

비등 열전달 시스템의 안정성 향상을 위한 탄소나노튜브 코팅의 열전달 및 내구성에 대한 연구

전 용 한* · 김 영 훈** · 김 남 진**

*상지영서대학교 소방안전과 · **제주대학교 에너지공학과

A Study on the Heat Transfer and Durability of Carbon Nano Coating for the Safety Improvement of a Pool Boiling System

Yong-Han Jeon* · Young-Hun Kim** · Nam-Jin Kim**

*Dept. of Fire and Protection, Sangji-Youngseo college.

**Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National univ.

Abstract

In this study, we investigated to the heat transfer performance of coating nano-structure with various shapes and patterns on the heat transfer surface. As a result of the measurement of the 3D nano shape, it was confirmed that the roughness generally increases when the adhesive is sprayed on the coating surface and finished durability experiment. In the case of TEOS adhesive, the roughness increased by 0.074 μm , 0.012 μm and 0.015 μm , and the contact angle decreased 12.64° , 1.31° , 9.84° at the coating time of 120 seconds, 180 seconds and 240 seconds, respectively. In the case of PVA adhesive, the roughness increased by 0.069 μm , 0.056 μm and 0.03 μm , and the contact angle decreased 2.85° , 4.82° , 6.96° at the coating time of 120 seconds, 180 seconds and 240 seconds, respectively. In the case of DGEBF adhesive, the roughness increased by 0.042 μm , 0.053 μm and 0 μm , and the contact angle decreased 0.81° at the coating time of 120 seconds, increased 4.82° , 6.96° at the coating time of 180 seconds and 240 seconds, respectively. As a result, the durability tends to decrease as more nano-structures are deposited, and 3D nano shapes, contact angles and SEM photographs showed that the performance of the PVA adhesive was superior among the three adhesives.

Keywords : Heat transfer, adhesive, roughness, contact angle, durability

1. 서 론

각종 대형 발전소와 보일러, 열교환 시스템, 원자로의 핵 연료봉, 증기발생기와 같이 가열면의 열유속이 조절되는 시스템에서 임계 열유속(Critical Heat Flux, CHF) 현상은 표면온도의 급격한 상승을 유발하기

때문에 비등 열전달 시스템의 안전성을 파악하거나 해석하기 위한 중요한 요인이 된다. 임계 열유속 현상은 비등 열전달 시스템에서 가열조건이나 유동조건이 변함에 따라 가열면 부근의 유체상태가 액체에서 기체로 바뀌면서 열전달계수가 급격히 감소하는 현상을 말하며, 임계 열유속 발생 시 순식간에 막 비등 영역으로

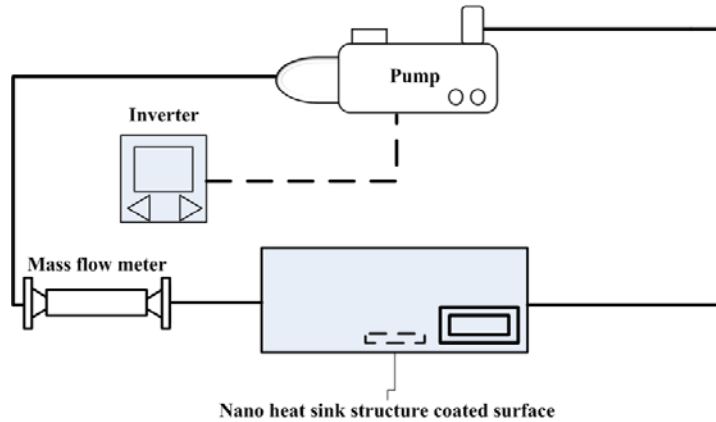
†이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(2015R1D1 A3A01018884)

†Corresponding Author : Nam-Jin Kim, Nuclear & Energy Eng., JEJU NATIONAL UNIVERSITY
102 Jejudaehak-ro, Jeju

Received January 20, 2017; Revision Received February 11, 2017; Accepted March 1, 2017.

