

판형 열교환기 전열판의 부식 파손 분석

송민지¹ · 최가현¹ · 채호병¹ · 김우철² · 김희산³ · 김정구⁴ · 이수열^{1,†}

¹충남대학교 신소재공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99

²한국지역난방공사 미래개발원, 경기도 용인시 기흥구 기곡로 92

³홍익대학교 재료공학과, 세종특별자치시 조치원읍 세종로 2639

⁴성균관대학교 신소재공학부, 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

(2021년 6월 18일 접수, 2021년 6월 29일 수정, 2021년 6월 29일 채택)

Corrosion Failure Analysis of Flow Plate in Plate Heat Exchanger

Min Ji Song¹, Gahyun Choi¹, Hobyung Chae¹, Woo Cheol Kim², Heesan Kim³,
Jung-Gu Kim⁴, and Soo Yeol Lee^{1,†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²R&D Institute, Korea District Heating Corp., Yongin 17099, Republic of Korea

³Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Republic of Korea

⁴School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

(Received June 18, 2021; Revised June 29, 2021; Accepted June 29, 2021)

Corrosion failure analysis of the flow plate, which is one of the accessories of the plate heat exchanger in a district heating system, was performed. The flow plate is made of 316 stainless steel, and water at different temperatures in the flow plate exchanges heat in a non-contact manner. The flow plate samples in which water mixing issues occurred were collected. Corrosion-induced pits, oxides, and contaminants were observed at locations where two plates are regularly in contact. The EDS analysis of the surface oxides and contaminants revealed that they were composed of carbon, silicon, and magnesium, which came from chemical adhesives. The IC/ICP analyses showed that the concentration of chloride ions was 30 ~ 40 ppm, which was not sufficient to cause corrosion of stainless steel. In the crevice, a local decrease in dissolved oxygen occurs along with an increase in chloride ions, thus forming an acidic environment. These environments destroyed the passive film of stainless steel, resulting in pits. Moreover, contaminants formed a narrower gap between the two metal plates and inhibited the diffusion of ions, thereby accelerating crevice corrosion.

Keywords: Plate heat exchanger, Flow plate, Crevice corrosion, Adhesive

1. 서론

지역난방은 열 생산시설에서 생산한 열의 손실을 최대한 줄이기 위해 매설된 열수송 배관망을 통해 대단위 지역으로 온수를 공급하는 시스템이다 [1,2]. 물을 열 매체로 이용하며, 열생산시설로부터 공급된 난방수(1차측 난방수)는 비접촉식으로 사용자측 난방수(2차측 난방수)와 열교환하여 최종 사용처로 열을 전달한다. 난방수 사이의 열교환은 열교환 설비를 통해 이루어지며, 판형 열

교환기는 우수한 열 전달 효율과 소형화가 가능하다는 특징을 가지기 때문에 현재 많은 곳에서 사용되고 있다.

판형 열교환기는 0.5 ~ 1 mm의 얇은 전열판과 이를 고정시키는 프레임 및 봉으로 구성된다. 전열판은 2 ~ 3% 몰리브덴(Mo)이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강으로, 우수한 내식성, 고온 강도 및 내산화성을 가진다 [3]. 전열판은 해링본 패턴(Herringbone pattern)으로 굴곡을 가지고 있으며, 열교환기 중간에 놓이는 플로우 플레이트(Flow plate)는 위아래로 엇갈리게 배치한다. 배치된 전열판은 화학접착제로 접착된 고무 개스킷을 사이에 두고 조임볼트로 조여지며, 판마다 좌우 방향으로 유체흐름을 형성한다. 예를 들면, 1차측 난방수는 고무 개스킷이 우측 포트(Port)가 실링되어 좌측 방향으로만

[†]Corresponding author: sylee2012@cnu.ac.kr

송민지: 박사과정, 최가현: 석사과정, 채호병: 석박통합과정, 김우철: 책임연구원, 김희산: 교수, 김정구: 교수, 이수열: 교수

흐르며, 교대로 놓인 판을 지나며 오픈된 좌측 포트를 통해 전열판 표면을 이동하며 열교환을 한다. 2차측 난방수는 반대로 좌측 포트가 실링되어있어 우측 방향으로 흐르며 열을 공급받는다. 열교환기의 고정 프레임에 접촉하는 실 플레이트(Seal plate)는 4개의 포트가 개스킷으로 실링되어 통로로써 이동만 하도록 하며, 이동 프레임과 닿는 블라인드 플레이트(Blind plate)는 4개의 포트가 닫혀있어 프레임과 접촉하지 않고 유체가 흐르도록 한다.

