

<학술논문>

나노유체의 풀비등 임계열유속에 대한 실험적 연구

김형대* · 김무환†

(2007년 7월 19일 접수, 2007년 9월 21일 심사완료)

Experimental Investigations on Pool Boiling CHF of Nano-Fluids

Hyung Dae Kim and Moo Hwan Kim

Key Words : Critical Heat Flux(임계열유속), Nanofluids(나노유체), Nanoparticle Surface Deposition (나노입자 표면흡착)

Abstract

Pool boiling critical heat flux (CHF) of nanofluids with oxide nanoparticles of TiO_2 or Al_2O_3 was experimentally investigated under atmospheric pressure. The results showed that a dispersion of oxide nanoparticles significantly enhances the CHF over that of pure water. Moreover it was found that nanoparticles were seriously deposited on the heater surface during pool boiling of nanofluids. CHF of pure water on a nanoparticle-deposited surface, which is produced during the boiling of nanofluids, was not less than that of nanofluids. The result reveals that the CHF enhancement of nanofluids is absolutely attributed to modification of the heater surface by the nanoparticle deposition. Then, the nanoparticle-deposited surface was characterized with parameters closely related to pool boiling CHF, such as surface roughness, contact angle, and capillary wicking. Finally, reason of the CHF enhancement of nanofluids is discussed based on the changes of the parameters.

기호설명

D : 선형 히터의 지름 [m]
 g : 중력 가속도 [m/sec^2]
 h_{fg} : 증발 잠열 [J/kgK]
 I : 인가 전류 [A]
 L : 선형 히터의 길이 [m]
 $L_{c,max}$: 모세관 높이 [m]
 q''_{CHF} : 임계열유속 [W/m^2]
 $q''_{CHF,Z}$: Zuber의 임계열유속 [W/m^2]
 Ra : 표면 조도 [m]
 V : 인가 전압 [V]

그리스문자

θ : 접촉각 [$^\circ$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면 장력 [N/m]

하첨자

f : 액체
 g : 기체

1. 서론

최근 비등 열전달의 작동 유체로 일반적인 유체에 나노입자를 분산, 부유시켜 제작한 나노유체(Nanofluids)를 이용할 경우 임계열유속을 최대 200%까지 혁신적으로 증진시킬 수 있음이 실험을 통해 발견되었다. 그 이후, 현상의 학문적 탐구 가치 뿐만 아니라 결과의 산업적 응용 가치 때문에 많은

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : mhkim@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2165 FAX : (054)279-3199

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

연구자들에 의해 활발히 연구되고 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 현재까지 발견된 나노유체의 풀비등 임계열유속 증진 현상의 주요 특성들을 정리하면 다음과 같다.

- 나노유체는 0.1% 체적 비율 이하의 적은 양의 나노입자만으로 풀비등 임계열유속을 주목할만 하게 증가시킨다.⁽¹⁻⁴⁾
- 나노유체 비등 열전달 과정에서 유체 내에 부유 하던 나노입자들은 비등 표면에 흡착되어 나노입자 도포층을 형성하며, 이러한 현상은 비등 벽면의 구조적, 물리화학적 특성을 변화시켜 비등 열전달 및 임계열유속 현상의 변화를 초래한다.⁽²⁻⁸⁾

그러나 열거된 연구결과들만으로는 나노유체 임계열유속 증진의 물리적 메커니즘을 충분히 이해할 수 없으며, 따라서 나노유체의 우수한 임계열유속 특성을 해석하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 나노유체의 풀비등 임계열유속 증가 현상을 해석하기 위하여 두 단계의 실험적 연구를 순차적으로 수행하였다. 첫째로 나노유체의 풀비등 실험을 수행하였으며, 다음으로 비등실험 동안 발생하는 나노입자 표면흡착에 의한 표면특성의 변화를 분석하고 임계열유속 결과와 연관시켜 비교 분석하였다. 풀 비등 실험에서는 물에 알루미늄(Al_2O_3)과 이산화티타늄(TiO_2) 나노입자를 각각 체적농도 10⁻⁵%에서 10⁻¹%로 분산시킨 나노유체들의 풀비등 임계열유속 성능을 조사하였다. 기존 연구 결과들로부터 나노유체 임계열유속 증진 현상이 나노입자에 의한 가열표면 특성의 변화와 깊은 연관을 가질 수 있음을 확인하였기 때문에, 나노유체의 비등실험 후 히터표면을 전자현미경을 이용하여 관찰하였으며, 나노입자 표면흡착에 의한 비등표면의 임계열유속 성능의 변화를 실험적으로 조사하였다. 표면특성 분석실험에서는 임계열유속 현상과 관계 깊은 인자들인 표면조도, 접촉각, 모세관 성능들을 이용하여 표면을 정량화하고, 이를 바탕으로 나노유체의 임계열유속 증진의 원인을 분석 하였다.