넘어가면서 각종 열전달 시스템의 물리적 파괴 현상이 발생하게 된다. 따라서 임계 열유속 현상은 원자로 설계 및 안전해석을 비롯하여 증기보일러와 열교환기, 그리고 핵융합장치 냉각로, 고집적 전자부품 등의 냉각장치 설계에서 중요하게 고려되고 있다. 그러나 임계 열

유속을 향상시키기에는 기계적인 방법만으로는 한계가 있기 때문에 근래에는 열적 특성이 우수한 나노입자를 이용하여 근래에는 열적 특성이 우수한 나노입자를 이용하여 열전달 성능을 향상시킨 나노유체에 대한 연구



[Figure 1] Schematic diagram of nano structure durability experiment apparatus

들이 진행되고 있다. J.M. Kim et al.(2014)은 Graphene Oxide(GO)를 증류수에 분산시켜 나노유체를 제조하였고 GO 나노유체의 농도에 따른 풀 비등 임계 열유속을 측정하였다. 그 결과 전반적으로 증류수에서의 임계 열유속보다 향상된 것을 확인하였으며, 0.001 wt%에서는 최대 63%까지 증가되는 것을 확인하였다. 또한 증착된 GO 필름의 두께를 측정하였으며, 이러한 임계 열유속의 증가는 증착된 GO 필름의 두께의 증가 때문이라고 보고하였다. Lee et al.(2016)은 Stainless Steel 위에 Layer-by-Layer 방법으로 PEI-MWCNTs를 코팅하여 열전달 계수와 임계 열유속을 측정하였으며, 열전달 계수는 최대 2 배까지 증가되는 것을 확인하였고 임계 열유속은 1.47 배까지 증가되는 것을 확인하였다. Sujith Kumar et al.(2014)은 구리 시편 위에서의 Alumina를 코팅이 열적 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 임계 열유속은 300°C에서 최대 128.3%까지 증가되는 것을 확인하였다. Jun et al. (2016)은 10 μ m, 25 μ m, 67 μ m 크기의 Cu 입자를 열전달 표면 위에 다양한 두께로 증착시켜 임계 열유속과 열전달 계수를 측정하였다. 비등 열전달 계수는 입자의 크기가 67 μ m이고 코팅 두께가 296 μ m일 때 최대 400kW/m² K까지 상승하였으며, 임계 열유속은 입자의 크기가 67 μ m이고 코팅 두께가 428 μ m일 때 최대 2.1MW/m² 까지 상승하는 것을 확인 하였다. 이와 같이 임계 열유속과 열전달 계수가 증가한 이유는 다공성 구조에 의한 것이라고 보고하였다. 이와 같이

나노 크기나 마이크로 크기의 입자들을 비등이나 응축이 일어나는 열전달 표면에 코팅하여 열전달 효과를 향상시키고자 하는 연구가 국·내외에서 시도되고 있다. 열전달 표면에 다양한 금속 분말을 코팅하여 금속 분말의 종류나 열전달 표면의 기율기에 따른 열전달 성능에 대한 연구가 진행되고 있으며, 실리콘 표면에 나노/마이크로 입자를 이용한 다공성 표면을 형성하여 열전달 성능을 향상시키고자 하는 연구가 수행되고 있다. 하지만 아직까지 비등 및 응축 열전달 성능을 증가시키기 위하여 연구되는 나노/마이크로 입자의 코팅은 열전달 표면에 나노/마이크로 입자를 단순도포 하는 수준의 코팅방법이 사용되는 것으로 파악되고 있다.

따라서 본 연구에서는 탄소나노튜브를 이용하여 실험시편 표면에 구조체를 만들어 열전달 성능을 측정하고 또한 탄소나노튜브를 코팅시킨 표면 위에 접착제를 코팅하여 내구성을 측정하기 위해서 실험 종료 후 실험 시편의 표면 상태, 접착각, 거칠기 등을 측정하였다.

