

탄소나노튜브 입자의 길이와 혼합비율이 나노유체의 비등 열전달에 미치는 영향에 대한 연구

A Study on the Influence of Boiling Heat Transfer of Nanofluid with Particle Length and Mixing Ratio of Carbon Nanotube

박성식(Sung-Seek Park)¹, 김우중(Woo Joong Kim)¹, 김종윤(Jong Yoon Kim)²,
전용환(Yong-Han Jeon)³, 김남진(Nam-Jin Kim)^{1†}

¹제주대학교 에너지공학과, ²서정대학교 소방안전관리과, ³상지영서대학교 소방안전과

¹Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

²Department of Fire Safety Management, Seojeong College, Yangju, 482-777, Korea

³Department of Protection and Safety, Sang Ji Young seo College, Wonju 220-713, Korea

(Received August 8, 2014; revision received October 1, 2014; Accepted: October 6, 2014)

Abstract A boiling heat transfer system is used in a variety of industrial processes and applications, such as refrigeration, power generation, heat exchangers, cooling of high-power electronics components, and cooling of nuclear reactors. The critical heat flux (CHF) is the thermal limit during a boiling heat transfer phase change; at the CHF point, the heat transfer is maximized, followed by a drastic degradation beyond the CHF point. Therefore, Enhancement of CHF is essential for economy and safety of heat transfer system. In this study, the CHF and heat transfer coefficient under the pool-boiling state were tested using multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) CM-95 and CM-100. These two types of multi-wall carbon nanotubes have different sizes but the same thermal conductivity. The results showed that the highest CHF increased for both MWCNTs CM-95 and CM-100 at the volume fraction of 0.001%, and that the CHF-increase ratio for MWCNT CM-100 nanofluid with long particles was higher than that for MWCNT CM-95 nanofluid with short particles. Also, at the volume fraction of 0.001%, the MWCNT CM-100 nanofluid indicated a 5.5% higher CHF-increase ratio as well as an approximately 23.87% higher heat-transfer coefficient increase ratio compared with the MWCNT CM-95 nanofluid.

Key words Carbon nanotube(탄소나노튜브), Nanofluid(나노유체), Boiling heat transfer(비등 열전달), Critical heat flux(임계 열유속), Heat transfer coefficient(열전달 계수)

† Corresponding author, E-mail: jnkim@jejunu.ac.kr

1. 서 론

비등 열전달은 각종 발전 시스템, 냉동 및 냉장, 열교환기, 고발열 전자부품 냉각, 원전 시스템과 같은 다양한 산업에서 매우 중요하게 다루어지고 있다. 그리고 임계 열유속 현상은 열전달이 매우 효과적으로 일어나는 비등 열전달 영역의 한계를 나타내며, 임계 열유속 발생 시 열전달 시스템의 물리적 파괴현상이 발생할 수 있다. 따라서 임계 열유속은 원자로 및 핵연료, 증기발생기, 고집적 전자부품 등의 냉각장치 설계 등 열전달 시스템에서 매우 중요하게 고려되고 있으며, 열전달 시스템의 안정성과 효율 극대화를 위해서는 임계 열유속 향상이 필수적이다. 이와 관련하여 최

근에는 기본유체보다 높은 열적특성을 나타내는 나노유체를 열전달 시스템에 적용할 경우 임계 열유속이 증가한다고 보고되었다.⁽¹⁾

나노유체는 유체 내에 열전도도가 우수한 nm 크기의 고체입자들이 안정적으로 부유되어 있는 새로운 개념의 유체로 기본 유체보다 높은 열전달 특성을 가지고 있기 때문에 차세대 열교환 매체로서 기대되고 있다. 따라서 많은 연구자들이 나노유체의 열전달 특성에 대한 연구를 수행하고 있다.⁽¹⁾ 특히, 최근에는 나노유체에 첨가되는 여러 가지 나노입자들 중에서 높은 열적 특성을 나타내며, 나노과학기술의 발달로 인하여 대량생산이 가능하게 된 탄소나노튜브 나노입자가 주목을 받고 있다. 탄소나노튜브는 SP² 결합에 의해 탄소 원

