물-TiO_2 나노유체 풀비등에서의 임계열유속

김형대† · 김무환*

Critical heat flux behavior in pool boiling of water-TiO_2 nanofluids

Hyung Dae Kim, Moo Hwan Kim

Key Words : Critical heat flux(임계열유속), Nanofluids(나노유체), Nanoparticle(나노입자), Pool boiling(풀비등)

Abstract

'Nanofluids' means suspension of common fluids with particles of the order of nanometers in size. The present research is an experimental study of critical heat flux (CHF) behavior in pool boiling of water-TiO_2 nanofluids under atmospheric pressure. CHF for pure water and water-TiO_2 nanofluids were respectively measured using disk-type copper block heater with 10mm diameter, and CHF of water with surfactant was also measured to consider the effect of surfactant used to disperse nanoparticle. The results show a large increase in CHF for water-TiO_2 nanofluids compared to pure water. After CHF occurred, heat flux in pool boiling for water-TiO_2 nanofluids was maintained in considerable value, but not for pure water.

기호설명

g	중력 가속도	[m/sec^2]
h_{fg}	증발 잠열	[J/kgK]
k	구리 블록 열전도도	[W/mK]
q''	열유속	[W/m^2]
$q''_{max,z}$	Zuber 의 임계열유속	[W/m^2]
T_1,T_2,T_3	열전대 온도	[K]
T_w	가열 벽면의 온도	[K]
T_{sat}	포화 온도	[K]
ΔT	벽면 과열도	[K]
Δx	열전대 삽입 거리 차	[m]
Greek Letters		
ρ_f	액체 밀도	[kg/m^3]
ρ_g	기체 밀도	[kg/m^3]
σ	액체 표면 장력	[N/m]

† 포항공과대학교 기계공학과 대학원
E-mail : bluebada@postech.ac.kr
TEL : (054)279-8106 FAX : (054)279-3199
* 포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

일반 가정의 보일러에서부터 여러 가지 운송 수단들의 냉각 장치, 더 나아가 발전소와 같은 대형 시설에 이르기까지 열교환기의 적용 분야는 매우 광범위하다. 이러한 열교환 장치에 있어서 유체는 열을 전달하는 매개체로서 열교환기의 성능과 밀접한 연관을 가진다. 그럼에도 불구하고 대부분의 작동 유체가 가지는 낮은 열전도도는 열교환기의 성능 향상을 제한하는 하나의 요인으로 작용하여 온 것이 사실이다. 금속의 경우 열교환기에 사용되는 일반 유체들보다 수백에서 수천 배에 이르는 열전도도를 가지며 이것을 유체 내에 분산시켰을 경우 용액의 유효 열전도도의 증가는 Maxwell[1]의 이론 이후 많은 연구자들에 의해서 증명되어 왔다. 그러나 이전까지의 연구에 사용된 입자의 크기는 모두 밀리나 마이크로 단위로 용액에 분산시킨 경우 매우 불안정하여 빠른 시간 내에 침전이 일어났으며 작동 유체로 사용할 경우 유로를 막아버리는 문제가 발생하여 실제적으로 적용이 불가능하였다. 최근 나노 기술의 현격한 발전은 수십 나노 크기를 가지는 금속 입자의 대량 생산을 가능하도

록 하였으며, 용액 내 입자들의 안정적 분산을 가능하도록 하였다. 1995 년에 최초로 Choi[2]는 일반 용액 내에 금속 나노입자(nanoparticle)를 분산시킨 용액을 일컬어 "나노유체(nanofluids)"라고 명명하였으며, 나노유체의 유효 열전도도가 일반적인 Maxwell[1]의 이론보다 더 큰 값을 가진다는 실험 결과를 소개하였다. 이후 여러 연구자들에 의해 나노유체가 가지는 유효 열전도도의 측정과 측정 결과의 이론적 설명을 위한 연구가 진행되어 오고 있다.[3][4][5]

