

열전달 향상을 위한 나노물질 코팅재료의 영향에 대한 연구

전용한¹ · 김남진[†]

상지영서대학교 소방안전과¹ · 제주대학교 에너지공학과[†]

Effect of nanoparticle material for heat transfer enhancement

Yong-Han Jeon¹ · Nam-Jin Kim[†]

Department of Fire and protection, Sangji-Youngseo College¹

Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University[†]

(Received February 19, 2019 / Revised March 26, 2019 / Accepted March 31, 2019)

Abstract: Nucleate boiling heat transfer is one of the most important phenomenon in the various industries. Especially, critical heat flux (CHF) refers to the upper limit of the pool boiling heat transfer region. Therefore, many researchers have found that CHF can be significantly increased by adding very small amounts of nanoparticles. In this study, the CHF and heat transfer coefficient were tested under the pool boiling state using copper and multi wall carbon nanotube nanoparticles. The results showed that two different types of nanoparticles deposited on the surface of two specimens made of the same material increased the heat flux in the nanoparticles with high conductivity, and there was no difference in the critical heat flux when the same material nanoparticles were deposited on the two different specimen surfaces.

Key Words: CHF, Copper, MWCNT, Nanoparticle, Pool boiling

1. 서 론

비등 열전달은 다양한 산업에서 여러 종류의 열전달 시스템에 적용되어 왔으며, 비등 열전달 시스템의 성능을 높이기 위해 임계 열유속을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 연구 및 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 임계 열유속이란 비등 열전달에서 가열조건이 변함에 따라 가열면의 열유속이 증가하다가 특정 임계점에서 열전달 효율이 급격히 감소하면서 막 비등영역으로 넘어가는 것을 말하며 이 현상이 일어나면 면서 각종 열전달 시스템의 물리적 파괴 현상이 발생되게 된다. 따라서 열전달 시스템의 안전운행과 성능을 높이기 위해서는 임계 열유속 향상이 필수적이다. 최근에는 열전달 표면에 나노입자를 코팅하는 나노코팅 역시 열전달 시스템의 임계 열유속을 향상시킬 수 있으며, 나노입자 물질의 종류, 표면 코팅의 방법, 시간 및 형태에 따라

다양한 연구 결과가 보고되었다.

Kim et al (2007)은 풀 비등에서 나노유체의 임계 열유속 특성에 관한 실험적 연구를 수행한 결과 TiO_2 나 Al_2O_3 가 함유된 나노유체의 임계 열유속이 순수한 물의 임계 열유속보다 최대 100% 향상되었다는 것을 보여주었다¹⁾. Kim et al. (2009)은 알루미늄, 아연산화물, 다이아몬드를 함유한 나노유체를 이용하여 유동 비등실험을 실시한 결과 높은 질량 유속에서 임계 열유속이 최대 40 - 50% 증가된 반면 낮은 질량유속에서는 증가되지 않았음을 보여주었다. 이와 같은 결과는 나노입자가 시편에 침착되었기 때문이라고 설명하였다²⁾. Song et al. (2014)는 체적농도 0.01 %의 SiC 나노입자가 침착된 시편으로 임계열유속 실험을 수행 한 결과 최대 105 %까지 향상되었으며 Bi et al. (2019)는 시편의 접촉각이 80°에서 20°로 떨어질 경우 임계 열유속은 3.54배 높아진다는 사실을 선행 연구로 발표된 논문을 검토하여 그 결과를 발표하였다^{3,4)}. Kim et al. (2017)은 지름코브으로 제작된 시편위에 산화 그래핀을 코팅

1. 상지영서대학교 소방안전과

† 교신저자: 제주대학교 에너지공학과

E-mail: jnkim@jeju.ac.kr

하여 임계 열유속을 측정된 결과 산화된 나노물질을 사용할 경우 임계 열유속이 높게 측정되었다고 보고하였다⁹⁾.