자 6개로 이루어진 육각형들이 벌집모양의 배열을 이루며 튜브와 같은 형상을 가지고 있는 입자를 말하며, 구조적, 화학적으로 매우 안정하고 우수한 기계 및 전기적 특성과 높은 열전달 특성을 보유하고 있어 차세대 소재로서 기대되고 있다.^(1, 5, 6)

Table 1에 나노유체의 풀 비등 열전달 특성에 대한 연구들을 간단히 정리하여 나타내었다. 나노유체의 열전달 특성에 대하여 연구한 연구자들은 공통적으로 나노유체를 이용하였을 때 비등 열전달 특성이 향상되었다고 보고하였으며, 나노유체에 첨가되는 나노입자의 혼합비율이 나노유체의 임계 열유속과 비등 열전달 계수에 영향을 미친다고 보고하였다.⁽⁹⁾ 하지만 나노유체에 첨가되는 나노입자의 크기가 나노유체의 비등 열전달 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 상당히 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 동일한 열전도도 특성을 가지고 있으나 입자의 크기가 다른 두 종류의 탄소나노튜브를 첨가한 나노유체를 제조하여 풀 비등 열전달 실험을 수행하였으며, 나노유체에 첨가되는 입자의 크기와 혼합비율이 나노유체의 임계 열유속과 비등 열전달 계수에 미치는 영향을 비교분석 하였다.

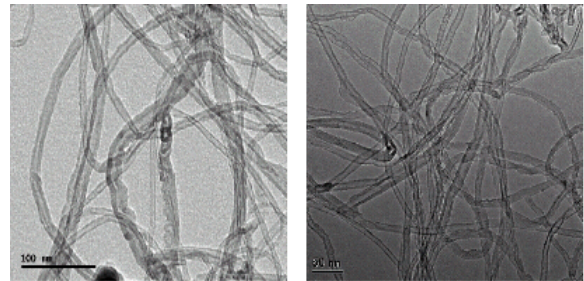
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 탄소나노튜브 나노유체

본 연구에서는 CVD(Chemical Vapor Deposition)법으로 제조된 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Wall Carbon Nanotube, MWCNT, Hanwha-nanotech Co.) CM-

Table 2 Properties of MWCNTs

Properties	MWCNT	
	CM-95	CM-100
Diameter	10~15 nm	10~15 nm
Length(μm)	10~20	~200
Purity(wt.%)	95	95
Bulk Density(g/cm^3)	0.1	0.05
True density(g/cm^3)	1.8	1.8
Thermal Conductivity($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	3000	3000
Surface Area(m^2/g)	200	225



(a) CM-95

(b) CM-100

Fig. 1 SEM micrographs of MWCNTs.

95와 CM-100을 사용하였으며, Table 2에 본 연구에서 사용된 다중벽 탄소나노튜브의 자세한 물성치를 나타내었다. 표를 보면 알 수 있듯이 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브는 동일한 열전도도 특성을 가지고 있으며, 길이가 다른 특성을 가지고 있다. Fig. 1에 본 연구에