판형 열교환기는 얇은 스테인리스 전열판을 겹겹이 위치시켜 물이 섞이지 않고 열을 효과적으로 전달하는 역할을 한다. 이때 중요한 점은 설비 관리를 위해 1차측과 2차측 난방수의 혼합이 발생해서는 안 된다는 점이다. 하지만 결합에 의해 물의 혼합 또는 개스킷 손상 [4], 전열판 스케일 형성 및 표면 부식 [5-7], 응력에 의한 균열 [4,8] 등이 종종 발생하고 있으며, 이로 인해 누수 및 열전달량의 감소로 이어져 보수로 인한 경제적 손실, 열 공급 문제를 야기하므로 적절한 설비 관리를 위한 대책이 요구된다. 육안으로 관찰가능한 결합은 유지 관리 및 보수가 원활하지만 보이지 않는 미세 결합은 파손 원인 분석을 통해 적절한 관리방안이 도출되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 판형 열교환기의 전열판에서 발생한 결합을 정밀 분석하고 원인 및 대책에 대하여 논하고자 한다. 최근 아파트 기계실에서 사용되었던 판형 열교환기 내부에서 혼수 발생이 보고되었다. 혼수가 전열판에 어떠한 영향을 끼쳤는지를 평가하기 위해서, 무작위하게 수집한 샘플들의 외관을 관찰하여 표면 부식 형태를 확인하였고, 표면 생성물 및 수질 성분분석을 통해 부식 발생 원인 및 메커니즘을 도출하였다.

2. 연구방법

2.1 판형 열교환기 전열판 샘플링

판형 열교환기의 전열판은 AISI 316 스테인리스강으로, 교대로 좌우방향으로 유체가 흐르는 플로우 플레이트를 샘플로 수집하였다. 내부 혼수가 발생한 열교환기의 전열판 중 두 개를 무작위로 수집하였고, 수집된 전열판 사진을 Fig. 1b에 나타내었다. 전열판은 화학접착제를 사용하여 고무 개스킷이 붙어 있음을 볼 수 있다.

2.2 분석 계획

전열판 표면에 결합이 발생하였다면, 결합 발생 위치의 경향성, 형성된 표면 스케일 분석을 통해 원인 및 발생한 부식 타입을 예측해 볼 수 있다. 육안검사를 통해 부식 및 결합 위치를 판독하였으며, 검사를 통해 확인된 부식 발생 위치를 가공하여 샘플로 제작해 정밀 분석을 진행하였다. 광학현미경, 주사전자현미경, 에너지

