

나노유체의 임계열유속 및 비등특성에 미치는 나노입자 크기의 영향

조병남[†] · 강준원* · 유재석** · 김현정**

Effect of particle sizes on CHF enhancement and boiling characteristics of nano-fluids

Byeongnam Jo[†] · Junone Kang · Jaisuk Yoo · Hyun-Jung Kim

Abstract

The characteristics of boiling heat transfer and critical heat flux (CHF) behavior of nano-fluids were studied by using various sized silver and alumina nanoparticles. The diameter of nanoparticles was from 2 nm to 250 nm for silver and from 20nm to 40nm for alumina. Pool boiling characteristics and CHF enhancement of nano-fluids with different sized nanoparticles were compared with those of pure water and each nano-fluids. The experiment was performed at atmospheric pressure and the temperature of the pool was maintained constantly by using a flat immersed heater. The concentration of nano-fluids was uniform in all experiments as 0.01g/liter. The results showed that the measured boiling curves were shifted to the right. It demonstrated that the occurrence of nucleate boiling regime in nano-fluids retarded, compared with that of pure water. Also, in nano-fluids, the boiling curves showed that CHF of nano-fluids is significantly enhanced and represented the effect of particle size on boiling characteristics.

Key Words : Critical heat flux(임계열유속), Nano-fluids(나노유체), Particle size(입자크기), Pool boiling(플비등)

기호설명

d : 열전대 사이의 간격(m)

g : 중력가속도 (m/s^2)

h_{fg} : 증발 잠열 (kJ/kg)

k : 구리의 열전도계수 (W/mK)

q'' : 열유속 (kW/m^2)

q''_{CHF} : Zuber 식에 의한 임계열유속 (kW/m^2)

$T_{1,2,3}$: 열전대의 온도 (K)

T_w : 비등 표면의 온도 (K)

T_{sat} : 물의 포화온도 (K)

ρ_v : 액체 밀도 (kg/m^3)

$\Delta\rho$: 액체와 기체의 밀도차 (kg/m^3)

σ : 액체 표면 장력 (N/m)

1. 서론

최근 수십년간 반도체 산업 등 전자부품의 집적도가 매우 높아짐에 따라, 전자부품의 냉각에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 특히, 많은

[†] 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail : jo798@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2350 FAX : (031)219-2353

