

그래핀 입자의 크기와 혼합비율이 나노유체의 비등 열전달에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

A Experimental Study on the Boiling Heat Transfer Characteristics of Nanofluids by the Size and Mixing Ratio of Graphene Particle

박성식*, 김영훈*, 김남진*†
Park Sung-Seek*, Kim Young Hun*, Kim Nam-Jin*†

(Received 17 March 2015; accepted 20 April 2015)

Abstract : Boiling heat transfer characteristic is very important in the various industries such as solar thermal system, power generation, heat exchangers, cooling of high-power electronics components and cooling of nuclear reactors. Therefore, in this study, boiling heat transfer characteristics such as critical heat flux (CHF) and heat transfer coefficient under the pool boiling state were tested using graphene nanofluids. Graphene used in this study, which have the same thermal conductivity but with different sizes. The experimental results showed that the highest the CHF and boiling heat transfer coefficient increase ratio for graphene nanofluids was at the 0.01 vol.%. At the present juncture, the CHF and boiling heat transfer coefficient increase ratio of the small-sized graphene nanofluids was higher than the large-sized graphene nanofluids.

Key Words : 그래핀(Graphene), 비등 열전달(Boiling heat transfer), 임계 열유속(Critical heat flux), 입자 크기(Particle size), 열전달계수(Heat transfer coefficient)

1. 서 론

그래핀은 6개의 탄소원자들이 2차원 상에서 SP^2 결합에 의해 벌집모양의 배열을 이루고

있는 원자 한 층을 명명하며, 구조적, 화학적으로 매우 안전하고, 우수한 열적특징을 가지고 있다고 보고되었다.¹⁾²⁾ 현재까지 알려진 그래핀의 열전도도는 $5300 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이며, 물리

*† 김남진(교신저자) : 제주대학교 에너지공학과
E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr Tel : 064-754-3643
*박성식 : 제주대학교 에너지공학과
*김영훈 : 제주대학교 에너지공학과

*† Kim Nam-Jin(corresponding author) : Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University.
E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3643
*Park Sung-Seek : Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University
*Kim Woung-Hun : Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University

적 강도는 강철의 200배 이상이다. 이와 같은 우수한 특성 때문에 현재 그래핀은 전 세계가 주목하는 신소재로 각광을 받고 있다.³⁾

최근 그래핀의 우수한 열적특성을 이용하여 각종 열전달 시스템의 성능을 향상시키고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 각종 태양열 및 발전 시스템, 열교환기, 냉각 시스템 등에서 매우 중요하게 적용되는 비등 열전달 특성을 그래핀을 이용하여 향상 시키고자 하는 연구들이 진행되고 있다.

S.D. Park et al.은 ERVC(External Reactor Vessel Cooling) 냉각수 환경 조건에서 Ni-Cr 와이어 히터(8:2비율)를 사용하여 그래핀 옥사이드 나노유체의 풀 비등 열전달 실험을 수행하였다. Hummers method 방법으로 제조된 0.0001 vol%의 그래핀 나노유체에 봉산, 수산화나트륨, 삼중인산나트륨과 혼합한 유체를 이용하였으며, 실험결과 풀 비등 임계 열유속이 히터의 기울기에 따라 순수물보다 약 40-200% 증가($0 < \theta < 90^\circ$)하였고, 임계 열유속 이후 히터표면에 그래핀 옥사이드 입자의 얇은 코팅 또는 퇴적물을 관찰하여, 이와 같은 코팅층은 비등버블 아래의 미세층을 고갈시킬 수 있다고 보고하였다.⁴⁾

S.W. Lee et al.은 순수 물 기반의 그래핀 옥사이드 나노유체를 이용하여 저압조건에서 유동 비등 임계 열유속에 대한 연구를 수행하였으며, 최대 100%까지의 임계 열유속 증가를 확인하였다.⁵⁾

L. Zhang et al.과 L.W. Fan et al.은 급냉(Quenching)을 이용하여 그래핀 옥사이드 나노시트의 나노유체의 농도에 따른 과도(Transient) 풀 비등 열전달 실험을 수행하였으며, 임계 열유속의 향상을 관찰하고, 열전달 표면 재질의 특성과 표면 처리 상태, 그래핀 표면 침착 등이 임계 열유속에 큰 영향을 줄