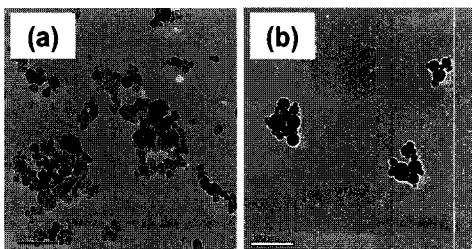


Fig. 1 TEM images of nanoparticles dispersed in distilled water: (a) TiO_2 ; (b) Al_2O_3

2. 풀비등 실험

2.1 나노유체 제조 및 특성분석

본 연구에서 나노유체는 증류수에 건조 상태의 나노입자들을 분산시키는 방식으로 제조하였으며, 사용된 Al_2O_3 와 TiO_2 나노입자들은 각각 Nanophase Technologies 사의 physical vapor synthesis (PVS) process 와 Advanced Nano Product 사의 sol-gel process 에 의해 제조되었다. 계면활성제와 같은 첨가제를 사용하는 경우 용액 내 나노입자의 분산 안정성을 향상시킬 수 있으나, 사용된 첨가제 자체가 나노유체의 유연학적 특성 및 비등 열전달 현상에 심각한 영향을 초래할 수 있다는 연구 결과가 보고된 바 있다.⁽⁸⁾ 따라서 본 실험에서는 첨가제를 사용하지 않고, 비등 실험 전 3 시간 동안 초음파 에너지를 주어 나노입자를 분산하였다. 용액에 분산된 나노입자의 총량은 부피비에 의해 정량화하였으며, 10⁻⁵~10⁻¹% 범위의 나노입자 부피농도를 가지는 나노유체를 제조하여 실험에 사용하였다.

나노유체의 특성은 사용된 나노입자의 종류 및 크기뿐만 아니라 나노입자들의 유체 내 분산상태에 영향을 받는다. Fig. 1 은 증류수에 분산시킨 나노입자들을 보여준다. TEM 사진을 분석한 결과, Al_2O_3 나노입자들은 구형의 평균 직경 47 nm 를 가지고, 10 nm 에서 100 nm 사이에 고르게 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 반면 TiO_2 나노입자들은 현상은 다각형이고, 평균 입도 크기 23 nm 를 가지면서 평균 크기로부터 상하 10 nm 범위에 분포하고 있다. 그러나 첨가제를 전혀 사용하지 않고 분산시킨 나노입자들은 입자들 사이의 전기적 반발력이 매우 약하여, 분산 상태에서 쉽게 뭉쳐질 수 있다. 실제로 분산제를 사용하지 않고 분산시킨 본 실험의 두 나노유체 모두 뭉침 현상이 발생하였으며, 뭉쳐진 나노입자들은 새로운 형태의 불규칙한 나노입자 다발을 이루었다.

2.2 실험과정 및 오차분석

Fig. 2 는 실험 장치의 개념도이다. 풀비등 실험용 풀은 250 mm × 140 mm × 250 mm 의 Pyrex glass 챔버와 상단의 30 mm 두께의 Teflon 덮개로 구성되며, coming hot plate 위에 설치되어 챔버 내 실험 용액의 예열이 가능하도록 하였다. 챔버 내 용액의 온도 계측을 위해 Pt-100 ohm RTD 센서를 이용하였고, 풀비등 실험은 대기압 상태에서 순수물의 포화 온도인 100 °C 조건에서 수행되었다.

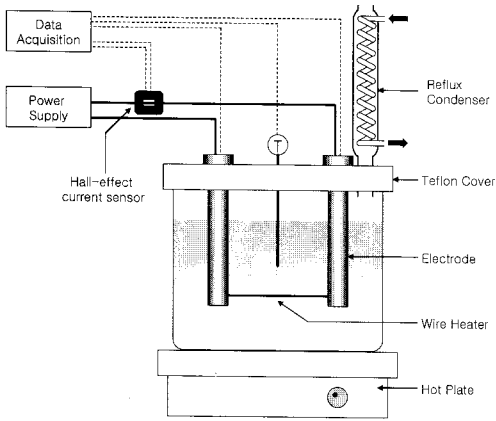


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus for pool boiling

Table 1 Experimental cases

실험	순수 히터표면	작동 유체
Case 1	순수 히터표면	순수물
Case 2	순수 히터표면	나노유체
Case 3	a	나노입자 흡착표면
	b	순수 히터표면
		Case 3a 후 유체

수돗물을 이용하여 냉각되는 reflux 응축기는 비등에 의해 발생된 수증기를 응축시켜 챔버 내부로 다시 공급해 주는 기능을 한다. 따라서 풀비등 실험 동안 실험용 용액의 나노입자 농도변화는 무시할 만하다. 또한 응축기 상단의 개방은 챔버 내부의 압력이 대기압과 유지하는 기능을 한다. 비등용 히터로는 직경 0.2 mm 상용 니크롬선이 사용되었으며 용액 내에서 지면에 수평이 되도록 설치하였다. 히터선 양단은 10 mm 직경의 구리 전극들에 의해서 팽팽하게 당겨진 상태로 고정되었으며, 두 전극은 HP agilent DC power supply (120 V/18 A)에 연결되었다. 비등용 히터에 공급되는 전류를 측정하기 위하여 LEM hall-effect 전류 센서가 설치되었고, 계측용 센서들로부터의 신호를 계측 및 PC로 전송하기 위하여 HP agilent 34970A data acquisition system이 사용되었다. 실험 중 임계열유속 현상의 발생은 팽팽하게 당겨진 상태의 니크롬선을 절단시켰으며, 그 순간 임계열유속(q''_{CHF})은 다음과 같이 계산하였다. 실험의 풀비등 임계열유속 측정의 최대 오차는 $\pm 4.4\%$ 였다.

