

## 나노유체 액적의 증발에 관한 실험적 연구

김 영 찬\*

\* 안동대학교 기계자동차공학과

### Experimental Study of Evaporation of Nanofluid Droplet

Yeung Chan Kim\*

\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received December 27, 2012 ; Revised May 16, 2013 ; Accepted May 29, 2013)

**Key Words:** Nano-Droplet(나노액적), Contact Angle(접촉각), Surface Roughness(표면조도), Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer Enhancement(열전달촉진)

**초록:** 본 연구에서는 산화구리(CuO) 나노분말과 순수 물을 혼합하여 제조한 나노유체를 이용하여 가열된 고체표면에 있어서 나노유체 액적의 증발특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과로부터 가열된 표면에서 나노유체 액적의 증발속도는 순수 물 액적보다 증발속도가 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었으며, 이는 나노유체에 포함된 나노입자가 유체의 열전도도를 향상시켜 고체 표면에서 액적으로의 열전달이 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 고체의 표면조도가 커질수록 액적의 증발속도가 약간 증가하였으며, 이는 고체의 표면조도가 커질수록 고체-액체의 접촉 면적이 증가하여 열전달이 촉진되었기 때문인 것으로 추정된다.

**Abstract:** The evaporation characteristics of nanofluid droplets on a heated solid surface were experimentally investigated. The experiments were conducted using pure water and a nanofluid of water mixed with CuO nanoparticles, and the solid surface was made of a copper block heated by a nine cartridge heater. The experimental results showed that the evaporation rate of the nanofluid droplet was higher than that of the pure water droplet on the heated solid surface because nanoparticles increased the thermal conductivity of the nanofluid. Furthermore, it was found that the evaporation rate of the nanofluid droplet increased with the solid surface roughness. This may be because the actual area of the liquid-solid interface increased with the solid surface roughness.

#### - 기호설명 -

- q : 열유속 [ $W/m^2$ ]
- R : 열저항 [ $^{\circ}C/W$ ]
- $R_a$  : 표면조도 [ $\mu m$ ]
- $T_a$  : 주위온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $T_s$  : 고체표면온도 [ $^{\circ}C$ ]
- t : 증발시간 [sec]
- $V_d$  : 액적의 부피 [ $\mu l$ ]
- $\theta$  : 액적의 접촉각 [ $^{\circ}$ ]

#### 1. 서 론

일반적으로 증발(evaporation)은 온도가 비교적

낮은 액체의 표면에서 발생하는 상변화(phase change) 현상을 의미하는 경우가 많다. 증발을 이용한 냉각기술은 표면온도가 낮은 냉각물체에 적용할 수는 있지만 열전달계수가 비교적 낮아 강력하고 적극적인 냉각수단으로 활용할 수 없다. 비등(boiling)은 액체의 온도가 포화온도 이상에서 발생하며, 상변화는 주로 액체와 고온물체의 경계면에서 발생하는 현상으로 정의할 수 있다. 특히 핵비등영역에서는 고온물체로부터 큰 열유속(heat flux)을 얻을 수 있어 강력한 냉각수단으로 사용될 수 있다. 최근 고성능 전자장비는 매년 성능과 속도가 빠르게 향상되고 있으나 이와는 반대로 장치의 부피와 크기는 점차 작아지고 있어 이와 같은 전자장비에 대한 강력하고 효과적인 냉각기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 액

† Corresponding Author, yeung@andong.ac.kr  
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

체의 증발 또는 비등과 같은 상변화 현상을 이용한 냉각기술은 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 것으로 판단되며 현재 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 특히 액체를 200 $\mu$ m 이하의 아주 작은 크기로 미립화하여 물체를 냉각시키는 분무냉각기술은 종래의 재료가공, 식품냉동, 소형열교환기 등의 분야는 물론이고 고밀도 전자장비, 생체용 극저온장치의 냉각 등 새로운 분야에의 적용을 목표로 활발히 연구가 진행되고 있다.<sup>(4-6)</sup>

