creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265291

2016 년 2 월

석사학위논문

다양한 표면조건에서 Al_2O_3 나노유체의 풀비등 현상의 해석 및 실험적 고찰

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

함 정 균

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다양한 표면조건에서 Al_2O_3 나노유체의 풀비등 현상의 해석 및 실험적 고찰

Theoretical and experimental study on the pool boiling of Al_2O_3 nanofluid various surface conditions

2016년 02월 25일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

함 정 균

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다양한 표면조건에서 Al_2O_3 나노유체의 풀비등 현상의 해석 및 실험적 고찰

지도교수 조 홍 현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

함 정 균

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

함정균의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 설 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 조 홍 현 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Contents

Contents ····· i 1
List of Figures ····· iv
List of Tables ····· vi
Nomenclature ····· vii
ABSTRACT ····· ix

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구배경 ····· 1
제 2 절 기존의 연구 ····· 3
제 3 절 연구 목적 ····· 6

제 2 장 비등열전달 이론 ····· 7
제 1 절 비등열전달 종류 ····· 7
제 2 절 비등구역과 비등곡선 ····· 9
1. 자연대류 비등(A-B) ····· 9
2. 핵비등(B-C) ····· 9
3. 천이비등(C-D) ····· 10
4. 막비등(D-E) ····· 10

제 3 장 실험장치 및 방법 ····· 12
제 1 절 실험장치 ····· 12
1. 비등 실험용 히터 ····· 15
2. 데이터 측정 ····· 17
가. 온도측정 ····· 17

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 압력측정 ····· 18
다. 데이터수집 장치 ····· 19
라. 슬라이닥스 ····· 20
마. 전력적산계 ····· 21
바. 초고속 카메라 ····· 22
제 2 절 나노유체 제조 ····· 23
1. 나노유체 제조방법 ····· 23
2. Al_2O_3 나노유체 ····· 25
제 3 절 Al_2O_3 나노유체 비등열전달실험 ····· 27
1. 실험방법 ····· 27
2. 실험조건 ····· 28
3. 실험데이터 처리 ····· 29

제 4 장 나노유체 비등열전달 모델링 ····· 31
제 1 절 나노유체 모델링 ····· 31
제 2 절 비등열전달 및 임계열유속 예측 모델 ····· 37
제 3 절 기포의 이탈직경, 빈도, 활성핵기공밀도 ····· 41

제 5 장 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 실험 결과 ····· 45
제 1 절 실험의 신뢰성 평가 ····· 45
제 2 절 매끄러운 표면에서 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 특성 고찰 ····· 47
1. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등곡선 고찰 ····· 47
2. 나노유체 함유량 변화에 따른 임계열유속 고찰 ····· 49
3. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등열전달계수 고찰 ····· 50

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 나노유체의 기포성장 고찰 ····· 52
5. 나노유체 비등 전/후 표면거칠기의 영향성 고찰 ····· 54
제 3 절 거친 표면에서 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 특성 고찰 ····· 56
1. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등곡선 고찰 ····· 56
2. 나노유체 함유량 변화에 따른 임계열유속 고찰 ····· 58
3. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등열전달계수 고찰 ····· 60
4. 나노유체의 기포성장 고찰 ····· 62
5. 나노유체 비등 전/후 표면거칠기의 영향성 고찰 ····· 64

제 6 장 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 해석 결과 ····· 66
제 1 절 나노유체 비등모델링 신뢰성 평가 ····· 66
제 2 절 나노유체 비등곡선 ····· 68
제 3 절 나노유체 비등의 기포이탈직경 ····· 70
제 4 절 나노유체 비등의 기포이탈빈도 ····· 74
제 5 절 나노유체 비등의 활성핵기공밀도 ····· 77
제 6 절 나노유체 비등의 자연대류비등과 임계열유속 ····· 82

제 7 장 결 론 ····· 84

제 8 장 참고문헌 ····· 88

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Fig. 1.1 Application of boiling heat transfer ····· 2
Fig. 2.1 Classification of boiling on the basis of the presence of bulk fluid motion ····· 7
Fig. 2.2 Classification of boiling on the basis of the presence of bulk fluid temperature ····· 8
Fig. 2.3 Typical boiling curve for water at 1 atm pressure ····· 11
Fig. 3.1 Schematics diagram about the pool boiling equipment of nanofluid ····· 13
Fig. 3.2 Experiment equipment ····· 14
Fig. 3.3 Component of boiling experiment heater ····· 16
Fig. 3.4 K-type thermocouple ····· 17
Fig. 3.5 Pressure transmitter ····· 18
Fig. 3.6 Data acquisition ····· 19
Fig. 3.7 Slide-ac ····· 20
Fig. 3.8 Digital power meter ····· 21
Fig. 3.9 High speed camera and display unit ····· 22
Fig. 3.10 Ultrasonic Liquid processor with continuous flow equipment ····· 23
Fig. 3.11 Al_2O_3 nanopower SEM image Ultrasonic ····· 25
Fig. 3.12 그림 16 ····· 29
Fig. 4.1 Contact angle according to volume concentration of Al_2O_3 nano particle. ····· 35
Fig. 4.2 Flow chart about calculation for base/nanofluid contact angle ····· 36
Fig. 4.3 Mechanism and process about the bubble growth ····· 37
Fig. 4.4 Flow chart for the simulation of nanofluid boiling ····· 40
Fig. 5.1 Comparison with the experiment and other correlations ····· 46
Fig. 5.2 Boiling curve according to the variation of nanofluid volume concentration at smooth surface ····· 47
Fig. 5.3 Improvement of critical heat flux according to nanofluid volume concentration at smooth surface ····· 49
Fig. 5.4 Boiling heat transfer coefficient according to nanofluid volume concentration at smooth surface ····· 51

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5.5 Bubble growth for water and 10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid according to heatflux ····· 53
Fig. 5.6 Dynamic contact angle in water and 10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid at smooth surface ·····
Fig. 5.7 Variation of surface roughness at smooth surface before and after boiling ····· 55
Fig. 5.8 Al_2O_3 nanoparticle deposition according to nanofluid concentration on smooth heated surface ····· 55
Fig. 5.9 Boiling curve according to the variation of nanofluid volume concentration at rough surface ····· 57
Fig. 5.10 Improvement of critical heat flux according to nanofluid volume concentration at rough surface ····· 59
Fig. 5.11 Ratio of critical heat flux with rough and smooth surface according to nanofluid volume concentration ····· 59
Fig. 5.12 Boiling heat transfer coefficient according to nanofluid volume concentration at rough surface ····· 60
Fig. 5.13 Bubble growth for water and 10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid according to heatflux ····· 63
Fig. 5.14 Dynamic contact angle about water and 10^{-3}vol%-Al_2O_3 nanofluid at rough surface ····· 63
Fig. 5.15 Variation of surface roughness at rough surface before and after boiling ····· 65
Fig. 5.16 Al_2O_3 nanoparticle deposition according to nanofluid concentration on rough heated surface ····· 65
Fig. 6.1 Comparison of boiling curve with this model and previous studies ····· 66
Fig. 6.2 Boiling curve according to volume concentration of nanofluid at (a) D_{np}=25 nm, (b) D_{np}=50 nm, (c) D_{np}=75 nm ····· 69
Fig. 6.3 The bubble departure diameter according to volume concentration ····· 72
Fig. 6.4 Improvement rate for Energy and K factors according to concentration of nanofluid and nanoparticle size ····· 73
Fig. 6.5 The frequency according to volume concentration and size of nanoparticle ····· 75
Fig. 6.6 Wait time ratio about total time according to volume concentration and size of nano particle ····· 76

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.7 Nucleate site density according to concentration of nanofluid and nanoparticle size ····· 79
Fig. 6.8 Surface wettability parameter and relative parameter for nucleate site density of nanofluid ····· 80
Fig. 6.9 Schematic diagram for the influence of nanoparticle deposition on heated surface (a) Dnp=75 nm, (b) Dnp=50 nm, (c) Dnp=25 nm ····· 81
Fig. 6.10 Influence of heat flux transferred by natural convection and dryout fraction for water, 25 nm-0.025vol%, 75 nm-0.025vol% and 75 nm-0.1vol% ····· 83

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 1.1 Summary about previous studies ····· 4
Table 3.1 Properties of Peek insulation ····· 16
Table 3.2 Specification of K-type thermocouple ····· 17
Table 3.3 Specification of pressure transmitter ····· 18
Table 3.4 Specification of data aquisition ····· 19
Table 3.5 Specification of slide-ac ····· 20
Table 3.6 Specification of digital power meter ····· 21
Table 3.7 Specification of high speed camera ····· 22
Table 3.8 Specification of ultrasonic homogenizer ····· 24
Table 3.9 Aluminum Oxide Nanopowder (80% alpha : 20%gamma) Certificate of Analysis - wt% ····· 25
Table 3.10 Specification of nanoparticle ····· 26
Table 3.11 Concentration of Al_2O_3 nanofluid ····· 26
Table 3.12 Experimental condition ····· 28
Table 3.13 Detailed uncertainty of instrument used in this study ····· 30
Table 4.1 Properties of base fluid and nano particle ····· 31
Table 4.2 Bubble departure diameter correlation ····· 41

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Nomenclature

A	: Area (m^2)
Ar	: Archimedes number (-)
B	: Constant about microlayer evaporation
Cp	: Specific heat (J/kg • K)
D	: Diameter (mm)
f	: Bubble departure frequency (Hz)
g	: Gravity (m/s^2)
h	: Boiling heat transfer coefficient ($W/m^2 \cdot K$)
h	: Lantent heat (J/kg)
Ja	: Jakob number
K	: Dimensionless parameter about Jensen and Memmel's bubble departure (-)
K	: Ratio of bubble projected ara to heat area after bubble (-)
k	: Thermal conductivity ($W/m^2 \cdot K$)
Na	: Active nucleate site density (site/m^2)
P	: Pressure (Pa)
Pr	: Prandtl number (-)
T	: Temperature
t	: time (s)
q	: Heat flux
R	: Dimensionless parameter about surface roughness
Ra	: Surface roughness (㎛)
Rnd	: dimensionless parameter about surface roughness by nanofluid
V	: evaporation velocity at microlayer unit bubble

Greeks

α	: thermal diffusion coefficient (m^2/s)
β	: thermal expansion coefficient (m^2/s)
β	: orientation angle (°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

γ : parameter at surface
λ : parameter about modified wettability by nanofluid
μ : viscosity (m^2/s)
θ : contact angle (°)
ν : kinematic viscosity (m^2/s)
ρ : density (kg/m^3)
σ : surface tension (kg/s^2)
ϕ : concentration
ψ : ratio between surface roughness and nano particle diameter

Subscripts

b : bubble
bf : base fluid
b,d : bubble departure
CHF : critical heat flux
g : growth
f : liquid
fg : liquid - vapor
i : internal
me : micropayer evaporation
nc : natural convection
nf : nano fluid
np : nano particle
s : surface
sat : saturated
tc : transient conduction
w : wait

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Theoretical and experimental study on the pool boiling of Al_2O_3 nanofluid various surface conditions

Jeong-gyun. Ham
Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun,
MSd. Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

To understand boiling heat transfer characteristics of nanofluid, the experiment and theoretical study about effect on nanofluid concentration, nanoparticle size and surface roughness were carried out by using Al_2O_3 nanofluid. Both the smooth surface(Ra=177.48 nm) and rough surface(Ra=292.79 nm), the critical heat flux(CHF) and superheat to reach the CHF of Al_2O_3 nanofluid increased according to the increase of nanofluid concentration. Maximum CHF on the smooth surface and rough surface was 722.52 kW/m^2 and 834.9 kW/m^2, respectively, at 0.05vol%-concentration and those were improved one more than 22 kW/m^2 and 350 kW/m^2 compared to that of water as base fluid.

However, the variation trend of boiling heat transfer coefficient was different according to surface roughness. In case of smooth surface, the boiling heat transfer coefficient at the CHF was 0.9, 17.4, 16.9, 19.2, 17.4 kW/m^2·K at the nanofluid concentrations of 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%, respectively. The boiling heat transfer coefficient of nanofluid was improved more than water and the improvement of boiling heat transfer coefficient decreased over the nanofluid

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

concentration of 0.05vol%. Besides, for the rough surface, the boiling heat transfer coefficient at the CHF was 15.5, 14.5, 18.1, 14.2, 15.2 $kW/m^2 \cdot K$, respectively. at the nanofluid concentrations of 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%, which were similar to water or a little decreased one.

In all experiments, the nanoparticle deposition on the heated surface was observed but the influence of nanoparticle deposition to heat transfer performance was different. Both the smooth and rough surface, the improvement of wettability was observed compared to water during boiling. However, the nanoparticle deposition was uniformly made on the smooth surface but was irregularly made on the rough surface for the investigation of heated surface geometry change by nanoparticle deposition after boiling.

To investigate the influences on nanofluid boiling according to volume concentration and size of nanoparticle, the theoretical study was carried out when the volume concentration was varied from 0vol% to 0.1vol% and nano particle sizes were 25, 50, 75 nm. The critical heat flux of nanofluid improved more than base fluid. When the volume concentration of 0.025vol% - Al_2O_3 nanoparticle size of 50 nm, the maximum critical heat flux was 1,515 kW/m^2 and then it gradually decreased. However, in case that volume concentration was 0.025vol%, the critical heat fluxes were 1,499, 1,515, and 1,509 kW/m^2 for the nanoparticle sizes of 25, 50, and 75 nm, respectively. It was small different. For Al_2O_3 nanoparticle of 50 nm, as the volume concentration increased from 0.025vol% to 0.1%, the bubble departure diameter increased from 1.235 to 1.805 mm but the bubble departure diameter did not show a significant change according to nanoparticle size. It is because the energy factor and K improved according to the increase of volume concentration of Al_2O_3 nanoparticle but it did not change a lot with nanoparticle size. The nucleate site density at the critical heat flux increased from 32.97 to 30.53 site/cm^2 with the increase of volume concentration for 50 nm-Al_2O_3 nanoparticle size, but it was seriously lower than that base fluid

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

with the nucleate site density of 65.90 site/cm^2. As nanoparticle size increased from 25 to 75 nm at the volume concentration of 0.025vol%, the nucleate site density at the critical heat flux decreased from 35.59 to 31.3 site/m^2. The volume concentration and nanoparticle size affects to the natural convection boiling. At the volume concentration of 0.025vol%, the portion of natural convection boiling was extended because the increase of dryout fraction, which was caused by the improvement of wettability before and after boiling. However, as nanoparticle size was similar to surface roughness, the critical heat flux was increased because the nucleate site density increased while the bubble departure diameter was slightly increased.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

현대사회는 인구의 증가와 전자기기 및 IT 산업의 발전으로 인하 에너지 사용량이 급격히 증가하고 있다. 특히 반도체 집적도의 향상으로 인한 전자제품의 소형화로 인해 휴대용 전자기기가 다수 등장하였다. 하지만 과거와 달리 휴대성으로 인한 제품의 소형화는 국소 공간에 다량의 열을 집중시켜 제품의 수명을 단축시켜 성능 감소를 발생시키고 있다. 전자기기의 냉각을 위해 과거에는 수냉 및 공랭식 냉각방법들이 사용되었지만 집적도 증가로 인한 열부하의 증가와 제품 소형화를 만족시키기 위해 잠열을 이용한 열전달 방법 중 하나인 히트파이프 냉각을 주로 사용하고 있다. 또한 에너지 사용량의 지속적으로 증가하고 있는 실정이지만 아직까지 신재생에너지에 대한 기술개발 발전이 더딤에 따라 다른 발전에 비해 발전원가가 저렴한 원자력발전의 의존성이 증가하고 있는 실정이다. 하지만 2011년에 발생한 인본 후쿠시마 원전사고와 같이 막대한 열이 발생하는 원자로의 냉각에 문제가 야기 시 다량의 방사선 누출에 대한 위험이 존재한다. 이러한 상황에서 각종기기의 냉각시스템 성능 향상은 기기의 성능유지와 안전성 확보를 위한 중요한 요소이다.

일반적으로 냉각시스템에 사용되는 열전달 매체들은 액체로 낮은 열전도도를 갖기 때문에 냉각이 필요한 열 부하가 증가 시 냉각시스템의 대형화가 요구된다. 그러므로 다량의 열을 냉각 시 잠열을 이용하는 비등열전달은 다른 열전달 방법에 비해 효율적인 방법이다. 비등열전달은 액체에서 기체로 상변화가 이루어질 때 잠열을 이용함으로 다른 열전달 방법에 비해 막대한 에너지를 전달 할 수 있어 막대한 열이 발생하는 원자로, 화학반응로, 전자기기, 응축기와 증발기 등의 열교환기의 열교환 방법으로 널리 사용되고 있다. 하지만 임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)을 초과하는 막대한 열이 열전달 표면에 발생 또는 유입되면 열전달 표면에 기포막이 형성되어 열전달이 원활하기 이루어지지 않아 기기의 성능 저하가 발생할 뿐만 아니라 열전달 표면의 급격한 온도 상승으로 인해 기기의 물리적 피해가 일어나는 번아웃(Burn-out)이 발생하여 기기의 안정성 문제를 야기한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 다량의 열을 안정적으로 전달하기 위해서는 비등 열전달계수와 임계열유속 향상이 필요하다. 비등 열전달 성능을 향상시키는 방법에는 대표적으로 기포의 이탈을 원활하게 만들기 위해 가열표면의 거칠기를 변화시키거나 핀 등을 부탁시키는 물리적 방법, 가열표면에 친수성 소수성 코팅을 수행하여 가열표면의 젖음성을 개선시키는 화학적 방법 등이 있다. 하지만 유체의 열물성 개선이 이루어지면 물리 및 화학적 방법을 통한 비등열전달 성능 개선의 한계가 개선되기 때문에 비등열전달에 물, 냉매 부동액 등 일반적인 유체에 비해 열물성이 우수한 나노유체를 이용한 비등열전달 성능 향상에 대한 연구가 수행되고 있다. 하지만 모유체에 분산되는 나노입자의 종류가 다양하며 나노유체의 분산 안정성, 나노유체의 함유량, 나노입자 및 가열표면의 종류에 따라 나노유체 비등특성은 상이하게 나타난다. 나노유체의 비등열전달에 영향을 주는 요인에 대한 조사가 필요하다.

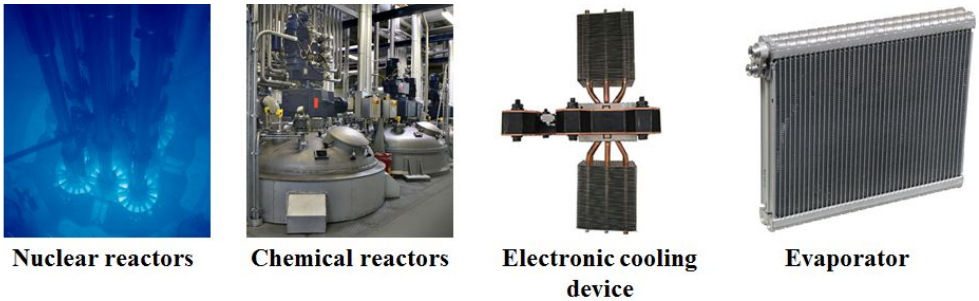


Fig. 1.1 Application of boiling heat transfer

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 기존의 연구

열전달 향상을 위하여 나노유체를 적용한 다양한 시스템에 대한 연구는 90년대 이후 급격히 증가하고 있으며 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이와 관련된 연구들을 살펴보면 Choi 등(1995)은 1995년에 물, 냉매, 부동액 등 일반적인 유체에 나노크기의 금속 또는 비금속 입자를 분산시킨 유체인 나노유체를 이론적으로 제안하였으며 1999년에 나노유체의 열전도도가 모유체에 비해 급격히 향상됨을 보고하였다. Xuan 와 Li (2000)는 Cu 나노입자를 이용하여 Cu-Water / Cu-Oil 나노유체를 제작하여 나노유체의 열물성치 향상을 관찰하였으며 나노입자의 체적분률, 모양, 크기 등이 나노유체의 열전도에 영향을 준다고 하였으며 Eastman 등(2001)은 0.3vol%의 CuO-Ethylen glycol 나노유체에서 열전도가 40% 향상됨을 보고하였다. 따라서 나노유체는 비등열전달과 임계열유속을 향상시키는 해결책으로 주목 받고 있다. Das 등(2003)은 Al_2O_3-Water를 이용하여 가열표면이 매끄러운 표면과 거친 표면에서 나노유체의 비등열전달에 대한 특성을 조사하였으며 나노유체의 체적분률(Volume concentration)이 증가함에 따라 비등열전달계수는 모유체에 비해 최대 약 40%까지 악화되며 매끄러운 표면보다 거친 표면에서 비등열전달이 더 높음을 보고하였으며 비등열전달계수의 감소는 가열표면에 나노입자의 침전으로 인해 활성핵기공이 감소한다고 주장하였다.

Bang 과 Chang(2005)은 나노입자의 함유량이 0%~4% 인 Al_2O_3-Water을 이용하여 대기압 하에서 비등열전달계수와 임계열유속을 측정하였으며 비등 열전달계수는 약 20% 감소하였지만 임계유속은 약 32% 향상되며 비등열전달계수의 감소와 임계열유속의 향상은 침전된 나노입자가 다공성 나노층을 이루어 나노입자층에 갇힌 기체와 나노입자 층이 열저항을 야기하여 비등 열전달계수는 감소하지만 가열표면의 표면개선을 야기하여 젖음성(Wettability)가 증가되어 임계열유속이 증가된다고 보고하였다. Kim 등(2007)은 나노입자의 함유량이 0~0.1%에서 Al_2O_3, SiO_2, ZnO-Water 나노유체를 이용하여 SUS 재질의 와이어 히터에서 비등실험을 수행하였으며 나노입자의 함유량에 따른 비등 전/후 접촉각 측정과 나노입자가 침전된 가열표면의 SEM 촬열을 통해 나노입자의 침전이 가열표면의 젖음성 향상을 유발함을 확인하였으며 임계열유속에 대한 다양한 이론을 통해 나노유체의 임계열유속 향상을 설명하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ganapathy 와 Sajith(2013)는 SiO_2-Water 나노유체를 이용하여 평판형 히터에서 비등실험을 수행하였으며 Semi-analytical 모델을 이용하여 나노입자의 함유량과 표면거칠기에 대한 SiO_2-Water 나노유체의 비등 특성을 분석하였으며 Semi-analytical 모델을 통해 실험과 유사한 비등곡선을 예측하였다. 지금까지 연구된 바에 따르면 나노유체의 비등은 나노입자의 종류와 함유량에 따라 다르지만 모유체에 비해 임계열유속을 향상시키는 반면에 열전달계수를 감소시키는 것으로 보고되었으며 자세한 내용은 Table 1.1에 요약하였다.