$$q''_{CHF} = \frac{VI}{\pi DL} \quad (1)$$

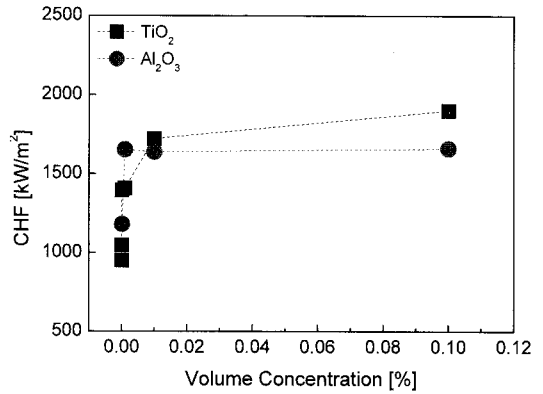


Fig. 3 Pool Boiling CHF of pure water and nano-fluids

2.3 실험조건

Table 1은 풀비등 실험의 세부 Case들을 보여준다. Case 1에서는 순수물의 임계열유속을 측정한다. Case 2는 Case 1과 같은 조건에서 작동유체로 나노유체를 사용하여 임계열유속을 측정한다. 실험 3에서는 나노입자 도포현상이 임계열유속 현상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 두 가지 실험을 수행한다. 첫째로, Case 3a에서 나노유체 풀비등 과정에서 나노입자 표면흡착이 발생한 히터에서의 순수물 임계열유속을 측정한다. 그러나 Case 3a 동안 히터표면에 존재하던 나노입자들이 분리되어 유체 내로 재분산될 수 있으며, 이 경우 나노입자 표면흡착에 의한 임계열유속 변화 실험에 오류를 가져올 수 있다. 따라서 이러한 영향을 확인하기 위하여 Case 3a의 수행 직후 실험에 사용된 유체를 그대로 두고 히터만을 초기상태의 깨끗한 히터로 교체하여 임계열유속을 측정한다. 최종적으로 Cases 2와 3의 결과 비교로부터 나노유체 임계열유속 증가에서 나노입자 표면코팅의 역할을 확인할 수 있다.

2.4 실험결과 및 토의

2.4.1 나노유체의 임계열유속

나노유체를 이용한 본 실험에 앞서, 실험장치의 재현성을 검증하기 위하여 순수물의 풀비등 실험을 수행하였다. 순수물의 임계열유속은 앞 장에서 분석한 본 실험장치의 임계열유속 측정의 오차범위 이내에서 매우 잘 재현되었다. 순수유체 풀비등 실험의 경우 임계열유속 예측을 위하여 다음과 같은 Zuber 모델⁽⁹⁾이 가장 많이 사용된다.

$$q''_{CHF,Z} = \frac{\pi}{24} \rho_g^{1/4} h_{fg}^4 \sqrt{g\sigma(\rho_f - \rho_g)} \quad (2)$$

본 실험의 경우 순수물의 임계열유속 값이 식 (2)와 비교하여 15% 정도 낮게 나타났다. 본 연구의 목적이 순수물의 임계열유속에 대한 나노유체의 상대적 임계열유속 증가 연구이므로, 실험결과와 재현성이 검증된 본 실험장치의 순수물 임계열유속 결과는 본 실험장치를 이용한 나노유체 임계열유속 성능 비교의 기준으로 사용 가능하다.

Fig. 3은 대기압 하에서 나노유체의 풀비등 임계열유속 실험결과를 보여준다. 물-TiO₂와 물-Al₂O₃ 나노유체 모두 주목할만한 임계열유속 증가를 나타내었으며, 나노입자 부피농도에 따라 다른 결과를 나타내었다. 물-Al₂O₃ 나노유체의 경우 나노입자의 농도가 10⁻⁵%에서 10⁻³%까지 증가하는 동안 순수물의 임계열유속에 비하여 70%의 임계열유속 상승을 나타내다가, 이후 10⁻¹%으로의 농도증가에 대해서는 미미한 임계열유속 상승을 보였다. 물-TiO₂의 임계열유속 또한 유사한 경향성을 나타내었는데, 10⁻³%까지의 농도 변화에 의해 80%의 상승이 있다가 이후에는 미미한 수준의 증가를 보였다. 본 실험결과와 같은 임계열유속 증가의 수렴 경향성은 나노유체를 이용한 임계열유속 증진을 최초로 소개한 You et al.⁽¹⁾의 물-Al₂O₃ 나노유체 임계열유속 실험결과와 동일한 현상이다.