본 연구에서는 단일액적(single droplet)에 대한 증발실험을 수행하여 분무냉각 열전달 연구를 위한 기초자료를 확보하고자 한다. 분무냉각 열전달은 아주 작은 크기로 미립화한 액적을 이용하여 물체를 냉각시키는 기술이기 때문에 단일 액적의 증발거동(evaporation behavior)에 대한 정보가 매우 중요하다고 판단된다. 특히 본 연구에서는 물과 나노유체(nanofluid)를 이용하여 액적의 증발실험을 수행하였으며, 냉각면의 표면조도와 접촉각 등이 액적의 증발거동에 미치는 영향을 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 본 연구에서는 선행연구<sup>(7)</sup>와 마찬가지로 액적의 형상분석을 위해 독일 Krüss사의 액적형상 분석장비(DSA 100)를 활용하였으며, 고체 표면의 온도를 조절하기 위해 Fig 2에 나타난 구리블록을 별도로 제작하여 실험에 활용하였다. Fig. 1에 나타난 실험장치를 이용하여 가열된 표면에서 액적이 증발하거나 비등하는 과정에 있어서 액적의 직경, 부피, 접촉각 등과 같은 액적의 형상을 분석하였다. Fig. 2에 나타난 구리블록은 전열면의 직경이 약 9.0mm이며, 전열면과 반대쪽에는 직경이 60mm인 원통형 구리블록에 용량이 220 watt인 카트리지 히터를 9개 삽입하여 전열면에 열유속을 인가할 수 있도록 제작하였다. 전열면에 인가되는 열유속은 전원조절기를 이용하여 조절하였으며, 전열면의 표면으로부터 약 1.0 mm 아래 위치에 직경 0.5 mm의 K Type 열전대를 삽입하여 전열면의 온도를 측정하였다. 전열면의 표면온도는 이 지점에서 측정된 온도에 기초하여 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다. 이 구리블록은 단열성이 좋은 유리섬유와 천 등을 이용

하여 표면을 완전히 단열한 후에 실험을 수행하였다. 또한 구리블록의 전열면은 #2000, #400, #60의 3종류의 샌드페이퍼로 연마하여 표면조도를 측정 후 실험에 활용하였다. 실험은 일정부피의 액적을 전열면에 공급하여 접촉각을 측정하거나, 증발과정을 촬영한 후에 액적의 형상을 분석하는 방법으로 진행하였다. 본 실험에서는 5~25 $\mu$ l 부피 범위의 액적을 이용하여 우선 전열면에 열유속을 인가하지 않은 상태에서 액적이 자연적으로 증발하는 과정을 촬영하고 증발시간을 측정하였다. 이 경우 액적은 순수 표면현상에 의해 증발이 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 다음 단계에서는 구리블록에 5~35 watt 범위의 열유속을 인가하여 전열면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서 전열면에 액적을 공급하여 액적이 증발하는 과정을 촬영하고 액적의 형상을 관찰하였다. 또한 본 실험에서는 초음파 가습기를 이용하여 상대습도를 일정하게 유지한 후 모든 증발 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 순수 물과 순수 물에 80nm 크기의 산화구리(CuO) 분말을 첨가한 나노유체를 실험에 활용하였다. 구리는 비교적 열전도도가

