

## Study on the material properties and heating efficiency according to the internal surface coating of the brazed plate heat exchanger (BPHE)

Hangchul Jung<sup>†</sup>, Hyunseok Yang, Hyunjong Kim\* and Jongpo Park\*

Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering (IAE), Youngin 17180, Korea

\*Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering (IAE), Youngin 17180, Korea

(Received October 27, 2020)

(Revised November 16, 2020)

(Accepted November 16, 2020)

**Abstract** In this study, a silane-based coating was applied to improve corrosion resistance and thermal efficiency performance of a brazed plate heat exchanger (BPHE) composed of stainless plate and copper (Cu) brazing. Although the selected coating material was applied to the BPHE by evaluating the corrosion and contact angle according to the coating material, the result of the heat transfer performance evaluation showed that the thermal efficiency was lower than that of the uncoated BPHE. It was analyzed that the adhesion of the coating agent to the flow path inside the BPHE and the residual coating agent on the surface acted as heat resistance, preventing heat transfer. This is due to the structural characteristics of the BPHE in which a fine flow path exists inside, and it is believed that manufacturing after coating the surface of the flow path in advance in the manufacturing process of the BPHE can improve heat transfer performance.

**Key words** Brazed plate heat exchanger (BPHE), Silane coating, Wettability, Hydrophobic, Hydrophilic

## 접합 판형 열교환기(BPHE)의 내부 코팅에 따른 소재 특성 및 성능 평가에 관한 연구

정향철<sup>†</sup>, 양현석, 김현종\*, 박종포\*

고등기술연구원 신소재공정센터, 용인, 17180

\*고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터, 용인, 17180

(2020년 10월 27일 접수)

(2020년 11월 16일 심사완료)

(2020년 11월 16일 게재확정)

**요약** 본 연구에서는 STS-316 플레이트와 구리(Cu) 브레이징으로 구성된 접합 판형 열교환기(BPHE, Brazed Plate Heat Exchanger)의 내식성과 열효율 성능 향상을 위해 실란계 코팅을 적용하고자 하였다. 코팅 재료에 따른 부식 및 접촉각을 평가하여 선정된 코팅재료를 열교환기에 적용하였으나, 전열 성능 평가 결과 코팅하지 않은 열교환기에 비해 열효율이 떨어지는 결과가 나타났다. 이는 접합 판형 열교환기 내부의 유로에 코팅제의 고착화 및 표면의 잔여 코팅제가 열저항으로 작용하여 열전달을 방해하는 것으로 분석되었다. 이는 내부에 미세한 유로가 존재하는 판형 열교환기의 구조적인 특성에 기인한 것으로, 판형 열교환기 제작 공정에서 사전에 유로 표면에 코팅 후 제작하는 것이 전열성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 1. 서론

산업 분야 전반에 걸쳐 플랜트에 적용되는 각종 설비들은 시장의 요구에 따라 에너지 효율을 극대화하기 위해 다양한 방법으로 발전하고 있으며, 유체의 냉각 또는

온도를 높이는 역할로 산업적으로 활용도가 높은 열교환기에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다[1]. 이러한 연구들로는 열전달계수를 증가시킬 수 있는 물리적인 성능개선과 재료의 내구성을 향상시켜 열교환기의 유지 관리가 용이하게 유도하는 노력들로 구분될 수 있다[2,3].

물리적 요인을 이용해 열교환기의 성능을 개선하는 경우는 플레이트의 유동성이나 형상 및 레이놀즈 계수(Renolds number)의 변화를 통한 연구가 주를 이루고

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: hcjung@iae.re.kr

있는데 이러한 요인들에 따른 성능 개선은 어느 정도 한 계점에 이르렀다고 평가되고 있다[6].

재료의 성능 개선의 경우는 플레이트의 부식에 초점을 두어 연구되어 왔다가 최근에 금속 표면의 코팅 기술이 발전함에 따라 플레이트의 표면의 기능이나 거칠기를 제어하는 패터닝 등의 연구가 이루어지고 있다[7].

최근 열교환기의 효율을 높이기 위해서 기존의 튜브형(shell & tube type)에서 판형 열교환기(plate heat exchanger)를 사용하는 경우가 많아졌으며, 열교환기의 디자인 개선을 통해 유속과 압력을 조정하여 난류성 흐름을 만들어 주어 열전달계수를 증가시키는 연구가 이루어지고 있다. 이러한 경우 얇은 플레이트의 두께 때문에 표면의 기능기에 따른 표면 제어 및 높은 내부식성이 요구된다[6].

