

# 탄소나노튜브 및 그래핀 나노유체 사용시 장기운전에 따른 열전달성능 변화에 대한 연구

김영훈 · 김남진<sup>†</sup>

제주대학교 에너지공학과

## Study on Heat Transfer Performance Change According to Long-term Operation Using Carbon Nanotube and Graphene Nanofluid

Kim Young-Hun · Kim Nam-Jin<sup>†</sup>

Nuclear &amp; Energy Engineering, Jeju National University

<sup>†</sup>Corresponding author: jnkim@jejunu.ac.kr

### Abstract

Critical heat flux refers to the sudden decrease in boiling heat transfer coefficient between a heated surface and fluid, which occurs when the phase of the fluid near the heated surface changes from liquid to vapor. For this reason, critical heat flux is an important factor for determining the maximum limit and safety of a boiling heat transfer. Recently, it is reported that the nanofluid is used as a working fluid for the critical heat flux enhancement. However, it could be occurred nano-fouling phenomena on the heat transfer surface due to nanoparticles deposition, when the nanofluid is applied in a heat transfer system. In this study, we experimentally carried out the effects of the nano-fouling phenomena in oxidized multi-wall carbon nanotube and oxidized graphene nanofluid systems. It was found that the boiling heat flux decreased by hourly 0.04 and 0.03 kW/m<sup>2</sup>, also the boiling heat transfer coefficient decreased by hourly 11.56 and 10.72 W/m<sup>2</sup>·K, respectively, in the thermal fluid system using oxidized multi-wall carbon nanotube or oxidized graphene nanofluid.

**Keywords:** 임계 열유속(Critical heat flux), 열전달 계수(Heat transfer coefficient), 유동 비등(Flow boiling), 파울링(Fouling), 나노유체(Nanofluid), 장기운전(Long-term operation)

 OPEN ACCESS


Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.37, No.1, pp.15-23, February 2017  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.1.015>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 17 August 2016

Revised: 15 December 2016

Accepted: 10 January 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

1995년 비등 열전달 시스템에서 임계 열유속(Critical Heat Flux, CHF), 열전달 계수 등이 중요한 인자로 여겨진다. 임계 열유속 발생 시 열전달 표면의 온도가 급격하게 상승하여 열전달 시스템에 물리적 파괴 현상이 발생되기 때문에 임계 열유속은 비등 열전달 영역의 한계를 나타낸다. 그리고 열전달 계수는 표면온도와 포화온도의 차 및 밀도차에 의해 야기된 체적력, 잠열, 표면장력, 액체 또는 증기의 열물성값들에 의해 영향을 받는다<sup>1)</sup>. 하지만 열전달 계수는 열효율에 큰

영향을 미치기 때문에 열효율 향상에 있어 매우 중요한 인자이다. 이에 따라 임계 열유속 및 열전달 계수를 향상시키기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있다.

Park et al.은 순수 물에 산화처리된 탄소나노튜브를 분산시킨 나노유체를 사용하여 풀 비등 열전달 실험을 수행하였다. 체적비가 0.0001%, 0.001%, 0.01%인 탄소나노튜브 나노유체를 이용하였으며, 실험결과 산화처리된 탄소나노튜브를 사용할 경우 비등 열전달 계수는 0.01 vol%에서 최대 26.9%, 임계 열유속은 0.001vol%에서 최대 150%까지 증가하는 것을 확인하였다<sup>2)</sup>. Ahn et al.은 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )을 분산시킨 나노유체를 사용하여 풀 및 유동 비등에서의 임계 열유속을 측정하였으며, 임계 열유속이 향상되었다고 보고하였다<sup>3)</sup>.

