Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 9 pp. 227-232, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.227
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

열교환기에서 부식이 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

권현민[1], 권정태[2*]
[1]인하대학교 기계공학과, [2]호서대학교 기계공학부

A Study of The Effect of Corrosion on Heat Transfer in a Heat Exchanger

Hyun-Min Kwon[1], Jeong-Tae Kwon[2*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Inha University
[2]Division of Mechanical Engineering, Hoseo University

요 약 심층수와 표층수의 온도 차이를 이용하는 히트펌프 시스템이나 해수열원 발전시스템(OTEC)의 열교환기는 해수의 염분에 의하여 발생하는 열교환기의 표면 위에서의 부식 현상에 의하여 열전달 성능이 저하된다. 본 연구는 이중관식 열교환기 실험을 통하여 부식시간에 따른 열전달저하를 실험하고 분석한 내용을 제시한다. 이러한 연구는 고가의 티타늄 열교환기를 대체하기 위하여 알루미늄에 전착 코팅을 하여 제작된 코팅 관을 통해 수행되었다. 코팅 두께 10, 15, 20μm의 알루미늄 관 및 티타늄 관을 각각 6주, 12주, 18주씩 가속 부식시킨 후에 이중관 열교환기 실험을 통하여 코팅 두께 및 부식 시간에 따른 열전달의 변화를 측정하고 분석하였다. 코팅이 얇을수록 더 빠르게 블리스터 현상이 발생하였다. 15μm의 코팅 관의 경우 12주 부식까지는 좋은 열전달 성능을 보였으나, 18주 부식의 경우에서 열전달 성능의 감소를 보였다. 연구결과로부터 본 실험 조건에서는 20μm의 두께로 코팅된 알루미늄관이 티타늄을 대체할 수 있는 열전달 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한, 부식 시간에 따른 부식 열저항의 증가에 대한 고찰을 통하여 향후 부식 열저항 모델 개발의 방법론을 제시하였다.

Abstract Heat pump systems based on ocean thermal energy conversion (OTEC) systems use the temperature difference between deep ocean water and surface ocean water to operate. However, they may have heat transfer degradation due to corrosion on the heat exchanger surface due to the salinity of sea water. This study presents experimental results for the heat transfer decrease of corroded metal tubes with respect to corrosion time. In order to replace high-priced titanium, electro-deposition (ED) coating was performed on aluminum tubes. Aluminum tubes with ED coating thicknesses of 10, 15, and 20 μm were tested for double-tube heat exchangers after performing accelerated corrosion for 6, 12, and 18 weeks. The effects of the coating thickness and the corrosion time on the heat transfer degradation were investigated. From the results, the aluminum tube with an ED coating of 20 μm thickness can be suggested as a candidate for replacing titanium tubes.

Keywords : Heat Exchanger, Heat Transfer, Corrosion, Electro-Deposition Coating, Sea Water

1. 서론

화석연료의 고갈과 기후변화에 대응하기 위한 인류의 노력은 최근까지 소위 신재생에너지의 확산 및 에너지 기기의 효율화로 이어져 오고 있다. 해수는 태양에너지가 도달하는 표층수와 태양에너지가 도달하지 못하는 심층

본 논문은 호서대학교 연구년(2017. 9~2018. 8) 지원으로 수행되었음.
*Corresponding Author : Jeong-Tae Kwon(Hoseo Univ.)
email: jtkwon@hoseo.edu
Received July 31, 2019 Revised August 27, 2019
Accepted September 6, 2019 Published September 30, 2019

