

# 유동 비등 시스템에서 산화 그래핀 나노유체의 열전달 및 파울링에 대한 연구

## Study on Heat Transfer and Fouling of Flow Boiling Systems using Oxidized Graphene Nanofluid

김우중\* · 김남진\*\*†

Kim Woo-Joong\* and Kim Nam-Jin\*\*†

(Received 14 April 2016; accepted 20 May 2016)

**Abstract :** The nanofluids are the fluids with excellent thermal property, it is expected as a working fluid of the next generation. The nanofluids are well known that if it is used in the boiling heat transfer system, the critical heat flux is enhanced up to 200%, and the thermal conductivity is increased up to from 10 to 160%. However, the fouling phenomenon can be occurred that nanoparticles of nanofluids are deposited on the heat transfer surface. Therefore, to investigate relation between nanofluid and fouling, this study is carried out using oxidized graphene nanofluid. Also it compared and analyzed the critical heat flux and the boiling heat transfer coefficient. As the result, in case of oxidized graphene deposition for fouling, the critical heat flux is increased up to 20% more than oxidized graphene nanofluid. However, the boiling heat transfer coefficient is decreased down to about 6 kW/m<sup>2</sup>K at 1,000kW/m<sup>2</sup> more than pure water.

**Key Words :** 그래핀(Graphene), 임계 열유속(Critical heat flux), 열전달 계수(Heat transfer coefficient), 유동 비등(Flow boiling), 파울링(Fouling), 나노유체(Nanofluid)

### 1. 서 론

나노유체는 나노크기의 입자를 유체에 골고루 분산시킨 우수한 열적 특성을 갖는 유체를

말한다. 태양열, 지열, 해수온도차를 이용하는 각종 발전 시스템, 냉방 및 냉동 시스템과 같은 비등 열전달 시스템의 작동유체를 나노유체로 사용한다면 임계 열유속은 최대 200%증가하며,

\*\*† 김남진(교신저자) : 제주대학교 에너지공학과  
E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3643  
\*김우중 : 제주국제대학교 산학협력단

\*\*† Kim Nam-Jin(corresponding author) : Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University.  
E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3643  
\*Kim Woo-Joong : Industry-Academic Cooperation Foundation, Jeju International University.

열전도율은 10~160% 증가시킨다고 보고되었다.<sup>1)2)3)4)</sup> 임계 열유속의 증가는 시스템의 열전달 최대 한계점 및 안전성을 향상시킬 수 있으며, 열전도율 증가는 열효율을 높일 수 있는 장점이 생긴다. 이처럼 우수한 열적 특성을 갖는 나노유체는 차세대 작동유체로 각광받고 있다.

따라서 나노유체를 작동유체로 사용한 유동 비등에 대한 연구가 지속적으로 보고되고 있다. Ahn et al.은 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 나노유체를 이용하여 풀 비등, 유동 비등에서 구리 판 히터의 임계 열유속을 측정하였으며, 히터 표면에 나노입자가 증착되어 임계 열유속이 향상되었다고 보고하였다.<sup>5)</sup> Peng et al.은 산화구리( $CuO$ ) 나노입자와 R-113을 분산시켜 나노유체를 제조하였으며, 구리 판 내 유동 비등의 비등 열전달 계수가 30%까지 증가함을 보고하였다.<sup>6)</sup> 또한 Lee and Mudawar는 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 나노유체를 사용하여 마이크로채널의 냉각 운전에서 단일상 층류의 임계 열유속이 상승한다고 보고하였으며, 이상 유동일 경우 나노입자가 수로 끝에서 뭉치는 현상이 있음을 보고하였다.<sup>7)</sup>

이와 같이 나노유체는 우수한 열적특성을 가지고 있지만, 실제 열전달 시스템에 적용 할 경우 나노입자들이 열전달 표면에 침착되는 나노 파울링(Fouling) 현상이 발생할 수 있다. 이는 나노유체 적용 시 최대 문제점으로 알려져 있으며, 이와 같은 나노 파울링이 열전달 시스템의 열효율과 안전성에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하다.

따라서 본 연구에서는 비등 열전달 시스템에 나노유체를 적용할 경우 열교환기 표면에 나노입자가 침착되는 파울링과 열전달 성능을 파악하기 위해서 열전달 시편 표면에 인공 나노 파울링 상태를 만들어 산화처리된 그래핀 나노유체 0.5~1.5 m/s의 유동 조건에서 파울링에 따른 임계 열유속 및 비등 열전달 계수를 비교분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 그래핀 나노유체

본 연구에서는 그래핀(Graphene, M-15, XG sciences Co.)에 화학적 개질에 의한 분산법으로 산화처리된 그래핀(Oxidized Graphene)를 제조하였다. 본 연구에서 사용한 나노유체는 산화처리된 그래핀 나노입자와 증류수를 이용하여 0.01 vol%의 농도로 제조하였으며, 나노유체의 분산 안정성 확보를 위해 기계적 분산법 중 하나인 초음파 분산을 이용하여 나노유체를 제조하였다. 초음파 분산은 준비된 나노유체에 500 W급 초음파 분산기(VC-505, Young-Jin Co.)를 이용하여 2시간 동안 초음파 분산하였다. 또한, 본 연구에서 사용한 산화처리된 그래핀 나노입자는 Fig. 1과 같고, 물성치는 Table 1과 같이 나타내었다.