Table 1.1 Summary about previous studies

Reference	Nano fluid	Experiment Condition	Results
Das and (2003)	Al_2O_3-Water	- Heat type : cartridge heat - D_p : 38 nm avg. - Ra : 0.387 ㎛, 1.15 ㎛	- Deterioration of BHTC, About 40% less - BHTC decreased according to the volume concentration of nanoparticle - BHTC is higher on rough surfaces than on smooth surfaces - Particle deposition is discovered
Bang and Chang (2005)	Al_2O_3-Water	- D_p : 47 nm avg - Heater type : Rectangular(4×100mm^2) - Volume fraction : 0~4%v	- Deterioration of BHTC, about 20% less - Improvement of CHF - Variation of surface geometry caused by particle deposition deteriorates BHTC
Taylor and Phelan (2009)	Al_2O_3-Water	- D_p : 20 nm avg. - Heater type : NiFe wire - Volume fraction : 0.05~1%v - Subcool and saturated pool boiling	- Improvement of BHTC, 25-40% - Nanofluid with subcool boiling led to a degradation in heat transfer relative to saturated pool boiling of pure water

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Reference	Nano fluid	Experiment Condition	Results
Kim et al. (2007)	Al_2O_3, SiO_2, ZrO-Water	- D_p : - Heater type : SUS wire, D=0.38 mm - Volume fraction : 0~0.1%v	- Deterioration of BHTC - Improvement of CHF - CHF is enhanced by buildup of a porous layer of nanoparticles
Jung et al. (2012)	Al_2O_3-Water	- D_p : 45 nm avg. - Addition of stabilizer - Volume concentration : 10^{-5}-10^{-1}%v	- Deterioration of BHTC according to the increase of volume concentration - Improvement of CHF, 203% and 216% at non-stability and stability, respectively - Below the critical point of stability, the effective boiling area increases but past the critical point, the increase is interrupted
Shahmoradi el al. (2013)	Al_2O_3-Water	- D_p : 40 nm - Volume fraction : 10^{-3}-10^{-1}%v - Heater type : Cu plate	- The improvement of CHF, about 7 - 47% - Deterioration of BHTC, about 13-40 - Boiling curve is affected by the relation between nanoparticle size and surface roughness.
Amiri et al. (2014)	CNT-Ag-H_2O CNT-Cys-H_2O CNT--H_2O	- D_p:<10nm,10-20 nm, 20-40 nm, 40-60 nm - Weight concentration : 0.01%, 0.05%, 0.1% - Heater type : plate, D=15 nm	- As the weight concentration increased, BTHC decreased in the presence of the non-covalent nanofluid. - BTHC of covalent nanofluid increases as the concentration of CNT increases - The diameter of CNT increased, the amount of the BHTC and CHF decreased

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 연구 목적

기존의 연구에 따르면 나노유체는 모유체의 임계열유속을 향상시키지만 비등열전달계수는 감소한다고 알려져 있다. 나노유체의 종류와 크기, 비등이 발생하는 가열면의 형상에 따라 나노유체 비등열전달 특성은 다르게 나타난다. 현재까지 진행되고 있는 나노유체 비등열전달 특성에 대한 연구는 나노유체의 종류와 함유량 변화에 중점이 맞춰져 있으며 나노유체 비등열전달에 미치는 다양한 요소에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 또한 비등현상은 상 변화, 자연대류 등 비등발생시 기포의 발생에 의한 열전달 메커니즘이 다른 열전달 방법에 비해 복잡할 뿐만 아니라 나노유체의 경우 나노입자 함유량과 가열표면의 거칠기, 표면의 친수성, 나노입자의 표면 침착에 의한 표면개선효과 등 복합적 요인으로 인해 비등열전달 성능에 해석 및 비등열전달 성능을 예측하는데 큰 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 나노유체의 비등 열전달 특성에 대한 가열표면의 형상에 대한 영향성을 평가하기 위해 가열표면의 표면거칠기를 폴리싱(Polishing) 작업을 통해 다르게 하여 매끄러운 표면과 거친 표면에서 Al_2O_3 나노유체의 함유량의 변화에 대한 실험을 통해 Al_2O_3 나노유체의 비등열전달 특성을 분석하였다. 또한 비등 특성을 예측하기 위해 Kurul과 Podowski(1990)은 Heat flux partitioning model을 이용하여 나노입자의 크기 변화에 따른 Al_2O_3 나노유체의 비등열전달 특성을 분석하였다. 이에 본 연구에서는 실험과 해석결과를 종합하여 Al_2O_3 나노유체의 비등열전달에 미치는 요인들을 조사하였으며 나노입자 크기와 함유량, 표면거칠기의 영향성이 Al_2O_3 나노유체 비등열전달에 미치는 영향성을 평가하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 비등열전달 이론

제 1 절 비등열전달 종류

비등열전달은 액체에서 증기로 상변화시에 물질전달과 함께 수반되는 열전달 과정으로 자연대류비등(Natural convective boiling)과 강제대류 비등(Fored convective boiling)의 두가지 종류가 있다. 자연대류비등은 유체에 펌프와 같은 외력이 작용하지 않은 정체상태의 액체 속에서 발생하는 비등을 풀비등(Pool boiling)이라 하며 흐르는 유체와 인접한 벽면에서 발생하는 비등을 강제대류비등 또는 유동비등이라 한다. 풀비등과 유동비등은 액체의 온도에 따라 과냉비등(Subcooled boiling) 또는 포화비등(Saturated boiing) 으로 구분하며 액체의 온도가 포화온도(T_{sat})보다 낮으면 과냉비등, 액체의 온도가 포화온도(T_{sat})와 같으면 포화비등으로 구분된다.

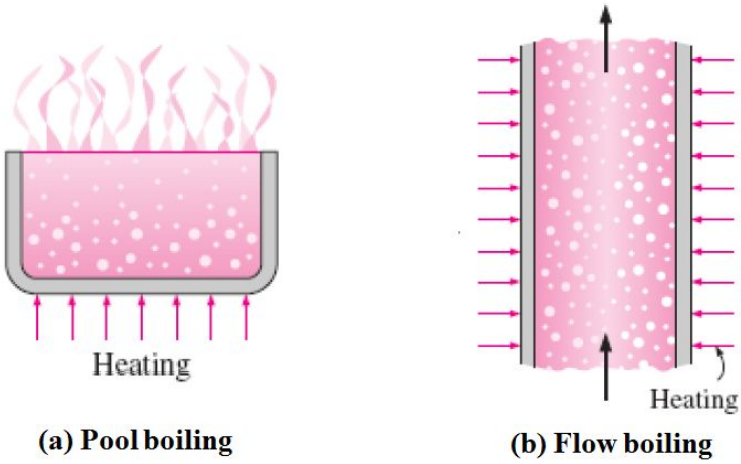


Fig. 2.1 Classification of boiling on the basis of the presence of bulk fluid motion

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

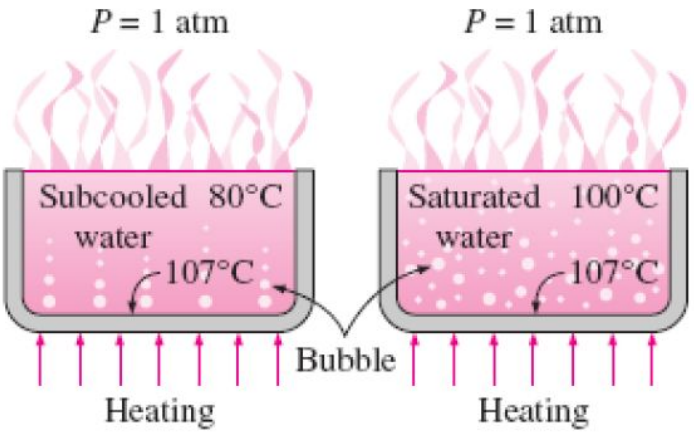


Fig. 2.2 Classification of boiling on the basis of the presence of bulk fluid temperature

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 비등구열과 비등곡선

비등열전달은 일상생활에서 손쉽게 볼 수 있는 열전달 방법이지만 아직까지 비등 시 기포형성과정에 대한 이해를 못하고 있으며 경험 또는 준 경험적인 관계에 의존하고 있다. Nukiyama(1934)는 전기적으로 가열된 니크롬과 백금 도선을 액체에 담가 실험을 수행하였으며 비등과정은 가열면의 온도에 따라 비등 열전달률이 최대 또는 최소가 되는 구간으로 구성됨을 밝혔다. 비등은 4개의 다른 비등구역인 자연대류비등(Natural convection boiling), 핵비등(Nucleate boiling), 천이비등(transient boiling), 막비등 (Film boiling) 으로 구성됨이 관찰되었다. 비등 특성은 유체의 종류에 따라 다르게 나타나지만 비등곡선의 형태는 유체의 종류와 무관하게 동일하게 나타난다. Fig. 2.3은 열유속과 초과온도에 대한 물의 비등곡선을 나타낸 것이다.

1. 자연대류비등 (A-B)

이론적으로 일정한 압력에서 순수한 물질은 포화온도에 도달 후 비등이 시작되지만 실제적으로 액체가 포화온도보다 약간 더 높게 형성되어도 기포의 형상을 볼 수 없다. 따라서 이러한 경우 액체는 준 안정적 상태로 가열된 것이며 자유표면으로 올라올 때 증발한다. 이러한 비등에서 유체의 유동은 자연대류에 의하여 지배되며 가열표면에서 열전달은 자연대류에 의해 이루어진다.

2. 핵비등 (B-C)

초음 생기는 기포는 비등곡선의 B점에서 가열표면에 존재하는 홈이나 공동 등 특수한 곳에서 발생하며 비등곡선이 점 C로 이동하면서 핵자리(Nucleate site)가 증가하여 기포생성률이 증가하며 생성된 기포는 상변화시 잠열을 액체로 전달하고 가열면에 인접한 액체를 교반함으로써 대류 열전달을 향상시킨다. 이 영액을 핵비등이라 하며 작은 온도차에 비해 열전달률은 매우 높다. 초과온도가 지속적으로 증가하면 가열표면은 다수의 핵자리로부터 생성된 기포가 활발히 생성되어

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

증기막으로 덮히게 되어 기포 생성에 필요한 액체의 유입이 차단과 증기막에 의한 가열표면의 단열이 이루어져 가열면의 온도는 급격히 증가하게 된다. 이를 핵비등 이탈(Departure from nucleate site boiling, DNB), 비등위기 (Boiling crisis) 혹인 번아웃 (Burn out) 이라 하며 이때의 열유속을 임계열유속 (Critical heat flux, CHF) 라고 한다.

3. 천이비등 (C-D)

임계열유속인 점 C점 이후의 비등과정은 불안정하며 부분막비등 또는 천이비등이라 불린다. 가열면은 증기막이나 액체에 불규칙적으로 노출됨으로 가열면 온도는 불규칙하게 변화한다. 이 영역은 가열면의 온도가 가능한 경우에만 존재하는 과도영역으로 가열표면에 덮힌 증기막이 절연체 역할을 하여 열유속은 낮아진다. 하지만 만약 가열면에 대한 열유속이 일정하게 지속될 경우 가열면의 온도는 DNB 지점인 C 부터 E로 급상승한 반면 열전달계수는 점진적으로 감소한다.

4. 막비등 (D-E)

D-E영역에서는 가열표면에 연속적이며 안정된 증기막이 형성되며 이를 막비등영역으로 부른다. 막지등영역의 하안인 E 점에서 막비등 열전달률은 최소값을 가지며 가열면 온도가 그보다 낮아지면 막비등영역은 증기막의 붕괴와 참께 천이비등영역으로 천이하게 된다. 막비등과정 중 증기-액체 계면에서 액체으 증발로 생성되는 증기는 기포의 형태로 계면상에 거의 등간격으로 발달하며 주기적으로 계면으로부터 이탈, 상승한다. 가열면온도가 증가하면 복사열전달의 효과가 커지므로 비등열전달률은 더욱 증가한다. 하지만 실제의 경우 열유속을 높이기 위하여 가열면온도를 무한히 증가시킬 수는 없으며 이는 가열면의 용융온도에 의해 제한된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

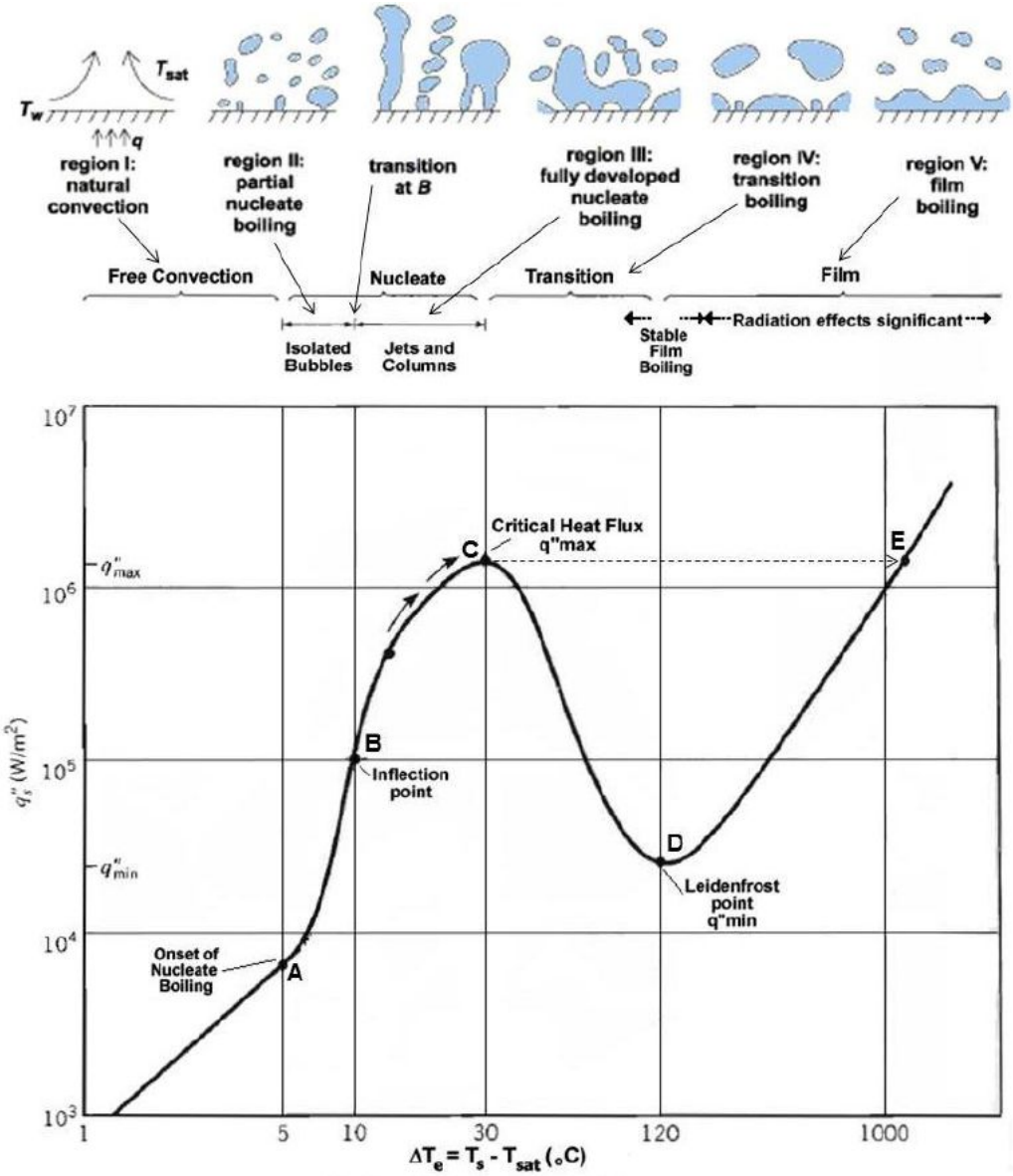


Fig. 2.3 Typical boiling curve for water at 1 atm pressure

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실험장치 및 방법

제 1 절 실험장치

Fig. 3.1는 본 연구에서 사용된 나노유체 풀비등 실험장치의 개략도로 크게 비등챔버, 예열장치, 비등실험용 히터, 응축기, 데이터 처리장치로 구성되어 있다. Fig. 3.2는 비등챔버 상단부와 하단부의 실물사진이다. 실험유체를 담기는 비등챔버는 장시간 실험으로 인한 부식성을 고려하여 스테인리스 스틸(stainless steel 304)를 이용하여 가로 220 mm, 세로 220 mm, 높이 300 mm로 제작되었으며 비등 챔버의 벽면에는 기포의 형상과정을 관찰 할 수 있도록 2개의 사이트 글라스가 설치되어 있다. 비등 챔버는 실험장치 조립이 보다 용이하면서 밀폐상태를 유지 할 수 있도록 볼트에 의한 체결형식으로 제작되었다. 비등챔버 상단부와 하단부의 틈으로 누설을 방지하기 위해 실리콘 재질의 패킹(packing)이 삽입이 되었다. 비등 챔버 상단부는 비등에 의해 증발된 증기를 냉각시키기 위한 응축기가 설치되어 실험 시 비등 챔버 내부의 수위변화 및 압력변화를 최소화시켰으며 Setra사의 저압용 압력계를 설치하여 실험 중 비등 챔버 내부의 압력을 측정하였다. 또한 실험 시 비등 챔버 내부에 고압발생으로 인한 안전사고를 방지하기 위해 안전밸브를 설치하였다.

비등챔버 하단부에는 K-type 열전대를 설치하여 실험유체의 온도를 측정하였으며, 비등이 발생하는 포화온도까지 실험유체를 예열시키기 위해 예열히터로써 2 kW 용량의 코일히터가 설치하였다. 예열히터는 PID 제어를 통해 실험유체의 포화온도를 일정하게 유지시켰다. 실험부는 단열케이스, 황동봉, 구리재질의 실험시편, 200 W 용량의 카트리지 히터, 열전대로 이루어져 있으며, 손쉽게 가열표면을 교체할 수 있도록 단열케이스를 상부와 하부로 나누어 나사체결을 통해 일체화할 수 있도록 설계하였으며 상부와 하부 접촉면에 O링을 삽입하여 실험부에 실험유체가 유입되지 않도록 하였다. 실험 시 비등이 발생하는 가열표면으로 열유

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

속을 발생시키기 위해 정격용량이 200 W인 슬라이닥스(Slide-ac)를 통해 실험부 내부에 설치된 카트리지 히터의 전원 공급을 수행하였으며 누전 또는 합선에 의한 카트리지 히터의 파손을 예방하기 위해 차단기를 설치하였다.

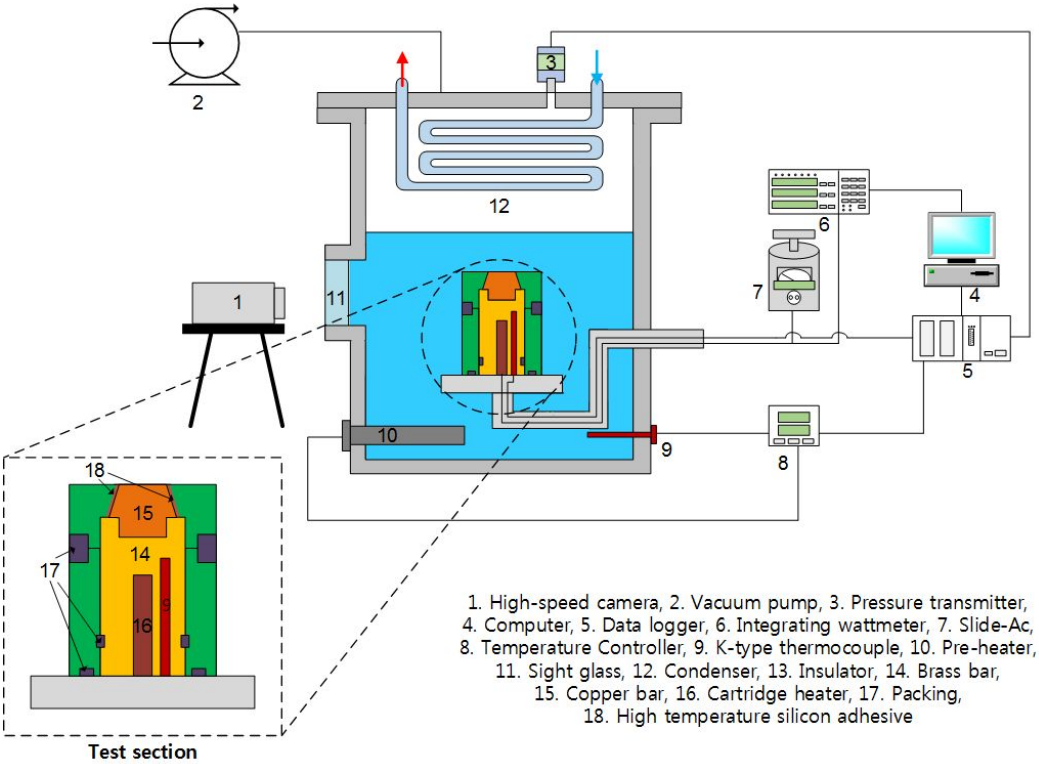


Fig. 3.1 Schematics diagram about the pool boiling equipment of nanofluid

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

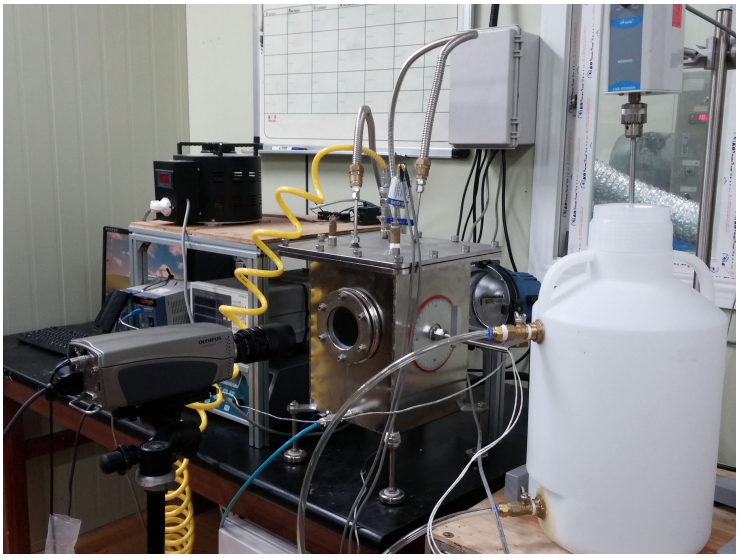


Fig. 3.2 Experiment equipment

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 비등 실험용히터

비등은 자연대류 비등부터 핵비등 까지 넓은 열유속 범위를 갖기 때문에 비등 실험을 수행하기 위해서는 비등이 발생하는 가열표면에 높은 열유속을 발생할 수 있도록 비등실험용 히터를 설계되어야 한다. 또한 본 실험은 다양한 가열표면의 표면거칠기가 다양하기 때문에 가열표면 시편이 손쉽게 교체하면서 비등실험용 히터 내부에 실험유체가 직접적으로 유입되지 않도록 체결부위마다 O링을 삽입 후 나사산에 의한 체결을 수행하도록 설계되었다.

비등실험용 히터는 200 W 카트리지 히터, 황동봉, k-tpye 열전대, 가열표면 시편, 상/하부 단열플라스틱으로 구성되어 있다. 200 W 카트리지 히터는 비등 발생에 필요한 높은 열유속을 발생하는 역할을 하며, 황동봉 내부에 삽입되어 있다 황동봉은 가열표면 시편이 결합할 수 있도록 중심부가 파인 구조로 되어 있으며 카트리지 히터에서 발생된 열유속은 황동봉에 의해 가열표면 시편으로 전달된다. 가열시편은 열전도도가 우수한 구리를 이용하여 제작하였으며 비등이 발생하는 가열 표면은 Polishing을 수행하여 표면거칠기를 변화시켰다. 단열케이스는 황동봉과 가열표면 시편의 열손실을 방지하며 직접적인 접촉을 할 수 없도록 엔지니어링 플라스틱으로 잘 알려진 Peek를 사용하여 제작하였으며 Peek의 물성은 Table 3.1과 같다. 단열케이스는 상부와 하부로 나누어서 제작되었으며 하부는 황동봉, 상부는 가열표면 시편을 단열하며 단열케이스의 상부와 하부는 나사산을 만들어 체결할 수 있도록 하였으며 상부와 하부의 접촉면에 실리콘소재의 O링을 삽입하여 결속면으로의 실험유체의 유입을 방지하였다. 또한 상부 단열케이스와 가열표면 시편이 접하는 면에는 내열실리콘(SJ 9100 HR)를 발라서 상부 단열케이스와 가열표면 시편의 틈에서 실험유체의 유입과 접촉을 방지하였다. 단열케이스 하단부는 스테인리스 스틸 소재의 지지대 구조물과 볼트체결을 통하여 결합이 되며, 지지대 구조물을 통해 히터와 열전대의 전선이 전원과 측정 장치로 연결이 된다. Fig. 3.3은 비등히터를 구성하는 요소를 보여준다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.1 Properties of Peek insulation

Item	Specification
Specific gravity	1.51
Tensile strength	90 MPa
Heat deflection temperature (At 1.82 MPa)	0.75%
Fusion point	340℃
Continuous duty temperature	0.40%
Absorption (under water, 24hs)	-
Chemical resistance	Very superior at oil, acid, alkari, organsic solvent

(a) Bottom insulation and brass bar (b) Top insulation and copper specimen (c) Cartridge heater and thermal couple

Fig. 3.3 Component of boiling experiment heater

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 데이터 측정

가. 온도 측정

비등실험 장치 내 각 요소의 온도측정을 수행하기 위해 k-type 열전대를 비등 챔버와 비등실험용 히터에 설치되었다. k-type의 열전대는 최고 1,200℃까지 높은 내열도를 갖으며 기전력의 직진성이 양호하며, 내열, 내식성이 높은 장점을 갖는다. k-type 열전대 허용오차는 측정온도의 ±1.0℃ 미만이다. Fig. 3.4와 Table. 3.2는 비등 실험장치에 설치된 k-type 열전대의 실물사진과 제원을 보여준다.

Fig. 3.4 K-type thermocouple

Table 3.2 Specification of K-type thermocouple

Item	Specification
Temperature range	0 ~ 600℃
Insulation material	glass fiber outer stainless steel braided material shield
Allowable error	±1.5℃ or 0.75% at measure temperature

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 압력 측정

비등 실험 시 비등챔버 내부의 증기압을 측정하기 위해 비등챔버 상단부에 Setra사 730Model의 진공용 압력계를 설치하였다. 진공용 압력계의 최대 측정압력은 1,000 Torr(133.3 kPa)이며 측정오차는 0.5% 미만이다. Fig. 3.5 와 Table 3.3은 설치된 압력계의 실물사진과 자세한 제원을 보여준다.