현재 시장에서 상용화 되어 있는 판형 열교환기에 적용되는 플레이트 중 우수한 내구성을 보이는 재료로 티타늄이 있다. 하지만 티타늄은 비교적 고가의 재료이기 때문에 설비구축 단계에서 많은 비용이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 티타늄 소재의 열교환기의 단점을 보완하고 열판 코팅을 통한 성능개선의 연구로 판형의 스테인리스와 구리 소재로 구성된 열교환기가 대중적으로 이용되고 있다[7].

판형 열교환기의 냉각성능을 개선하기 위해 소재 표면에 코팅기술을 적용하여 열효율성 향상과 내식성 증대를 위해 표면 기능기를 갖는 절연소재를 적용하고 있으며, 이의 성능 향상을 위해 소수성 및 친수성 절연소재의 표면 코팅을 적용하고 있다[6]. 표면 처리 기술은 단지 소수성 처리가 중요한 것이 아니라 열교환기의 전열 특성을 높이며, 균일한 코팅이 중요하다. 이를 위해서는 열교환기가 노출된 환경을 고려하여 소수성 및 친수성의 적절한 공정이 필요하다.

소수성은 열교환기 표면에 초발수 기능을 부여하여 액체가 표면에 응축되었을 때 내부의 구조물 사이 액적의 브릿지 현상을 효율적으로 방지하여 열교환 특성을 높이는 표면처리 공정으로 사용되고 친수성은 열교환기 표면의 액적에 의해 젖는 면적을 증가시켜 증발 열전달 성능 향상을 높이는데 사용된다[6]. 열교환기에서 작동유체인 냉매의 상(phase)과 열교환기 입구 온도 및 응축 시작온도 등을 고려하여 열교환기 표면처리가 설계되어야 하며, 작동유체가 액상인 구간과 기상인 구간에 따라 소수성 및 친수성 표면처리를 적절하게 배분한 표면처리 기술이 필요하다[8].

본 연구에서는 스테인리스(STS 316) 플레이트와 구리(Cu) 브레이징으로 구성된 집합 판형 열교환기(BPHE, Brazed Plate Heat Exchanger) 내부 금속 재질의 플레이트 표면에 상온 실란 코팅 처리를 하여 열교환기를 운전하였을 때, 내식성과 열효율에 관한 성능 변화를 평가하였다. 열교환기에 적용된 유기 작동 유체인 R1234ze와 소재 표

면과의 매칭성 연구를 통해 소수성 및 친수성 표면에서의 열전달 성능을 비교분석하여 코팅 소재를 선정하고 이의 집착성 및 내구성 향상을 위한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 스테인리스의 친수 및 소수성 코팅 연구

Figure 1에는 본 연구에서 실란 코팅을 진행한 집합 판형 열교환기의 외관과 내부 구조를 나타냈다. 본 열교환기는 스웨덴 SWEP사의 B633 모델로 내부는 STS 316 플레이트와 구리 재질로 되어 있으며, 전면 및 후면 커버 플레이트 패키지 사이에 주름진 채널 플레이트와 커