수 있다고 보고하였다.⁶⁾⁷⁾

그래핀 나노유체의 비등 열전달 특성에 대하여 연구한 연구자들은 공통적으로 그래핀 입자를 이용한 나노유체의 비등 임계 열유속과 열전달계수와 같은 열전달 성능이 크게 향상됨을 확인하였으며, 그래핀 입자의 혼합비율과 열전달 표면 변화가 비등 열전달에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 하지만 현재 차세대 신소재로 기대되고 있는 그래핀의 열전달 특성과 메커니즘 규명은 아직까지 연구개발이 더 필요한 상황인 것으로 판단되며, 특히 그래핀 입자의 크기에 따른 비등 열전달 특성에 대한 연구결과는 아직 보고되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 열전도도 특성은 동일하나 입자의 크기가 다른 두 종류의 그래핀을 이용하여 풀 비등 열전달 실험을 수행하였으며, 그래핀 입자의 크기가 풀 비등 임계 열유속 및 열전달계수에 미치는 영향을 비교분석하였다.

2. 그래핀 나노유체의 제조

2.1 그래핀

P.R. Wallace⁸⁾에 의해 이론적으로 처음 제안되었던 그래핀은 2차원 구조의 원자들이 불안정하기 때문에 실제로 존재 할 수 없는 물질인것으로 알려졌으나 K.S Novoselov et al.¹⁾이 흑연으로부터 그래핀을 분리하는데 성공하여 분리된 그래핀의 여러 가지 우수한 특성과 밴드갭 구조를 보고함으로써 전 세계적으로 큰 주목을 받게 되었다. 최근에는 원자 한층을 명명하는 그래핀을 원자의 층 수에 따라 크게 SLG(Single Layer Graphene), FLG(Few Layer Graphene), MLG(Multi Layer Graphene)로 구분하고 있다.

본 연구에서 비등 열전달 실험에 사용된 그

래핀은 XGscience Co.에서 제조된 것으로 MLG의 한 종류인 그래핀 Nanoplatelets Grade M-5와 M-15를 이용하였으며, 자세한 물성치를 Table 1에 나타내었다. 표를 보면 알 수 있듯이 그래핀 M-5와 M-15는 열전도도와 같은 다른 물성치들은 동일하지만 크기가 다른 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 그래핀 M-5와 M-15의 FESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope) 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 2차원 구조의 그래핀의 원자 한 층이 여러 겹으로 다중적인 구조를 이루고 있음을 확인할 수 있다.

2.2 그래핀 나노유체 제조방법

본 연구에서는 나노크기 단위의 입자들이 가지고 있는 반데르발스 인력을 최소화 하고, 나노입자들을 기본유체 내에 안정적으로 부유시키기 위하여 초음파를 이용한 기계적 분산방법을 이용하여 나노유체를 제조하였다.⁹⁾ 최대 1 L의 나노유체를 제조할 수 있는 영진 코퍼레이션의 500 W급 VC-505 Ultrasonic processor를 사용하였으며, 두 종류의 그래핀 입자를 각각 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%, 0.1 vol%의 비율로 순수 물과 혼합하여 그래핀 나노유체를 제조하였다.

3. 실험장치 및 방법

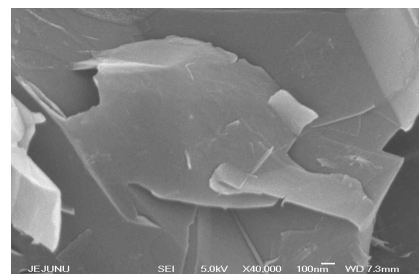
3.1 비등 열전달 실험장치

비등 열전달 실험을 위하여 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 반응용기는 다양한 포화온도와 유체에서 비등 열전달 실험을 수행할 수 있도록 스테인레스 합금(SUS 316) 재질을 사용하여 밀폐형으로 제작하였다. 또한 비등 및 임계 열유속의

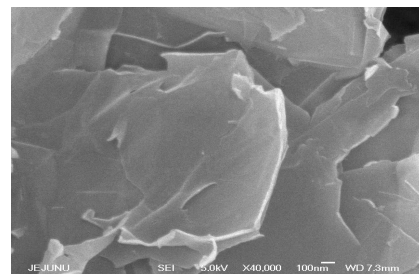
발생과정을 시각적으로 관찰할 수 있도록 반응용기 앞뒤로 45 mm의 석영창을 설치하였다. 반응용기의 상부에는 반응용기에서 증발된 증기를 다시 반응용기로 순환시킬 수 있도록 환류 증류기(SUS 316)를 설치하였으며, 저온순환수조(RW-3025G, Jeio-tech)와 연결하여 효과적으로 증발된 증기를 다시 반응용기로 순환시켰다. 반응용기의 압력을 정확하게 측정하기

Table 1. Properties of Graphene M-5 and M-15.

