

물액적에 의한 미연소면의 냉각에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Cooling of Unburned Surface due to Water Droplet

방창훈* · 김정수** · 예용택***

Chang Hoon Bang* · Jung Soo Kim** · Yong Taeg Yea***

*경북전문대학 소방안전관리과
**경북대학교 대학원 기계공학부
***경일대학교 기계공학부

요 약

본 연구의 목적은 물액적에 의한 미연소면의 냉각 특성을 연구하는 것이다. 고온고체로는 황동, 탄소강, 동을 사용하였으며 온도범위는 70°C~116°C이다. 액적의 직경은 2.4 mm~3.0 mm로 하였다. CCD카메라를 이용하여 액적의 증발과정을 기록하였으며, 증발시간은 비디오에 기록된 프레임을 분석하여 구하였다. 열전도도가 가장 큰 동은 액적이 떨어진 직후 조금 냉각되었다가 일정 온도를 유지하지만 열전도도가 낮은 탄소강의 경우는 증발시간 동안 약 1°C 정도의 온도 기울기가 나타났다. 고체 표면에서의 액적 증발시 무차원 액적체적은 가열체의 재질에 상관없이 무차원 증발시간이 증가할수록 선형적으로 감소한다.

ABSTRACT

The objective of the present work is to examine the cooling characteristics of water droplet on the unburned surface. The hot solid surface material used brass, carbon steel and copper at temperature ranging from 70 to 116°C. the droplet size is from 2.4 mm to 3.0 mm. The CCD camera was used to record the evaporation histories of the droplets. and the evaporation time of the droplet on the hot solid surface could be determined by using frame-by-frame analysis of the video records. It is found that during the droplet evaporation process for copper the temperature remains nearly constant, whereas for carbon steel the temperature continuously decreases about 1°C. During the droplet evaporation process on the hot solid surface, regardless of solid materials, nondimensional droplet volume decreases nondimensional evaporation time increases.

Keywords : fire suppression, unburned objects, evaporation characteristics

1. 서 론

물을 이용한 소화 방법에는 크게 화염에 직접 분무하는 방식과 화염이 아직 전파되지 않은 가연물을 냉각하여 화염의 전파를 막는 방법으로 나눌수가 있으며, 실제 화재 현장에서 소화 활동을 관찰하면 화염이 전파된 곳에 분무를 하지 않고 미연소 가연물에 분무를 하는 것을 볼 수 있다. 이는 소량의 물로 주위를 냉각시켜 연소를 방지하기 위한 소화 방법이다. 따라서 소량의 물을 이용하여 화재를 억제하기 위한 소화 방법의 연구를 위해서는 발화되지 않은 저온 영역의 가연물에

대한 액적의 냉각 특성을 연구하는 것이 필수적이다.¹⁾

분무된 액적의 증발을 온도 범위에 따라 분류할 경우, Fig. 1과 같이 고체 표면의 과열도(degree of superheat)에 따라 일반적으로 낮은, 중간, 높은 과열도 영역으로 분류할 수 있다.

화재가 전파되지 않은 영역은 낮은 과열도 영역으로 대부분의 연구자들은 가열 고체의 표면온도, 액적의 크기 등이 액적의 증발 냉각에 미치는 영향을 연구하였다.^{1,7)} 그러나 이를 실제 화재소화에 직접 이용하기 위해서는 매우 미흡하며 액적의 증발 냉각에 대한 자세한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 화염이 전파되지 않은 미연소면에서의 액적의 증발 냉각 특성을 구명하기 위하여 열전도

† E-mail: bch@mail.kbc.ac.kr

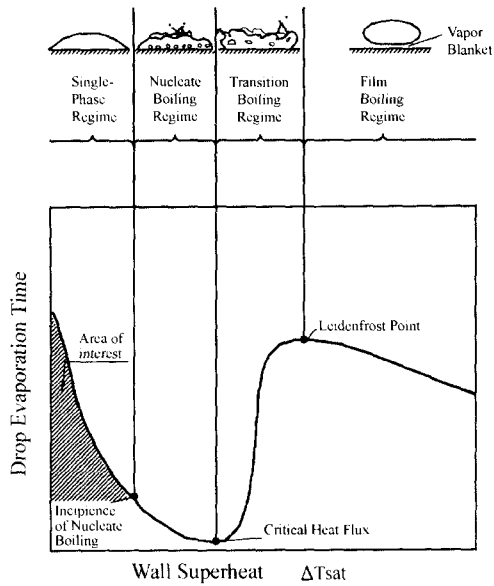


Fig. 1. Sessile droplet evaporation curve and experiment range.