수와의 사이에서 온도 차이가 존재한다. 이러한 온도 차이를 이용하면 히트펌프와 같은 냉난방시스템 뿐 만 아니라 해수 열원 발전(OTEC) 시스템을 이용한 발전도 가능하다[1]. 해수에서 사용하는 위와 같은 시스템의 핵심 부품인 열교환기는 해수의 염분으로 인하여 발생하는 부식(corrosion) 때문에 열교환기의 열전달 성능이 저하될 수 있다[2]. 본 저자(J. T. Kwon) 등의 기존 연구[3-5]에서는 해수용 열교환기의 코팅 부식특성을 시편을 이용하여 수행하였고, 또한 다양한 열교환기 재질의 영향과 부식의 영향에 대한 기초 연구를 소개한 바 있다. 기존연구[5]에서는 6주 부식된 알루미늄 코팅관(15, 150 μm)에서의 연구를 통하여 15μm로 전착 코팅된 알루미늄 관의 티타늄에 대한 가능성을 탐색한 바 있으나, 부식 시간이 다소 짧고 코팅 두께의 최적화도 더 필요하다는 결과를 보고한 바 있다. 이번 연구에서는 기존 연구를 좀 더 심화하여 코팅 두께 및 부식 시간의 영향 등을 좀 더 면밀히 조사하기 위한 실험을 수행하였다. 즉, 티타늄 관과 10, 15, 20 μm의 두께로 전착 코팅 된 알루미늄 관을 각각 6주, 12주, 18주씩 가속 부식 시킨 후에 이중관 열교환기 실험을 통하여 코팅 두께 및 부식 시간에 따른 열전달의 변화를 측정하고 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 해수용 열교환기에서 주로 사용되는 티타늄 관의 알루미늄 전착 코팅 관으로의 대체 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 열교환기 실험 및 해석

2.1 이중관 열교환기 제원 및 실험조건

본 연구에서 사용한 이중관 열교환기의 제원을 Table 1에 정리하였다. 열교환 시험 시 내관을 흐르는 고온수의 온도는 30℃, 외관을 흐르는 저온수의 온도는 7℃로 유지하고 1차 실험과 2차 실험의 내관과 외관의 유량 조건은 Table 2와 같이 설정하였다.

Table 1. Thermal conductivities of metal tubes and their specifications

Materials	k[W/mK]	Spec.[mm]
Ti	22	12.7D×0.9T×1500L
Al	237	12.0D×1.0T×1500L
Al-ed-10μm	-	12.0D×1.0T×1500L
Al-ed-15μm	-	12.0D×1.0T×1500L
Al-ed-20μm	-	12.0D×1.0T×1500L

Table 2. Experimental conditions of double-tube heat exchangers

Test number	Inner flow rate [lpm]	Our flow rate [lpm]
1	1	10
	2	
	3	
	4	
2	2	6
		8
		10
		12

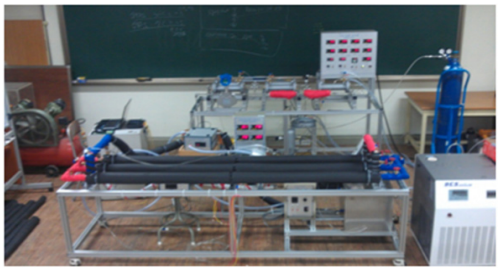
이중관 열교환기는 대향류로 설계하였고 열전달률을 구하기 위하여 ε-NTU 방법을 채택하였다. 상세한 실험 방법은 기존연구[3]에 나타낸 바와 같다. 실험의 조건을 Reynolds 수 기준으로 난류 조건을 만들기 위해서 내관 유량은 1 lpm (Re : 2344)을 최저유량으로 설정하였다. 이때, 외관의 유량은 Reynolds 수의 난류 조건과 고온수의 입·출구 온도차를 고려하여 10 lpm으로 고정시켰다. 또한, 내관의 유량을 고정시킬 때도, 외관의 유량을 고정시킬 때의 조건과 같게 하여서 2 lpm으로 고정하였고, 외관의 유량은 6 lpm일 때부터 Reynolds 수가 난류 조건에 가까웠고, 1 lpm 의 차이로는 고온수 만큼 Reynolds 수의 변화가 크지 않을뿐더러, 외관의 유량이 10 lpm 일 때와 그보다 좀 더 높은 유량일 때의 Reynolds 수를 구해보기 위해서 6, 8, 10, 12 lpm 으로 구간을 나누게 되었다.

2.2 실험 방법 및 불확실성 해석

온도 센서는 ±1.5%의 오차를 갖는 PT100Ω을 사용하였고, 유량계는 터빈 유량계로 ±1%의 오차를 갖는다. Eq. (1)을 통해서 측정 장치의 오차를 통한 불확실성 해석(Uncertainty analysis)을 수행한 결과, 열전달률의 불확실성은 ±1.8%값이 나왔다. 이식에서 x는 측정값(온도, 유량), Y는 결과 값(열전달률)을 나타낸다.

$$\left|\frac{\triangle Y}{Y}\right|_{\exp} = \sqrt{\sum\left(\frac{\partial Y}{\partial x_i}\frac{x_i}{Y}\frac{\triangle x_i}{x_i}\right)^2} \qquad (1)$$

실험은 비부식관과 6주, 12주, 18주 부식관(Ti, Al, Al 전착 코팅 관)을 사용하여 이중관 열교환기에 설치하고 열전달율을 측정하였다. Fig. 1은 이중관 열교환기 실험 장치와 개략도를 나타낸 것이다.