나노유체의 단상 열전달 연구와 함께 최근에는 나노유체의 상변화 열전달에 대한 적용 가능성을 검토하는 실험들이 진행되고 있다. Das et al[6]은 수평으로 놓인 직경 20mm 의 원형관 히터를 이용하여 평균 크기 38nm 의 Al_2O_3 입자가 분산된 나노유체의 풀비등 실험을 핵비등(nucleate boiling) 영역에 대해서 수행하였다. 실험 결과 순수 물의 경우와 비교하여 비등 열전달이 지양되어 동일한 열유속 조건하에서 히터 표면의 과열도가 증가하게 됨을 보여 주었으며, 실험 전후 히터 표면의 조도를 측정하여 나노유체의 비등 시 히터 표면 조도가 낮아짐을 확인하였다. 이후 Li et al[7] 은 Hus[8]의 활성 공동 이론을 이용하여 나노유체의 비등 시 입자의 침전에 의해서 활성 가능한 크기의 공동이 감소하게 되며, 따라서 동일한 열유속 조건에서 기포의 생성에 필요한 벽면 과열도가 증가하게 된다고 분석하였다. 최근 Vassallo et al[9]는 NiCr 선형 히터를 이용하여 서로 다른 크기(15nm, 50nm, 3 μm)의 SiO2 입자가 각각 분산되어 있는 유체들의 풀비등 실험을 전체 비등 영역에 대해서 수행하였다. 실험 결과 모든 실험 유체들에 대해서 임계열유속이 크게 증가함을 보였다. 특히 50nm 나노입자를 포함하는 유체의 경우 천이비등 영역을 지나 막비등 영역까지도 안정적인 실험이 가능하여, 임계열유속 직후 히터선의 순간적 과열에 의한 단선 없이 녹는점 근처까지 실험이 가능하였다. 나노유체의 이와 같은 비등 특성은 상변화 열교환기에서 순간적 과열에 의한 임계열유속 발생시에 열유속이 급격히 감소하지 않고 지속적으로 유지되도록 하여 냉각되고 있는 장치의 손상을 지연시킬 수 있다. 하지만 이러한 새로운 현상들에 대한 충분한 이해는 아직까지 이루어지지 못한 상태로 이 부분에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 임계열유속 부근에서의 나노유체의 비등 열전달 현상을 연구하기 위하여 디스크형태의 원형 표면을 가지는 구리 블록 히터를 이용하여 대기압 상태에서 순수 물, 분산제가 첨가된 수용액, TiO_2 나노입자가 분산된 용액의 임계열유속을 각각 측정하여 결과를 상호 비교하였다. 또한 임계열유속 발생 직후 시간에 따른 히터 표면의 과열도와 열유속의 거동을 관찰하였다.

2. 물-TiO_2 나노유체

물-TiO_2 나노유체 두 종류를 ㈜나노신소재에서 구매하였다. 분산제 0.1%를 첨가하여 질량분 10%로 분산시킨 나노입자의 평균크기는 각각 45nm, 84nm 이었다.

질량분 10%의 용액을 3 차 증류수를 사용하여 부피 비 0.5%로 희석시켜 실험에 사용하였다. Fig. 1 는 부피 비 0.5%로 희석시킨 물-TiO_2 나노유체를 촬영용 격자 위에서 건조시킨 후 투과식전자현미경(TEM : transmission electron microscopy)을 이용하여 촬영한 사진이다. Fig. 2 는 나노입자의 크기 분포를 Microtrac UPA 150 을 이용하여 입도 분석한 그래프이다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 평균 입자 크기 84nm 인 경우의 결과이며 45nm 물-TiO_2 나노유체의 경우도 같은 방법으로 분석하였다.