Kim et al.은 그래핀 콜로이드와 알루미늄 나노유체를 혼합시킨 이원 혼합물을 이용하여 풀 비등 실험을 수행하였으며, 금속 나노유체에 그래핀 콜로이드를 첨가할 경우 임계 열유속이 순수 물보다 300%까지 증가하는 것을 확인하였다<sup>4)</sup>. 이와 같이 우수한 열적특성을 갖는 나노유체를 비등 열전달 시스템에서 작동유체로 사용할 경우 열전달 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 Das et al.은 나노유체를 지속적으로 사용할 경우 열전달 표면에 나노 입자들의 침착현상(fouling)이 발생하게 되며 이러한 문제는 지속적인 연구가 필요하다고 보고하였다<sup>5)</sup>. 따라서 본 연구에서는 나노유체의 사용 시 계속운전에 따른 비등 열전달 특성을 파악하기 위하여 나노유체 사용시간에 따른 비등 열유속 및 열전달계수 측정 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서는 열유속 및 열전달 계수 측정을 위하여 S.S. Park et al.의 임계 열유속 실험장치를 참고하였다<sup>6)</sup>. Fig. 1~Fig. 3은 본 연구에서 사용된 열유속 및 열전달 계수 측정 실험 장치 및 환류 냉각기, 시편의 개략도이다. 실험 장치는 크게 반응 용기와 제어부로 구성되었다. 반응용기는 비등상태 및 열유속을 발생 시키고 제어부는 열유속 및 반응용기 내의 온도를 제어한다.

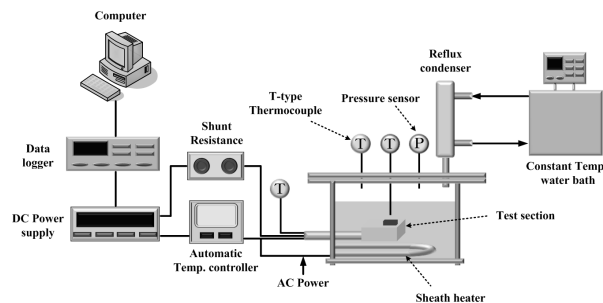


Fig. 1 Schematic diagram of CHF experimental apparatus

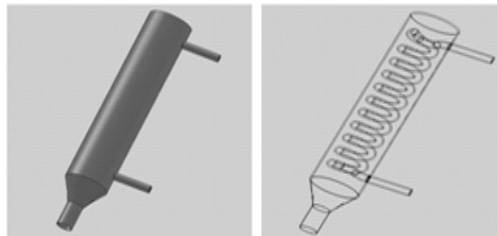


Fig. 2 Schematic diagram of reflux condenser

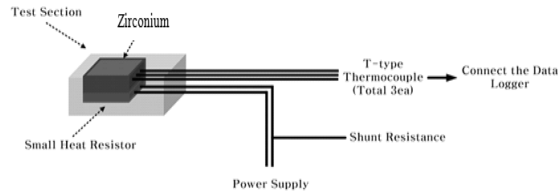


Fig. 3 Schematic diagram of heat transfer test section

반응용기는 장기 운전에 따른 열유속 및 열전달 계수 측정 실험을 안정적으로 수행할 수 있도록 스테인레스 합금(SUS 316)을 사용하였으며, 반응용기 내의 압력을 안정적으로 유지하기 위하여 밀폐형으로 제작하였다. 그리고 장기 운전에 따른 열유속 및 열전달 계수 측정 실험과정을 시각적으로 관찰이 가능하도록 직경 45 mm의 석영창을 설치하였다. 또한 반응용기 내의 수위를 유지시켜주기 위하여 반응용기 상단은 환류 증류기(SUS 316)를 부착된 상태로 제작하고 환류 증류기에 저온순환수조를 결속시켜 증발된 증기가 응축되도록 하였다. 그리고 반응용기 내부에 1개의 압력센서, 2개의 온도센서(T-type)를 설치하여 반응용기 내부의 압력과 상단 온도, 중단 온도를 측정하였다. 비등상태를 유지시켜주기 위하여 반응용기 내부에 직경 8 mm의 시즈히터를 설치하였다.

반응용기 내부의 열유속 및 열전달 계수 측정 실험 시편(37 mm×40 mm×30 mm)은 사각 평면 실험 시편 및 히터로 구성되어 있다. 사각 평면 실험 시편은 두께 9.53 mm, 폭 9.53 mm, 높이 4 mm로 제작되었다. 히터는 두께 9.53 mm, 폭 9.53 mm인 25 Ω의 열저항 히터를 사용하였다. 열저항 히터는 최대 350 W의 열을 발생시킬 수 있으며, 본 연구에서 사용된 지르코늄 시편과 접합할 경우 최대 3850 kW/m<sup>2</sup>의 열유속을 발생시킬 수 있다. 그리고 지르코늄 시편에는 구멍을 동일한 간격으로 3 개를 만들고, 각각의 구멍에 T-type 온도센서를 삽입하여 지르코늄 시편의 온도를 정확하게 측정할 수 있게 하였다. 또한 열저항 히터에서 발생하는 열을 최대한 단열하고, 지르코늄 실험 시편으로만 공급할 수 있도록 열유속 및 열전달 계수 측정 실험 시편의 재질을 열전도도가 매우 낮은 PEEK로 제작하였다.