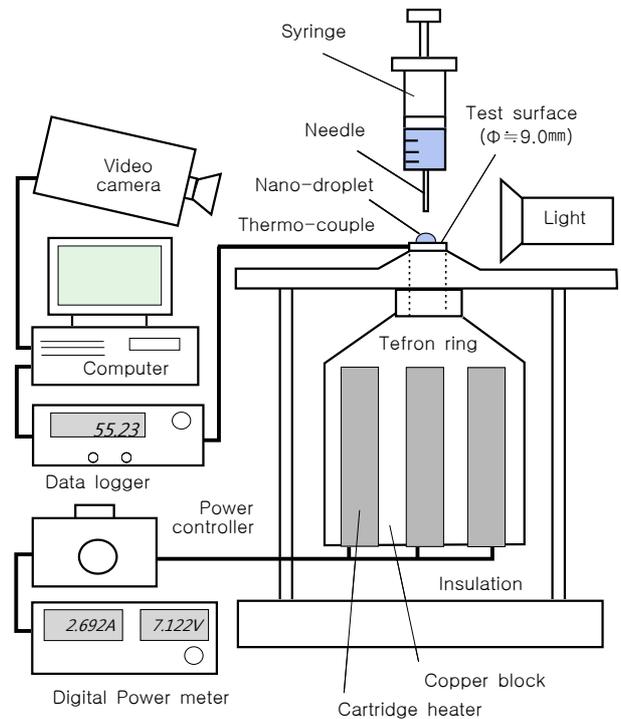


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

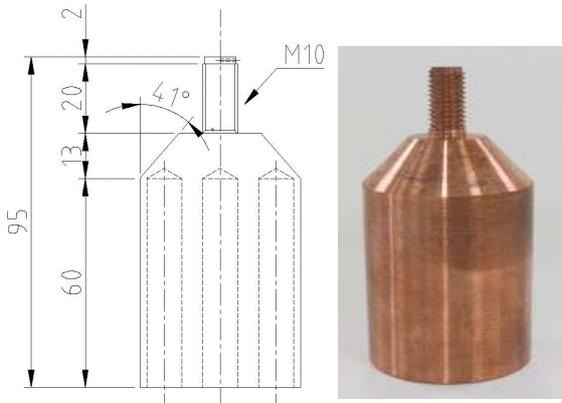


Fig. 2 Schematic of copper block

우수하며, 또한 전열면이 구리로 제작되었기 때문에 나노입자가 전열면에 부착되어도 전열면 표면의 열물성이 거의 변하지 않을 것으로 판단하였다. 나노유체는 0.5% 부피농도로 제조하였으며, 이 나노유체는 실험시작 전 2시간 정도 초음파 진동에 의해 나노입자들을 안정적으로 분산시킨 후 실험에 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 고체 표면의 온도를 액적의 온도와 동일하게 설정한 상태에서 액적의 증발과정을 관찰하는 자연증발실험과 고체의 표면을 일정 온도로 가열하여 액적의 증발과정을 관찰하는 가열증발실험, 두 종류의 실험을 수행하였다. Fig. 3에는 액적의 부피를 동일하게 설정하고 액적의 초기 접촉각을 변화시켜 액적의 자연증발시간을 측정한 실험결과를 나타내었다. 본 실험에서는 적절한 부피의 액적을 전열면에 낙하시킨 후 니들(needle)을 이용하여 초기부피와 접촉각을 조절한 후 증발실험을 수행하였다. Fig. 3으로부터 동일한 부피의 액적에 있어서 액적의 초기 접촉각이 작을수록 증발이 더 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 이는 액적의 초기 접촉각이 감소할수록 액적의 표면적이 증가하여 표면증발이 활발히 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 액적의 부피, 초기 접촉각 등의 실험조건을 동일하게 설정한 상태에서 순수 물과 나노유체 액적의 자연증발시간을 측정한 결과를

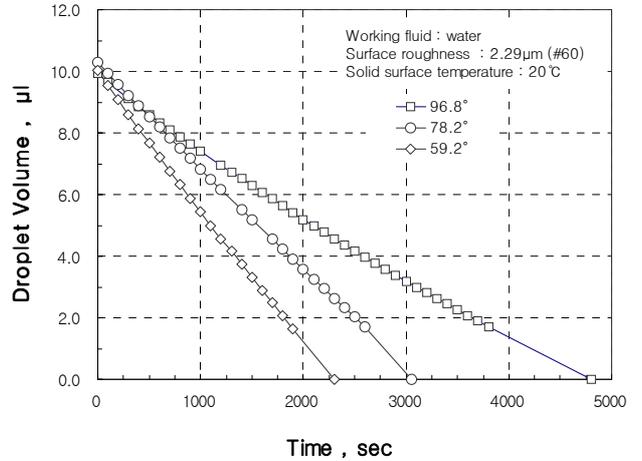


Fig. 3 Variations of droplet volume for different initial contact angles (pure water)