Properties	M-5	M-15
Average particle diameter(μm)	5	15
Average particle thickness(nm)	6-8	6-8
Carbon content (%)	>99.5	>99.5
Bulk Density(g/cm^3)	0.03-0.1	0.03-0.1
True density(g/cm^3)	2.2	2.2
Thermal conductivity($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	3000	3000
Surface Area(m^2/g)	120-150	120-150



(a) Graphene M-5



(b) Graphane M-15

Fig. 1. FESEM photos of graphene.

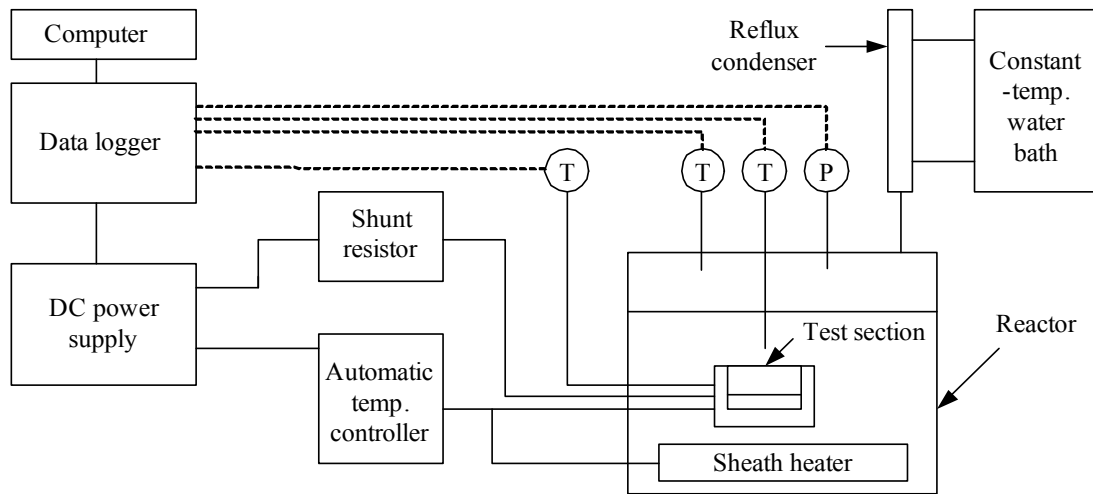


Fig. 2 Schematic diagram of boiling heat transfer experimental apparatus.

위하여 정밀도 $\pm 0.8\%$ 의 압력센서(PMC D0350KACA, Sensys Co.)를 설치하였으며, 반응용기 내부의 온도측정을 위해 정밀도가 ± 0.1 °C인 2개의 T-type 온도센서(TJC36-CPSS-040U -6, Omega)를 반응용기 내의 상단과 중단에 각각 설치하였다. 반응용기 내부의 하단에는 반응용기의 크기에 맞게 주문제작한 직경 8mm의 시즈히터를 설치하여 반응용기 내부의 실험온도를 일정하게 유지하였다. 반응용기 내부의 비등 열전달 실험 시편의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 시편은 350 W급의 열저항 히터와 비등이 발생하는 지르코늄 시편, 3개의 T-type 온도센서로 구성되어 있다. 히터에서 발생하는 열을 최대한 단열하고, 열손실을 최소화하기 위하여 비등 열전달 실험 시편의 재질은 열전도도가

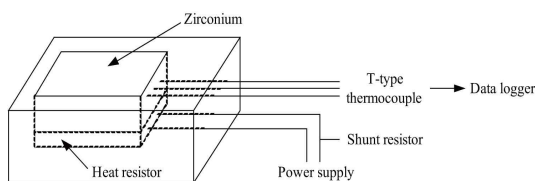


Fig. 3 Structure of test section.

아주 낮은 PEEK를 사용하였다.

열유속이 발생하는 비등 열전달 실험 시편에 전력을 공급해주기 위한 직류전원공급기(DAP-125, Dau nanotek)는 최대 750 W의 전력을 공급 할 수 있는 것으로 설치하였으며, 비등 열전달 실험 시편에 공급되는 열량을 측정하기 위하여 셉트 저항(221509, Yokogawa Co.)을 직류전원공급기와 비등 열전달 실험 시편 사이에 설치하여 공급되는 전류와 전압강하를 정확하게 측정하였다. 또한 온도조절기(NX9, Hanyoung nux)를 설치하여 비등 열전달 실험 시편의 온도를 효과적으로 제어할 수 있게 하였다. 측정된 실험데이터의 수집과 저장을 위하여 데이터 로거(34970a, Agilent)와 컴퓨터를 설치하였으며, 실험데이터의 실시간 모니터링과 효과적인 데이터의 처리를 위하여 임계 열유속 측정 프로그램을 제작하여 사용하였다.

