

저온소성 코팅을 적용한 판형 열교환기의 성능평가

이원주* · 신우중** · 이동규*** · 최재혁**†

* 한국해양수산연수원, ** 한국해양대학교 기관시스템공학과, *** GP&E

Performance Evaluation of Plate Heat Exchanger Applied Low Temperature Cofired Coating

Won-Ju Lee* · Woo-Jung Shin** · Dong-kyu Lee*** · Jae-Hyuk Choi**†

* Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea

** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

*** GP&E, Daejeon, Korea

요 약 : 본 연구에서는 저온소성 코팅을 적용한 SUS 304 판을 사용하여 고가의 티타늄 판 대체에 대한 성능평가를 수행하였다. 전산유동해석 결과, 저온소성 코팅을 적용한 SUS 304 판은 100 마이크로 두께의 코팅까지는 티타늄 판에 비해 더 뛰어난 열전달 성능을 보이는 것으로 나타났다. 실제 열교환기를 이용하여 열전달 성능에 대한 실험을 한 결과, 코팅을 적용한 SUS 304 판이 티타늄 판에 비해 더 우수한 열전달 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한 개방검사를 통해서 판의 부식 및 스케일 생성 정도를 확인하였을 때, 코팅을 적용한 SUS 304 판의 내부식 성능은 티타늄 판과 거의 동등하게 나타났으며, 해수에 의한 스케일의 생성 억제 효과는 코팅을 적용한 SUS 304 판에서 더욱 우수하게 나타났다.

핵심용어 : 내부식성, 판형 열교환기, 티타늄, 저온소성 코팅, SUS 304

Abstract : In this study, a performance evaluation was conducted using a SUS 304 plate applied to low-temperature co-fired coating as a replacement for titanium plates. As a result of computational fluid dynamic analysis, the SUS 304 plate, applied to low-temperature co-fired coating, showed better heat transfer performance than a titanium plate, for 100 micron thickness coating. The result of the experiments using an actual heat exchanger revealed that a coated SUS 304 plate showed better heat transfer performance than a titanium plate. Furthermore, as the degree of corrosion and scale formation of the plate was confirmed through an overhaul inspection, the corrosion resistance of a coated SUS 304 plate was found to be almost the same as that of a titanium plate, and the inhibition effect of scale formation by sea water was better with a coated SUS 304 plate.

Key Words : Corrosion resistance, Plate heat exchanger, Titanium, Low-temperature co-fired coating, SUS 304

1. 서 론

현재 여러 산업 분야에서 에너지의 효율을 개선하기 위한 다양한 노력들이 진행되고 있다. 이런 노력에 발맞추어 에너지를 이용하는 각종 설비들에는 에너지 효율을 향상시키기 위해 다양한 방법으로 열교환기가 적용되고 있다(Kim et al., 2010). 선박의 경우 다관형(Shell & tube type), 판형 열교환기(Plate Heat Exchanger, PHE)가 주로 사용되며, 특히 판형 열

교환기의 경우 튜브형 열교환기에 비해 설치공간이 작고 열교환 면적이 넓으며 낮은 레이놀즈수에서도 난류를 형성하는 장점으로 인하여 선박뿐만 아니라 여러 산업현장에서 널리 사용되고 있다(Jeon et al., 2014; Ko et al., 2012; Lim and Cho, 2009).

시장의 요구에 따라 열교환기의 성능을 향상시키기 위해 종래의 다양한 연구들이 수행되어왔다(Son et al., 2012). 이러한 연구들로는 총괄열전달계수를 증가시킬 수 있는 물리적인 성능개선과 재료의 내구성을 향상시키는 노력들이 있었다(Ahn et al., 2010; Song et al., 2016). 이 중 물리적인 성능개

* First Author : skywonju@seaman.or.kr, 051-620-5518

† Corresponding Author : choi_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

선의 경우 열관의 형상이나 난류특성의 변화를 통한 연구는 한계점에 다다르고 있다는 평가가 지배적이고 재료의 성능 개선의 경우는 주로 열관의 부식에 초점을 두어 연구되어 왔다(Kim et al., 2015; Lim and Yun, 2005; Lee et al., 2014). 일반적으로 열교환기의 효율을 높이기 위해서는 높은 유속과 압력, 난류성 등이 요구되는데 특히나 판형 열교환기의 열관의 경우는 얇은 열관의 두께 때문에 다른 종류의 열교환기들 보다 더욱 높은 수준의 내부식성이 요구된다.

현재 시장에서 상용중인 판형 열교환기의 열관 중 시장에서 요구하는 우수한 내구성을 보이는 재료로 티타늄이 있다(Kim and Park, 2012). 하지만 티타늄은 고가의 재료로 설비 구축 단계에서 유지보수 단계까지 많은 비용이 발생한다. 현재 티타늄을 대체할 수 있는 판형 열교환기의 개발에 관한 연구들에서 열관 코팅을 통한 성능개선의 방향으로 연구가 진행되고 있으나 아직까지는 가능성을 엿볼 수 있는 단계일 뿐 현 시점에서 산업현장에 적용이 가능한 코팅기술은 부족한 실정이다.