도에 따라 동, 황동, 탄소강등의 금속을 사용하였으며 액적의 크기는 2.4 mm~3.0 mm로 변화시켰다. 이를 위하여 액적이 가연물의 표면에 떨어지는 순간부터 증발이 완료될 때까지 고속 사진 촬영에 의하여 액적의 증발현상을 조사하고, 가연물의 내부온도를 측정하여 냉각특성을 구명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 액적의 증발 냉각을 위한 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 전원 공급부 ①, 데이

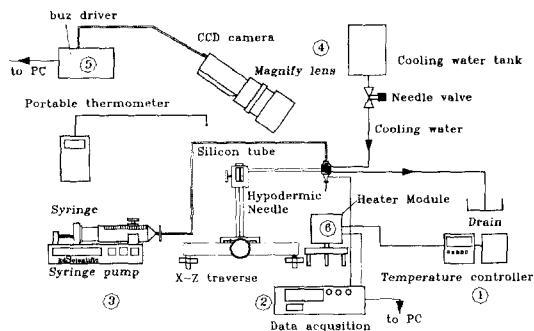


Fig. 2. Schematic diagram of over all apparatus of droplet experiment.

터 처리부 ②, 유량공급부 ③, 냉각수 제어부 ④, 영상 처리부 ⑤, 가열 블록 케이스 ⑥으로 구성되어있다.

전원 공급부 ①은 가열 모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도 제어기(Fuji, pxw-9)와 이 제어기로부터 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기(Spc-101series)로 구성되어있다. 데이터 처리부 ②는 가열 모듈에 부착된 5개 및 액적 발생기에 부착된 1개의 K형 열전대($\Phi = 0.1 \text{ mm}$)의 데이터를 처리하기 위한 데이터 처리장치(Fluke, 2640A)로 구성되어 있다.

유량 공급부 ③은 액적의 속도 및 크기를 조절하기 위한 정유량 조절기(KD scientific model 100)와 일정 온도의 액적을 발생시키는 액적 발생기 및 액적의 직경을 조절하기 위한 22~28 gauge의 주사 바늘과 소형 X-Z Traverse로 구성되어있다. 액적 발생기는 알루미늄과 황동으로 제작하였다. 주사 바늘은 바늘 끝에 액적이 일정한 형태로 형성되도록 평평하게 만들어진 상용제품을 사용하였다.

냉각수 제어부 ④는 액적 발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량 조절 밸브, 액적 발생기를 냉각시키기 위한 열 교환기로 구성되어 있다.

영상 처리부 ⑤는 영상처리를 위해서 고해상도 CCD 카메라와 CCD 카메라에서 얻은 영상을 처리하기 위한 영상 처리장치로 구성되어 있다. 영상처리용 CCD 카메라에는 확대 렌즈가 부착하였다.

가열 블록 케이스 ⑥은 외부 치수가 140×140×100 mm이다.

Fig. 3은 가열 고체의 형상과 열전대의 위치와 히터의 기하학적 형상을 나타낸 그림이다. 전체 길이를 70 mm로 목(neck)부분 직경이 8 mm, 하부 직경이 25

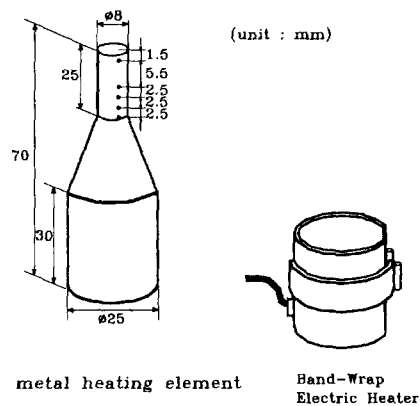


Fig. 3. Schematic diagram of the heating element and band-wrap electric heater.

mm인 원통형으로 제작하였다. 열전대는 가열 고체의 표면으로부터 깊이 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm, 14.5 mm에 각각 5개 부착하였으며 온도 제어용 열전대는 깊이 68 mm에 1개 설치하였다. 가열 고체를 가열하기 위한 히터는 240 V, 200 W인 밴드형을 사용하였다. 가열 고체인 동, 황동, 탄소강 표면은 #2000 사포로 연마한 후에 10 μm의 크롬을 도금하였다.