3.2 비등 열전달 실험방법

히트파이프와 같은 열전달 장치들은 보통 매우 낮은 저압 조건에서 작동하기 때문에 본

연구에서는 실험압력을 19.61 kPa로 결정하였다. 또한 비등은 열전달 벽면의 온도가 포화온도에 도달한 포화액 상태의 유체보다 온도가 높아야 일어나기 때문에 실험온도는 실험압력의 포화온도인 60 °C로 결정하였다. 비등 열전달 실험장치의 반응용기에 나노유체를 충전한 뒤 진공 펌프인 로터리 펌프를 작동하여 반응용기의 압력을 실험압력(19.61 kPa)으로 조절하고, 반응용기의 압력이 실험압력으로 유지되는 것을 확인한다. 비등은 가열면의 온도가 포화온도에 도달한 포화액 상태의 유체보다 온도가 높아야 일어나기 때문에 시즈히터를 이용하여 반응용기 내부 나노유체의 온도를 실험압력의 포화온도인 60 °C로 상승시킨다. 유체의 온도가 목표한 실험온도로 도달한 것을 확인한 뒤, 직류전원공급기를 사용하여 비등 열전달 실험시편에 전력을 공급하고, 열유속을 발생시킨다. 열유속은 10 kW/m²씩 증가시켰으며, 실험을 수행하는 동안 반응용기의 압력과 온도는 일정하게 유지하였다. 실험이 끝난 뒤에는 반응용기를 분리하고, 비등 열전달 실험 시편과 반응용기 내부를 깨끗이 세척하였다. 특히, 비등 열전달 실험 시편은 2000 번 사포를 이용하여 표면을 항상 균일하게 만들고 다시 실험을 수행하였다.

풀 비등 임계 열유속과 비등 열전달 계수는 간단한 대류 열전달 방정식 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였으며, 비등 열전달 시편에 공급된 열량 Q는 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$q'' = h(T_{wall} - T_{sat}) \quad (1)$$

$$h = \frac{Q/A}{(T_{wall} - T_{sat})} \quad (2)$$

$$Q = IV \quad (3)$$

여기서 q'' , h , A , T_{wall} , T_{sat} , Q , I , V 는 각각 열유속(kW/m²), 열전달 계수(kW/m² · K), 열전달 면적(m²), 비등 열전달 실험 시편 표면 온도(K), 실험유체의 포화온도(K), 공급열량(W), 전류량(A), 전압강하(V)이다.

이 때 비등 열전달 실험 시편 표면온도는 시편에 삽입된 3개의 T-type 온도센서로 측정된 값들을 평균하여 사용하였으며, 실제 실험시편 표면온도 T_{wall} 는 측정된 평균온도 T_{ave} 를 식 (36)과 같은 1차원 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다.

여기서 T_{ave} , l , k 는 각각 측정된 비등 열전달 실험시편 평균온도(K), 삽입된 온도센서로부터 실제 실험시편 표면까지의 두께(m), 실험시편의 열전도도(W/m · K)이다.

$$T_{wall} = T_{ave} - \frac{Q}{A} \left(\frac{l}{k} \right) \quad (4)$$

4. 결 과

4.1 실험장치의 신뢰성

본 연구에서는 먼저 실험장치의 신뢰성과 재현성을 확인하기 위해 순수 물을 이용하여 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행하였으며, 실험결과를 Zuber, Haramura and Katto의 예측식과 비교하였다.¹⁰⁾¹¹⁾

$$q''_{CHF, Zuber} = 0.131 h_{fg} \rho_g^{0.5} [\sigma g (\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \quad (5)$$

$$q''_{CHF} = 5.505 q''_{CHF, Zuber} \left(\frac{A_v}{A_w} \right)^{5/8} \left(1 - \frac{A_v}{A_w} \right)^{5/16} \times \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_f} + 1 \right) / \left(\frac{11}{16} \frac{\rho_g}{\rho_f} + 1 \right)^{3/5} \right]^{5/16} \quad (6)$$

$$\frac{A_v}{A_w} = 0.0584 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.2}$$

