

산질화 표면에서 액적의 증발열전달 특성

김대윤* · 이성혁*,†

Evaporative Heat Transfer Characteristics of Droplet on Oxi-nitriding Surface

Dae Yun Kim and Seong Hyuk Lee

Key Words: Droplet(액적), Evaporation(증발), Heat transfer(열전달), Oxi-nitriding(산질화)

Abstract

The present study aims to experimentally investigate the evaporative heat transfer characteristics of Oxi-nitriding SPCC surface. Moreover, the heat transfer coefficient was examined with respect to surface temperature during droplet evaporation. In fact, the nitriding surface showed significant enhancement for anticorrosion performance compared to bare SPCC surface but the thermal resistance also increased due to the formation of compound layer. From the experimental results, the evaporative behavior of sessile droplet on nitriding surface showed similar tendency with the bare surface. Total evaporation time of sessile droplet on the nitriding surface was delayed less than 5%. The difference in heat transfer coefficient increased with the surface temperature, and the maximum difference was estimated to be around 11% at 80°C surface. Thus, this nitriding surface treatment method could be useful for seawater heat exchanger industries.

기호설명

ρ 액체의 밀도, kg/m³
 θ 동적 접촉각, deg
 θ_{ECA} 평형 접촉각, deg
 A 액적의 접촉면적, m²
 c 액체의 비열, J/kg·°C
 d 액적의 접촉직경, m
 h 열전달계수, W/m²·°C
 L_v 액체의 증발열, J/kg
 T_s 전열면의 온도, °C
 T_∞ 외기 온도, °C

t 증발 시간, s
 t_f 액적의 최종 증발 시간, s
 V 액적의 체적, m³

서론

최근 티타늄으로 제작되는 해수용 열교환기의 제작 비용을 낮추기 위한 연구가 증가하고 있다. 티타늄은 재료 자체의 고유 열물성과 내식성능이 우수하여 각광받는 소재지만, 고가의 비용 때문에 티타늄을 대체하기 위한 여러 기술들이 개발되고 있다. 대체 기술 중 하나인 산질화(Oxi-nitriding)기법은 표면을 개질하여 마모 및 부식 특성을 개선시켜 기계 수명을 크게 연장시킬 수 있으며, 제한된 자원을 효율적으로 이용하기에 점차 중요시되고 있다⁽¹⁻³⁾. 또한 산질화기법은 상대적으로 낮은 온도에서 공정이 진행되어 제품의 변형이 적고, 형상에 대한 제약이 없다는 장점이 있

(Received: 29 Feb 2016, Received in revised form: 14 March 2016, Accepted: 15 March 2016)

*중앙대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부(소속)

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)820-9780

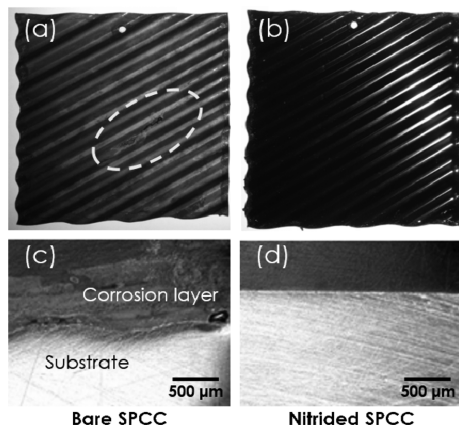


Fig. 1 (a) bare and (b) nitrided SPCC steel after 400 hours of salt spray test. Cross-section optical images of (c) bare and (d) nitrided SPCC steel

다. 그러나 산질화 개질 표면의 내식성능에 관한 연구에 비해 열전달 성능에 관한 연구는 미비한 실정이다.

Figure 1은 일반 steel plate cold commercial(SPCC)강과 산질화 열처리 공정 후 전착 도장한 시편의 내식성능을 비교하기 위한 염수분무 시험 결과다. 저온(4°C)의 심층수와 동일한 환경을 조성하여 장기 부식 실험을 진행하였으며, chamber내에서 약 400시간 동안 부식 실험을 진행하였다. 일반 시편의 경우 시편의 chevron 형상에 고여진 염수로 인하여 국부적인 부식이 진행되었고, 산질화 표면에서는 부식이 진행되지 않았다. Fig. 1(c)를 보면 일반 SPCC강에서는 부식층의 두께가 시간 경과에 따라 증가하며 모재와 다른 회절층이 생성되었다. 또한 부식이 진행될수록 편평했던 모재가 침식되어 표면이 불균일한 것을 확인할 수 있으며, 산질화 개질 표면은 동일 시간이 경과해도 부식이 진행되지 않았다. 이와 같이 산질화 열처리 과정을 통해 개질한 표면은 내식성능이 두드러지게 향상되었으나, 화합물층의 생성으로 열저항이 증가한다^(4,5). 산질화 표면에서 열저항이 증가하는 것은 사실이지만 개질 표면의 정량적인 열전달 특성에 관한 연구가 부족하다.