* 아주대학교 대학원 기계공학과

** 아주대학교 기계공학부

열소산을 필요로 하는 분야에 있어서, 상변화를 수반하는 비등 열전달에 대한 관심이 집중되었다. 많은 연구자들이 액체의 제한된 열유속을 증가시키기 위하여, 임계열유속 향상을 위한 많은 연구를 진행하였다. 이와 함께, 순수 유체에 나노 크기의 입자를 분산시킨 나노유체(nano-fluids)가 소개되었고, 나노유체가 우수한 열전도도를 갖는다는 사실이 이미 확인되었다[1]. 최근 몇몇 연구자들은 이러한 나노유체를 이용한 풀비등 실험을 통해, 매우 높은 임계열유속의 증가가 발생함을 확인하였다. You et al.[2]은 알루미나(Al_2O_3) 나노유체를 이용하여 2.89 psia 의 압력조건에서 정상각형의 평판 히터를 이용하여 풀비등 실험을 한 결과 0.01 g/liter 의 소량의 나노입자를 첨가한 경우에도 임계열유속이 약 200% 가량 상승하는 것을 확인하였다. 또한 Vassallo et al.[3]은 물-SiO₂ 나노유체의 풀비등 실험을 니크롬선 히터를 이용하여 대기압 조건에서 수행하여, You et al.[2]의 결과와 마찬가지로 약 200%의 임계열유속 증가함을 관찰하였다. 또한 Bang et al.[4]은 물-Al₂O₃ 나노유체의 풀비등 실험에서 길고 가느다란 평판히터를 사용하여 대기압에서 실험을 수행하였다. Bang et al.[4]은 실험 전후의 히터 표면의 조도 측정을 통해 실험 후 히터 표면이 나노입자의 코팅에 의해 조도가 변화함을 관찰하였으며, 이러한 나노입자의 코팅현상이 나노유체의 임계열유속 증가와 관련이 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 나노유체의 임계열유속 증가와 관련하여, 나노유체에 분산된 나노입자의 크기의 영향을 알아보기 위하여 순수물(distilled and deionized water)에 다른 크기의 은나노 입자가 분산되어 있는 0.01 g/liter 의 동일한 농도의 은 나노유체(silver nano-fluids)의 풀비등 실험을 통해 순수물과 각 나노유체 사이의 비등 곡선과 임계열유속을 비교하였다. 입자의 종류의 영향을 파악하기 위하여 알루미나(alumina) 입자를 분산시킨 나노유체와 은(Ag) 나노유체의 임계열유속을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 풀비등 실험은 200mm x 200mm x 160mm 의 알루미늄 챔버에서 대기압 조건에서 진행되었다. 챔버는 약 2 리터의 내부 부피를 갖는다. 유체의 온도는 K 형 열전대를 이용하여 측정되었으며, 챔버 내에 1.5kW 용량의 파이프 히터를 삽입하였다. 파이프 히터를 사용하여 풀비등 실험 전에 유체를 끓여서 유체 내에 남아 있는 기체를 제거하고 히터의 공급 전원을 조절하여 실험중 유체의 온도를 일정하게 유지시켰다. 실험 진행중 나노유체의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 챔버 바깥쪽에 응축기를 설치하여 수증기가 응축기를 통해 응축되어 다시 챔버 안으로 들어가도록 하였다.