2.2 실험 방법 및 실험 범위

주위의 온도는 25.5°C±0.5°C로 설정하였고, 액적의 온도는 25.5±0.25°C로 하였다. 증발시 고체에 물이 완전히 증발할 때까지를 증발시간으로 하였다. 또한 실험동안 온도 변화를 열전대를 통하여 측정하고, 시간에 따른 변화는 CCD 카메라를 이용하여 기록하였다.

열전도도에 따른 영향을 조사하기 위하여 동, 황동, 탄소강을 사용하였다. 표면 온도는 70°C~116°C이다. 액적의 직경은 2.4 mm(28 gauge)~3.0 mm(22 gauge)로 하였다.

액적의 열 물성치는 Cengel⁶⁾를 이용하였다. 실험에 사용한 순수 물은 증류수를 100°C까지 가열하여 물 속의 기체를 제거한 후 사용하였다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 가열 고체의 초기 표면 온도가 84.7°C이고 액적 직경이 3.0 mm이며 가열 고체의 재질이 황동일 때, 액적 부착 후 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 그림이다. 온도측정위치는 접촉면에서 깊이방향으로 고체 표면의 중심점에서 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm, 14.5 mm이다.

증발기간은 액적이 부착된 후 액적이 완전히 증발하여 고체 표면에서 물의 흔적이 완전히 없어지는 상태까지 측정할 값으로 정의하고 있으며, 이후 시간은 회복기간으로 정의하였다.⁷⁾

Table 1. Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding : 25±0.5°C Initial droplet : 25±0.25°C
Surface temperature	70°C~116°C
Surface material	Brass, Carbon steel Copper
Droplet diameter	2.4 mm~3.0 mm

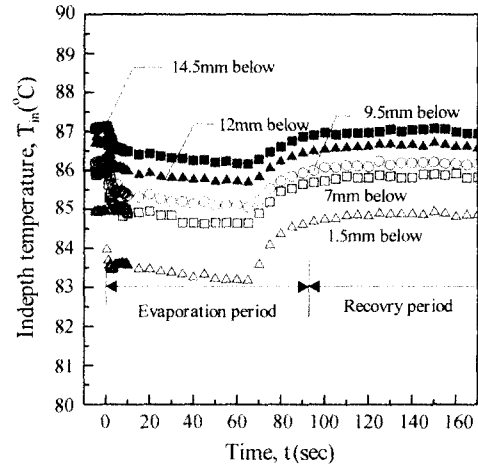


Fig. 4. In-depth temperature variation of brass versus time for a 3.0 mm water droplet, T_{s,0} = 84.7°C.

고체 내부의 온도는 액적 부착시 급격히 하강하고 다시 서서히 감소하여 최소 값에 도달한 후 다시 증가하여 고체 표면의 초기 온도로 회복되고 있다. 급격한 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 부착 후 고체 표면이 액적에 의하여 냉각되어 나타나는 현상이며 이후 액적에 의하여 고체 표면은 지속적으로 냉각되어 최소 값을 나타낸다. 다시 온도가 상승하는 것은 액적의 증발이 거의 완료되어 액적에 의한 냉각 효과는 없어지고 주위 고체로부터의 전도열전달로 인하여 표면 온도가 상승하기 때문이다.

Photo 1은 액적 직경이 3.0 mm, 가열 고체의 재질이 황동일 때, 가열 고체 표면의 초기 온도에 따른 액적의 증발 현상을 시간에 따라 초당 30 프레임으로 촬영한 사진중의 일부이다. 또한 사진 촬영시 액적 증발 기간동안의 고체의 내부온도, 액적의 접촉각, 형상비를 측정하였다.