본 연구는 기존의 고가 티타늄을 대체할 SUS 304 재질의 열관 표면에 저온소성 코팅 처리를 하여 열교환기를 운전하였을 때, 내식성과 열효율에 관한 성능평가를 수행하였다. 판형 열교환기 열관의 코팅 적용의 유무에 따라 변화될 수 있는 열교환기의 성능을 전산유동해석을 활용하여 예측하였으며, 실험을 통하여 열교환기의 성능뿐만 아니라 코팅으로 인해 변화되는 열관 부식의 영향을 비교하였다.

2. 실험 장치 구성

Fig. 1은 실험 장치의 구성도이다. 실험 장치의 전체 구성은 크게 열교환이 발생하는 판형 열교환기(1)와 냉·온수(해·청수) 펌핑부(3-1, 3-2), 유량 및 온도 계측부(2, 4-1, 4-2)로 구분할 수 있다. (4-1)과 (4-2)는 유량계로 펌프를 통해 흐르는 유체의 유량 데이터를 계측하였고 (5-1)은 청수탱크, (5-2)는 해수탱크이다. (2)는 데이터 로거(data logger)로 열교환기의 입·출구에 부착된 열전대의 온도와 유량계의 유량 데이터를 수집하여 기록하였다. 구성도의 파란색 선은 청수를 의미하며 여기에서는 고온의 온수가 흐르고, 녹색 선은 해수로 저온의 냉각수가 흐른다.

실험에 사용된 판형 열교환기의 열관 재료는 SUS 304와 티타늄을 선정하였고 SUS 304 열관의 경우 저온소성 나노코팅 처리를 한 것과 안한 것을 구분하여 티타늄 열관과 성능 비교를 하였다. 작동 유체의 경우 상용 중인 제품에 대한 성능평가기기에 실험 시간을 단축하고자 냉각수에 해당하는

해수에 소금과 아세트산을 첨가하여 열교환기 열관에 조악한 조건을 만들었다.

실험은 서로 다른 열관을 설치한 2대의 판형 열교환기를 동시에 운전하여 입·출구 온도상태를 모니터링 하였으며 60일의 실험 기간이 지난 후 판형 열교환기를 개방하여 열관의 상태를 점검 하였다.

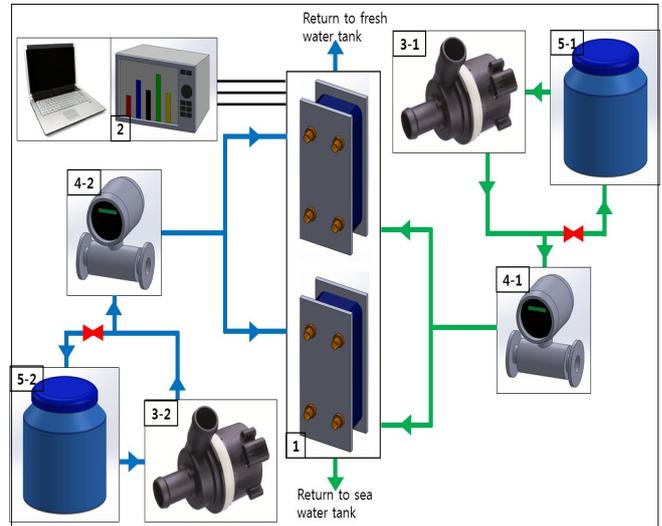


Fig. 1. Schematics of the experimental setup.

3. 전산유동해석

본 실험에서는 시뮬레이션을 통하여 열관 재료의 종류에 따른 열전달 성능 비교와 코팅의 두께에 따른 성능 비교를 수행하였다. 해석에는 상용 전산유동해석 소프트웨어인 ANSYS CFX R17.1을 사용하였으며 해석에 관한 상세한 내용은 아래와 같다.

3.1 판형 열교환기 설계조건

본 실험의 전산유동해석은 열관 재료와 코팅 물질, 그리고 코팅 두께에 따른 영향을 분석하는데 초점을 두었다. 판형 열교환기 시뮬레이션의 전체 도메인 형상은 길이 500 mm, 높이 6 mm (해수영역 2 mm, 청수영역 2 mm, 열관 2 mm), 두께 0.5 mm로 간략화 하였다. 열관을 통한 열유동을 해석하기 위하여 격자 형성 시 유체영역 뿐만 아니라 열관에 해당하는 고체영역 또한 유체영역과 동일한 격자를 만들어 해석하였다. Table 1은 판형 열교환기의 유한체적모델의 격자 정보를 나타낸다.