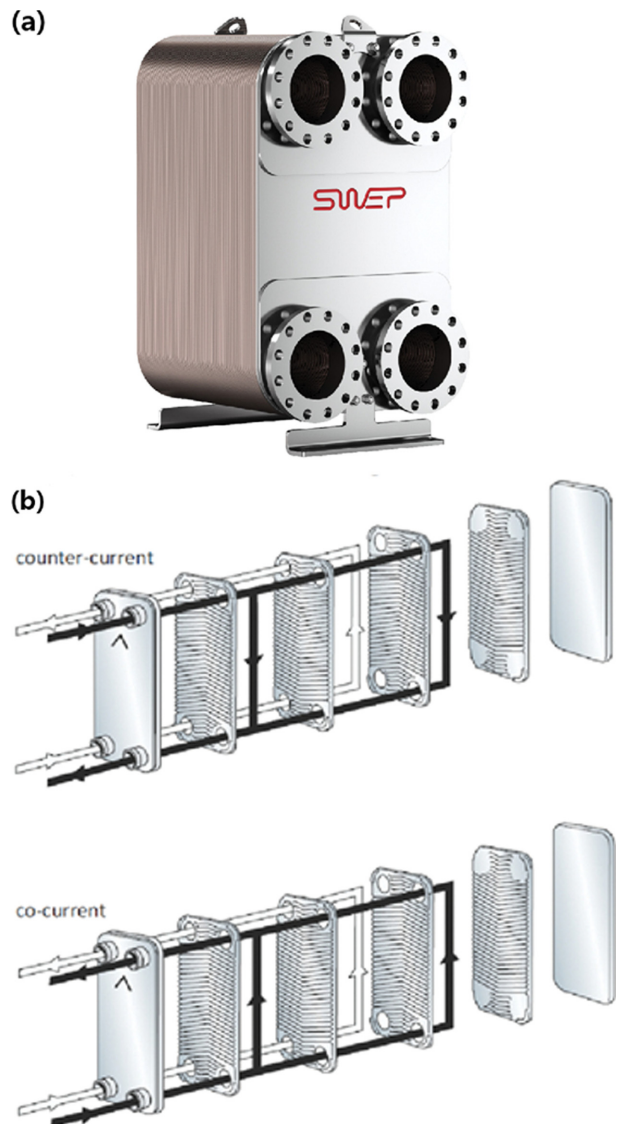


Fig. 1. (a) Brazed plate heat exchanger & (b) principle of the heat exchanger.

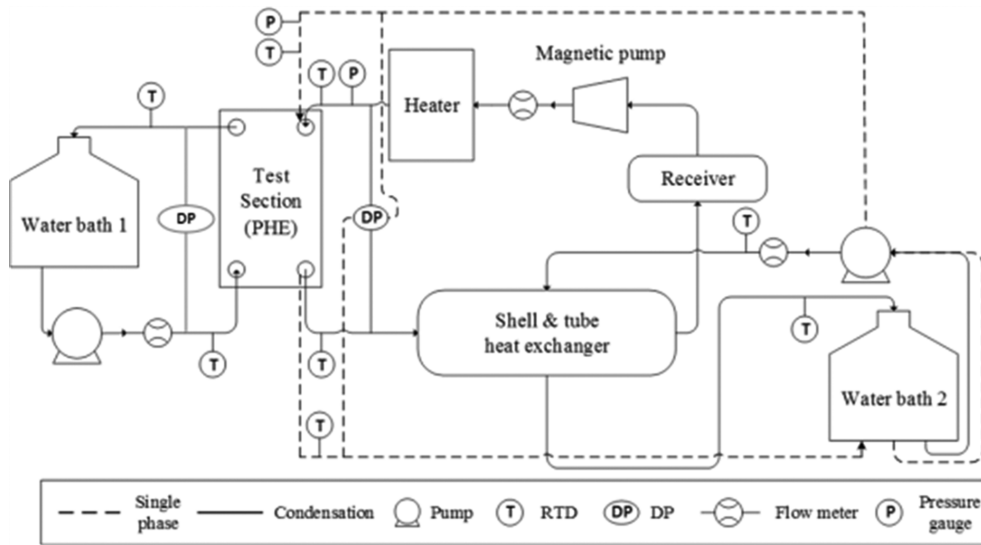


Fig. 2. Diagram of the experimental apparatus.

버 플레이트로 구성되어 있다. 진공 브레이징 과정을 통해 베이스와 충전재 사이의 모든 접점에서 브레이징 조인트가 형성되는데, 두 개의 개별 채널로 구성된 구조로 되어 있다.

열교환기 내부 플레이트의 코팅을 위해 열교환기 내부 재질인 STS 316 플레이트를 이용하여 표면에 실란 코팅을 진행하였으며, 코팅 방식은 딥-코팅(Dip-coating)을 활용하였다. 코팅에 적용된 용액은 독일 KhaiEL 사의 제품으로 실란 코팅 성분 및 특성에 따라 친수성을 갖는 용액 2종, 소수성을 띄는 용액 2종을 선정하여 적용하였으며, 친수로는 H1147과 TKF를, 소수성 코팅제로는 EKG와 NanoEL를 사용하였다.

코팅을 진행하기 전에 STS 316 표면의 전처리 용액 (ALK13)을 사용하여 폴리싱 및 세척 공정을 진행한 다음, 코팅 두께와 공정 시간 제어를 위해 Dip coater(E-Flex, EF-4100)를 적용하여 코팅 공정을 수행하였다. 친수와 소수 각 2종씩 코팅된 기판은 접촉각 측정기(contact angle meter, DSA100)를 이용하여 젖음성(wettability) 평가를 실시하여 친수 및 소수성 정도를 분석하였다.