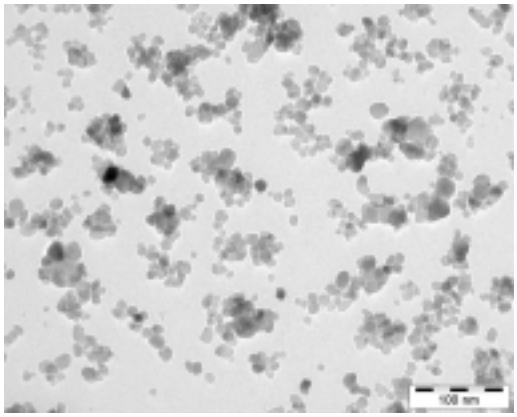

Fig. 1 TEM photo of dispersed nanoparticles

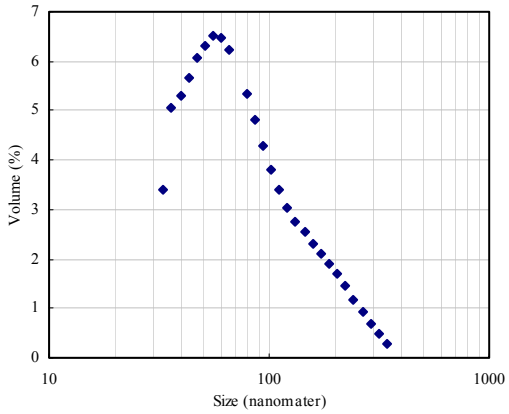

Fig. 2 Particle size distribution of the nanoparticles

3. 실험

3.1 실험 장치

Fig. 3 은 전체 실험 장치의 개략도이다. 본 연구에서는 대기압 상태에서의 포화 풀비등 조건을 시험하기 위하여 내부 부피 2.5liter 의 알루미늄 챔버를 사용하였다. 챔버 내 유체의 온도는 K 형 열전대와 1kW 용량의 투입식 히터에 의한 피드백 제어를 통해서 원하는 조건으로 유지 되도록 하였다. 응축기로 들어간 수증기가 액화하여 챔버 내부로 손실 없이 다시 유입되도록 응축기를 설계하여 실험 중 유체의 농도가 일정하게 유지되도록 하였다. 응축부를 통과한 응축수가 챔버 내부로 재 유입되는 유로의 한 부분을 대기 개방하여 챔버의 내부 압력이 항상 외부의 대기압과 동일하게 유지되도록 하였다.

Fig. 4 는 비등 실험용 히터의 내부 구성을 설명하기 위한 개략도 이다. 지름 10mm 의 원형 평면을 가지는 구리 블록의 하부에 200W 용량의 삽입용 히터를 3 개 장치하여 열전도에 의하여 히터 상부로 열이 공급되도록 하였다. 직경 0.5mm K 형 열전대 3 개를 그림과 같이 4mm 간격을 두고 삽입하여 각 지점의 온도를 HP 사의 Agilent 34970A 데이터 계측 시스템을 사용하여 측정하였다. 구리 블록 상부의 유체와 접하는 부분은 고온용 플라스틱 단열재인 피크(peek)를 사용하여 구리 블록을 고정한 후 고온용 실리콘으로 마감하였다.

실험에 사용된 구리 블록의 소재가 100% 순수 구리가 아니기 때문에 열전도도 k 는 문헌상의 값과 다른 값을 가지게 된다. 따라서 진공 열전도도 측정 장치를 이용하여 구리 블록의 열전도도를 측정한 결과 문헌상의 값보다 17%정도 낮은 값을 가졌다.