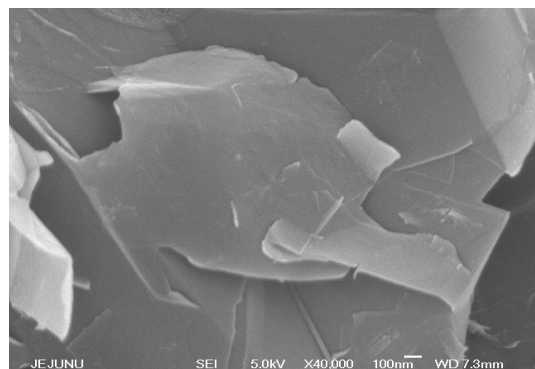


Fig. 1 SEM micrographs of oxidized graphene nanofluid.

Table. 1 The properties of Graphene.

Properties	Graphene
Diameter(nm)	15
Thickness(nm)	6~8
Purity(wt.%)	99.5
Bulk Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.03~0.1
True density(g/cm <sup>3</sup> )	2.2
Thermal Conductivity(W/m·K)	3,000
Surface Area(m <sup>2</sup> /g)	120~150

### 2.2 유동 비등 열전달 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서는 사용된 유동 비등 열전달 실험장치의 개략도로 크게 반응용기, 히터, 질량유량계, 마그네틱 펌프, 데이터 로거로 구성되었다. 알루미늄 합금으로 구성된 반응용기 상단에 2개의 온도센서, 1개의 압력센서, 2개의 환류냉각기, 2개의 폴리카보네이트(PC)창으로 구성되어 있다. 환류냉각기는 저온순환환온수조 (RW-3025G, Jeio-tech)와 연결되어 반응용기 내에서 증발된 증기를 냉각하며, 반응용기 내부의 온도와 압력을 측정하기 위하여 2개의 K-type 온도 센서(Tctech Co.)와 1개의 압력센서(PSCD0002BCPG-HSA, Sensys Co.)를 설치하였다. 또한 열전달 표면 및 기포 발생을 확인하기 위하여 2개의 폴리 카보네이트창을 구성하였다. 히터는 99.9%의 무산소동 재질에 8개의 500 W급 카트리지 히터가 삽입되어 있으며, 2,000 W급 직류전원공급장치 2대에 연결하였다. 또한, 1,200°C까지 사용가능한 세라믹 단열재를 알루미늄용기 사이에 삽입하여 히터에서의 열손실을 막았다. 본 연구의 유동조건을 위하여 마그네틱 펌프 (20JMTF-11CB, JoongWon SMET Co.)를 인버터(SV008iG5A-2, LSIS Co.)와 연결하였으며, 질량유량계(F025S113CCAZEZZZZ, Micro Motion Inc.)를 통하여 유동조건을 확인하였다. 또한, 유동 비등 실험 시 모니터링 및 데이터 저장을 위하여 컴퓨터와 데이터로거(34970a, Agilent)를 설치하였으며, 데이터 수집은 Labview 프로그램을 가지고 자체 제작하여 사용하였다.

또한, 열전달 표면의 인공 파울링을 조성하

기 위하여 제조된 나노유체를 분사증착과 건조 과정을 반복하여 인공 파울링 조성을 위한 인위적 나노코팅을 수행하였다. 파울링을 위한 나노코팅은 산화처리된 그래핀을 열전달 표면에 180초 동안 분사증착 코팅으로 수행하였으며, 분사증착 코팅은 0.3 mm 노즐에서 압축 공기를 이용해 일정하게 분사시키는 중력식 에어분사기(HP-CP, IwataCo.)를 일정한 높이에서 시편 표면에 분사하였다. 분사 후에는 시편을 100°C로 유지하는 건조기(WOF-155, Wiseven)에서 건조시켜 나노입자를 증착시켰다.

### 2.3 유동 비등 열전달 실험 방법

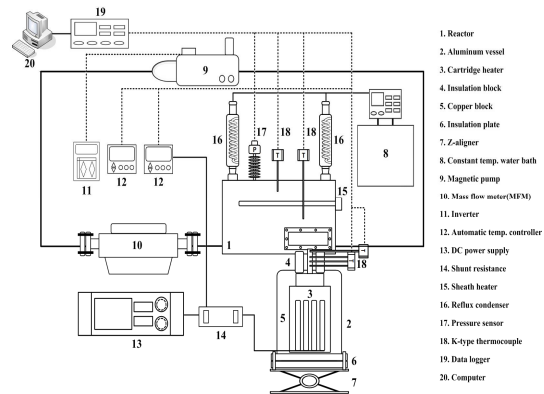


Fig. 2 Schematic diagram of flow boiling CHF experimental apparatus.

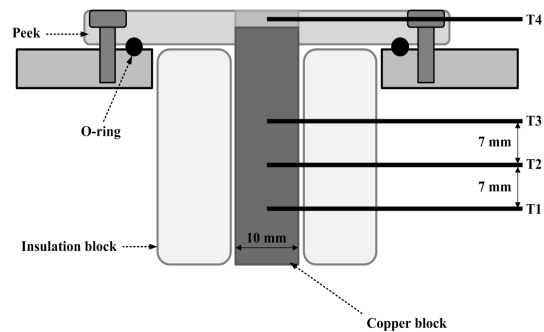


Fig. 3 Schematic diagram of flow boiling CHF experimental specimen.