Table 1 CHF of nanofluids reported in literature

Author names	Type of heater	Nanofluids	results of research
You et al. ⁽²⁾	Cu plate	Al ₂ O ₃ -water	◦ CHF 200% 증가
Liu and Liao ⁽³⁾	Cu plate	CuO and SiO ₂ -water/ (C ₂ H ₅ OH)	◦ CHF가 증가함에 따라 비등 열전달 계수도 이와 비례하여 증가 ◦ 히터표면에 나노입자 침착 ◦ 표면 젖음성이 증가
Suriyawong and Wongwis ⁽⁴⁾	Cu plates	TiO ₂ -water	◦ 0.0001 vol%에서 비등 열전달 계수 15%의 증가
Park and Jung ⁽⁷⁾	Stainless steel tube	Carbon nanotubes -water/R-22	◦ 100 kW/m ² 이하에서 비등 열전달 계수 약 30% 정도 증가
Liu et al. ⁽⁸⁾	Cu plate	Carbon nanotubes -water	◦ 비등 열전달 계수와 CHF가 같이 증가 ◦ 나노입자 혼합비율이 나노유체의 CHF와 비등 열전달 계수에 크게 영향을 미침 ◦ 열전달 표면에서 탄소나노튜브 나노입자가 침착된 다공성 표면을 관찰

서 사용된 다중벽 탄소나노튜브의 SEM 사진을 나타 내었다. 1차원 구조를 가진 다중벽 탄소나노튜브는 가 늘고 긴 튜브 형태의 모양을 하고 있음을 확인 할 수 있다.

나노유체의 분산안정성 확보를 위하여 본 연구에서 는 나노유체의 기계적 분산방법을 적용하였으며, 500 W급 초음파 분산기(VC-505, You-ng Jin Co.)의 stain- less probe를 탄소나노튜브 입자가 0.0001~0.1 vol%의 비율로 혼합된 유체 내에 삽입하고 2시간 동안 초음파 분산하여 나노유체를 제조하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 나노유체 임계 열유속 측정 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 비등 상태에서 열유속을 발생시킬 수 있는 반응용기와 발생 되는 열유속 및 반응용기 내의 온도를 제어할 수 있는 제어부로 구성되어 있다.

Fig. 3과 같은 반응용기 내부의 비등 열전달 실험 시편은 비등 열전달이 일어나는 지르코늄 재질의 사각 평면 실험 시편(9.53 mm×9.53 mm×4 mm)과 시편 에 열을 공급할 수 있는 25 Ω의 열저항 히터(CCR-375-1, Compo- nent Gene-ral Inc.)로 구성되어 있다. 열저항 히터에서 발생되는 열을 최대한 단열하고, 비등 열전달 실험 시편에서의 열손실을 최소화하기 위하여 열저항 히터와 지르코늄 시편을 직접 접합하였으며, 열전달 실험 시편 재질을 열전도율이 0.25 W/m·K으로 아주 낮은 PEEK 를 사용하여 지르코늄 실험 시편으로만 열이 공급될 수 있도록 하였다. 또한 반응용기에서 임계 열유속이 발생하는 순간 비등 열전달 실험 시편의 온도가 급격 히 상승하여 열저항 히터가 파손되기 때문에 온도조절

기(NX9, Hanyoung nux)를 설치하여 155℃ 이상이 되 면 자동으로 직류전원공급기에서 공급되는 전력이 차 단되게 하였다.

반응용기에 나노유체를 충전한 뒤 실험압력과 실험 온도로 조절하고 열유속을 발생시킨다. 본 연구에서는 열유속을 10 kW/m²씩 증가시켰으며, 증가시킨 열유속 에서 실험시편의 온도가 일정하게 유지되면 다시 열유 속을 증가시키면서 나노유체의 임계 열유속까지 실험 을 수행하고 측정된 데이터를 수집하였다. 본 실험에 서는 실험압력을 19.61 kPa으로 일정하게 유지하였으며, 실험온도는 이 때 실험압력에서의 증발온도인 60℃로 온도조절기를 이용하여 일정하게 유지하였다.