저온소성 코팅을 적용한 판형 열교환기의 성능평가

Table 1. Meshing information of Finite Volume Method for a plate heat exchanger

Type	Nodes	Elements
Hexahedrons	60120	28500

Fig. 2와 Fig. 3은 판형 열교환기 해석을 위한 전체 도메인의 형상과 도메인에 적용한 격자의 형상을 나타낸다. 격자의 구성은 본 실험의 유체흐름 방향에 부합하면서 2D 해석에 신뢰성이 높은 hexahedrons model로만 도메인 전체를 구성하였으며 열유동이 발생하는 벽면부에 격자를 집중하여 경계부 및 벽면에서의 온도 구배를 보다 정확하게 해석하고자 하였다.

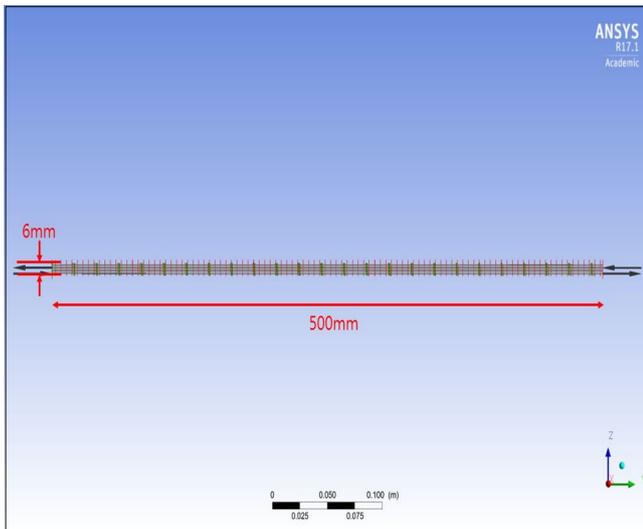


Fig. 2. Design shape of a plate heat exchanger.

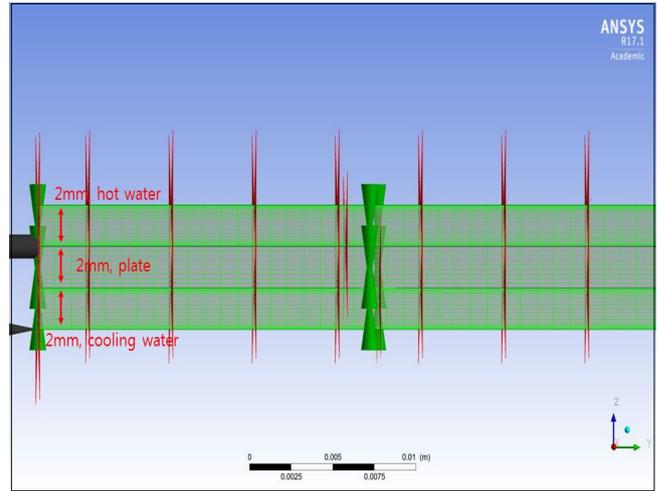


Fig. 3. Meshing shape of a plate heat exchanger.

본 유동해석은 재료적인 특성이 열교환기에 미치는 영향에 대하여 집중하고자 하였기에 해석의 신뢰성을 저해할 수 있는 요인들을 최대한 배제하고자 난류를 야기하는 열판 표면의 주름진 형상을 제거하는 등 되도록 간단하게 디자인하였다.

3.2 경계조건

Table 2는 본 연구에서는 사용된 판형 열교환기의 유동해석을 위한 경계조건을 나타낸다. 경계조건으로 고체에 해당하는 열판영역, 해수(sea water)가 흐르는 냉각수 영역, 청수(fresh water)가 흐르는 온수 영역으로 구분하였다. 난류모델은 벽면 주변과 스트림라인을 모두 고려하는데 특화된 SST (shear stress transport) 모델을 적용하였다. 코팅부분의 해석적용을 위해서는 별도의 도메인을 구성하지 않았으며 ANSYS CFX의 경계면 인터페이스 모델 중 ‘Thin Material’을 활용하여 코팅 재료의 물성치와 함께 마이크론 단위의 코팅 두께를 반영하였다.

Table 2. Boundary condition of CFD for a plate heat exchanger

	part of cooling water	part of heat plate	part of hot water
Materials	sea water	SUS 304 / titanium	fresh water
Turbulent Model	shear stress transport	NIL	shear stress transport
Inlet condition	0.0016kg/s, 18°C	NIL	0.0012kg/s, 35°C
Outlet condition	1.7bar	NIL	0.6bar
Wall condition	no slip wall	no slip wall	no slip wall
Coating material	NIL	SiO ₂	NIL

3.3 유동해석 결과

본 실험의 전산유동해석의 결과로 첫 번째는 관형 열교환기에 사용되는 열관의 재료를 무코팅 SUS 304와 티타늄으로 구분하여 비교하였다. 두 번째로는 열관의 재료를 SUS 304로 하였을 때 코팅이 없는 것과 10 μm , 100 μm 두께의 코팅을 적용한 경우를 구분하여 해석결과를 비교하였다.