앞에서 소개한 바와 같이 나노물질을 시편에 침착할 경우 대부분 임계 열유속이 증가하였다. 그러나 기존의 연구들은 대부분 실험 시편과 침착되는 나노물질이 서로 다른 종류로 수행되어 졌다. 따라서 본 연구에서는 동일한 나노입자를 열전도도가 다른 두 재료의 시편에 증착시켰을 경우와 동일한 재료의 시편에 크기와 열전도도가 다른 두 종류의 나노입자를 증착시켰을 경우의 영향을 서로 비교하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 임계 열유속 측정 실험장치 및 재료

Fig. 1은 비등 임계 열유속 실험장치의 개략도이다. 임계 열유속이 발생하는 실험용 반응용기는 알루미늄합금을 사용하여 두께 10 mm의 육면체 밀폐형(320×120×220 mm)으로 제작되었으며, 반응용기 내부에서 일어나는 비등과정을 눈으로 관찰할 수 있도록 반응용기 앞뒤에 내충격성 및 내열성이 우수한 폴리카보네이트재질의 사각형 가시화 창(60×40 mm)을 설치하였다. 반응용기의 상부에는 증발된 유체의 증기를 다시 반응용기 내부로 순환시킬 수 있도록 항온수조에 연결된 2대의 환류냉각기를 설치하였다. 반응용기 내부의 압력을 정확하게 측정하기 위하여 정밀도 ±0.05%의 압력측정용 센서를 설치하였으며, 내부 증기로 인하여 압력센서의 손상을 방지하기 위함과 정확한 정밀도를 위하여 히트 싱크를 연결하여 반응용기 상부에 설치하였다. 또한 반응용기 내 정확한 온도를 측정하기 위하여 용기의 상단과 중간에 열전대(K-타입) 온도센서를 2개 삽입하였다. 실험에 사용된 열전대는 K-타입으로 +극은 89~90%Ni9~9.5%Cr +0.5%SiFe, -극은 95~90%Ni1~1.5%Si+1~2.3%Al 1%Mn0.5%Co으로 구성되었다. 반응용기 내부의 유체를 포화온도까지 효과적으로 가열할 수 있도록 시즈 히터를 설치하였으며, 온도센서와 조절기를 연결하여 반응용기 내부 유체의 온도를 일정하게 제어하였다.

Fig. 2(a)는 비등 열전달 실험 시편의 개략도이고, Fig. 2(b)는 구리로 제작된 열전달 시편의 표면 사진이다. 비등 열전달 실험 시편(ø 70 × 5 mm)은 실험 시편인 구리(ø 10 × 2 mm)와 단열재인 PEEK로 구성되어 있으며, 시편용 구리에는 ø 1 mm의 K-타입

온도센서가 삽입되어 있다. 임계 열유속현상이 발생할 때 시편의 온도가 급격히 상승하여 시스템을 손상시킬 수 있기 때문에 온도센서에는 조절기

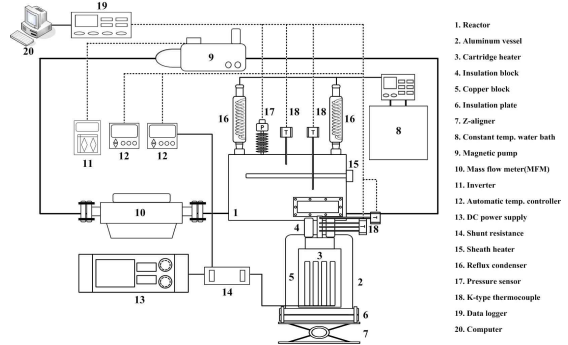
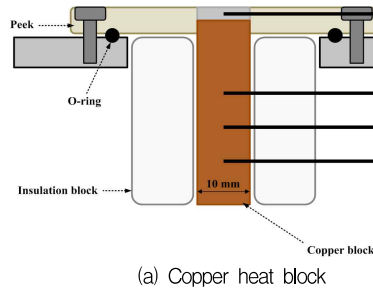