## 2.2. 접합 판형 열교환기의 실란 코팅 및 전열량 평가

접합 판형 열교환기는 친수성, 소수성 각 1종의 실란 코팅액을 사용하여 열교환기의 내부 조건별로 코팅을 진행하였다. 각각 냉매와 물이 흐르는 유로가 형성 되어 있는 내부에 코팅을 진행하였으며, 코팅에 앞서 ALK13로 표면의 전처리를 진행한 다음, 코팅 용액을 주입하여 가압 후 제거하는 방식(필-오프방식)으로 코팅 공정을 진행하였다. 이후 실란 코팅 용액의 고형화 및 안정성 확보를 위해 80°C의 온도에서 5시간 동안 열풍 건조를

진행하였다.

코팅된 열교환기의 전열량 평가를 위해 최대 전열량 16 kW급 test-loop에서 시험을 수행하였으며, 평가를 위한 실험장치 개략도를 Fig. 2에 나타냈다. 성능평가 기준은 AHRI 450-Standard for Performance Rating of Remote Type Refrigerant-Cooled Liquid Coolers[9]에서 제시한 standard와 application rating을 적용하였으며, 평가를 위해 사용된 작동유체는 증류수와 R1234ze이다. 본 논문에서 냉매로 적용된 R1234는 미국 Honeywell사의 SOLSTICE의 불연성 가스 냉매로 전열성능이 우수하여 고온 열교환기에 주로 적용되는 냉매이다.

R1234ze 냉매는 마그네틱 펌프로부터 공급되고 히터에서 가열되어 열교환기로 공급되고, 냉매와 냉각수의 온도와 압력은 열교환기의 입구 및 출구에서 측정되었다. 열교환기는 물과 냉매가 대향 유동이 되도록 설치되었으며, 실험 설비의 외기온도를 26°C로 유지하고 단열재료 열교환기를 보온하였다. 냉매는 열교환기에 과열증기 상태로 유입되고 과냉액으로 배출되도록 시험 조건을 설정하여 전열량을 평가하였다. 평가는 일정한 유량, 압력, 온도, 열량이 유지된 정상상태의 데이터를 기반으로 진행하였다[11,12].

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 코팅 표면 접촉각 및 부식성 평가

Figure 3에는 독일 KhaiEL사의 실란 나노 코팅제로 소수성 및 친수성 코팅한 소재의 접촉각 측정 결과를 나타냈다. 코팅을 진행하지 않은 STS 316 플레이트의 접

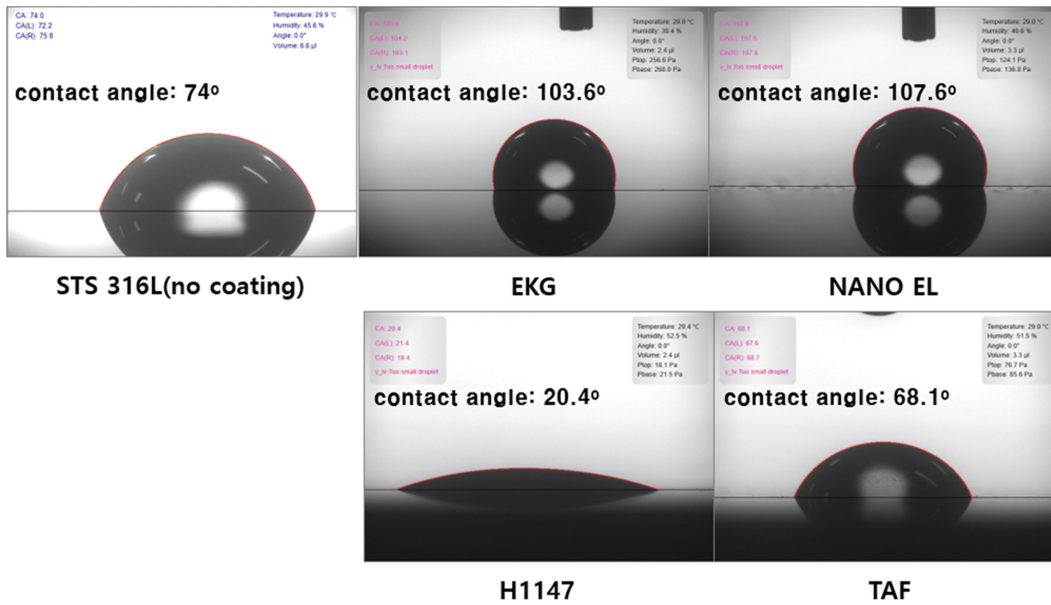


Fig. 3. Wettability of the hydrophobic & hydrophilic surface.