Fig. 3.5 Pressure transmitter

Table 3.3 Specification of pressure transmitter

Item	Specification
Pressure range	0~1,000 Torr(133,3 kPa)
Accuracy	±0.5%
Excitation	9-30 VDC
Output	0~5 VDC
Time constant	<20 ms

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 데이터수집 장치

나노유체의 풀비등 실험 시 주요한 실험환경 조건을 측정하기 위해 설치된 압력계, 열전대에 대한 데이터를 수집하기 위해 Yokogawa사의 MX 100를 설치하여 데이터를 수집하였다. 데이터수집 장치는 주요한 데이터를 수집 후 Ethernet 통신을 통해 PC에 수집한 데이터를 전송하며, 수집된 데이터는 Yokogawa사에서 제공된 MX100 standard 프로그램을 통해 모니터링을 할 수 있게 하며, 실험 종료 후 수집된 데이터를 엑셀파일로 종합해준다. Fig. 3.6과 Table 3.4는 데이터 수집장치의 실물과 제원을 보여준다.

Fig. 3.6 Data acquisition

Table 3.4 Specification of data aquisition

Item		Specification
Model		MX100 (Yokogawa Inc.)
Measurement interval		100 ms (shortest)
Supplying Voltage		100 ~ 220 VAC
Accurancy	Thermocouple	±0.05% of rdg.
	DC voltage	±0.05% of rdg.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 슬라이닥스

비등이 발생하는 가열표면에 일정하게 열유속이 전달되고, 히터의 출력을 제어하기 위해 슬라이닥스를 설치하였다. 슬라이닥스의 정격용량은 2 kW이며 최대출력 전압은 240 V이다. Fig. 3.7과 Table 3.5는 설치된 슬라이닥스의 실물사진과 상세 제원을 보여준다.

Fig. 3.7 Slide-ac

Table 3.5 Specification of slide-ac

Item	Specification
Model	DS 232(deakwang Inc)
Rated normal capacity	2 kVA
Maximum voltage	240 V
Maximum current	8.3 A

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

마. 전력적산계

비등이 발생하는 가열표면으로 전달되는 열유속은 비등실험히터에서 발생된 열량과 가열표면 면적의 비로 계산됨에 따라 실험 조건에 따른 비등히터에서 발생된 열량의 측정이 필요하다. 비등실험히터의 전력량은 열량으로 변환됨으로 전력적산계를 이용하여 비등실험히터의 전력량을 측정하였다. 슬라이닥스와 비등실험히터 사이에 전력적산계(WT230, Digital Power Meters)를 설치하여 비등실험히터에서 발생되는 전력량을 측정하였으며 기본측정오차는 ±0.1% 이다. Fig. 3.8과 Table 3.6는 전력적산계의 실물사진과 제원을 보여준다.

Fig. 3.8 Digital power meter

Table 3.6 Specification of digital power meter

Item		Specification
Model		WT230 (Yokogawa Inc.)
Base accuracy		±0.1% of reading
Measurement Range	Volage	Max. 600 V
	Current	Max. 20 A
Interface		RS-232

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

바. 초고속 카메라

비등 시 기포의 성장은 마이크로 초 단위로 이루어지기 때문에 기포의 성장을 관찰하기 위해서는 초고속 카메라와 대용량 광원이 필요하다. 본 연구에서는 초고속카메라(High speed camera, I-speed 2, Olympus Inc)를 실험장치에 설치하여 나노유체의 기포 성장과정을 관찰하였다. Fig. 3.9 와 Table 3.7 은 초고속 카메라의 실물사진과 제원을 보여준다.

Fig. 3.9 High speed camera and display unit

Table 3.7 Specification of high speed camera

Item	Specification
Model	I-speed 2 (Olympus Inc.)
Size	106×98×264 mm^3
Weight	2 kg
Resolution	800×600 activie pixels
Max. for full resolution	1,000 fps

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 나노유체 제조

1. 나노유체 제조방법

나노유체의 제조방법에는 One-step과 Two-step method가 있으며 모유체에 나노입자의 생성과 분산을 동시에 하는 경우는 One-step method, 나노입자를 생성 후 모유체에 나노입자를 분산시키는 경우를 Two-step method로 구분한다. One-step method는 높은 분산 안정성을 갖지만 대량의 나노유체 제조가 어렵다. 이에 본 연구에서는 제조된 나노입자를 초음파 분산기를 이용하여 나노입자를 모유체에 분산시키는 Two-step method 방법으로 나노유체를 제조하였다.

초음파 분산(Ultrasonic Dispersion)은 20 Hkz 이상의 초음파를 혼합물에 방출시켜 순간적으로 생성된 수많은 microcavity 파괴에 의한 충격파에 의한 에너지에 의해 엉켜있는 입자들을 분산시키는 방법으로 고속회전을 이용한 Rotor/Stator 분산에 비해 미세하게 분산시키는 장점을 갖는다. 본 연구에서는 15 L 이상의 나노유체가 필요하기 때문에 나노유체가 작은 챔버 안에 연속적으로 순환하면서 초음파 분산이 수행되는 연속순환식 초음파 분산장치는 제작하였으며 3 h 동안 분산작업을 수행하였다. Fig. 3.10과 Table 3.8는 각각 연속순환식 초음파 분산장치의 실물 사진과 제원을 보여준다.

(a) Ultrasonic hone and chamber (b) Mixer and tank (c) Controller (d) Thermostate

Fig. 3.10 Ultrasonic Liquid processor with continuous flow equipment

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.8 Specification of ultrasonic homogenizer

Item	Specification
Model	SHT 750S (Inc. Sonictopia)
Output Power	750 W
Frequency	19.97 khz
Converter	PZT(40 mm×6 ea,PZT-81) Length : 160 mm
Booster	ϕ48×140 mm
Horn	ϕ30×123 mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. Al_2O_3 나노유체

Al_2O_3 나노유체를 제조하기 위해 본 연구에서는 RND Korea 사에서 제조된 나노분말인 Al_2O_3 nano powder를 이용하여 나노유체를 제조하였다. Fig. 3.11은 RND Korea 사에서 제공한 Al_2O_3 nano powder의 SEM 이미지이며 Table 3.9와 3.10는 Al_2O_3 nano power의 조성과 함유량을 보여준다. Al_2O_3 나노입자의 함유량이 0.001, 0.01, 0.05, 0.1vol%의 Al_2O_3 나노유체를 제조하기 위해 사용된 증류수와 나노입자의 양을 Table 3.11에 나타내었다.

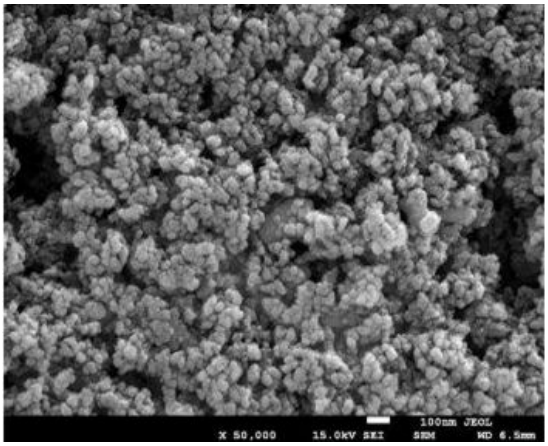


Fig. 3.11 Al_2O_3 nanopower SEM image

Table 3.9 Aluminum Oxide Nanopowder (80% alpha : 20%gamma)
Certificate of Analysis - wt%

Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	SiO_2
99.90%	<0.002	<0.001	<0.03	<0.002	<0.01	<0.02

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.10 Specification of nanoparticle

Item	Specification
Nano particle	Al_2O_3(80% alpha : 20% gamma)
Pureity	99.9%
APS size	50 nm
Density	3.95~4.1 g/cm^3
Thermal conductivity	30 W/m·K
Specific heat	773 J/kg · K
Manufactor	RND KOREA

Table 3.11 Concentration of Al_2O_3 nanofluid

Volume percent[%]	Water mass [g]	Mass of Al_2O_3 nanoparticle [g]
0	1497	0
0.001	1497	0.600
0.01	1497	6.001
0.05	1497	30.015
0.1	1497	60.060

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 실험

1. 실험방법

비등이 발생하는 포화온도는 시스템의 압력에 의해 정해짐으로 비등 실험 시 기밀확보가 중요하다. 실험에 앞서 비등실험 장치의 기밀시험을 하기 위해 비등 실험장치에 질소가스를 채운 후 2시간 동안 비등 실험장치의 압력변화를 확인하였다. 기밀확보를 확인 후 진공펌프를 이용하여 비등실험 장치 내부를 2 kPa 미만의 중진공 상태를 조성하였다. 이후 비등실험 장치 내부와 외부의 압력차를 이용하여 15 L의 실험유체를 비등실험 장치로 주입 후, 실험유체가 함유하고 있는 용해기체를 제거하기 위해 예열히터를 이용하여 30분간 가열 후 진공펌프를 이용하여 용해기체를 제거하였다. 가열된 실험유체는 포화온도까지 식힌 후 실험을 시작하였다. 비등열전달 실험은 슬라이닥스의 전압을 증가시켜 발생하는 가열표면에 열유속을 증가시키면서 실험을 진행하였으며, 가열표면의 온도가 정상상태에 도달하였을 때 초고속카메라(High spped camera, i-speed, Olympus Inc)를 이용하여 500 fps(frame per second) 속도로 비등 시 기포의 성장과정을 관찰하였다. 전압을 변화시켜 10분 이후에도 가열표면의 온도가 계속 증가하는 경우 임계열유속으로 간주하여 실험을 종료하였다. 실험종료 후 빈 용기에 실험유체를 회수하였으며, 아세톤을 이용하여 비등실험장치 내부를 청소를 수행하여 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 실험조건

Al_2O_3 나노유체의 비등 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 가열표면의 조도와 Al_2O_3 나노입자의 함유량을 변화시켜 비등 열전달실험을 수행하였다. 대기압하에서 물의 포화온도는 약 100℃로 장시간 비등실험을 수행 시 단열제로 사용된 플라스틱의 수명과 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 압력을 낮추어 포화온도를 25.1℃로 만들어 실험을 수행하였다.

가열표면의 표면조도를 균일하게 만들기 위해 사포와 연마제를 이용한 폴리싱(Polishing)을 수행하였다. 폴리싱(Polishing)을 통해 제작된 실험시편은 비접촉 3차원 미세형상측정기를 통해 표면조도를 측정하였다. Al_2O_3 나노유체는 Al_2O_3 나노입자 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol% 으로 제작하였으며 각각의 가열표면에서 비등실험을 수행하였다. Table 3.12은 Al_2O_3 나노유체 비등 특성의 실험조건을 보여준다.

Table 3.12 Experimental condition

Item	Specification
Saturated pressure	3 kPa
Nano particle	Al_2O_3(80% alpha : 20% gamma)
Concentration	0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%
Stabilizer addition	no addition
Surface roughness	177.5 nm / 292.8 nm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 실험데이터 처리

비등이 발생하는 가열표면에 직접적으로 열전대를 설치하여 가열표면의 온도를 측정하는 것은 기포의 성장에 방해를 주기 때문에 비등실험용 히터 내부에 설치된 열전대에서 측정된 온도와 열유속을 바탕으로 가열표면의 온도를 계산하였다. 열유속은 실험히터의 전력량을 이용하여 계산하였으며 식 (3-1)과 같다.

$$q = \frac{V_{heater} I_{ciruit}}{A_{sur}} \tag{3-1}$$

실험히터의 내부는 황동봉과 실험시편으로 이루어져 있으며, 실험시편의 직경이 가열표면으로 다가갈수록 줄어들기 때문에 Ansys 사의 Steady state thermal analysis를 이용하여 가열표면의 온도를 계산하였다. Fig. 3.12는 Steady state thermal analysis를 이용한 실험히터의 온도분포를 보여준다.

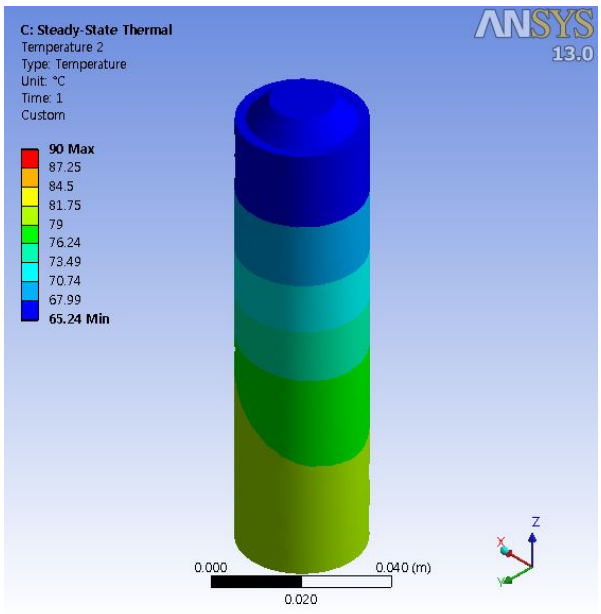


Fig. 3.12 Steady state thermal analysis and thermal error about boiling heater

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비등열전달계수는 식 (3-2) 와 같이 계산된 열유속과 가열표면에서의 과열도를 이용하여 계산하였다.

$$h_{boiling} = \frac{q}{T_w - T_{sat}} \tag{3-2}$$

Kline and McClintock(1953)은 비등열전달계수와 열유속에 대한 불확실성 분석법을 제시하였으며 식 (3-3) 과 (3-4)와 같다.

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2} \tag{3-3}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \tag{3-4}$$

열유속과 비등열전달계수의 불확실도는 각각 4.09%와 9.79%로 나타났다. Table 3.13은 본 연구에 사용된 측정기기의 불확실도 요소들은 보여준다.

Table 3.13 Detailed uncertainty of instrument used in this study

Parameter	Instrument	Uncertainty
Cross section area (m)	Precise engineering callipers	0.001 m
Temperature (K)	Calibrated K-type thermocouple	±0.1 K
Voltage (V)	Digital Power meter (WT 230)	±0.1% of reading
Current (A)	Digital Power meter (WT 230)	±0.1% of reading
Bulk Temperature (K)	Calibrated K-type thermocouple	±0.1 K

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 나노유체 비등열전달 모델링

제 1 절 나노유체 모델링

나노유체는 나노 크기의 금속 또는 비금속 입자가 물, 오일, 냉매 등의 모유체에 분산되어 있는 혼합물로서 모유체에 첨가되는 나노입자의 종류와 크기에 따라 나노유체의 열물성 개선이 상이하게 나타나지만 일반적으로 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 열전도도, 밀도, 점도, 표면장력은 증가한 반면 비열과 접촉각은 감소한다. 본 연구에서는 나노유체가 비등 시 특성을 해석하기 위해 Al_2O_3 나노유체를 Al_2O_3 나노입자가 모유체인 물에 균일하게 혼합된 혼합물로 가정하였으며 Table 4.1 을 이용하여 Al_2O_3 나노입자의 함유량과 크기에 따른 물성을 계산하였다. 나노유체의 밀도와 비열은 식(4-1)과 (4-2)로 나타난다.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \tag{4-1}$$

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{bf}Cp_{bf} + \phi Cp_{np}}{\rho_{nf}} \tag{4-2}$$

Table 4.1 Properties of base fluid and nano particle

Properties	Value	Properties	Value
ρ_{bf}	959 kg/m^3	ρ_{np}	3970 kg/m^3
Cp_{bf}	4218 J/kg·K	Cp_{np}	205 J/kg·K
k_{bf}	0.681 W/m·K	k_{np}	7.2 W/m·K
μ_{bf}	1.68×10^{-5} m^2/s		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나노유체의 열전도도와 점도는 나노입자의 모양과 크기에 영향을 받기 때문에 Al_2O_3 나노입자의 모양은 구형으로 가정하였으며 나노입자의 크기의 영향성이 포함된 식(4-3)과 식(4-4)를 이용하여 계산하였다.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 1.0112\phi + 2.437\phi\left(\frac{47\times10^{-7}}{D_{np}}\right) - 0.0248\phi\left(\frac{k_{np}}{0.613}\right) \tag{4-3}$$

$$\mu = \frac{\mu(T)}{\left[1 - 34.87(d_{np}/d_{bf})^{-0.3}\phi^{1.03}\right]} \tag{4-4}$$

식(4-3)과 식(4-4)에서 d_{bf}는 모유체 분자의 평균직경이며 식 (4-5)로 표현되며 이때 M은 분자량으로 물의 경우 18.02 kmol/kg 이며 N은 아모가드로 수로 6.02×10^{23} 이다.

$$d_{bf} = 0.1\left(\frac{6M}{N\pi\rho_{bf}}\right)^{1/3} \tag{3-5}$$

또한 나노유체의 동점성계수인 식(3-4)에서 온도의 영향성 파라미터인 $\mu(T)$는 식 (4-6)로 표현된다.

$$\mu(T) = \exp\left(\frac{1.12646 - 0.0396338T}{1 - 0.00729769T}\right)\times1.005\times10^{-7} \tag{4-6}$$

Zhu 등(2010)은 5% 미만의 Al_2O_3-Water 나노유체의 표면장력를 측정하였으며 나노유체의 온도가 증가함에 따라 표면장력이 감소한다고 보고하였다. Sysyzkowski 방정식은 1mol% 미만의 낮은 몰분률의 혼합물의 표면장력을 함유량과 온도의 변화에 따라 정의하는 방정식으로 Wang 과 Wu(2015)는 Zhu 등(2010)의 연구를 통해 Al_2O_3-Water 나노유체의 표면장력를 예측하였으며 Zhu 등(2010)의 연구결과와 비교 시 4.35%의 오차를 보였다. 이에 Wang 과 Wu(2015)에 의해 수정된 Al_2O_3 나노유체의 Sysyzkowski 방정식은 식 (4-7)과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{\sigma_{bf}-\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}}=b\ln\left(\frac{\phi}{a}+1\right) \tag{4-7}$$

식 (3-7)에서 a 와 b는 Zhu 등(2010)의 실험에 대한 Fitting factor로 a=7.673×10-7, b=-7.773×10^{-3} 이다.

나노유체의 비등열전달에 대한 다수의 연구에 따르면 나노유체는 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 나노유체의 접촉각은 감소하며 비등 후 나노입자가 가열 표면에 침전되어 생성된 다공성 나노입자층에 의해 비등 전에 비해 접촉각이 감소됨이 보고되었다. 비등 전/후의 접촉각 변화는 표면 젖음성 개선을 나타내는 직접적인 파라미터로 비등열전달 성능에 영향을 미친다. 하지만 나노유체 접촉각에 대한 연구는 미흡한 실정이며 비등 후 접촉각의 경우 가열 표면의 표면거칠기, 나노입자의 종류 및 크기, 함유량, 실험시간 등 다양한 변수가 존재하여 예측이 어려우며 이에 대한 연구 데이터는 매우 부족하다.

Kubiak 등(2011)은 Aluminum, Titanium, SUS, Copper, Ceramic, PMMA 등 다양한 재질에 대해 표면거칠기 변화 따른 접촉각 변화를 측정하였으며 표면거칠기 변화에 따른 철의 표면에서의 접촉각 변화를 Curve fitting을 통해 모유체의 접촉각을 예측하였다. SUS 재질의 표면에서 접촉각에 대한 Kubiak 등(2011)은의 Curve fitting 상관식은 식 (4-8)과 같다.

$$\theta_{bf}=52.80382\exp\left(\frac{-Ra}{0.0674\times10^{-6}}\right)+65.90199 \tag{4-8}$$

Chinnam 등(2015)은 60% propylene glycol과 40% 물을 기반으로 Al_2O_3, ZnO TiO_2, SiO_2 나노유체의 접촉각에 대해 나노입자의 크기와 함유량, 나노유체의 온도에 대한 영향성을 반영하여 상관식을 개발하였으며 식 (4-9)와 같다. Al_2O_3-Water 나노유체의 접촉각에 대한 문헌조사를 수행한 결과 Al_2O_3-Water 나노유체의 접촉각에 대한 상관식은 아직 개발되지 않은 실정이다. 비록 6:4

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

propylen glycol은 순수한 물과 성질이 다르지만 물을 기반으로 제작됨으로 물과 유사한 접촉각을 갖기에 Kubiak 등(2011)의 실험결과를 통한 Curve fitting 데이터와 Chinnam 등(2015)의 나노유체 접촉각 상관식을 이용하여 비등 전 Al_2O_3-Water 나노유체의 접촉각을 예측하였다.

$$\frac{\theta_{nf}}{\theta_{bf}} = a_1\phi^2 + a_2\phi + b_1\left(\frac{T}{T_0}\right) + c_1\left(\frac{d_{np}}{d_{bf}}\right) + D \tag{4-9}$$

식 (3-9)에서 a_1, a_2, b_1, c_1, D는 무차원계수로 10.5194, -4.17912, -0.00252388, -0.0000674063, 0.989345이며 T_0는 참고온도로 299K 이다.

Kim 등(2007)은 물을 기반으로 Al_2O_3, ZnO, SiO_2 나노유체를 제작하여 비등열전달 실험을 수행하였으며 가열표면의 표면거칠기가 0.1~0.15 ㎛인 SUS 표면에서 비등 전 / 후의 접촉각을 측정하였으며 본 연구에서는 비등 후 Al_2O_3 나노유체의 접촉각을 Curve fitting 통해 Al_2O_3 나노유체의 접촉각을 계산하였으며 이는 식 (3-9)와 같다.

$$\theta_{nf.after} = \frac{40}{1 + \exp(-103.39259(100\phi - 0.00705))} \tag{4-10}$$

Fig 4.1 은 Al_2O_3 나노입자의 함유량에 따른 비등 전후의 접촉각 변화를 보여준다. Kubiak 등(2011)의 결과를 이용하여 Ra=0.1 ㎛에서 물의 접촉각은 77.9°로 나타났다. 비등 전 Al_2O_3 나노유체의 접촉각은 나노입자의 크기에 상관없이 나노입자의 함유량이 0vol% 에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 약 77.9°에서 52.1°로 감소하였다. 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 비록 오차가 발생하지만 동일한 조건에서 비등 전 Kim 등(2007)의 비등 전 접촉각 변화와 유사한 경향을 보인다. 나노입자의 크기가 25 nm, 50 nm, 75 nm 에서의 접촉각 변화 차이는 0.4°미만으로 거의 차이가 없다. 비등 후 Al_2O_3 나노유체의 접촉각은 나노입자의 함유량이 0.001vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 13.39°에서 40°으로 증가하였으며 Kim 등(2007)의 실험결과와 잘 일치하였다. Fig 4.2는 Al_2O_3 나노유체의 접촉각 예측 모델링의 순서도를 보여준다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

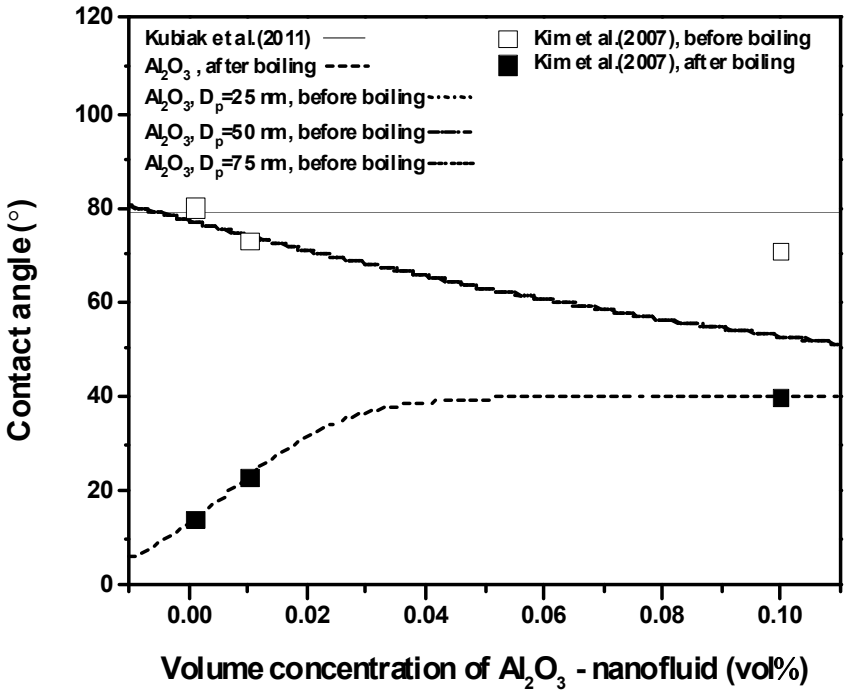


Fig. 4.1 Contact angle according to volume concentration of Al_2O_3 nano particle.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