따라서 본 연구에서는 산질화 개질 표면에서의 열전달 특성을 파악하기 위해 산질화 처리 유무에 따른 영향을 분석하였다. 각 표면에서 증발 과정 동안 액적의 동적 거동을 가시화하였으며 이미지 처리하여 분석하였다^(6,7). 또한 전열면의 온도 변화에 따른 열전달계수를 추산하여 증발열전달 특성을 파악하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

2. 실험

Figure 2는 본 연구에서 액적을 고착시킬 표면의 이미지다. Fig. 2(a)는 SPCC강으로 가로와 세로의 길이가 각각 25 mm, 두께는 1.53 mm이며, 시편의 상단을 SiC 연마지(#2000)를 이용하여 표면을 제작하였다. Fig. 2(b)는 (a)와 동일한 SPCC강에 산질화 열처리 공정 후 전착 도장을 통해 표면을 개질한 시편이다. 산질화층의 두께는 약 19.35 μm , 전착 도장의 두께는 약 29.36 μm 이다. 실제 산업 현장에 적용하기 위해 산질화 층과 전착 도장을 포함한 전체 코팅층의 열전달 성능에 대해 연구하였다. 증발 실험에 탈이온수(DI-water)를 사용하였으며 상온에서 액적을 두 가지 표면에 고착시켰을 경우 평형 접촉각은 각각 $79.35 \pm 1.1^\circ$, $72.78 \pm 1.5^\circ$ 로 측정되었다.

Figure 3은 본 연구에서 사용한 액적 증발 실험 장치를 나타낸 그림이다. CMOS(Canon, EOS 7D) 카메라를 사용하여 액적의 증발 거동을 촬영 하였으며, 할로겐 램프(Fiber-lite, MI-157)를 광원으로 사용하였다. 저장된 사진의 해상도는 한 픽셀당 3.27 μm 이며, 촬영한 사진들은 상용 프로그램인 ImageJ를 이용하여 후처리 하였다. 전열판(Lab companion, T-17R)을 이용하여 시편의 표면 온도를 40, 60, 80°C로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다. 전열면의 온도는 상온 약 20°C와 물의 비등점인 100°C 범위를 등간격으로 설정하였다. 시편과 전열면의 상단에 각각 RTD (J&S Sensor, PT100)센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 온습도 측정기(Kimo,

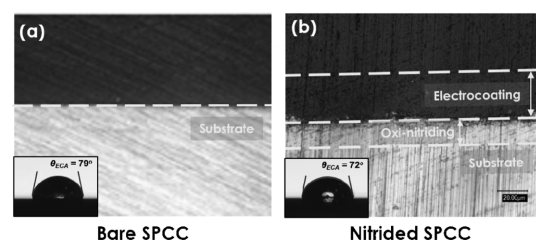


Fig. 2 Surface preparation

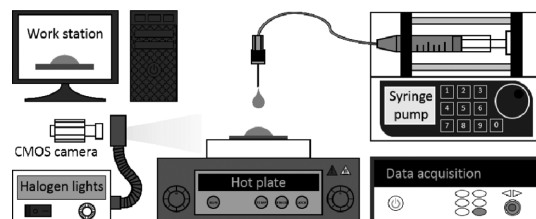


Fig. 3 Schematic of the experimental set-up

TH100)를 사용하여 실험 분위기 조건을 측정하였고 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하였다. 외기 온도는 $18.6 \pm 0.9^\circ\text{C}$, 상대습도는 $26 \pm 2.1\%$ 로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다.