본 연구에서 풀 비등 임계 열유속은 대류 열전달 방 정식(1)을 이용하여 계산하였다. 온도센서가 설치된 비 등 열전달 실험 시편 표면에서의 비등 열전달 계수는 식(2)를 통하여 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'' , h , A , T_w , T_{sat} , Q , I , V 는 각각 열유속 (kW/m²), 열전달 계수(kW/m²·K), 열전달 면적(m²), 비 등 열전달 실험 시편 표면온도(K), 실험유체의 포화온 도(K), 공급열량(W), 전류량(A), 전압강하(V)이다. 이 때 비등 열전달 실험 시편 표면온도는 시편에 삽입된 3개의 T-type 온도센서로 측정된 값들을 평균하여 사 용하였으며, 실제 실험시편 표면온도 T_{wall} 는 측정된 평 균온도 T_{ave} 를 식(4)과 같은 1차원 열전도 방정식을 이

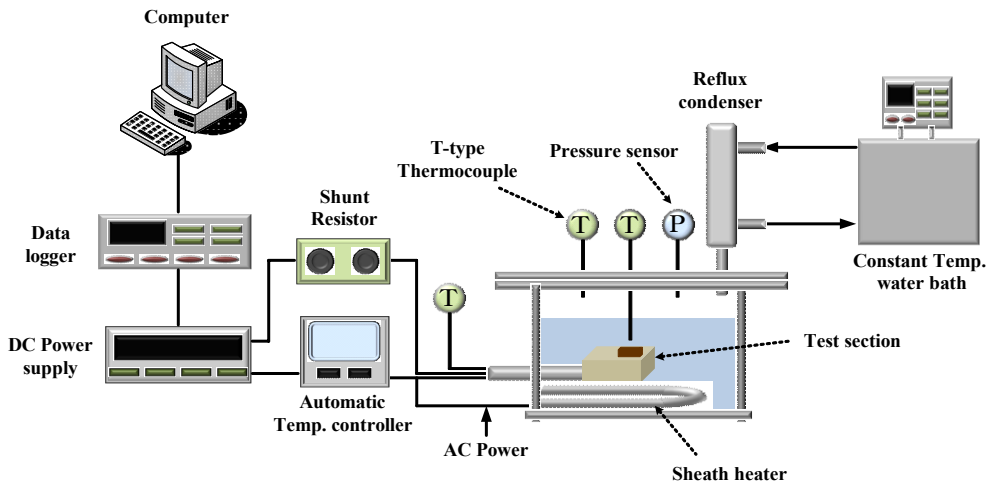


Fig. 2 Schematic diagram of CHF experimental apparatus.

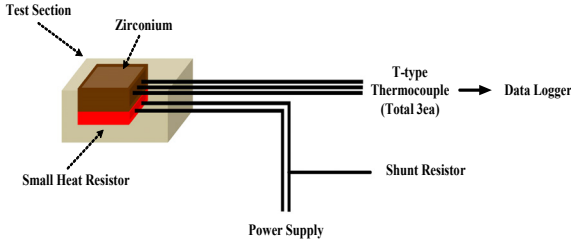


Fig. 3 Schematic diagram of test section.

용하여 계산하였다.

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

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

3. 실험결과

3.1 풀 비등 열전달 실험의 신뢰성 평가

본 연구에서는 먼저 실험장치 및 방법의 신뢰성과 재현성을 확인하기 위해 순수 물을 이용하여 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행하였다. 순수한 단일유체 풀 비등 실험의 경우 임계 열유속을 예측하기 위한 상관식은 Zuber가 제시한 임계 열유속 상관식이 가장 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서도 Zuber가 제시한 임계 열유속 상관식(5)를 이용하였으며, 순수 물에서 측정된 임계 열유속 실험 데이터와 비교하였다.⁽¹⁰⁾

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

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. 4는 Zuber의 예측식과 본 실험에서 측정된 순수 물의 임계 열유속 실험결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. Zuber가 제시한 예측식을 이용하여 계산한 임계 열유속은 560.48 kW/m²이며, 본 실험에서 측정된 순수 물의 임계 열유속과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 측정된 3번은 실험결과는 Zuber의 예측식과 5% 이내로 일치함을 확인하였으며, 측정된 비등 곡선 사이에서 뛰어난 재현성을 확인할 수 있었다.