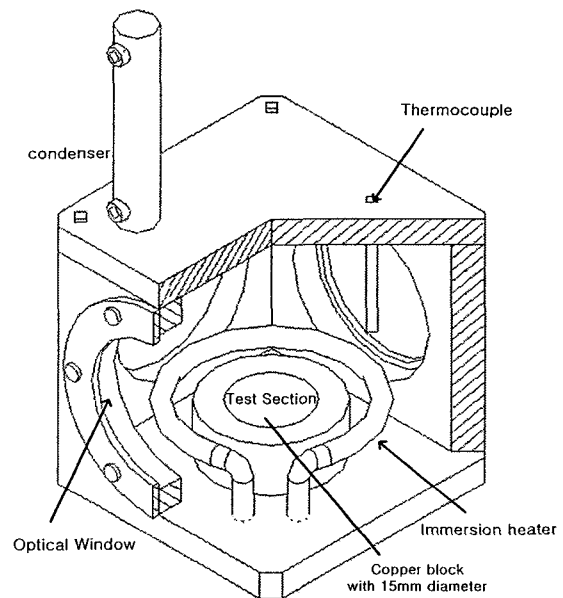


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

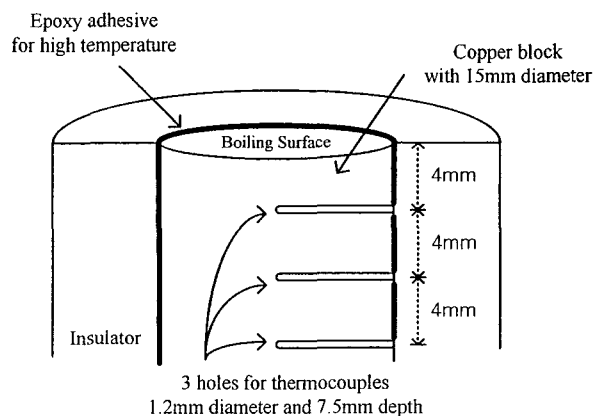


Fig. 2 Schematic of test section

Fig. 2 는 실험에 사용된 히터의 구조를 나타내고 있다. 지름 15mm 의 비등 표면(boiling surface)을 갖는 원통형 구리블록에 카트리지 히터(cartridge heaters)를 삽입하여, 1 차원 열전도를 통하여 상부 표면으로 열이 전달되도록 하였다. 카트리지 히터는 AC 전압조절기(AC transformer)를 사용하여 전원을 공급하였으며, 공급전원은 실험 진행동안 일정하게 유지되도록 조정하였다. 비등 표면의 과열도(superheat)와 열유속의 계산을 위해, 구리블록에 1.2mm 의 홀(hole)을 만들어 3 개의 K 형 열전대를 등간격으로 삽입하여 High conductivity thermal resin 을 이용하고 고정하였다. 열전도를 통해 측정되는 온도는 Yokogawa 사의 DA-100 데이터 계측 장치(data acquisition system)를 통하여 온도를 측정하였고, 0.5 초 간격으로 온도를 저장하였다.

측정된 온도를 바탕으로, 각 구간에서의 온도차의 비율에 따른 외삽(Extrapolation)을 통해 표면 온도를 식(1)과 같이 계산하여, 과열도를 산출하였다. 열유속은 측정된 두 지점의 온도를 1 차원 열전도 관계식에 적용하여 식(2)와 같이 계산하였다.

$$T_w = T_1 - (T_2 - T_1)^2 / (T_3 - T_2) \quad (1)$$

$$q'' = k \frac{(T_2 - T_1)}{d} \quad (2)$$

풀비등은 구리 블록에 삽입된 카트리지 히터의 공급 전원을 단계별로 증가시키면서 진행되었다. 각 단계별로 AC 전압조절기를 이용하여 히터에 일정한 전원을 공급한다. 동시에 Fig. 3 에 나타난 것처럼, 지속적인 pool 의 온도 측정을 통해 정상상태를 확인하고, 정상상태에서 일정시간이 지난 후 다시 공급 전원을 증가시키는 방법으로 실험을 반복하였다. 나노유체의 비등 곡선의 특성을 면밀히 관찰하기 위하여 자유대류비등 영역에서는 공급 전압을 서서히 올리면서 실험을 진행하였다. 임계열유속의 발생, 즉, 핵비등에서 막비등으로의 전환은 측정 온도의 급격한 상승을 통해 확인하였고, 임계열유속의 값은 직전의 공급전원에서 측정된 온도를 이용하여 계산하였다.

실험 후, 비등 표면은 사포를 이용하여 동일한 조건으로 가공되었으며, 챔버는 충분한 세척을 수행하여 서로 다른 나노입자의 영향을 최대한 억제하였다.

2.2 나노유체

본 연구에서 사용된 나노입자의 종류와 분산된 나노입자의 크기를 Table 1 에 나타내었다. 각 나노유체는 500ppm 에서 10000ppm 의 농도를 갖고 있었다. 실제 풀비등에서는 이 은 나노유체를 0.01g/liter 의 동일한 농도로 희석하여 사용하였다. 또한 입자의 종류 - 금속과 금속 산화물 - 에 따른 임계열유속의 변화를 알아보기 위하여 알루미늄 나노유체의 풀비등 실험을 통해 은 나노유체의 임계열유속과 비교하였다.