2.4.2 나노입자 표면흡착

나노유체 비등 동안의 나노입자와 가열벽면과의 상호작용을 조사하기 위하여 비등 실험이 끝난 직후 Ni-Cr 히터선의 표면을 전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 그 결과 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 Al₂O₃와 TiO₂ 나노유체 모두의 경우에서 가열벽면에 대한 나노입자의 흡착 현상을 확인할 수 있었다. 나노입자 흡착의 구조적 특징은 사용된 나노입자의 종류에 따라 매우 다르게 나타났다. TiO₂ 나노유체는 뭉침 현상에 의해 발생한 나노입자 다발의 흡착에 의해 매우 불균일한 표면구조를 형성한 반면, Al₂O₃ 나노유체의 경우 비교적 균일한 표면구조를 유지하면서 농도증가에 따라 흡착층의 두께가 증가하는 경향성을 나타내었다.

나노입자 가열표면흡착의 원인은 형성된 표면 구조로부터 유추할 수 있다. 첫째, 나노입자 흡착은 비등 시 설치되었던 히터선이 방향과 관계없이 전 방향에 대해서 동일한 형상을 가졌다. 둘째, 비등실험 동안 가열 없이 나노유체 내에 들어가 있던 히터선의 경우 무시할만한 수준의 나노입자 흡착이 발생하였다. 따라서 나노입자의 표면흡착은 단상에서의 난류유동이나 중력에 의한 침전현상에 의해 발생하는 것이 아니며, 비등에 의한 기포의 발생, 성장, 이탈의 과정에 의해 발생한다.

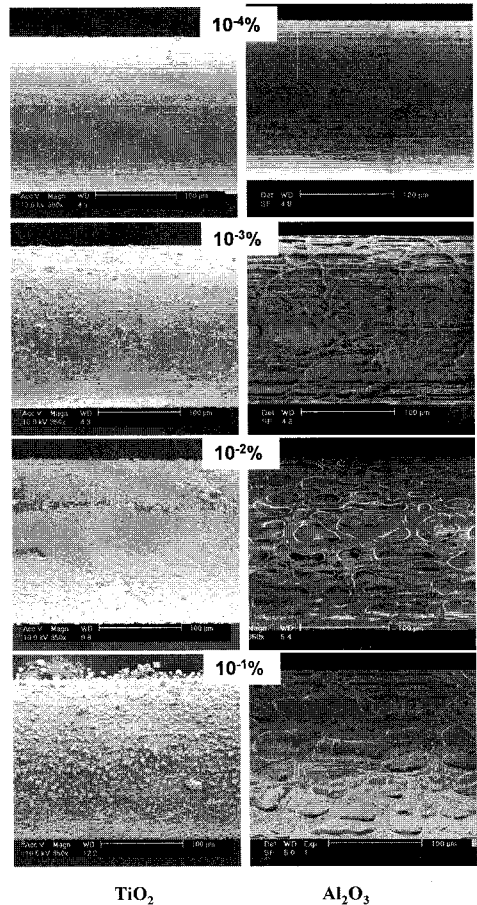


Fig. 4 SEM images of nanoparticle surface deposition of TiO₂ (left) and Al₂O₃ (right) (× 350)

2.4.3 나노입자 흡착의 임계열유속에 대한 영향
나노입자 흡착구조의 임계열유속 현상에 대한 영향을 조사하기 위하여, 나노입자 흡착표면에서의 순수물의 풀비등 임계열유속 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 나노입자 흡착표면에서 순수물의 풀비등 임계열유속은 순수 Ni-Cr 표면에 비해서 월등히 높은 값을 가졌다. 또한, 나노입자 흡착표면에서의 풀비등 실험이 끝난 직후 사용되었던 유체는 그대로 두고 나노입자 흡착표면만을 순수 Ni-Cr 표면으로 교체 후 다시 한번 풀비등 실험을 수행하여 본 결과, 그 때에 나타난 임계열유속 값은 기준 값인 순수 Ni-Cr 표면에서 순수물의 임계열유속과 동일한 값을 나타내었다. 이것은 흡착표면을 이용한 순수물 비등 실험에서 나노입자의 이탈이 무시할 만한 수준이었으며, 주목할만한 순수물 임계열유속의 상승이 전적으로 나노입자 흡착의 영향임을 증명해 준다.