Fig. 5는 액적이 고체 표면에 부착하여 접촉면 온도가 67.7°C에 도달한 이후 준 정적 상태의 액적 내부의 온도분포를 계면의 수직방향(z축)에 따라 나타난 계산결과로서 고체 표면과 액적 사이의 접촉면 온도는 고체 표면의 종류에 관계없이 부착전의 액적 및 고체의 초기 온도에 의하여 결정되는 온도이며, 액적 내부의 온도분포는 1차원적으로 고려한 반 무한 접촉모델을 사용하였다.^{9,10)}

액적 내부의 온도구배는 t = 0.1초일 때 매우 크며, t = 10초에서는 거의 선형적으로 나타난다.

Fig. 6은 액적 직경이 3.0 mm이고 가열 고체의 재질이 동, 황동, 탄소강일 때, 액적 부착 후 시간에 따른

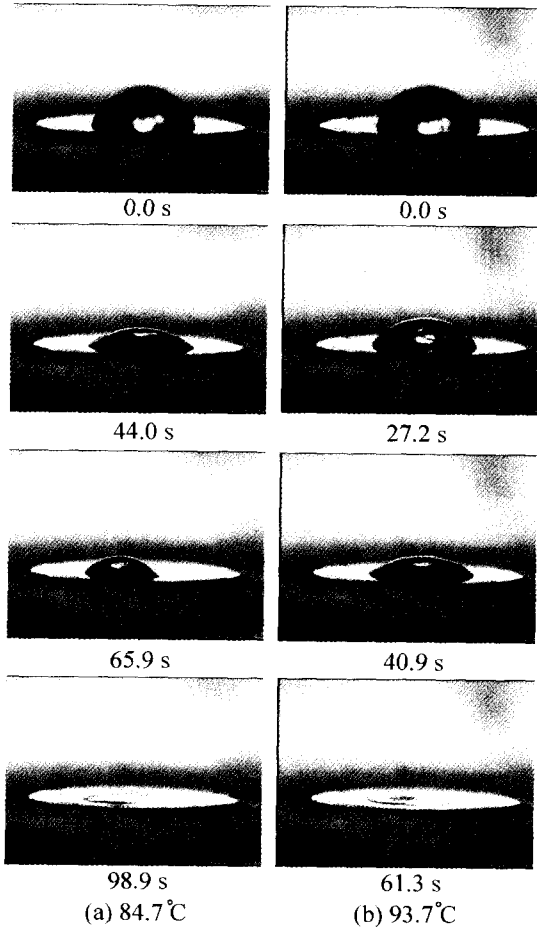


Photo. 1. Evaporation of droplets of water as initial surface temperature (a) 84.7°C, (b) 93.7°C on brass, $d_0 = 3.0$ mm.

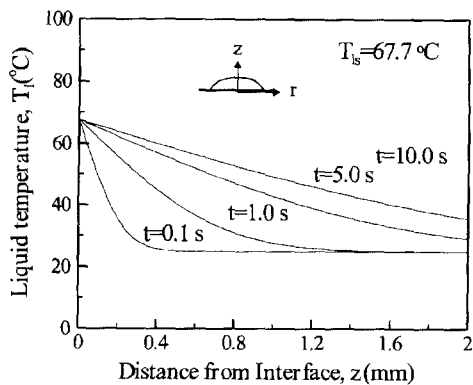


Fig. 5. Transient temperature profiles in a droplet for interface temperatures at 67.7°C.

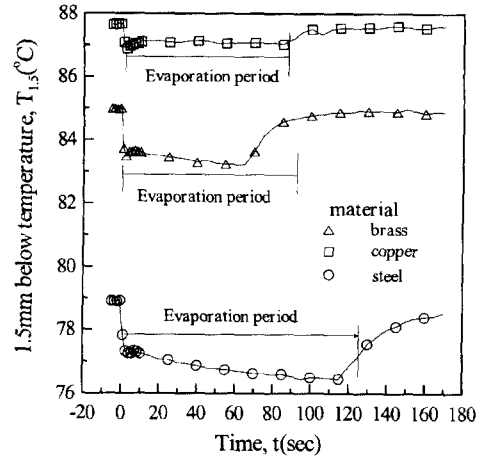


Fig. 6. 1.5 mm below temperature variation with time for various heating materials, $d_0 = 3.0$ mm.

온도 변화를 나타낸 그림이다.