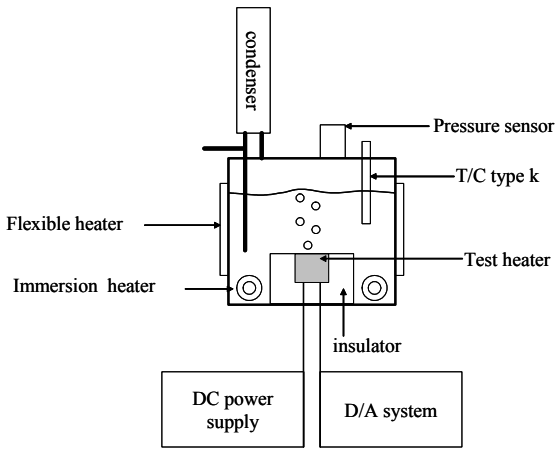

Fig. 3 Schematics of the experimental apparatus

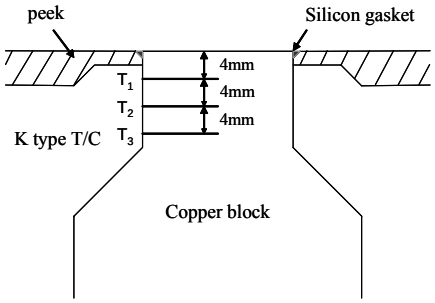

Fig. 4 Test heater for experiments

3.2 실험 방법 및 데이터 처리

매 실험 시 히터 표면을 1000psc 사포로 연마하여 동일한 표면 상태를 유지시켜 주었으며, 실험 전 1 시간 동안 용액을 100°C 끓여서 용액에 녹아 있는 기체를 제거하였다. 전원 공급기의 전압을 증가시키면서 실험하였다. 전압을 조정한 후에 정상상태에 도달 후 1 초 간격으로 1 분간 온도 계측을 하여 평균을 취해서 결과 분석에 이용하였다. 히터 표면의 온도는 측정한 각 지점의 온도를 외삽하여 구하였으며, 열유속은 두 지점 사이의 온도 차를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$T_w = T_1 - (T_2 - T_1) \tag{1}$$

$$q'' = k\frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \tag{2}$$

임계열유속의 경우는 위와 같은 방식으로 실험을 진행하다가 표면 온도의 급속한 변화가 나타나면 이 순간 직전의 열유속을 계산하여 임계열유속을 측정하였다. 임계열유속 발생 이후에도 히터의 공급 전력을 유지하며 각 지점의 온도변화를 관찰하였으며, T_1 의 온도가 230°C 에 이르면 삽입용 히터의 보호를 위하여 전원을 차단하였다.

챔버 내 유체 온도 측정용 열전대의 정확도는 0.5K 이며, 구리 블록 내부의 온도측정에 사용된 0.5mm K 형 열전대의 온도측정 오차는 0.2K 이다. 구리의 열전도도 측정 오차는 5W/mK 이고 열전대 사이의 거리 Δx 의 가공 오차는 0.05mm 이다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_1}}{T_2 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_2}}{T_2 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{U_k}{k}\right)^2} \tag{3}$$

위의 식으로부터 계산된 열유속 측정의 불확실성은 ±28.3% (10^5W/m^2 근처의 저열유속 구간)에서 ±3.1% (10^6W/m^2 이상의 고열유속 구간)이었다.

4. 실험 결과

4.1 임계열유속

Fig. 5 는 순수 물, 분산제가 첨가된 수용액 그리고 물-TiO_2 나노유체의 풀비등 곡선들을 비교한 그래프이다.

Nukiyama[10]와 Jakob[11] 이래로 많은 연구자들에 의해 수행되어 온 풀비등 실험은 이번 연구의 순수 물 실험에서 잘 재현되었다. 비등이 일어나지 않는 자연 대류 영역에서는 열유속이 매우 천천히 증가하다가 히터의 표면에서 핵비등이 시작되자 열유속이 빠르게 증가하는 경향성을 보여주었다. 이와 같은 경향성을 유지하면서 계속 증가하던 열유속은 어느 순간 더 이상 증가하지 않고 대신 히터 표면의 온도가 매우 빠르게 상승하는 임계열유속 현상이 발생하였다. 임계열유속에 대한 Zuber[12]의 상관식은 다음과 같다.

$$q''_{max,z} = \frac{\pi}{24}\rho_g^{1/4} h_{fg} \sqrt[4]{g\sigma(\rho_f - \rho_g)} \qquad (4)$$

본 실험에서 측정된 순수 물의 임계열유속은 식 (4)의 값과 비교하면 20%정도 높게 측정되었다. Rainey et al[13]은 평면 히터를 이용한 풀비등 실험에서 히터의 크기가 임계열유속에 미치는 영향은 상당히 크며, 히터의 크기가 작아질수록 임계열유속이 상승한다는 실험결과를 제시하였다. 본 실험에서 사용된 히터의 크기는 지름 10mm 로, 히터 주위의 과열되어지지 않은 유체가 히터 방향으로 밀려 들어오면서 생기는 열전달에 의한 임계열유속의 상승을 기대할 수 있다.