열유속을 발생시키는 열저항 히터에 전력을 공급하기 위하여 직류전원공급기를 사용하였으며, 전력을 최대 750 W까지 공급할 수 있도록 하였다. 또한 열유속의 정확한 측정을 위하여 셉트 저항을 직류전원공급기와 열저항 히터 사이에 설치하고 전류 및 전압을 측정하였다. 그리고 실험장치의 파손 방지를 위하여 온도조절기를 설치하였고 실험 시편의 온도가 155°C 이상이 될 경우 전력이 차단되도록 설정하였다.

데이터 로거 및 컴퓨터, 소프트웨어를 이용하여 실험데이터를 모니터링하고 실험 데이터를 수집, 저장하였다.

## 2.2 실험 방법

### (1) 산화처리된 탄소나노튜브 및 그래핀 나노유체의 제조

본 연구에서는 나노유체를 제조할 때, 나노유체의 분산안정성 확보를 위해 나노유체의 기계적 분산방법과 화학적 개질에 의한 분산방법을 이용하여 나노유체를 제조하였다. 나노유체의 기계적 분산방법은 500 W급 초음파 분산기를 이용하였다. 본 연구에서는 2시간동안 초음파 분산하여 0.001 vol%인 산화처리된 탄소나노튜브 나노유체(CM-100)와 0.01 vol%인 산화처리된 그래핀 나노유체(M-15)를 제조하였다.

### (2) 열유속 및 열전달 계수 측정 실험방법

나노 유체의 계속운전에 따른 열유속 및 열전달 계수 측정 실험방법은 먼저 반응용기에 나노유체를 충전한다. 반응용

기 내부에 있는 나노유체의 온도를 시즈히터를 이용하여 목표한 온도까지 상승 시킨다. 나노 유체의 온도가 원하는 온도에 도달한 것을 확인한 후, 직류전원공급기를 이용하여 열저항 히터에 전력을 공급하고, 열전달 시편에 열유속을 발생시킨다. 실험은 각각 24시간, 48시간, 72시간 동안 수행하였으며, 실험 시작 시 비등 열유속은  $200 \text{ kW/m}^2$ 으로 고정하고 각각의 시간 동안 나노유체의 침착현상에 따른 비등 열유속과 열전달계수의 변화를 측정하였다. 실험이 끝난 다음에는 실험장비를 분리하고 열전달 실험 시편과 반응용기를 세척하였다. 또한 열전달 실험 시편의 표면을 균일하게 하기 위하여 2000번 사포를 사용하여 다시 실험을 수행하였다.

본 연구에서 비등 열전달계수 및 임계 열유속은 대류 열전달 방정식(1)을 이용하여 계산하였다. 온도센서가 설치된 비등 열전달 실험 시편 표면에서의 국부 열전달계수는 식(2)에 의해서 계산하였으며, 공급된 열량 Q는 식(3)를 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  $q''$ ,  $T_w$ ,  $T_{sat}$ ,  $h$ ,  $Q$ ,  $A$ ,  $I$ ,  $V$ 는 각각 열유속( $\text{kW/m}^2$ ), 열전달 실험 시편 표면온도(K), 나노유체의 포화온도(K), 열전달 계수( $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$ ), 공급열량(W), 열전달 면적( $\text{m}^2$ ), 전류(A), 전압(V)이다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험장치의 신뢰성

본 연구에서 비등 열전달 실험의 불확실성에 대한 해석은 Kline and McClintock의 식을 이용하였다<sup>7)</sup>. 본 연구에서 사용된 열유속 및 열전달 계수에 관한 식(1)~(3)을 보면, 열유속은 열전달 계수, 실험시편의 표면 온도 그리고 작동유체의 온도차에 의존하는 것을 알 수 있다. 또한 열전달 계수는 전류, 전압, 시편의 면적, 시편의 표면온도, 작동유체의 온도에 의존하는 것을 알 수 있으며, 열유속 및 열전달 계수는 다음의 함수로 표현된다.