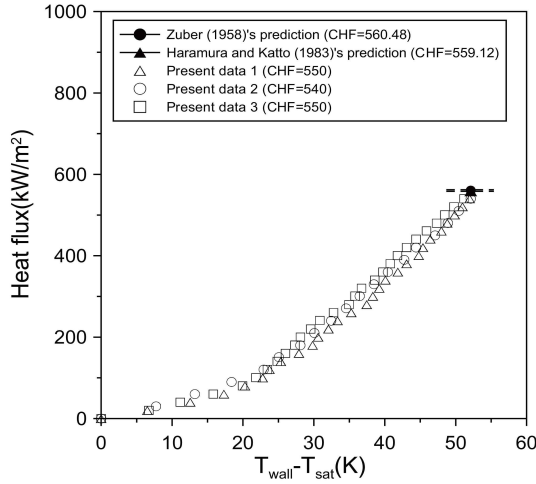


Fig. 4 boiling heat transfer test of pure water.

여기서, h_{fg} , ρ_g , ρ_f , σ , g 는 각각 증발잠열 (kJ/kg), 기체밀도(kg/m³), 액체밀도(kg/m³), 표면장력(N/m), 중력가속도(m/s²)이다.

Fig. 4에 Zuber, Haramura and Katto의 예측식과 본 연구에서 측정된 임계 열유속 결과를 비교하여 나타내었다. Zuber와 Haramura and Katto가 제시한 예측식을 이용하여 계산한 임계 열유속은 각각 560.48 kW/m², 599.12 kW/m²이며, 본 실험결과와 5% 이내로 일치함을 확인하였다. 또한 측정된 실험결과들의 뛰어난 재현성을 확인할 수 있었다.

또한 본 연구에서는 Kline and McClintock의 식을 이용하여 비등 열전달 실험의 불확실성에 대한 해석을 수행하였다.¹²⁾ 본 연구에서 사용한 열유속과 열전달 계수에 대한 식 (1) ~ 식 (3)을 보면, 열유속에 대한 인자는 열전달 계수와 열전달 실험시편의 표면온도와 작동유체의 온도차임을 알 수 있으며, 열전달 계수에 대한 인자는 전류, 전압강하, 시편 면적, 시편 표면온도, 작동유체 온도임을 알 수 있으며, 열유속과 열전달 계수는 다음 인자들의 함수로 표현된다.

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

$$h = h(I, V, L, T_{wall}, T_{sat}) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 나타난 인자들을 이용하여 열유속과 열전달 계수에 대한 불확실성을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall} - T_{sat}}}{T_{wall} - T_{sat}}\right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall}}}{T_{wall}}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{sat}}}{T_{sat}}\right)^2} \quad (9)$$

여기서, $U_{q''}$, U_h , $U_{T_{wall} - T_{sat}}$, U_I , U_V , U_L , $U_{T_{wall}}$, $U_{T_{sat}}$ 는 각각 임계 열유속, 비등 열전달 계수, 열전달 실험시편의 표면온도와 작동유체의 온도차, 전류, 전압강하, 실험시편의 길이에 대한 불확실성을 나타낸다. 위 식으로부터 계산된 임계 열유속과 비등 열전달 계수의 불확실성은 각각 $\pm 2.2\%$, $\pm 6.7\%$ 로 나타났다.

4.2 그래핀 나노유체의 임계 열유속

Fig. 5는 그래핀 M-15 나노유체의 체적비율에 따른 비등 곡선을 순수 물의 비등 곡선과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모든 체적비율에서 그래핀 나노유체의 임계 열유속은 순수 물보다 증가함을 확인할 수 있었으며, Zuber나 Haramura and Katto의 예측식보다 높음을 알 수 있었다. 특히, 0.0001-0.01 vol%의 그래핀 혼합비율까지 임계 열유속이 지속적으로 향상되었으며, 임계 열유속을 크게 향상시킬 수 있는 최적의 혼합비율은 0.01 vol%로, 이때의 임계 열유속

은 순수 물보다 약 129% 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 그래핀 M-5 나노유체의 체적비율에 따른 비등 곡선을 순수 물의 비등 곡선과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그래핀 M-15보다 입자의 크기가 작은 그래핀 M-5 나노유체의 풀 비등 곡선의 경향은 그래핀 M-15 나노유체의 풀 비등 곡선과 유사한 경향을 나타냄을 확인하였으며, 최적의 임계 열유속을 향상시키는 혼합비율은 그래핀 M-15 나노유체와 마찬가지로 0.01 vol%임을 확인하였다. 하지만 모든 혼합비율에서 그래핀 M-5 나노유체의