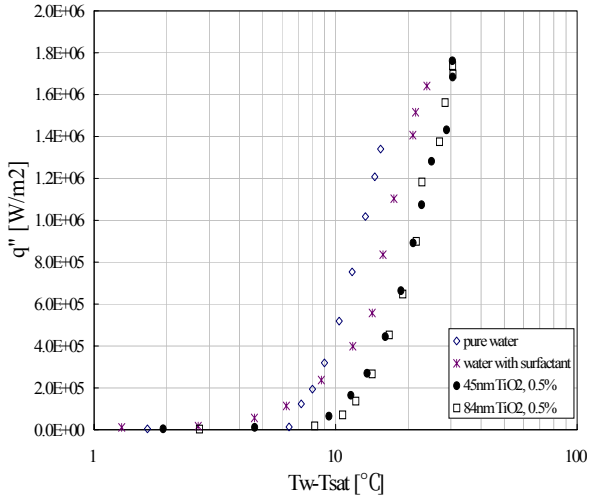

Fig. 5 . q"-ΔT curves for water-TiO_2 nanofluids

핵비등 영역에서 물-TiO_2 나노유체의 비등은 순수 물의 경우보다 지양되어 같은 열유속 조건에서 나노유체의 벽면 과열도가 높게 나타났다. 이것은 이전의 연구자들과 일치하는 결과로서, Li et al[7]의 이론과 같이 나노입자들이 활성 가능한 공동들을 채워서 기포의 생성을 위해서 필요한 벽면 과열도를 상승시킨 것으로 판단된다. 나노유체의 임계열유속은 순수 물에 비하여 30%정도 증가하였으며, 이 점에서의 벽면 과열도는 순수 물의 경우보다 15°C 가량 상승하여 큰 폭의 증가를 보였다. 45nm 물-TiO2 나노유체와 84nm 물- TiO_2 나노유체 간의 임계열유속의 차이는 거의 존재하지 않았다

분산제의 영향을 살펴보기 위하여 준비된 분산제만을 첨가한 수용액의 경우 임계열유속이 순수 물보다 증가하였으나 나노유체의 임계열유속 증가에는 미치지 못하였다.

4.2 임계열유속 이후의 거동

실험한 용액들에 대해서 임계열유속 발생 직후 시간에 따른 벽면 과열도와 열유속의 변화를 서로 비교하였다.

Fig. 6 에서 20 초인 순간을 기점으로 순수 물과 물-TiO2 나노유체의 표면 과열도가 갑자기 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 순수 물의 경우는 온도 상승이 시작된 이후 수 초안에 벽면 과열도가 100°C 를 넘어서 순수 물의 비등영역 중 막비등 영역에 해당하는 온도에까지 이르렀다. 그러나 나노유체의 경우 20°C 정도에 걸친 빠른 온도 상승이 있은 후 점차적으로 온도가 증가하는 안정적인 변화 추이를 보였다. 분산제가 첨가된 용액의 경우 순수 물과 비교하였을 때 표면 과열도가 천천히 증가하였으나 중간에 온도의 변동이 존재하며 상대적으로 불안정한 모습을 나타내었다.