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

$$h = h(I, V, L, T_{wall}, T_{sat}) \quad (5)$$

열유속 및 열전달 계수에 대한 불확실성은 열유속 및 열전달 계수에 영향을 미치는 인자들을 이용하여 계산하였으며, 식은 다음과 같다.

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

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall}}}{T_{wall}}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{sat}}}{T_{sat}}\right)^2} \quad (7)$$

여기서  $U_{q'}$ ,  $U_h$ ,  $U_{T_{wall}-T_{sat}}$ ,  $U_I$ ,  $U_V$ ,  $U_L$ ,  $U_{T_{wall}}$ ,  $U_{T_{sat}}$  는 각각 열유속, 열전달 계수, 실험시편의 표면온도 및 나노유체의 온도차, 전류, 전압, 실험시편의 길이의 불확실성이다. 식(6), (7)에 의하여 계산된 열유속 및 열전달 계수의 불확실성은 각각  $\pm 2.2\%$ ,  $\pm 6.7\%$ 로 나타났다.

### 3.2 나노유체의 분산 안정성

#### (1) 산화처리된 탄소나노튜브 나노유체

Fig. 4에 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체와 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 시간에 따른 분산 안정성 차이를 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 분산 직후에는 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브 모두 유체 내에 안정적으로 분산되어 그 차이를 확인할 수 없음을 볼 수 있다. 하지만 24시간이 지난 후에는 산화처리되지 않은 다중벽 탄소나노튜브 CM-100은 대부분 가라앉아 분산 안정성이 감소하고, 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 CM-100은 분산 안정성이 계속 유지되고 있음을 볼 수 있다.



**Fig. 4** Comparison of stability of dispersion according to elapsed time after ultrasonic dispersion and oxidation treatment with carbon nanotube nanofluids



**Fig. 5** Comparison of stability of dispersion according to elapsed time after ultrasonic dispersion and oxidation treatment with graphene nanofluids

#### (2) 산화처리된 그래핀 나노유체

Fig. 5에 그래핀 M-5와 산화처리된 그래핀 M-5 나노유체의 시간에 따른 분산 안정성 차이를 나타내었다. 그림을 보

면 알 수 있듯이 분산 직후에는 두 종류의 그래핀 모두 유체 내에 안정적으로 분산되어 그 차이를 확인할 수 없음을 볼 수 있다. 하지만 24시간이 지난 후에는 그래핀은 대부분 가라앉아 분산 안정성이 감소하고, 산화처리된 그래핀은 분산 안정성이 계속 유지되고 있음을 볼 수 있다.

### 3.3 열유속

Fig. 6는 시간에 따른 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 비등 열유속 변화를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 나노유체의 사용시간이 증가함에 따라 비등 열유속은 서서히 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 비등 열유속은 실험시작 시  $200 \text{ kW/m}^2$ 에서 실험종료 뒤에는  $197.1 \text{ kW/m}^2$ 으로 감소하였으며, 시간당 열유속 감소율은 약  $0.04 \text{ kW/m}^2$ 임을 알 수 있었다. 이는 나노유체 사용 시 나노입자가 비등 열전달 표면에 서서히 침착됨으로 인하여 비등 열유속이 서서히 감소된 것으로 판단된다.

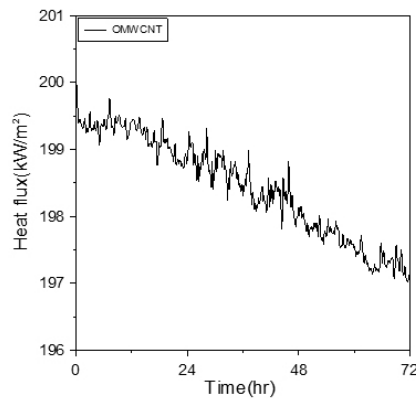


Fig. 6 Boiling heat flux of oxidized multi-walled carbon nanotubes nanofluids over time