3.3.1 열관 재료에 관한 비교

Fig. 4은 온수 출구부에서 열관의 재료에 따른 온도 구배 형상으로 a: SUS 304, b: titanium, c: 두 해석의 온도 차이를 나타낸다. 전체 도메인 중에서 대향류 관형 열교환기의 성능을 잘 나타내는 온수 출구를 기준으로 시각화 하였다. Fig. 4의 윗부분은 온수 출구부이며 가운데는 열관, 아래 부분은 냉각수 입구부이다. 온수 입구에서 35 $^{\circ}\text{C}$ 로 들어온 청수는 열교환기를 거쳐서 온도가 강하되어 출구로 빠져 나간다. 냉각수는 18 $^{\circ}\text{C}$ 의 해수가 들어와서 온도가 상승하여 반대측의 출구로 배출된다. Fig. 4의 온도 구배를 보면 (b)에 비해서 (a)의 온수 출구부 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. (c)를 통해 본 두 온도의 차이는 SUS 304 재질의 열관을 사용할 경우 약 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 가량 온도가 낮으며 이러한 차이는 Fig. 5의 그래프를 통하여 분명하게 확인할 수 있다.

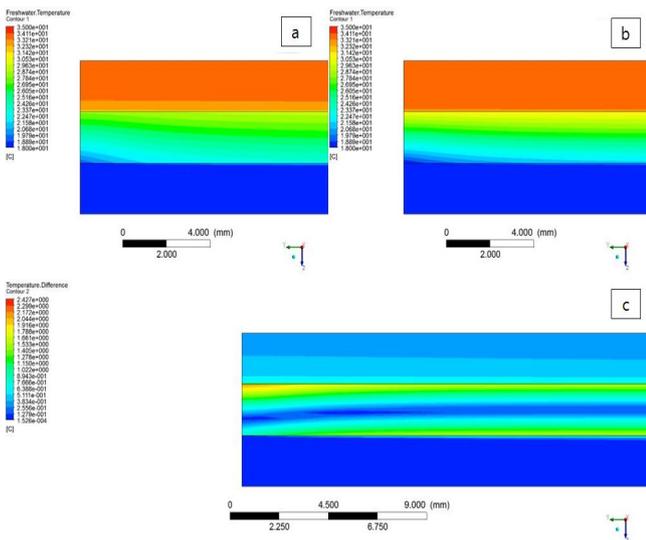


Fig. 4. Temperature contour of hot water outlet side for each materials (a: SUS 304, b: titanium, c: difference).

Fig. 5는 높이방향으로의 온도곡선을 나타내는데 -3 ~ -1 mm는 온수부이며 -1 ~ 1 mm는 열관부, 1 ~ 3 mm는 냉각수부이다. Fig. 5의 냉각수 입구부(1~3 mm)는 온도 구배가 거의 없다. 열관부에서는 두 재료의 물성치 차이로 인하여 비교

적 열전도도가 높은 SUS 304 열관이 좁은 온도분포를 보이며 전체적으로 열관의 온도가 낮다. 이러한 특징 때문에 온수는 SUS 304 열관을 사용한 경우에 티타늄보다 낮은 온도로 배출된다.

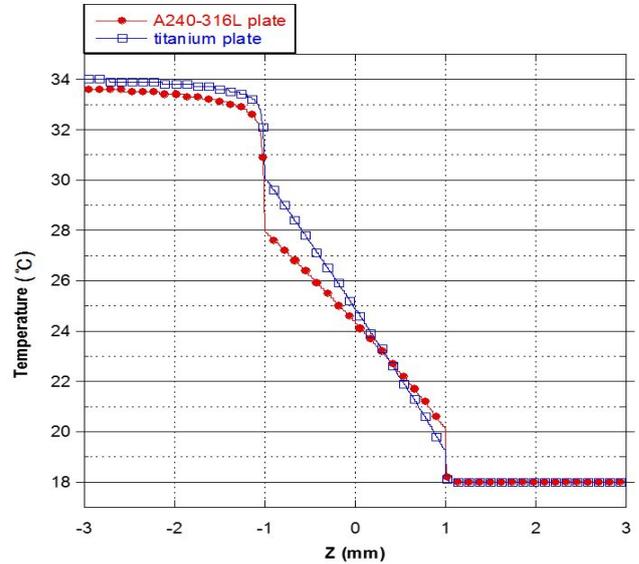


Fig. 5. Temperature graph of hot water outlet side for each materials.

3.3.2 코팅두께에 관한 비교

코팅두께에 따른 비교에서 열관의 재료는 실험과 동일하게 SUS 304로 하였으며 저온소성 코팅의 주요 물질인 SiO_2 의 두께를 다르게 하여 유동해석을 수행하였다.

Fig. 6은 온수 출구부에서 열관의 코팅두께에 따른 온도 구배 형상을 시각화한 그림이다. Fig. 6은 Fig. 4와 동일하게 온수 출구이면서 동시에 냉각수 입구부이다. 각 그림은 a: 코팅이 없는 경우, b: 10 μm 두께의 코팅을 한 경우, c: 100 μm 두께의 코팅을 한 경우이다. Fig. 6a와 Fig. 6b는 거의 유사한 온도곡선을 보이나 SiO_2 는 SUS 304에 비해 열전도도가 작은 물질이기 때문에 코팅이 두꺼워 질수록 배출되는 온수의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 코팅이 두꺼워질수록 열교환이 저해됨을 나타낸다.

