나노유체 이용한 풀비등 임계열유속 증가에서 나노입자 유착물의 영향에 관한 실험적 연구

김형대* · 김선태* · 안호선* · 김무환†

Experimental study on the role of nanoparticle deposition in pool boiling CHF enhancement using nanofluids

Hyung Dae Kim*, Seon Tae Kim*, Ho Seon Ahn*, and Moo Hwan Kim†

Key Words : CHF (임계열유속); nanofluids (나노유체); nanoparticle deposition (나노입자 유착물)

Abstract

It has been well known that pool boiling CHF in nanofluids compared to pure water significantly increase due to the deposition of nanoparticles on heater surface. This study concerns the characteristics of the nanoparticle deposition layer and its influence on CHF. Pool boiling experiments were carried out with 0.01vol.% water-TiO_2 nanofluids to obtain various nanoparticle-deposited heaters. CHF on the prepared heaters was measured during pool boiling in pure water. The heater surfaces were visualized using scanning electron microscope (SEM) and also characterized using contact angle and capillarity. The results showed that the CHF enhancement in nanofluids was completely dependent upon the structural and physicochemical characteristics of the nanoparticle deposition layer.

기호설명

D: 선형 히터의 지름(m)
I: 인가 전류(A)
L: 선형 히터의 길이(m)
L_c: 모세관 높이(m)
q''_{CHF}: 임계열유속(W/m^2)
q''_{max}: 인가된 최고 열유속(W/m^2)
Q": 단위 열전달표면에 인가된 총 열량(J/m^2)
$t_{boiling}$: 비등실험에 소요된 전체 시간(sec)
V: 인가 전압(V)
Greek Letters
θ: 접촉각(degree)

1. 서 론

나노유체는 매우 적은 양의 나노입자 농도만을 가지고 풀비등 임계열유속을 최고 200%까지 증가시킬 수 있다 [1-3]. 그러나 풀비등 임계열유속의 예측을 위해 기존에 가장 널리 사용되어오던 Zuber [4]의 상관식은 나노유체의 현격한 임계열유속 증가를 전혀 해석하지 못하였다. 최근 김형대 등 [5]은 물-TiO_2 및 -Al_2O_3 나노유체들을 이용하여 순수 히터 표면 위에서의 나노유체 풀비등 및 나노유체 풀비등에 의해 나노입자가 도포된 히터 표면 위에서의 순수물 풀비등 실험을 수행한 결과, 나노유체 풀비등 시 발생하는 히터 표면의 나노입자 코팅이 나노유체 임계열유속 증가 현상의 주요 원인임을 밝혔다. 한편 Sefiane [6]는 나노유체에 분산되어있는 나노입자들의 고체표면 근처에서의 정렬 효과에 의한 젖음현상의 변화가 임계열유속 증가의 주요 원인이 된다고 주장하였다.

본 연구에서는 나노유체를 이용한 임계열유속 증가의 주요원인이 비등 시 발생하는 나노입자 유착물에 의한 히터 표면 특성의 변화임을 실험적으로 검증하고자 함이다. 이를 위해 본 실험에서는

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

0.01vol.% 물-TiO_2 나노유체를 이용하여 풀비등 실험을 수행하였으며, 비등벽면에 나노입자 유착물이 발생함을 확인하였다. 다음으로 동일한 나노유체를 이용하여 서로 다른 과정의 풀비등 실험에 의해 다양한 종류의 나노입자 유착을 가지는 히터 구조를 준비하였고, 이들을 이용하여 순수물 비등 실험을 수행하였다. 마지막으로 이렇게 얻은 풀비등 결과들이 나노입자 유착에 의한 히터 표면 특성의 변화에 의해 매우 잘 설명됨을 확인하였다.