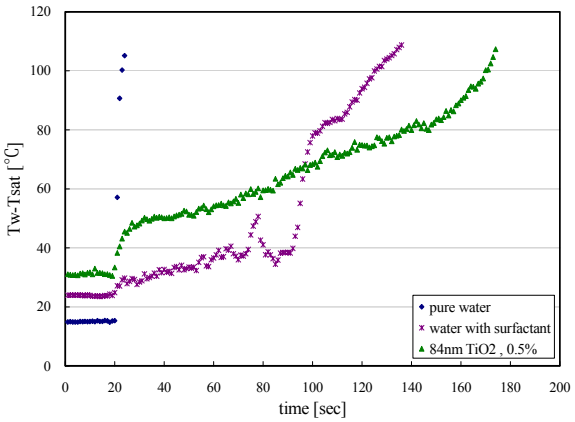

Fig. 6 Variation of wall superheat after CHF

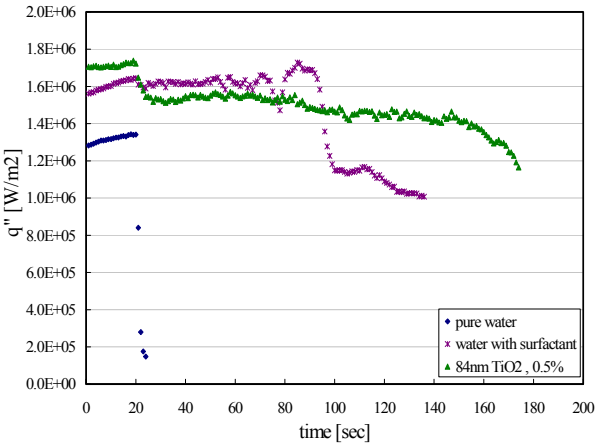

Fig. 7 Variation of heat flux after CHF

Fig. 7 은 임계열유속의 발생 이후 히터에서 방출되는 열유속을 시간에 따라서 나타낸 그래프이다. 순수 물의 경우 임계열유속의 발생 직후 방출되는 열유속이 현격히 감소한 반면 나노유체의 경우 열유속이 순수 물의 임계열유속보다도 높은 값을 유지하면서 천천히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 임계열유속의 발생 이후 나노유체를 사용했을 때 순수 물의 경우보다 더 방출하는 총 열량은 열유속을 시간에 따라 적분한 값으로 본 실험의 경우 그 양은 상당하다.

5. 결론

본 연구에서는 물- TiO_2 나노유체 비등 열전달에서 임계열유속 현상의 특성들을 실험을 통하여 규명하였다.

물- TiO_2 나노유체의 풀비등에 있어서 발생하는 임계열유속은 순수 물의 경우와 비교하여 30%정도, 발생 지점의 벽면 과열도는 15°C 정도의 증가를 보였다. 임계열유속의 발생 직후 순수 물의 경우는 히터로부터 방출되는 열유속이 크게 감소하여 벽면과열도가 급속히 증가하는 반면 물- TiO_2 나노유체의 경우는 열유속이 순수 물의 임계열유속 이상의 값을 유지하면서 천천히 감소하여 벽면과열도의 급속한 증가가 방지됨을 확인하였다. 이는 냉각이 필요한 열원에 순간적으로 과부하가 발생한 경우 과열에 의한 장치의 파손을 감소 시킬 수 있다.

후 기

이 연구는 국가지정연구실사업의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

(1) U. S. Choi, 1995, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” ASME, *Developments and applications of non-Newtonian flows*, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, pp.99~105.
(2) J.C. Maxwell, 1881, “A treatise on Electricity and Magnetism,” Clarendon Press, Oxford, UK, Vol. 1, pp.435,.
(3) Yimin Xuan, Wilfried Roetzel, 2000, “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701~3707.
(4) J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thomson, 2001, “Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nano-fluids containing copper nano-particle,” *Applied Physics Letter*, Vol. 78, pp. 718~720.
(5) Yimin Xuan, Qiang Li, and Weifeng Hu, 2003, “Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids,” *AIChE Journal*, Vol. 49, No 4, pp. 1038~1043.
(6) S.K. Das, N. Putra, W. Roetzel, 2003, “Pool boiling characteristics of nano-fluids,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851~862.
(7) C.H. Li, B.X. Wang, X.F. Peng, 2003, “Experimental investigation on boiling of nano-particle suspensions,” 5th International Conference on Boiling Heat Transfer.
(8) Y.Y. Hsu, 1962, “On the size range of active nucleation cavities on a heating surface,” ASEM, *Journal Heat Transfer*, Vol. 84, Issue 3, pp.207~216.
(9) 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, Issue 2, pp. 407~411.
(10) 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 (1966, translated in *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1419~1433).
(11) M. Jakob, W. Linke, 1935, *Phys. Z.*,Vol. 36, pp. 267.
(12) N. Zuber, 1959, “Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer,” AEC Rep. AECU-4439.
(13) K.N. Rainey, S.M. You, 2000, “Effects of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.44, pp.2589~2599.