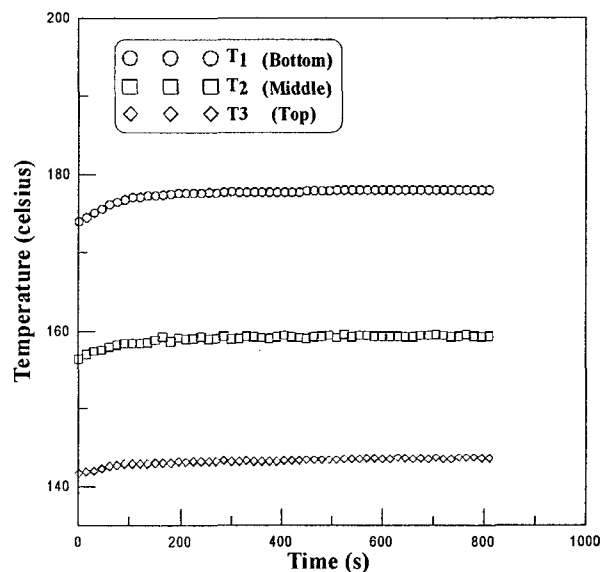


Fig. 3 The measured temperature in a step of pool boiling

Table 1 Nanoparticles size variation and type used in experiments

Particles Type	Particle size (nm)
Silver	1 – 3
	10
	80
	150
	250
Al ₂ O ₃	20
	40

3. 실험결과 및 고찰

3.1 은 나노유체의 비등특성 및 임계열유속

Fig. 4 는 순수물과 은 나노유체의 비등곡선을 보여주고 있다. 순수물의 비등 곡선을 살펴보면, 표면의 과열도가 작은 자유대류비등 영역(free convective boiling regime)에서는 낮은 열유속을 보이고, 과열도가 증가함에 따라 비등이 발생하는 핵비등 영역(nucleate boiling regime)에서는 열유속이 급격하게 증가하였다. 이것은 Nukiyama[5]의 1 기압 비등곡선의 형태와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 Fig. 4 의 비등곡선에서 알 수 있듯이, 은 나노유체의 비등곡선이 순수물의 비등곡선과 비교하여 오른쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 또한 나노유체에서 히터 표면의 과열도가 순수물과 비교하여 최대 약 15°C 상승하였다. 이것은 순수물과 비교하여 약 100%의 과열도의 상승을 보여준다. 이것은 나노유체의 열전달계수가 순수물에서 보다 감소하였음을 의미하고, 열전달계수의 감소는 순수물에 분산된 나노입자가 핵비등의 발생을 지연시키는 역할을 했을 것으로 예상된다. 실험에서 사용된 비등 표면이 충분히 거칠게 가공되었다면, Das et al.[6]의 실험에서 알 수 있듯이 매우 작은 나노입자가 거친 비등 표면에 도포되어 표면의 조도를 감소시키고 이것은 핵생성의 발생을 억제하는 효과를 불러온다. 따라서 나노유체는 순수유체와 비교하여 자유대류비등이 오래 지속되는 것이다.

임계열유속을 살펴보면, 순수물의 임계열유속은 약 966 kW/m²로 측정되었다. 순수유체에 대한 임계열유속을 예측하는 상관식은 Zuber[7]에 의해 식(3)으로 알려져 있다.

$$q_{CHF}^* = 0.131 h_{fg} \rho_v^{1/2} (g \sigma \Delta \rho)^{1/4} \quad (3)$$

본 실험에서 측정된 순수물의 임계열유속은 의 Zuber[7]의 상관식에 의한 값보다 약 12% 낮은 값을 보이고 있다. 그러나 임계열유속은 히터의 형상과 크기에 많은 영향을 받는다고 알려져 있으므로 오차범위안에서 잘 일치 한다고 볼 수 있다. 본 연구는 순수물과 나노유체의 임계열유속의 비교를 목적으로 하기 때문에 측정된 순수물의 임계열유속 값을 이용하여 나노유체의 임계열유속 증가와 비교하였다.

Fig. 4 에서 알 수 있듯이, 은 나노유체의 임계

열유속은 1-3nm의 입자가 분산된 나노유체의 임계열유속이 가장 큰 증가를 나타내었고, 증가율은 약 30%였다. 이 결과는 물-Al₂O₃ 나노유체를 이용한 Bang et al.[4]의 증가율과 비슷하였다. 10nm와 80nm의 입자를 분산시킨 나노유체의 경우에는 두 나노유체의 임계열유속 증가는 약 12%로 거의 동일 하였으며, 입자의 크기를 증가시켜 150nm와 250nm의 입자가 분산된 나노유체는 임계열유속의 증가가 거의 발생하지 않았다. 즉, 은 나노유체는 분산된 입자가 증가할수록 임계열유속의 증가는 감소하고, 분산된 입자의 크기가 일정 수준 이상이 될 경우 임계열유속은 순수물과 같은 값을 나타내었다. 따라서 150nm와 250nm의 은 나노유체는 임계열유속의 증가가 거의 없이 표면 과열도의 상승만이 발생하여 순수물과 비해 비등 열전달이 오히려 감소하였음을 알 수 있다.