2. 풀비등 실험

2.1 나노유체

본 연구에서는 건조 상태의 나노입자를 순수유체 내에 분산시킴으로써 나노유체를 제조하였다. 나노입자의 분산은 용액의 pH 를 변화시키거나 소량의 계면활성제를 첨가하여 효과적으로 이루어질 수 있다. 그러나 본 풀비등 실험에서는 나노입자의 분산을 위하여 별도의 첨가물 없이 초음파를 이용하여 3 시간 가량 가진 하는 방법을 취하였다 실험에 사용된 나노입자는 졸-젤 합성법에 의해 제조된 TiO_2 이며, Fig. 1 은 증류수 내에 분산된 상태의 나노유체를 silicon wafer 위에서 한 방울 떨어뜨려 건조한 후 전자주사현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 대부분의 나노입자들은 기본 입자 크기인 23 nm 정도의 평균 크기를 가지면서 균일하게 분포하는 반면, 드물게 존재하지만 나노 입자들끼리의 심각한 뭉침 현상에 의해 크기가 수 μm 에 달하는 매우 큰 입자들이 존재하였다. 따라서 본 나노유체의 분포 특성은 균일한 입도의 분포라기 보다는 수십 nm 와 수천 nm 의 서로 다른 평균 사이즈를 가지는 두 가지 종류의 입자들의 혼합 형태라고 보는 것이 적절하다.

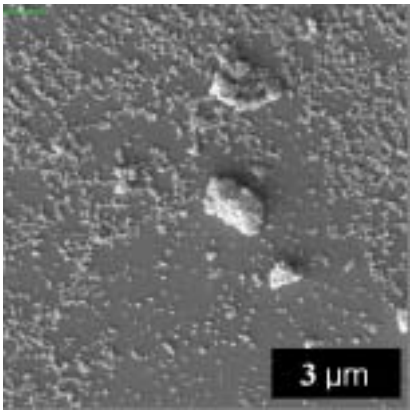


Fig. 1 SEM image of 0.01 vol.% water-TiO_2 nanofluids dried on silicon wafer

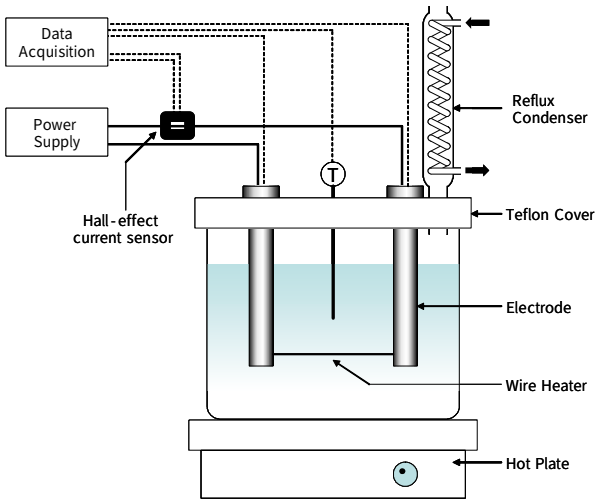


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

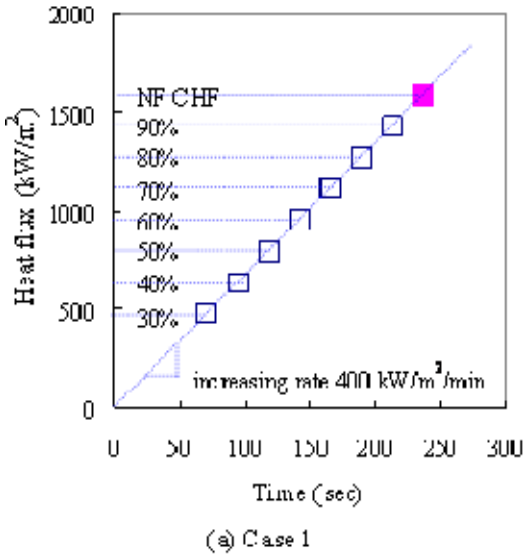
2.2 풀비등 실험장치 및 실험과정

본 실험은 최근 김형대 등 [5]이 수행한 실험연구와 동일한 실험장치를 이용하여 수행되었기 때문에 실험장치와 실험과정의 대부분이 동일하다. 따라서 본 논문에서는 실험에 대한 개략적인 설명만을 소개하며, 실험에 대한 보다 상세한 설명은 김형대 등[5]의 논문을 참고하기 바란다.