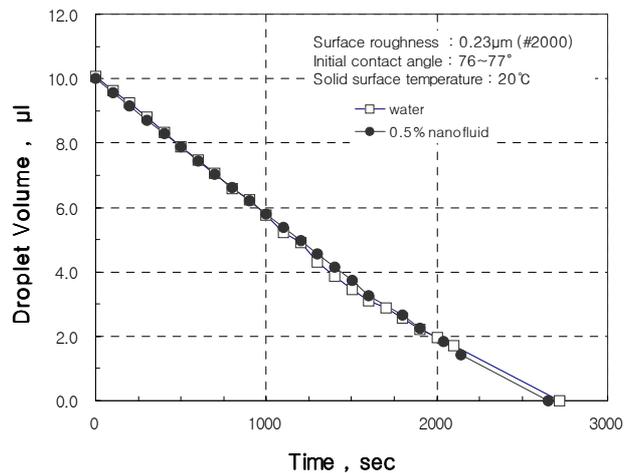
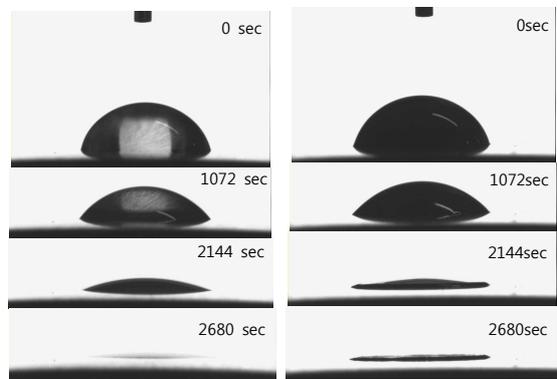


Fig. 4 Variations of droplet volume for pure water and 0.5% nano-fluid



(a) Pure water (b) 0.5% Nano-fluid

Fig. 5 Time history of evaporating droplets

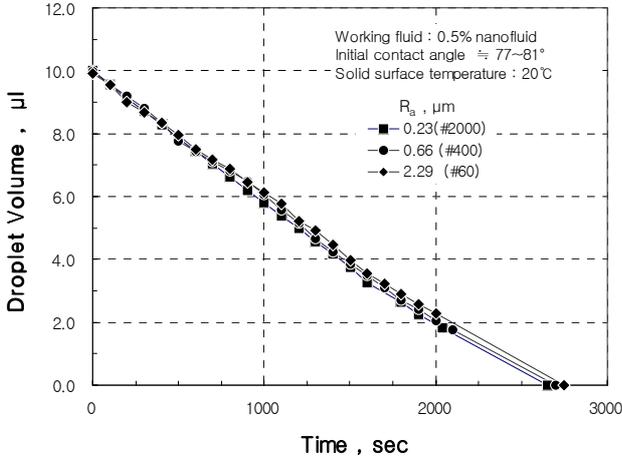


Fig. 6 Variations of droplet volume for different surface roughness (0.5% nano-fluid)

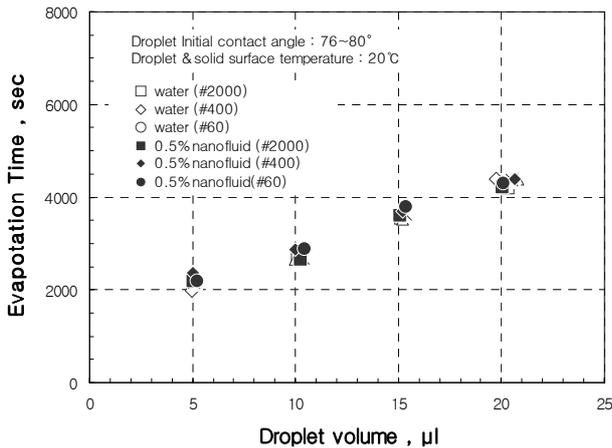


Fig. 7 Evaporation time vs droplet volume

나타내었다. Fig. 4로부터 순수 물과 나노유체 액적의 자연증발시간은 거의 동일하며, 이로부터 액적에 혼합된 나노금속은 자연증발시간에 별 다른 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에는 Fig. 4에 나타낸 실험조건에서 순수 물과 나노유체 액적의 증발과정을 촬영한 사진을 나타내었으며, 앞서 설명한바와 같이 거의 동일한 시간에 증발이 완료되었음을 알 수 있다.