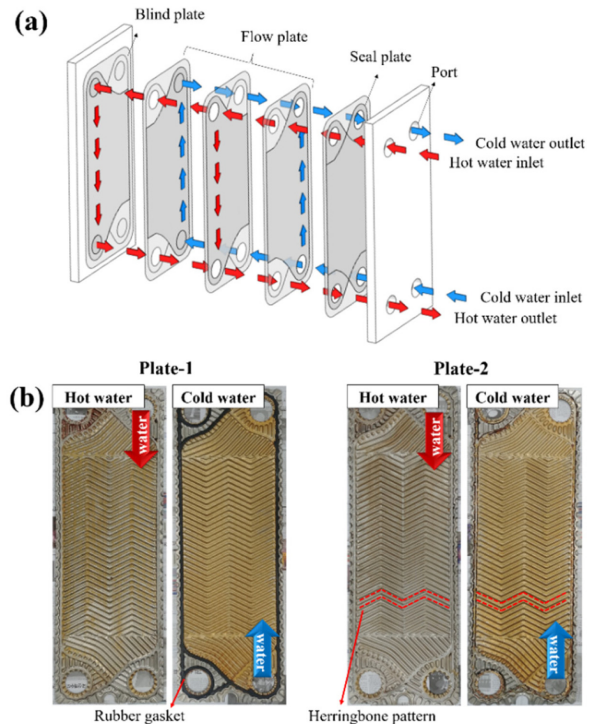


Fig. 1. (a) Water flow of inlet and outlet in plate heat exchanger, (b) Flow plate samples used in the plate heat exchanger

분산형 분광분석법(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)을 이용해 표면의 부식 형태 및 표면 스케일 성분 분석을 수행하였다. 판형열교환기 내부로 유입되는 난방수에 의한 영향 평가를 위해 판형 열교환기로 공급되는 1차측 난방수와 2차측 난방수를 각각 채수하여 이온크로마토그래프(Ion chromatography, IC), 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)를 통해 분석을 수행하였다.

3. 연구결과

3.1 육안 검사

전열판 표면의 부식 발생 경향성을 파악하기 위해 육안검사를 수행하였다. 부식은 특정 위치에서 규칙적으로 나타났으며, Plate-1과 Plate-2의 발생위치가 동일하였다. 표면이 패인 pit 형태로 발생되었으며, 전열판의 볼록한 위치에 분포하였다. 고무 개스킷은 고온에서도 사용 가능한 화학 접착제를 사용하여 부착되어 있으며(Fig. 2c), 개스킷 및 화학접착제 아래에는 부식에 의한 손상은 발견되지 않았다. 전열판 표면에는 부식에 의한 산화물 형성과 더불어 오염물이 관찰되었으며(Fig. 2b, 2f), 오염물은 무작위한 위치에서 나타났다. Fig. 3은 광