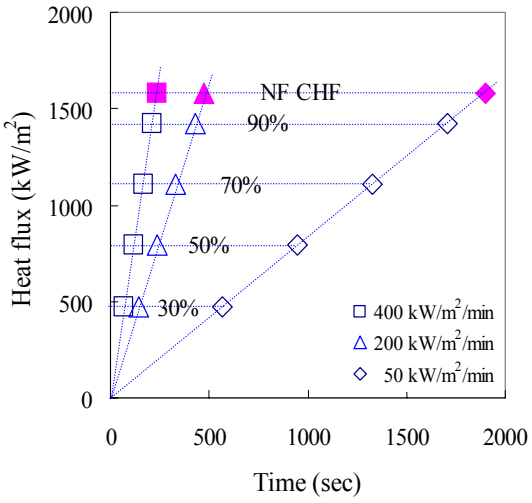
Fig. 2 는 실험 장치의 개념도이다. 풀비등 실험장치는 Pyrex glass 챔버와 내부의 비등용 히터 및 전극 연결 단자, 상단의 Teflon 덮개와 응축기, pre-heating 용 corning hot plate 으로 구성된다. 비등용 히터로는 직경 0.2 mm 상용 니크롬선이 사용되었으며 용액 내에서 지면에 수평 되게 설치되었다. HP agilent DC power supply (120 V/18 A)를 이용하여 전력을 인가하고 HP agilent 34970A data acquisition system 를 전력 및 유체의 온도를 측정을 수행하였다. 실험은 대기압 하에서 순수물의 포화 온도인 100 ºC 조건에서 수행되었다. 실험은 비등용 히터에 공급되는 전압을 증가시키면서 수행되었으며, 임계열유속 가까이에 이르렀을 때는 전압을 매우 천천히 증가시켰다. 임계열유속 조건에 이르게 되면 히터선의 온도가 급격히 상승하게 되어 히터의 저항은 급격히 증가하게 된다. 급격한 저항 변화로부터 임계열유속 조건의 발생을 확인하였으며, 이 순간 측정된 전류와 전압을 이용하여 임계열유속 값을 계산하였다.

$$q''_{CHF} = VI \big/ \pi DL \qquad (1)$$

본 실험의 풀비등 임계열유속 측정의 최대 오차는 ±4.4%였다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3 Experimental cases of pool boiling in nanofluids

본 실험에 앞서 순수 NiCr 히터를 이용하여 순수물과 0.01 vol.% 물-TiO_2 나노유체의 임계열유속 실험을 수 차례 수행하였다. 그 결과 각각 950, 1582 kW/m^2 라는 평균된 임계열유속 값을 얻을 수 있었다. 그 다음 나노유체의 임계열유속 값을 기준으로 Fig. 3 의 (a), (b)에서 보여지는 두 가지 실험들을 수행하였다.

Case 1 은 0.01 vol.% 물-TiO_2 나노유체 내에서 풀비등 실험 시작 후 히터표면에 가해지는 열유속을 400 kW/m^2/min 의 일정한 기울기로 증가시키다가, 열유속이 Fig. 3(a)와 같이 1582 kW/m^2 임계열유속의 30~90%사이의 7 가지 열유속 조건에 다다르면 전원을 차단하고 히터 시편을 회수하였다. 즉, 나노유체 비등곡선에서 임계열유속 이하 서로 다른 열유속 지점에 대응되는 히터 시편들을 확보하였다. 그 후 샘플들의 표면구조를 전자주사현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 이들 히터를 이용하여 400 kW/m^2/min 의 열유속 증가율을 적용하여 순수물의 풀비등 실험을 수행하여 각각의 시편들에 대해서 순수물의 임계열유속 값을 얻었다.