Fig. 1 Schematic diagram of CHF experimental apparatus



(a) Copper heat block
(b) Photograph of the specimen
Fig. 2 Schematic diagram of heat transfer test section

를 설치하여 임계 열유속 발생 시 공급되는 히터의 전력을 차단할 수 있게 구성하였다. 또한 실험 시편은 반응용기의 하부에 설치되어 있으며 히터부와 연결되어 있다. 히터부는 알루미늄 용기 내에 구리블럭과 단열판이 있고, 외부에 히터부의 높이를 조절하는 서포트 잭으로 구성되어 있다. 구리블럭에는 8개의 500 W급의 카트리지 히터(ø 18 × 150 mm, Ultraheater)가 삽입되어 있으며, 2000 W급의 직류전원공급기 2개와 연결하여 효과적으로 히터의 역할을 수행할 수 있게 구성되어 있다. 또한 구리블럭 상부에는 ø 1 mm의 열전대(K-타입) 온도센서가 7 mm 간격으로 3개가 삽입되어 시편의 온도를 측정

할 수 있게 구성하였다. 알루미늄 용기와 구리블럭의 사이에는 1200℃까지 사용할 수 있는 세라믹 단열재를 사용하여 열손실을 최소화하였으며, 실험장치의 모니터링과 측정되는 데이터를 저장하기 위하여 각종 센서들과 연결된 데이터로거를 컴퓨터에 연결하였다. 또한 본 연구를 위해서 사용되어진 열전달 시편은 지르코늄과 구리로 열전도도는 각각 22.6과 401 W/m·K가 되고, 시편표면에 증착시킨 나노물질은 탄소나노튜브와 구리 나노입자를 사용하였으며 그에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of mwcnt and copper nanopowders

Properties	MWCNT	Copper
Diameter(nm)	10 ~ 15	40~60
Length(μm)	~ 200	-
Purity(wt.%)	95	99.5
Density(g/cm3)	1.8	8.94
Thermal Conductivity(W/m • K)	3,000	401

2.2. 나노입자 분사증착 방법

나노입자를 혼합한 나노유체의 분사 코팅 증착순서와 방법은 Fig. 3과 같으며, 분사증착과정에서 나노유체의 효과적인 분사를 위해 압축공기를 사용하여 유체를 일정하게 분사하였다. 그리고 혼합비율 0.1 vol%로 제조된 나노유체를 이용하여 일정한 높이와 위치에서 유체를 실험 시편에 180초 동안 분사하여 실험시편을 제조하였다. 또한 분사 후 도포된 나노입자들을 효율적으로 열전달 실험시편 표면에 증착시키기 위하여 건조기를 사용하였으며, 100℃에서 가열 소성하여 나노입자들을 실험 시편 표면에 안정적으로 증착시켰다. 증착된 실험 시편 표면의 접촉각을 측정하기 위해서 3 μl의 순수 물을 실험 시편 표면에 떨어트려 접촉각을 측정하는 접촉각 측정기를 이용하였으며 측정 오차는 ± 2°이다.

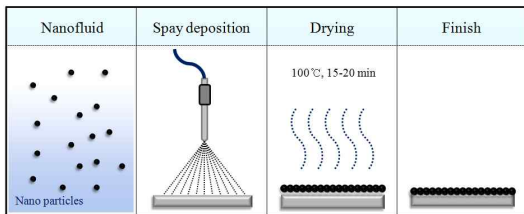


Fig. 3 Spray deposition process

2.3. 비등 열유속 계산 방법

본 연구에서는 1차원 정상상태 열전도방정식을 이용하여 열유속을 계산하였다.