Fig. 7의 온수 출구부의 온도 곡선을 보면 온수와 열관의 경계인 -1 mm 지점에서 코팅에 관계없이 비슷한 온도를 보인다. 하지만 SUS 304에 비해 비열이 높고 열전도도가 작은 SiO_2 의 특징 때문에 코팅이 두꺼워 질수록 온수부의 열이 열관에 갇혀 온도분포가 좁아지는 것을 알 수 있다. 코팅이 없거나 얇을수록 열교환이 많아 낮은 온도의 온수가 나가는 것을 볼 수 있다.

4. 실험 결과 및 분석

실험을 통하여 코팅을 한 SUS 304 열판과 티타늄 열판을 설치한 열교환기를 운전하여 열교환기의 성능을 비교하였고 운전 후 개방하여 열판 내부의 부식 상태를 점검하였다.

4.1 열판 재료와 관련한 열교환기 성능 비교

저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판과 티타늄 열판을 판형 열교환기에 설치 및 운전하여 60일의 시간이 지난 후 성능을 비교하였다.

Fig. 8은 온수 입출구 온도곡선으로 평균온도 36.4 °C의 온수가 들어와 열교환기를 거쳐 출구로 배출된다. 온수 출구의 평균온도는 티타늄 열판이 30.9 °C, 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판이 29.3 °C로 코팅을 한 SUS 304 열판의 온수가 1.6 °C 낮은 온도로 배출되는 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 유동해석 결과와 경향이 일치하는 것으로서 열전도도가 높은 SUS 304 열판에서 티타늄에 비해 열교환이 잘 일어나기 때문이며, 유동해석에서 약 0.5 °C 차이가 나는 반면 실제 실험에서 1.6 °C로 차이가 크게 나는 이유는 장시간 운전에 따른 두 열판의 오염계수의 차이 때문으로 분석되며 이에 관한 자세한 언급은 뒤에서 하겠다.

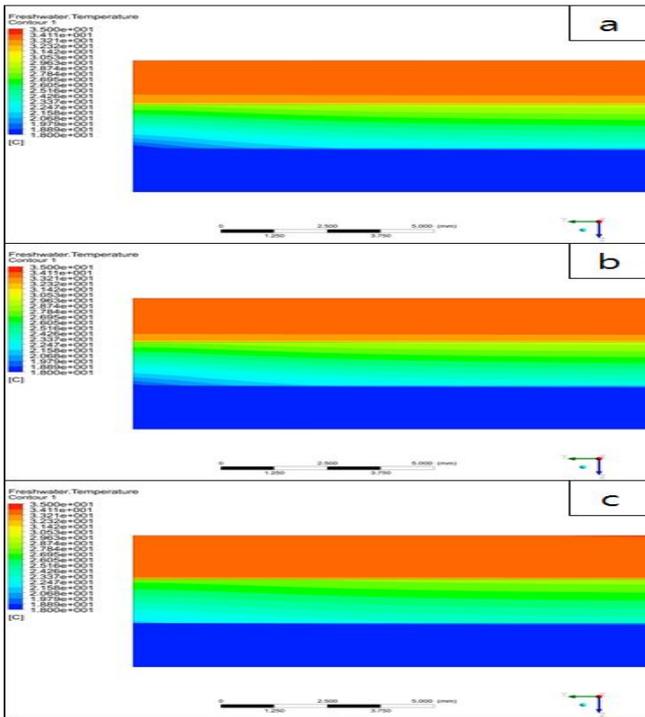


Fig. 6. Temperature contour of hot water outlet side for each coating thickness (a: SUS 304, b: titanium, c: difference).

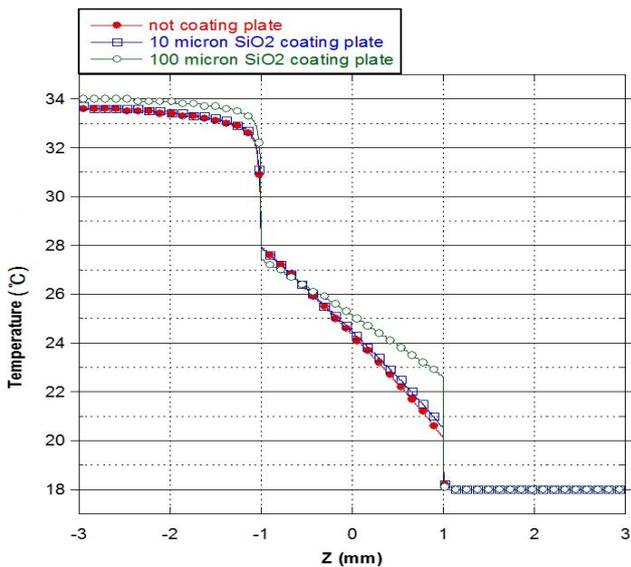


Fig. 7. Temperature graph of hot water outlet side for each coating thickness.