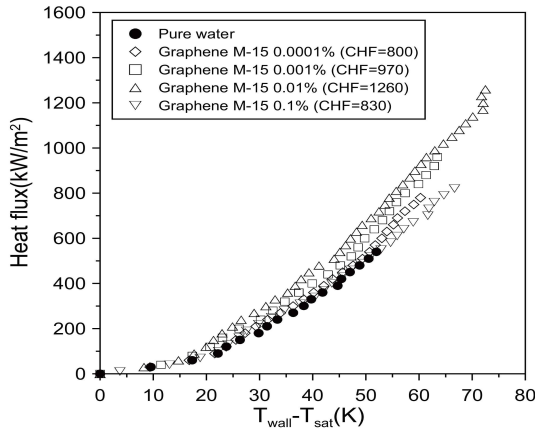


Fig. 5. CHF of graphene M-15.

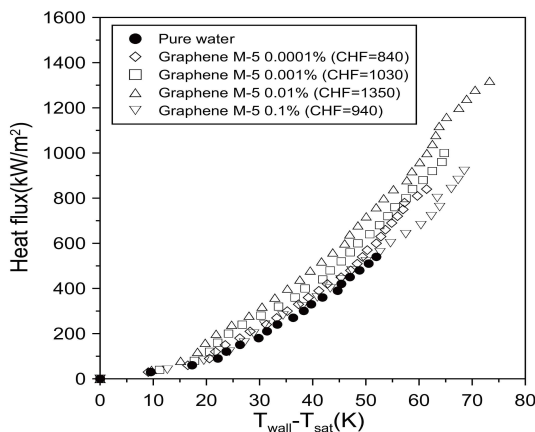


Fig. 6. CHF of graphene M-5.

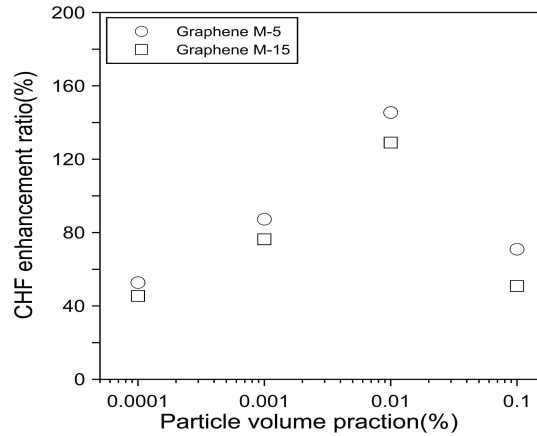


Fig. 7. Comparison of CHF enhancement ratio of graphenes M-5 and M-15.

임계 열유속은 입자의 크기가 큰 그래핀 M-15 나노유체의 임계 열유속보다 높다는 것을 알 수 있었다. 특히, 가장 높은 임계 열유속을 나타낸 0.01 vol%의 체적비율에서 그래핀 M-5 나노유체의 임계 열유속은 그래핀 M-15 나노유체보다 약 7.14% 높음을 확인하였다. 이와 같은 실험결과로 그래핀을 이용한 나노유체의 풀 비등 임계 열유속은 입자의 크기에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 크기가 작은 그래핀을 이용하여 제조한 나노유체의 임계 열유속 향상효과가 훨씬 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 순수 물의 임계 열유속과 비교한 그래핀 M-5와 M-15 나노유체의 임계 열유속 증가율을 체적비율에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모든 체적비율에서 입자 직경이 작은 그래핀 M-5 나노유체의 임계 열유속 증가비율이 입자 직경이 큰 그래핀 M-15 나노유체의 증가비율보다 높다는 것을 알 수 있다. 특히, 두 종류의 그래핀 나노유체 모두 0.01 vol%에서 가장 높은 임계 열유속 증가를 나타냄을 확인할 수 있었다. 하지만 두 종류의 그래핀 나노유체 모

두 0.1 vol% 체적비율에서는 임계 열유속 증가율이 감소하는 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 비교적 높은 체적비율의 나노유체 내에 존재하는 수 많은 그래핀 입자들의 영향 때문인 것으로 판단되며, 유체 내에 부유하는 많은 수의 그래핀 입자들이 비등 열전달 표면에 침착됨으로 인하여 열전달 표면 상태를 변화시키기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수

Fig. 8은 그래핀 M-15 나노유체의 체적비율에 따른 비등 열전달계수를 순수 물의 비등 열전달계수와 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 각기 다른 혼합비율의 나노유체에서 임계 열유속이 발생했을 때의 비등 열전달계수는 모두 순수 물의 임계 열유속보다 높음을 알 수 있었으며, 0.01 vol%에서 가장 높은 비등 열전달계수를 나타냄을 확인하였다. 하지만 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때와 동일한 열유속에서 측정된 비등 열전달계수는 순수물보다 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%에서 각각 3.05%, 9.09%, 16.00% 증가함을 알 수 있었으며, 0.1 vol%에서는 순수 물보다 0.30%가 감소함을 확인하였다.