Table 1  
Neutral salt testing result of the hydrophobic & hydrophilic sample

	72 hr	144 hr	168 hr
Hydrophobic coating (NanoEL)			
Hydrophilic coating (H1147)			
No coating			

촉각은 74°로 비교적 소수성에 가까운 표면 특성을 보이고 있다. 소수성 코팅을 진행한 시료의 경우, 모두 90° 이상의 소수성을 나타내고 있으며, 이때의 접촉각은 EKG 시료는 103.6°, NanoEL 시료는 107.6°를 나타냈다.

친수성 코팅을 진행한 H1147와 TKF 시료의 접촉각 평가 결과, H1147 시료는 20.4°의 친수성 표면을 보이는 반면 TKF 시료는 68.1°의 접촉각을 보이고 있다. 접촉각에 대한 친수성과 소수성에 대한 학술적으로 명확한 규명은 없으나 통상적으로 30° 이하는 친수성, 90° 이상은 소수성으로 표기 하고 있다[4,5].

열교환기 내부 코팅을 위해 친수성의 실란 코팅제는 H1147을 선정하였으며 소수성 실란 소재는 코팅제의 신뢰성 및 코팅 두께를 고려하여 결정하였다. EKG 코팅은 300 nm 급의 코팅 두께를 갖는 반면, NanoEL 코팅은 50~70 nm의 두께로 코팅에 따른 열저항의 영향이 적을 것으로 판단되어 최종적으로 소수성 코팅은 NanoEL 시료를 선정하였다[6].

Table 1에는 접촉각 평가를 통해 선정된 코팅 소재의 내부식성 평가를 위해 코팅을 실시하지 않은 STS 316 플레이트 표면에 H1147, NanoEL를 각각 코팅한 소재의 염

Table 2  
Experiment design and results of the hydrophobic & hydrophilic coating for brazed plate heat exchanger

No	Refrigerant side coating	Water side coating	Heating rate (W)		Efficiency
1	No	No	Standard	4,788	100
			Application	8,960	100
2	Hydrophobic	No	Standard	4,584	96
			Application	7,997	89
3	Hydrophilic	No	Standard	3,786	79
			Application	7,127	80
4	Hydrophobic	Hydrophilic	Standard	4,511	94
			Application	7,781	87
5	Hydrophilic	Hydrophilic	Standard	4,398	92
			Application	7,384	82

수분무 평가 결과를 나타냈다. 염수 농도는  $5 \pm 0.5\%$ 로 분사형 분무방식으로 진행하였으며, 시험온도는  $35^\circ\text{C}$ , 시험시간은 168시간까지 유지하였다.

염수 분무 장치를 이용한 부식성 테스트 결과, 코팅되지 않은 STS 316 플레이트의 경우 144시간이 지나면서 가장 자리부터 부식이 진행되기 시작하였으며, 시간이 지남에 따라 모서리 부분의 부식 가속화가 발생하였고 플레이트 표면에 부식 면적이 증가함을 확인할 수 있었다. 친수 및 소수 코팅된 소재의 경우 시험 시간 경과에 따라 코팅 표면에서 부식이 발생하지 않았으며, 실란 코팅 성분 및 소재에 따른 부식성의 차이는 없는 것으로 판단된다.

3.2. 판형 열교환기의 코팅에 따른 전열량 평가

Table 2에는 실란코팅 조건에 따른 집합 판형 열교환기의 전열량 평가 결과를 나타냈다. 친수 및 소수성 조건 4개에 대하여 냉매측은 친/소수성 소재를, 냉각수측은 친수성 소재만을 코팅하고 대조군 및 실험군을 선정하여 이에 대한 전열량을 평가하였다.

집합 판형 열교환기의 전열 성능 평가 결과, 전반적으로 코팅을 진행하지 않은 대조군 대비 전열량 특성이 저하되는 결과를 얻을 수 있었다. 유로에 친수 및 소수성 소재를 코팅할 경우, 코팅표면이 열저항으로 작용하여 열전달을 저감하는 것으로 나타났다. 또한 냉매측 유로에는 친수성 소재를 코팅할 경우 소수성 소재를 코팅한 열교환기보다 열전달 성능이 감소하며, 냉각수측 유로에는 친수성 소재를 코팅하지 않은 경우가 코팅한 것보다 열전달 성능이 상대적으로 덜 감소한 결과를 보였다.