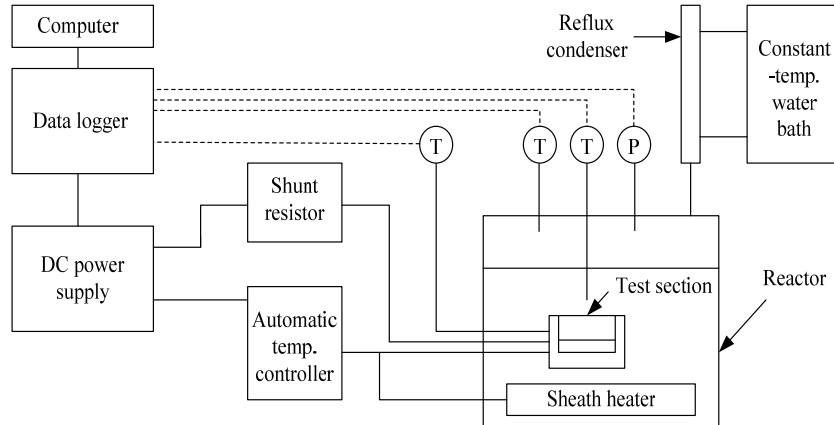
2. 실험장치 및 방법

2.1 나노구조체 내구성 실험장치 및 방법

[Figure 1]은 나노 구조체의 내구성 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 코팅된 실험 시편을 설치하는 반응용기와 유체를 순환시키는 마그네틱 펌프 그리

고 순환되는 유체의 유속을 정확히 측정할 수 있는 질

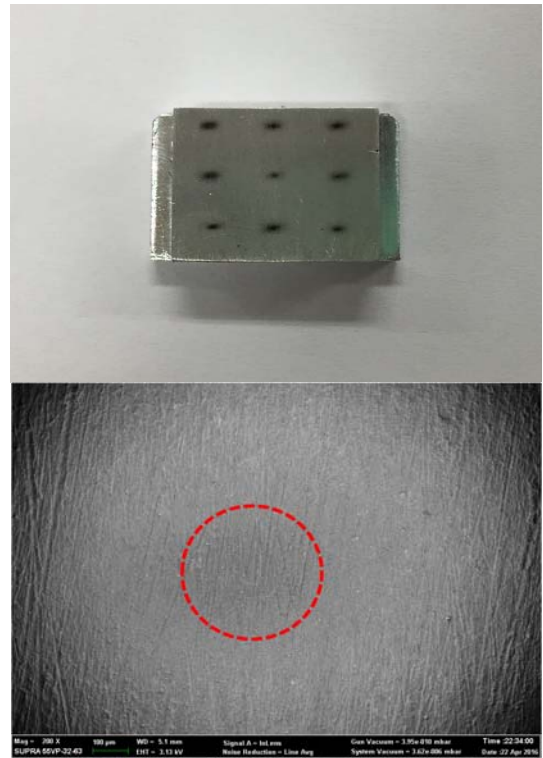
량유량계로 구성되어 있다. 코팅된 실험 시편을 설치되



[Figure 2] Schematic diagram of heat transfer coefficient experiment apparatus.

는 반응용기(1)는 두께 10 mm의 알루미늄합금 재질을 사용하여 밀폐형(320 mm × 120mm × 220 mm)으로 제작되었으며, 실험 시 코팅 표면의 변화를 시각적으로 관찰할 수 있도록 반응용기 앞뒤로 내충격성 및 내열성이 우수한 PC (polycarbonate)재질의 창(60 mm × 40 mm)을 설치하였다. 반응용기와 연결되어 유체가 순환되는 배관은 3/4인치 SUS316재질의 파이프를 구성되었으며, 나노유체의 순환을 원활하게 할 수 있는 0.5 HP의 마그네틱 펌프(DGS.57EEEE2NN00000, Tuthill co.)와 연결되어 있다. 마그네틱 펌프는 인버터(SV008iG5A-2, LSIS Co.)와 연결되어 펌핑속도를 조절할 수 있게 구성하였다. 또한 반응용기 전단에는 반응용기로 유입되는 유체의 정확한 유속을 측정할 수 있도록 질량유량계(F025S113CCAZEZZZZ, Micro motion Inc.)를 설치하였다. 그림 3.36에 나타낸 것과 같이 유동 비등 열전달 실험 시편(125 × 90 × 5 mm)은 알루미늄(20 × 15 × 5 mm)과 코팅된 실험 샘플들을 고정시키기 위하여 압축 테프론 재질을 사용한 홀더로 구성되어 있다.

