

나노 코팅을 이용한 열전달 향상에 대한 연구

강명보* · 김우중** · 김남진*†

*제주대학교, **KNJ 테크놀로지

Heat Transfer Enhancement using Nano Particles coated Surface

Myung-Bo Gang*, Woo-Joong Kim**, Nam-Jin Kim*†

*Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

**KNJ Technology, Jeju-si, Jeju 63243, Korea

Abstract

A boiling heat transfer is used in various industry such as power generation systems, heat exchangers, air-conditioning and refrigerations. In the boiling heat transfer system, the critical heat flux (CHF) is the important factor, and it indicated safety of the system. It has kept up studies on the CHF enhancement. Recently, it is reported the CHF enhancement, when working fluid used the nanofluid with excellent thermal properties. Therefore, in this study, we investigated the influence of nano particles coated surface for heat transfer enhancement in pure water, oxidized multi-wall carbon nanotube nanofluid (OMWCNT), and oxidized graphene nanofluid (OGraphene). Nanoparticles were coated for 120 sec on the surface, and we measured the CHF at the flow velocities of 0.5, 1.0, and 1.5 m/sec, respectively. As the results, both of the OMWCNT and OGraphene nanofluids increased up to about 34.0 and 40.0%.

Key words: CHF(임계 열유속), Heat transfer(열전달), Carbon nanotube(탄소나노튜브), Graphene(그래핀), Nanofluid(나노유체)

기호 설명

g : 중력가속도
G : 질량유속
 h_{fg} : 증발잠열
l : 히터길이
 $U_{q''}$: 임계 열유속
 U_h : 비등 열전달계수

$U_{T_2-T_3}$: 온도차
 U_L : 온도센서 거리
 $U_{T_{wall}-T_{sat}}$: 과열도
 $U_{T_4-T_{sat}}$: 온도차
 $U_{q''}$: 열유속
 U_d : 온도센서 거리
 $U_{T_{sat}}$: 과열도

그리스 문자

ρ_g : 기체밀도
 ρ_f : 액체밀도
 σ : 표면장력

†Corresponding author

Tel: +82-64-756-3643, Fax: +82-64-757-9276

E-mail: jnkim@jejunu.ac.kr

접수일: 2018년 04월 30일

심사일: 1차:2018년 05월 17일, 2차:2018년 05월 30일

채택일: 2018년 05월 30일

1. 서 론

지열 시스템에서 사용되는 열교환기, 공조, 냉·난방, 등 다양한 산업에서 열전달 시스템의 효율을 높이기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 최근에는 우수한 열전달 특성을 나타내는 나노유체가 주목을 받고 있다[1-4].

Lee and Mudawar[5]는 산화알루미늄 나노유체를 사용하여 마이크로채널 냉각운전에서 단일 상의 층류에서는 임계 열유속이 상승하였으며, 이상의 유동일 경우에 나노입자가 수로 끝에서 멎는 현상이 있음을 보고하였다. Peng et al.[6]은 R-113 내에 산화구리 나노입자를 분산시켜 나노유체를 제조하였으며, 구리 관내의 유동 비등에서 비등 열전달 계수가 30%까지 향상되었음을 보고하였다. Kim et al.[7]은 산화알루미늄, 산화아연, 다이아몬드 나노유체를 제조하여 나노유체의 질량유속과 나노입자 농도가 증가할수록 임계 열유속이 최대 53%까지 향상되었고 낮은 열유속에서 비등 열전달 계수가 소량 증가했음을 보고하였다. Ahn et al.[8]은 산화알루미늄 나노유체를 사용하여 풀 비등과 유동 비등에서 구리 관 히터의 임계 열유속을 측정하였으며, 히터 표면에 나노입자의 증착으로 인하여 임계 열유속이 향상되었음을 보고하였다. Henderson et al.[9]은 SiO_2 와 R-134a 나노유체를 유동 조건에서 사용하였으며, 비등 열전달 계수는 순수 R-134a에 비해 55% 감소되었음을 보고하였다. Kim and Kim[10]은 나노물질 분사 증착 시 장기운전에 대한 실험시편의 변화를 측정한 결과 실험실 규모의 실험에서는 큰 변화가 발생하지 않았다고 발표하였다. Jeon et al.[11] 탄소나노튜브 구조체가 형성되지 않은 열전달 표면보다 dot 패턴의 탄소나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서의 열전달 계수가 전체적으로 증가한다고 발표하였으며, Mo et al.[12]은 나노물질 코팅시간이 증가할수록 접촉각이 감소하고 표면 거칠기는 증가함을 확인하였다. 또한, 순수물에서 구리 나노입자 코팅시간이 60 sec와 180 sec일 때 풀 비등 임계 열유속이 각각 5.74와 6.40% 증가함을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 나노유체와 나노코팅이 동시에 적용될 때의 영향을 알아보기 위하여, 탄소 동소체이나 형상이 다르며 열전도성이 매우 뛰어난 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀을 이용하여 나노유체를