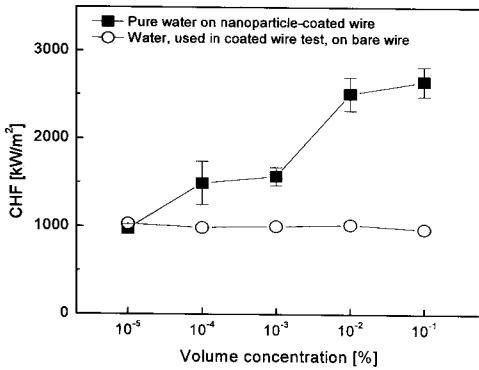


Fig. 5 Effect of nanoparticle surface deposition on CHF of pure water

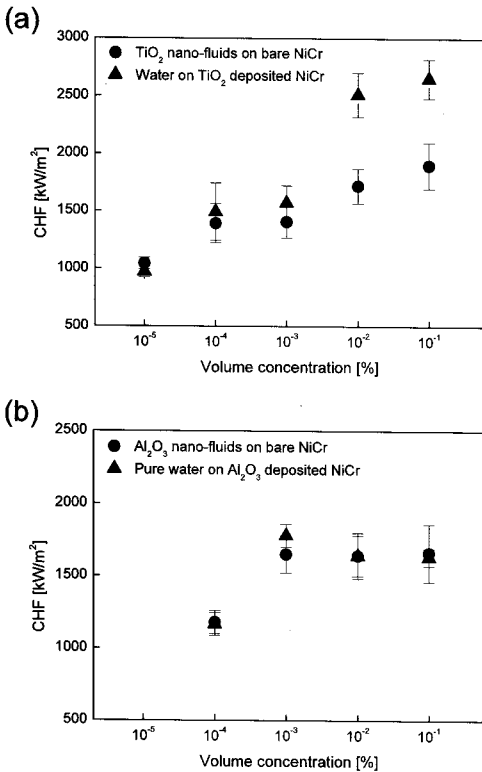


Fig. 6 Comparison of CHF of nano-fluids on a bare heater and pure water on nanoparticle-deposited heaters: (a) TiO₂; (b) Al₂O₃

Fig. 6 은 나노유체의 임계열유속과 나노입자 흡착표면에서의 순수물의 임계열유속의 비교를 보여준다. 모든 나노입자 종류 및 부피농도에 대해서, 나노유체를 이용한 주목할만한 임계열유속 증진은 나노입자 흡착표면에서의 순수물의 임계열유속에

의해 재현 가능하였다. 따라서, Fig. 6 은 나노유체의 혁신적 임계열유속 향상의 주요 원인이 나노유체 비등과정에서의 가열표면에 대한 나노입자의 흡착임을 명백히 보여준다.

또한 흥미롭게도 Fig 6(a)에서 부피농도 10⁻²% 이상의 물-TiO₂ 나노유체의 경우, 나노입자 흡착표면에서의 순수물 비등이 나노유체의 향상된 임계열유속보다 훨씬 더 높은 임계열유속을 가지는 결과를 보여주었다. 나노입자 흡착표면의 구조가 동일하다고 가정할 때, 두 가지 실험 조건들 사이의 유일한 차이는 작동 유체 내에 부유하는 나노입자의 유무이다. 따라서 부피농도 10⁻²% 이상의 물-TiO₂ 나노유체의 경우 나노입자 흡착구조에 의해 매우 높은 임계열유속 증가가 발생 가능하나, 나노유체 내에 부유하는 나노입자의 영향으로 임계열유속 증진이 오히려 반감되어버린 결과라고 추측된다.

3. 나노입자의 임계열유속에 대한 영향

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 나노유체의 풀비등 과정에서 부유하던 나노입자들의 표면흡착 현상은 열전달 표면의 미세구조적 특성을 심각하게 변화시킨다. 히터표면의 구조적 특성의 변화를 정량화하기 위하여 표면조도(Ra)를 이용하였다. Fig. 7 은 다양한 부피농도를 가지는 TiO₂ 나노유체에 대응되는 나노입자 흡착표면의 Ra 값들을 보여주며, 농도가 증가함에 따라 Ra 가 증가하는 경향성을 보인다. 이것은 물-Al₂O₃ 나노유체를 이용하여 풀비등 실험을 수행한 후 표면조도를 측정된 Bang and Chang⁽⁵⁾의 실험결과와 일치하며, 본 실험의 Al₂O₃ 나노유체 또한 Fig. 4 에서 알 수 있듯이 농도의 증가에 따라 흡착표면의 구조가 거칠어지는 방향으로 발달하는 경향성을 보인다. 결론적으로 농도의 증가에 따른 나노입자 흡착표면의 Ra 값의 증가는 나노입자 표면흡착에 의한 히터표면의 구조의 발달 및 불균일성의 증가를 의미한다.

비등 열전달 및 임계열유속에 대한 표면조도의 영향에 대한 이전 연구결과들로부터, 표면조도는 일반적으로 임계열유속을 최대 25-35% 가량 증가시킬 수 있음이 밝혀졌다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 그러나 Roy Chowdhury and Winterton⁽¹³⁾은 핵비등 현상의 특성에 영향을 주는 인자는 표면조도 자체가 아니라, 표면의 변화에 의한 가열표면에 존재하는 활성기공밀도(Active Nucleation Site Density)의 변화임을 지적하였다. 따라서 단순히 표면조도의 증가에 의한 임계열유속의 증가는 비등 현상에서 활성기공밀도의 증가를 수반한다. 하지만,

나노유체 비등에 대한 이전 연구들은 나노입자 표면 흡착에 의해서 활성기공밀도가 감소하며, 이에 의해 비등 열전달 성능이 감소하였다고 이야기하였다.^(5,7) 나노유체 비등에서의 활성기공밀도의 감소는 임계열 유속 증가를 야기하는 표면조도의 일반적인 경향과 상반되는 현상이다. 이런 관점에서 단순한 표면조도 (Ra)의 증가는 나노입자 흡착표면의 혁신적 임계열 유속 증가를 충분히 설명하지 못한다.