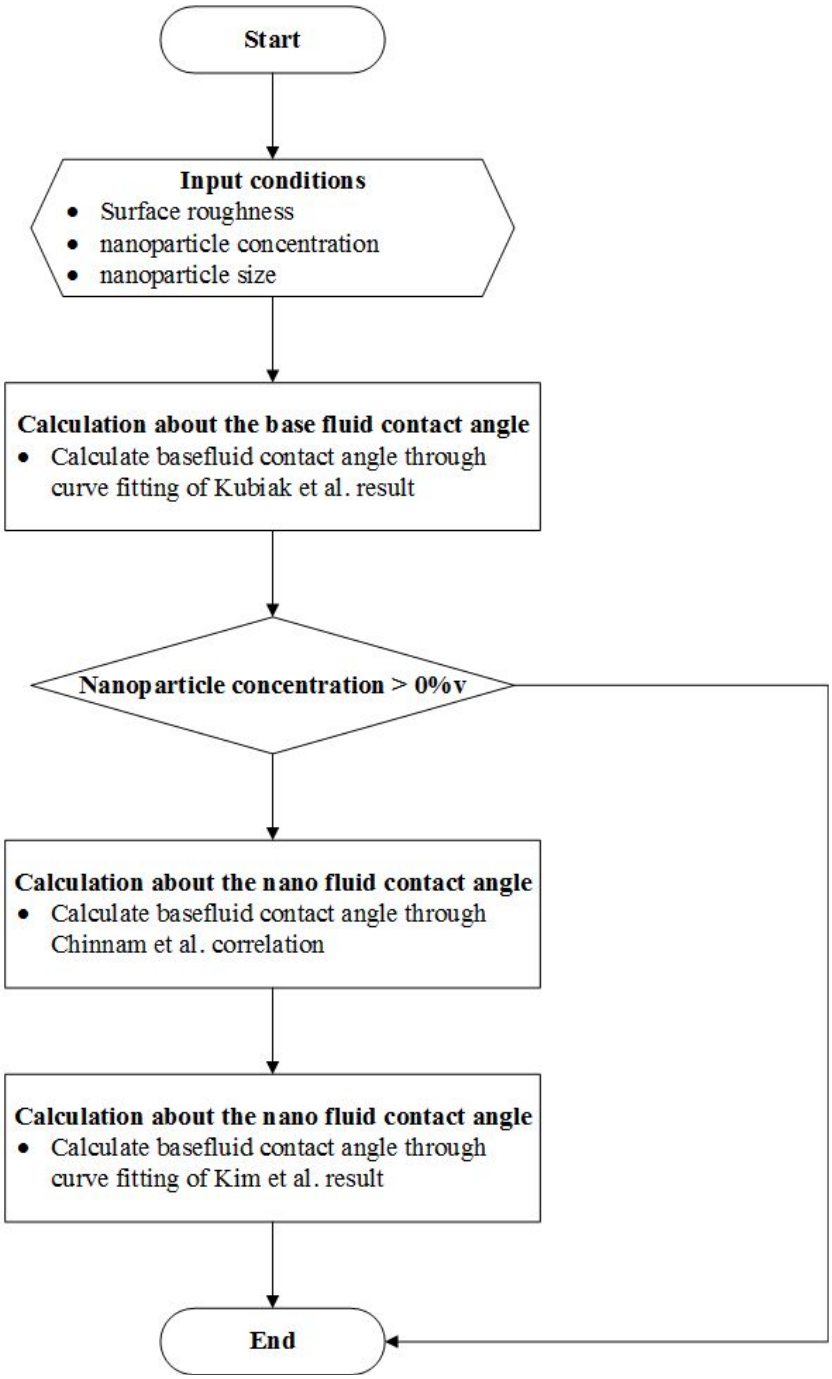


Fig. 4.2 Flow chart about calculation for base/nanofluid contact angle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 비등열전달 및 임계열유속 예측 모델

비등은 기포의 생성, 성장, 이탈과정으로 이루어지며 Han 과 Graffith(1965)는 고립된 기포영역에서의 열전달 과정을 Fig. 4.3과 같이 4단계로 구분하였다. 가열표면에 열유속 유입이 증가하여 표면의 온도가 액체의 포화온도보다 높아지게 되면 가열표면 주변에 열경계층과 기포를 생성하는 활성핵기공이 생성된다. 활성핵기공은 가열표면으로부터 얻은 열에너지로 시간이 지남에 따라 점점 성장하며 기포에 작용되는 부력과 항력이 표면장력과 유체의 관성력보다 커질 때 기포는 주변의 과도 열경계층의 일부와 함께 이탈하게 된다. 이때 기포 이탈 시 주변의 액체는 기포가 차지하고 있는 부분에 유입되며, 유입된 액체는 동일한 과정이 반복되게 된다. Moore 과 Mesler(1961)은 비등 시 기포 밑에 미소액체막(Microlayer)이 형성이 되며, 미소경계층(Microlayer)의 증발로 인해 기포가 성장함을 주장하였다. Mikic 과 Rosenow(1969)는 기포가 이탈한 후 가열면으로 주입된 액체가 과도 전도열전달로 고온의 미소액체막을 형성하며 기포 이탈 시 과도열경계층과 함께 이탈함을 주장하였다.

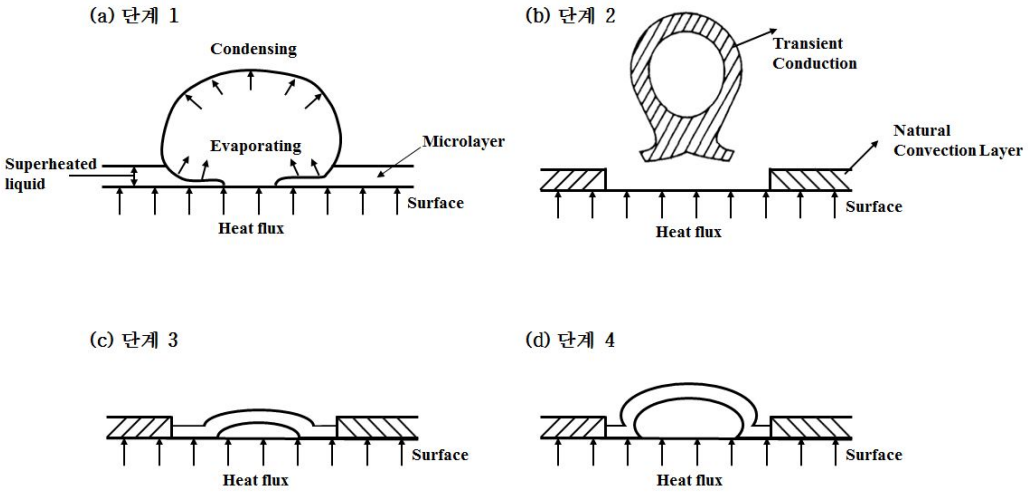


Fig. 4.3 Mechanism and process about the bubble growth

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Kurul 과 Podowski(1990)는 기포의 성장 메카니즘인 증발, 과도전도, 자연대류의 영향성을 종합하여 Heat flux partition (HFT) model을 개발하였으며 이는 식 (4-11)로 표현된다

$$q = q_e + q_{tc} + q_{nc} \tag{4-11}$$

식 (4-11)에서 q_e, q_{tc}, q_{nc}는 증발, 과도전도, 자연대류에 의해 전달되는 열유속을 의미하며 식 (4-12) ~ 식(4-14) 로 표현된다.

$$q_e = \frac{\pi}{6} d_{b,f} \rho_f f N_a h_{fg} \tag{4-12}$$

$$q_{tc} = h_{tc} A_{bub} \Delta T_{sat} \tag{4-13}$$

$$q_{nc} = h_{nc} A_{nc} \Delta T_{sat} \tag{4-14}$$

식 (4-13)에서 h_{tc}는 과도전도 열전달계수이며, A_{bub}는 기포의 이탈직경이 차지하면 유효면적을 의미한다. h_{tc}와 A_{bub}는 식 (4-15)와 식 (4-16)으로 표현된다.

$$h_{tc} = 2\sqrt{\frac{k_f \rho_f Cp_f}{\pi t_w}} \tag{4-15}$$

$$A_{bub} = N_a K \left(\frac{\pi D_{b,d}^2}{4} \right) \tag{4-16}$$

식 (4-16)에서 K는 기포이탈직경 면적에 대한 영향성에 대한 무차원 파라미터로 다수의 연구자들은 K=2 로 가정하였다.

기포가 이탈은 가열면의 열을 운반하기 때문에 미소액체막의 온도는 감소하며, 가열면에서 미소액체막으로 전달되는 열유속은 증가한다. 이로 인하여 가열면 주변의 액체 내에서는 온도구배가 형성되며 기포 생성과 온도 차에 의해 자연대류

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가 발생한다. Han 과 Griffith(1965)는 자연대류에 의해 전달되는 열유속인 식 (4-17)를 구성하는 자연대류 열전달계수인 h_{nc}와 기포이탈직경에 영향을 받지 않는 면적인 A_{nc}는 식 (4-17)와 식(4-18)으로 표현된다.

$$h_{nc} = 0.14\rho_f Cp_f \left(\frac{\beta g \Delta T \alpha_f^2}{\nu_f} \right)^{1/3} \tag{4-17}$$

$$A_{nc} = 1 - t_g f N_a \left(\frac{\pi d_{b,d}^2}{4} \right) - t_w f N_a K \left(\frac{\pi d_{b,d}^2}{4} \right) \tag{4-18}$$

하지만 HFT model은 비등곡선은 예측이 가능하지만 핵비등의 임계점인 임계열유속(Critical heat flux)를 예측하지 못한다. 임계열유속은 비등열전달계수가 높은 핵비등의 임계점을 나타내는 지표로 가열면의 열유속이 임계열유속을 초과 시 번아웃이 발생하여 히터를 고장시키며 표면이 증기막으로 덮여 비등열전달 성능이 급격히 감소하게 된다. 그러므로 임계열유속을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 임계열유속 예측은 주로 Zuber(1963) 와 Kandlikar(2001)의 상관식을 널리 사용되고 있지만 나노유체는 나노입자의 침전으로 인해 표면젖음성이 달라지며 Zuber(1963) 와 Kandlikar(2001) 상관식은 가열표면의 재질의 영향성과 표면거칠기 효과, 나노유체의 젖음성 개선 효과 등이 고려되지 않아 나노유체의 임계열유속 예측에 적합하지 않다. Dryout fraction는 기포의 수와 이탈직경을 이용하여 가열표면에 기포가 차지하는 비를 나타내는 파라미터로 Bi 등(2015)은 Dryout fraction, F를 이용하여 나노유체의 임계열유속을 예측하였으며 Kandlikar(2001) 상관식에 비해 높은 정확성을 보였다. 이에 본 연구에서는 Dryout fraction을 이용하여 임계열유속을 예측하였다. Dryout fraction 은 식 (4-21)와 같이 정의되며 F가 $\pi/4$ 초과 시 임계열유속에 도달하였다고 가정하였다.

$$F = \frac{\pi}{4} d_{b,d}^2 N_a \tag{4-21}$$

나노유체의 비등 해석에 대한 순서도는 Fig. 4.4와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

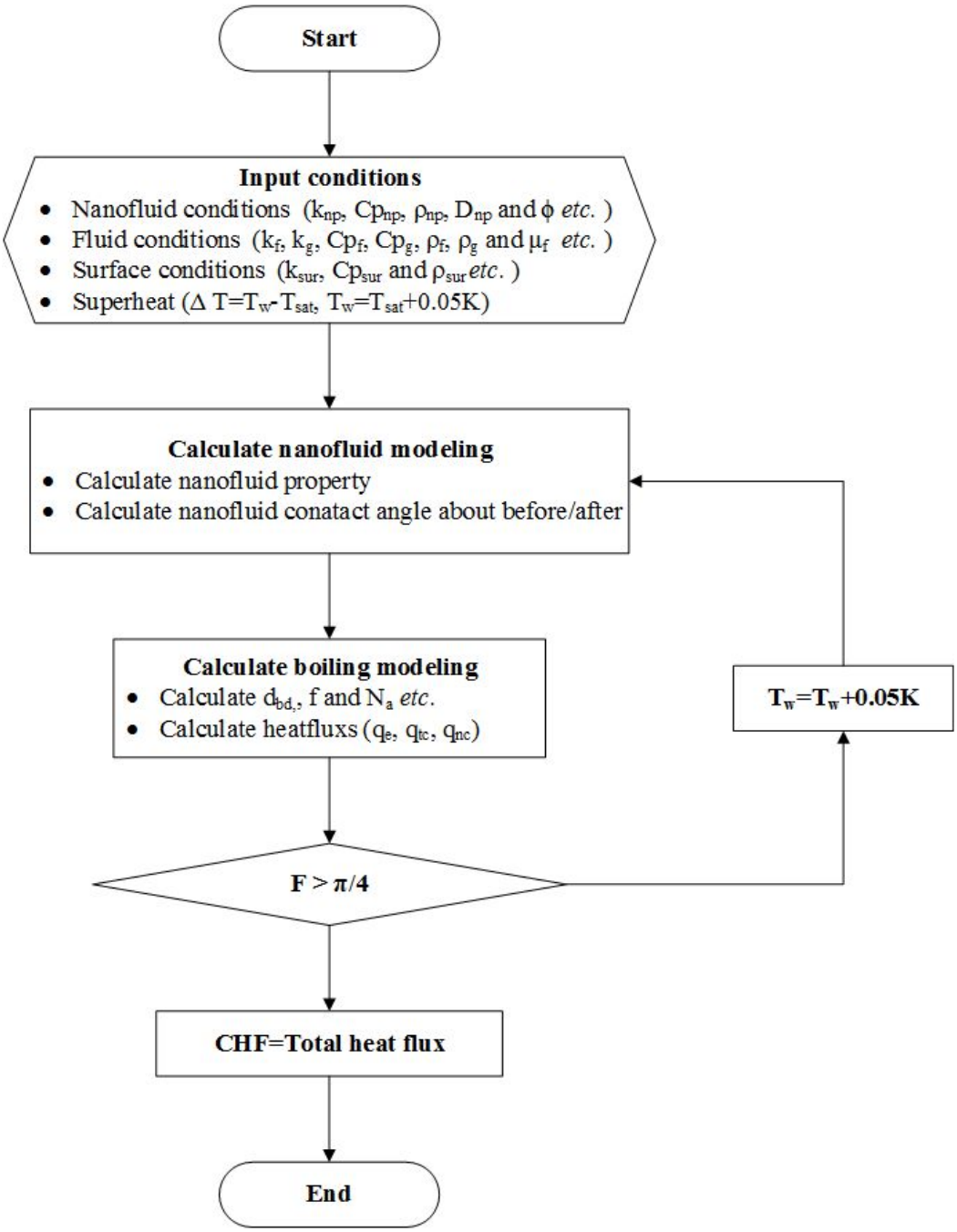


Fig. 4.4 Flow chart for the simulation of nanofluid boiling

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 기포의 이탈직경, 빈도, 활성핵기공 밀도

기포의 이탈직경과 이탈주기, 활성핵기공 밀도는 비등열전달 메커니즘를 결정하는 중요한 요소이다. 기포이탈직경을 예측하는데 개발된 상관식을 Table 4.2에 나타내었다. Fritz(1935)는 부력과 표면장력의 평형식으로부터 기포의 이탈직경인 식을 유도하였다. 하지만 이는 고온에서의 관성과 대류에 의한 영향성이 포함되지 않아 정확하지 않은 단점이 있다. 이를 보안하여 Stephan(1992)은 점성과 부력의 비의 무차원수인 Archimedes number 와 상변화시 헌열과 잠열의 비인 Jakob number, 액체와 증기의 계면에서 대류를 고려한 Prantle number을 고려하여 기포이탈 직경을 식(4-23)와 같이 정의하였다. 하지만 나노유체는 나노입자의 농도가 증가함에 따라 접촉각이 감소한다. 그러므로 정확한 해석을 위해서는 접촉각에 대한 영향성이 포함되어야 한다. Li 등(2013)은 Jensen 과 Memmel(1986) 와 Phan등(2009)이 제안한 기포이탈직경 상관식을 결합하여 표면 개선효과와 가열도의 영향성을 포함한 기포이탈직경을 정의하였으며 식 (4-28)과 같다.

Table 4.2 Bubble departure diameter correlation

Reference	Correlation
Frize(1936)	$d_{b,d} = 0.0208\theta\sqrt{\dfrac{2\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}}$ (4-22)
Stephan(1992)	$d_{b,d} = 0.025\sqrt{\left(\dfrac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}\left[1 + \left(\dfrac{Ja}{\mathrm{Pr}_f}\right)^2\left(\dfrac{1}{Ar}\right)\right]\right)}$ (4-23)
Jensen 과 Memmel (1986)	$d_{b,d} = 0.019(1.8 + 10^5 K)^{2/3}\left(\dfrac{\sigma}{\Delta\rho g}\right)^{1/2}$ (4-24) Where $K = \dfrac{Ja}{\mathrm{Pr}_f}\left[\dfrac{\Delta\rho g}{\rho_f \nu_f^2}\left(\dfrac{\sigma}{\Delta\rho g}\right)^{2/3}\right]^{-1}$ (4-25)
Phan 등(2009)	$d_{b,d} = 0.626977 f(\theta)\left(\dfrac{\sigma}{\Delta\rho g}\right)^{1/2}$ (4-26) Where $f(\theta) = \dfrac{2 + 3\cos\theta - \cos^3\theta}{4}$ (4-27)
Li 등(2013)	$d_{b,d} = 0.019\dfrac{f(\theta)}{f(50^\circ)}(1.8 + 10^5 K)^{2/3}\left(\dfrac{\sigma}{\Delta\rho g}\right)^{1/2}$ (4-28)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이에 본 연구에서는 Li 등(2013)의 기포이탈직경 상관식을 이용하여 나노유체의 기포이탈직경을 계산하였다. 기포의 이탈주기는 가열면에서 기포가 성장하는 시간과 기포가 이탈 후 다음기포가 생성되는 대기시간으로 구성되며 식 (4-29)로 표현된다.

$$f = \frac{1}{t_g + t_w} \tag{4-29}$$

기포의 성장기간은 기포의 이탈직경과 직접적으로 관련이 있으며 식 (4-30)을 적용하였다.

$$t_g = \frac{d_{b,d}^2}{B^2 Ar^{0.27} Ja \alpha_f} \tag{4-30}$$

Han 과 Griffith(1965)는 대기시간은 기공 반경은 3/2배 도달을 위한 열경계 두께에 필요한 가열시간에 영향을 준다고 하였으며 액체 내의 온도분포에 대한 단순화를 통해 대기시간을 식(4-31)과 같이 유도하였다. 본 연구에서는 대기시간을 계산하기 위해 식(4-31)을 이용하였다.

$$t_w = \frac{144(T_w - T_{sat})^2 T_{sat}^2 \sigma^2}{\pi \alpha \rho_g^2 h^2 (T_w - T_{sat})^4} \tag{4-31}$$

가열표면의 종류가 달라짐에 따라 가열면의 열전도도와 젖음성 특성이 달라지기 때문에 이를 개선하기 위한 노력이 지속되었다. Benjamin 과 Balakrishnan(1996)은 표면거칠기에서 풀비등 열전달 모델을 개발함과 동시에 활성핵기공밀도 상관식을 제시하였지만 가열표면의 종류가 달라짐에 따라 가열면의 열전도와 젖음성 특성이 다를 시 활성핵기공밀도는 달라지기 때문에 이를 개선하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고자 하는 노력이 지속되었다. Li 등(2014)은 접촉각이 90° 미만인 친수성 표면에 대해 활성핵기공밀도 상관식인 식 (4-34)를 개발하였다.

$$N_a = Max(612.5(1-\cos\theta), 19.7)\frac{1}{\gamma}Pr^{1.63}R^{-0.4}\Delta T_{sat}^3 \tag{4-34}$$

R은 표면거칠기에 대한 무차원 파라미터이며 식 (4-33)로 표현된다.

$$R = 14.5 + 4.5\left(\frac{R_a P_{sat}}{\sigma}\right) + 0.4\left(\frac{R_a P}{\sigma}\right) \tag{4-33}$$

나노유체는 모유체와 달리 나노입자 함유량에 따라 접촉각이 변화하여 접촉각 감소는 활성핵기공 수 밀도의 감소를 야기함을 다수의 연구를 통해 보고되었으며, Wang 과 Dhir(1993)은 나노유체의 접촉각 변화에 따른 표면 젖음성 효과가 활성핵기공밀도에 대한 영향성에 대해 식 (4-35)와 같은 관계를 갖는다고 언급하였다.

$$\frac{N_{a,nf}}{N_{a,bf}} \propto \lambda = \frac{1-\cos\theta}{1-\cos\theta^*} \tag{4-35}$$

식 (4-35)에서 θ^*는 비등 전 가열표면에서 접촉각이며, θ는 비등 후 가열표면에서 접촉각이다.

Li 등(2015)은 가열면 종류에 대한 특성추가와 가열면의 표면거칠기와 나노입자의 효과를 개선시켜 식 (4-36)을 고안하였다.

$$N_a = 512\frac{1}{\gamma}Pr^{1.63}\left(R\lambda^{-3}\right)^{-0.4} f\left(\frac{Ra}{d_{np}}\right)\Delta T_{sat}^3 \tag{4-36}$$

식 (4-36)에서 $f\left(\frac{Ra}{d_{np}}\right)$는 나노입자의 크기와 표면거칠기의 영향성을 평가하는 항으로 식 (4-37)으로 표현된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$f\left(\frac{Ra}{d_{np}}\right)=\begin{cases}0.275 \quad (Ra/d_{np})^{-1.2} & 0 < Ra/d_{np} < 1 \\ 0.275+0.791(Ra/d_{np}-1)^{0.68} & Ra/d_{np} \geq 1\end{cases} \tag{4-37}$$

이에 본 연구에서는 활성핵기공밀도 있어 젖음성, 나노입자의 크기, 가열표면의 재질과 표면거칠기의 영향성을 평가하기 위해 나노유체의 함유량이 없을 때에는 Li 등(2013)의 상관식을 나노유체의 경우 Li 등(2015)의 상관식을 이용하여 활성핵기공밀도를 계산하였다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 실험 결과

제 1 절 실험의 신뢰성 평가

가열표면의 거칠기 변화에 따른 Al_2O_3 나노유체의 비등열전달 실험을 수행하기 이전에 비등열전달 실험의 정확성을 평가하기 위해 Rohsenhow(1952) 와 Zuber(1959)의 상관식과 실험데이터를 비교하였다. Rohsenhow(1952) 와 Zuber(1959)의 상관식은 식 (5-1)과 식(5-2)와 같다.

$$q = \mu_f h_{fg}\left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\sigma}\right]^{1/2}\left[\frac{c_{p_f}(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} \mathrm{Pr}_f^n}\right]^3 \tag{5-1}$$

여기서 n은 유체와 표면에 의해 정해지는 변수이며 물인 경우 1로 정의한다. 또한 C_{sf}는 비등곡선에서 면과 유체조합에 따른 상수로 유체와 표면상태에 따라 달라지며 이에 의해 비등곡선에 영향을 준다. 이에 거친표면과 폴리링 상태의 실험상수인 0.013 과 0.0068의 비등곡선 내에서 실험데이터 의한 비등곡선이 생성되는지는 확인하였다.

$$q_{CHF,Zuber} = \frac{\pi}{24}\rho^{1/2} h_{fg}\left[g\sigma(\rho_f - \rho_g)\right]^{1/4} \tag{5-2}$$

임계열유속에 대해서는 Zuber(1959)의 임계열유속 상관식과 비교하여 실험의 정확성을 평가하였다. 실험은 포화압력이 3 kPa하에서 유체의 온도를 24℃로 일정하게 유지한 상태에서 수행하였다.

Fig. 5.1은 물의 비등곡선에 대해 실험과 상관식의 비교를 보여준다. 비등곡선은 Rohsenhow(1952) 상관식 내에서 생성되어 일치하는 경향을 보였다. 임계열유속의 경우 매끄러운 표면(Ra=177.5 nm)에서 Zuber(1959)의 임계열유속과 비교하여 약

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

9%의 오차를 보였으나 거친표면(Ra=292.8 nm)의 경우 Zuber(1959)의 임계열유속보다 43.3% 높게 나타났다. 이와 같이 매끄러운 표면과 거친표면의 비등곡선과 임계열유속에 차이가 나는 이유는 매끄러운 표면의 경우 거친표면에 비해 표면이 매끄러워 기포 생성에 필요한 기공이 적어 가열표면의 열을 원활히 전달하지 못하기 때문이다.