Fig. 6에는 고체의 표면조도를 다르게 설정하여 나노유체 액적의 자연증발시간을 측정된 실험결과를 나타내었다. Fig. 6으로부터 알 수 있듯이 고체의 표면조도가 변화해도 나노유체 액적의 증발시간은 거의 동일함으로 알 수 있으며, 이로부터 고체의 표면조도는 나노유체 액적의 자연증발시간에 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 판단된다. Fig. 7에는 다양한 부피의 순수 물과 나노

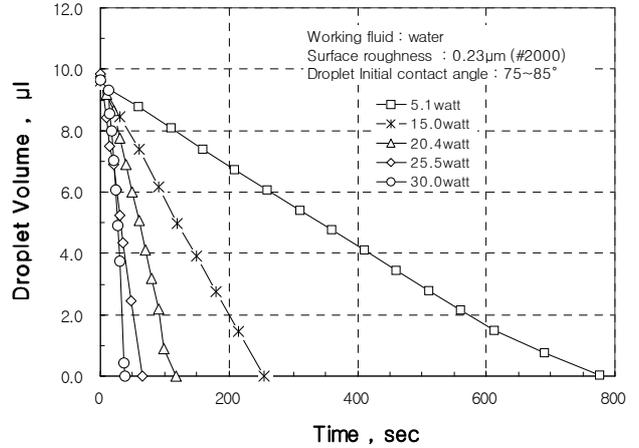


Fig. 8 Variations of droplet volume on heated solid surface (pure water)

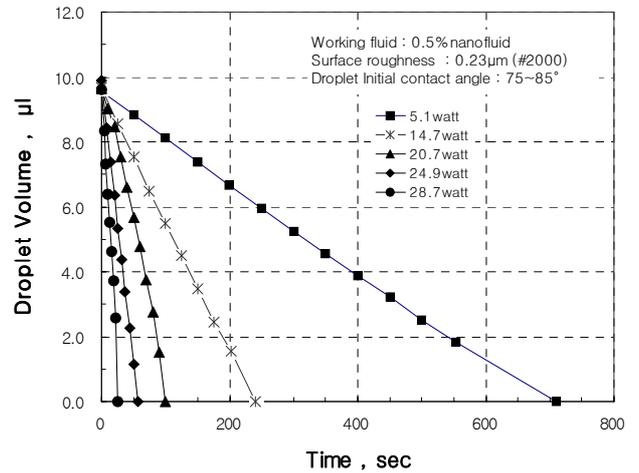


Fig. 9 Variations of droplet volume on heated solid surface (0.5% nano-fluid)

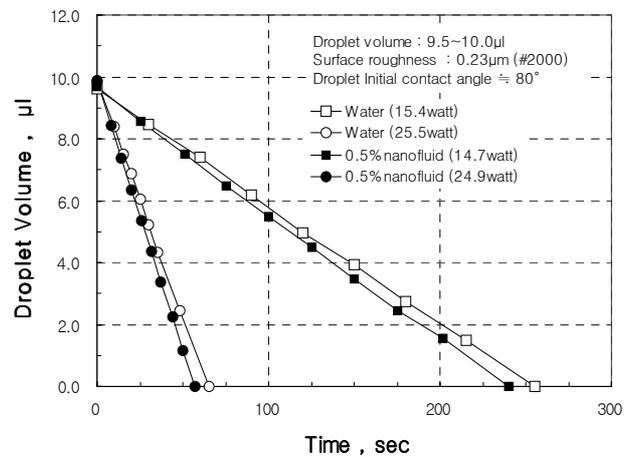
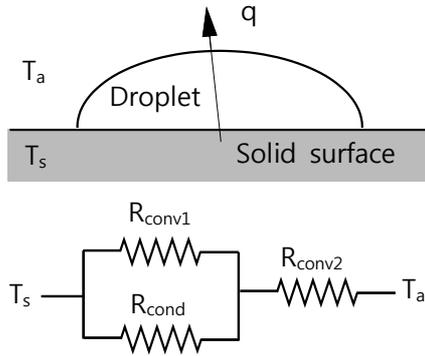


Fig. 10 Variations of droplet volume for pure water and 0.5% nano-fluid on heated solid surface

유체 액적에 대한 자연증발 실험결과를 종합적으로 정리하여 나타내었다. Fig. 7에는 각각의 실험



**Fig. 11** Heat transfer mechanism of evaporating droplet on heated solid surface

조건에서 최대 10회까지 반복 실험하여 그 평균 값을 나타내었다. 예를 들면 초기부피가 약  $10\mu\text{l}$ , 초기접촉각이  $78^\circ$ 인 0.5% 나노유체가 #60의 표면 조건에서 증발할 경우 평균 증발시간은 약 2910 초이며, 표준편차는 약 141초이다. Fig. 7로부터 액적의 부피가 증가할수록 액적의 전체 증발시간은 증가하지만 순수 물과 나노유체 액적의 자연 증발시간은 거의 동일하며, 또한 고체의 표면조도는 순수 물과 나노유체 액적의 자연증발시간에 별 다른 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