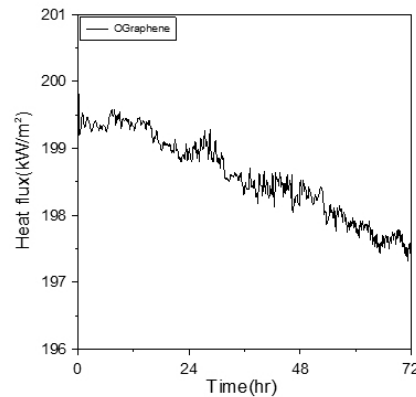


Fig. 7 Boiling heat flux of oxidized graphene nanofluids over time

Fig. 7은 시간에 따른 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열유속 변화를 나타낸 그래프이다. 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 비등 열유속과 마찬가지로 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열유속 또한 사용시간이 증가함에 따라 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 비등 열유속은 실험시작 시  $200 \text{ kW/m}^2$ 에서 실험종료 뒤에는  $197.8 \text{ kW/m}^2$ 으로

로 감소하였으며, 시간당 열유속 감소율은 약  $0.03 \text{ kW/m}^2\text{임}$ 을 알 수 있었다. 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열유속 감소율은 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브의 비등 열유속 감소율보다 적다는 것을 확인하였으며, 이는 산화처리된 그래핀 나노유체의 나노입자 침착정도가 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브보다 적기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 실험결과는 장시간 나노유체 사용 시 열전달 시스템의 성능이 크게 떨어질 수 있다는 것을 확인할 수 있는 결과이며, 이에 대한 메커니즘 규명 및 이를 방지할 수 있는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 3.4 열전달 계수

Fig. 8는 시간에 따른 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 비등 열전달계수 변화를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 나노유체의 사용시간이 증가함에 따라 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체에서의 비등 열전달계수는 이와 반대로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 비등 열전달계수는 실험시작 시  $5424.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 실험종료 뒤에는  $4592.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 크게 감소함을 확인할 수 있었다. 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 시간당 비등 열전달계수 감소율은 약  $11.56 \text{ W/m}^2\cdot\text{K임}$ 을 알 수 있었다. 이는 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 사용시간이 증가함에 따라 탄소나노튜브 나노입자가 비등 열전달 표면에 침착되며, 이로 인하여 비등 열전달 표면의 온도가 상승하기 때문인 것으로 판단된다.

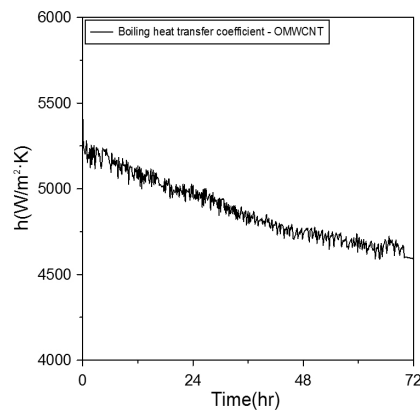


Fig. 8 Boiling heat transfer coefficient of oxidized multi-walled carbon nanotubes nanofluids over time

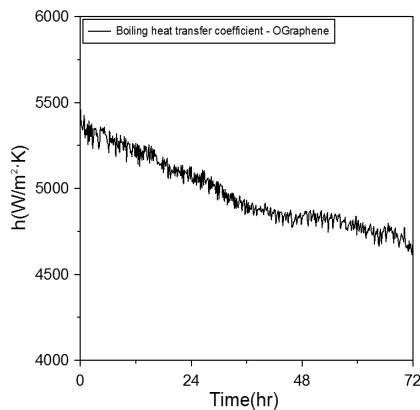


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient of oxidized graphene nanofluids over time

Fig. 9은 시간에 따른 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수 변화를 나타낸 그래프이다. 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 비등 열유속과 마찬가지로 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수 또한 사용시간이 증가함에 따라 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수는 비등 열전달계수는 실험시작 시  $5466.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 실험종료 뒤에는  $4694.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 크게 감소함을 확인할 수 있으며, 시간당 비등 열전달계수 감소율은 약  $10.72 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 임을 알 수 있었다. 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수 감소율은 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브의 비등 열전달계수 감소율보다 적음을 알 수 있으며, 이는 앞서 설명하였듯이 산화처리된 그래핀 나노유체의 나노입자 침착정도가 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브보다 적기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 실험결과는 원전시스템에 나노유체 적용 시 큰 문제로 작용할 수 있기 때문에 나노유체의 실적용을 위해서는 이와 같은 문제를 해결하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.5 표면 특성 변화

본 연구에서는 나노유체 사용 시 시간에 따른 비등 열전달 표면 특성 변화를 확인하기 위하여 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브와 산화처리된 그래핀 나노유체에서 각각 24시간, 48시간, 72시간 동안 비등 열전달 측정 실험 종료 후의 열전달 실험 시편 표면을 접촉각, SEM, 3D나노형상측정시스템을 통하여 관찰하였다.