Case 2 에서는 서로 다른 세가지 열유속 증가율들(400, 200, 50 kW/m^2)을 적용하여 Fig. 3(b)와 같이 나노유체 내에서 case 1 과 동일한 과정의 실험을 수행하였다. 그리고 같은 열유속 값에 대하여 서로 다른 열유속 증가율을 가지는 히터 시편들에 대해서 표면 형상을 상호 비교하고, 순수물 내에서의 임계열유속 성능을 측정·비교하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 나노유체 비등에 의한 나노입자 표면유착

Figs. 4 와 5 는 각각의 나노유체 풀비등 실험이 후 회수한 히터의 표면 형상을 보여준다. 실험 후 모든 히터 표면에서 나노입자들에 의한 표면 도포현상을 관찰할 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 나노유체의 종류와 농도가 모두 동일함에도 실험과정(최고 인가 열유속과 열유속 증가율)에 따라 서로 다른 나노입자 유착 형상을 나타내었다.

Fig. 4 는 Fig. 3(a)에서 설명한 case 1 실험으로부터 회수한 히터 시편들의 표면 형상을 보여준다. 나노유체 내에서 인가된 최고 열유속의 크기에 비례하여 히터 표면의 나노입자 유착의 정도가 증가함을 보여준다. 이것은 히터에 가해지는 열유속이 증가함에 따라 히터 표면에서의 비등 현상이 강렬해지고, 나노입자의 유착이 증가함과 동시에 보다 크고 복잡한 형태의 나노입자 표면 유착구조가 형성되었을 것으로 추측된다.

Fig. 5 는 Fig. 3(b)의 case 2 실험에서 회수한 히터들 중 인가된 최고 열유속이 나노유체 임계열유속의 70% 지점에 해당되는 히터 시편들의 표면구조 비교를 보여준다. 각 히터들에 대해 가해진 최고 열유속은 동일하지만 열유속 증가율에 따라 나노입자 유착에 의한 표면 성상은 큰 차이를 보인다. 이 결과는 비등 현상에 의한 나노입자의 유착 현상은 비등 실험시 소요되는 시간에 비례하여 더 많은 나노입자 유착을 만들며 이는 더욱 활성화된 표면 형상구조로 나타남을 보여준다. 따라서 Figs. 4 와 5 로부터 나노유체 비등에서의 나노입자 유착에 의한 표면구조의 성장이 비등 시 가해진 열유속 및 총 비등 시간에 크게 영향을 받는다는 것을 확인 할 수 있다.