가열면 재료의 열전도도에 따라서 액적이 부착된 후의 시간에 따른 냉각곡선의 기울기가 다르게 나타나고 있다. 열전도도가 가장 우수한 동 경우 액적이 떨어진 직후 조금 냉각되었다가 일정 온도를 유지하고 있다. 이는 열전도도가 높은 재료의 경우 액적 부착 초기의 온도가 액적이 증발하는 동안 거의 일정하게 유지된다는 사실¹¹⁾과 잘 일치하고 있다. 그러나 탄소강의 경우는 증발시간 동안 약 1°C 정도의 온도 기울기가 나타난다. 이는 열전도도가 낮은 재료의 경우 액적의 증발에 필요한 잠열이 고체로부터 원활히 전달되지 않음을 의미한다.

Fig. 7은 액적 직경이 3.0 mm이고 가열 고체의 재질이 동, 황동, 탄소강일 때, 액적 부착 후 무차원 시간에 따른 무차원 체적 변화를 나타낸 그림이다.

전반적으로 무차원 체적은 가열체의 재질에 상관없이 무차원 시간이 증가할수록 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 액적의 체적 감소율은 재료의 열전도도와 상관없이 시간에 따라 일정하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 가열면의 재질이 황동일 때, 액적 직경에 따른 시간 평균 열유속(q)을 초기표면온도($T_{s,0}$)에 따라 나타낸 그림이다.

시간 평균 열유속(q)¹²⁾은 증발기간동안 고체와 액적의 경계면에서 고체로부터 액적으로 전달된 평균 열유속으로 식(1)과 같다.

$$q = (2d_0 \rho_l \lambda') / (3t_e) \tag{1}$$

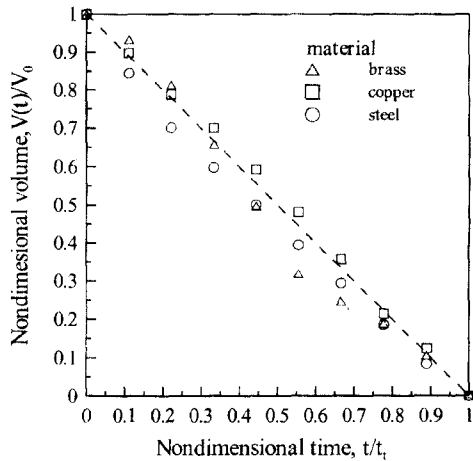


Fig. 7. Nondimensional volume variation with nondimensional time for various heating materials, $d_0 = 3.0$ mm.

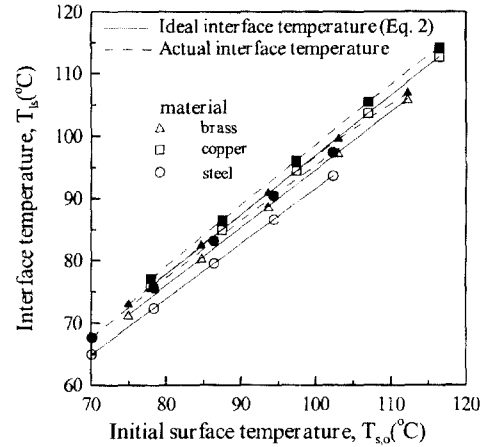


Fig. 9. Interface temperature with initial surface temperature for various heating materials.

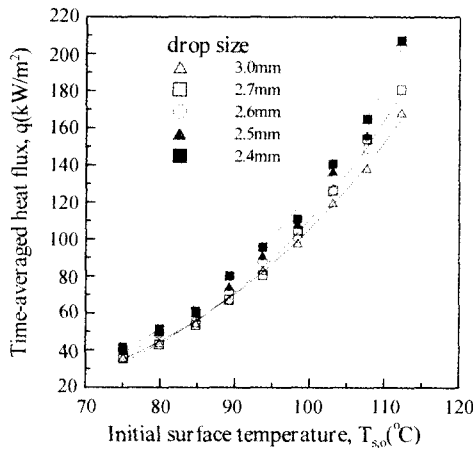


Fig. 8. Time-averaged heat flux with initial surface temperature on brass for various initial droplet diameters.

여기서 $\lambda' = \lambda + c_p (T_d - T_\infty)$ 는 유효 증발잠열이고, T_d 는 액적의 시간 평균 온도이다.