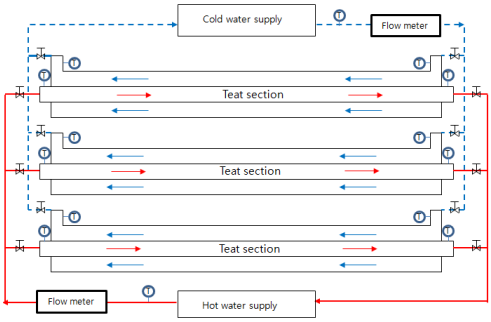


Fig. 1. Experimental apparatus and schematic diagram[5]

세부적인 구성 요소로는 냉온수 공급 장치, 항온조, 유량 측정 장치, 온도지시계, 데이터 수집 장치 등이 있다. 냉온수 공급 장치의 최대 유량은 30 lpm 이며, 사용온도 범위는 -5~70℃이므로 해양심층수의 온도를 7℃로 가정한 실험 조건에 적합하다. 항온조에서 30℃의 고온수를 공급한다. 히터는 AC 220V 단상 2㎾를 사용하였으며, PID Control을 이용하여 온도 조절이 가능하다. 입력 온도센서는 PT 100Ω이며 출력은 4~20mA이다. 유량 측정 장치는 내관의 고온수와 외관의 저온수 유량을 측정하기 위한 장치로, 터빈 유량계이며 사용압력은 0.6~0.5㎏f/㎠ 이다. 사용온도는 0~70℃이며 ±1% RD (±0.5%FS)의 오차를 가지고 있다. 이외에도 측정되는 온도를 나타내는 온도 지시계, 실험에서 측정된 유량, 온도 등의 데이터들을 컴퓨터로 전송해주는 데이터 수집 장치 등이 있다.

2.3 부식관 제조 및 부식표면 관찰

부식관 제조장치[5, 6]를 이용하여 다섯 가지의 시험관을 각각 6주, 12주, 18주 가속 부식(accelerated corrosion)시킨 후 촬영한 사진은 Fig. 2 ~ Fig. 4와 같다.

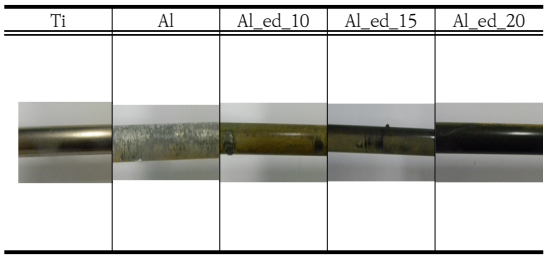


Fig. 2. Photos of tube in 6 week-enhanced corrosion

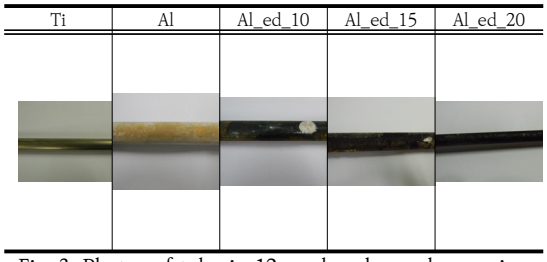


Fig. 3. Photos of tube in 12 week-enhanced corrosion

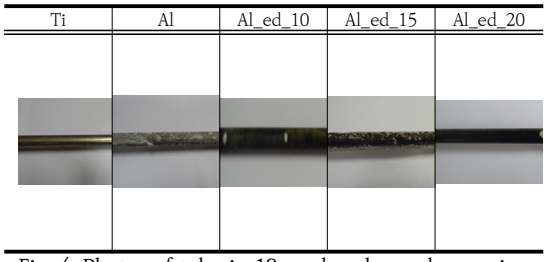


Fig. 4. Photos of tube in 18 week-enhanced corrosion

부식은 증류수에 해수염도에 해당하는 3.5%의 염화나트륨을 혼합한 뒤, 가속부식을 위하여 온도를 70℃로 가열한 후 6주, 12주, 18주간 진행하였다. 해수는 온도가 10℃ 상승할 때 부식 속도는 약 30% 증가하며 70~80℃까지 부식속도가 증가한다고 보고 되고 있다[7]. 그러므로, 해수 온도 70℃의 부식은 10℃에 대한 금속관의 부식에 대하여 최대 5배 정도 가속된다고 추정할 수 있다. 즉, 18주 가속 부식은 대략 90주의 자연 부식에 해당한다고 볼 수 있다.