Table 1. Properties of MWCNT and graphene

Properties	MWCNT	Graphene
Diameter(nm)	10~15	15
Length(μm)	~200	-
Thickness(nm)	-	6~8
Purity(wt.%)	95	99.5
Bulk Density(g/cm^3)	0.05	0.03~0.1
True density(g/cm^3)	1.8	2.2
Thermal Conductivity(W/m·K)	3,000	3,000
Surface Area(m^2/g)	225	120~150

제조 후 유동 비등 임계 열유속을 측정 및 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

임계 열유속이 발생하는 반응용기는 두께 10 mm의 알루미늄합금 재질을 사용하여 밀폐형으로 제작하였으며, 반응용기의 상부에는 2대의 환류냉각기를 저온순환항온수조와 연결하여 설치하였다. 또한 반응용기 내부의 상단과 중단에 2개의 K-type 온도센서를 삽입하였고, 작동유체를 포화온도까지 가열할 수 있도록 시즈 히터를 설치하였다. 작동유체의 순환을 위해서 배관은 1/2인치 SUS316재질의 파이프로 구성하였고, 1.1 kW의 마그네틱 펌프를 사용하였다. 마그네틱 펌프는 인버터에 연결하여 펌핑 속도를 조절할 수 있도록 구성하였고, 작동유체의 정확한 유속 측정을 위해 질량유량계를 설치하였다.

유동 비등 열전달 실험 시편의 구성은 지르코늄 시편과 단열재인 PEEK로 구성되어 있으며, 지르코늄에는 직경 1 mm의 K-type 온도센서를 삽입하였다. 열전달 실험 시편에 열을 공급하기 위한 히터부는 히터의 역할을 하는 구리블럭과 알루미늄 용기, 알루미늄 재질의 단열판, 히터의 높이를 조절할 수 있는 서포트 잭으로 구성하였으며 구리블럭에는 8개의 500 W급 카트리지 히터를 삽입하였다. 구리블럭의 상부에는 직경 1 mm의 K-type 온도센서를 7 mm 간격으로 삽입하여 열전달 시편으로 공급되는 열을 측정할 수 있도록 구성하였다.

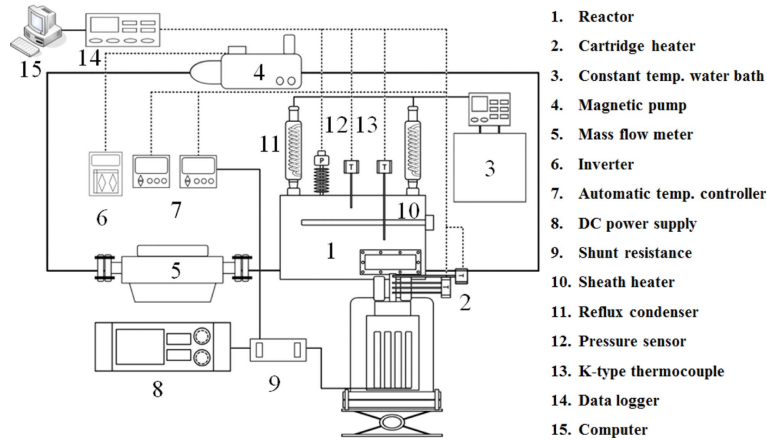


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus.

2.2 실험방법

반응용기 내에 유체를 채운 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 공급하는 방식으로 열유속을 발생시켰다. 임계 열유속이 발생하면 실험을 종료하여 반응용기 분리 후 깨끗이 세척하였다.