집합 판형 열교환기에서 내부의 코팅을 진행함에 따라 작동유체의 열교환 면적이 감소된 경우 또는 작동유체의 흐름성을 방해하는 요소가 발생함에 따라 열교환 특성이

감소한 것으로 판단되었으며, 열교환기의 내부를 분석하여 그 원인을 파악하였다.

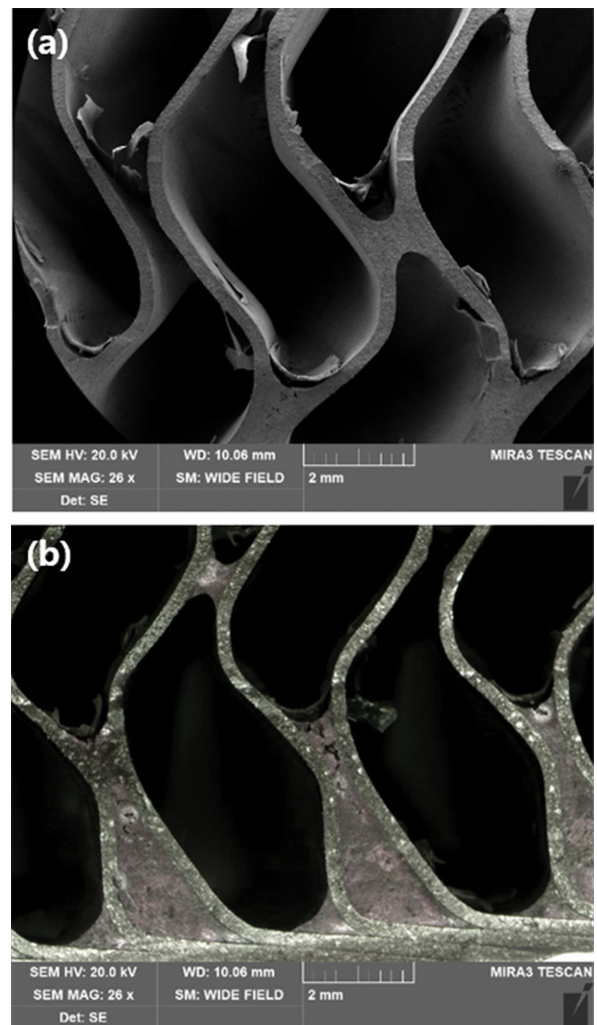


Fig. 4. Microstructure of the brazed plate heat exchanger internal: (a) center and (b) blazing part.

3.3. 코팅된 판형 열교환기의 내부 부식성 평가

Figure 4에는 친/소수성 소재가 열교환기 유로 표면에 균일하게 도포되었는지를 확인하기 위해 시료를 wire-cutter로 절개하여 내부 시편 채취하여 주사전자현미경 (SEM)으로 미세구조를 분석한 결과를 나타냈다. 본 연구에서 판형 열교환기 내부의 내부식성 및 전열 특성을 향상시키기 위해 진행된 코팅 공정이 내부의 요인으로 인해 전열 특성이 감소하는 결과를 나타냈으며, 그 원인을 파악하고자 코팅된 열교환기의 유로 및 내부 상태를 확인하였다.

Wire-cutter로 절개하여 내부를 관찰한 결과, 열교환기 일부 유로에서 단단하게 응고된 흰색의 이물질이 발견되었으며, 이는 유로의 모서리 부분에서 다수 관찰되었다. 또한 이러한 이물질은 냉매측 및 물측 모두 코팅을 진행한 유로 쪽에서 관찰할 수 있었다.

열교환기 내부의 냉매측과 물측 유로에 발생된 이물질에 대한 EDX 분석을 진행한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 이물질과 유로를 각각 나눠 3 point를 지정하고 각 지점

에 대한 면분석을 진행한 결과, 일부 박피가 되어 있는 이물질 부분(Fig. 5, spectrum 1, 2)에서는 Si 성분이 10% 이상 분석되었으며 판형상을 갖는 열교환기 유로 플레이트 부분(Fig. 5, spectrum 3)은 STS 316의 조성이 분석되었다.