나노 히트싱크 구조체 내구성 측정 실험 방법은 코팅된 실험 샘플들을 홀더에 고정시킨 뒤, 반응 용기 내부에 설치한다. 그리고 증류수를 반응 용기에 충분히 채우고 마그네틱 펌프와 질량 유량계를 이용하여 순환되는 유체의 속도가 0.5 m/s가 되도록 조절한 뒤, 24 시간동안 실험을 진행한다. 실험이 종료된 후에는 반응용기를 분리하여 깨끗이 세척하여 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 하였다.

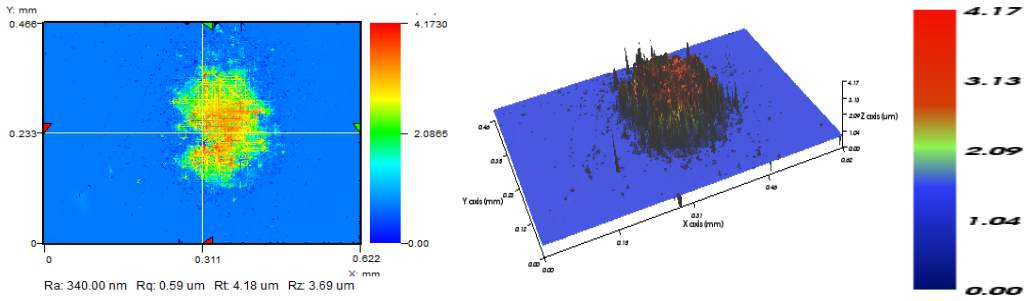


[Figure 3] Photograph and SEM image of dot pattern

2.2 나노구조체 열전달측정 실험장치 및 방법

[Figure 2]는 본 연구에서 사용된 열전달 성능측정 실험장치의 개략도이다. 반응용기는 스테인레스 합금(SUS 316)을 사용하였으며 직경 45mm의 석영창을 설치하였다. 또한 반응용기 상단은 증발된 증기가 응축되도록 저온순환수조(RW-3025G, Jeio-tech)를 연

결한 환류 증류기, 압력센서(PMCD0350KA CA, Sensys Co.) 1개,



[Figure 4] 3D photographs of the specimen surface with dot pattern

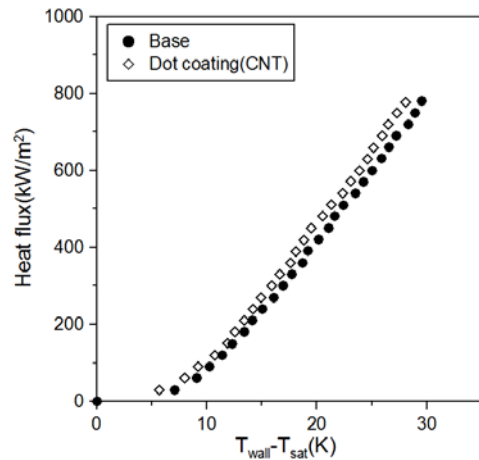
온도센서(T-type, TJC36-CPSS-040U -6, Omega) 2개를 설치하였다. 반응용기 내부의 열유속 및 열전달 계수 측정 실험 시편(37 mm × 40 mm × 30 mm)은 사각 평면 실험 시편 및 히터로 구성되어 있다. 사각 평면 실험 시편은 두께 9.53 mm, 폭 9.53 mm, 높이 4 mm로 제작되었다. 히터는 두께 9.53 mm, 폭 9.53 mm인 25 Ω의 열저항 히터(CCR-375-1, Component General Inc.)를 사용하였다. 그리고 알루미늄 시편에는 T-type 온도센서를 삽입하기 위하여 직경 1 mm 깊이 4.8 mm의 구멍 3개를 만들었다. 열유속을 발생시키기 위해서 직류전원 공급기(DAP-125, Dau nanotek)와 셉트 저항(221509, Yokogawa Co.)을 설치하여 전류 및 전압을 측정하였다. 또한 데이터 로거(34970a, Agilent) 및 컴퓨터, 소프트웨어를 이용하여 실험데이터를 모니터링하고 수집 및 저장하였다.

