J. Korea Saf. Manag. Sci. Vol. 19 No. 4 December 2017 ISSN 1229-6783(Print) 317
http://dx.doi.org/10.12812/ksms.2017.19.4.317 ISSN 2288-1484(Online)

# 구리나노입자가 코팅된 열교환기의 안전성 향상을 위한 임계 열유속 측정실험

모 용 현* · 김남진* · 전용한** · 이덕수***
*제주대학교 에너지공학과 · **상지영서대학교 소방안전과 · ***한라대학교 산업경영공학과

# Critical heat flux measurement experiment to improve safety of copper nano-particle coated heat exchanger

Yong-Hyun Mo* · Nam-Jin Kim* · Yong-Han Jeon** · Deok-Soo Lee**
*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National Univ.
**Dept. of Fire and Frotection, Sangji-Youngseo College.
***Dept. of Industrial Engineering, Halla Univ.

## Abstract

When the heat flux on the heating surface following changing heat condition in the boiling heat transfer system exceeds critical heat flux, the critical heat flux phenomenon is going over to immediately the film boiling area and then it is occurred the physical destruction phenomenon of various heat transfer systems. In order to maximize the safe operation and performance of the heat transfer system, it is essential to improve the CHF(Critical Heat Flux) of the system. Therefore, we have analysis the effect of improving CHF and characteristics of heat transfer following the nanoparticle coating thickness. As the results, copper nanocoating time are increased to CHF, and in case of nano-coatings are increased spray-deposited coating times more than in the fure water; copper nanopowder is increased up to 6.40%. The boiling heat transfer coefficients of the pure water are increased up to 5.79% respectively. Also, the contact angle is decreased and surface roughness is increased when nano-coating time is increasingly going up.

Keywords : Heat transfer, Boiling, Graphene, Oxidation, Critical heat flux

## 1. 서 론

비등 열전달 시스템에서 가열조건이 변함에 따라 가열면의 열유속이 임계 열유속(CHF)을 초과하게 되면 순식간에 막비등 영역으로 넘어 가면서 각종 열전달 시스템의 물리적 파괴현상이 발생되게 된다. 따라서 열전달 시스템의 안전과 성능을 극대화시키기 위해서는 시스템의 임계 열유속 향상이 필수적이다. 열전달 표면에 나노입자를 코팅하는 나노코팅 역시 열전달 시스템의 임계 열유속을 향상시킬 수 있는 방법 중 하나이며, 나노입자의 종류, 표면 코팅 방법과 코팅시간에 대해 다양한 연구결과가 보고되었다.

†This research was funded by the government (Ministry of Education) and conducted with the support of the Korean Research Foundation (2015 R1D01A 018884)
†Corresponding Author : Nam-Jin Kim, Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National Univ., Jejudaehakro 102, Jeju, Jejudo.

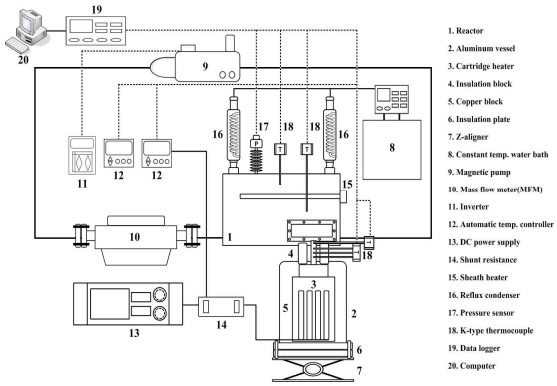
Wen and Ding(2005)은 스테인레스 스틸 평판 히터를 이용하여 Al2O3 나노유체의 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행한 결과, 40%까지의 임계 열유속 증가를 확인하였으며, 열전달 히터 표면의 나노입자가 침착되었음을 보고하였다. 또한 같은 시기에 Bang and Chang(2005)도 Al2O3 나노유체의 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행하였고, 임계 열유속이 기본유체 대비 32% 까지 증가하는 것을 확인하였다.

또한 실험 전후의 열전달 표면 거칠기를 측정하였으며, 나노입자의 침착에 의한 열전달 표면의 거칠기가 변화함을 관찰하고, 이러한 나노입자의 침착현상이 나노유체의 임계 열유속 증가와 관련을 가지고 있다고 주장하였다. Ahn et al.(2013)은 0.0005wt.%의 환원된 그래핀 옥사이드 나노유체가 코팅된 Ni-Cr 와이어 히터를 이용하여 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행하였으며, 약 320% 증가된 임계 열유속을 관찰하였다. 특히, 코팅시간에 따른 임계 열유속을 측정하였으며, 환원된 그래핀 옥사이드 나노유체를 이용한 코팅시간이 증가할수록 임계 열유속이 획기적으로 증가함을 확인하였다.