본 실험에서는 액적을 시편에 고착시키기 위해 실린지 펌프(Longer Pump, LSP01)와 50 gage 미세 바늘(Hamilton, 90310)을 사용하였다. 미세 바늘은 시편으로부터 4.6 mm의 높이에 고정하였으며, $7.5 \mu\text{l}$ 의 탈이온수가 자중에 의해 분리되도록 설정하여 액적의 충돌 속도는 0.09 m/s 이다. 각 실험은 10회씩 반복하였으며, 데이터 측정에 의한 불확실성은 4.1%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적의 증발 거동 특성

Figure 4는 80°C 로 가열된 각 표면 위에 고착된 액적이 증발하는 과정을 촬영한 이미지이다. 평형 접촉각 측정 결과와 동일하게 산질화 표면에서는 액적이 표면에 고착된 후 접촉각이 작게 나타났다. 최종 증발시간은 평균적으로 일반 SPCC강에서 약 70.1초, 산질화 표면에서 약 74.5초로 측정되었으며 총 증발 과정이 6.27% 지연되었다. 액적의 증발 거동을 정량화하기 위해 촬영한 이

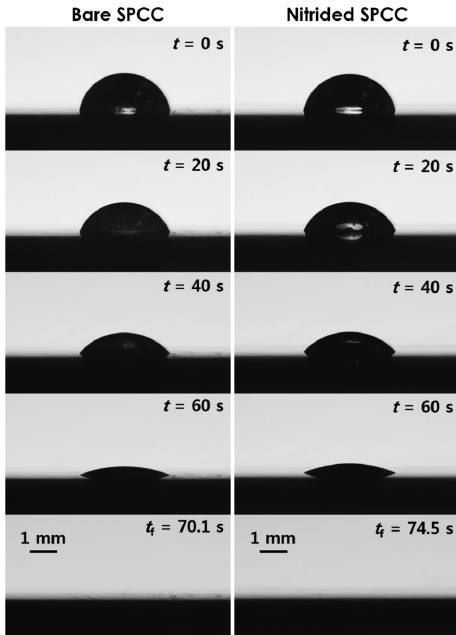


Fig. 4 Images of droplet evaporation on a heated surface at 80°C

미지를 후처리하여 접촉각을 측정하였다. Fig. 5는 80°C 로 가열된 표면에서 액적이 증발과정 동안 시간에 따른 접촉각의 변화를 나타낸다. 두 표면에서 모두 접촉각은 시간이 지남에 따라 점차적으로 감소한다. 동일한 온도 조건이지만 산질화 표면은 접촉각의 감소하는 기울기가 완만한 것을 알 수 있으며 약 60초이후에는 접촉각의 값이 역전한다. 산질화 표면에서는 초기 평형 접촉각이 작지만 최종 증발 시간이 길기 때문에 이러한 역전 현상이 나타나는 것으로 사료된다. Fig. 6에서는 시간에 따른 액적의 접촉 직경 변화를 보여주며, 액적이 고착된 후 초기 증발 과정에서는 액적의 피닝효과(pinning effect)가 확실하게 나타난다^(11,12). 초기 증발 과정에서 액적의 접촉직경이 거의 일정하게 유지되는 반면 접촉각은 감소하기 때문에 반경이 일정한 상태(constant radius mode)로 간주할 수 있다⁽¹³⁾. 총 증발 과정의 중반 이후에는 액적의 접촉직경이 서서히 감소하기 시작하면서 그 기울기가 급격하게 증가한다. 본 실험에서 사용한