3. 실험결과 및 토의

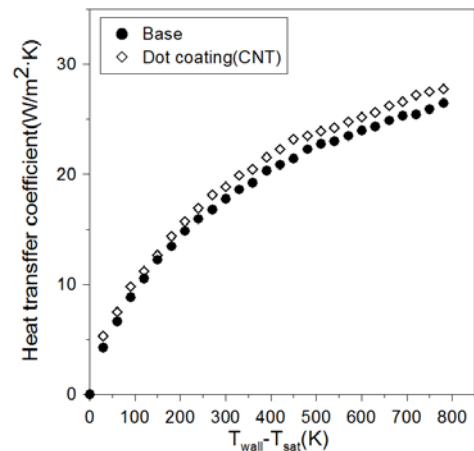
3.1 에어로졸 젯 프린팅을 이용한 나노구조체 패턴 형성

본 연구에서는 열전달 표면에 에어로졸 젯 프린팅 방식을 이용하여 dot 패턴의 나노 구조체 코팅하였고 코팅된 표면을 관찰한 결과 거칠기와 높이가 각각 0.34 μm와 3.69 μm로 측정되었다. 그리고 dot 패턴의 실제 사진 및 3D 나노 형상, SEM 사진을 [Figure 3]과 [Figure 4]에 나타내었다.

3.2 나노구조체 열전달 실험 결과



[Figure 5] Pool boiling heat flux data on dot pattern-coating



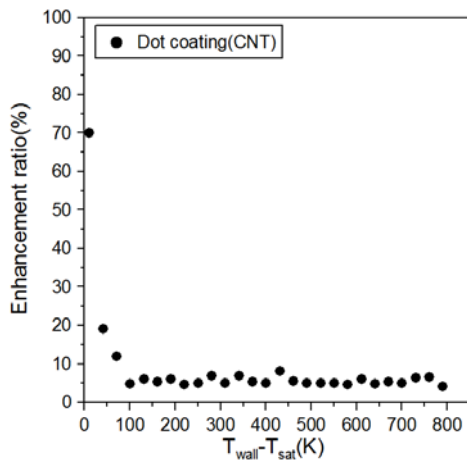
[Figure 6] Heat transfer coefficient data on dot pattern-coating.

[Figures 5], [Figures 6], [Figures 7]은 나노 구조체가 형성되지 않은 열전달 표면과 dot 패턴의 탄소 나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서의 열

유속과 열전달 계수, 열전달 계수 증가율을 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 나노 구조체가 형성되지 않은 열전달 표면보다 dot 패턴의 탄소

[Table 1] Change of surface roughness and contact angle before and after durability experiment

Adhesive	Nano Coating Time	Roughness (μm)		Contact angle ($^\circ$)	
		before	after	before	after
TEOS	120	0.245	0.319	75.07	62.43
	180	0.359	0.371	62.88	61.57
	240	0.413	0.428	60.18	50.34
PVA	120	0.413	0.482	60.85	58
	180	0.454	0.51	59.76	54.94
	240	0.52	0.55	51.47	44.51
DGEBF	120	0.409	0.451	62.69	61.88
	180	0.497	0.55	54.29	60.83
	240	0.56	0.56	54.97	70.59