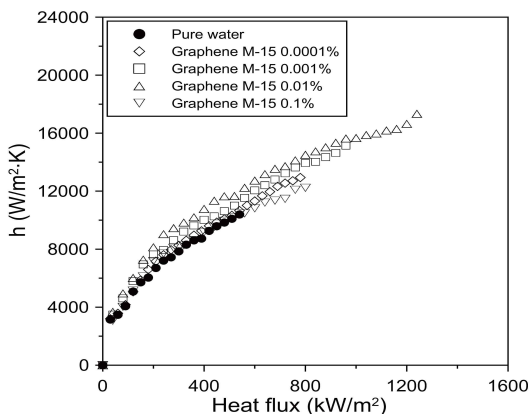


Fig. 8. boiling heat transfer coefficient of graphene M-15.

Fig. 9는 그래핀 M-5 나노유체의 체적비율에 따른 비등 열전달계수를 순수 물의 비등 열전달계수와 비교하여 나타낸 그래프이다. 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때와 동일한 열유속에서 측정된 비등 열전달계수는 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01, 0.1 vol%에서 각각 6.25%, 12.51%, 22.05%, 1.36% 증가함을 알 수 있었다. 또한 그래핀 M-15 나노유체와는 조금 다르게 0.1 vol%의 체적비율에서도 순수 물보다 비등 열전달계수가 약간 증가함을 확인할 수 있었다. Park and Jung은 기존의 실험에 사용되어 온, 금속 친화성을 가진 Cu, Al 나노입자들과는 달리 탄소나노튜브는 금속과의 친화성이 적어 표면 불결 효과를 일으키지 않기 때문에 비등 열전달계수가 향상되는 것으로 분석하였다.¹³⁾ 이와 같은 결과로 같은 탄소동소체인 그래핀인 경우도 탄소나노튜브와 마찬가지로 금속 친화성을 가진 나노입자들과는 다르게 비등 시 나노입자의 실험 시편 표면침착정도가 적어 비등 열전달계수가 향상된다는 것을 알 수 있으며, 비등 열전달계수가 향상되는 혼합비율은 0.01 vol%까지임을 확인할 수 있다. 하지만 혼합비율이 0.01 vol%보다 증가하게 되면 많은 양의 그래핀 입자들이

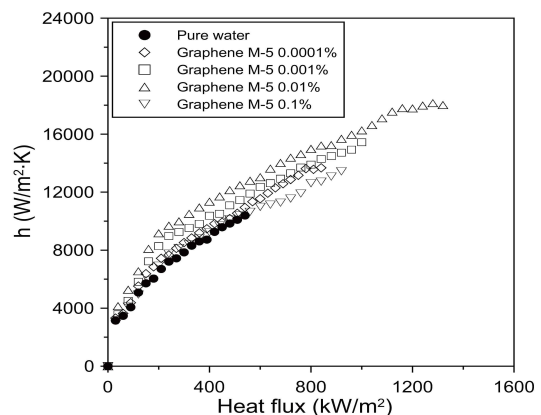


Fig. 9. boiling heat transfer coefficient of graphene M-5.

비등 열전달 표면에 침착되게 되며, 이와 같이 침착된 두꺼운 입자의 막 때문에 비등 열전달 계수가 감소한 것으로 판단된다. Kim et al.은 이와 같이 열전달 표면에 침착된 두꺼운 나노막이 추가적인 열저항을 발생시켜 열전달 계수를 감소시킨다고 보고하였으며, 이 같은 결과는 본 실험의 결과와 일치한다.¹⁴⁾

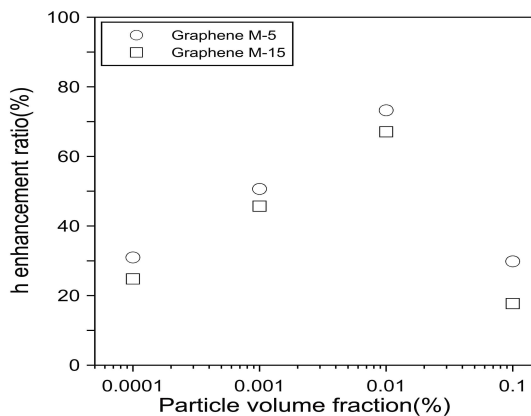


Fig. 10. Boiling heat transfer coefficient enhancement ratio of graphenes M-5 and M-15.