한편, 본 연구에서 사용된 산화 나노입자들(TiO₂, Al₂O₃)의 Ni-Cr 표면에 대한 흡착은 히터면의 구조적 특성뿐만 아니라 물리화학적 특성을 변화시킨다. 앞 문단에서 설명한 바와 같이 표면조도를 증가시키며 또한 금속표면 위에 산화층을 형성시켜 표면에너지를 변화시켜, 접촉각을 감소시키는 원인이 된다.⁽¹³⁾ 실제로 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 TiO₂ 와 Al₂O₃ 나노입자 흡착표면에서의 접촉각은 순수 Ni-Cr 표면에서의 접촉각에 비하여 상당히 작은 값을 보였다.

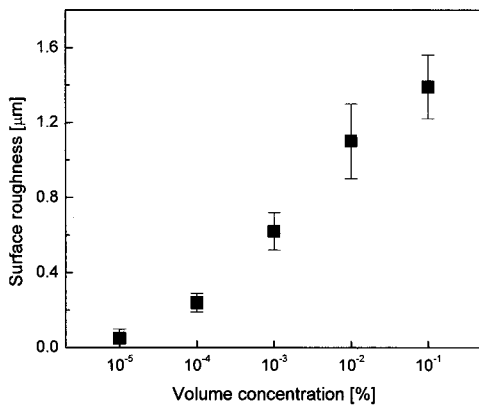


Fig. 7 Ra of TiO₂ nanoparticle-deposited surfaces

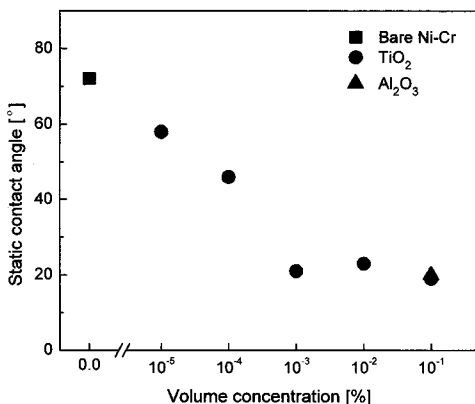


Fig. 8 Contact angle of water on nanoparticle-deposited surfaces

Roy Chowdhury and Winterton⁽¹³⁾은 천이비등 (Transition Boiling)에 대한 히터 표면의 영향을 체계적으로 연구하여, 접촉각(또는 표면 젖음성)이 임계열유속의 발생을 포함한 천이비등 열전달 현상에 매우 큰 영향을 준다는 사실을 밝혔다. Takata et al.⁽¹⁵⁾은 초친수성(Super-hydrophilic) 표면의 경우 일반 표면과 비교하여 100% 가량 높은 임계열유속을 가짐을 실험적으로 보였다. 최근에, Fukada et al.⁽¹⁶⁾은 순수 백금(Pt) 히터선 위에 우수한 표면 젖음성을 가지는 퇴적물(Fouling)이 쌓였을 경우 순수물의 임계열유속 변화를 조사하였다. 그 결과 수 마이크로 두께의 얇은 퇴적물이 존재하는 경우 167%에 해당하는 임계열유속의 증가 결과를 얻었다. 이러한 예로 든 연구결과들은 모두 풀비등 임계열유속이 히터표면의 접촉각 변화에 의해 심각하게 영향을 받을 수 있음을 이야기 하며, 따라서 본 실험에서 나노입자 흡착표면의 심각한 접촉각의 감소는 나노유체의 주목할만한 임계열유속 증가의 원인이 된다.