반응용기내에 유체를 채운 후 완전 밀폐형으로 조립한 후 반응용기 상단에 환류냉각기, 온도센서, 압력센서를 연결하고, 마그네틱 펌프와 질량유량계를 이용하여 유체의 실험 속도로 조절한 뒤 반응용기 내부의 유체를 실험 온도로 상승시켰다. 유체의 온도가 실험온도인 100℃가 되었을 때, 직류전원공급기를 이용하여 히터에 전력을 공급하여 열유속을 발생시켰다. 임계 열유속이 발생하면 실험을 종료하여 반응용기를 분리한 후 깨끗이 세척하였다.

본 연구에서 임계 열유속은 푸리에의 법칙으로 잘 알려진 1차원 정상상태 열전도방정식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$q'' = k \frac{\Delta T}{L} = k \frac{T_2 - T_3}{L} \quad (1)$$

여기서,  $q''$ ,  $k$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $L$ 은 각각 열유속 ( $\text{kW/m}^2$ ), 열전도율 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ), 히터에 삽입된 온도센서에서 측정된 온도( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$ 와  $T_3$ 사이의 거리(m) 이다.

또한 식 (2)를 이용하여 열전달 표면의 과열도를 계산하였다.

$$T_{wall} - T_{sat} = \left( T_4 - \frac{q''}{k} d \right) - T_{sat} \quad (2)$$

여기서,  $T_{wall}$ ,  $T_{sat}$ ,  $T_4$ ,  $d$ 는 각각 지르코늄의 표면온도( $^{\circ}\text{C}$ ), 유체의 포화온도( $^{\circ}\text{C}$ ), 지르코늄에 삽입된 온도센서에서 측정된 온도( $^{\circ}\text{C}$ ), 지르코늄 표면과 온도센서 사이의 거리(m) 이다.

또한, 대류 열전달 방정식 (3)을 이용하여 비등 열전달 계수를 수행하였다. 식 (4)를 통하여 실험 시편 표면에서의 열전달 계수를 구하였다.

$$q'' = h(T_{wall} - T_{sat}) \quad (3)$$

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{sat})} \quad (4)$$

## 2.4 불확실성 해석

본 연구에서는 실험에서 발생하는 불확실성에 대한 해석을 수행하기 위해서 아래와 같은 Kline and McClintock의 오차 전파 방법을 사용하였다.

$$q'' = q''(T_2 - T_3, L) \quad (5)$$

$$T_{wall} - T_{sat} = T_{wall} - T_{sat}(T_4 - T_{sat}, q'', d) \quad (6)$$

$$h = h(q'', T_{wall} - T_{sat}) \quad (7)$$

식 (5)에서 열유속에 대한 인자는 히터에 삽입된 온도센서  $T_2$ 와  $T_3$ 에서 측정된 온도차,  $T_2$ 와  $T_3$  온도센서 사이의 거리, 식 (6)에서 과열도에 대한 인자는 실험 시편인 지르코늄에 삽입된 온도센서  $T_4$ 와 포화온도  $T_{sat}$ 의 온도차, 열유속, 온도센서  $T_4$ 와 지르코늄 표면까지의 거리, 식 (7)은 비등 열전달 계수에 대한 인자는 열유속과 과열도임을 알 수 있다.<sup>8)</sup> 식 (5), (6), (7)에서 나타난 인자들을 이용하여 열유속과 열전달 계수에 대한 불확실성 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left( \frac{U_{T_2 - T_3}}{T_2 - T_3} \right)^2 + \left( \frac{U_L}{L} \right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{U_{T_{wall} - T_{sat}}}{T_{wall} - T_{sat}} = \sqrt{\left( \frac{U_{T_4 - T_{sat}}}{T_4 - T_{sat}} \right)^2 + \left( \frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left( \frac{U_d}{d} \right)^2} \quad (9)$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall}-T_{sat}}}{T_{wall}-T_{sat}}\right)^2} \quad (10)$$

여기서,  $U_{q''}$ ,  $U_h$ ,  $U_{T_2-T_3}$ ,  $U_L$ ,  $U_{T_{wall}-T_{sat}}$ ,  $U_{T_4-T_{sat}}$ ,  $U_{q''}$ ,  $U_d$ ,  $U_{T_{sat}}$  는 각각 임계 열유속, 비등 열전달 계수,  $T_2$ ,  $T_3$ 의 온도센서에서 측정온도차, 온도센서 사이의 거리, 과열도,  $T_4$ 와 유체의 포화온도  $T_{sat}$ 의 온도차, 열유속, 온도센서  $T_4$ 와 지르코늄 표면까지의 거리에 대한 불확실성을 나타내었다. 위 식으로부터 계산된 열유속과 과열도의 불확실성은 열유속 100 kW/m<sup>2</sup>에서 각각 10.63%, 15.04%이며, 열유속 1,100 kW/m<sup>2</sup>에서는 각각 2.44%, 2.45% 임을 확인하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 신뢰성 평가

본 연구의 실험장치에 대한 신뢰성과 재현성을 확인하기 위하여 순수 물을 이용한 임계 열유속 실험을 수행하였다. 단일유체 풀 비등 임계 열유속 예측식에서 Zuber가 제시한 식 (11)을 이용하였으며, 풀 비등에서의 순수 물에서 측정된 임계 열유속 실험 데이터와 비교하였다.<sup>9)</sup>

$$q''_{CHF,Zuber} = 0.131h_{fg}\rho_g^{0.5}[\sigma g(\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \quad (11)$$

여기서,  $h_{fg}$ ,  $\rho_g$ ,  $\rho_f$ ,  $\sigma$ ,  $g$  는 각각 증발잠열 (kJ/kg), 기체밀도(kg/m<sup>3</sup>), 액체밀도(kg/m<sup>3</sup>), 표면장력(N/m), 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)이다.