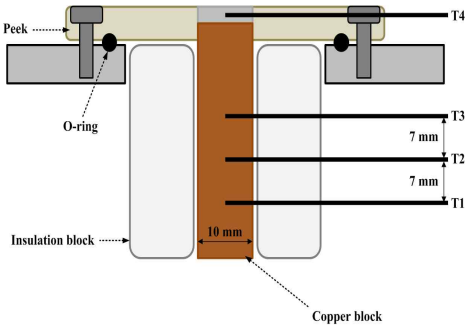
Kim et al.(2006)은 Al2O3, TiO2, SiO2 나노입자를 적용한 나노유체에서 Ni-Cr 와이어 히터를 이용하여 풀 비등 임계 열유속 실험을 수행하였다. 그리고 비등실험을 통하여 가열표면에 나노입자를 증착하고, 이 증착시킨 표면과 순수 물의 풀 비등 임계 열유속 실험을 진행하고, 깨끗한 시편표면과 나노유체를 사용한 시편표면의 풀 비등 임계 열유속 실험결과를 서로 비교하여, 나노입자 증착 표면이 임계 열유속 향상의 원인이 될 수 있으며, 나노입자의 증착현상이 만들어낸 열전달 시편표면 접촉각의 변화와 표면특성 변화에 따른 모세관력의 증가가 임계 열유속 향상의 주요 원인임을 실험적으로 보였다. 또한 Zhang et al.(2014)와 Fan. et al.(2017)은 전기히터를 사용하는 기존 풀 비등실험의 불편함을 개선하고자 Quenching 실험을 도입하여 풀 비등 실험의 새로운 시도를 하였다.

따라서 본 연구에서는 산업현장에서 많이 사용되고 있는 구리열교환기를 장착한 열전달 시스템의 효율과 안전성을 향상시키기 위하여 열교환기와 같은 재질이면서 열전도도가 높은 구리나노입자를 실험시편 표면에 분사 증착하여 코팅하는 방법을 사용함으로써 순수물에서 나노입자 코팅시간에 따른 임계 열유속, 열전달계수, 접촉각, 거칠기를 측정하여 나노입자 코팅이 열전달현상에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법




[Figure 1] Schematic diagram of the experimental apparatus




[Figure 2] Schematic diagram of the experimental specimen

[그림 1]과 [그림 2]는 본 연구에서 사용된 실험장치와 실험시편의 개략도이다. 실험시편은 직경 1 mm의 K-타입 열전대가 삽입되어 있는 지름 10 mm의 구리와 시편을 고정하는 역할과, 동시에 열전대를 7 mm 간격으로 3개를 삽입한 히터에서 발생되는 열이 다른 곳으로 분산되지 않도록 하기 위한 단열재인 PEEK로 구성되어 있다. 또한 [그림 1]에서 볼 수 있듯이 실험시편은 반응용기의 하부에 있는 히터부와 연결되어 있으며, 히터는 구리블럭과 알루미늄 용기, 알루미늄 재질의 단열판, 히터의 높이를 조절할 수 있는 서포트잭으로 구성되었다.

또한 알루미늄 용기와 구리블럭 사이에는 세라믹 단열재를 삽입하여 손실되는 열을 최소화하였다. 측정되는 실험데이터의 모니터링과 저장을 위하여 데이터로거와 컴퓨터를 설치하였다. 본 연구에서는 실험이 종료된 후에 열전달 실험 시편 표면 상태를 관찰하기 위하

여 전자장방출주사전자현미경, 접촉각 측정기, 3D나노형상측정시스템을 이용하여 시편의 표면상태, 접촉각, 그리고 거칠기를 측정하였다. 또한 열전달 시편의 표면에 구리나노입자를 코팅하기 위하여 분사증착 코팅방법을 사용하였다.

본 연구에서는 [그림 2]와 <표 1>에서 볼 수 있듯이 40~60nm 크기의 순도 99.5% 구리나노입자를 60초, 180초, 240초 동안 분사증착 코팅을 하였으며, 코팅시간에 따른 풀 비등 임계 열유속과 열전달 계수를 비교하였다.