다음으로 중요한 나노입자 흡착표면의 특성은 표면의 모세관 현상이다. 나노입자 표면흡착에 의한 매우 불규칙한 미세구조는 모세관력에 의한 유체의 흐름을 야기한다. Fig. 9 는 나노입자 흡착표면들에서의 모세관 현상에 의한 수두의 최대 높이 (Lc_{max})를 보여준다. 10⁻⁴% 이하의 입자 농도에서 형성된 흡착표면은 모세관 현상에 의한 수두의 상승을 만들지 않았다. 이것은 표면 미세 구조가 모세관 현상에 의한 유체의 흐름을 만들 만큼 충분히 발달하지 않았기 때문이다. 10⁻³% 이상의 농도 범위에 대해서 관찰된 유체의 상승 현상은 흡착된 나노입자의 종류(Al₂O₃ 또는 TiO₂)에 따라서 큰 차이를 보였다. TiO₂ 나노입자 흡착표면은 10⁻³% 농도에서 Lc_{max}가 1.2 mm의 값을 보이고, 그 이후 급격히 상승하여 10⁻²%에서 4.7 mm, 10⁻¹%에서 5.9 mm의 수두 상승 높이를 기록하였다. 반면, Al₂O₃의 경우 모든 농도 범위에 대해서 0.5 mm 이하의 Lc_{max}를 가졌다. 이러한 차이의 주요 원인은 Fig. 4에서 보여지는 Al₂O₃와 TiO₂ 나노입자 흡착면의 서로 다른 표면 미세구조에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 TiO₂ 나노입자 흡착표면에서의 순수물과 나노유체의 모세관현상의 비교를 보여준다. 동일한 흡착표면에 대해서 순수물의 Lc_{max}가 나노유체에 비하여 1.5 mm 가량 높은 값을 가졌다. 뿐만 아니라 모세관에 의한 수두의 높이가 최대 지점에 도달한 후, 순수물의 수두는 최대 지점을 계속 유지하는 반면, 나노유체의 수두는 점차 감소하여

충분히 시간이 지난 후에는 매우 낮은 수두 상승 높이를 유지하였다. 본 실험 시 상승한 흡착 표면으로부터 주위로의 증발이 존재하여, 상승 수두에 있는 물 분자들이 이탈하는 현상이 존재하였다. 따라서 수두의 상승 높이를 유지하기 위해서는 액체의 증발에 의한 감소를 충당할 정도의 충분한 유체의 공급이 하부 수조로부터 이루어져야 한다. 순수물의 경우 이러한 유체의 공급이 원활히 이루어진 반면, 나노유체의 경우 부유하는 나노입자들이 형성된 미세구조 사이의 모세관에 의한 유체흐름의 통로(Capillary Micro-flow-path)를 막는 역할을 하여 원활한 유체의 공급이 어려운 상황이 되어 Fig. 10 에서 보는 바와 같은 수두 높이의 감소 현상이 나타난 것이라고 추측된다.

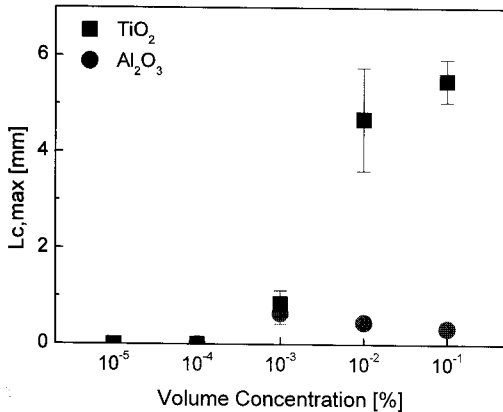


Fig. 9 Effect of nanoparticle surface deposition on maximum capillary liquid rise

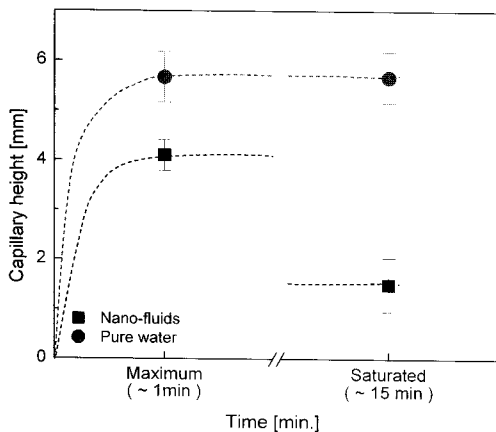


Fig. 10 Capillary wicking behaviors of pure water and TiO₂-water nano-fluids on a TiO₂ nanoparticle-deposited surface. The nano-fluids and the nanoparticle-coated heater are of 10⁻¹% volumetric concentration

모세관 현상이 존재하는 다공성 표면에서의 임계열유속의 상승은 기존의 여러 연구자들에 의해서 보고된 바 있다. 특히, Tehver⁽¹⁷⁾는 Haramura and Katto⁽¹⁸⁾가 제시한 기포 밀면에 존재하는 macrolayer의 소멸에 의한 임계열유속의 발생 메커니즘을 기초로 하여, 다공성 표면에서 발생하는 모세관 현상에 의한 기포 밀면으로의 추가적인 유체의 공급에 의해 macrolayer의 두께가 증가하는 현상이 나타나며 이로 인해 임계열유속의 발생이 효과적으로 지연될 수 있다고 추론하였다. 또한 실험을 통해 모세관에 의한 유체의 공급이 임계열유속을 선형적으로 증가시킴을 보였다. 이러한 사실을 고려할 때, Fig. 9에서 보여지는 나노입자 흡착표면에서의 모세관력에 의한 수두의 상승 높이는 임계열유속의 현격한 증가 경향의 근거가 될 수 있다. 또한 비등 현상을 매우 빠르고 큰 규모의 증발 과정이라고 생각해 볼 수 있는데, 부유하는 나노입자에 의한 모세관 흐름의 통로(Capillary Micro-flow-path)의 막힘 현상은 가열 벽면으로의 냉각용 유체의 공급을 저해할 것이다. 따라서 주목할만한 모세관 현상이 존재하는 10⁻²%과 10⁻¹% 나노입자 흡착표면에서 냉각용 유체로 순수물 대신에 나노유체를 사용한다면 Fig. 6(a)의 결과와 같이 임계열유속의 증가 정도가 오히려 저하되는 결과를 야기할 수 있다.