또한, 균일한 평면히터의 평행흐름에서 유동 비등 임계 열유속 예측식은 Katto and Kurata의 식 (12)를 이용하여 0.5 m/s~1.5 m/s까지의 순수 물의 유동 비등 임계 열유속 실험 데이터와 비교하였다.<sup>10)</sup>

$$q''_{CHF} = 0.186\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{0.559}\left(\frac{\sigma\rho_f}{G^2l}\right)^{0.264}GH_{fg} \quad (12)$$

여기서,  $G$ ,  $l$  은 각각 질량유속(kg/s · m<sup>2</sup>), 히터길이(m)이다.

Fig. 4은 Zuber의 예측식, Katto and Kurata의 예측식을 비교하여 나타낸 그래프이다. 본 실험에서 측정된 순수 물의 풀 비등 임계 열유속은 각각 1,050, 1,130, 1,160 kW/m<sup>2</sup>이며, Zuber의 예측식의 임계 열유속은 1,106.28 kW/m<sup>2</sup>으로 측정된 3번의 실험결과는 Zuber의 예측식과 5.08% 이내로 거의 일치함을 확인하였다. 또한 본 실험에서 측정된 0.5, 1, 1.5 m/s에서의 유동 비등 임계 열유속이 각각 1,216, 1,553, 1,982 kW/m<sup>2</sup>로 Katto and Kurata의 예측식과 약 8.5 %이내의 오차로 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 실험장치의 높은 신뢰성과 재현성을 확인할 수 있었다.

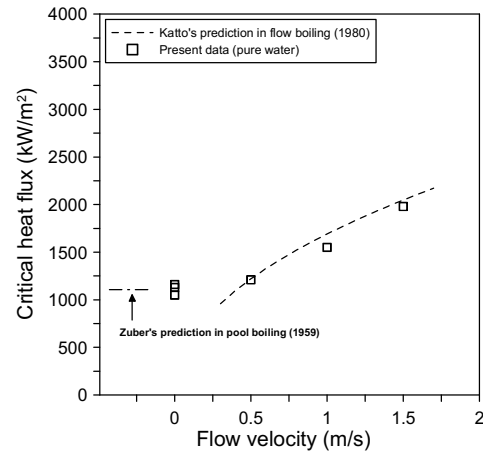


Fig. 4 CHF comparison of purewater.

#### 3.2 임계 열유속

Fig. 5는 코팅이 되지 않은 열전달 시편이 0.01 vol%의 산화처리된 그래핀 나노유체에서 유속에 따른 임계 열유속 비등곡선을 나타

낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 산화처리된 그래핀 나노유체의 임계 열유속은 유속이 증가할수록 증가함을 확인할 수 있다. 산화처리된 그래핀 나노유체의 유속 0.5, 1, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 각각 1,582, 1,888 kW/m<sup>2</sup>, 2,415 kW/m<sup>2</sup>이며, 0 m/s의 임계 열유속 1,452 kW/m<sup>2</sup>, 보다 각각 8.95, 30.02, 66.32% 증가됨을 확인하였다. 또한 열전달 표면온도와 유체의 포화온도의 차이인 과열도 역시 이와 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

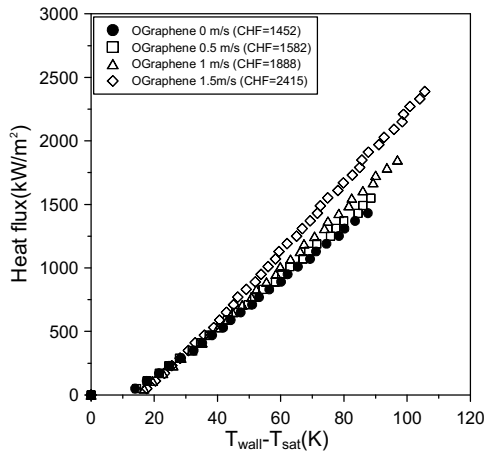


Fig. 5 CHF of oxidized graphene nanofluids.

Fig. 6은 180초 동안 분산코팅된 열전달 시편이 산화 그래핀 나노입자 코팅 상태에서 0.01 vol%의 산화처리된 그래핀 나노유체의 유속에 따른 임계 열유속 비등 곡선을 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 산화처리된 그래핀 나노유체의 임계 열유속이 코팅 상태에서 유속이 증가할수록 크게 증가함을 확인하였다. 산화처리된 그래핀 나노입자 코팅 상태에서의 유속 0.5, 1, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 각각 1,864, 2,311, 2,598 kW/m<sup>2</sup>이며, 0 m/s의 임계 열유속 1,756 kW/m<sup>2</sup>보다 각각

6.15, 31.60, 47.94% 증가함을 확인하였다. 따라서 나노입자 침착 상태에서 유속에 따른 임계 열유속은 나노입자를 침착하지 않았을 때 보다 증가됨을 확인하였다. Lee et al.은 0.01 vol%의 산화 그래핀 나노유체를 사용하여 저압저유동 조건에서 유동 비등 임계 열유속을 측정하였으며, 임계 열유속은 최대 100%까지 증가한다고 보고하였다.<sup>11)</sup> 이는 본 실험의 데이터와 유사하여 비슷한 경향을 나타내는 것으로 확인하였다.