열교환기 내부에 있는 이물질에서 검출된 Si 성분은 소수성 코팅을 위해 투입된 코팅제의 실란 성분으로 판단되며, 판형열교환기 내부 구조상 코팅 용액이 도포된 다음 공정 중 휘발 및 건조 과정에서 완전한 제거가 안 되고, 이는 반응기 내부의 금속 성분에 장시간 접촉됨에 따라 금속의 부식 및 이물질로의 고착화가 진행된 것으로 판단된다[13].

이물질의 분포를 확인해 보면 열교환기 내부 플레이트의 접촉부위나 모서리 부분에 다량 분포된 것으로 보아 코팅 용액과 내부 유로를 형성하는 플레이트 부분의 표면 장력으로 인해 액상으로 되어 있는 코팅 용액이 완전 제거가 안 된 상태로 판단된다[14].

판형으로 구성되어 유로를 형성하는 접합 판형 열교환기의 경우, 조립 과정에서 브레이징 공정으로 접합이 된 다음에는 내부의 구조상 액상 코팅액을 딥코팅 공정으로 적용하기 어려울 것으로 보이며, 이러한 코팅제의 고착화 현상을 방지하고 열교환기의 코팅 공정을 적용하여 전열특성을 개선하기 위해서는 열교환기의 플레이트에 우선적으로 코팅 공정을 진행한 다음, 브레이징 및 플레이트의 조립 공정을 통해 열교환기를 제작하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 접합 판형 열교환기 내부의 금속 표면에 실란 코팅 처리를 하여 열교환기를 운전하였을 때, 내식성과 열효율에 관한 성능을 평가하였다. 유기 작동유체와 소재의 표면과의 매칭성 연구를 통해 표면에서의 열전달 성능을 비교 분석하였으며, 이때 발생하는 열교환기 내부의 문제점을 고찰하였다.

열교환기 내부에 적용할 절연소재의 표면 처리를 위해 소수성 코팅을 적용한 NanoEL 시료는 107.6°, 친수성 코팅을 적용한 H1147 시료는 20.4°의 접촉각을 나타냈다. 또한 친수 및 소수성 코팅 처리된 절연소재를 168시간 동안 염수분무 테스트를 진행한 결과, 코팅 성분때 따른 부식성은 발현되지 않았다.

접합 판형 열교환기의 코팅 조건에 따라 전열량 평가를 진행한 결과, 코팅표면이 열저항으로 작용하여 열전달을 방해하는 것으로 나타났으며, 냉각수측 유로에는 코팅하지 않은 경우가 전열 특성이 우수한 것으로 분석됐다.

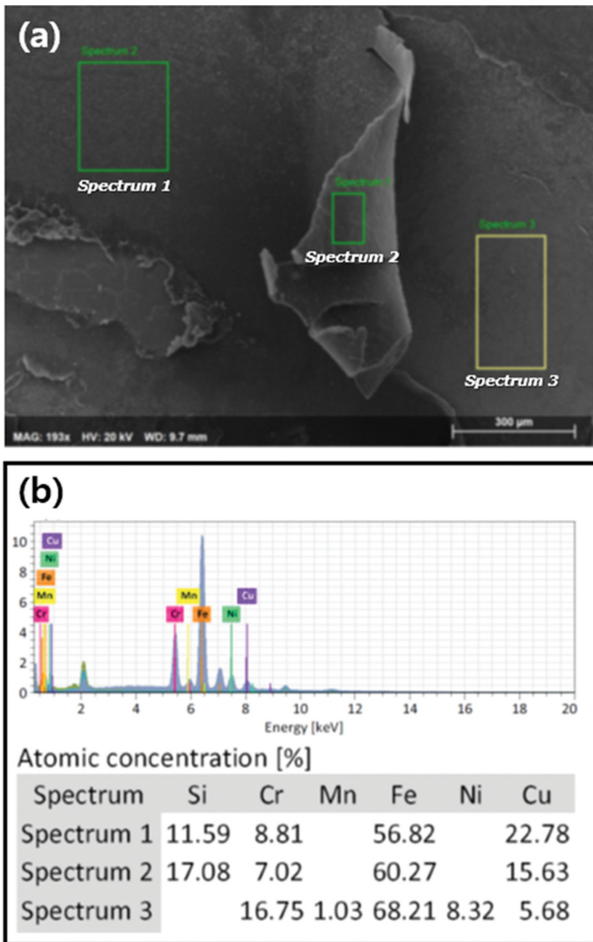


Fig. 5. EDX analysis of the heat exchanger internal: (a) analysis point and (b) analysis results according to points.