3.2 입자의 종류

Fig. 5 는 순수물과 알루미나 나노유체의 비등곡선이다. 알루미나 나노유체는 20nm와 40nm의 입자를 분산시켜 사용하였다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이, 알루미나 나노유체의 비등곡선은 은 나노유체의 비등 곡선과 마찬가지로 오른쪽으로 이동하였다. 알루미나 나노유체의 임계열유속은 입자가 큰 경우에 더 많은 증가가 관찰되었다. 20nm의 입자를 분산시킨 경우에는 임계열유속이 약 1632 kW/m²으로 약 69%의 증가율을 나타내었다. 40nm의 입자를 분산시킨 경우에는 임계열유속의

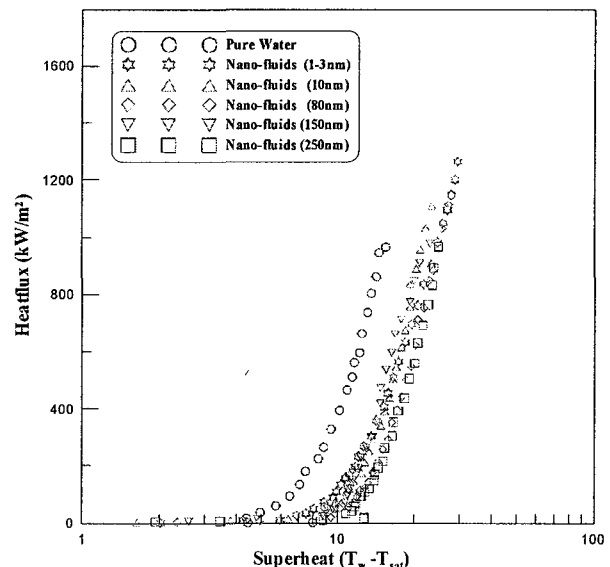


Fig. 4 Boiling curve for pure water and silver nano-fluids

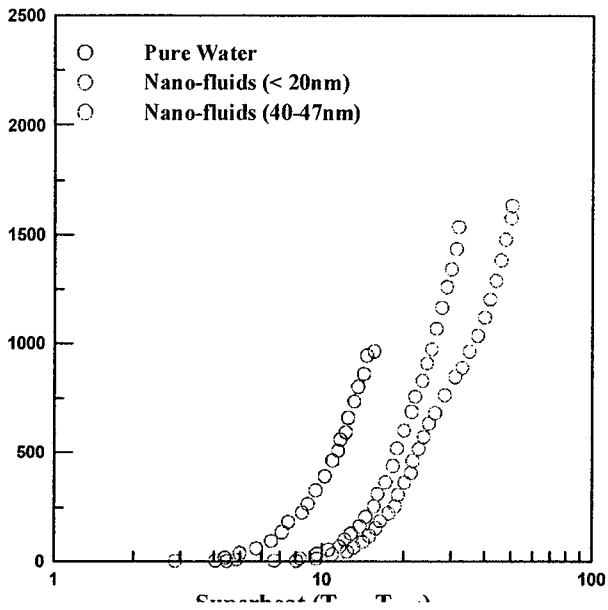


Fig. 5 Boiling curve for pure water and alumina nano-fluids

증가가 59%로 급격한 상승이 관찰되었다. 이것은 나노유체에서 측정된 최대 임계열유속 증가율의 2 배에 해당하는 값으로 0.01 g/liter의 동일 농도에서는 은 나노유체와 알루미나 나노유체의 풀비등에서는 금속 산화물이 분산된 나노유체에서 임계열유속 증가가 더 급격하게 일어남을 알 수 있다. 은 나노유체와 알루미나 나노유체의 임계열유속 증가를 Table 2에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 은 나노유체와 알루미나 나노유체 모두 입자의 크기가 작을수록 더 높은 임계열유속 증가 현상을 보였다. 