAREK*, Vol 13, No. 9, pp. 895~903.
- (12) Chandra, S., DiMarzo, M., Qiao, Y. M. and Tartarini, P., 1995, "Effect of solid-liquid Contact Angle on Droplet Evaporation," *NIST-GCR-96-687*.
- (13) Cengel Y. A. and Boles M. A., 1994, *Thermodynamics*, McGraw-Hill, Int. ed.
- (14) Karsa, D. R., 1987, "Industrial Applications of Surfactants," D. R. Karsa ed., *The Royal Soc. of Chemistry*, London.
- (15) Ozisik, M. N. and Orlande, H. R. B., 2000, *Inverse Heat Transfer*, *CIP*
- (16) Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, *Hemisphere*
- (17) Zhang, N. and Yang, W. J., 1982, "Natural Convection in Evaporating Minute Drops," *J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 656~662.