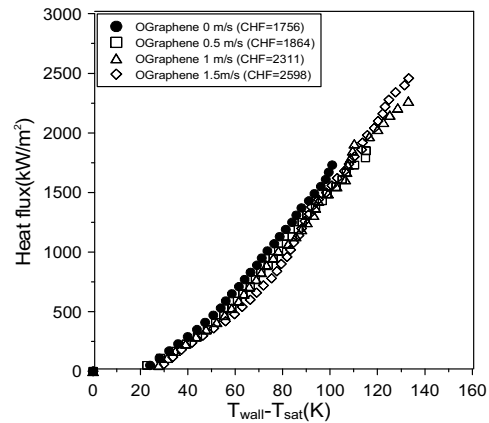


Fig. 6 CHF of nanoparticle deposition for fouling in oxidized graphene nanofluids.

Fig. 7은 코팅이 되지 않은 열전달 시편이 순수 물에서 측정된 임계 열유속과 산화 그래핀 나노입자 코팅 상태의 열전달 시편에서 측정된 임계 열유속을 유속에 따라 나타내었으며, Fig. 8은 임계 열유속 증가율을 나타내었다. 순수 나노유체보다 산화처리된 그래핀 나노입자 코팅 상태에서의 유속에 따른 임계 열유속이 매우 향상됨을 확인하였다. 특히, 파울링을 위한 나노입자 코팅 상태의 경우 산화처리된 그래핀 나노유체의 임계 열유속 상승률보다 평균 21.44% 높게 증가한 것으로 확인되었다. 또한 나노유체를 사용한 조건과 같이 임계 열

유속이 증가함에 따라 과열도 역시 상당히 증가함에 따라 열전달 시스템의 물리적 손상을 일으킬 수 있음을 확인하였다.

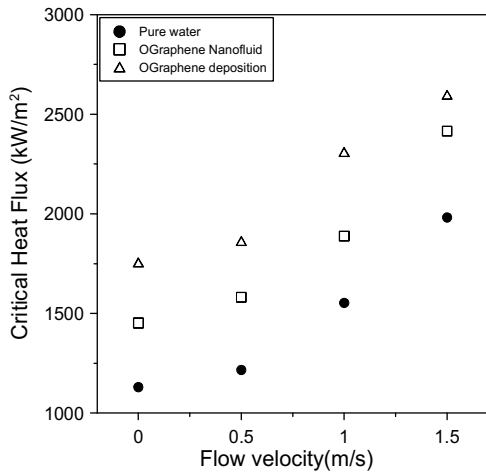


Fig. 7 CHF comparison of 3 cases(pure water, nanofluid, and nano fouling).

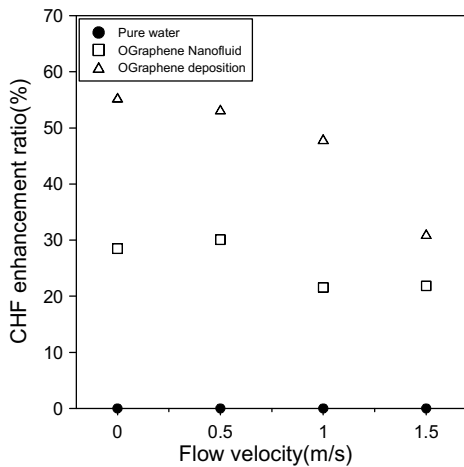


Fig. 8 CHF enhancement ratio comparison of 3 cases(pure water, nanofluid and nano fouling).

### 3.3 비등 열전달 계수

비등 열전달 계수는 열유속이 1,000 kW/m<sup>2</sup>을 기준으로 비교하였으며, 순수 물, 산화처리된 그래핀 나노유체, 분사코팅 상태에서 산화

처리된 그래핀 나노유체로 정리하였다.

Fig. 9는 코팅이 되지 않은 열전달 시편이 순수 물에서 열유속이 1,000 kW/m<sup>2</sup>까지 유속에 따른 비등 열전달 계수를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순수 물에서 유속이 증가할수록 열전달 계수가 증가하였으며, 측정된 열전달 계수는 0, 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 각각 14.45, 14.93, 16.21, 18.89 kW/m<sup>2</sup> · K로 나타났으며, 0 m/s보다 각각 3.32, 12.18, 30.73% 증가함을 확인하였다.

Fig. 10은 열유속이 1,000 kW/m<sup>2</sup>될 때까지 코팅이 되지 않은 열전달 시편이 0.01 vol%의 산화 그래핀 나노유체 속에서 유속에 따른 비등 열전달 계수를 나타내었다. 0, 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 15.46, 16.08, 16.83, 18.02 kW/m<sup>2</sup> · K로 나타났으며, 0 m/s보다 각각 4.01, 8.86, 16.56% 증가하였다.

Fig. 11은 열유속이 1,000 kW/m<sup>2</sup>까지 180초 동안 분사코팅된 열전달 시편이 0.01 vol%의 산화처리된 그래핀 나노유체 속에서 유속에 따른 비등 열전달 계수를 나타내었다. 측정된 열전달 계수는 0, 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 13.71, 12.96, 12.77, 12.05 kW/m<sup>2</sup> · K로 나타났으며, 열전달 계수 증가율은 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 0 m/s보다 각각 -5.47, -7.12, -12.11%로 감소함을 확인되었다.