[Figure 3] Photograph of Copper nanoparticles

<Table 1> Properties of Copper nanoparticle

| Properties | Copper nanoparticle |
|---|---|
| Particle Size(nm) | 40~60 |
| Purity(wt.%) | 99.5 |
| Boiling Point(℃) | 2567 |
| Melting Point(℃) | 1083.4 |
| Density(g/cm3) | 8.94 |
| Thermal Conductivity(W/m·K) | 401 |
| Thermal Diffusivity(m2/s) | 117×10-6 |
| Specific Heat(J/kg·K) | 385 |
| Resistivity($\mu\Omega$-cm, ℃) | 1.673, 20 |

## 3. 실험결과

### 3.1 풀 비등 임계 열유속 측정실험의 불확실성 해석

본 연구의 임계 열유속은 실험에서 측정된 온도를 사용하여 식 (1)의 1차원 정상상태 열전도방정식을 이용하여 계산하였고, 비등 열전달 계수는 식 (2)의 대류 열전달 방정식을 이용하여 계산하였다.

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

$$q'' = h(T_{wall} - T_{sat}) \quad (2)$$

$$T_{wall} - T_{sat} = \left(T_4 - \frac{q''}{k}d\right) - T_{sat} \quad (3)$$

여기서, $q''$, $k$, $T_2$, $T_3$, $L$, $T_{wall}$, $T_{sat}$, $T_4$, $d$는 각각 열유속(kW/m2), 열전도율(W/m · K), 구리히터에 삽입된 온도센서에서 측정된 온도(℃), $T_2$와 $T_3$사이의 거리(m), 시편의 표면온도(℃), 유체의 포화온도(℃), 시편에 삽입된 온도센서에서 측정된 온도(℃), 시편 표면과 온도센서 사이의 거리(m)이다.

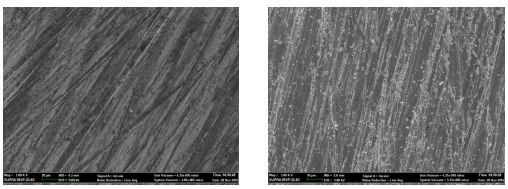
또한, 위의 식들에 사용되어진 인자들을 이용하여 Kline and McClintock(1953)의 오차 전파방법으로 열유속과 열전달 계수에 대한 불확실성을 계산한 결과 열유속 100kW/m2에서 각각 10.63%, 15.04%이며, 열유속 1,100kW/m2에서는 각각 2.44%, 2.45%임을 알 수 있었다.

### 3.2 열전달 실험시편 표면 관찰 실험

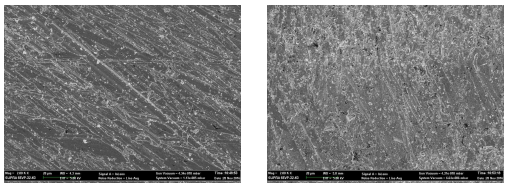
본 연구에서는 풀 비등 임계 열유속 실험을 위하여 실험시편에 구리 나노입자를 분사코팅한 후의 표면을 관찰하였다.

[그림 4]는 코팅시간에 따른 열전달 시편 표면을 전자장 방출 주사 전자 현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM, JSM-6700F)으로 촬영한 사진이고, [그림 5]는 접촉각 측정기(Phoenix 300, SEO)를 이용하여 3 $\mu\ell$의 순수 물을 실험시편 표면에 떨어트려 측정한 접촉각 사진이다. 또한 Fig. 6은 구리 나노입자 코팅시간에 따른 열전달 실험 시편의 접촉각 변화를 나타낸 그래프이다.

그림에서 볼 수 있듯이 코팅시간이 증가함에 따라 접촉각은 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 접촉각이 감소함에 따라 열전달 시편 표면에서 나노입자의 침착이 증가하여 친수성이 좋아진다는 것을 의미한다.