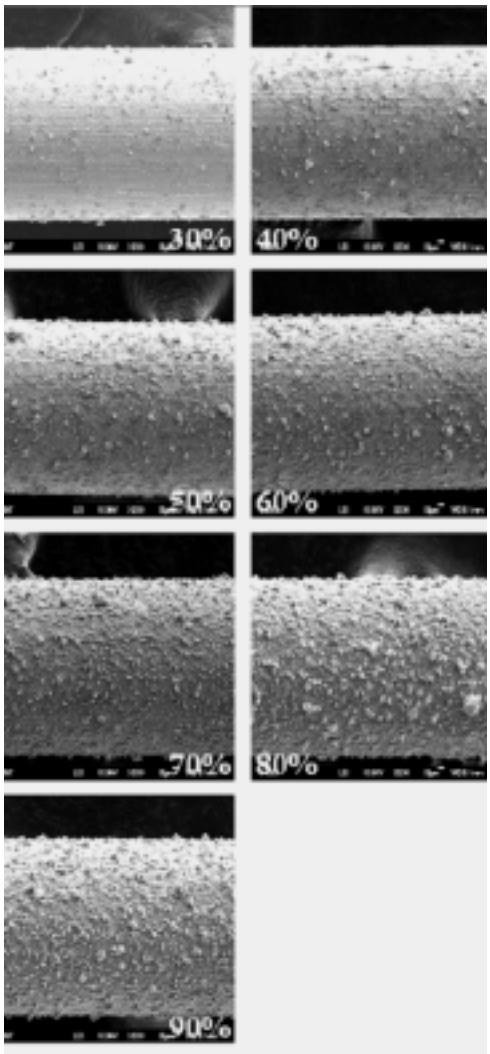


Fig. 4 SEM images of heater surfaces subsequent to pool boiling of nanofluids with various maximum applied heat flux (case 1)

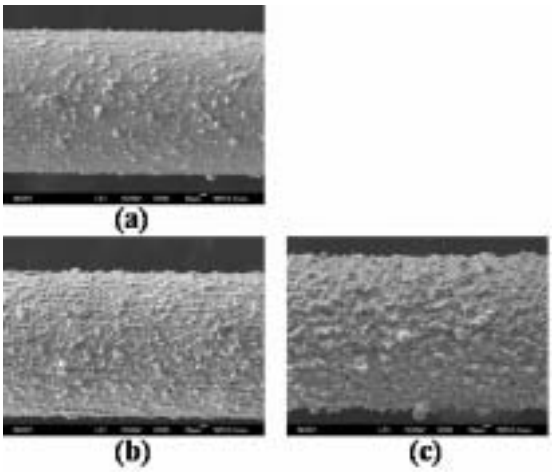


Fig. 5 SEM images of heater surfaces subsequent to pool boiling of nanofluids with different heat flux increasing rate for 70% maximum applied heat flux of $q''_{CHF, NF}$ (case 2): (a) 400 kW/m^2/min; (b) 200 kW/m^2/min; (c) 50 kW/m^2/min

3.2 나노입자 유착이 임계열유속에 미치는 영향

Figs. 6 과 7 은 각각 실험 cases 1 과 2 로부터 얻어진 나노입자 표면유착 히터들을 이용한 순수물 풀비등 실험에서의 임계열유속 결과를 보여준다. 이는 앞의 3.1 절에서 살펴본 서로 다른 나노입자 표면유착이 임계열유속 성능과 어떠한 관계를 가지는지 보여준다.

Fig. 6 에서 보여지는 바와 같이, 나노유체 비등실험에서 순수 NiCr 히터에 가해졌던 최종 열유속 값에 비례하여 순수물의 임계열유속이 증가하였다. 이것은 나노입자 유착에 의한 표면특성 변화로부터 기인한 결과로 Fig. 4 에서 보여지는 표면 구조의 성장 추이와 밀접한 연관을 가진다. 단, 50% 결과의 경우 다른 결과들의 경향성과는 달리 낮은 값을 나타내었으나, 실험 시 오차 요인이 개입되어 나타난 예외의 경우라고 판단된다.

나노유체 비등실험에서 최종 열유속 조건에 도달하는 열유속 증가율의 차이는 히터표면이 보여주는 순수물 임계열유속 성능에 영향을 주는 주요 인자임이 Fig. 7 로부터 확인되었다. 열유속 증가율이 작을수록 히터시편의 순수물 임계열유속 값이 높게 나타났으며, 이러한 결과의 원인은 Fig. 5 의 비교에서 보여지는 바와 같이 낮은 열유속 증가율 조건에서의 총 비등시간의 증가는 나노입자의 표면유착을 증가시키고 표면구조의 기하학적 성장을 확연히 강화시켰다. 이것은 히터표면의 특성을 비등 열전달에 유리한 조건으로 변화시켜 더 높은 순수물 임계열유속을 만드는 원인으로 작용하였다.