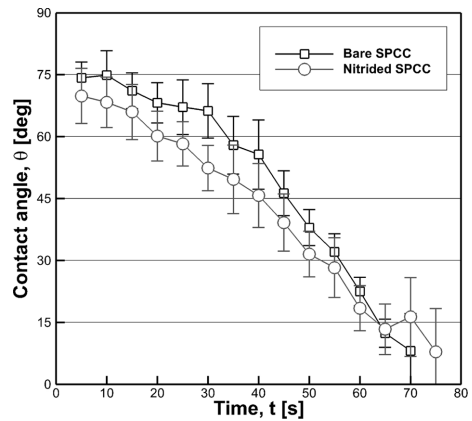


Fig. 5 Contact angle variation with time

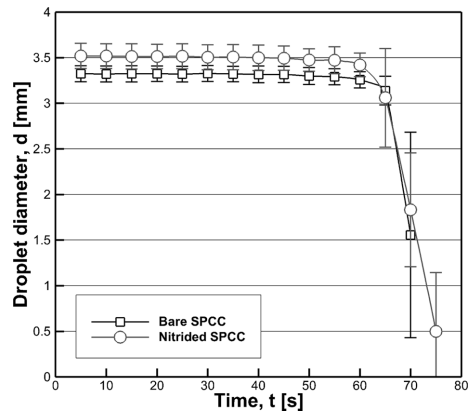


Fig. 6 Droplet diameter variation with time

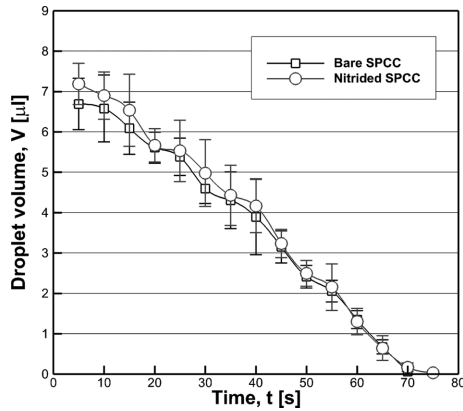


Fig. 7 Droplet volume variation with time

달이온수는 나노유체와 달리 pinning effect가 크지 않아 최종 증발 직전에는 접촉각과 접촉직경이 동시에 감소하며, 매 실험마다 일관된 거동을 보이지 않아 표준편차가 크게 나타났다. 이러한 결과는 표면을 제작하는 과정에서 발생하는 heterogeneous한 특성과 유체의 종류에 따른 pinning effect가 액적의 최종 증발까지 유지되지 않기 때문이라고 판단된다.

전열면의 온도가 80°C인 경우 시간에 따른 액적의 체적 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 친수성 표면에 고착된 액적의 접촉직경과 접촉각을 측정하면 기하학적으로 액적의 체적을 계산할 수 있다⁽¹⁴⁾. 전열면의 온도가 40, 60°C인 경우 각 표면에서 액적 거동의 차이가 미미하였으며 총 증발 시간이 약 460, 170초로 스케일이 상이하어, 전열면의 온도가 80°C인 경우의 실험 결과만을 대표적으로 나타냈다. 또한, 전열면의 온도가 40, 60°C인 경우에는 전열면과 외기의 온도차이가 상대적으로 작아 각 실험 결과의 표준 편차가 Figs. 5-7보다 작게 나타났다. 시간이 지남에 따른 액적의 체적은 두 표면에서 모두 점차적으로 감소하며 거의 선형적인 경향이 나타났다. 산질화 표면에서 증발량이 작아 동일한 시간 경과 후 액적의 체적이 더 크다. 최종 증발시간에 다다르면서 각 표면 위 액적의 체적 차이가 감소하는데, 액적의 pinning effect가 감소하면서 액적의 접촉직경이 급격하게 줄어들기 때문이다.

3.2 산질화 표면의 열전달 특성

산질화 표면에서의 단일 액적의 초기 형상과 최종 증발 시간을 기준으로 열전달계수를 추산하였다. 김영찬은 전열면에서 발생하는 열이 액적의 온도를 높이고 증발시키는 데에 전부 사용된다는 가정으로 다음의 식을

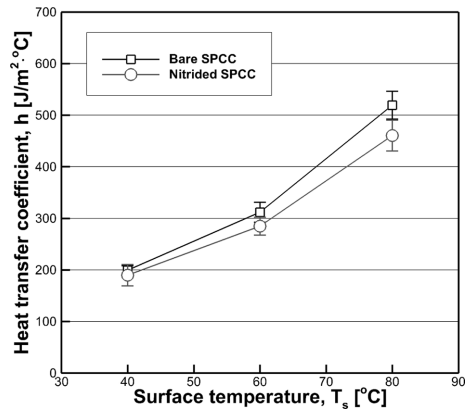


Fig. 8 Heat transfer coefficient with respect to temperature difference

유도하였다⁽¹⁵⁾:

$$h = \frac{c\rho V(T_s - T_\infty) + \rho V L_v}{A(T_s - T_\infty)t_f} \quad (1)$$

여기서 c 는 액체의 비열, ρ 는 액체의 밀도, V 는 액적의 체적, T_s 는 전열면의 온도, T_∞ 는 외기의 온도, L_v 는 액체의 비열, A 는 액적의 접촉면적, t_f 는 최종 증발 시간을 의미한다. 액체의 비열과 밀도는 상온의 값을 기준으로 상수로 가정하였다.