Fig. 5와 Fig. 7의 결과로 미루어 볼 때, 100 μm 코팅은 티타늄 열판과 비슷한 온수 출구 온도를 보이기 때문에 코팅이 더욱 두꺼워질 경우 SUS 304 열판은 티타늄 열판보다 열교환 성능이 저하될 것으로 예상된다.

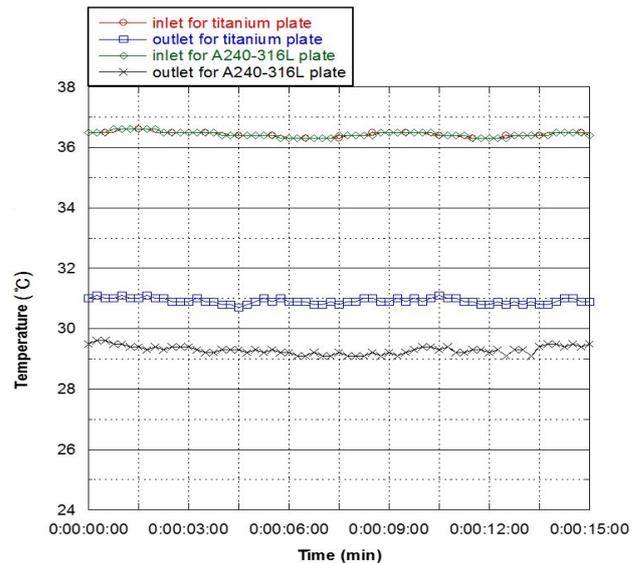


Fig. 8. Temperature graph of hot water inlet & outlet.

Fig. 9는 냉각수 입출구 온도곡선으로 냉각수 출구의 평균 온도는 티타늄 열판이 31.1 °C, 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판이 32.6 °C이며 위에서 언급한 바와 같이 코팅을 한 SUS 304 열판이 열교환이 많기 때문에 냉각수가 1.5 °C 높은 온도로 배출되는 것을 볼 수 있다.

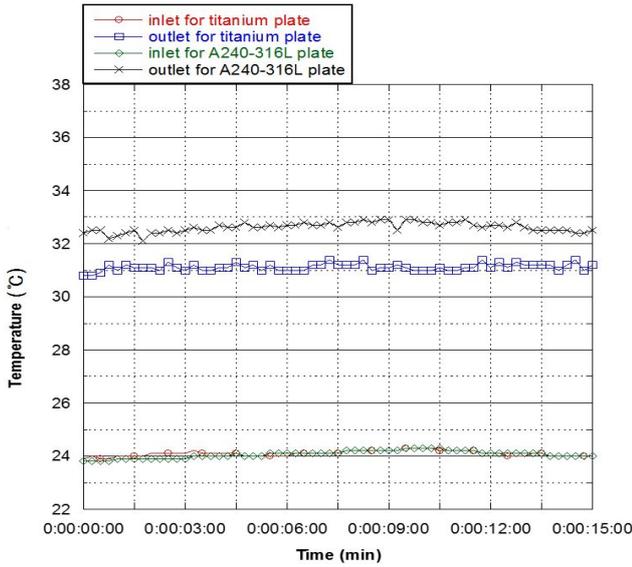


Fig. 9. Temperature graph of cooling water inlet & outlet.

본 연구는 실험 결과의 정량적인 비교를 위한 평가지표로 총괄열전달 계수(Overall Heat Transfer Coefficient, OHTC)와 열교환기효율을 사용하였다. 총괄열전달 계수와 열교환기효율을 구하기 위해 사용된 식은 아래 식과 같다.

$$U = \frac{Q_m}{\Delta T_{LMTD} \cdot A \cdot F} \quad (1)$$

U 는 총괄열전달 계수 [W/m^2K], ΔT_{LMTD} 는 대수평균온도 차 [K], A 는 열전달면적 [m^2], F 는 보정계수.

$$\begin{aligned} (m_1 C_{p1})_{\min} &= m_1 \cdot C_{p1}, \quad \eta = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{11} - T_{21}} \\ (m_2 C_{p2})_{\min} &= m_2 \cdot C_{p2}, \quad \eta = \frac{T_{22} - T_{21}}{T_{11} - T_{21}} \end{aligned} \quad (2)$$

m_1 은 냉각수 유량 [kg/s], m_2 는 온수 유량 [kg/s], C_p 는 비열 [kJ/kgK], T_{11} 은 온수 입구온도 [$^{\circ}C$], T_{12} 는 온수 출구온도 [$^{\circ}C$], T_{21} 는 냉각수 입구온도 [$^{\circ}C$], T_{22} 는 냉각수 출구온도 [$^{\circ}C$].

식(1)을 통하여 구한 총괄열전달계수는 티타늄 열판을 설치한 열교환기가 $1,631 W/m^2K$, 코팅을 한 SUS 304를 설치한 열교환기가 $2,680 W/m^2K$ 으로 저온소성 코팅을 한 SUS 304를 설치한 열교환기가 약 64% 가량 높게 나왔다.