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

여기서, q'' 는 열유속(kW/m²), k 는 열전도율(W/m·K), T_2 와 T_3 는 구리히터에서 측정 온도(°C), L 은 T_2 와 T_3 사이의 거리(m)이다. 또한 벽면 온도와 포화 온도의 차이인 과열도를 구하기 위해서 다음의 식을 사용하였다.

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

여기서, T_{wall} 은 시편의 표면온도(°C), T_{sat} 는 유체의 포화온도(°C), T_4 는 측정 온도(°C), d 는 시편 표면과 온도센서 사이의 거리(m)이다. 비등 열전달 계수에 대한 식은 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

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

3 실험 결과

3.1 실험의 불확실성 계산

일반적으로 많이 사용되는 Kline and McClintock (1953)이 제시한 오차 전파 방법을 사용하여 불확실성에 대한 해석을 수행하였다⁶. 식 (4)와 식 (5)에서 알 수 있듯이, 열유속에 대한 인자는 구리히터에서 측정된 T_2 와 T_3 의 온도차와 두 온도센서 사이의 거리임을 알 수 있다. 또한 과열도에 대한 인자는 구리 시편에서 측정된 T_4 와 물의 포화온도 T_{sat} 의 온도차, 열유속 q'' , 온도센서 T_4 와 구리 표면까지의 거리 d 임을 알 수 있다. 그리고 비등 열전달 계수에 대한 인자는 식 (6)에 나타내었듯이 식 (4)의 열유속과 식 (5)의 과열도임을 알 수 있다.

$$q'' = q''(T_2 - T_3, L) \quad (4)$$

$$T_{wall} - T_{sat} = T_{wall} - T_{sat}(T_4 - T_{sat}, q'', d) \quad (5)$$

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

위의 식에서 나타난 인자들을 이용하여 본 실험에 대한 불확실성 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_2-T_3}}{T_2-T_3}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{U_{T_{wall}-T_{sat}}}{T_{wall}-T_{sat}} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_4-T_{sat}}}{T_4-T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_d}{d}\right)^2} \quad (8)$$

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

여기서, $U_{q''}$ 는 임계 열유속, U_h 는 비등 열전달 계수, $U_{T_2-T_3}$ 는 T_2 와 T_3 의 온도센서에서 측정온도차, U_L 는 온도센서 사이의 거리, $U_{T_{wall}-T_{sat}}$ 는 과열도, $U_{T_4-T_{sat}}$ 는 T_4 와 물의 포화온도 T_{sat} 의 온도차, U_d 는 온도센서 T_4 와 구리 표면까지의 거리에 대한 불확실성을 나타낸다. 위 식으로부터 계산된 임계 열유속과 과열도의 불확실성은 열유속 1,100 kW/m²에서 각각 2.44와 2.45% 임을 알 수 있었다.

3.2. 비등 임계 열유속 측정실험 상관식 비교

본 연구를 위해 만들어진 실험장치와 실험방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 순수물에서 풀 비등 실험을 수행하였다. 또한 순수 단일 유체의 풀 비등에 대한 임계 열유속 상관식 중에서 가장 널리 알려진 Zuber (1958)의 상관식을 이용하여 실험에서 측정된 임계 열유속 결과치와 비교하였다⁷⁾.

$$q''_{CHF,Zuber} = 0.131h_{fg}\rho_g^{0.5}[\sigma g(\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \quad (10)$$

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

Fig. 4는 실험에서 측정된 임계 열유속 결과와 Zuber 식을 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 실험에서 측정된 임계 열유속은 1159, 1042, 1066 kW/m²으로 평균 1089 kW/m²가 된다. 따라서 Zuber의 상관식으로 예측한 1106.28 kW/m²과 1.6% 이내로 일치함에 따라 본 연구를 위해서 제작된 실험장치와 연구방법의 높은 신뢰성을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 5은 Fig. 4에서 측정된 결과를 비등 열전달 계수로 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알

수 있듯이 계산된 비등 열전달 계수는 각각 36.72, 36.30, 36.66 kW/m²·K로 평균 36.56 kW/m²·K 값과 ±0.001 %내로 일정함을 확인하였다.