따라서 입자의 영향은 나노유체에 분산된 입자가 작을수록 임계열유속이 더 많이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 두 나노유체에서 가장 많은 임계열유속의 증가가 발생한 비등 곡선을 순수물의 비등 곡선과 함께 비교하고 있다. 이 그래프를 살펴보면, 은 나노유체와 알루미나의 나노유체의 경우, 차이는 있지만 핵비등의 시작이 순수유체보다 지연됨을 알 수 있다. 그러나 두 나노유체에서 임계열유속의 증가가 다르게 측정되었고, 분산된 나노입자에 따라 비등 특성과 임계열유속의 증가가 다름이 관찰되었다.

그러나 한가지 농도에서만 실험이 진행되었기 때문에 그 영향을 정확히 파악하였다고 볼 수 없다. 따라서 농도의 영향을 고려한 실험이 추가적으로 진행되어야 할 것이다. 또한 풀비등에서 임계열유속에 영향을 주는 유체의 표면장력 등의 물성 변화에 관한 더 많은 연구가 필요하다.

Table 2 CHF enhancement of silver and alumina nano-fluids

Particles	Size (nm)	CHF (kW/m ²)	Enhancement ratio (%)
Pure water	N/A	966	N/A
Silver	1 - 3	1265	31
	10	1110	15
	80	1112	15
	150	978	1.2
	250	967	0.0
Alumina	20	1632	69
	40	1534	59

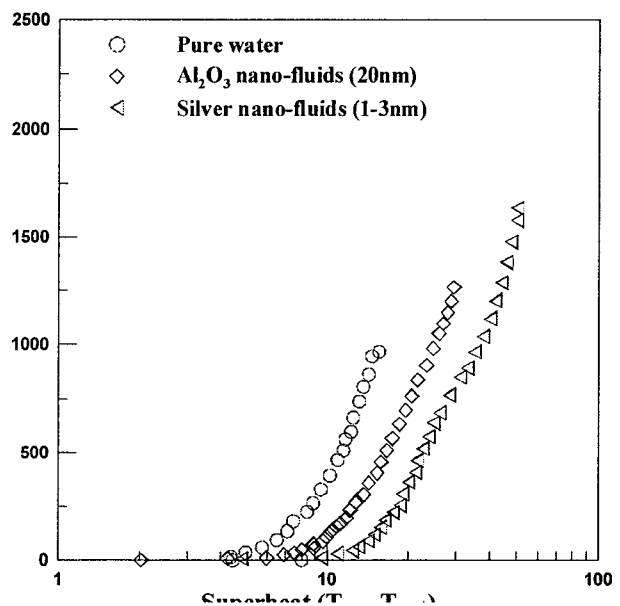


Fig. 6 Boiling curve of silver and alumina nano-fluids with maximum CHF enhancement

3.3 비등과정의 가시화

Fig. 7은 순수물과 알루미나 나노유체의 비등과정의 비교 사진이다. 동일 공급전압에서 사진임에도 불구하고 생성되는 버블(Bubble)의 크기에서 차이가 있음을 알 수 있다.