Table 1은 시간에 따른 비등 열전달 측정 실험 종료 후 비등 열전달 실험 시편 표면의 접촉각과 표면 거칠기를 정리하여 나타낸 표이다. 표를 보면 알 수 있듯이 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀 모두 나노유체 사용시간이 증가할수록 접촉각이 크게 감소하고 있음을 확인할 수 있으며, 이와는 반대로 표면 거칠기는 증가한 것은 확인할 수 있다. 이는 나노유체의 사용시간이 증가할수록 나노입자의 침착현상이 크게 증가한다는 것을 의미한다. 또한 J.M. Kim et al에 의하면, 나노입자의 침착현상은 핵 비등 열전달 이후에 발생된다고 보고하였다<sup>8)</sup>. 이에 따라 열전달표면에 형성되는 침착 현상은 가열에 의한 표면 증착현상으로 사료되며, 이와 같은 나노입자의 침착현상은 비등 열전달 시스템의 성능을 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

**Table 1** Contact angle and roughness on surface of boiling heat transfer over time

Time (h)	Contact angle (°)		Roughness (μm)	
	OMWCNT nanofluid	OGraphene nanofluid	OMWCNT nanofluid	OGraphene nanofluid
0	49.4		0.11	
24	12.8	14.6	0.37	0.37
48	5.3	7.3	0.53	0.41
72	0	0	0.72	0.47

## 4. 결론

본 연구에서는 나노유체 적용시 시간에 따른 비등 열전달 특성을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀 나노유체의 시간당 비등 열유속 감소율은 각각  $0.04 \text{ kW/m}^2$ ,  $0.03 \text{ kW/m}^2$ 임을 알 수 있었다. 그리고 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열유속 감소율은 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브의 비등 열유속 감소율보다 적다는 것을 확인하였다.
- (2) 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀 나노유체의 시간당 비등 열전달계수 감소율은 약  $11.56 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,



10.72 W/m<sup>2</sup>·K임을 알 수 있었다. 또한 산화처리된 그래핀 나노유체의 비등 열전달계수 감소율은 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브의 비등 열전달계수 감소율보다 적다는 것을 확인하였다.

- (3) 표면 특성 변화 측정 결과 산화처리된 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀 모두 나노유체 사용시간이 증가할수록 접촉 각이 크게 감소하고 있음을 확인할 수 있으며, 이와는 반대로 표면 거칠기는 증가한 것은 확인할 수 있다. 이는 나노유체의 사용시간이 증가할수록 나노입자의 침착현상이 크게 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 열전달표면에 형성되는 침착 현상은 가열에 의한 표면 증착현상으로 사료된다.
- (4) 열유속, 열전달 계수, 표면변화 측정 실험을 통하여 열전달 시스템에 나노유체 적용 시 큰 문제로 작용할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 나노유체의 실적용을 위해서는 이와 같은 문제를 해결하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후기

이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

## REFERENCE

1. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., Principles of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, Wiley, pp. 653-693, 2012.
2. Park, K. J., Lee, Y. H., Jung, D. S., and Shim, S. E., Boiling Heat Transfer Coefficients of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes Up to Critical Heat Fluxes, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 35, No. 7, pp. 665-676, 2011.
3. 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.
4. Kim, J. H., Kim, J. M., Park, S. C., Lee, C. H., Kim, M. H., and Ahn, H. S. Experimental Study of the Effects of Both Nanofluids and Graphene Colloids on Critical Heat Flux Enhancement, 2015 Workshop Presentation File of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 118-119, 2015.
5. Das, S. K., Choi, S. U. S., and Yu, W., Nanofluids Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
6. Park, S. S. and Kim, N. J. Critical Heat Flux Enhancement in Pool-boiling Heat Transfer Using Oxidized Multi-wall Carbon Nanotubes, International Journal of Energy Research, 1391-1401, 2015.
7. 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.
8. Kim, J. M., Kim, T. J. Kim, J. Y. Kim, M. H., and Ahn, H. S., Effect of Graphene Oxide Coating Layer on Critical Heat Flux Enhancement Under Pool Boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer 77, pp. 919-927, 2014.