또한 본 연구에서는 Kline and McClintock의 오차 전파 방법을 사용하여 본 실험에서 발생하는 실험오차를 계

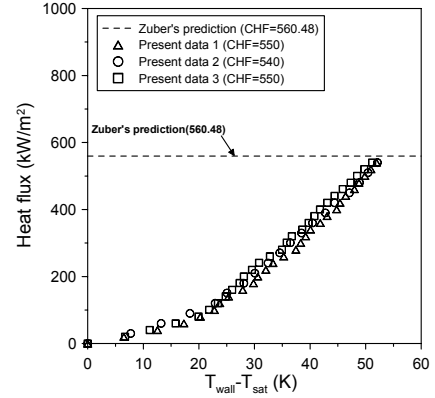


Fig. 4 Boiling curve of pure water.

Table 3 Experimental uncertainties

Parameter	Uncertainty
Current	±0.001 A
Voltage	±1 V
Length	±0.05 mm
Temperature	±0.5 °C

산하고, 실험의 불확실성에 대한 해석을 수행하였다.⁽¹¹⁾ Table 3에 전류, 전압, 길이, 온도 인자에 대한 불확실성을 나타내었으며, 열유속과 열전달 계수에 대한 불확실성을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_h}{h} \right)^2 + \left(\frac{U_{T_{wall} - T_{sat}}}{T_{wall} - T_{sat}} \right)^2} \quad (6)$$

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

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

3.2 탄소나노튜브의 크기 및 혼합비율에 따른 임계 열유속 실험결과

Fig. 5는 평면 히터에서 지르코늄 시편을 이용한 다중벽 탄소나노튜브 CM-95 나노유체의 체적비율에 따른 비등 곡선을 순수 물의 비등 곡선과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모든 체적

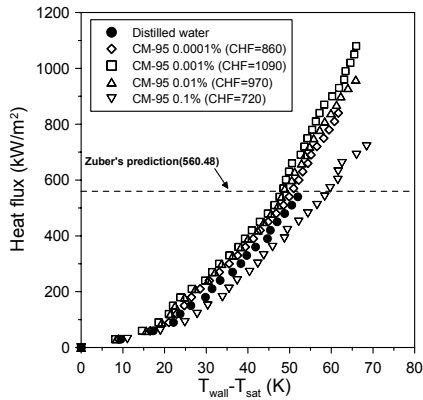


Fig. 5 Boiling curve of MWCNT CM-95.

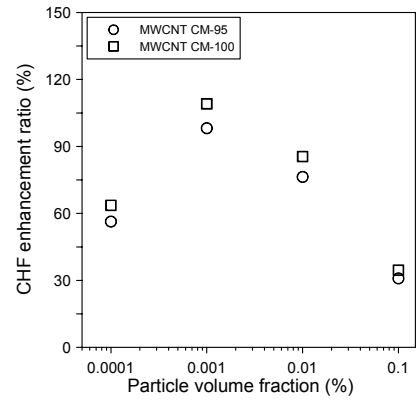


Fig. 7 Comparison of CHF enhancement ratio of MWCNT CM-95 and CM-100.

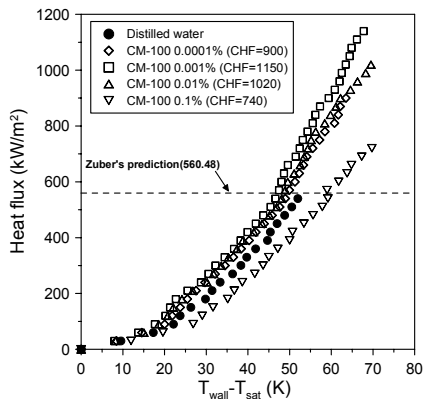


Fig. 6 Boiling curve of MWCNT CM-100.