Fig. 2 ~ Fig. 4의 사진을 보면 10 ㎛로 가장 얇게 코팅된 Al_ed_10인 경우 6주 부식 시 코팅이 부풀어 오르는 소위 블리스터 현상(Blistering phenomenon)이 발생하였다. 15 ㎛ 코팅관의 경우에는 12주까지는 건재하였으나 18주 부식 시에 블리스터 현상이 발생하였다. 20 ㎛ 코팅관의 경우에는18주 가속부식 때까지 블리스터 현상을 거의 보이지 않았다. 부식을 방지하기 위

하여 전착 코팅 관에서 블리스터 현상이 일어나게 되면 열저항으로 작용하게 되어 오히려 열전달 성능이 저하될 수도 있을 것이며, 이러한 예측은 실험 및 해석 결과에서 확인할 수 있었다.

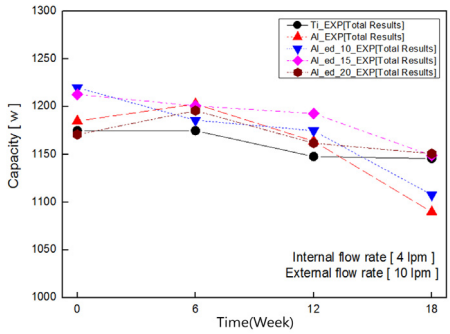
3. 실험 및 해석 결과

3.1 비부식관 및 부식관에서의 열전달 비교

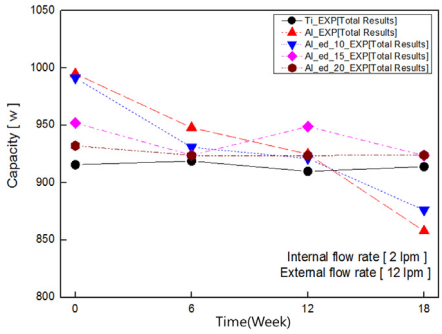
비부식관 및 부식(6주, 12주, 18주)관의 열전달률 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 열전달률(Capacity) 도출은 다음 식을 이용하였다.

$$\dot{Q}=\dot{m}c_p\triangle T \qquad (2)$$

여기서, $\dot{Q}$ 는 열전달률(W), $\dot{m}$ 은 질량유량(kg/s), c_p 는 정압비열(J/kg℃), $\triangle T$는 입구와 출구에서의 물의 온도이다.



(a)



(b)

Fig. 5. The effects of corrosion time on the heat transfer rates

즉, Eq. (2)를 이용하여 내관과 외관에서의 열전달률을 각각 구한 후에 두 값의 평균값을 최종 열전달률로 산정하였다. 선행연구[5]에서는 6주 부식된 알루미늄 코팅관(15, 150 μm)에서의 연구를 통하여 15μm로 전착 코팅된 알루미늄 관의 티타늄에 대한 대체 가능성을 탐색하였다. 150 μm 전착 코팅 관은 열전달률이 티타늄 대비 12.3% 감소하였으나 15 μm 전착 코팅 관은 열전달률이 티타늄 대비 4.7% 감소하여 티타늄 대체 가능성이 있다고 판단하였다. 다만, 부식 시간이 다소 짧고 코팅 두께의 최적화도 더 필요하다는 결과를 보고한 바 있다.

Table 2의 8가지 시험조건 중에서 대표적인 2가지 조건에 대한 결과를 분석하여 보고 하면 다음과 같다. 대표적인 2가지 조건은 내관유량 조절(외관유량 고정) 조건 중 열전달량이 가장 높게 측정이 된 경우와, 외관유량 조절(내관유량 고정) 조건 중 열전달량이 가장 높게 측정이 된 경우이다.