Figure 8에는 증발 실험 결과로부터 전열면의 온도에 따른 열전달계수를 각 표면에 따라서 나타내었다. 전열면의 온도가 증가할수록 외기와 온도차가 증가하여 증발 과정이 가속되어 최종 증발시간이 감소한다. 전열면의 온도가 40, 60, 80°C인 경우 산질화 표면의 열전달계수는 약 4.9, 8.7, 11.3% 감소하였다. 전열면의 온도가 증가할수록 열전달계수의 차이가 증가하며 표준편차도 증가한다. 본 실험에서 전열면의 온도가 80°C인 경우에는 액적과 표면의 접촉면에서 핵비등(nucleate boiling)이 관측되었으며, 핵비등으로 인해 열전달이 촉진되고 전열면 온도가 증가하면서 열전달계수 변화량이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해수용 열교환기의 내식성능 향상을 위해 산질화 및 전착도장한 SPCC강에 대하여 열전달 성능을 평가하였다. 염수 분무 시험 결과 산질화 표면 처리한 시편에서는 내식성능이 두드러지게 향상되지만

열저항도 증가하였다. 비록 표면처리 후에 액적의 증발 시간이 지연되고 열전달계수가 감소하지만, 오차범위 내에서 일반 시편과 유사한 열전달 성능을 나타내는 것으로 판단된다. 향후 산질화 표면의 열저항 대비 내식성능 향상으로 인한 수명 연장의 관계를 파악하면 실제 해수용 열교환기 산업에 적용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01006186), 2016년도 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 출연금 재원으로 수행된 (해양기자재 성능향상을 위한 내식성/방오 표면기술 개발) 연구 결과임 (No. PES2180).

참고문헌

- (1) K. Funatani, "Heat treatment of automotive components : current status and future trends", *Trans. Indian Inst. Met.* Vol. 57, No. 4, 2004, pp. 381-396.
- (2) M. A. J. Somers, B. J. Kooi, L. Maldzinski, E. J. Mittemeijer, A. A. Van der horst, A. M. Van der Kraan and N. M. Van der pers, "Thermodynamics and long-range order of interstitials in an h.c.p. lattice : nitrogen in ϵ -Fe₂N_{1-z}", *Acta Mater.* Vol. 45, No. 5, 1997, pp. 2013-2025.
- (3) E. J. Mittemeijer and M. A. J. Somers, "Thermodynamics, kinetics, and process control of nitriding", *Surface Engineering*, Vol. 13, No. 6, 1997, pp. 483-497.
- (4) M. Arai, H. Ochiai and T. Suidzu, "A novel low-thermal-conductivity plasma-sprayed thermal barrier coating controlled by large pores", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 285, 2016, pp. 120-127.
- (5) M. N. Rahaman, J. R. Gross, R. E. Dutton and H. Wang, "Phase stability, sintering, and thermal conductivity of plasma-sprayed ZrO₂-Gd₂O₃ compositions for potential thermal barrier coating application", *Acta Mater.* 54, 2006, pp. 1615-1621.
- (6) D. H. Shin, C. K. Choi, Y. T. Kang and S. H. Lee, "Local aggregation characteristics of a nanofluid droplet during evaporation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, 2014, pp. 336-344.
- (7) 문주현, 이상민, 정정열, 이성혁, "홀 패턴 텍스처 표면에서 충돌하는 단일 액적의 젖음 특성", *한국액체미립화학회지*, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 181-186.
- (8) 김으뜸, 박인한, 배녹호, 강보선, "고온벽과 충돌하는 나노유체 액적 거동에 관한 연구", *한국액체미립화학회지*, Vol. 20, No. 1, 2015, pp. 7-13.
- (9) 김대운, 정정열, 이성혁, "비등점의 가열 표면에서 나노유체 액적의 증발 특성", *한국액체미립화학회지*, Vol. 20, No. 4, 2015, pp. 236-240.
- (10) Y. C. Kim, "Evaporation of nanofluid droplet on heated surface", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 4, 2015 pp. 1-8.
- (11) R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel and T. A. Witten, "Contact line deposits in an evaporating drop", *Physical Review E*, Vol. 62, No. 1, 2000, pp. 756-765.
- (12) R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel and T. A. Witten, "Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops", *Nature*, Vol. 389, 1997, pp. 827-829.
- (13) J. M. Stauber, S. K. Wilson and B. R. Duffy, "Evaporation of droplets on strongly hydrophobic substrates", *Lanmuir*, Vol. 31, No. 12, 2015, pp. 3653-3660.
- (14) M. E. R. Shanahan and K. Sefiane, "Kinetics of triple line motion during evaporation", *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, 6th edition, 2009, pp.19-31.
- (15) 김영찬, "가열 표면에서 액적의 증발열전달에 관한 실험적 연구", *한국액체미립화학회지*, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 15-18.