2.3 나노유체 제조 및 코팅

탄소 동소체 입자사이에서 발생하는 반데르발스 인력을 제거하여 나노유체의 분산안정성을 확보하기 위해서 화학적 개질에 의한 분산방법인 산화처리방법을 이용하여 나노물질을 제조하였다. 또한 500 W급 초음파 분산기를 사용하여 열전도율이 가장 좋은 0.001 vol%의 OMWCNT 나노유체와 0.01 vol%의 OGraphene 나노유체를 각각 2시간 동안 초음파 분산시켜 나노유체를 제조하였다[13]. 열전달 시편 표면에 나노물질을 코팅하기 위하여 0.3 mm 노즐이 장착된 압축공기를 사용하는 중력식 에어분사기를 활용하였으며, 실험 시편과 일정한 높이에서 120 sec 동안 분사하였다. 나노유체 분사 후에는 100℃를 유지하는 건조기에서 건조시켜 나노입자를 열전달 실험시편 표면에 코팅하였다. 코팅 후

시편 표면의 접촉각을 측정한 결과 OMWCNT와 OGraphene는 각각 29.6°와 30.9°로 OMWCNT의 친수성이 강함을 예측할 수 있다.

3. 실험결과 및 토론

3.1 불확실성 해석

본 연구에서는 Kline and McClintock[14]의 오차전파 방법으로 열유속에 대한 불확실성 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_2 - T_3}}{T_2 - T_3}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2} \quad (1)$$

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

$$\frac{U_h}{h} = \left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall} - T_{sat}}}{T_{wall} - T_{sat}}\right)^2 \quad (3)$$

위 식으로부터 계산된 열유속과 과열도의 불확실성은 열유속 100 kW/m²에서 각각 10.63와 15.04%이며, 열유속 1,100 kW/m²에서는 각각 2.44와 2.45%임을 알 수 있었다.

3.2 임계열유속 측정

Fig. 2와 Fig. 3은 순수물, 0.001 vol%의 OMWCNT

나노유체, 0.01 vol%의 OGraphene 나노유체에서 코팅이 되지 않은 열전달시편의 과냉도와 유속에 따른 임계 열유속 비등곡선을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보이듯이 순수물 보다는 나노유체가, 정지보다는 유속이 빠를수록 임계 열유속이 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

OMWCNT 나노유체의 경우 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 1490, 1827, 2251 kW/m²으로 0 m/s에서 측정된 1384 kW/m²보다 각각 7.7, 32.0, 62.6% 증가됨을 확인하였다. 또한 OGraphene 나노유체의 경우 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s

에서 측정된 임계 열유속은 1582, 1888, 2415 kW/m²으로 0 m/s에서 측정된 1452 kW/m² 보다 각각 9.0, 30.0, 66.3% 증가됨을 확인하였다. 이는 속도가 증가할수록 열전달 시편 표면에 형성되는 열경계층을 깨는 힘이 강하기 때문으로 사료된다[15].

Fig. 4와 Fig. 5는 순수물에서 코팅이 되지 않은 열전달 시편, 0.001 vol%의 OMWCNT 나노유체와 0.01 vol%의 OGraphene 나노유체에서 120 sec 동안 OMWCNT와 OGraphene을 각각 분사 증착방법에 의하여 코팅된 열전달시편의 과냉도와 유속에 따른 임계 열유속 비등곡선을 나타낸 그래프이다.

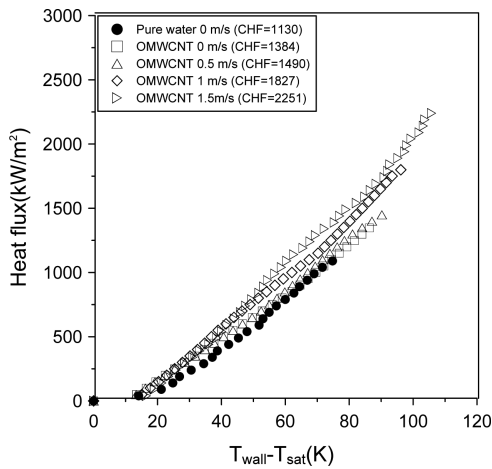


Fig. 2. Flow boiling CHF data in OMWCNT nanofluid (without coating).