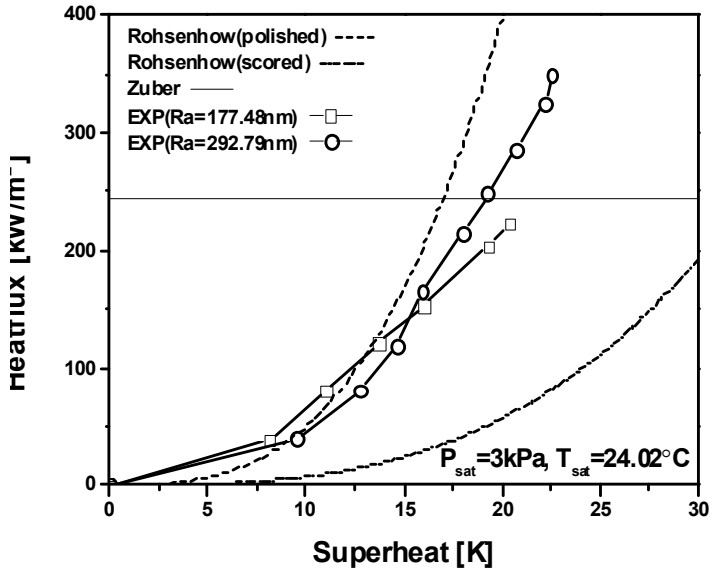


Fig. 5.1 Comparison with the experiment and other correlations

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 매끄러운 표면에서 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 특성 고찰

1. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등곡선 고찰

매끄러운 표면에서 Al_2O_3 나노유체의 비등열전달 특성을 고찰하기 위해 표면거칠기가 177.5 nm 인 나노유체의 함유량이 10^{-3}에서 10^{-1}vol%까지 증가시켜 실험을 수행하였다. Fig. 5.2는 Al_2O_3 나노유체 함유량 변화에 대한 비등곡선을 보여준다. 모유체인 물에서 임계열유속과 임계열유속에서 도달에 필요한 과열도는 222 kW/m^2·K 과 20.4K 로 나타났으며 5×10^{-2}vol% Al_2O_3 나노유체에서 임계열유속과 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 722.5 kW/m^2·K 와 37.7K로 나타나났다. Al_2O_3 나노유체 함유량이 증가함에 따라 비등곡선은 전반적으로 우측으로 이동하였다. 임계열유속은 모유체인 물보다 높게 나타났으며 또한 임계열유속 도달에 필요한 가열도도 증가하였다. 이는 다수의 연구에서는 언급된 바와 같이 나노유체 함유량이 증가함에 따라 임계열유속은 증가하며, 핵비등 발생 과열도 구간이 넓어지는 특징과 일치한다. 하지만 나노유체의 함유량이 증가는 반드시 임계열유속과 핵비등 발생 과열도 구간의 증가를 야기하는 것은 아니다. 본 연구에서는 Al_2O_3 나노유체의 함유량이 5×10^{-1}vol% 이 후 부터는 비등곡선이 우측으로 이동하였다. 나노유체 함유량이 최대인 10^{-1}vol%-Al_2O_3 나노유체에서 임계열유속과 과열도는 499.9 kW/m^2·K 과 28.7K로써 0.05vol% 보다 낮게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

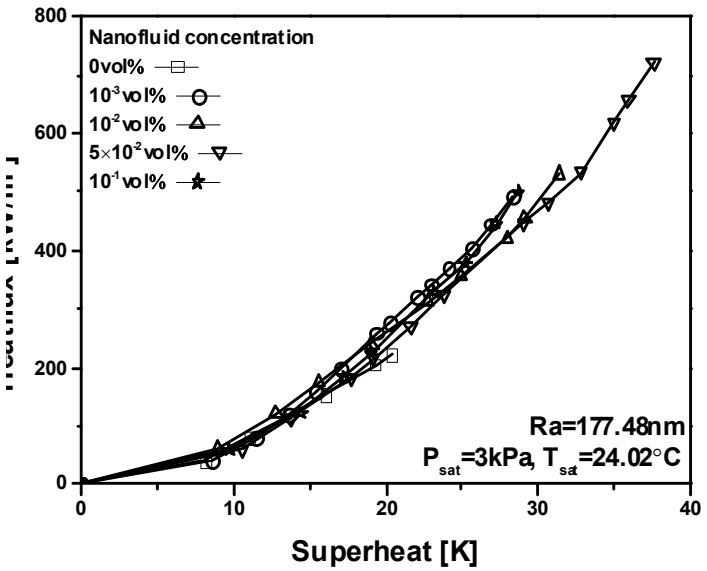


Fig. 5.2 Boiling curve according to the variation of nanofluid volume concentration at smooth surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 나노유체 함유량 변화에 따른 임계열유속 고찰

Fig. 5.3은 나노입자 함유량에 따란 임계열유속 향상을 보여준다. 모든 나노유체에서 임계열유속은 향상됨을 보였으나 나노유체 함유량이 10^{-3}vol% 에서 5×10^{-1}vol%까지 증가함에 따라 Al_2O_3 나노유체의 임계열유속은 121.8%에서 225.1%까지 향상되어 최대 722.5 kW/m^2·K 까지 증가하였으며 그 이후에서는 임계열유속 향상은 이루어졌지만 기존보다 낮은 임계열유속 개선을 보였다. Hedge 등(2012)은 CuO 나노유체를 이용하여 비등열전달 특성을 연구하였으며 CuO 나노유체의 함유량이 0.2vol%까지 증가함에 따라 임계열유속은 130% 향상되었으며 그 이후 함유량에서는 거의 일정한 임계열유속 개선이 이루어졌다. 이로 미루어 볼 때 나노유체 사용시 모유체에 비해 임계열유속 향상은 발생하지만 나노유체의 함유량 증가에 따른 임계열유속 향상에는 한계가 존재함을 알 수 있다.

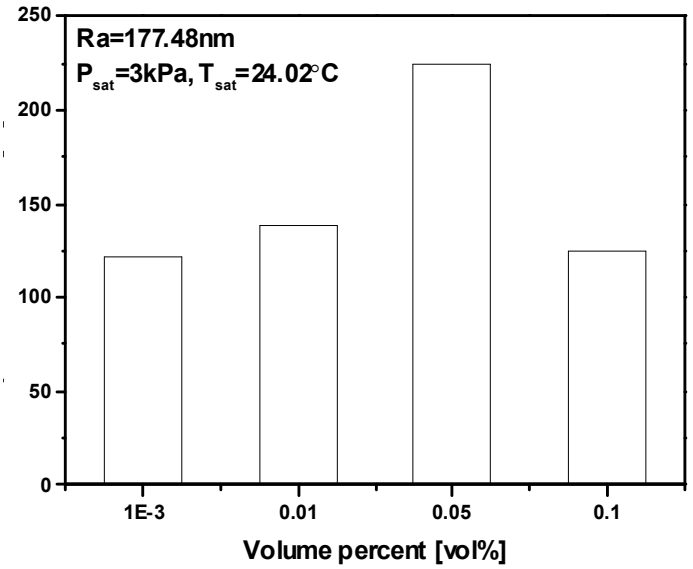


Fig. 5.3 Improvement of critical heat flux according to nanofluid volume concentration at smooth surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등열전달계수 고찰

비등열전달계수는 열유속이 증가함에 따라 증가하지만 특정 열유속 이상의 경우 비등열전달계수는 천천히 증가한다. 이는 비등열전달이 구분되기 때문으로 초기에는 자연대류에 의존하는 자연대류 비등에서 열유속이 증가함에 따라 핵비등으로 발전되어 비등 열전달계수가 증가하기 때문이다. 하지만 열유속이 지속적으로 증가함에 따른 가열표면에 생성된 기포는 한정되며 높은 열유속에서는 연속적으로 기포가 생성됨에 따라 기포막이 생겨 기포생성에 필요한 액체의 유입이 원활하지 않아 비등 열전달계수는 천천히 증가한다. 이후 꾸준히 가열면을 통해 전달되는 열유속이 증가되면 기포생성에 의한 열전달에 한계가 오며 이로 인하여 열전달계수는 급격히 증가한다.

Fig. 5.4는 Al_2O_3 나노유체의 열유속에 따른 비등열전달계수 변화를 보여준다. 동일한 열유속에서 비등열전달계수는 열유속과 나노입자의 함유량의 증가에 따라 비등열전달계수는 증가함을 보였다. 임계열유속은 나노입자의 함유량에 따라 임계열유속이 다르게 나타나기 때문에 물의 임계열유속인 222 $kW/m^2 \cdot K$ 의 약 절반지점인 120 kW/m^2 에서 비등열전달계수를 비교하였다. 측정 시 열유속을 정확히 120 kW/m^2 로 고정시킬 수 없기 때문에 열유속이 120 kW/m^2 전 후의 측정값을 이용하여 선형적으로 열유속이 120 kW/m^2 의 비등열전달을 계산하여 비교하였다. 열유속이 120 kW/m^2 비등열전달계수는 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%에서 각각 8.8, 8.7, 9.4, 8.4, 8.5 $kW/m^2 \cdot K$으로 대체적으로 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 비등열전달계수는 감소함을 보였다. 하지만 Al_2O_3 나노유체의 모유체인 물에 비해 높은 임계열유속을 갖기 때문에 단순히 동일한 열유속에서 모유체인 물의 비등열전달계수에 비해 Al_2O_3 나노유체 비등열전달계수가 낮다고 볼 수 없다. 이를 정확히 파악하기 위해서는 임계열유속에서 비등열전달계수과 동일 과열도에서의 비등열전달계수를 함께 비교할 필요가 있다. 임계열유속에서 비등열전달계수는 나노유체의 함유량이 0에서 5×10^{-2}vol%로 증가함에 따라 전반적으로 증가한 반면 나노유체의 함유량이 5×10^{-2}vol% 초과시 비등열전달계수는 물에 비해 높지만

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감소함을 보였다. 이를 종합해 볼 때 Al_2O_3 나노유체 사용 시 동일한 열유속에서 비등열전달계수는 모유체에 비해 낮지만 임계열유속에서의 비등열전달계수는 향상되어 전반적으로 Al_2O_3 나노유체에서 비등열전달계수는 모유체인 물에 비해 향상되며 나노유체 함유량 증가에 대한 비등열전달계수 향상은 한계가 있음을 알 수 있다.

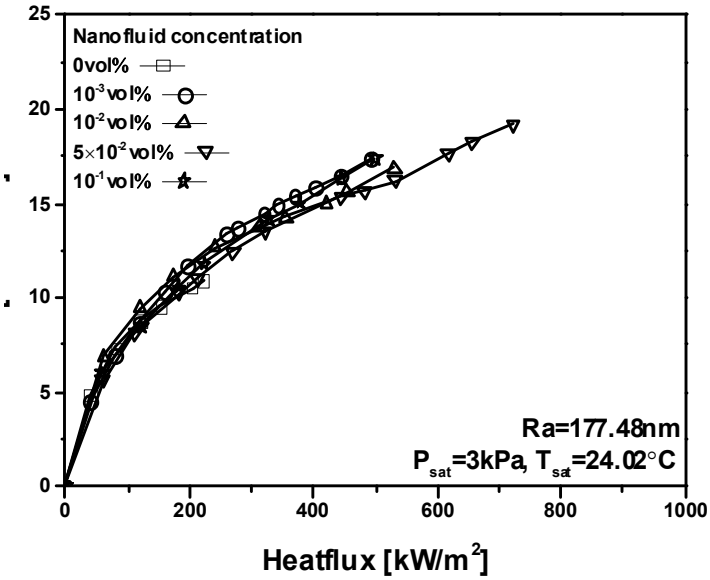


Fig. 5.4 Boiling heat transfer coefficient according to nanofluid volume concentration at smooth surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 나노유체의 기포성장 고찰

나노유체의 비등열전달 특성을 파악하기 위해 나노유체가 비등 시 기포성장과정을 초고속카메라(High spped camera, i-speed, Olympus Inc)를 이용하여 촬영하였다. Al_2O_3 나노유체의 경우 나노유체의 함유량이 증가함에 따라 빛의 투과성이 약해져 촬영에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 모유체인 물과 10^{-3}vol%에 대해 기포의 성장과정을 초고속카메라를 이용하여 관찰하였다. Fig. 5.5는 물과 10^{-3}vol% Al_2O_3 나노유체의 기포성장과정을 보여준다. 열유속이 증가함에 따라 가열표면의 기포의 크기와 수는 증가하였으며 열유속이 임계열유속에 도달함에 따라 가열표면은 기포에 의해 덮혀짐을 보였다. 하지만 모유체인 물과 10^{-3}vol% Al_2O_3 나노유체의 기포 성장과정에는 몇 가지 차이가 나타났다. 첫째, 기포의 크기로 물의 경우 열유속이 증가함에 따라 기포의 크기는 증가하지만 크게 증가함을 보이지 않지만 나노유체의 경우 기포 크기가 크게 증가함을 보였다. 둘째, 기포의 수로 물의 경우 열유속이 증가함에 따라 기포의 수가 많으며 기포가 성장하면서 합쳐짐을 보였으나 나노유체의 경우 기포의 수가 물에 비해 적게 나타났다. 마지막으로 기포의 이탈주기로 물에 비해 10^{-3}vol% Al_2O_3 나노유체는 기포의 성장과 이탈시간이 길어짐을 보였다. 이러한 현상의 원인을 파악하기 위해 임계열유속의 약 30% 지점에서 기포 생성 시 표면 접촉각을 측정하였다.

Fig. 5.6은 기포 생성 시 물과 10^{-3}vol% Al_2O_3 나노유체의 접촉각을 보여준다. 물의 경우 기포 생성 시 표면접촉각은 약 77°로 나타난 반면에 10^{-3}vol% Al_2O_3 나노유체의 경우 61.2°로 접촉각의 감소가 나타났다. 접촉각의 감소는 표면 젖음성의 증가로 기포 성장 및 이탈에 소요되는 에너지양의 증가를 의미하며 이로 인해 나노유체의 기포의 크기는 모유체인 물에 비해 크게 나타난다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

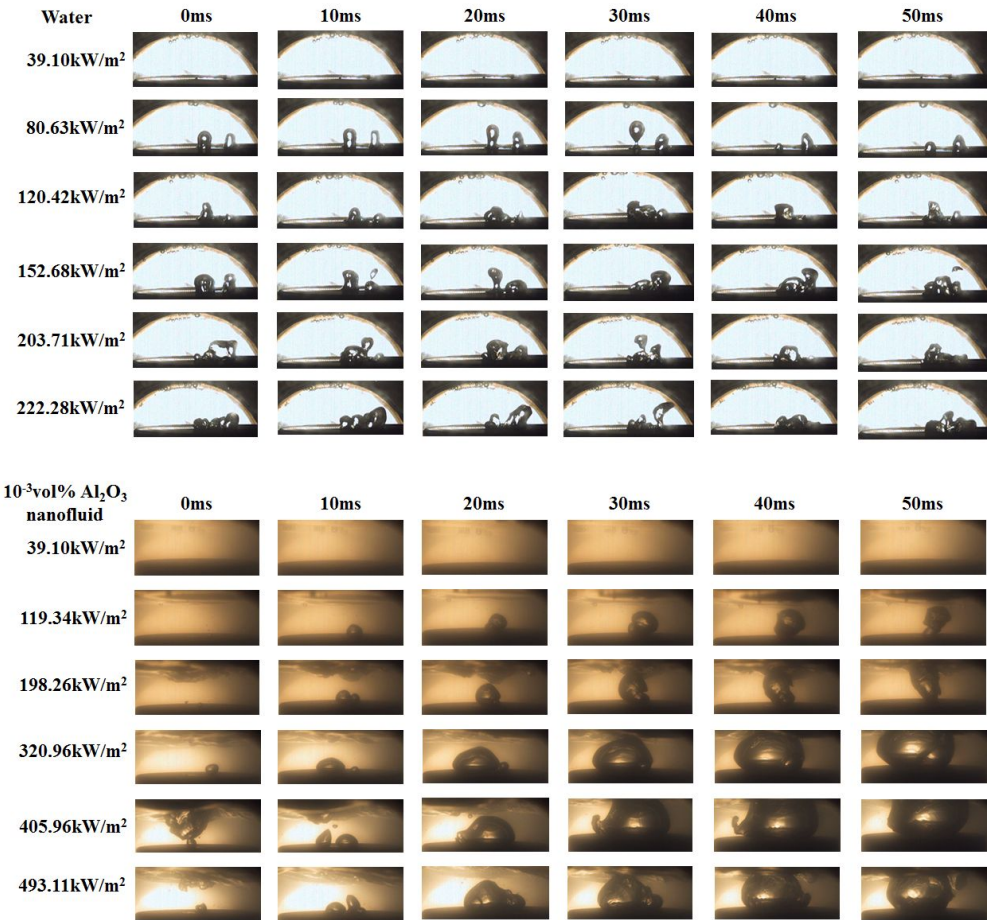
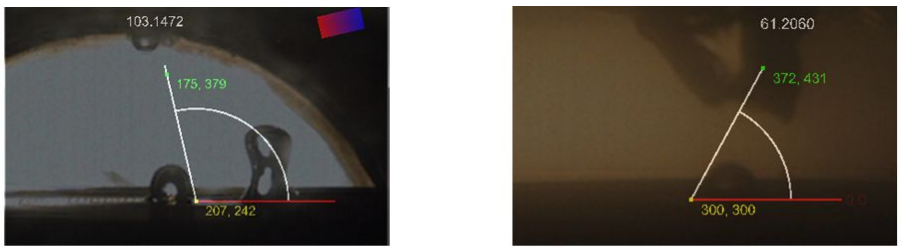


Fig. 5.5 Bubble growth for water and 10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid according to heatflux



Water 80.64kW/m², Contact angle : 77deg

10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid 198.25kW/m², Contact angle : 61.2deg

Fig. 5.6 Dynamic contact angle in water and 10^{-3}vol% Al_2O_3 nanofluid at smooth surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 나노유체 비등 전/후 표면거칠기의 영향성 고찰

다수의 문헌에 따르면 비등 시 나노입자의 침전이 비등열전달 특성에 영향을 준다고 보고하고 있다. 이에 본 연구에서는 비등 전/후 가열표면의 침전 여부를 확인하였다. Fig. 5.7은 0.1vol% Al_2O_3 나노유체의 비등 전/후 매끄러운 가열표면의 표면거칠기 변화를 보여준다. 비등 전 가열표면의 평균 표면거칠기는 177.5 nm 인 반면 비등 후 가열표면의 거칠기는 530 nm 로 증가하였다. 또한 가열표면 전역에 나노입자가 균일하기 침전되어 나노입자 침전에 의한 가열표면의 표면개선이 균일하게 개선되었음을 확인 할 수 있다.

Fig. 5.8은 비등 전/후 가열표면의 변화를 보여준다. 모든 Al_2O_3 나노유체에서 비등실험 수행 후 나노입자의 침전이 발견되었으나 침전 정도에는 차이를 보였다. Al_2O_3 나노유체의 함유량이 10^{-3}vol%에서 5×10^{-2}vol%로 증가함에 따라 나노입자의 침전이 더 활발하게 이루어졌으며 가열면 전체로 확대되었다 하지만 5×10^{-2}vol% 이후에는 나노입자 침전이 약화되었으며 중심부에 나노입자 침전이 덜 이루어짐을 보였다. 이는 나노유체가 가열표면에서 상변화하면서 가열표면에 나노입자가 침전되어 나노입자층을 형성하며 이로 인해 표면 젖음성에 영향을 주기 때문이다. 이로 미루어 볼 때 나노입자의 함유량에 의한 표면침전의 영향성은 직접적으로 비등열전달계수과 임계열유속에 영향을 줌을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

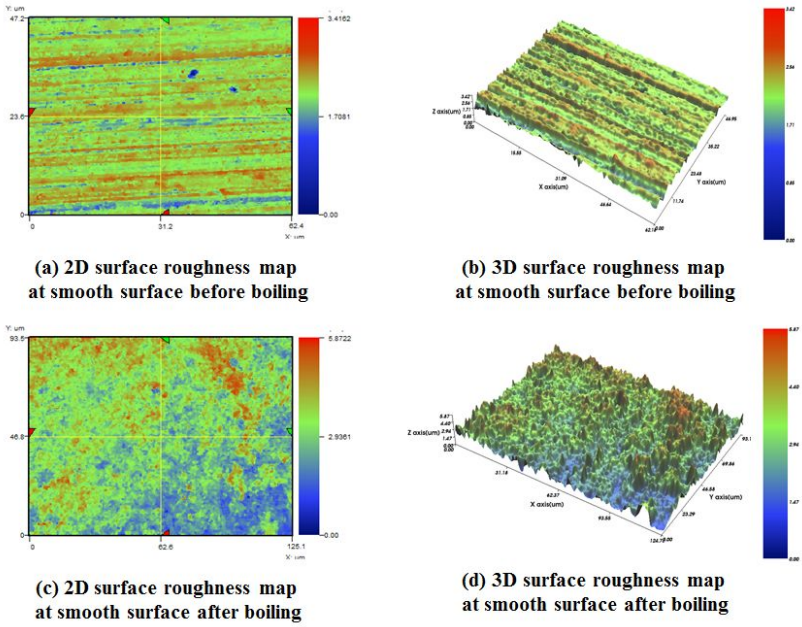


Fig. 5.7 Variation of surface roughness at smooth surface before and after boiling

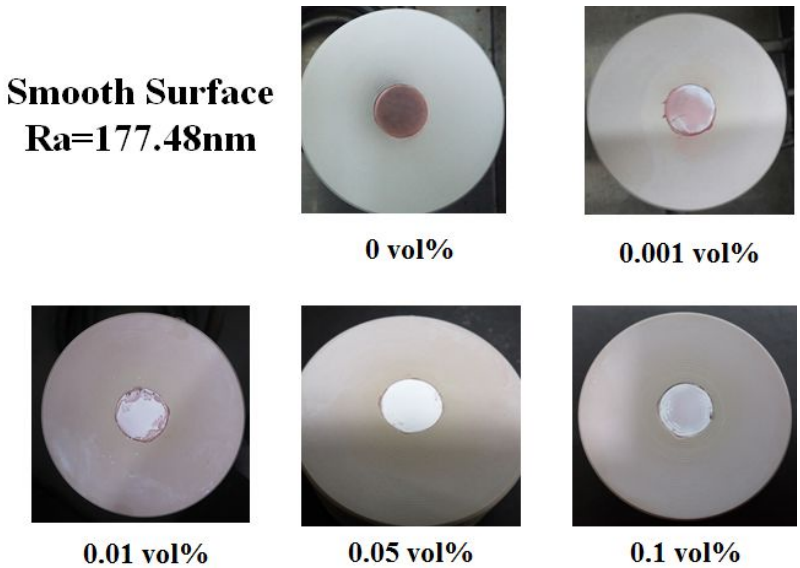


Fig. 5.8 Al_2O_3 nanoparticle deposition according to nanofluid concentration on smooth heated surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 거친 표면에서 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 특성 고찰

1. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등곡선 고찰

Fig. 5.9는 거친 표면(Ra=292.8 nm)에서 Al_2O_3 나노유체의 함유량 변화에 따른 비등곡선을 보여준다. 거친 표면에서 물의 임계열유속은 매끄러운 표면(Ra=292.8 nm)에 비해 57.5% 향상된 350 kW/m^{2}으로 나타났다. 또한 매끄러운 표면과 마찬가지로 거친표면의 비등곡선은 모유체인 물의 비등곡선에 비해 우측으로 이동하였으며 임계열유속과 임계열유속 도달에 필요한 과열도 또한 증가하였다. Al_2O_3 나노유체의 함유량이 5×10^{-2}vol% 까지 증가함에 따라 임계열유속은 향상되었으며 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 증가하였다. 5×10^{-2}vol% 서 임계열유속은 물에 비해 138.5% 향상되어 834.9 kW/m^{2}로 나타났으며 가장 높은 향상을 보였다. 반면에 0.05vol% 이후에는 모유체인 물에 비해 임계열유속의 향상과 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 증가하였지만 향상 및 증가율은 감소하였다. 10^{-3}vol%, 10^{-2}vol%, 5×10^{-2}vol%, 10^{-1}vol% 일 때 각각의 임계열유속과 임계열유속 도달필요한 과열도는 각각 527.9, 476.4, 834.9, 529.3 kW/m^2 와 36.4, 26.3, 58.7, 34.9K 으로 모유체에 비해 높게 나타났다. 종합적으로 살펴볼 때 비등시 나노입자 침전에 의한 가열표면의 거칠기의 증가는 따라 임계열유속과 핵비등 과열도의 증가를 야기 시키는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

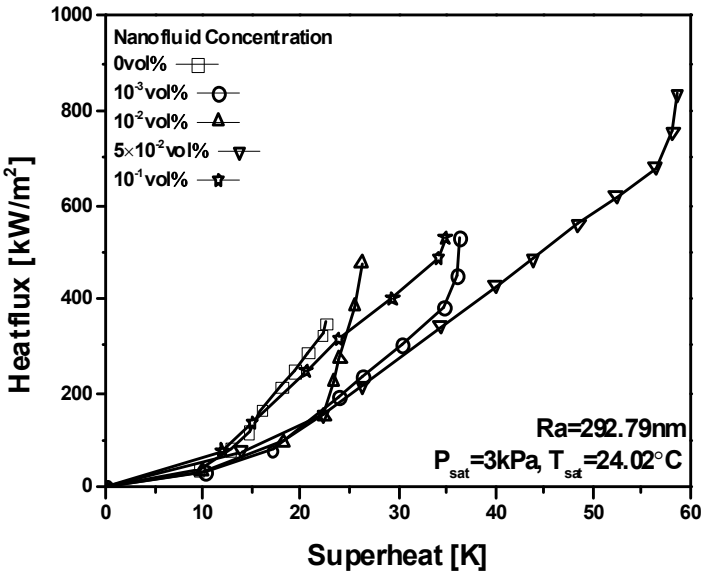


Fig. 5.9 Boiling curve according to the variation of nanofluid volume concentration at rough surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 나노유체 함유량 및 표면거칠기 변화에 따른 임계열유속 고찰

Fig. 5.10은 거친 표면(Ra=292.8 nm)에서 Al_2O_3 나노유체 함유량에 따른 임계열유속 향상을 보여준다. 모든 나노유체에서 임계열유속은 향상됨을 보였으나 Al_2O_3 나노유체의 함유량이 5×10^{-2}vol%에서 138.5% 임계열유속 향상이 이루어졌으며 5×10^{-2}vol% 이상의 함유량에서는 이보다 낮은 향상률을 보였다. 특히 10^{-2}vol%에서 임계열유속 향상은 36.1%으로 가장 낮은 향상률을 보였으며 Al_2O_3 나노유체의 함유량의 증가가 임계열유속의 향상과 비례적 임계열유속 향상과 비례하지 않으며 임계열유속 향상에 대해 증가와 감소를 보였다. 이는 나노유체 함유량에 의한 임계열유속 개선에 한계가 존재하며 표면거칠기에 따라 한계점이 다름을 의미한다.