(base) 75.48° (60sec) 71.09°



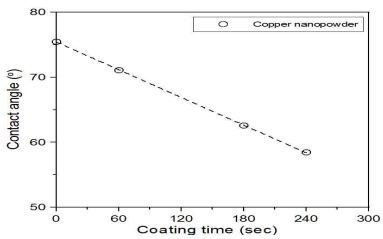
(180sec) 62.56° (240sec) 58.46°

[Figure 4] SEM photograph of specimen surface

(base) 75.48° (60sec) 71.09°

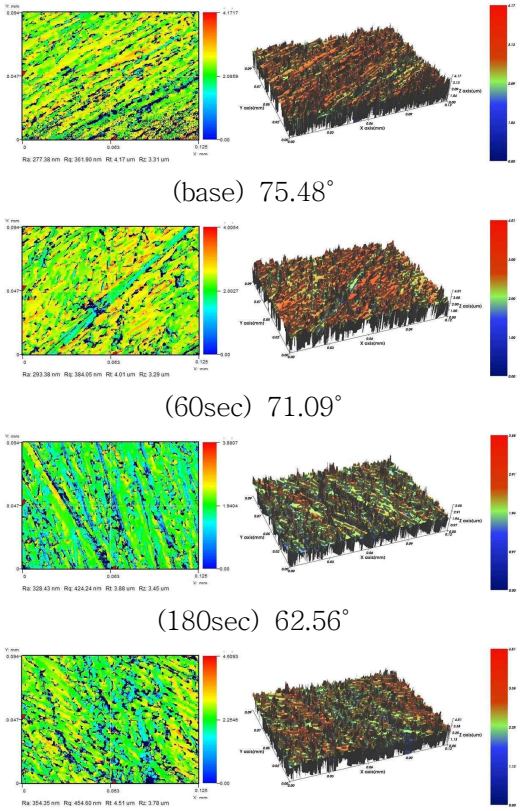
(180sec) 62.56° (240sec) 58.46°

[Figure 5] Change of contact angle




[Figure 6] Variation of the contact angle as a function of spray coating time

그리고 접촉각에 따른 표면 거칠기를 측정하기 위하여 Non-Contact white light scanning interferometer system을 적용한 3D 나노형상 측정 시스템(Nanoview NV2000, Nanosystem Co.)을 사용하였으며, 그 결과를 [그림 7]에 정리하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전달 실험시편 표면 거칠기는 코팅시간이 증가할수록 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.



(base) 75.48°

(60sec) 71.09°

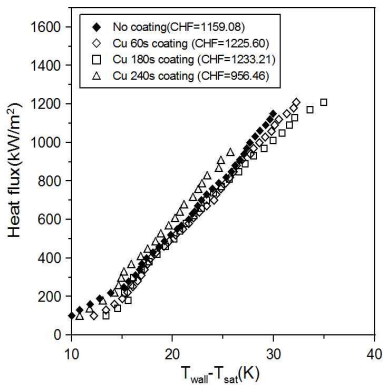
(180sec) 62.56°

(240sec) 58.46°

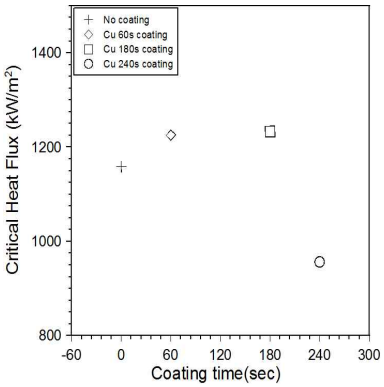
[Figure 7] 3D photograph of specimen surface

## 3.3 구리 나노입자 코팅시간에 따른 임계 열유속 실험

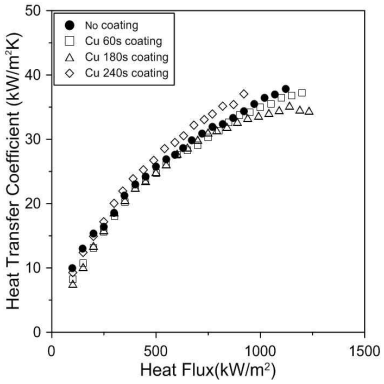
[그림 8]과 [그림 9]는 구리 나노입자 코팅시간과 실험시편의 벽면온도($T_{wall}$)와 반응기 내 유체의 포화온도($T_{sat}$)의 차이인 과열도에 따른 열유속 변화와 코팅시간에 따른 임계 열유속을 비교한 그래프이다.




[Figure 8] Heat flux according to the excess temperature




[Figure 9] Comparisons of pool boiling CHF




[Figure 10] Pool boiling heat transfer coefficient

[그림 8]을 보면 알 수 있듯이 코팅시간이 60초, 180초 상태에서는 임계 열유속이 증가하고 있으나, 코팅시간이 240초 상태에서는 임계 열유속이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. [그림 9]에서 구리 나노입자 코팅시간 60초, 180초, 240초에서 측정된 임계 열유속은 코팅하지 않았을 때보다 각각 5.74%, 6.40%, −17.48%의 변화율을 확인하였다.

그러나 동일한 과열도에서 60초와 180초 상태에서의 열유속은 코팅을 하지 않은 시편보다 낮게 나왔지만 240초로 코팅된 시편의 열유속은 코팅을 하지 않은 시편보다 높게 나왔다. 이는 60초와 180초보다 240초로 코팅된 구리 나노입자사이에 만들어지는 핵기공에서 빠른 비등현상이 발생하여 임계 열유속이 감소하는 것으로 판단된다.