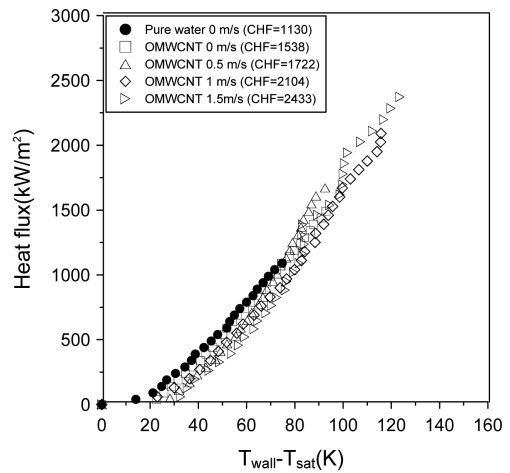


Fig. 4. Flow boiling CHF data in OMWCNT nanofluid (with coating).

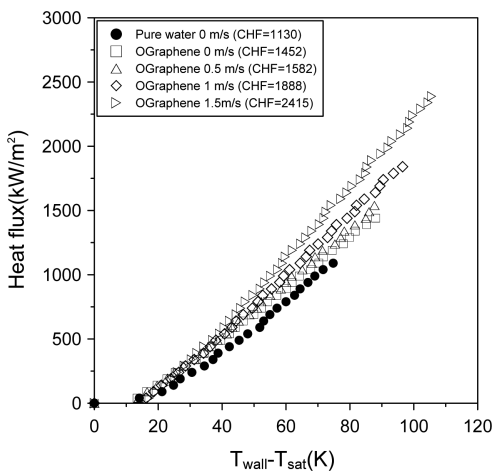


Fig. 3. Flow boiling CHF data in OGraphene nanofluid (without coating).

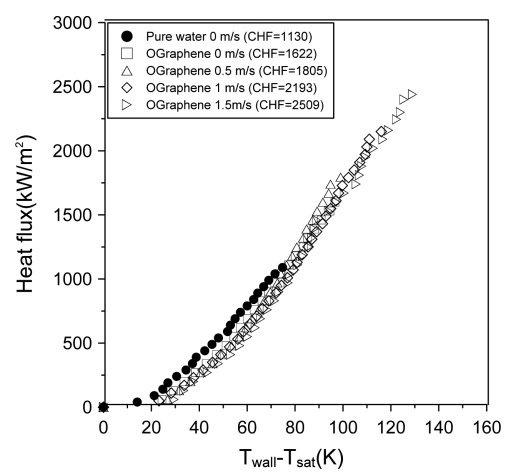


Fig. 5. Flow boiling CHF data in OGraphene nanofluid (with coating).

그림을 보면 알 수 있듯이 정지되어 있는 순수물 보다는 나노유체, 그리고 유속이 빠를수록 임계 열유속이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 2와 Fig. 3과는 다르게 열전달 곡선이 0 m/s의 곡선보다 오른쪽으로 치우치는 현상이 관찰되었다. 이는 시스템 안정성에 영향을 줄 수 있는 현상으로 향후 정밀한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. Fig. 4에서 OMWCNT 나노유체의 경우 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 1722, 2104, 2433 kW/m²으로 0 m/s에서 측정된 1538 kW/m²보다 각각 7.65, 32.00, 62.64% 증가됨을 확인하였다. 또한 OGraphene 나노유체의 경우 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 1582, 1888, 2415 kW/m²으로 0 m/s에서 측정된 1452 kW/m²보다 각각 12.0, 36.8, 58.2% 증가됨을 확인하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Fig. 4의 OMWCNT 나노유체와 마찬가지로 열전달 곡선이 오른쪽으로 치우치는 동일한 현상이 발견되었으며, 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속은 1805, 2193, 2509 kW/m²으로 0 m/s에서 측정된 1622 kW/m²보다 각각 11.3, 35.2, 54.7% 증가됨을 확인하였다.