Fig. 12는 순수 물, 산화처리된 그래핀 나노유체, 파울링을 위한 나노입자 코팅 상태에서 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달 계수를 비교하여 나타내었다. 산화처리된 그래핀 나노유체는 순수 물의 비등 열전달 계수보다 약간 증가하였으나, 나노입자 코팅 상태의 나노유체 비등 열전달 계수는 순수 물보다 감소하는 모습을 확인할 수 있다. Henderson et al.은 SiO<sub>2</sub>/R-134a 나노유체를 유동 조건에서 사용 시 비등 열전달 계수가 감소한다고

보고하였으며, 나노유체의 나노입자가 안정된 분산성을 얻기 힘들기 때문에 감소한다고 보고하였다. 이는 Sarafraz et al.이 보고한 내용과 같이 나노입자의 분산이 일정하지 않으면, 나노입자가 중력에 의해 열전달 표면으로 침착되어 파울링의 원인이 될 수 있으며, 파울링 현상으로 인한 비등 열전달 계수가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 비등 열전달 계수가 감소하는 다른 이유는 나노유체와 나노입자가

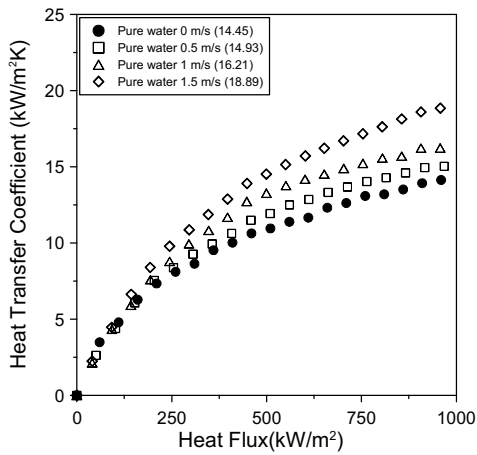


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient of purewater.

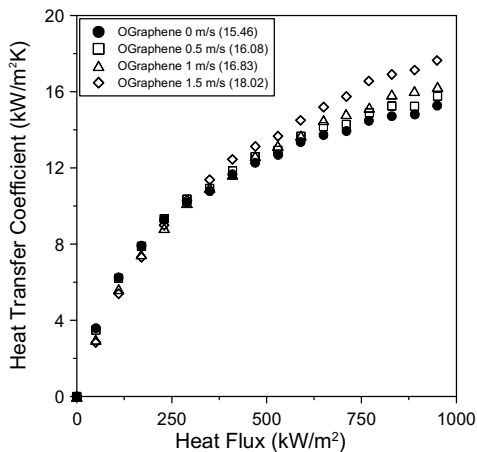


Fig. 10 Boiling heat transfer coefficient of oxidized graphene nanofluid.

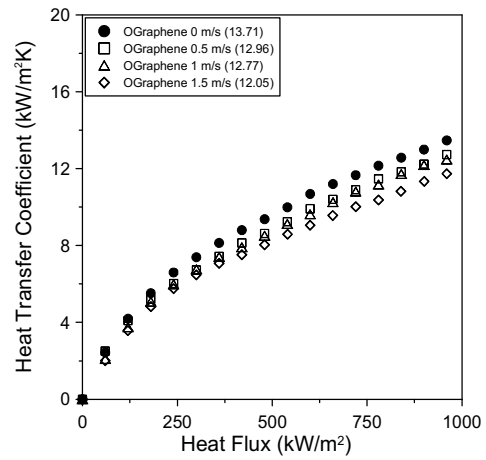


Fig. 11 Boiling heat transfer coefficient of nano fouling in nanofluids.

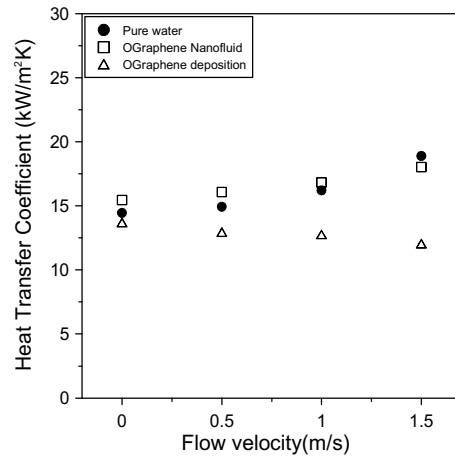


Fig. 12 Boiling heat transfer coefficient comparison of 3 cases (purewater, nanofluid, nano fouling).

증착된 열전달 표면 사이의 열전달이 일정하지 못한 원인인 것으로 사료된다. 마지막으로 실험 시편 표면에서의 활성 핵 기공의 감소로 인한 기포 생성을 감소시켜 비등 열전달 계수가 감소한 것으로도 판단된다. 비등 열전달 계수 감소에는 여러 원인이 있지만 정확한 원인을 분석하기 위해서는 차후 연구가 필요할 것으로 사료된다.<sup>12)13)14)</sup>



### 3.4 실험 후 표면변화

본 연구에서는 나노 파울링 상태에서 산화 그래핀 나노유체의 유동 비등 임계 열유속 측정 실험 후 실험 시편 표면을 관찰하였다.

Fig. 13은 파울링을 위한 산화처리된 그래핀 나노입자 코팅 상태의 유동 비등 열전달 실험 종료 후 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 실험 시편 표면을 측정된 사진을 나타내었다. 나노입자 코팅 상태에서 나노유체의 유속이 증가할수록 실험 시편 표면에 그래핀 나노입자가 파울링 현상과 유사하게 증착됨을 확인하였다.