전반적으로 초기 표면온도가 증가하면 시간 평균 열유속은 지수적으로 증가하며, 액적 직경이 작을수록 시간 평균 열유속이 크게 나타난다. 이는 액적의 크기가 작은 경우 증발시간이 액적이 큰 경우보다 작기 때문에 시간 평균 열유속이 크게 나타난다.¹³⁾

Fig. 9는 가열 고체 표면의 초기 온도에 대한 고체와 액적과의 계면의 온도 변화를 재질에 따라 나타낸 그림이다.

그림에서 이론적인 접촉면 온도¹⁴⁾는 식 (2)으로 구한 것이고, 실험에서 구한 접촉면 온도는 증발기간 동안의

액적과 고체와의 계면 온도를 평균한 값을 사용하였다.

$$T_{ls} = \frac{(kpc_p)_s^{0.5}T_{s,o} + (kpc_p)_l^{0.5}T_{l,p}}{(kpc_p)_s^{0.5} + (kpc_p)_l^{0.5}} \quad (2)$$

본 연구의 금속면에 대한 실험치는 참고문헌¹⁴⁾에서 제시한 식 (2)으로 계산한 값과 최대 3°C 이내에서 일치하였다.

4. 결 론

화염이 전파되지 않은 미연소면에서의 액적의 증발 냉각 특성을 연구하기 위하여 가연물의 열전도도에 따라 동, 황동, 탄소강 등의 금속을 사용하였으며 액적의 크기는 2.4 mm~3.0 mm로 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화염이 전파되지 않은 미연소 고체표면에 액적부착시 열전도도가 가장 큰 동은 경우 액적이 떨어진 직후 조금 냉각되었다가 일정 온도를 유지하지만 열전도도가 낮은 탄소강의 경우는 증발시간 동안 약 1°C 정도의 온도 기울기가 나타났다.
2. 고체 표면에서의 액적 증발시 무차원 액적체적은 가열체의 재질에 상관없이 무차원 증발시간이 증가할수록 선형적으로 감소한다.
3. 초기 표면온도가 증가하면 시간 평균 열유속은 지수적으로 증가하며, 액적 직경이 작을수록 시간 평균 열유속이 크게 나타난다.
4. 액적이 부착된 계면에서의 이론적인 접촉면온도와 실험적으로 구한 접촉면온도가 최대 3°C 이내에서 일치하였다.

참고문헌

1. DiMarzo, M., Evans, D. D., "Evaporation of a Water Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface," J. of Heat Transfer, Vol. 111, 210-213(1989)
2. Klassen, M., DiMarzo, M., "Transient Cooling of a Hot Surface by Droplets Evaporation," NIST-GCR 90-575(1990)
3. DiMarzo, M., Kidder, C. H., Tartarini, P., "Infrared Thermography of Dropwise Evaporative Cooling of a Semi-Infinite Solid Subjected to Radiant Heat Input," Experimental Heat Transfer, Vol. 5, pp. 101-114(1992)
4. Tartarini, P., DiMarzo, M., "Dropwise Evaporative Cooling in Radiative Field," Experimental Heat Transfer, Vol. 6 (1994)
5. 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)
6. Chandra, S., DiMarzo, M., Qiao, Y. M., Tartarini, P., "Effect of solid-liquid Contact Angle on Droplet Evaporation," NIST-GCR-96-687(1995)
7. King, M. D., Yang, J. C., Chien, W. S., Grosshandler, W. L., "Evaporation of a Small Water Droplet Containing an Additive," Proc. of the ASME National Heat Transfer Conference, Biltmore. (1997)
8. Cengel, Y. A., Boles, M. A., Thermodynamics, McGraw-Hill, Int. ed (1994)
9. Eckert, E. R. G., Drake, R. M., Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill Inc., New York. (1972)
10. Benardin, J. D., Leidenfrost Point and Film Boiling Heat Transfer of Single Droplets and Sprays, A Thesis of Ph. D. (1996)
11. Zhang, N., Yang, W. J., "Natural Convection in Evaporating Minute Drops," J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 656-662(1982)
12. Bonacina, C., DelGiudice, S., Comini, G., "Dropwise Evaporation," J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 441-446(1979)
13. Makino, K., Michiyoshi, I., "Effects of the Initial Size of water Droplet on Its Evaporation on Heated Surfaces," Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 22. pp. 979-981(1979)
14. A. F. Mills, "Heat Transfer," IRWIN. (1992)