코팅에 따른 접합관형열교환기의 열특성 저하의 원인을 규명하고자 실시한 열교환기 분석에서는 일부 유로에서 응고된 Si 성분의 이물질이 관찰되었으며, 코팅 공정 중 발생한 이물질의 고착화에 따라 절연 특성이 저하됨을 알 수 있다.

관형으로 구성되어 유로를 형성하는 관형 열교환기의 경우, 코팅 공정을 적용하여 전열특성을 개선하기 위해서는 열교환기의 플레이트에 우선적으로 코팅 공정을 진행한 다음, 브레이징 및 조립 공정을 통해 열교환기를 제작하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년 산업통상자원부 에너지기술평가원 에너지기술개발사업(번호: 20171010105960)의 지원을 받아 수행된 연구임

## References

- [ 1 ] J. Son, E. Lee, H. Kang, Y. Kim, J.K. Kim, S.Y. Cho and J.H. Park, "Performance characteristics of plate heat exchangers with various geometric design parameters", *Trans of the Kor. Soc. of Mecha. Eng. B* 36 (2012) 583.
- [ 2 ] H.J. Ahn, S.H. Lee, N. Hur, H.J. Park and H.S. Ryu, "A numerical simulation of flow and heat transfer in a dimple-type plate heat exchanger", *Kor. J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng.* 22 (2010) 149.
- [ 3 ] K.S. Song, C. Baek, S.W. Kim and Y. Kim, "Experimental study on leak flow rate and inner flow characteristics of plate heat exchangers with pin-hole location and mass flux", *Kor. J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng.* 28 (2016) 171.
- [ 4 ] Y.C. Ko, B.D. Ratner and A.S. Hoffman, "Characterization of hydrophilic—hydrophobic polymeric surfaces by contact angle measurements", *J. Colloid Interface Sci.* 82 (1981) 25.
- [ 5 ] T.D. Lee, H. Cho, S.J. Yoon and T.G. Kim, "Study of surface modification and contact angle by electrospun PVdF-HFP membrane with DLC coating", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 24 (2014) 33.
- [ 6 ] J. Jeon, E. Lee, H. Kang and Y. Kim, "The fouling characteristics of plate heat exchangers with geometric and operating parameters", *Kor. J. Air-Conditioning and Refrigeration Eng.* 26 (2014) 163.
- [ 7 ] D.U. Kim and C.W. Park, "A study of the anticorrosive characteristics of Ti based coatings by cold spray for plate heat exchangers", *Proc. of The Kor. Soc. of Mecha. Eng.* (2012) 240.
- [ 8 ] T.W. Lim and D.H. Cho, "Study on heat transfer characteristic of shell-and-tube heat exchanger with plate fin", *J. of Academia-Industrial Tech.* 10 (2009) 46.
- [ 9 ] W.J. Lee, W.J. Shin, D.K. Lee and J.H. Choi, "Performance evaluation of plate heat exchanger applied low temperature cofired coating", *J. of the Kor. Soc. of Marine Environment & Safety* 23 (2017) 407.
- [10] AHRI Standard 450-2007, 2007 Standard for Performance Rating of Water-Cooled Refrigerant Condensers, Remote Type.
- [11] J. Wang, J.M. Li and Y.H. Hwang, "Flow pattern transition during condensation of R134a and R1234ze(E) in microchannel arrays", *Applied Thermal Eng.* 115 (2017) 244.
- [12] C. Kondou, S. Umemoto, S. Koyama and Y. Mitooka, "Improving the heat dissipation performance of a looped thermosyphon using low-GWP volatile fluids R1234ze(Z) and R1234ze(E) with a superhydrophilic boiling surface", *Appl. Therm. Eng.* 118 (2017) 147.
- [13] F. Zucchi, V. Grassi, A. Frignani and G. TrabANELLI, "Inhibition of copper corrosion by silane coatings", *Corrosion Science* 46, Issue 11 (2004) 2853.
- [14] D.Y. Ji, D.H. Kim and K.Y. Lee, "The effects of non-condensable gas on condensation heat transfer on a super-hydrophobic surface tube", *J. of the Kor. Academia-Industrial Cooperation Soc.* 19 (2018) 517.