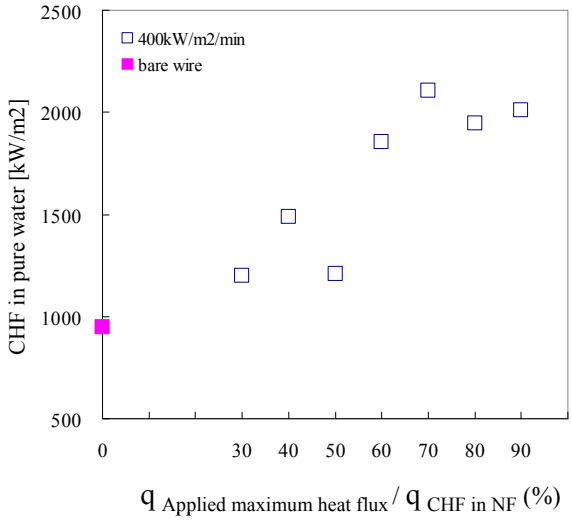


Fig. 6 q''_{CHF} of water on the nanoparticle-deposited heaters obtained from case 1

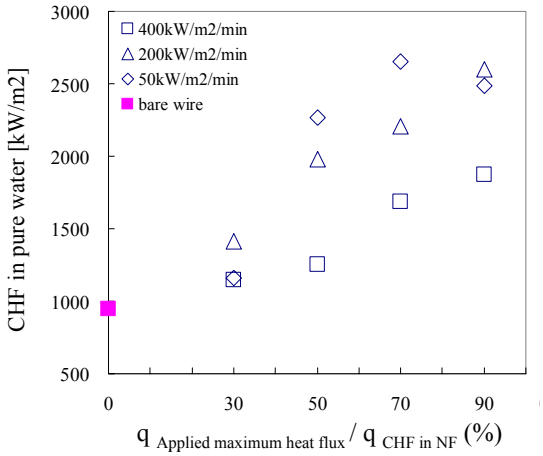


Fig. 7 q''_{CHF} of water on the nanoparticle-deposited heaters obtained from case 2

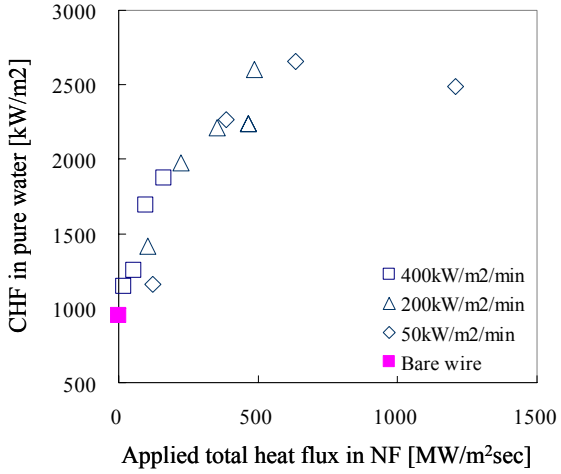


Fig. 8 Dependency of q''_{CHF} of water on the nanoparticle-deposited heaters on the total applied heat during boiling of nanofluids

나노입자의 표면유착은 나노유체의 비등 시 기포의 밑면 액막에 존재하던 나노입자들이 유체의 기화에 히터표면에 모이면서 발생한다. 따라서 단위 면적당 나노입자의 표면유착의 정도는 면적당 기포의 총 발생 횟수와 비례하고, 이는 시간마다 인가된 열유속을 총 비등시간 동안 적분한 값에 비례한다. 특히 열유속을 일정한 기울기로 증가시킨 경우 면적당 총 인가열량은 다음과 같다.

$$Q'' = \frac{1}{2} \times t_{boiling} \times q''_{max} \qquad (2)$$

앞에서 나노유체 비등에 의한 나노입자의 표면유착은 히터표면의 특성을 변화시켜 순수물 임계열유속 성능을 증가시킴을 확인하였다. 따라서 면적당 총 인가열량은 나노입자 유착이 존재하는 표면에서의 임계열유속 특성과 연관되며, Fig. 8 은 두 인자가 서로 정비례함을 보여준다.