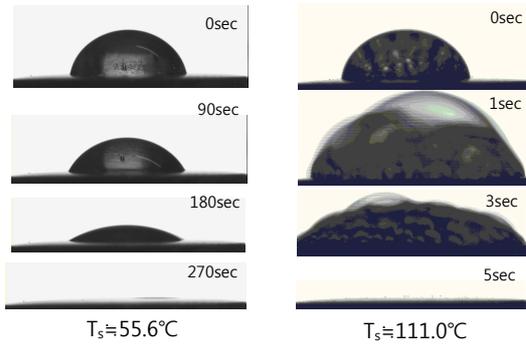
Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 순수 물과 나노유체 액적의 가열증발 실험결과를 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 가열증발 실험에서는 구리블록에 5~35 watt 범위의 전력을 공급하여 전열면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서 전열면에 액적을 공급하여 액적이 증발하는 시간을 측정하고 액적의 형상을 관찰하였다. 이때에 액적의 초기 접촉각은  $75\sim 85^\circ$ 의 범위에서 설정한 상태에서 실험을 실시하였다. 또한 구리블록에 5~35 watt의 전력을 공급할 경우 전열면 표면의 측정온도는  $35\sim 110^\circ\text{C}$ 의 범위에 있음을 확인하였다. Fig. 8 및 Fig. 9로부터 알 수 있듯이 구리블록에 인가되는 전력이 증가할수록 순수물과 나노유체 액적 모두 빠르게 증발하고 있음을 알 수 있으며, 이는 전력이 증가할수록 전열면에서 액적으로의 열전달이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 순수 물과 나노유체 액적의 가열 증발 실험결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 10으로부터 알 수 있듯이 액적의 부피와 초기 접촉각을 거의 동일하게 설정하여 가열증발 실험을 실시한 결과, 순수 물보다 나노유체 액적이 약간 빠르게 증발하여 증발이 완료되는 시간이 단축되

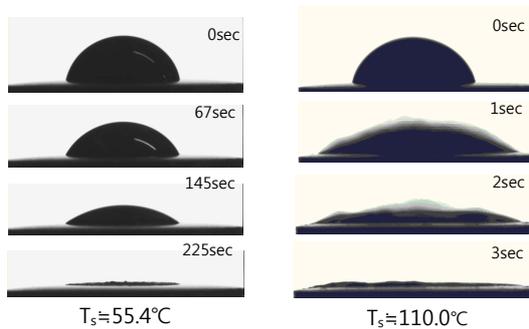
고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 Fig. 4에 나타낸 순수 물과 나노유체 액적의 증발속도가 거의 같게 나타나는 자연증발 실험결과와는 상이한 것으로, 가열증발의 경우 나노유체에 포함된 금속입자가 액적의 열전도도를 향상시켜 전열면 표면으로부터의 열전달을 촉진시키기 때문에 증발속도가 빨라지는 것으로 판단된다.<sup>(8)</sup> 일반적으로 고체표면에서의 액적의 증발은 복사열전달을 무시할 경우 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 액적 내부의 대류 열저항과 전도 열저항, 액적 외부에서의 대류 열저항에 의해 지배되는 것으로 가정할 수 있다. 또한 매우 작은 부피의 액적에서는 액적 내부의 대류 열전달을 무시할 수 있으므로 액적 내부의 열전달은 오직 유체의 열전도도에 좌우되는 것으로 판단할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 나노유체 액적의 증발 속도가 순수 물 액적의 증발 속도보다 빠른 것은 나노유체에 포함된 금속입자가 액적의 열전도도를 향상시키기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 순수 물과 나노유체 액적의 증발과정을 고체의 표면온도를 변화시켜 촬영한 사진을 나타내었으며, 실험결과로부터 고체의 표면온도가 증가할수록 증발 완료시간은 점차 빨라지고 있음을 알 수 있었다. 고체의 표면온도가 증가할수록 고체 표면에서의 기포발생이 증가하여 증발시간이 급격히 단축되며, 특히 고체표면의 온도가 약  $110^\circ\text{C}$  부근에서는 액적 내부에서의 급격한 비등(boiling)이 발생하여  $10\mu\text{l}$ 의 액적이 2~3초 이내의 매우 빠른 시간에 증발이 완료되고 있음을 알 수 있었다. 이 과정동안에는 액적의 정확한 형상측정과 분석이 불가능하였으며 이에 대한 정확한 현상을 관찰하기 위해서는 고성능 촬영장비를 이용한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 같이 고체의 표면온도가 액체의 포화 온도 이상으로 가열될 경우 고체-액체 경계에서 급격한 비등이 발생하여 Fig. 11에 나타낸 열전달 모델에서 액적 내부의 대류열전달계수는 비등열전달계수로 대체되어야 할 것으로 판단된다. Fig. 12의 (b)에는 나노유체 액적이 증발과정을 촬영한 사진을 나타내었으며 순수 물 액적과는 다르게 증발이 완료된 시점에 있어서도 금속 입자가 원형을 유지하며 고체 표면에 남아 있음을 알 수 있다.