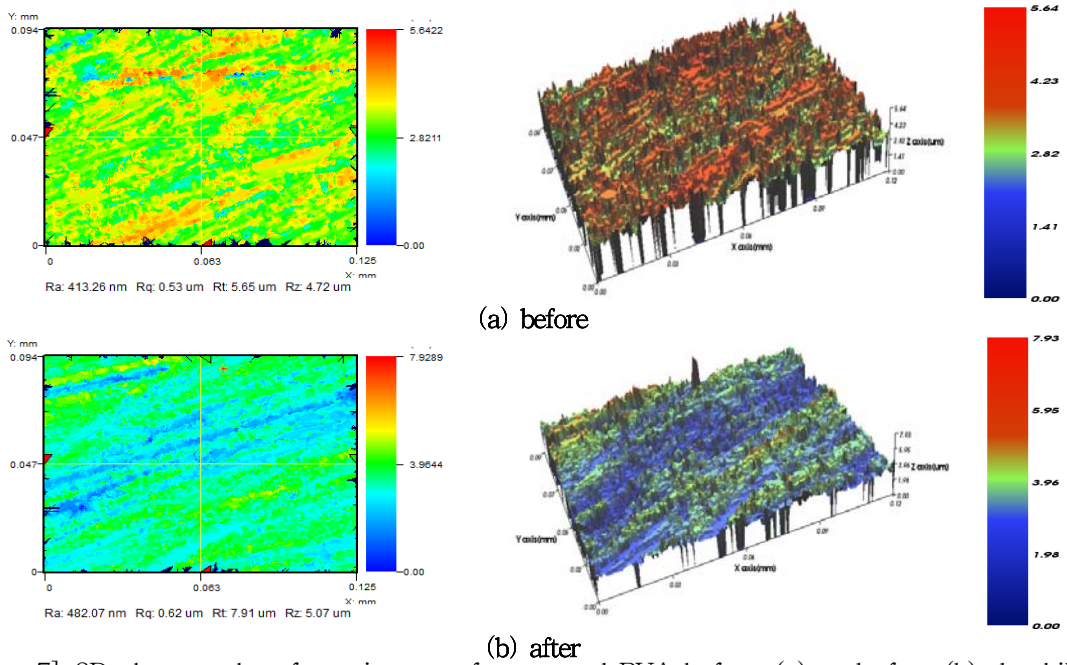
[Figure 6] Heat transfer coefficient enhancement ratio on dot pattern-coating

나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서의 열전달 계수가 전체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 dot 패턴의 탄소나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서의 열전달 계수 증가율은 지속적으로 감소하였으며, 100 kW/m² 이후의 열유속에서 열전달 계수의 증가율은 평균 5.81% 증가하였다. 이러한 결과는 나노 구조체가 형성되지 않은 열전달 표면보다 dot 패턴의 탄소나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서 열전달 성능이 향상됨을 의미한다.

3.3 접착제가 첨가된 나노코팅의 내구성 실험

열전달 표면에 나노구조체를 만들 경우 내구성에 문

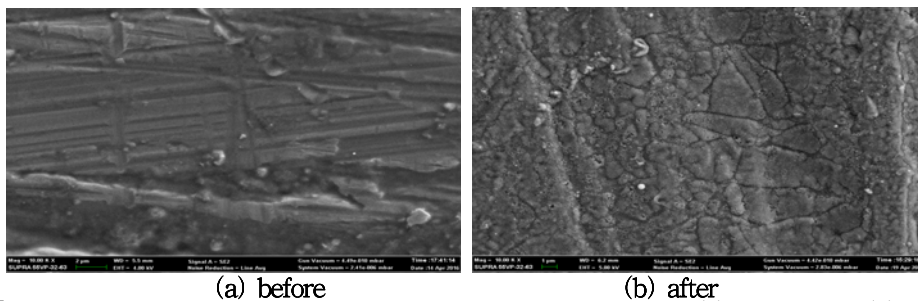
제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 내구성을 알아보기 위하여 나노 입자가 코팅된 표면에 TEOS, PVA, DGEBF 접착제를 첨가한 시편의 내구성 측정 실험 후 코팅된 실험 시편 표면을 관찰하였다. 삼차원 나노형상 측정 결과 코팅 표면 상단에 접착제를 분사할 경우 거칠기가 대부분 증가하는 것을 확인하였다. TEOS 접착제를 사용할 경우, 거칠기는 코팅 시간 120초, 180초, 240초에서 각각 0.074 μm , 0.012 μm , 0.015 μm 증가하는 것을 확인하였다. PVA 접착제를 사용할 경우, 거칠기는 코팅 시간 120초, 180초, 240초에서 각각 0.069 μm , 0.056 μm , 0.03 μm 증가하는 것을 확인하였다. DGEBF 접착제를 사용할 경우, 거칠기는 코팅 시간 120초, 180초에서 각각 0.042 μm , 0.053 μm 증가하고 240초에서는 변화가 없는 것을 확인하였다. 또한 TEOS 접착제를 사용할 경우의 접촉각은 코팅 시간 120초, 180초, 240초에서 각각 12.64 $^\circ$, 1.31 $^\circ$, 9.84 $^\circ$ 감소하는 것을 확인하였다. PVA 접착제를 사용할 경우의 접촉각은 코팅 시간 120초, 180초, 240초에서 각각 2.85 $^\circ$, 4.82 $^\circ$, 6.96 $^\circ$ 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 TEOS, PVA 접착제와는 반대로 DGEBF 접착제를 사용할 경우의 접촉각은 코팅 시간 120초에서 0.81 $^\circ$ 감소하고 180초, 240초에서는 각각 4.82 $^\circ$, 6.96 $^\circ$ 증가하는 것을 확인하였다. TEOS, PVA, DGEBF 접착제를 첨가한 시편의 실험 전후 거칠기 및 접촉각을 정리하여 [Table 1]에 나타내었으며, 참고적으로 PVA 접착제가 첨가된 코팅시간 120초의 삼차원나노형상, 접촉각, SEM 사진을 [Figures 7~9]에 나타내었다.