Fig. 5에서 x축은 부식제조 장치를 통하여 관을 부식시킨 기간으로, 0은 비부식관을 의미한다. Fig. 5(a)는 내관의 유량이 4(lpm), 외관의 유량이 10(lpm)일 때 나타나는 열전달률을 그래프로 나타낸 것으로, 내관의 유량을 조절하는 1차 실험에서 가장 높은 열전달률이 나오는 조건이다. Ti의 경우 부식에 강하다는 특성 때문에, 전체 부식기간인 18주가 지난 뒤에도 열전달률이 총 2.47%밖에 감소하지 않았다. Al 관은 부식이 일어나면서 열전달률이 급격하게 감소하는데, 이는 같은 조건에서의 비부식관 열전달률 1185W보다 총 8.02%가 감소한 것이다. $Al_{_ed_}10\mu m$ 은 처음에는 열전달률이 어느 정도 감소하다가 부식 시간이 18주로 늘어났을 때, 블리스터 현상이 급격하게 일어나면서 코팅의 일부가 벗겨지게 되었고, 12주에서 18주로 경과하는 시간동안 5.7%의 열전달률 감소를 보였다. $Al_{_ed_}15\mu m$는 12주 부식까지는 거의 열전달률의 변화가 없었으며, Ti 보다도 뚜렷하게 높은 열전달률 값을 보였다. 하지만 부식 시간이 18주로 경과 되면서, 12주 보다 3.68% 열전달률이 감소하면서 Ti과 거의 비슷한 값을 가지게 되었다. 반면 $Al_{_ed_}20\mu m$는 부식 시간이 12주가 될 때까지는 $Al_{_ed_}10\mu m$보다 두각을 나타내지 못하고 있었지만, 18주로 기간이 늘어나자 1151W로 가장 높은 열전달률 값을 갖게 되었다. 이는 비부식관의 열전달률 1171W와 비교했을 때, 1.71%로 감소한 것으로, 열전달률의 총 감소율 또한 상당히 낮은 수치를 보였다.

Fig. 5(b)는 내관의 유량이 2(lpm), 외관의 유량이 12(lpm)일 때 나타나는 열전달률을 그래프로 나타낸 것

으로, 외관의 유량을 조절하는 2차 실험에서 가장 높은 열전달률이 나오는 조건이다. Ti은 비부식관에서의 열전달률 919W가 18주 동안 부식시킨 Ti관의 열전달률 값인 914W와 비교했을 때, 0.22%라는 아주 근소한 차이밖에 보이지 않았다. 하지만 Al은 역시 부식의 기간이 늘어날수록 계속해서 열전달률이 감소하는 것을 볼 수 있다. 부식이 일어나지 않았을 때는 995W로 가장 높은 열전달률을 보였지만, 부식 시간이 18주까지 경과 되자 858W의 가장 낮은 열전달률을 보였다. 이는 13.8%나 열전달률이 감소한 셈이다. Al_ed_10μm도 Al과 비슷한 경향을 나타내었다. Fig. 5(b)의 Al_ed_10μm 데이터는 Fig. 5(a)의 그래프와 비교했을 때, 변화가 좀 더 심하지만 18주 동안 부식을 시켜도 열전달률이 Ti보다 높은 것을 알 수가 있다. Al_ed_15μm를 18주 동안 부식시켰을 때의 열전달률 값 924W를 비부식관 데이터와 비교했을 때, 1.39%의 낮은 감소율을 보였다. 하지만 Al_ed_20μm의 그래프를 살펴보면 거의 열전달률의 변화가 없는 것을 확인할 수가 있다. 열전달률의 총 감소율도 0.86%에 지나지 않았으며, 18주에서는 Al_ed_15μm와 같이 924W로 가장 높은 열전달률을 보였다. 이상의 고찰을 통해 볼 때 부식 시간이 12주가 될 때까지는 Al_ed_15μm의 열전달 성능이 우수하였으나, 18주의 장기 부식에 있어서는 Al_ed_20μm이 다른 모든 관보다 Ti 대체 능력이 더 우수함을 알 수 있었다.

3.2 부식 시간에 따른 열저항 증가 고찰

3.1의 내용을 통해 볼 때 부식이 많이 될수록 열전달의 저항이 증가하여 열전달 성능이 저하됨을 알 수 있다. 관의 총괄 열저항 R_t는 Eq. 3과 같이 표현할 수 있다. 여기서 h_i, h_o는 이중관 열교환기에서의 내부관 및 외부 환형관에서의 열전달계수를 타내며, k는 관의 열전도율을 나타낸다.

$$R_t = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + R_c + \frac{1}{h_o A_o} \qquad (3)$$

본 실험 데이터를 이용하여 6주, 12주, 18주의 부식에 따른 부식 열저항(Corrosion thermal resistance) R_c를 따로 추출한다면 시간에 따른 부식의 영향을 모델화 할 수 있을 것이다. 이러한 연구는 보다 많은 경과 시간 및 다양한 재질의 금속관에 대한 데이터가 필요하므로 향후 연구로 남긴다.