Fig. 13에는 동일한 부피와 초기 접촉각을 가진



(a) Water



(b) 0.5% nano-fluid

Fig. 12 Time history of evaporating (boiling) droplets on heated solid surface ( $V_d \approx 10 \mu\text{l}$ )

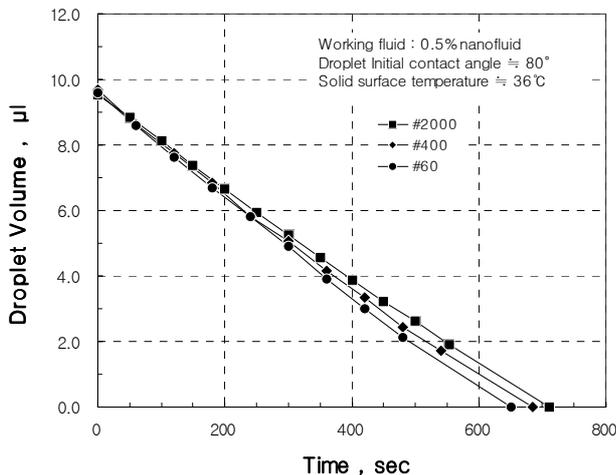


Fig. 13 Variations of droplet volume for different surface roughness on heated solid surface

나노유체 액적에 대하여 고체표면의 조도를 다르게 설정하여 가열증발시간을 측정된 실험결과를 나타내었다. Fig. 13으로부터 고체표면의 조도가 거칠수록 액적의 증발속도가 빨라지고 있음을 알 수 있다. 이는 고체표면의 조도가 증가할수록 동일한 투영면적에 대해 고체-액적의 접촉 면적이

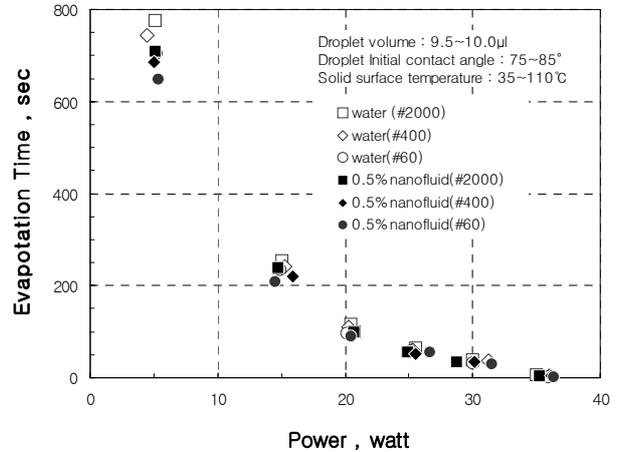


Fig. 14 Evaporation time vs. power for pure water and 0.5% nano-fluid droplets on heated solid surface