비율에서 나노유체의 임계 열유속은 순수 물보다 증가하며, Zuber의 예측값 보다 높음을 확인할 수 있었다. 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%, 0.1 vol%에서 측정된 임계 열유속은 순수 물보다 각각 56.36%, 98.18%, 76.36%, 30.90% 증가함을 알 수 있었다. 그리고 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 체적비율이 0.01 vol%에서는 순수 물보다는 임계 열유속이 증가하지만 0.001 vol%보다는 낮아지게 되므로 임계 열유속을 향상시킬 수 있는 최적의 체적비율은 0.001 vol%임을 알 수 있었다. Park et al.은 나노입자가 포함된 나노유체와 나노입자들의 침착에 의해 변화된 열전달 시편 표면은 비등이 발생할 때, 비등의 하단으로 유체가 공급되는 것을 감소시키는 거대한 증기기포의 형성을 억제하거나 작은 기포들이 모여 큰 기포막이 생성되는 것을 방해하게 된다고 보고하였다.⁽¹²⁾ 따라서 모든 체적비율의 나노유체에서 핵 비등이 순수 물보다 더 오래 지속될 수 있기 때문에 임계 열유속은 순수한 물보다 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 체적비율에 따른 풀 비등 곡선을 비교하여 나타낸 그래

프이다. 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%, 0.1 vol%에서 측정된 임계 열유속은 순수 물보다 각각 63.64%, 109.09%, 85.45%, 34.55% 증가하였으며, 최적의 임계 열유속을 나타내는 체적비율은 CM-95 나노유체와 마찬가지로 0.001%임을 확인하였다. 그리고 0.1 vol%의 비등곡선의 과열도 60℃ 부근에서는 열유속은 증가했지만 과열도는 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 역전 임계 열유속 현상으로 Kim et al., Chen et al. 그리고 Ahn et al. 또한 이와 유사한 현상을 관찰하였다.^(13, 14, 15) 임계 열유속 근처에서 관찰되는 역전 임계 열유속 현상은 나노 또는 마이크로 구조를 가지고 있는 다공성층이 코팅된 비등 열전달 표면에서 관찰되는 현상이다. 비등이 일어나는 열전달 표면의 다공성층으로 유체가 흡입되어 비등의 하단으로 유체가 공급되며, 이 유체는 열전달 표면의 미세층(microlayer)을 증가시켜 임계 열유속의 발생을 지연시킨다. 따라서 열전달 표면의 과열도는 감소하고, 열유속은 증가될 수 있다.⁽¹⁶⁾

Fig. 7은 순수 물의 임계 열유속을 기준으로 다중벽 탄소나노튜브 CM-95와 CM-100 나노유체의 임계 열유속 증가율을 체적비율에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 다중벽 탄소나노튜브 CM-95와 CM-100 나노유체 임계 열유속 증가비율은 상당히 유사한 경향을 보이고 있으며, 두 종류의 나노유체 모두 0.001 vol%에서 가장 높은 임계 열유속 증가를 나타내었다. 모든 체적비율에서 입자의 길이가 긴 CM-100 나노유체의 임계 열유속 증가비율이 입자의 길이가 짧은 CM-95 나노유체의 증가비율보다 높다는 것을 알 수 있었다. 특히, 가장 높은 임계 열유속 증가를 나타낸 0.001 vol%에서 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 임계 열유속은 CM-95 나노유체보다 약 5.5% 높음을 알 수 있었다. 이와 같은 실험결과로 탄소나노튜브를 이용한 나노유체의 임계 열유속은

입자의 크기에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 길이가 긴 탄소나노튜브를 이용하여 제조한 나노유체의 효과가 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 이는 임계 열유속 증가의 주요 원인인 열전달 표면특성 변화가 나노입자의 크기와 체적비율에 따라 달라지기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 탄소나노튜브의 크기 및 혼합비율에 따른 비등 열전달 계수 실험결과

Fig. 8은 다중벽 탄소나노튜브 CM-95 나노유체의 체적비율에 따른 임계 열유속까지의 비등 열전달 계수를 순수 물의 비등 열전달 계수와 비교하여 나타낸 그래프이다. 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때와 동일한 과열도에서 측정된 비등 열전달 계수는 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%에서 순수 물보다 각각 4.70%, 10.15%, 9.10% 증가함을 알 수 있었으며, 0.1 vol%에서는 오히려 순수 물보다 10.44% 감소함을 확