3.3 비등표면 특성과 풀비등 임계열유속

Fig. 9 는 대기압 하에서 순수 NiCr 히터와 나노입자들의 표면유착이 존재하는 NiCr 히터에서의 순수물의 접촉각와 모세관 현상에 의한 유체의 상승 높이를 측정하여 비교한 결과이다. 순수 히터의 경우 60°의 접촉각을 가지면서 모세력에 의한 유체 상승이 전혀 존재하지 않았다. 반면 나노입자 유착히터의 경우 접촉각이 현저히 줄어들었을 뿐만 아니라 성장된 표면구조에 의해 유체가 상승하는 모세관 현상을 관찰 할 수 있었다. 이러한 각각의 현상은 고열유속 비등 시 기포 밑면에 존재하면서 임계열유속으로 가는 시발점이 되는 dry/hot spot 의 성장을 지연시킴으로써 풀비등 임계열유속을 증가시키는 원인 될 수 있다.

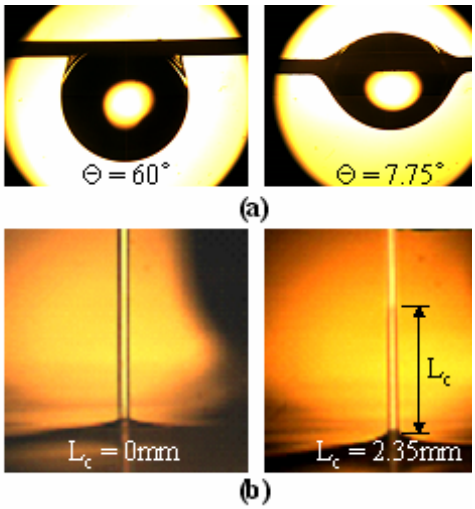


Fig. 9 Characterization of bare (left) and nanoparticle-deposited (right) NiCr wires: (a) contact angle, (b) capillary wicking height

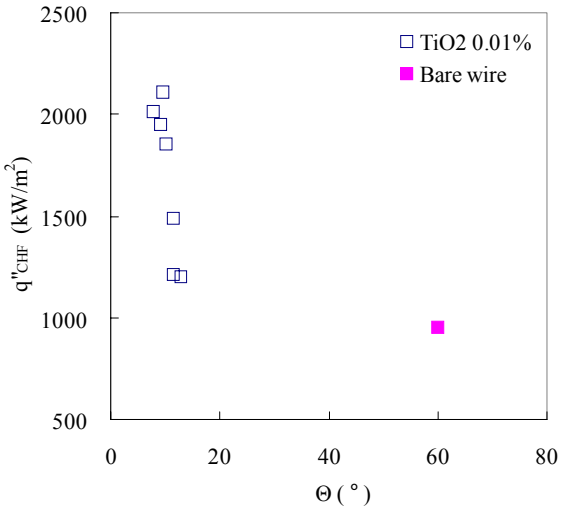


Fig. 10 Relationship of q''_{CHF} and contact angle of pure water on nanoparticle-deposited surfaces (case 1)

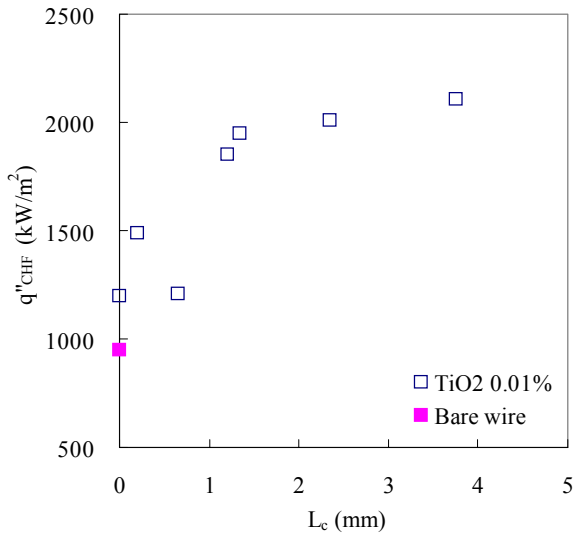


Fig. 11 Contact angles of water on bare and nanoparticle-coated wires (case 1)