증가하여 열전달이 향상되기 때문인 것으로 판단된다. 고체의 표면조도와 액적의 초기 접촉각과의 상관관계를 연구한 선행연구<sup>(7)</sup>에서는 고체의 표면조도가 증가할수록 액적의 초기 접촉각이 약간 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 동일한 부피의 액적에 대하여 액적의 초기 접촉각이 커질수록 고체와 접촉하는 면적이 감소하여 열전달에 불리할 것으로 판단되지만, 앞서 설명한 바와 같이 고체의 표면조도가 증가할수록 고체표면과 액적이 실제로 접촉하는 면적은 증가하여 열전달이 촉진되는 것으로 판단된다. Fig. 6에 나타낸 자연증발의 경우 이러한 고체-액체 경계에서의 열전달이 존재하지 않기 때문에 고체의 표면조도는 액적의 증발시간에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 14에는 부피가 약  $10 \mu\text{l}$ 인 액적에 대하여 가열 증발실험을 수행한 결과를 종합적으로 정리하여 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 전열면에 인가된 전력이 증가할수록 고체표면의 온도가 증가하여 열전달이 증가함으로써 액적의 증발속도가 빨라지는 것으로 판단된다. 또한 순수 물보다는 나노유체 액적의 증발속도가 빠르며 표면조도가 증가할수록 증발속도가 약간 빨라짐을 알 수 있다. 전열면에 공급되는 전력이 30 watt 이상 ( $T_s \approx 97^\circ\text{C}$ )인 영역에서는 고체표면에 급격한 비등(boiling)이 발생하여 증발과정동안의 액적형상 분석과 증발시간 측정 등에 대해서는 고성능 촬영장비를 동원한 추가적인 연구가 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 순수 물과 나노유체의 단일액적

(single droplet)에 대한 증발실험을 수행하였으며, 특히 냉각면의 표면조도와 접촉각 등이 액적의 증발거동에 미치는 영향을 관찰하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고체의 표면을 가열하지 않은 상태에서 액적을 증발시키는 자연증발 실험결과로부터 동일한 부피의 순수 물과 나노유체 액적의 증발시간은 거의 동일함을 알 수 있었으며, 이는 나노유체에 포함된 나노입자가 액적의 자연증발 속도에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 또한 고체의 표면조도를 다르게 설정한 자연증발 실험결과로부터 고체의 표면조도는 나노유체 액적의 자연증발 속도에 큰 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 판단된다.

(2) 고체의 표면을 액적의 초기온도 이상으로 가열하여 액적을 증발시키는 가열증발 실험결과로부터 나노유체액적의 증발속도는 동일한 부피의 순수 물 액적보다 증발속도가 약간 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 이는 나노유체에 포함된 나노입자가 열전도도를 향상시켜 열전달이 촉진되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 고체의 표면조도가 증가할수록 액적의 증발속도는 미소하게 증가하며 이는 고체의 표면조도가 증가할수록 고체-액체의 접촉 면적이 증가하여 열전달이 촉진되기 때문인 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2011-0007117).

## 참고문헌

- (1) Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Flow Boiling Heat Transfer in Two-Phase Micro-Channel Heat Sink," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2755~2771.
- (2) Kim, J. H., You, S. M. and Choi, U. S., 2004, "Evaporative Spray Cooling of Plain and Microporous Coated Surfaces," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3307~3315.
- (3) Hsieh, C. C. and Yao, S. C., 2006, "Evaporative Heat Transfer Characteristics of a Water Spray on Micro-Structured Silicon Surfaces," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 962~974.
- (4) Silk, Eric C., Kim, J. and Kiger, K., 2006, "Spray Cooling of Enhanced Surfaces (Impact of Structured Surface Geometry and Spray Axis Inclination)," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4910~4920.
- (5) Kim, Y. C. and Yun, S. M., 2007, "Study on Correlation of Droplet Flow rate and Film Boiling Heat Transfer in Spray Cooling," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 31-4, pp. 335~340.
- (6) Kim, Y. C., 2010, "Effects of Micro-fin structure on Spray Cooling Heat Transfer in Forced Convection and Nucleate Boiling Region," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34-11, pp. 983~990.
- (7) Kim, Y. C., 2013, "Effects of Surface Roughness on Contact Angle of Nano-fluid Droplet," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37-6, pp. 559~566.
- (8) Choi, U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluid with Nanoparticles," *ASME FED*, Vol. 231, pp. 99~105.