4. 결론

해수용 열교환기에 주로 사용되는 티타늄(Ti)을 대체하기 위한 목적으로 다섯 가지의 금속관 (Ti, Al, Al_ed_10μm, 15μm, 20μm)의 열전달률을 측정하였다. 또한 부식시간의 영향을 파악하기 위하여 6주, 12주, 18주의 가속 부식 (accelerated corrosion)된 금속관에 대하여 이중관 열교환기 실험을 수행하고 비부식관의 열전달 결과와 비교함으로써 부식 시간이 열전달에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 6주 부식에서는 Al이 가장 높은 열전달률을 보였지만 부식이 많이 발생함을 알 수 있었다. 또한, Al_ed_10μm에서 코팅 면이 부풀어 오르는 블리스터 현상이 나타나면서 열전달률이 감소하였다. 12주 부식이 되었을 때, Al_ed_10μm의 블리스터 현상이 더욱 뚜렷해지고, 그에 따른 열전달률이 더욱 감소하였다. 하지만 Al_ed_15μm과 Al_ed_20μm는 계속해서 좋은 열전달률을 보였다.

둘째, 18주 부식관 중에서 Al_ed_10μm는 블리스터 현상이 더욱 심각해져 열전달률 감소가 거의 순수 Al 관과 비슷한 수준이 되었다. Al_ed_15μm 관도 조금씩 열전달률이 감소되어 Ti의 열전달률과 비슷한 결과를 얻게 되었다. 그에 비해 Al_ed_20μm는 내부식성이 좋아서 가장 높은 열전달률을 나타내었다.

셋째, 이상의 결과로부터, 본 실험의 범위내에서 Al_ed_20μm관이 티타늄 관을 대체할 능력이 가장 우수함을 알 수 있었다. 물론 더 두꺼운 코팅을 할 경우 내부식성은 우수해 질 수 있겠으나, 코팅두께의 증가에 따른 열저항 증대로 인하여 열전달성능을 티타늄 수준으로 유지하기는 어려울 것으로 판단된다.

References

[1] G. C. Jang, Y. J. Baek, H. S. Ra, J. Y. Kim, J. H. Lee, "The operation characteristics of a sea water source heat pump system", *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Collected papers of summer research meeting*, pp.1353-1357, June, 2008.

[2] J. G. Kim, K. H. Kim, S. J. Kim, G. H. Park, K. M. Moon, "An Electrochemical Study on the Corrosion

Property of Materials for Sea Water Heat Exchange System", *International Conference on Marine Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp.99-107, 2002.

[3] Y. C. Kwon, K. Y. Kim, C. Huh, M. I. Cho, J. T. Kwon "Experimental study on coating corrosion characteristics of heat exchanger for sea water", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.9, pp.4117-4123, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4117

[4] J. T. Kwon, C. K. Lee, C. Huh, M. I. Cho, K. Y. Kim, Y. C. Kwon, "A fundamentals study on heat exchanger using deep ocean water: effects of material on heat transfer performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.10, pp.4658-4664, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.4658

[5] Y. C. Kwon, S. H. Lee, C. Huh, M. I. Cho, C. K. Lee, J. T. Kwon "A fundamentals study on heat exchanger using deep ocean water: effects of corrosion on heat transfer performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.11, pp.5377-5384, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.11.5377

[6] H. M. Kwon, *The Effects of Corrosion on the Performance of the Heat Exchanger using Deep Ocean Water*, Master's Thesis, Hoseo University, pp.38-39, 2014.

[7] D. A. Jones, Principles and prevention of Corrosion, Prentice Hall, 2004.

권 현 민(Hyun-Min Kwon) [정회원]

- 2007년 3월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 호서대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)

〈관심분야〉
열전달, 가스터빈, 사이클 해석

권 정 태(Jeong-Tae Kwon) [정회원]

- 1988년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2005년 2월 : 남부대학교 자동차기계공학과 교수
- 2005년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학부 교수

〈관심분야〉
냉동공조, 열전달, 해수용 열교환기