열교환기효율은 식(2)를 통하여 티타늄 열판을 설치한 열교환기가 44.7%, 코팅을 한 SUS 304를 설치한 열교환기가 57.7%로 코팅을 한 SUS 304를 설치한 열교환기가 13% 가량 높게 나왔다. 이러한 상당히 큰 열전달 특성의 차이를 보이는 것은 두 재료의 물성치 차이뿐만 아니라 오염계수의 차이에 기인한다.

4.2 코팅에 의한 부식방식 효과 비교

본 실험은 SUS 304 열판과 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판, 티타늄 열판을 설치한 판형 열교환기를 60일 동안 운전한 후 개방하여 열판의 부식을 비교하였다. 작동유체인 냉각수(해수)에는 앞의 실험 구성에서 언급한 바와 같이 짧은 기간 안에 상용된 제품의 부식을 관측하기 위해서 소금과 아세트산을 투입하여 열판에 조악한 조건을 만들었다. 그러므로 본 실험의 부식이나 스케일 결과는 실제 운전의 결과보다 과도하게 생성된 것임을 말하는 바이다.

Fig. 10은 운전 전 a: SUS 304 열판, b: 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판, c: 티타늄 열판의 사진을 나타낸다. Fig. 11은 실험 장치를 60일 운전 후 a: SUS 304 열판, b: 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판, c: 티타늄 열판의 부식 상태를 나타내는 사진들이다. Fig. 11a의 경우 운전 전과 비교했을 때 전체적으로 스케일이 보이며 해수가 흐른 부분을 중심으로 부식이 많이 발생하였다. 또한 열판 표면에 국부적인 부위를 중심으로 부식이 퍼져나가는 형상을 발견할 수 있다. 반면 코팅을 한 열판(Fig. 11b)과 티타늄 열판(Fig. 11c)은 부식에 양호한 상태를 보인다.

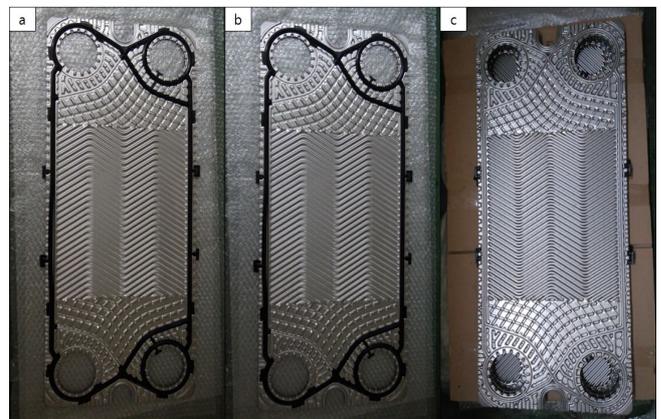


Fig. 10. Pictures of heat plate before operation (a: not coated, b: coated, c: titanium).

저온소성 코팅을 적용한 판형 열교환기의 성능평가

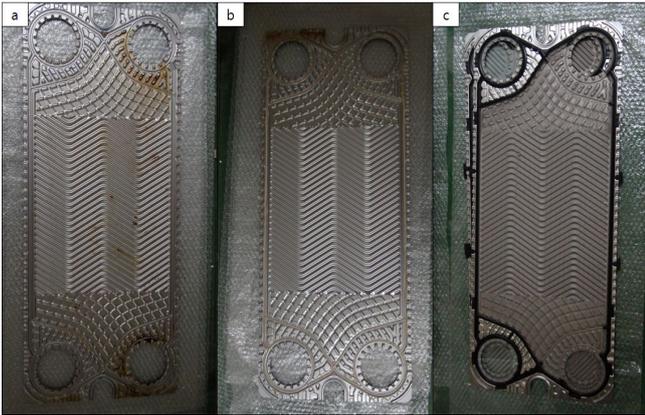


Fig. 11. Pictures of heat plate after operation (a: not coated, b: coated, c: titanium).

Fig. 12는 실험 장치를 60일 운전 후 a: 저온소성 코팅을 한 SUS 304 열판, b: 티타늄 열판의 스케일이 발생한 부분을 확대한 사진들이다. 여기서 흥미로운 점은 해수 스케일에 관한 특성으로 티타늄 재질의 경우(Fig. 11c, Fig. 12b) 다른 열판과 비교하여 스케일이 가장 많이 발생하였으며 코팅을 한 열판의 경우(Fig. 11b, Fig. 12a) 스케일이 거의 발생하지 않았다. 이는 저온소성 코팅을 한 열판과 티타늄 코팅을 한 열판의 표면 거칠기의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 표면 거칠기의 차이는 앞의 열교환기의 성능비교에서 언급하였으며 Fig. 11에서 볼 수 있듯 장시간 운전으로 오염 계수의 차이가 발생하였고 이는 두 제품의 열전달 특성을 야기하였다.