Fig. 10 은 나노입자 코팅면에서의 순수물 임계열유속과 접촉각의 관계를 나타낸 그래프이다. 선행 연구자들에 의해 보고된 결과와 같이 임계열유속과 접촉각이 서로 반비례 경향성을 나타내었다 [7]. 그러나 순수 히터표면으로부터의 급격한 접촉각 감소 이후 매우 미미한 접촉각의 변화만 가지고 임계열유속의 변화 추이를 완벽히 설명하는 것은 불가능하였다.

Fig. 11 은 모세관 현상에 의한 유체의 상승 높이와 임계열유속의 상관관계를 보여준다. 이전에 지적되었던 case 1 의 50% 지점 결과를 제외한다면 순수물의 임계열유속이 나노입자 유착히터에서의 모세관 상승력에 잘 대응됨을 확인 할 수 있다. 이와 관련하여 Tehver [8]는 다공성 표면에서 발생하는 모세관 현상에 의한 기포 밑면으로의 추가적인 유체의 공급에 의해서 임계열유속이 증가될 수 있다고 주장하였으며, 실험적으로 모세관에 의한 유체의 공급이 임계열유속을 선형적으로 증가 시킴을 보였다. 이러한 사실을 고려할 때, Fig. 11 이 보여주는 나노입자 유착 표면에서의 모세관력의 존재는 임계열유속 상승의 근거가 된다.

4. 결론

0.01 vol.% 물-TiO_2 나노유체들을 이용하여 나노유체 풀비등 시 발생하는 나노입자 히터표면 유착현상을 관찰하고, 그 표면 위에서 순수물을 풀비등 임계열유속을 측정하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 나노유체 비등 시 발생하는 나노입자 유착현상은 비등 과정에서 가해진 열유속의 크기와 지속시간에 비례하여 발생한다.

2. 나노입자 유착에 의해 발생한 나노입자 도포히터는 순수 히터와 비교하여 보다 높은 순수물의 임계열유속을 가지며, 증가 정도는 나노입자 유착에 의한 히터 표면의 형상변화와 밀접한 연관을 가진다.

3. 나노입자 유착에 의한 히터 표면특성의 변화는 접촉각의 현저한 감소 및 복잡한 표면 구조에 의한 모세관력의 발생으로 표현되며, 풀비등 임계열유속 상승의 주요 원인이 된다.

참고문헌

(1) S. M. You, J. H. Kim, K. H. Kim, 2003, "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer," *Applied Physics Letter*, Vol. 83 pp. 3374-3376.

(2) I. C. Bang, S. H. 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. 48, pp. 2407-2419.

(3) H. D. Kim, J. B. Kim, M. H. Kim, 2006, "Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 5070-5074.

(4) N. Zuber, 1959, "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer," AEC Rep. AECU-4439.

(5) 김형대, 김무환, 2006, "나노유체를 이용한 풀비등 임계열유속 증가에 대한 실험적 연구", 2006 대한기계학회 추계학술대회 CD-Rom.

(6) K. Sefiane, 2006, "On the role of structural disjoining pressure and contact line pinning in critical heat flux enhancement during boiling of nanofluids ", *Applied Physics Letter*, Vol. 89, 044106.

(7) S. G. Kandlikar, M. Shoji, V. K. Dhir, 1999, "*Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation*," Taylor & Francis, pp. 145-151.

(8) J. Tehver, 1992, "Influence of porous coating on the boiling burnout heat flux," *Recent Advances in Heat Transfer: Proceedings of the First Baltic Heat Transfer Conference*, Sweden, pp. 231-242.