Plate-1

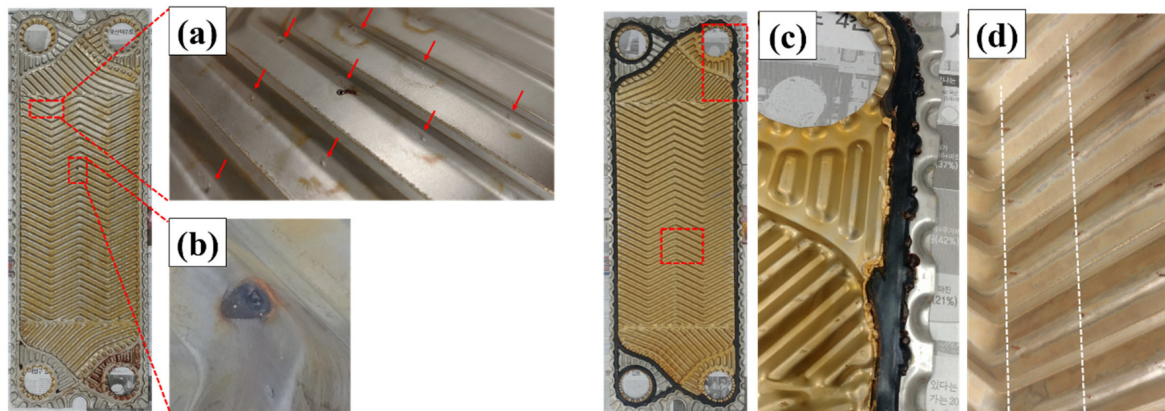


Plate-2

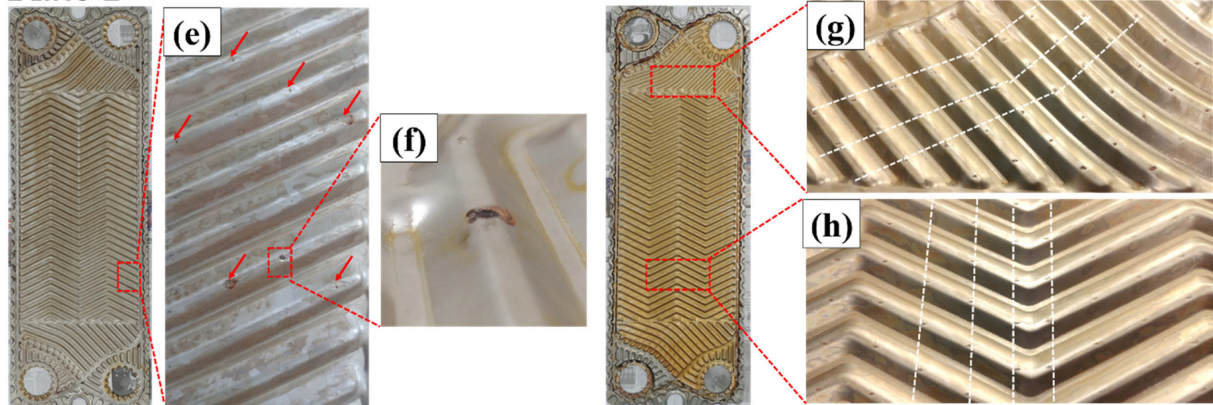
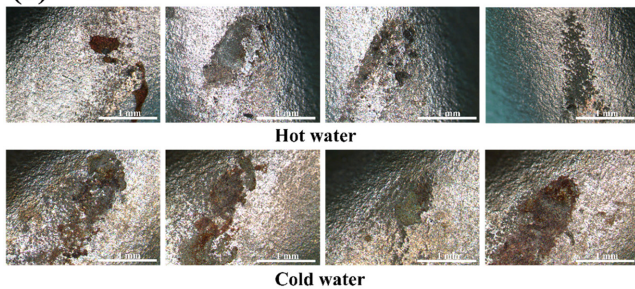


Fig. 2. The corroded plate-1: (a) the surface pits distributed regularly in the hot water side, (b) oxides and contaminants, (c) a rubber gasket attached by chemical adhesive, (d) the surface pits distributed regularly in the cold water side; The corroded plate-2: (e) the surface pits distributed regularly in the hot water side, (f) oxides and contaminants, (g) and (h) the surface pits distributed regularly in the cold water side

(a) Plate-1



(b) Plate-2

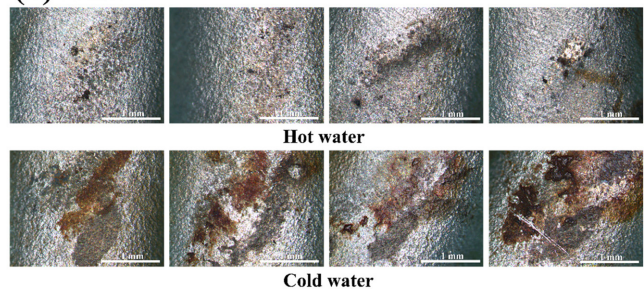


Fig. 3. Optical microscope images for the corrosion pits and the scales of the (a) plate-1 and (b) plate-2