Table 2. Comparison of CHF and heat transfer coefficient enhancement ratio.

Type		0.0001%	0.001%	0.01%	0.1%
CHF	Graphene M-5	52.73	87.27	145.45	70.91
	Graphene M-15	45.45	76.36	129.09	50.91
h	Graphene M-5	30.97	50.66	73.25	29.84
	Graphene M-15	24.79	45.71	67.08	17.72

Fig. 10은 임계 열유속이 발생했을 때 그래핀 M-5와 M-15 나노유체의 비등 열전달 계수 증가율을 체적비율에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모

든 체적비율에서 입자의 크기가 작은 그래핀 M-5 나노유체의 비등 열전달 계수 증가율이 입자의 길이가 큰 그래핀 M-15 나노유체보다 높음을 알 수 있으며, 두 종류의 그래핀 나노유체 모두 0.01 vol%에서 가장 높은 비등 열전달 계수 증가율을 나타내었다. 이와 같은 실험결과는 그래핀 입자의 크기가 나노유체의 임계 열유속 뿐만 아니라 비등 열전달계수에도 영향을 미친다는 것을 나타내며, 입자의 크기가 큰 그래핀보다 입자의 크기가 작은 그래핀이 우수한 비등 열전달 성능을 나타낸다는 것을 보여주는 결과이다. 또한 표 2에 그래핀 M-5와 M-15의 실험결과를 정리하여 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 동일한 열전도도 특성을 가지고 있으나 입자의 크기가 다른 그래핀 나노유체의 혼합비율에 따른 비등 열전달 특성을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입자의 크기가 다른 두 종류의 그래핀 나노유체를 이용하여 풀 비등 열전달 실험을 수행한 결과 두 종류의 그래핀 나노유체 모두 0.01 vol%에서 가장 높은 임계 열유속과 비등 열전달계수 증가를 나타냄을 확인하였다.
- (2) 모든 체적비율에서 입자의 크기가 작은 그래핀 M-5 나노유체의 풀 비등 임계 열유속과 비등 열전달계수 증가율이 입자의 크기가 큰 그래핀 M-15 나노유체의 증가율보다 높음을 확인할 수 있었다.
- (3) 그래핀 입자의 크기가 풀 비등 임계 열유속과 비등 열전달계수와 같은 비등 열전달 성능에 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 입자의 크기가 작은 그래핀을 혼

합한 나노유체의 비등 열전달 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NO. 2013M2B2A9A03051391)

Reference

1. Novoselov. K.S. et al., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, Vol. 306, pp. 666-669, 2004.
2. Novoselov. K.S. et al., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, *Nature*, Vol. 438, pp. 197-200, 2005.
3. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W.Z., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N., Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, Vol. 8, pp. 902-907, 2008.
4. Park S.D., Lee S.W., Kang S., Kim S.M., Bang I.C., Pool boiling CHF enhancement by graphene-oxide nanofluid under nuclear coolant chemical environments, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 252, pp. 184-191, 2012.
5. Lee S.W., Kim K.M., 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.
6. Zhang L., Fan L., Yu Z., Cen K., An experimental investigation of transient pool boiling of aqueous nanofluids with graphene oxide nanosheets as characterized by the quenching method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 410-414, 2014.
7. Fan L.W., Li J.Q., Li D.Y., Zhang L., Yu Z.T., Cen K.F., The effect of concentration on transient pool boiling heat transfer of graphene-based aqueous nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 91, pp. 83-95, 2015.
8. Wallace. P.R., The band theory of graphite, *Physical Review Letters*, Vol. 71, pp. 622-634.
9. Park S.S., Kim N.J., Influence of the oxidation treatment and the average particle diameter of graphene for thermal conductivity enhancement, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, pp. 1911-1915.
10. Zuber N., On stability of boiling heat transfer, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 80, pp. 711-714, 1958.
11. Haramura Y. and Katto Y., A new hydrodynamic model of critical heat flux applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 389-399, 1983.
12. Kline S.J., McClintock F.A., Describing uncertainties in single-sample experiment, *Mechanical Engineer*, Vol. 75, pp. 3-8, 1953.
13. Park K.J. and Jung D., Enhancement of Nucleate Boiling Heat transfer Using Carbon Nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4499-4502, 2007.
14. Kim, H. D. et al., Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids, *Applied Physics Letters*, Vol. 91, pp. 014104, 2007.