[Figure 7] 3D photographs of specimen surface coated PVA before (a) and after (b) durability experiment.



[Figure 8] Contact angle of specimen surface coated PVA before (a) and after (b) durability experiment.



[Figure 9] SEM Images of specimen surface coated PVA before (a) and after (b) durability experiment.

4. 결론

본 연구에서는 탄소나노튜브 구조체로 코팅된 열전달 표면의 풀 비등 열전달 계수 변화와 접촉제의 종류에 따른 탄소나노튜브 코팅의 표면상태를 분석한 결과 탄소나노튜브 구조체가 형성되지 않은 열전달 표면보다 dot 패턴의 탄소나노튜브 나노 구조체가 형성된 열전달 표면에서의 열전달 계수가 전체적으로 증가하지만 열전달 계수 증가율은 지수적으로 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 100 kW/m² 이후의 열유속에서 열전달 계수의 증가율이 평균 5.81% 증가하는 것을 확인하였으며, 이러한 결과를 통하여 열교환기의 열전달 표면에 탄소나노 구조체를 형성시킴에 따라 열전달 성능을 높일 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 탄소나노 입자가 코팅된 표면에 TEOS, PVA, DGEBCF 접촉제를 첨가한 시편의 내구성 측정 실험 후 코팅된 실험 시편 표면을 3D 나노형상 및 접촉각, SEM 사진을 통하여 비교·분석한 결과 PVA 접촉제의 성능이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

5. References

- [1] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., Principles of heat and mass transfer, 7th edition, Wiley.
- [2] Kim, J.M., Kim, T.J., Kim, J.Y., Kim, M.H., Ahn, H.S.(2014), "Effect of a graphene oxide coating layer on critical heat flux enhancement under pool boiling." International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 77. June: 919-927.
- [3] Lee, S.H., Seo, G.H., Lee, S.H., Jeong, U.J. Lee, S.J., Kim, S.J., Choi, W.J.(2016), "Layer-by-Layer carbon nanotube coatings for enhanced pool boiling heat transfer on metal surfaces." Carbon. Vol. 107. October: 607-618.
- [4] Sujith Kumar C.S., Suresh, S., Yang, L., Aravind, S.(2014), "Flow boiling heat transfer enhancement using carbon nanotube coatings." Applied Thermal Engineering. Vol. 65. April: 166-175
- [5] Jun, S.C., Kim, J.S., Son, D.G., Kim, H.Y., You,

S.S.(2016), "Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water Using Sintered Copper Microporous Coatings." Nuclear Engineering and Technology. Vol. 48. No. 4. August: 932-940.

저자 소개

김 영 훈



제주대학교 에너지공학과 학사, 석사 취득.
관심분야 : 유체역학, 열전달 분야 등

전 용 한



인하대학교 기계공학과 학사, 석사, 박사 취득. 현재 상지영서대학교 소방안전과 부교수 재직 중
관심분야 : CFD 해석, 터널화재, 열전달, 등

김 남 진



인하대학교 기계공학과 학사, 석사, 박사 취득. 전 대우자동차 기술연구소 근무. 현 제주대학교 에너지공학과 교수 재직 중
관심분야 : 열공학 분야 등