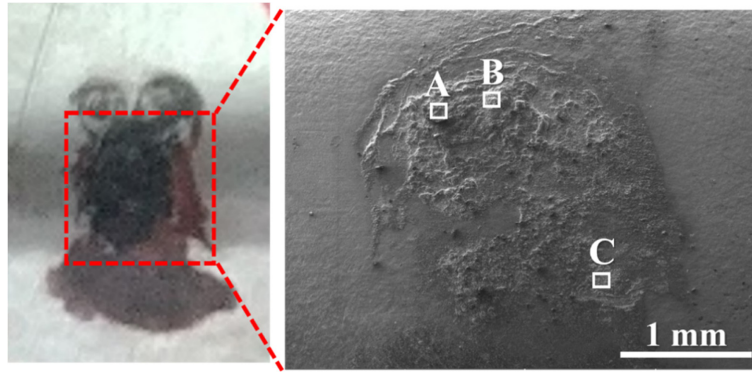
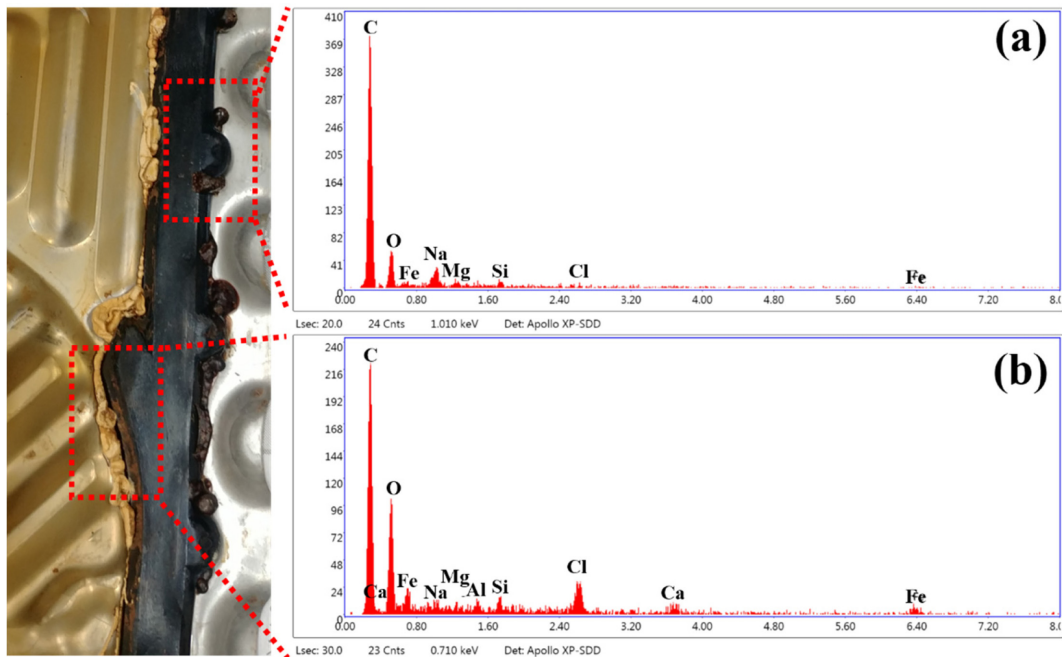
학현미경으로 촬영된 pit의 모습이며, 1, 2차 양측 난방수에 노출된 면에서 육안검사에서 확인되었던 pit이 관찰되었다. 1차측보다 2차측의 부식이 상대적으로 더 발생한 것으로 확인되었으며, pit 주변에는 산화물이 형성되어 있었다.

3.2 표면 결함 및 성분 분석

Fig. 4는 전열판 표면에서 관찰된 산화물 및 오염물의 모습이다. 모재의 조성과 비교했을 때(Table 1), 탄소(C), 산소(O)가 굉장히 높게 측정되었으며, Fig. 4의 B와 C 위치에서 실리콘(Si), 마그네슘(Mg)이 측정되었다. 스테인리스강은 일반적으로 1 ~ 3 nm 두께의 크롬 산화물

Table 1. Nominal chemical composition of AISI 316 stainless steel plate

Element	C	Ni	Cr	Mo	Si	Mn	P	S	Fe
wt%	0.08	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00	1.00	2.00	0.045	0.03	Bal.

**Fig. 4. The SEM images for the surface oxides and contaminants****Fig. 5. The appearance of chemical adhesive and EDS analysis in (a) black color region for the adhesives which is not contact with heating water, and (b) yellow color region for the adhesives in contact with heating water**

(Cr_2O_3) 부동태 피막을 형성함으로써 부식 저항성을 가지는데[9], 측정된 C, O, Si, Mg 등을 포함하는 표면에 형성된 물질은 피막과 무관하게 외부에서 유입된 원소에 의해 형성된 산화물 및 오염물로 판단된다.