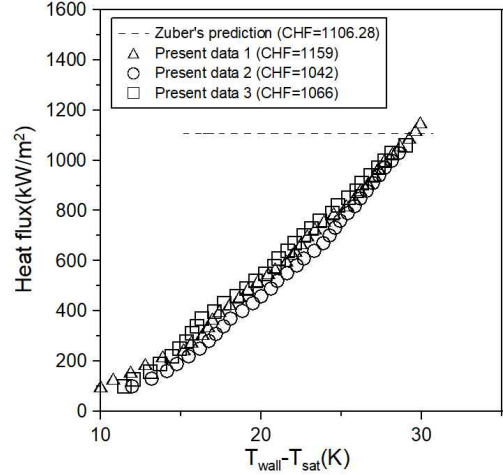


Fig. 4 Pool boiling CHF in pure water

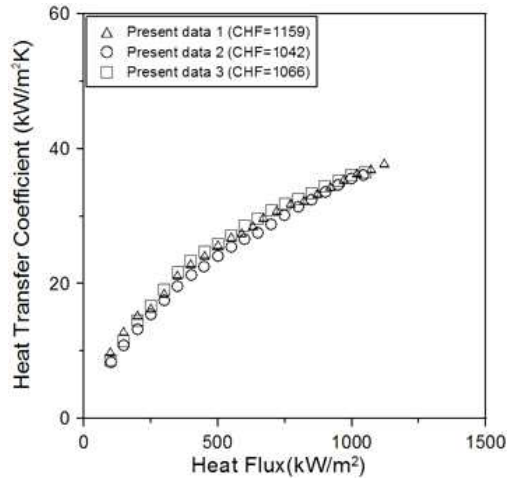


Fig. 5 Boiling heat transfer coefficient in pure water

3.3. 분사 증착된 나노입자 재질의 영향

Fig. 6은 구리와 탄소나노튜브 나노입자를 구리시편 표면에 180초 동안 분사 코팅 후 증착시 임계 열유속 비등 곡선을 나타낸 그래프이다. 본 실험은 동일 재질의 시편에 크기와 열전도도가 다른 나노입자를 증착할 때의 영향을 알아보기 위한 실험으로 그림에 표시하였듯이 나노입자가 증착되지 않은 구리시편과 구리 및 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킨 구리시편의 임계 열유속은 각각 1159, 1233, 1570

kW/m²로 측정되었다. 즉 나노입자가 증착되지 않은 구리시편의 임계 열유속보다 구리와 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킬 경우 임계 열유속이 각각 6.4와 35.5 % 증가되는 것을 확인하였다. 따라서 다공도와 열교환 표면적이 넓을 것으로 예측되는 탄소나노튜브 나노입자가 증착될 경우 임계 열유속이 높다는 것을 확인할 수 있다. 또한 20 °C의 동일한 과냉도에서 열유속을 확인하면 나노입자가 증착되지 않은 구리시편과 구리 나노입자를 증착시킨 구리시편의 열유속은 차이를 보이지 않았지만 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킨 구리시편의 열유속은 나노입자가 증착되지 않은 구리시편의 열유속보다 약 500 % 증가하는 것을 확인하였다. 이는 다공도, 열교환 표면적, 높은 열전도의 복합적인 효과로 사료되며, 이 영향으로 임계 열유속이 일어나는 과냉도는 나노입자가 증착되지 않은 구리시편과 구리 나노입자를 증착시킨 구리시편의 경우 37.78과 34.46 °C로 큰 차이를 보이지 않지만 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킨 구리시편은 28.95 °C로 빨리 임계 열유속 현상이 발생함을 알 수 있었다.