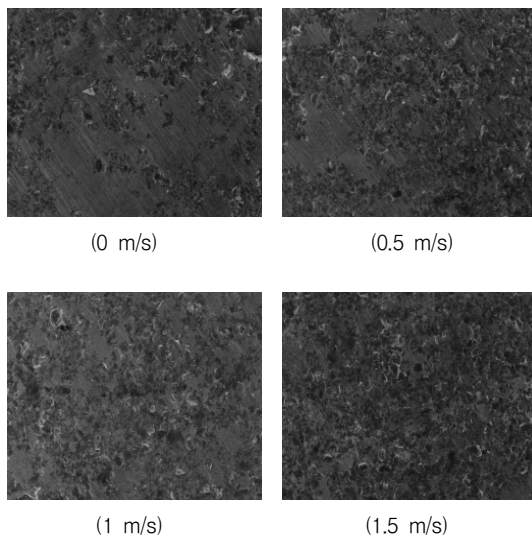


Fig. 13 SEM micrographs of nano fouling in nanofluid.

Fig. 14는 파울링을 위한 산화처리된 그래핀 나노입자 코팅 상태의 유동 비등 열전달 실험 종료 후 실험 시편 표면의 접촉각의 변화를 나타내었다. 임계 열유속 발생 후 실험 시편 표면 접촉각이 실험 전 49.4°에서 실험 후 13.3°, 11.8°, 10.3°, 7.5°로 측정되었으며, 유속이 증가할수록 접촉각은 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 열전달 시편 표면에서 나노입

자의 침착은 유속이 증가함에 따라 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 Ahn et al.과 Lee et al. 등이 보고한 열전달 시편 표면의 접촉각 실험결과와 일치하였으며, 유동 비등 열전달에서 나노입자 침착과 유속의 증가는 열전달 표면의 다공성 효과로 접촉각이 감소함을 의미하며, 이 이유는 나노입자의 침착현상이 상당한 영향을 주는 것으로 판단하였다.<sup>5)15)</sup>

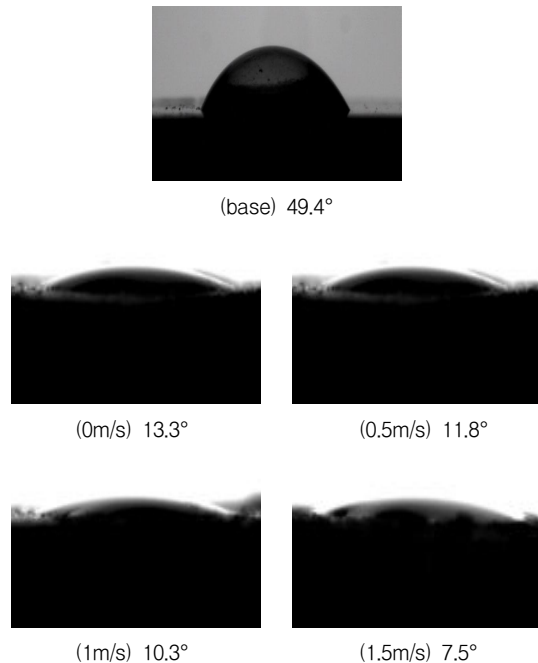


Fig. 14 Change of contact angle.

Fig. 15는 파울링을 위한 산화처리된 그래핀 나노입자 코팅 상태의 유동 비등 열전달 실험 종료 후 실험 시편 표면의 3D 사진을 나타내었다. 이 장치를 이용하여 실험 종료 후 열전달 시편의 표면 거칠기를 측정된 결과 0, 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 각각 0.206, 0.178, 0.165, 0.138  $\mu\text{m}$ 으로 측정되었다. 따라서 임계 열유속 발생 후 실험 시편의 표면 거칠기는 유속

이 증가할수록 감소하고 있음을 확인할 수 있다. Ahn et al.은  $Al_2O_3$  나노유체를 사용한 유동 비등 열전달 실험종료 후 표면 거칠기를 측정된 결과, 유속이 증가할수록 표면 거칠기는 감소하였으며, 이는 본 연구의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 유속이 증가할수록 표면 거칠기가 감소하는 원인은 M.M. Awad가 게재한 내용을 참고하면, 유동에 의해 기존에 침착된 표면에서 떨어져나가는 나노입자와 표면 틈 사이로 새로 침착되는 나노입자의 영향으로 표면 거칠기가 감소하는 것으로 판단된다.<sup>5)16)</sup>