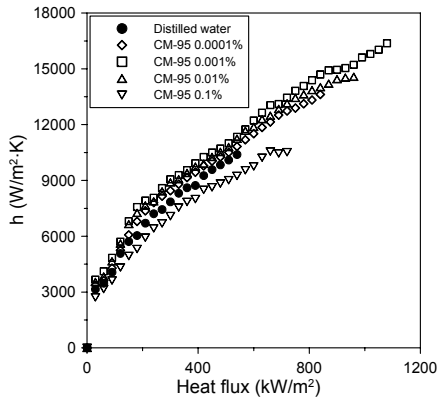


Fig. 8 Boiling heat transfer coefficient of MWCNT CM-95.

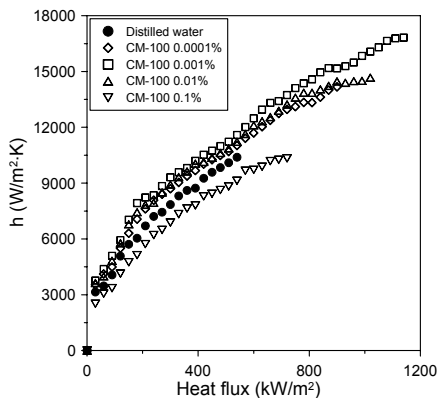


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient of MWCNT CM-100.

인할 수 있었다. 나노입자의 표면침착은 나노유체의 비등 시 기포의 밀면 액막에 존재하던 나노입자들이 유체의 기화에 의하여 히터 표면에 유착되면서 발생하게 되는데 나노입자들의 표면침착이 증가하게 되면 열전달 시편 표면에서의 활성 핵 기공을 감소시킨다. 이러한 활성 핵 기공의 감소는 비등 열전달을 촉진시키는 기포의 생성을 감소시키기 때문에 비등 열전달 계수가 감소한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 0.01 vol%의 체적비율에서부터는 나노입자의 표면침착이 열전달을 감소시킬 정도로 이루어진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 체적비율에 따른 비등 열전달 계수를 순수 물의 비등 열전달 계수와 비교하여 나타낸 그래프이다. 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때와 동일한 과열도에서 측정된 비등 열전달 계수는 0.0001 vol%, 0.001 vol%, 0.01 vol%에서 순수 물보다 각각 6.81%, 12.58%, 9.08% 증가함을 알 수 있었으며, 0.1 vol%에서는 순수 물보다 10.82% 감소함을 확인하였다.

Fig. 10은 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때와 동일한 과열도를 기준으로 다중벽 탄소나노튜브 CM-95와 CM-100 나노유체의 비등 열전달 계수 증가율을 체적비율에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 순수 물과 나노유체의 비등 열전달 계수를 동일한 조건에서 비교분석 하기 위하여 순수 물에서 임계 열유속이 발생했을 때, 순수 물과 나노유체의 공통 조건인 벽면 과열도를 기준으로 선정하였다. 0.001 vol%까지는 입자의 길이가 긴 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 비등 열전달 계수 증가율이 입자의 길이가 짧은 다중벽 탄소나노튜브 CM-95보다 높음을 알 수 있으며, 0.001 vol% 이후의 혼합비율에서는 두 종류의

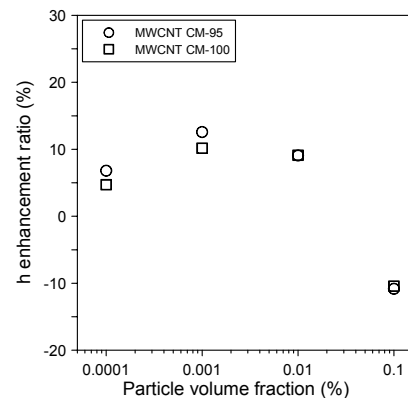


Fig. 10 Comparison of heat transfer coefficient enhancement ratio of MWCNT CM-95 and CM-100 at the excess temperature ($T_{wall} - T_{sat}$) that the CHF of distilled water is occurred.