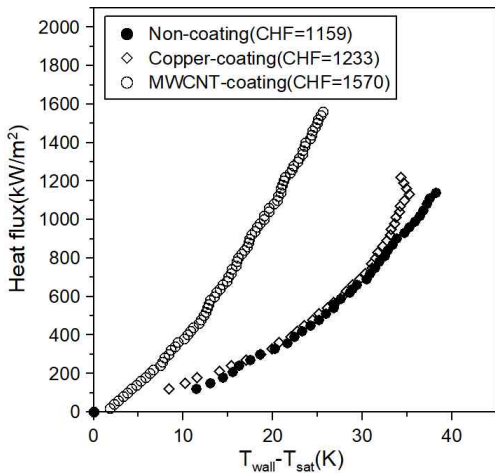


Fig. 6 Pool boiling CHF according to type of nanomaterial

또한 Fig. 7은 Fig. 6의 열유속 결과를 바탕으로 계산된 비등 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 나노입자가 증착되지 않은 구리시편과 구리 및 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킨 구리시편의 비등 열전달계수는 임계 열유속이 일어나는 시점에서 각각 30.68, 35.79, 54.23 W/m²·K로 나노입자를 증착시키지 않았을 때보다 각각 16.66와 76.76 %의 증가율을 확인하였다.

3.4. 열전달 시편 재료의 영향

Fig. 8은 열전도도가 다른 구리와 지르코늄시편 표면에 동일한 탄소나노튜브 나노입자를 각각 180

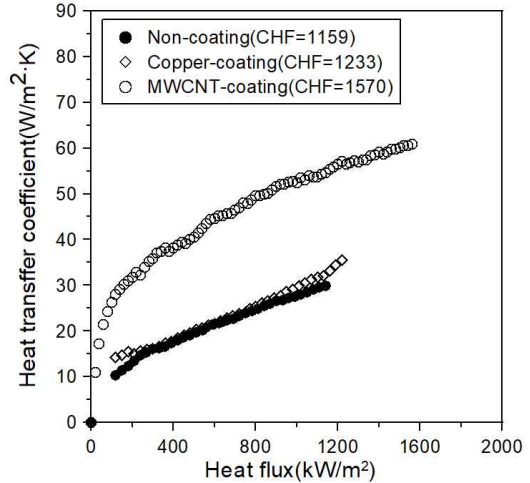


Fig. 7 Boiling heat transfer coefficient according to type of nanomaterial

초 동안 분사 코팅 증착시 임계 열유속 비등 곡선을 나타낸 그래프이다. 본 연구는 동일한 나노입자를 열전도도가 다른 시편에 증착시킬 경우 시편의 영향을 알아보기 위한 실험으로 그림을 보면 알 수 있듯이 구리시편과 지르코늄시편의 임계 열유속은 각각 1568과 1592 kW/m²로 측정되었다. 즉 탄소나노튜브 나노입자를 증착시킨 구리와 지르코늄 시편의 임계 열유속은 차이가 크지 않았다. 이는 Zuber의 상관식(10)에 따르면 임계 열유속은 시편의 재질에 영향을 받지 않고 오로지 유체의 종류에 영향을 받는다는 이론과 일치하는 결론을 얻을 수 있었다. 그러나 임계 열유속에는 차이를 보이지 않았지만 임계 열유속이 일어나는 과냉도는 큰 차이를 보였다. 그림에서와 같이 과냉도 30 °C의 경우 지르코늄 시편의 열유속이 발생하는 시점에서 구리 시편은 이미 임계 열유속에 도달하는 현상을 발견할 수 있다. 이는 열전달 시편 재료의 열전도도에 따른 영향으로 사료되고, 에너지 시스템의 안전성에 매우 중요한 의미를 가지는 결과이다. 따라서 열전달 시편에 증착되는 나노입자의 종류도 중요하지만 시편의 재질 또한 나노입자 못지않게 중요함을 보여주는 의미있는 결과라고 사료된다. 또한 Fig. 9는 Fig. 8의 열유속 결과를 바탕으로 계산된 비등 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 동일한 탄소나노튜브 나노입

자를 증착할 경우 임계 열유속이 일어나는 시점에서 지르코늄과 구리 시편의 비등 열전달계수는 각각 14.88과 54.23 W/m²·K로 열전도도가 큰 구리가 지르코늄 기준 265 % 증가함을 확인하였다.