Fig. 5.11은 매끄러운 표면과 거친표면에서 임계열유속에 대한 비를 보여준다. 모유체인 물에서 표면거칠기 증가에 대한 임계열유속 향상률은 57.5%로 가장 높게 나타났으며 전반적으로 표면거칠기 증가에 따른 Al_2O_3 나노유체의 임계열유속 향상은 나타났다. 특히 5×10^{-2}vol%에서 표면거칠기 증가에 따른 임계열유속 향상은 15.6%으로 다른 나노유체 함유량에 비해 높게 나타난 반면 10^{-2}vol%에서 표면거칠기 증가에 따른 임계열유속은 오히려 감소함을 나타났다. 이는 표면거칠기가 거칠어짐에 따라 Al_2O_3 나노유체에 함유량에 의한 임계열유속 개선의 영향성은 감소하며 임계열유속 개선에 대한 Al_2O_3 나노유체 함유량의 영향성 또한 다름을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

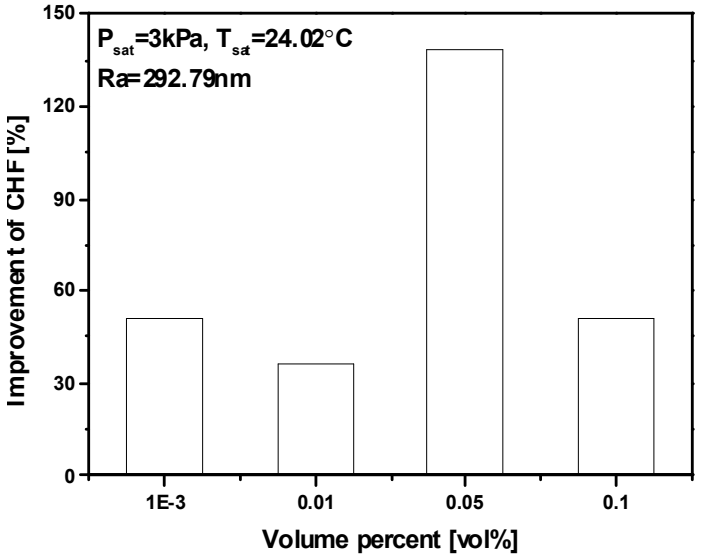


Fig. 5.10 Improvement of critical heat flux according to nanofluid volume concentration at rough surface

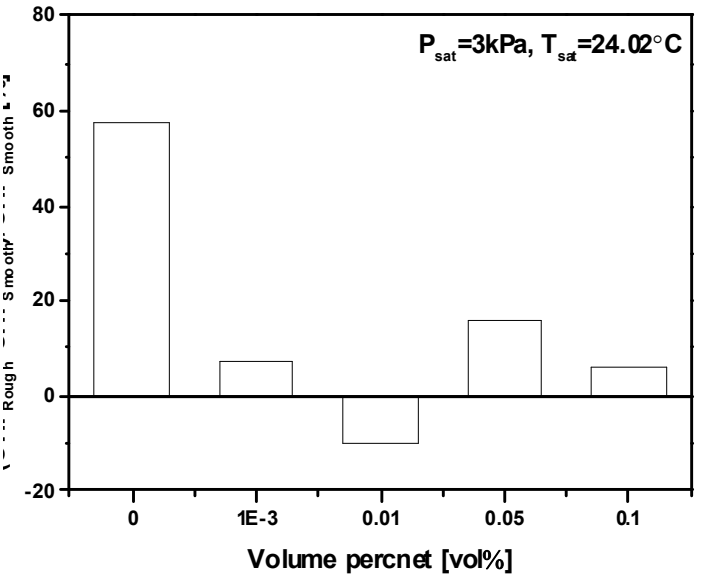


Fig. 5.11 Ratio of critical heat flux with rough and smooth surface according to nanofluid volume concentration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 나노유체 함유량 변화에 따른 비등열전달계수 고찰

Fig. 5.12는 거친표면에서 Al_2O_3 나노유체의 함유량에 따른 비등열전달계수를 보여준다. 열유속이 증가함에 따라 비등열전달계수는 증가하였지만 나노입자의 함유량의 증가 시 대체적으로 감소함을 보였다. 이는 매끄러운 표면과 다른 경향성을 보인다. 본 연구에서는 모유체인 물의 임계열유속의 약 절반인 175 kW/m^{2}에서 비등열전달계수를 비교하였다. 175 kW/m^2 전후의 열유속에서 비등열전달계수를 선형적으로 계산하여 175 kW/m^{2}의 열유속을 계산하여 비등열전달계수를 비교하였다. 175 kW/m^{2}에서 Al_2O_3 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%에서의 비등열전달계수는 각각 10.6, 7.5, 7.7, 7.4, 10.1 kW/m^2·K 으로 모유체에 비해 나노유체의 경우 동일한 열유속에서 낮을 열유속을 보였다. 특히 나노유체의 함유량이 0vol%에서 0.05vol% 까지 증가함에 따라 비등열전달계수는 감소하는 경향을 보였지만 나노유체 함유량이 0.05vol% 이상의 경우 비등열전달계수가 모유체인 물에 비해서는 낮지만 다른 함유량에 비해서는 비등열전달계수가 증가함을 보였다. 임계열유속에서 Al_2O_3 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol% 일 때 비등열전달계수는 각각 15.5, 14.5, 18.1, 14.2, 15.2 kW/m^2·K 로 10^{-2}vol%를 제외한 나머지 나노유체 함유량에서 비등열전달계수는 감소함을 보였다. 본 결과를 분석해 보면 가열표면의 거칠기가 매끄러워질 경우 비등열전달계수는 모유체의 비해 향상되는 반면 가열표면의 거칠기가 거칠어질 경우 비등열전달계수는 낮아 짐을 알 수 있다. 또한 나노유체 함유량 증가에는 비등열전달 특성 개선에 대한 한계점이 존재하며 가열표면의 표면거칠기와 나노유체 함유량의 조합으로 인해 나노유체의 비등열전달 특성이 정해진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

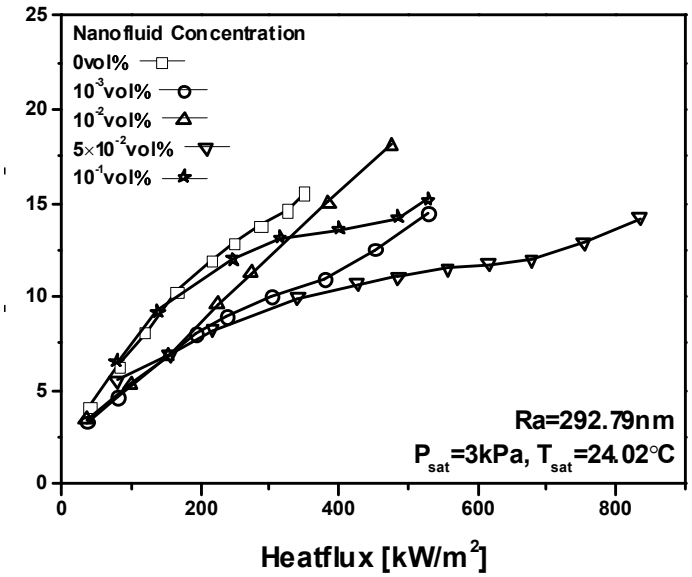


Fig. 5.12 Boiling heat transfer coefficient according to nanofluid volume concentration at rough surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 나노유체의 기포성장 고찰

Fig. 5.13은 거친표면에서 물과 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 기포성장과정을 보여준다. 물에 비해 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 경우 기포의 이탈직경은 크며 기포성장 시간 또한 길게 나타난 반면 기포의 수는 작음을 보였다. 이는 기포 성장에 필요한 기공과 관계가 있다. 물에 비해 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 경우 기포 생성에 필요한 기공이 작기 때문에 가열표면으로부터 공급되는 열유속은 소수의 기공에서 상변화에 의한 기포성장에 사용이 되며 이로 인해 물에 비해 큰 기포가 생성되며 성장 시 주변의 기포를 병합하여 기포의 크기는 더욱 커지게 된다. Al_2O_3 나노유체에서 거대 기포 생성과 기포성장 시간의 증가를 알 기 위해 임계열유속의 약 30% 지점에서 기포 생성 시 표면 접촉각을 측정하였다.

Fig. 5.14는 기포 생성 시 물과 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 접촉각을 보여준다. 물의 경우 기포 생성시 표면접촉각은 약 54°로 나타난 반면 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 경우 물보다 작은 접촉각인 48.4°으로 나타났다. 이는 Al_2O_3 나노유체가 물보다 표면 젖음성이 우수하며 이로 인해 기포의 크기 증가와 성장시간의 증가가 야기된다. 매끄러운 표면에서 물과 10^{-3}vol%-Al_2O_3 나노유체의 기포의 크기와 이탈주기는 거친표면보다 작고 짧게 나타났다. 이는 매끄러운 표면에서 접촉각은 77°와 61.2°로 거친 표면보다 크게 나타나 표면젖음성이 감소하였기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

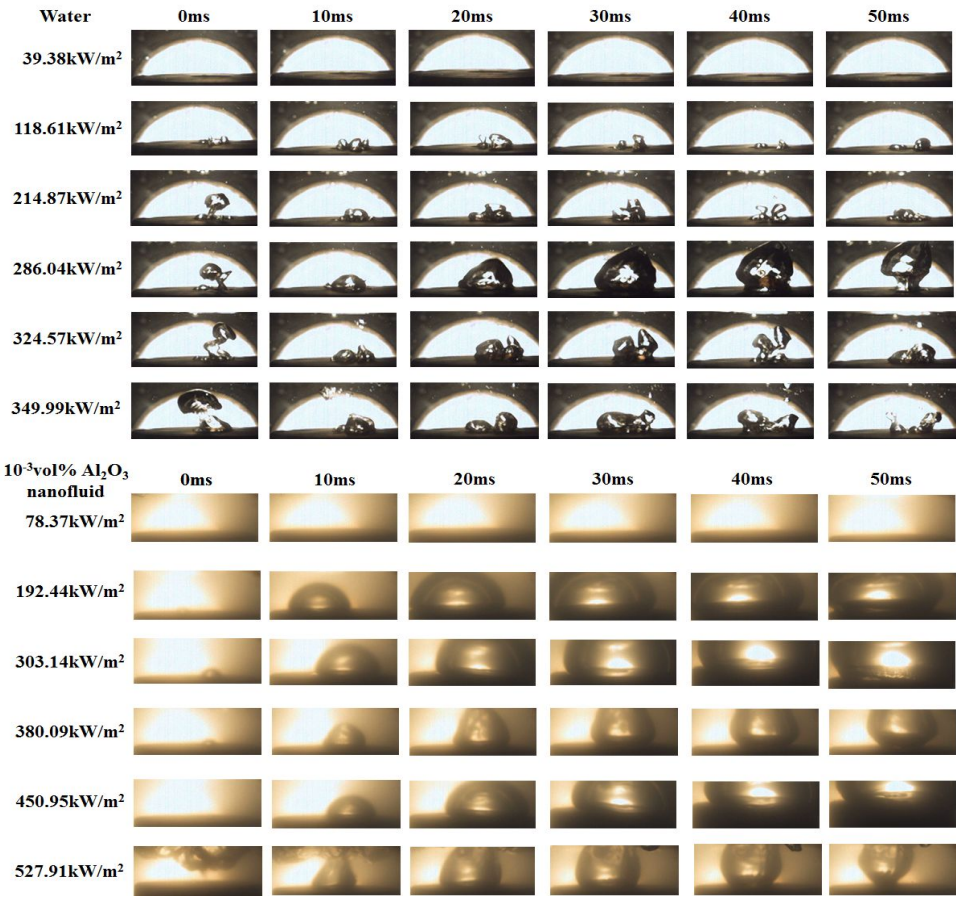


Fig. 5.13 Bubble growth about water and 10^{-3}vol%-Al_2O_3 nanofluid according to heat flux at rough surface

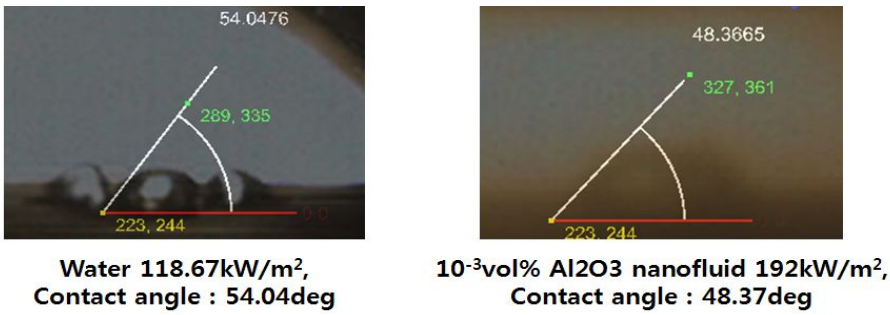


Fig. 5.14 Dynamic contact angle about water and 10^{-3}vol%-Al_2O_3 nanofluid at rough surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 나노유체 비등 전/후 표면거칠기의 영향성 고찰

Fig. 5.15는 10^{-1}vol% Al_2O_3 나노유체의 비등 전/후 매끄러운 가열표면의 표면거칠기 변화를 보여준다. 비등 전 가열표면의 평균 표면거칠기는 293 nm 인 반면 나노입자가 침전된 비등 후 가열표면의 평균 표면거칠기는 920 nm로 비등 후 매끄러운 표면의 평균 표면거칠기 인 530 nm 보다 가열표면이 거칠어짐을 보였다. 또한 매끄러운 표면에서 비등 후 표면은 나노입자의 침전이 균일하게 이루어 진 반면 거친표면에서는 나노입자의 침전이 불균일하게 이루어졌다.

Fig. 5.16은 거친표면에서 비등 후 가열표면의 변화를 보여준다. 모든 Al_2O_3 나노유체 함유량에서 나노유체의 침전이 발견되었으며 매끄러운 표면에 비해 비등이 발생하는 가열표면 전역에 나노입자의 침전이 발생하였다. 나노입자의 침전에 의한 표면거칠기 변화는 육안으로 확인할 수 있을 정도로 뚜렷하게 나타났으며 10^{-3}vol%와 5×10^{-2}vol%의 표면에서는 나노입자의 침전이 매끄럽게 형성된 반면 10^{-2}vol%와 10^{-1}vol%의 경우 나노입자의 침전이 거칠게 형성되었다. 나노입자의 침전에 의해 가열표면이 거칠어진 10^{-2}vol%와 10^{-1}vol%의 Al_2O_3 나노유체의 임계열유속은 다른 나노유체 함유량에 비해 낮은 임계열유속과 높은 비등열전달계수가 나타났다. 이를 종합해 볼 때 초기 가열표면의 표면거칠기는 나노입자의 침전에 영향을 주며 나노입자의 함유량에 따라 가열표면의 개선정도가 다르게 나타나 임계열유속과 비등열전달계수에 영향을 줌을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

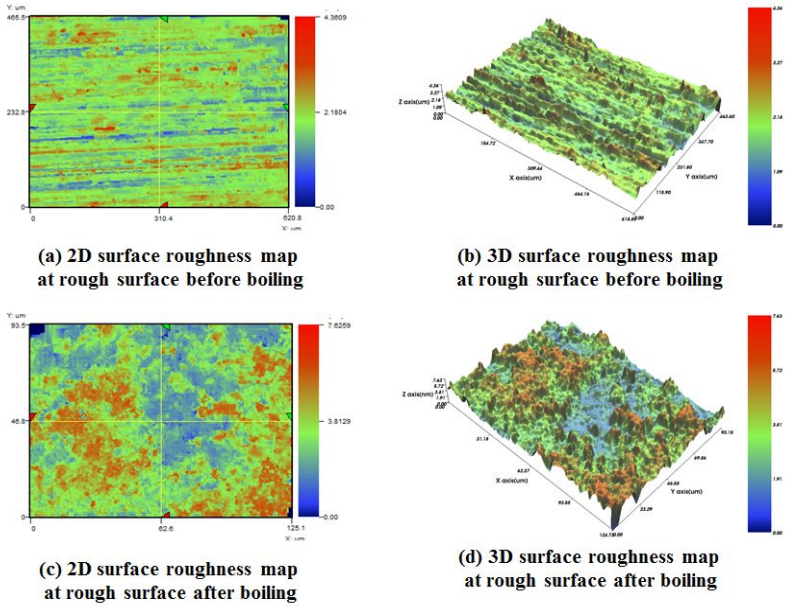


Fig. 5.15 Variation of surface roughness at rough surface before and after boiling

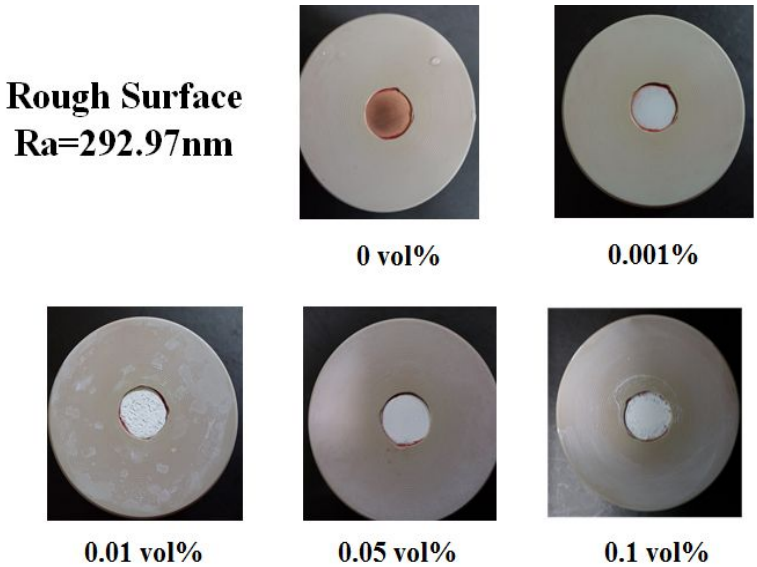


Fig. 5.16 Al_2O_3 nanoparticle deposition according to nanofluid concentration on rough heated surface

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 Al_2O_3 나노유체 비등열전달 해석 결과

제 1 절 나노유체 비등모델링 신뢰성 평가

나노입자의 함유량과 나노입자의 크기 따른 Al_2O_3 나노유체의 풀비등 특성에 대한 해석을 진행하기 이전에 개발된 해석모델의 신뢰성을 평가하기 위해 기존의 연구자들의 연구결과와 비교하였다. 이를 위해 Geradi(2009) 과 Shahmoradi 등(2013)의 실험조건 하에서 개발된 모델을 적용시켜 진행하였으며 결과를 비교하여 나노유체 비등모델링의 신뢰성을 평가하였다. Fig. 6.1은 기존연구와 본 연구의 비등 곡선 비교를 보여준다. Fig. 6.1이 보여주듯 순수한 물이나 나노유체 모두에 대하여 해석결과의 경우 전반적으로 기존의 결과와 잘 일치하였으며 열유속은 예측하는 것을 확인할 수 있으며 모든 조건에서 최대 오차와 평균오차는 각각 17.2% 와 6.2%로 나타났다. 특히 본 연구의 실험결과는 Geradi(2009)의 물과 Shahmoradi 등(2013) 의 나노유체 비등 실험 결과와 잘 일치하였다. 실험 및 해석결과 둘 다 모유체인 물에 나노입자가 첨가되었을 때 임계열유속 향상과 비등 구간의 증가가 이루어짐을 보였다. 특히 Geradi(2009)의 실험은 Shahmoradi 등(2013) 의 실험에 비해 비등 구간이 짧고 임계열유속 100 kW/m^2 이 차이가 난다. 이는 가열표면의 재질이 차이로 발생된 차이로 Geradi(2009)은 가열표면의 재질이 유리에서 비등실험을 수행한 반면 Shahmoradi 등(2013) 은 구리표면에서 실험을 수행하였기 때문이다. 더욱이 Shahmoradi 등(2013) 의 실험에서 물의 접촉각은 약 45°로 Geradi(2009)가 측정한 접촉각인 80°에 비해 작다. 이는 비등열전달에 가열표면의 재질로 인하여 나노유체의 젖음성에 영향을 줌을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

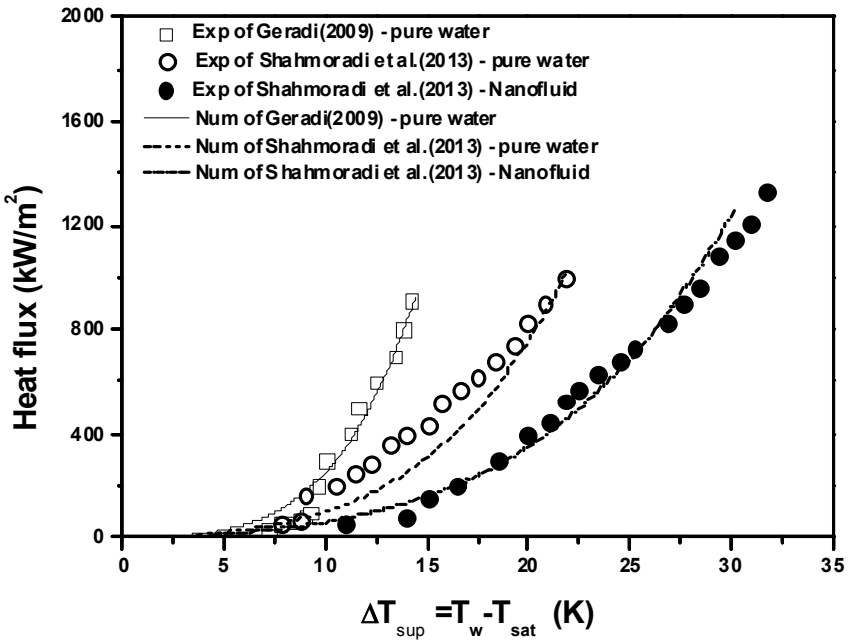


Fig. 6.1 Comparison of boiling curve with this model and previous studies

Collection @ chosun

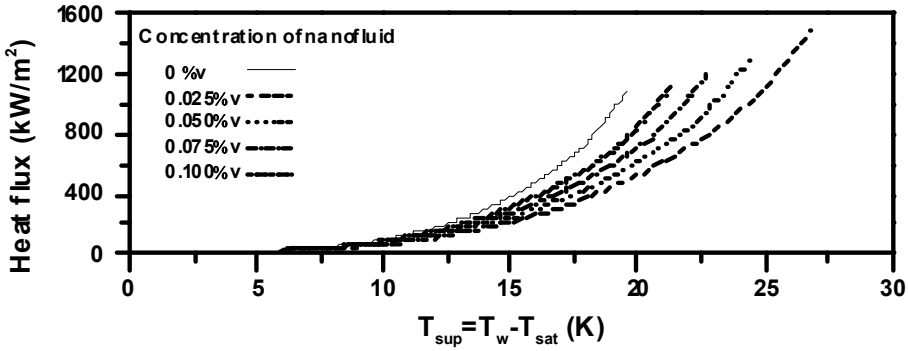
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 나노유체의 비등곡선

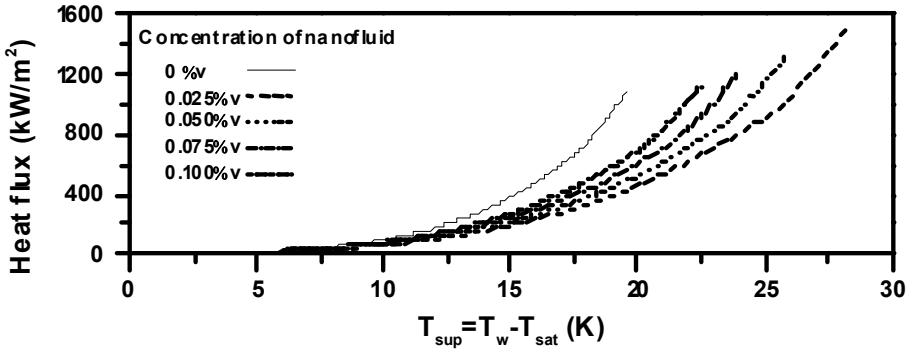
Fig. 6.2는 나노입자의 크기가 25, 50, 75 nm에서 나노유체의 함유량에따른 비등곡선의 변화를 보여주고 있다. 모유체에 비해 나노유체의 경우 나노입자의 크기 및 함유량과 상관없이 임계열유속의 향상과 비등열전달계수의 감소가 나타났다. 이러한 경향은 다수의 연구에 의해 보고되었으며 임계열유속의 향상과 비등열전달계수의 감소를 기포의 성장 및 이탈 시 가열표면에 나노입자층이 형성되어 젖음성을 개선시키기 때문으로 언급하였다. 25, 50, 75 nm 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 임계열유속은 최대값이 나타났으며 1,499, 1,515, 1,509 kW/m^2 으로 나타났다. 하지만 나노입자의 크기가 25 nm에서 75 nm 로 증가함에 따라 임계열유속 도달에 필요한 과열도가 증가하였다. 이는 나노입자 크기가 증가함에 따라 비등열전달계수는 감소함을 의미한다. 나노입자의 함유량이 0.025vol% 이후부터 임계열유속의 감소가 나타났다. 나노입자의 함유량이 0.1vol%에서 최소값으로 0.1vol%에서 25 nm, 50 nm, 75 nm의 임계열유속은 1,109, 1,125, 1,134 kW/m^2 으로 나타났다. 이는 비등에서 나노입자의 함유량 증가로 인한 열물선 개선보다 접촉각 감소로 인한 젖음성 개선이 비등열전달에 영향을 미친다고 볼 수 있다. Harish 등(2011)은 나노유체가 가열도에 따라 접촉각이 변함을 관찰하였으며, 접촉각의 변화는 나노입자의 함유량과 표면거칠기에 따라 다르게 나타났다. 또한 Shahmoradi 등(2013)은 가열표면에 나노입자의 침전으로 인해 만들어진 나노 층이 가열표면에 열저항 형성과 젖음성 개선을 수행한다고 언급하였다. 기존의 연구들의 결과를 바탕으로 나노유체의 젖음성 변화는 비등열전달 성능에 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 기포의 이탈직경, 이탈주기, 활성핵기공 밀도는 젖음성 변화에 영향을 받으며 비등열전달에 큰 영향을 주는 요소이다.