4. 결론

(1) 물-TiO₂ 및 물-Al₂O₃ 나노유체들은 0.01% 정도의 소량의 나노입자를 포함할 경우에도 풀비등 임계열유속을 현격히 증가시킬 수 있다.

(2) 나노유체 비등에서 유체 내에 부유하는 나노입자들은 기포의 발생, 성장, 이탈의 과정에서 히터표면에 주목할만하게 흡착되며, 히터표면의 구조적, 물리화학적 성질을 바꾼다.

(3) 나노유체 풀비등에 의한 TiO₂ 및 Al₂O₃ 나노입자들의 표면흡착은 순수물의 풀비등 임계열유속을 증가시켰으며 나노유체의 혁신적 임계열유속 증가를 충분히 재현하였다. 이것은 나노유체 풀비등 시 발생하는 나노입자 표면흡착이 임계열유속 증가의 주요 원인임을 명백히 보여주는 결과이다.

(4) 나노입자 흡착표면을 표면조도, 접촉각, 모세관력에 의한 수두상승을 바탕으로 정량화 하였다. 그 결과 나노입자흡착에 의한 접촉각의 현격한 감소 및 모세관력에 의한 유체의 흐름이 나노유체의 혁신적 임계열유속 증가 메커니즘과 밀접

한 관계를 가짐을 확인하였다.

참고문헌

- (1) You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H., 2003, "Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer," *Applied Physics Letter*, Vol. 83, pp. 3374~3376.
- (2) Vassallo, P., Kumar, R. and D'Amico, S., 2004, "Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-Water Nano-Fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 407~411.
- (3) Kim, H. D., Kim, J. B. and Kim, M. H., 2006, "Experimental Study on CHF Characteristics of Water-TiO₂ Nano-fluids," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 38, pp. 61~68.
- (4) Kim, S. J., Truong, B., Buongiorno, J., Hu, L. W. and Bang, I. C., 2006, "Study of Two-phase Heat Transfer in Nanofluids for Nuclear Applications," *Proceedings of ICAPP '06*, Reno, NV USA, June 4-8.
- (5) Bang, I. C. and Chang, S. H., 2005, "Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃-water Nano-Fluids from a Plain Surface in a Pool," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 2407~2419.
- (6) Milinova, D. and Kumar, R., 2005, "Role of Ions in Pool Boiling Heat Transfer of Pure and Silica Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, pp. 233107.
- (7) Das, S.K., Putra, N., Roetzel, W., 2003, "Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851~862.
- (8) Wen, D., Ding, Y., 2005, "Experimental Investigation into the Pool Boiling Heat Transfer of Aqueous Based γ -alumina Nanofluids," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, pp. 265~274.
- (9) Zuber, N., 1959, "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer," AEC Rep. AECU-4439.
- (10) Haramura, Y., 1991, "Steady State Pool Transition Boiling Heated with Condensing Steam," *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference 2*, 59~64.
- (11) Nishikawa, K., Fujita, Y., Ohta, H. and Hidaka, S., 1982, "Effects of System Pressure and Surface Roughness on Nucleate Boiling Heat Transfer," *Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ.*, Vol. 42, pp. 95~123.
- (12) Ramlison, J. M. and Lienhard, J. H., 1987, "Transition Boiling Heat Transfer and Film Transition Regime," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 480~486.
- (13) Roy Chowdhury, S. K. and Winterton, R. H. S., 1985, "Surface Effects in Pool Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 1881~1889.
- (14) Hong, K. T. and Imadojemu, H., Webb, R. L., 1994, "Effect of Oxidation and Surface Roughness on Contact Angle," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 8, pp. 279~285.
- (15) Takata, Y., Hidaka, S., Cao, J.M., Nakamura, T., Yamamoto, H., Masuda, M. and Ito, M., 2005, "Effect of Surface Wettability on Boiling and Evaporation," *Energy*, Vol. 30, pp. 209~220.
- (16) Fukuda, Y., Haze, I. and Osakabe, M., 2004, "The Effect of Fouling on Nucleate Pool Boiling of Small Wires," *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 33, pp. 316~329.
- (17) Tehver, J., 1992, "Influence of Porous Coating on the Boiling Burnout Heat Flux," *Recent Advances in Heat Transfer*, pp. 231~242.
- (18) Haramura, Y. and Katto, Y., 1983, "A New Hydrodynamic Model of Critical Heat Flux, Applicable Widely to Both Pool and Forced Convection Boiling on Submersed Bodies in Saturated Liquids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 389~399.