[그림 10]은 순수 물에서 구리 나노입자 코팅시간에 따른 풀 비등 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 측정된 열전달 계수는 코팅시간이 60초, 180초, 240초 상태에서 코팅을 하지 않았을 때보다 각각 -2.08%, −5.03%, 5.79%의 증가율을 확인하였다. 따라서 구리 나노입자 코팅시간이 60초, 180초 상태에서 코팅을 하지 않은 시편보다 임계 열유속은 증가하나 열전달계수는 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 열전달 표면의 과도한 온도상승으로 인하여 열전달 시스템의 안전성에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 열전달계수를 증대시키기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 앞에서 언급했듯이 구리 나노입자 코팅시간이 240초 상태에서 열전달 계수는 증가하나 임계 열유속이 감소하는 모습을 보이고 있다. 이는 구리 나노입자 코팅 시 만들어지는 다공성으로 인해 친수성이 증대되어 빠른 비등 열전달 현상이 발생하여 임계 열유속이 감소하는 것으로 사료된다. 따라서 열시스템의 안전성을 향상시키기 위해서 임계 열유속과 열전달 계수를 모두 증대시킬 수 있는 최적의 두께가 존재함을 알 수 있었고, 정확한 판단을 위해서는 구리 나노입자의 크기와 분사시간에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 열전달 시스템의 안전성 향상을 위하여 구리 나노입자가 코팅된 실험시편의 임계 열유속, 열전달 계수, 접촉각, 표면 거칠기를 비교분석한 결과, 코팅시간이 증가할수록 접촉각이 감소하였으며 표면 거칠기는 증가함을 확인하였다. 또한, 순수 물에서 구리 나노입자 코팅시간이 60초, 180초까지 임계 열유속은 각각 5.74%, 6.40%로 증가 하였으며, 240초 상태에서는 -17.48%로 감소하였고, 열전달계수는 -2.08%, −5.03%, 5.79%의 증가율을 보이는 것으로 확인하였다.

따라서 열전달 계수는 증가하나 임계 열유속이 감소하는 경우와 열전달 계수는 감소하나 임계 열유속은 증가하는 서로 반대의 현상이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 열시스템의 안전성을 높이기 위해서는 임계 열유속과 열전달 계수를 모두 증대시킬 수 있는 더 많은 연구가 필요한 것으로 보여진다.

## 5. References

[1] Wen, D. and Ding, Y.(2005), “Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based-alumina nanofluids.” Journal of Nanoparticle Research. Vol.7. June: 265-274.

[2] Bang, I-C. and Chang, S-H.(2005), “Boiling heat transfer performance and phenomena of Al2O3-water nanofluids from a plain surface in a pool.” International Journal of Heat and

Mass Transfer. Vol. 48. June:2407-2419.
[3] Ahn, H-S. and Kim, J-M. and Kim, M-H.(2013), "Experimental study of the effect of a reduced graphene oxide coating on critical heat flux enhancement." International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 60. May: 763-771.
[4] Kim, H-D. and Kim, J-D. and Kim, M-H.(2006), "Effect of nanoparticles on CHF in pool boiling of nano-fluids." International Journal of Heat and Mass Transfer." Vol. 49. December: 5070-5074.
[5] Zhang, L, and Fan, L-W. and Yu, Z-T. and Cen, K.(2014), "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, June:410-414
[6] Fan, L-W. and Li, J-Q. and Wu, Y-A. and Yu, Z-T.(2017), "Pool boiling heat transfer during quenching in carbon nanotube (CNT)-based aqueous nanofluids: Effects of length and diameter of the CNTs." Applied Thermal Engineering. Vol. 122. July:555-565
[7] Kline, S-J. and McClintock, F-A.(1953), "Describing uncertainties in single-sample experiment." Mechanical Engineer. Vol. 75. January:3-9

## 저 자 소 개

**모 용 현**

제주대학교 에너지공학과
공학사, 공학석사 취득.
관심분야 : 열역학, 유체역학 분야 등

**김 남 진**

인하대학교 기계공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 취득.
전 대우자동차 기술연구소 근무.
제주대학교 에너지공학과 교수 재직 중.
관심분야 : 열·유체공학 분야

**전 용 한**

인하대학교 기계공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 취득.
상지영서대학교 소방안전과 부교수 재직 중
관심분야 : CFD 해석, 터널화재, 열전달 등

**이 덕 수**

인하대학교 산업공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 취득.
한라대학교 공과대학 산업경영공학과 조교수로 재직 중.
관심분야 : 품질경영 등