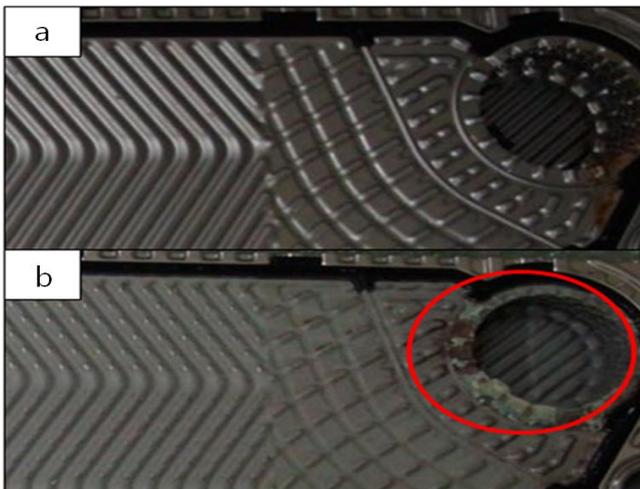


Fig. 12. Pictures of scale part for heat plate after operation (a: coated, b: titanium).

위의 부식과 스케일에 대한 비교를 다시 정리하면, 코팅이 되지 않은 SUS 304 열판(Fig. 11a)은 부식과 스케일 모두 취약함을 보였고 티타늄 열판(Fig. 11c, Fig. 12b)은 내부식성은 뛰어나나 스케일에서 취약함을 보였다. 코팅을 한 SUS 304 열판(Fig. 11b, Fig. 12a)은 부식에서 티타늄에 준하는 내부식성을 보였고 스케일에서는 다른 열판들 보다 뛰어난 성능을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 저온소성 코팅을 한 열판을 적용한 판형 열교환기의 성능평가를 전산유동해석과 실험을 통하여 수행하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전산유동해석 결과 SUS 304 열판이 티타늄 열판보다 우수한 열전달 특성을 보였으며, 이러한 우수성은 코팅의 두께가 두꺼워질수록 그 효과가 저감되는 경향을 보였지만 본 유동해석을 통해서 100 μm 의 코팅 두께까지는 열전달 우수성이 유효함을 확인하였다.

(2) 실험을 통해 코팅을 한 SUS 304 열판의 경우 티타늄 열판에 비하여 열전달 특성이 약 13% 정도 개선되는 것으로 나타났고, 부식과 스케일 생성 측면에서 취약한 SUS 304 열판이 저온소성 코팅을 함으로써 티타늄 열판보다 부식과 스케일 모두에서 뛰어난 성능을 보였다.

(3) 저온소성 코팅을 한 열판이 열전달 특성과 부식 및 스케일에서 우수한 성능을 보인 이유는 SUS 304의 재료 물성치에 따른 뛰어난 열전달 특성과 코팅의 효과 때문인 것으로 확인되었다.

사 사

본 연구는 중소기업청에서 시행한 중소기업 기술개발사업의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Ahn, H. J., S. H. Lee, N. Hur, H. J. Park and H. S. Ryu(2010), A numerical simulation of flow and heat transfer in a dimple-type plate heat exchanger, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 149-155.
- [2] Jeon, J., E. Lee, H. Kang and Y. Kim(2014), The fouling characteristics of plate heat exchangers with geometric and

- operating parameters, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 163-168.
- [3] Kim, D. U. and C. W. Park(2012), A study of the anticorrosive characteristics of Ti based coatings by cold spray for plate heat exchangers, Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 240-241.
- [4] Kim, K. S., Y. H. Song, D. Y. Choi, K. S. Kim and S. H. Choi(2010), A study on the overall heat transfer coefficient and the pressure drop in a plate heat exchanger, Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2435-2439.
- [5] Kim, S. H., J. H. Lee, J. G. Kim and W. C. Kim(2015), Failure mechanism of plate heat exchanger in customer interface of district heating system, Proceedings of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 640-643.
- [6] Ko, J. H., K. H. Park and Y. H. Song(2012), Study on design factor and design-code development for plate type heat exchangers, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 8, pp. 1003-1009.
- [7] Lim, T. W. and D. H. Cho(2009), Study on heat transfer characteristic of shell-and-tube heat exchanger with plate fin, Journal of academia-industrial technology, Vol. 10, No. 1, pp. 46-51.
- [8] Lim, U. J. and B. D. Yun(2005), A study on the prevention of crevice corrosion for a stainless steel heat exchanger, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol. 17, No. 1, pp. 106-114.
- [9] Song, K. S., C. Baek, S. W. Kim and Y. Kim(2016), Experimental study on leak flow rate and inner flow characteristics of plate heat exchangers with pin-hole location and mass flux, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 171-177.
- [10] Son, J., E. Lee, H. Kang, Y. Kim, J. K. Kim, S. Y. Cho and J. H. Park(2012), Performance characteristics of plate heat exchangers with various geometric design parameters, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol. 36, No. 6, pp. 583-591.

Received : 2017. 05. 16.

Revised : 2017. 06. 19.

Accepted : 2017. 06. 28.