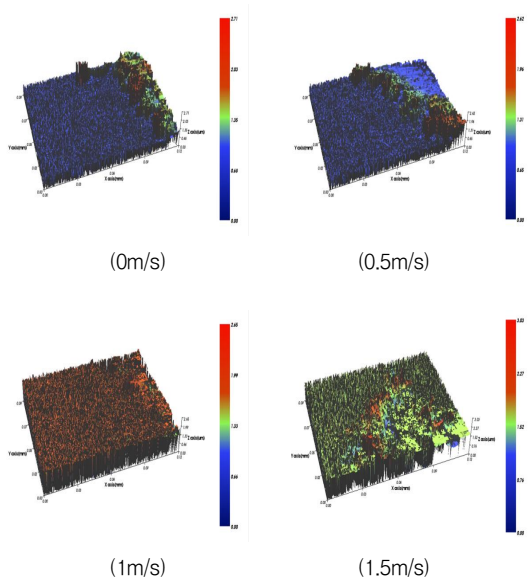


Fig. 15 3D photograph of specimen surface.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유동 비등 열전달에서의 산화 그래핀 나노유체의 파울링 특성을 알아보기 위하여 임계 열유속과 비등 열전달 계수를 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 산화처리된 그래핀 나노유체 및 파울링 조건을 위한 나노입자 분사코팅 상태에서 의 유동 비등 열전달 임계 열유속 실험을 수행한 결과, 유속이 증가함에 따라 임계 열유속과 과열도가 증가하였다. 또한 파울링 상태가 나노유체를 사용하였을 때보다 임계 열유속이 약 20% 높게 측정이 되었으며, 과열도 역시 상당히 증가함을 나타내었다. 이는 나노유체가 갖는 열적 특성을 잘 나타낸 것으로 판단된다.
- (2) 유속에 따른 임계 열유속 증가율을 비교하면, 산화처리된 그래핀 나노유체의 임계 열유속은 순수 물보다 최대 30.1%, 파울링 상태에서 산화처리된 그래핀 나노유체 임계 열유속은 순수 물보다 최대 55.4% 증가함을 확인하였다.
- (3) 열유속  $1,000 \text{ kW/m}^2$ 에서 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달 계수는 순수 물의 비등 열전달 계수보다 약간 증가하였으나, 파울링 상태의 비등 열전달 계수는 순수 물의 비등 열전달 계수에 비하여 최대 약  $6 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$  감소함을 확인하였다. 이는 나노유체에서 분산된 나노입자가 분산성을 잃어 중력에 의해 열전달 표면으로 침착되어 파울링의 형성, 또는 나노입자가 증착된 열전달 표면과 나노유체의 열전달 패턴이 불규칙하게 되어 비등 열전달 계수가 감소한 것으로 판단된다. 또한 활성 핵 기공 감소 효과와 유동조건에 의해 기포 생성을 방해하여 비등 열전달 계수가 감소한 것으로 사료된다. 추후에 비등 열전달 계수 감소의 원인에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (4) 실험 종료 후 실험 시편의 표면 변화를 확인하기 위하여 표면 접촉각, 거칠기를 측정된 결과, 접촉각은 나노 파울링 상태에

서 유속이 증가할수록 파울링으로 인한 다공성 효과로 접촉각이 감소하여 열전달 시편 표면에 나노입자의 침착이 증가함을 확인하였다. 또한 실험 시편의 표면 거칠기를 측정된 결과, 유속이 증가할수록 유동으로 인한 표면 상단 층의 나노입자 이탈과 나노입자가 표면 틈 사이의 침착이 표면 거칠기에 상당한 영향을 주는 것으로 확인하였다.

### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1D1A3A01018884).

### Reference

1. S. K. Das, S. U. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids : science and technology*, John Wiley and Sons, 2008.
2. Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technology*, Vol. 196, No. 2, pp. 89-101, 2009.
3. J. Barber, D. Brutin, and L. Tadrist, A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp.1-16, 2011.
4. J. M. Wu, J. Zhou, A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—research gap to engineering application, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 66, pp. 13-24, 2013.
5. Ahn. H. S, Kim. H. D, Jo. H. J, Kang. S. H, Chang. W. P, and Kim. M. H, Experimental study of critical heat flux enhancement during forced convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, No. 5, pp. 375-384, 2010.
6. H. Peng, G. Ding, W. Jiang, H. Hu, and Y. Gao, Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 6, pp. 1259-1270, 2009.
7. J. Lee, and I. Mudawar, Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 3-4, pp. 452-463, 2007.
8. S. J. Kline, and F. A. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiment, *Mechanical Engineer*, Vol. 75, pp. 3-8, 1953.
9. N. Zuber, On stability of boiling heat transfer, *ASME transactions*, Vol. 80, pp. 711-714, 1958.
10. Y. Katto, and C. Kurata, Critical heat flux of saturated convective boiling on uniformly heated plates in a parallel flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 6, No. 6, pp. 575-582, 1980.
11. Lee. S. W, Kim. K. M, and Bang. I. C, Study on flow boiling critical heat flux enhancement of graphene oxide/water nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 348-356, 2013.
12. K. Henderson, Park. Y. G, L. Liu, and Jacobi. A. M, Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 5-6, pp. 944-951, 2009.
13. M. M. Sarafraz, F. Hormozi, and S. M. Peyghambarzadeh, Role of nanofluid fouling on thermal performance of a thermosyphon: Are nanofluids reliable working fluid?, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 82, pp. 214-224, 2015.

14. Park. S. S, Kim. Y. H, Jeon. Y. H, Hyun. M. T, and Kim. N. J, Effects of spray-deposited oxidized multi-wall carbon nanotubes and graphene on pool-boiling critical heat flux enhancement, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 24, pp. 276-283, 2015.
15. Lee. S. W, Park. S. D, Kang. S, Kim S. M, Seo. H, Lee. D. W, Bang I. C, Critical heat flux enhancement in flow boiling of  $Al_2O_3$  and SiC nanofluids under low pressure and low flow conditions, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 44, No. 4, pp. 429-436, 2012.
16. Mostafa M. Awad, Fouling of heat transfer surfaces, *Heat transfer - Theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems*, pp. 505-542, 2011.