나노유체 모두 유사한 증가율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브 나노유체 모두 0.001 vol%에서 가장 높은 비등 열전달 계수 증가율을 나타내었다. 이와 같은 실험결과는 탄소나노튜브 입자의 길이가 나노유체의 비등 열전달 계수에 영향을 미친다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 동일한 열전도도 특성을 가지고 있거나 크기가 다른 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 혼합비율에 따른 임계 열유속과 비등 열전달 계수 특성을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 크기가 다른 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브 나노유체를 이용하여 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행한 결과 두 종류의 나노유체 모두 0.001 vol%에서 가장 높은 임계 열유속 증가를 나타냄을 확인하였다.
- (2) 모든 체적비율에서 입자의 길이가 긴 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 임계 열유속 증가비율이 길이가 짧은 CM-95 나노유체의 증가비율보다 높다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브 모두 0.001 vol%에서 가장 높은 비등 열전달 계수 증가를 나타내었으며, 0.001 vol%까지는 입자의 길이가 긴 다중벽 탄소나노튜브 CM-100 나노유체의 비등 열전달 계수 증가율이 입자의 길이가 짧은 다중벽 탄소나노튜브 CM-95보다 높음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2014년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. Das, S. K., Choi, S. U., Yu, W., and Pradeep, T., 2008, *Nanofluids : Science and Technology*, John Wiley and Sons.
2. You, S. M., Kim, J. H., and Kim, K. H., 2003, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 16, pp. 3374-3376.
3. Liu, Z. H. and Liao, L., 2008, Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 9-10, pp. 2593-2602.
4. Suriyawong, A. and Wongwises, S., 2010, Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-water nanofluids at very low concentrations, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 8, pp. 992-999.
5. Ajayan, P. M., 1999, Nanotubes from carbon, *Chemical Reviews*, Vol. 99, pp. 1787-1799.
6. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., and Avouris, P., 2001, *Carbon nanotubes : Synthesis, Structure, Properties and Applications*, Springer Science and Business Media, New York.
7. Park, K. J. and Jung, D. S., 2007, Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 21-22, pp. 4499-4502.
8. Liu, Z. H., Yang, X. F., and Xiong, J. G., 2010, Boiling characteristics of carbon nanotube suspensions under sub-atmospheric pressures, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 7, pp. 1156-1164.
9. Barber, J., Brutin, D., and Tadrist, L., 2011, A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp. 1-16.
10. Zuber, N., 1958, On stability of boiling heat transfer, *ASME transactions*, Vol. 80, pp. 711-714.
11. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, *Mechanical Engineer*, Vol. 75, pp. 3-8.
12. Park, K. J., Jung, D. S., and Shim, S. E., 2009, Nucleate boiling heat transfer in aqueous solutions with carbon nanotubes up to critical heat fluxes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 6, pp. 525-532.
13. Kim, H. D., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L. W., 2009, On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 5, pp. 427-438.
14. Chen, R., Lu, M. C., Srinivasan, V., Wang, Z., Cho, H. H., and Majumdar, A., 2009, Nanowires for enhanced boiling heat transfer, *Nano Letters*, Vol. 9, No. 2, pp. 548-553.
15. Ahn, H. S., Kim, H. D., Jo, H. J., Kang, S. H., and Kim, M. H., 2009, Experimental investigation on the pool boiling critical heat flux of water-based alumina and titania nanofluids on a flat plate heater, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 33, No. 10, pp. 729-736.
16. Cieřliński, J. T., 2002, Nucleate pool boiling on porous metallic coatings, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, No. 7, pp. 557-564.