Collection @ chosun

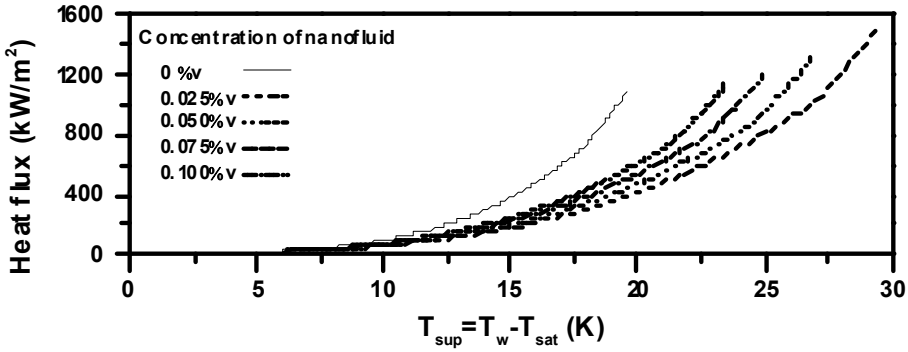
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) D_p=25 nm



(b) D_p=50 nm



(c) D_p=75 nm

Fig. 6.2 Boiling curve according to volume concentration of nanofluid at (a) D_{np}=25 nm, (b) D_{np}=50 nm, (c) D_{np}=75 nm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 나노유체 비등의 기포이탈직경

Fig. 6.3은 나노입자의 크기가 25, 50, 75nm에서 기포의 이탈직경을 보여준다. 기포의 이탈직경은 가열도가 임계열유속 온도로 증가할수록 또한 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 증가하였으며 기포의 최대 이탈직경은 나노입자의 함유량이 0.025vol%일 때 1.235 mm에서 0.1vol% 일 때 1.805 mm 로 증가하였다. 반면에 나노입자의 함유량이 0.025vol% 일 때 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가에 따른 기포의 이탈직경의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이는 기포이탈직경의 변화에서 나노입자의 크기에 대한 영향성은 거의 없으며 나노입자 함유량 변화에 의한 접촉각 변화가 주요인이기 때문이다. Al_2O_3 나노유체의 접촉각 변화는 Fig. 4.1의 설명에서 이미 언급되었듯이 Al_2O_3 나노유체 의 접촉각은 나노입자의 크기에 거의 영향을 받지 않지만 나노유체의 함유량의 증가에 따라 다소 감소함을 보였다.

Fig. 6.4는 나노입자의 함유량과 나노입자의 크기에 따른 기포이탈직경의 Energy factor 와 K factor의 향상률 보여준다. 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 Enery factor는 15.8%에서 37.8% 로 증가하였다. Energy factor 의 증가는 기포가 성장에서이탈까지 도달하는데 필요한 잠재적 에너지량의 증가를 의미하며 이로 인해 나노유체는 모유체와 동일한 기포이탈 직경을 형성하는데 더 높은 표면가열도가 요구된다. 반면에 나노입자의 함유량이 0.025vol%일 때 나노입자의 크기가 25 nm에서 75 nm로 증가함에 따라 Energy factor의 향상률은 15.8% 에서 16.9%으로 미미하게 증가하여 이에 대한 영향성은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. K factor는 기포 생성에 있어 상변화에 따른 에너지 공급, 관성과 부력에 대한 무차원수로 Ja, Pr, Ar수에 의해 정의된다. K factor는 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 모유체에 비해 약 6.23% 에서 7.46% 으로 향상되었으며 동일한 나노입자의 함유량일

Collection @ chosun

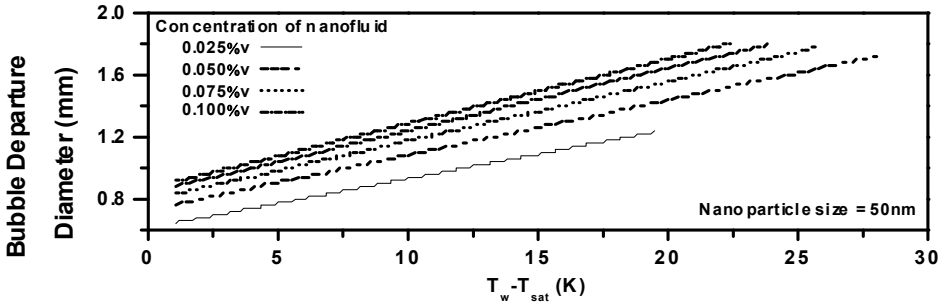
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경우 나노입자 크기가 큰 75 nm가 25 nm와 50 nm에 비해 크게 나타났지만 개선률 차이는 약 0.3% 미만으로 거의 차이가 없다.

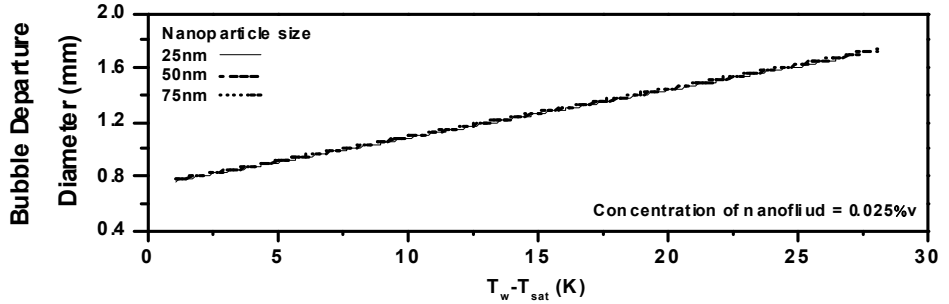
나노유체에서 Energy factor와 K factor의 개선은 나노입자 함유량에 따른 젖음성 향상과 열물성 개선과 관련이 있다. Fig. 4.1 에서 언급한 바와 같이 나노유체의 초기 접촉각의 경우 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 초기접촉각은 감소하여 Energy factor는 개선된다. 반면에 나노입자 크기의 변화는 초기 접촉각 변화에 큰 영향이 없어 동일함 함유량에서 나노입자 크기 변화에 따른 Energy factor의 개선률은 큰 차이를 보이지 않는다. K factor의 개선은 나노유체의 열물성 개선과 큰 관련이 있다. 나노유체의 경우 나노입자의 함유량이 증가함에 따라 유체의 점도는 증가하지만 하지만 부력에 영향을 주는 밀도의 경우 큰 변화가 없다. 본 연구에서는 나노입자의 함유량이 0.1vol% 미만으로 소량이기 때문에 나노입자의 함유량에 의한 열물성 개선이 크게 이루어 지지 않아 K factor의 개선률은 낮다. 특히 나노입자의 크기의 영향성은 열물성 개선에 있어 거의 변화가 없어 동일한 나노입자 함유량에서 K factor의 개선률은 큰 차이가 없다. 이로 미루어 볼 때 나노유체의 기포 이탈직경은 나노입자 함유량에 의한 젖음성 개선으로 인해 증가하며 나노입자 크기의 영향성은 거의 없다고 볼 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Bubble departure diameter according to concentration of nanofuild



(b) Bubble departure diameter according to nanoparticle size

Fig. 6.3 The bubble departure diameter according to volume concentration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

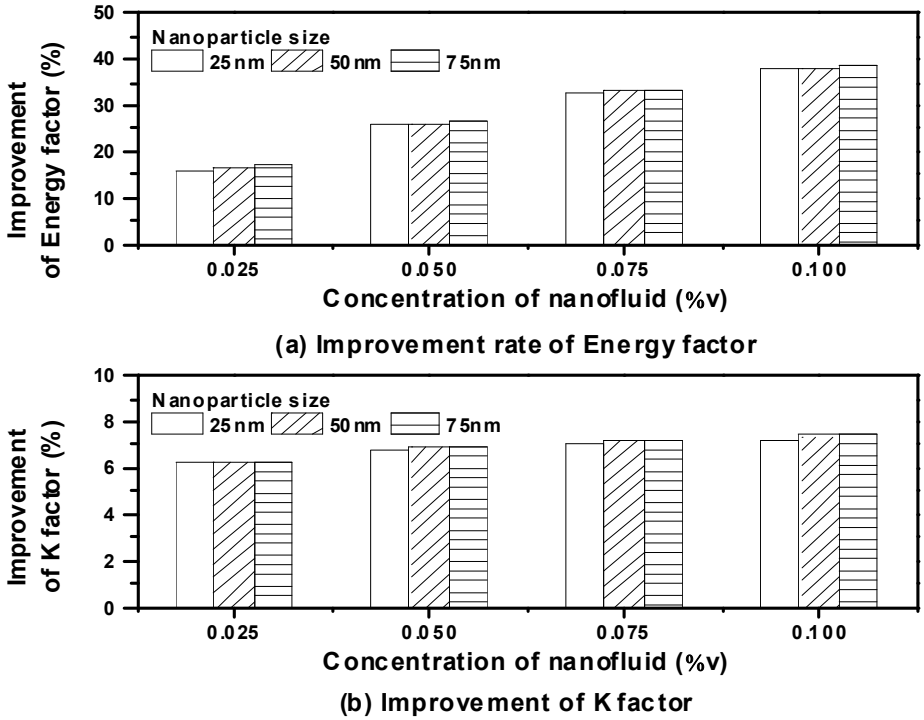


Fig. 6.4 Improvement rate for Energy and K factors according to concentration of nanofluid and nanoparticle size

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 나노유체 비등의 기포이탈빈도

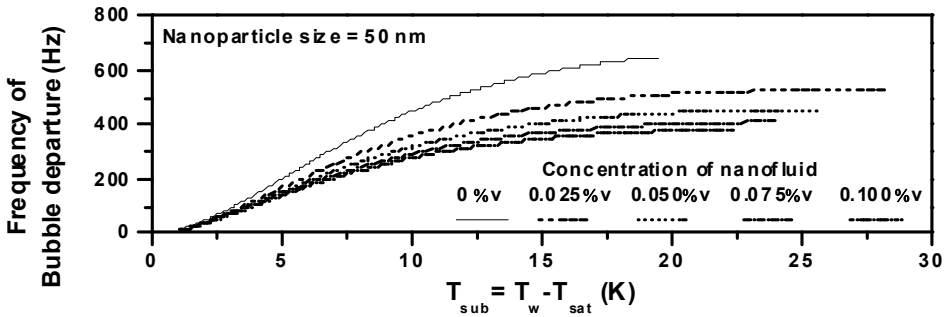
Fig. 6.5는 나노입자의 농도와 크기 변화에 따른 기포의 이탈빈도를 보여준다. 기포는 미소액체막의 증발로 인해 주변의 액체를 밀어내며 이탈직경까지 성장하며 이탈 후 열경계층에 비해 상대적으로 차가워지며 기포 생성 전까지 과도전도에 의해 가열된다. 이때 기포의 성장에 소요되는 시간을 성장시간이라 하며 기포이탈 후 다음기포가 생성될 때 까지를 이탈시간이라 한다. 기포의 성장과 관련있는 기포의 이탈주기는 기포의 이탈직경과 밀접한 관계가 있다. 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 기포의 이탈빈도가 현저히 감소하였으며 임계열유속에 가까워짐에 따라 거의 일정해 짐을 보였다. 반면에 나노입자의 함유량이 0.025vol%일 때 나노입자 크기가 25 nm에서 75 nm로 증가에 따른 기포의 이탈빈도는 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이는 기포의 이탈빈도가 기포의 이탈직경과 연관이 있기 때문이지만 단지 이 원인만으로 임계열유속 근처에서 일정한 이탈빈도에 대한 현상 해석은 명확하지 않다. 따라서 이러한 현상을 명확히 분석하기 위해이탈주기와 대기시간의 비를 확인하였다.

Fig. 6.6은 나노입자 함유량과 크기 변화에 따른 이탈주기-대기시간 비를 보여준다. 모유체와 나노유체의 이탈주기-대기시간 비는 5K 미만의 가열도에서 이탈주기와 대기시간의 비는 0.5 이상으로 이전의 다수의 문헌에서 가정한 또는 와 유사하지만 과열도가 증가함에 따라 이탈주기-대기시간 비는 감소하는 경향을 가진다. 이는 기포의 성장시간은 기포의 이탈직경과 부력에 의해 결정되며 나노유체의 경우 젖음성 증가로 기포의 이탈직경이 커지지만 나노입자 함유량에 대한 Archimedes number는 거의 변화가 없기 때문에 기포의 성장시간은 모유체보다 길어진다. 하지만 대기시간은 가열표면과 주변 액체 사이의 표면장력과 과열도에 의해 영향을 받으며 나노유체의 물성 개선효과는 매우 미약하다. 이러한 이유로 가열도가 증가함에 따라 기포이탈주기에 대한 대기시간의 비율이 작아지며 나노유체의 함유량이 0vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 동일 가열도에서 기포의

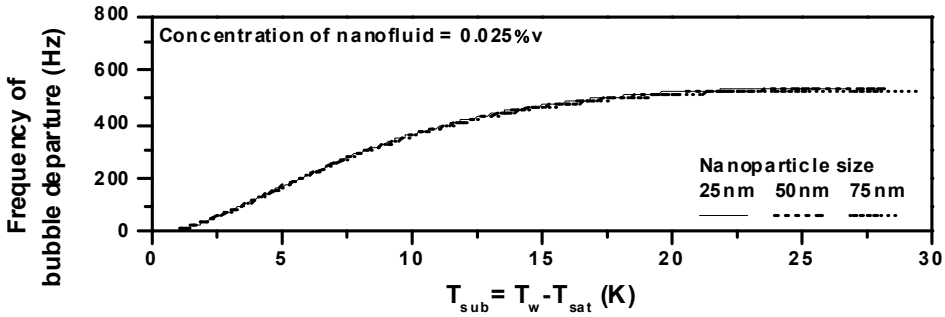
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이탈빈도는 줄어드는 반면에 나노입자의 함유량이 0.025vol% 일 때 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가함에 따른 기포의 이탈주기-대기시간 비는 거의 변화가 없다. 이는 나노입자의 크기가 25 nm가 75 nm로 변화함에 따른 기포 이탈직경의 변화가 없으며 결국 나노입자 크기가 25 nm에서 75 nm 이내의 열물성의 개선 개선효과가 작기 때문이다.



(a) Frequency of bubble departure according to concentration of nanofluid



(b) Frequency of bubble departure according to nanoparticle size

Fig. 6.5 The frequency according to volume concentration and size of nanoparticle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

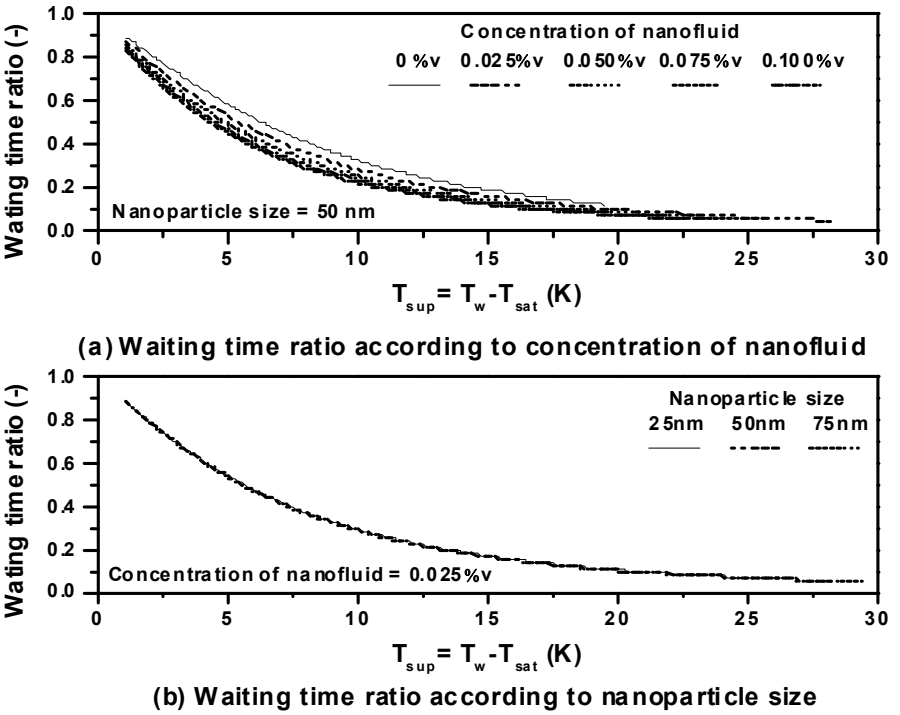


Fig. 6.6 Wait time ratio about total time according to volume concentration and size of nano particle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 절 나노유체 비등의 활성핵기공밀도

Fig. 6.7은 나노유체의 입자 함유량 및 크기 변화에 따른 대한 활성핵기공밀도를 보여준다. 활성핵기공밀도는 가열도가 증가함에 따라 증가하며 동일한 가열도에서 나노유체의 경우 모유체에 비해 활성핵기공밀도가 감소하였다. 이러한 현상은 기존의 다수의 연구에서도 동일한 경향을 보였다. 임계열유속에서 50 nm Al_2O_3 나노입자의 함유량이 0.025vol%에서 0.1vol%으로 증가함에 따라 나노유체의 활성핵기공밀도는 32.97, 31.25, 30.82, 30.53 site/cm^2 으로 모유체의 임계열유속에서의 활성핵기공밀도 인 65.90 site/cm^2 보다 낮게 나타났다. 나노입자의 함유량이 0.025vol% 일 때 나노입자의 크기가 25 nm에서 75 nm로 증가 시 활성핵기공밀도는 동일 가열도에서 활성핵기공밀도는 더 적게 생성되었으며 임계열유속에서 나노입자의 함유량이 0.025vol%일때 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가함에 따라 활성핵기공밀도는 35.59, 32.97, 31.3 site/m^2 으로 나노입자의 크기가 커짐에 따라 활성핵기공밀도가 감소함을 보였다.

Fig. 6.8은 나노입자의 함유량 및 크기에 따른 표면젖음성 및 나노입자의 크기와 표면거칠기의 상대적 파라미터의 변화를 보여준다. 표면젖음성 파라미터(Surface wettability parameter, λ) 는 비등 전/후 젖음성 변화에 대한 영향성으로의 감소는 나노입자 침전으로 생성된 나노막으로 의한 젖음성 향상을 의미한다. 나노입자의 함유량이 0.025vol% 에서 0.1vol% 으로 증가함에 따라 표면젖음성 파라미터는 증가하였고 동일한 나노입자 함유량에서 나노입자의 크기가 커짐에 따른 표면젖음성 파라미터는 미세하게 증가하였다. 이는 Al_2O_3 나노유체의 경우 나노입자의 함량이 0.025vol%, 표면거칠기가 0.1에서 비등 전/후로의 젖음성 향상이 크게 일어나며 오히려 더 많은 나노입자를 함유 시 비등 전/후로의 젖음성 향상은 약해지기 때문이다. Hegde등(2012)는 나노유체는 모유체에 비해 임계열유속이 향상되지만 임계치 이상의 나노입자가 함유시 임계열유속향상은 감소한다고 언급하였으며 본 연구의 결과와 일치한다. 나노입자의 크기와 표면거칠기에

Collection @ chosun

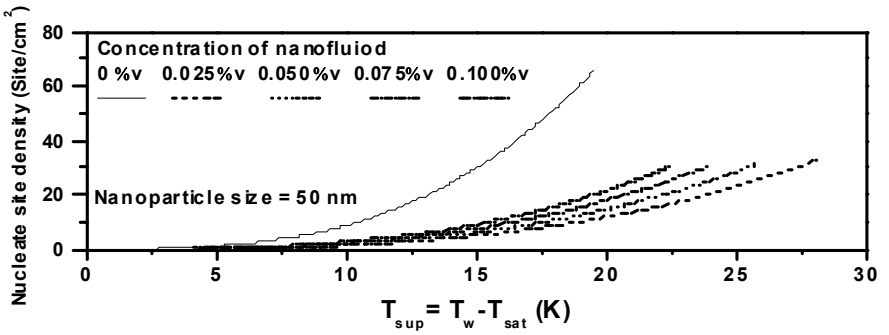
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

대한 상대적 파라미터(Relative parameter about nanoparticle size and roughness)는 가열표면에 나노입자의 침전으로 인한 가열표면의 형상 변화에 대한 영향성을 평가한 지표로 나노입자의 크기와 표면거칠기에 대한 상대적 파라미터의 감소는 나노입자 침전으로 인해 변화된 활성핵기공 생성지점의 감소를 의미한다. 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가함에 따라 나노입자의 크기와 표면거칠기에 대한 상대적 파라미터는 1.95에서 0.65로 감소하였다. 이는 나노입자의 크기가 표면거칠기인 0.1μm에 가까워짐에 따라 Fig. 6.9와 같이 침전된 나노입자가 기존의 활성핵기공 생성지점을 메꿔기포 생성을 억제시키기 때문이다. 이러한 이유로 동일한 나노입자의 함유량에서 나노입자의 크기가 표면거칠기에 가까워지면 Fig. 6.7 과 같이 활성핵기공밀도가 감소한다. 반면에 나노입자의 크기가 표면거칠기에 비해 작을 시 표면에서 활성핵기공을 메꾸는데 다량의 나노입자가 필요로 하기 때문에 활성핵기공밀도 감소 정도가 상대적으로 작아진다.