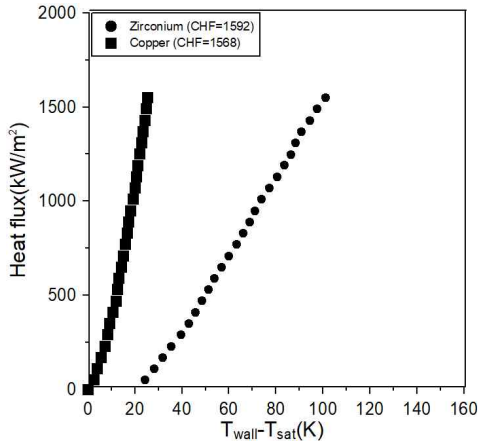


Fig. 8 Pool boiling CHF according to type of heat transfer specimen

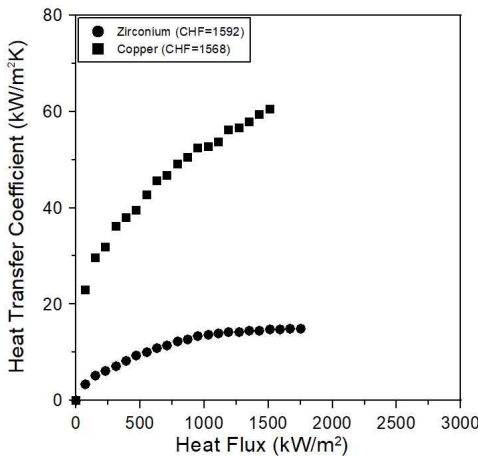


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient according to type of heat transfer specimen

4. 결론

본 연구에서는 동일한 나노입자를 서로 다른 두 개의 시편과 동일한 재료로 만들어진 두 개의 시편

에 서로 다른 종류의 나노입자를 각각 증착시켰을 경우의 임계 열유속을 측정된 결과 동일한 나노입자를 증착시킬 경우 임계 열유속의 차이는 크지 않았지만 과열도에서 큰 차이를 보였다. 또한 동일한 시편에 서로 다른 나노입자를 증착할 경우 열전달 표면적과 전도도가 큰 나노입자에서 임계 열유속이 크게 나타남을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과 지원 사업에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- 1) Kim, M.H., Kim, J.B., and Kim, H.D., "Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 33, pp. 691-706, 2007.
- 2) Kim, S.J., McKrell, T. Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Experimental study of flow critical heat flux in alumina - water, zinc-oxide - water and diamond-water nanofluids", J. of Heat Transfer Vol. 131, No. 4, 2009.
- 3) Song, S. L., Lee, J.H., and Chang, S.H., "CHF enhancement of SiC nanofluid in pool boiling experiment", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 52, pp. 12-18, 2014.
- 4) Bi, J., Vafai, K., and Christopher, D.M., "Heat transfer characteristics and CHF prediction in nanofluid boiling", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 80, pp. 256-265, 2015.
- 5) Kim, W.J., Jeon, Y.H., and Kim, N.J., "Study on the Oxidation Treatment of Nanoparticles for the Critical Heat Flux", J.I of the Korean Solar Energy Society, Vol. 37, No. 6, pp. 39-49, 2017.
- 6) Kline, S.J. and McClintock, F.A., "Describing uncertainties in single-sample experiment", Mechanical Engineer, Vol. 75, pp. 3-8, 1953.
- 7) Zuber, N. "On stability of boiling heat transfer", ASME transactions, Vol. 80, pp. 711-714, 1958.