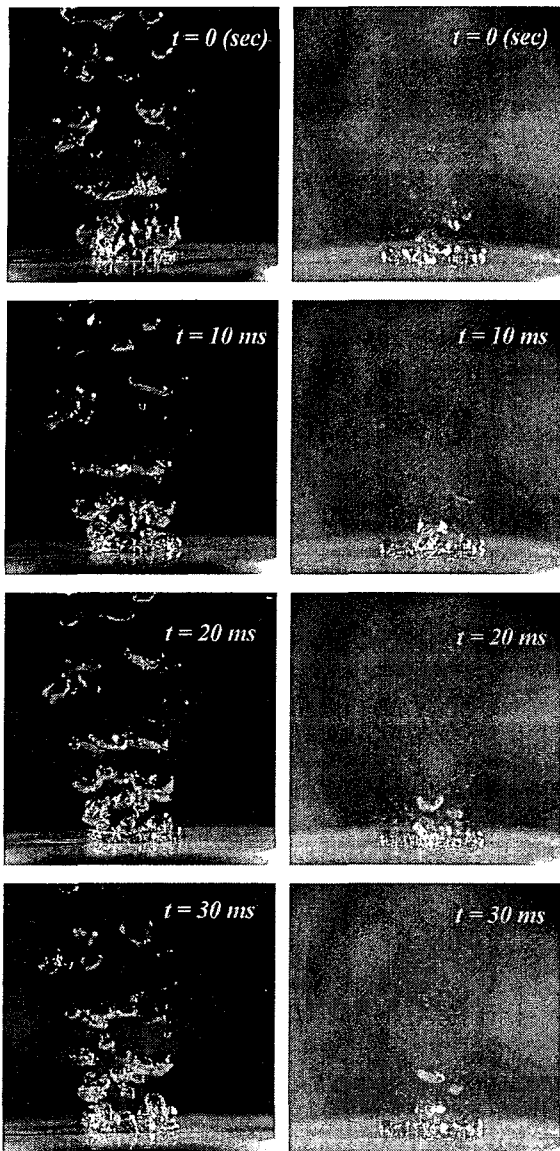


Fig. 7 Photographs for the pure water and alumina nano-fluids

4. 결론

본 연구에서는 나노유체의 비등 특성과 임계열 유속 증가에 나노입자의 크기가 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일한 농도에서 은 나노유체와 알루미나 나노유체의 풀비등 실험을 수행하였다. 실험을 통해, 나노유체의 비등 곡선은 순수물과 비교하여 핵비등의 발생이 지연됨을 확인하였다. 즉, 나노유체는 동일 열유속에 대하여 표면의 과열도가 증가하여 비등 열전달계수(heat transfer coefficients)가 순수물보다 낮게 나타났다. 그러나 나노유체의 임계열유속은 순수물보다 증가하였

다. 특히, 금속 산화물인 Al_2O_3 나노입자를 분산시킨 경우에, 최대 약 60%의 급격한 상승을 보였다. 입자의 크기가 임계열유속에 미치는 영향은 은 나노유체를 통해 확인되었다. 은 나노유체의 풀비등 결과, 입자의 크기가 작을수록 임계열유속이 크게 증가함이 관찰되었다. 또한 150nm 이상의 입자의 경우에는 임계열유속의 증가가 발생하지 않았다.

또한 순수물과 나노유체의 비등 가시화를 통해 생성 버블의 크기가 발생 주기가 차이가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지역대학 우수과학자 지원(R05-2004-000-11406)과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11264-0)에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, 2001, "Anomalous increase in effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Applied Physics letter*, Vol. 78, No. 6, pp. 718 ~ 720.
- 2) S. M. You, J. H. Kim, and K. H. Kim, 2003, "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer," *Applied Physics letter*, Vol. 83, No. 16, pp. 3374-3376.
- 3) Peter Vassallo, Ranganathan Kumar, and Stephen D'Amico, 2004, "Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 407-411.
- 4) In Cheol Bang and Soon Heung Chang, 2005, "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nano-fluids from a plain surface in a pool," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2407-2419.
- 5) S. Nukiyama, 1934, "The maximum and minimum values of heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure," *J. Japan. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 37, pp. 367-374.
- 6) S. K. Das, N. Putra, and W. Roetzel, 2003, "Pool boiling characteristics of nano-fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851-862.
- 7) N. Zuber, 1959, "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer," AEC Rep. AECU-4439