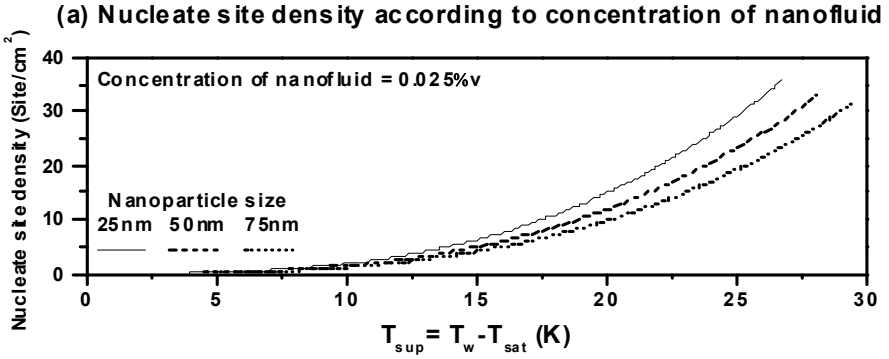
Fig. 6.9는 나노입자의 크기와 표면거칠기에 따른 가열표면에 나노입자 침전의 영향성에 대한 개략도를 보여준다. 나노입자의 침전은 가열표면에 존재하는 미세한 틈을 채우기 때문에 나노입자의 침전으로 인해 가열표면의 형상은 변한다. 나농입자 침전으로 인한 가열표면의 표면거칠기 변화의 영향성은 나노입자의 크기와 표면거칠기에 따라 다르게 나타난다. 동일한 나노유체의 체적 농도에서 나노입자의 수는 나노입자의 크기가 감소할수록 증가한다. 따라서 동일한 나노유체의 체적 농도에서 가열표면에 침전되는 나노입자의 수는 나노입자의 크기가 감소할수록 증가한다. 나노입자의 크기가 표면거칠기와 유사한 경우 비등 발생시 가열표면에 침전된 나노입자와 가열표면간의 공극은 감소한다. 반면에 나노입자의 크기와 표면거칠기의 차이가 증가하면 가열표면에 침전된 나노입자와 가열표면간의 공극이 증가하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Nucleate site density according to concentration of nanofluid



(b) Nucleate site density according to concentration of nanofluid

Fig. 6.7 Nucleate site density according to concentration of nanofluid and nanoparticle size

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

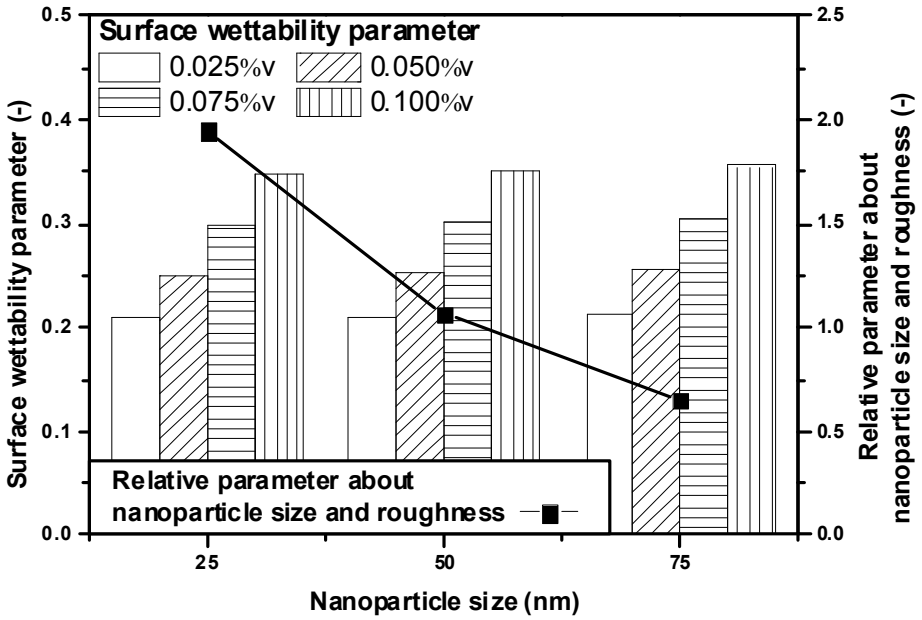
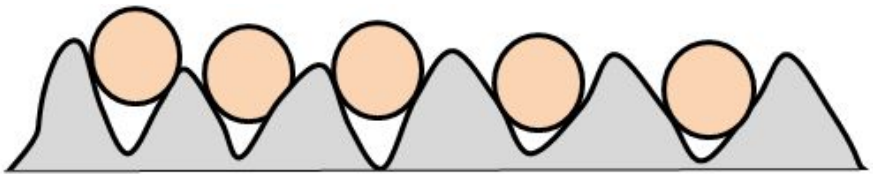


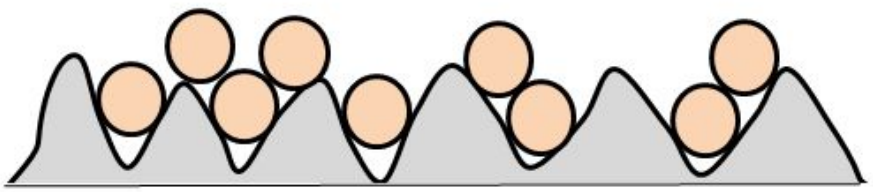
Fig. 6.8 Surface wettability parameter and relative parameter for nucleate site density of nanofluid

Collection @ chosun

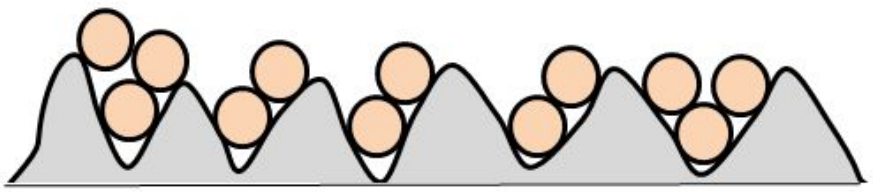
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) The heated surface with Ra=0.1 deposited 75nm – nanoparticle



(b) The heated surface with Ra=0.1 deposited 50nm – nanoparticle



(c) The heated surface with Ra=0.1 deposited 25nm – nanoparticle

Fig. 6.9 Schematic diagram for the influence of nanoparticle deposition on heated surface (a) D_{np}=75 nm, (b) D_{np}=50 nm, (c) D_{np}=25 nm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 절 나노유체 비등의 자연대류비등과 임계열유속

Fig. 6.10은 가열도에 따른 Dryout fraction와 자연대류에 의해 전달되는 열유속 분률을 보여준다. 과열도가 낮을 때 비등열전달에 있어 자연대류에 의한 열유속은 큰 비중을 차지하지만 과열도가 증가함에 따라 비등열전달에 대한 영향성은 점차적으로 감소한 반면 증발과 과도전도에 의해 전달되는 열유속의 영향성을 증가한다. 자연대류에 의해 전달되는 열유속의 영향성이 0-50% 일 때 자연대류비등이라 하면 모유체의 자연대류 비등은 과열도가 9.65K 까지 발생한다. 하지만 Al_2O_3 나노유체는 자연대류에서 핵비등으로 전환점이 지연된다. 모유체와 비교하여 자연대류에서 핵비등으로 전환점은 0.025vol%와 0.1vol%의 나노유체에서 각각 2.2℃와 7.3℃도 지연되었다. 이는 Al_2O_3 나노유체는 모유체에 비해 젖음성이 우수하여 기포이탈직경의 증가하지만 활성핵기공밀도와 기포의 이탈빈도가 감소하여 자연대류가 일어나는 면적의 감소가 천천히 이루어지기 때문이다. 또한 나노입자의 크기 변화와 농도는 비등열전달에 영향을 미친다. 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가함에 따라 자연대류비등에서 핵비등으로 전환점은 13.95K 에서 16.35K까지 증가하였으며 이는 Fig. 6.9 이 보여주듯이 나노입자의 크기가 표면거칠기에 가까워져 활성핵기공 생성지점이 메꾸어져 활성핵기공밀도가 감소했기 때문이다.

기포이탈직경은 나노입자의 크기가 25 nm 에서 75 nm로 증가함에 따라 기포이탈직경은 미소하게 증가하지만 활성핵기공밀도 증가률이 감소함으로 인해 Dryout fraction가 서서히 증가하며 이로 인하여 임계열유속 도달이 지연된다. 나노입자의 함유량의 영향성은 25 nm-0.025vol%와 25 nm-0.1vol%의 나노유체의 비교를 통해 알 수 있다. 0.025vol%의 나노유체는 초기 접촉각이 0.1vol% 나노유체보다 크지만 비등 전/후를 비교시 젖음성 개선이 가장 우수하여 기포의 이탈직경과 활성핵기공밀도은 25 nm-0.1vol% 나노유체 보다 작기 때문에 25 nm-0.025

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

vol% 나노유체가 25 nm-0.1vol% 보다 자연대류비등 구간이 증가하며 Dryout fraction의 증가률이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

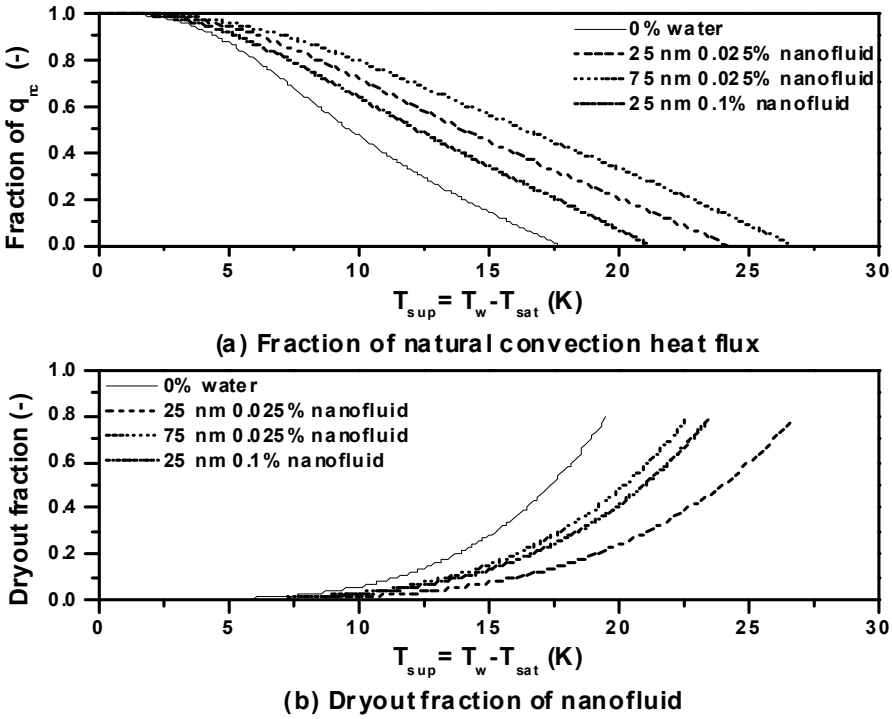


Fig. 6.10 Influence of heat flux transferred by natural convection and dryout fraction for water, 25 nm-0.025vol%, 75 nm-0.025vol% and 75 nm-0.1vol%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7 장 결 론

비등열전달은 일상생활에서 손쉽게 볼 수 있는 열전달이지만 전도, 대류 등과 같은 열전달방법에 비해 우수한 열전달 성능을 갖는다. 이로 인하여 대용량의 열이 발생하는 원자로, 화학 반응로, 전자기기 및 각종 열교환기의 열교환 방법으로 사용되고 있다. 나노유체는 물, 냉매, 부동액 등 일반적인 유체에 비해 우수한 열성능을 가짐이 보고된 이후 나노유체를 이용하여 비등열전달 성능을 향상에 대한 연구가 다수 진행되고 있으며 나노유체 비등 시 가열표면에 입자의 침전이 비등열전달 특성에 영향을 줌이 보고되었지만 나노입자의 침전에 주는 요인에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 Al_2O_3 나노유체를 이용하여 나노유체의 함유함, 표면거칠기, 나노입자의 크기에 대한 영향성에 대한 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

Al_2O_3 나노유체의 비등열전달이 Al_2O_3 나노유체의 함유량과 가열표면의 표면거칠기에 대한 영향성을 평가하기 위해 매끄러운 표면(Ra=177.5 nm)와 거친표면(292.8 nm)에서 나노유체의 함유량을 0에서 0.1vol% 까지 변화시켜 실험을 수행하였다. 매끄러운 표면에서 모유체인 물의 임계열유속과 임계열유속에 도달에 필요한 과열도는 222.3 kW/m^2 과 20.4K 으로 나타났다. 매끄러운 표면에서 Al_2O_3 나노유체의 임계열유속은 모유체인 물에 비해 향상되었지만 나노입자의 함유량에 따라 다르게 나타났다. 임계열유속과 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 나노유체의 함유량이 0.05vol% 까지 증가함에 따라 증가하였으며 나노유체의 함유량이 0.05vol%에서 임계열유속은 722.5 kW/m^2, 과열도는 37.9K 으로 가장 높게 나타났다. 나노유체 함유량이 0.05vol% 이상에서도 임계열유속 향상은 나타났지만 임계열유속 향상률은 감소하였으며 0.001vol%과 유사하게 나타났다. 이는 거친 표면에서도 동일하게 나타났다. 거친 표면의 경우 유체인 물의 임계열유속과 임계열유속에 도달에 필요한 과열도는 350 kW/m^2 와 22.6K으로 매끄러운 표면에 비해 임계열유속 향상과 임계열유속 도달에 필요한 과열도가 증가하였다. 임계열유

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

속과 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 나노유체의 함유량이 0.05vol% 까지 834.9 kW/m^2 와 58.7K 으로 증가한 반면 나노유체 함유량이 0.05vol% 초과시 임계열유속 향상률과 임계열유속 도달에 필요한 과열도는 감소하였다.

Al_2O_3 나노유체의 비등열전달계수 개선을 평가하기 위해 물과 Al_2O_3 나노유체의 임계열유속이 다르기 때문에 모유체인 물의 임계열유속의 절반지점과 각각의 나노유체의 임계열유속에서 비등열전달계수를 비교하였다. 가열표면이 매끄러운 경우 임계열유속 절반지점에서 비등열전달계수는 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%에서 각각 8.4, 8.3, 9.0, 8.1, 8.0 kW/m^2·K으로 대체적으로 나노유체 함유량이 증가함에 따라 비등열전달계수는 감소함을 보였다. 임계열유속에서 비등열전달은 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%에서 10.9, 17.4, 16.9, 19.2, 17.4 kW/m^2·K으로 나노유체의 함유량이 0에서 5×10^{-2}vol%로 증가함에 따라 전반적으로 증가한 반면 나노유체의 함유량이 5×10^{-2}vol% 초과 시 비등열전달계수는 물에 비해 높지만 감소함을 보였다. 반면에 가열표면이 거친 경우 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol%에서의 비등열전달계수는 각각 10.6, 7.5, 7.7, 7.4, 10.1 kW/m^2·K 으로 모유체에 비해 나노유체의 경우 동일한 열유속에서 낮을 열유속을 보였다. 임계열유속에서 나노유체의 함유량이 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 5×10^{-2}, 10^{-1}vol% 일 때 비등열전달계수는 각각 15.5, 14.5, 18.1, 14.2, 15.2 kW/m^2·K 로 10^{-2}vol%를 제외난 나머지 나노유체 함유량에서 비등열전달계수는 감소함을 보였다. 이를 종합해 볼 때 가열표면의 거칠기가 매끄러울 경우 전반적으로 Al_2O_3 나노유체는 비등열전달계수는 향상시키는 반면 가열표면의 거칠기가 거친 경우 비등열전달계수를 감소시키며 나노유체의 함유량 증가로 인한 비등열전달 특성 개선에 한계점이 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Al_2O_3 나노유체가 비등 시 가열표면에 Al_2O_3 나노입자의 침전이 발생으로 인한 젖음성 개선 때문이다.

기포의 성장 관찰에 의하면 매끄러운 표면과 거친 표면 둘 다 0.001vol% Al_2O_3 나노유체의 기포의 크기의 증가와 기포의 성장 및 이탈시간이 길게 나타난 반면 기포의 수는 감소함을 보였다. 매끄러운 표면에서 임계열유속의 약 30% 지점에서 기포 성장 시 물과 0.001vol% Al_2O_3 나노유체의 접촉각은 77°와 61.2°로 나타났으며

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

거친 표면에서 물과 0.001vol% Al_2O_3 나노유체의 접촉각은 54°와 48.4°로 표면거칠기가 거칠고 나노유체의 경우 접촉각이 작게 나타났다. 접촉각의 감소는 젖음성의 우수함을 나타나는 지표로 비등시 나노입자의 침전이 표면개선에 영향을 줌을 알 수 있다. 이는 비등 전/후 표면거칠기의 변화 또한 이를 뒷받침 해준다. 매끄러운 표면과 거친표면에서 나노입자의 침전이 가열표면 전역에 균일하게 발생된 경우 임계열유속 향상과 비등열전달계수 감소가 발생한 반면 가열표면에 나노입자가 불균일하게 침전된 경우 임계열유속 향상과 비등열전달계수 감소가 작게 나타났다. 특히 거친표면의 경우 나노입자의 함유량 변화에 따른 나노입자의 침전은 가열표면 전구역에 나타났지만 나노입자 침전에 의한 표면거칠기 변화는 육안으로 관찰될 만큼 차이가 크게 나타났다..

Al_2O_3 나노유체의 비등열전달에 대해 나노입자의 크기와 함유량에 영향성을 평가하기 위해 가열표면의 표면거칠기가 0.1 μm로 일정할 때 나노입자의 크기를 25 nm 50 nm, 75 nm에 대해 비등 특성에 대한 해석을 진행하였다. 50 nm-0.025vol% Al_2O_3 나노유체에서 임계열유속은 1,509 kW/m^2 으로 다른 나노유체에 비해 가장 높게 나타났지만 나노입자의 함유량은 같지만 입자의 크기가 다른 25 nm-0.025vol%와 75 nm-0.025vol% 나노유체와 큰 차이는 보이지 않았다. 이는 나노입자의 함유량의 변화는 기포의 이탈직경, 이탈주기, 활성핵기공밀도에 큰 영향을 준 반면 나노입자의 크기의 영향성은 미흡하기 때문이다. 나노유체의 활성핵기공밀도는 모유체인 물에 비해 감소하였으며 나노입자의 크기가 50 nm로 일정할 때 활성핵기공밀도는 0.025vol%로 가장 작게 나타났으며 그 이후 점차적으로 증가하였다. 이는 0.025vol%에서 젖음성 개선이 가장 우수하기 때문이다. 나노입자의 함유량이 0.025vol%으로 일정 할 때 활성핵기공밀도는 나노입자의 크기가 표면거칠기와 유사한 75 nm 에서 활성핵기공밀도는 가장 작게 나타났다. Al_2O_3 나노유체의 자연대류비등구간은 모유체에 비해 연장되었으며 Dryout fraction 또한 증가하였다. 자연대류비등구간 연장과 Dryout fraction 향상효과는 나노입자의 함유량의 증가에 따라 약화된 반면 나노입자의 크기가 표면거칠기에 가까워짐에 따라 강화되었다. 실험과 해석결과를 종합해 볼 때 Al_2O_3 나노유체 비

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

등의 특성은 가열표면의 표면거칠기, 나노입자의 함유량의 상관관계에 의해 정의가 되며 비등 시 가열표면에 생성되는 나노입자의 침전에 의한 젖음성 개선이 Al_2O_3 나노유체 비등열전달에 영향을 줌을 확인할 수 있었다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Reference

K.V. Wong, O. D. Leon, Applications of nanofluids : current and future, Hindawi Publishing Corporation Avances in Mechanical Engineering, (2010) Article ID 519659.

S.U.S. Choi, Enhancement thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME Publications, 1995, pp. 99-105.

Y. Xuan, Q. Li., Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow, 21 (2000) pp. 280-289.

J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. You, L.J. Thomspon, Thompson, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles, Applied Physics Letters 78 (6) (2001) 718-720

S.K. Das, N. Putra, W. Roetzel, Pool boiling characteristics of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transf 46 (2003) 851 - 862.

I. C. Bang, S. H.Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al2O3 -water nanofluids from a plain surface in a pool, Int. J. Heat Mass Transf 48 (2005) 2407-2419.

S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, Int. J. Heat Mass Transf, 50 (2007) 4105-4116.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

H. Ganapathy, V. Sajith, Semi-analytical model for pool boiling of nanofluids, Int. J. Heat and Mass Transf 57 (2013) 32-47.

R. A. Taylor, P. E. Phelan, Pool boiling of nanofluids : Comprehensive review of existing data and limited new data, Int. J. Heat Mass Transf 52 (2009) 5339-5347

J.Y. Jung, E. S. Kim, Y. T. Kang, Stabilizer effect on CHF and boiling heat transfer coefficient of alumina/water nanofluids, Int. J. Heat Mass Transf, 55 (2012) 1941-1946

Z. Shahmoradi, N. Etesami, M. N. Esfahany, Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, Int. J. Heat Mass Transf 47 (2013) 113-120

A. Amiri, M. Shanbedi, H. Amiri, S. ZeinaliHeris, S. N. Kazi, B. T. Chew, H. Eshghi, Pool boiling heat transfer of CNT/Water nanofluids, Appl. Therm. Eng. 71 (2014) 450-459.

N. Kurul, M.Z. Podowski, Mutidimensional effects in forced-convection sub-cooled boiling, Heat Transfer 1-7 (1990) 21-26.

Y. A. Cengel, A.J, Ghajar, Heat and mass transfer - fundamentals and application (4th Edition), McGraw Hill (2012) 575-591.

S. Nukiyama, Film boiling water on thin wires, Soc. Mech. Engng, Japan (1934) 37

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

M.H. Kim, B.J. Kim, S.L. Lee, Two-Phase Flow Heat Transfer, Daeyoungsa (1993) 297-333.

D.S. Zhu, S.Y. Wu, N. Wang., Surface tension and viscosity of aluminum oxide nanofluids. AIP Conf. Proc. 1207, 460-464.

Y. Wang, J. M. Wu, Numerical simulation on single bubble behavior during Al2O3/H2O nanofluids flow boiling using Moving Particle Simi-Implicit method, Prog. Nucl. Energy 85 (2015) 130-139

K.J. Kubiak, M.C.T. Wilson, T.G. Mathia, Ph. Carval, Wettability versus roughness of engineering surface, The 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering 271 (2011) 523-528

J. Chinnam, D. Das, R. Vajjha, J. Satti, Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation, Int. J. Heat Mass Transf 62 (2015) 1-12

C.Y. Han, P. Griffith, The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling - I and II, Int. J. Heat Mass Transfer 8 (1965) 887-914.

F. D. Moore, R. B. Mesler, The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water, AIChE J. 7 (1961) 620-624.

N. Zuber, Nucleate boiling: The region of isotatedbubles and the similarity with natural convection, Int. J. Heat Mass Transf 6 (1963) 53-78.

S. G. Kandlikar, A theorical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation, SME J. Heat Transf 123 (6) (2001)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1071-1079.

J. Bi, K. Vafai, D.M. Christopher, Heat transfer characteristics and CHF prediction in nanofluid boiling, Int. J. Heat Mass Transf 80 (2015) 256-265.

W. Fritz, Maximum volume of vapor bubbles, Phys. Z. 36 (1935) 379-384.

K. Stephan, Heat Transfer in Condensation and Boiling, Springer, New York, 1992

M.K. Jensen, G.J. Memmel, Evaluation of bubble departure diameter correlation, in : Proc. Eighth Int. Heat Transfer Conf., vol. 4, 1986, pp. 1907-1912.

H.T. Phan, N. Cabeny, P. Marty, S. Colasson, J. Gavillet, Surface wettability control by nanocoating : the effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism, Int. J. Heat Mass Transf 52 (2009) 5459-5471.

Y.Y. Li, Z.H. Liu, C.S. Wang, A predictive model of nucleate pool boiling on heated hydrophilic surfaces, Int. J. Heat Mass Transf, 65 (2013) 789-797

R. J. Benjamin, A. R. Balakrishnan, Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxs, Int. J. Heat Mass Transf 37 (1996), 2495-2504.

C.H. Wang, V.K. Dhir, Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface, J. Heat Transf 115 (1993) 659-669.

W.M. Rohsenow, A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Boiling of Liquids, ASME Transactions 74 (1952) 969-975

N. Zuber, Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer, USAEC Report AECU-4439 (1959)

R.N. Hegde, D.S.S. Rao, R.P. Reddy Investigations on Heat Transfer Enhancement in Pol Boiling with Water-CuO Nano-fuids, J. Thermal Science, 21 (2) (2012) 179-183

C. Geradi, Investigations of the pool boiling heat transfer enhancement of nano-engineered fluids by means of high-speed infrared thermography, PH.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.

G. Harish, V. Emlin, V. Sajith, Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids, Int. J. Thermal Science, 50 (2011) 2318-2327

Collection @ chosun