Fig. 6은 Fig. 2~Fig. 5의 유속에 따른 임계 열유속과 예측 상관식과의 비교를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 유속이 0 m/sec인 풀 비등에서 순수 물에서 측정된 임계 열유속 데이터를 Zuber[16]가 제시한 아래의 상관식을 이용하여 비교한 결과 하였으며, 측정된 3번의 실험

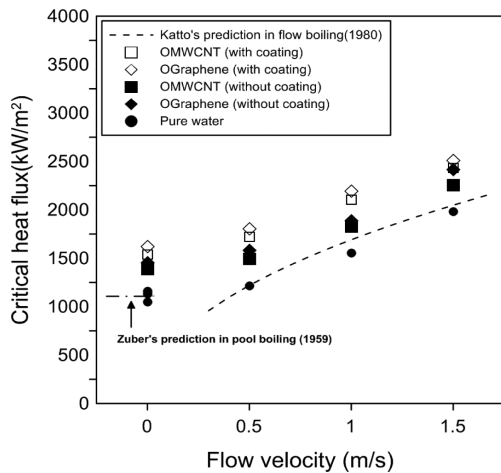


Fig. 6. Comparisons of the flow boiling CHF.

결과와 Zuber의 예측식과 5.08% 이내로 일치함을 확인하였다. 또한 측정된 비등곡선 사이에서 뛰어난 재현성을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 사용된 실험장치의 높은 신뢰성과 재현성을 확인할 수 있었다.

$$q''_{CHF, Zuber} = 0.131 h_{fg} \rho_g^{0.5} [\sigma g (\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \quad (4)$$

유동 비등 실험에서도 Katto and Kurata[17]의 식 (4)를 이용하였으며, 0.5~1.5 m/s까지의 순수물에서 측정된 유동 비등 임계 열유속 실험 데이터와 비교한 결과 약 8.5% 이내의 오차로 일치함을 확인하였다.

$$q''_{CHF} = 0.186 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.559} \left(\frac{\sigma \rho_f}{G^2 l} \right)^{0.264} G H_{fg} \quad (5)$$

또한 코팅을 하지 않은 시편의 경우 동일 유속시 순수물에 비해 OMWCNT 나노튜브는 19.1%, OGraphene 나노유체는 25.5%의 증가율을 보였다. 코팅을 한 시편의 경우 동일 유속시 순수물에 비해 OMWCNT 나노유체는 34.0%, OGraphene 나노유체는 40.0%의 증가율을 보였다. 이는 나노유체의 특성이라기보다는 나노유체 제작 시 첨가한 나노물질 농도의 영향으로 사료되며, 이는 추후 실험을 통해 검증할 예정이다.

아울러 나노유체에서 열전달 시편에 OMWCNT와 OGraphene을 코팅할 경우 임계 열유속 증가율이 각각 12.5와 11.5%로 비슷한 증가율을 보였는데, 이를 통해 코팅되는 나노물질의 종류보다는 나노유체의 종류와 그 유속의 영향을 더 크게 받을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 실험 후 표면 변화

Fig. 7은 코팅하지 않은 시편(a)과 120 sec 동안 코팅한 후의 시편(b, b'), 실험 후 유속에 따른 시편의 표면 접촉각변화(c, c')를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 유속이 클수록 접촉각의 변화가 크게 나타났으며, OGraphene보다 OMWCNT의 접촉각이 작은 것을 알 수 있다.

OGraphene의 경우 첨가되는 부피비가 크면서도 접촉각이 OMWCNT보다 크게 나타나는 현상을 관찰하였는데, 추후 부피비에 대한 실험을 통하여 그 원인을 분석할 예정이다.

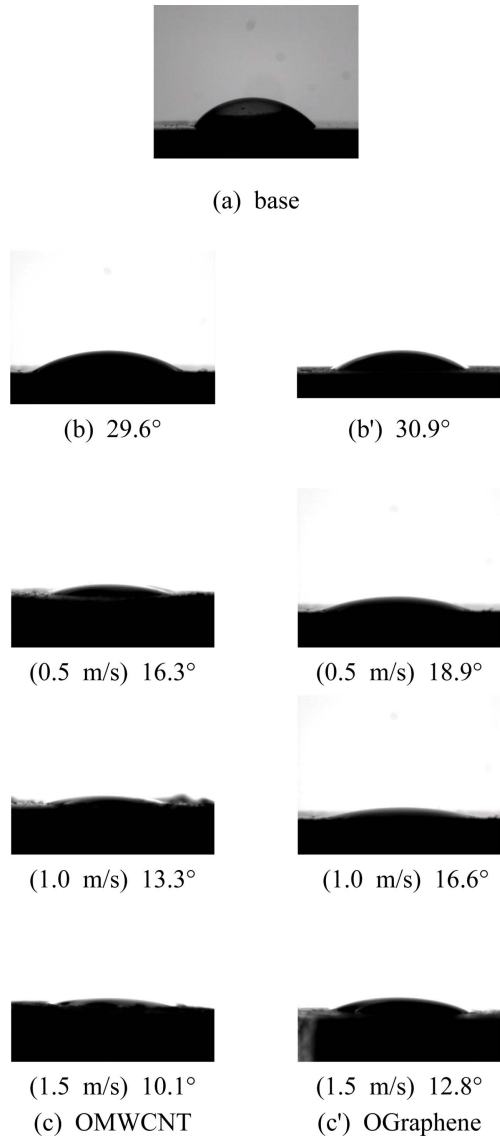


Fig. 7. Change of the contact angle.

4. 결 론

본 연구에서는 나노유체와 나노 코팅의 영향을 알아보기 위하여, OMWCNT와 OGraphene을 이용한 나노유체를 제조 후 유동 비등 임계 열유속을 측정 및 비교 하였다. 유속 0.5, 1.0, 1.5 m/s에서 측정된 임계 열유속과 0 m/s에서 측정된 값을 비교한 결과 OMWCNT 나노유체의 경우 각각 7.7, 32.0, 62.6% 그리고 OGraphene 나노유체의 경우 각각

9.0, 30.0, 66.3% 증가됨을 확인하였다. 또한 나노 유체에서 열전달 시편에 OMWCNT와 OGraphene을 코팅할 경우 임계 열유속 증가율은 비슷한 증가율을 보였는데, 이를 통해 코팅되는 나노물질의 종류에는 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과 지원사업에 의하여 연구되었음

References

- Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., and Grulke, E. A., 2001, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Applied Physics Letters*, Vol. 79, pp. 2252-2254.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., and Firsov, A. A., 2004, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, Vol. 306, pp. 666-669.
- Das, S. K., Choi, S. U. S., and Yu, W., 2008, *Nanofluids Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc.
- Geim, A. K. and Kim, P., 2008, Carbon Wonderland. *Scientific American*, Vol. 298, pp. 90-97.
- Lee, J. and Mudawar, I., 2007, Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 50, No. 3-4, pp. 452-463.
- H. Peng, G. Ding, W. Jiang, and Y. Gao, 2009, 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.
- Kim, S. J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.-W., 2010, Subcooled flow boiling heat transfer of dilute alumina, zinc oxide, and diamond nanofluids at atmospheric pressure, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 5, pp. 1186-1194.
- Ahn, H. S., Kim, H. D., Jo, H. J., Kang, S. H., Chang, S. H., and Kim, M. H., 2010, 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, pp. 375-384.
- Henderson, K., Park, Y. G., Liu, L., and Jacobi, A. M., 2010, 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.
10. Kim, Y. H. and Kim, N. J., 2017, Study on heat transfer performance change according to long-term operation using carbon nanotube and graphene nanofluid, *Journal of the Korea Solar Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 15-23.
 11. Jeon, Y. H., Kim, Y. H., and Kim, N. J., 2017, A study on the heat transfer and durability of carbon nano coating for the safety improvement of a pool boiling system, *J. Korea Saf. Manag. Sci.*, Vol. 19, No. 1, pp. 211-217.
 12. Mo, Y. H., Kim, N. J., Jeon, Y. H., and Lee, D. S., 2017, Critical heat flux measurement experiment to improve safety of copper nano-particle coated heat exchanger, *J. Korea Saf. Manag. Sci.*, Vol. 19, No. 4, pp. 317-322.
 13. Park, S. S., Kim, Y. H., Jeon, Y. H., Hyun, M. T., and Kim, N. J., 2015, 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.
 14. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiment, *Mechanical Engineer*, Vol. 75.
 15. Chang, S. H., Heong, Y. H., and Shin, B. S., 2006, Critical heat flux enhancement, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 8, pp. 753-762.
 16. Zuber, N., 1958, On stability of boiling heat transfer, *ASME transactions*, Vol. 80, pp. 711-714.
 17. Katto, Y. and Kurata, C., 1980, 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.