관찰된 손상 표면 오염물(Fig. 4)은 열교환기에 사용되는 가스켓 접착제일 가능성이 있으므로 접착제를 샘플링하여 EDS 분석을 수행하였다. 사용된 화학접착제를 수집하여 분석하였다. 난방수와 접촉하는 면은 노란

색, 비접촉면의 경우 검은색을 나타내었으며(Fig. 5), 환경 및 색상에 따라 이를 성분 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 2에 분석된 산화물 및 오염물과 비슷하게 화학접착제 또한 탄소 및 산소가 높게 측정되었으며, 난방수와 접촉하는 화학접착제는 소량의 염소가 포함된 것으로 확인되었다. 따라서 표면의 오염물은 화학접착제이며, 운영 중 전열관 내부로 화학 접착제가 유입되어 틈에 접착된 상태로 나타난 것으로 판단된다.

Table 2. The EDS analysis of the surface oxides and contaminants [at.%]

Element	C	O	Si	Al	Mg	P	Ni	Mo	Cr	Mn	Fe
A	29.1	53.5	1.8	0.3	0.9	0.1	13.8	0.1	0.3	0.1	13.8
B	39.6	42.6	8.7	0.3	6.5	0.0	0	0.1	0.2	0.3	1.6
C	39.9	40.1	4.1	0.2	2.3	0.0	0.1	0.1	2.5	2.1	9.4

Table 3. The EDS analysis of the adhesives [at.%]

Element	C	O	Si	Al	Mg	Na	Cl	Ca	Fe
Yellow color adhesive	70.4	22.9	0.4	0.3	0.3	1.1	1.8	0.9	1.9
Black color adhesive	79.7	17.7	0.4	-	-	2.3	-	-	-

Table 4. IC/ICP analysis on the water quality of plate-1 and plate-2 [ppm]

Type	Water	Cl	Na	Fe	Al	Mg	Cu	Si	S	P
Plate-1	Hot	30.4	14.9	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.6	1.1	< 0.1
	Cold	41.9	6.4	< 0.1	< 0.1	3.0	< 0.1	2.5	3.4	< 0.1
Plate-2	Hot	44.8	22.3	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	0.5	1.5	< 0.1
	Cold	41.0	6.1	< 0.1	< 0.1	2.9	< 0.1	2.4	3.2	< 0.1

3.3 수질 검사

전열판 부식에 대한 공급되는 난방수의 수질의 영향이 있는지 검토해보기 위해 채수된 1, 2차측 난방수를 IC/ICP 분석하였다(Table 4). 스테인리스강의 부식을 일으키는 염화 이온(Cl) 농도는 1차측과 2차측에서 채수된 물에서 30 ~ 40 ppm 수준으로 분석되었다. 염화 이온은 SS316 스테인리스강 표면에 결합이 없는 경우 1,000 ppm 까지는 사용을 허용하고 있으며, 난방수 환경에서 염화 이온 자체가 스테인리스강 공식(Pitting corrosion)을 일으키기에는 농도가 낮음을 확인할 수 있었다 [9-11].

4. 토의

동일한 위치에서 발견되는 pit 위치는 전열판 디자인에 의해 결정된다고 유추할 수 있다. 판형 열교환기 전열판은 해링본 패턴으로 만들어져 있으며, 이러한 패턴이 유체 난류 유동을 발생시켜 높은 열전달계수를 갖게끔 함으로써 열교환 효율을 향상시킨다. 방향을 위아래로 엇갈리게 번갈아 배치한 두 절연판은 조이면서 서로 맞닿게 되는데, 접촉 지점은 셰브론 각(Chevron angle)에 의해 결정된다(Fig. 6). 두 절연판의 접촉지점은 관찰된 pit 위치와 정확히 일치하며, 접촉지점에서의 부식은 금속 간 틈 형성에 의해 발생하는 틈 부식으로 추측된다. 좁은 틈 내부에 산소 공급이 힘들기 때문에 산소 고갈 후 내부로 Cl⁻이온이 이동하게 되고 이때 형성된 염화철이 가수분해되면서 강산성 환경을 만들면서 부동

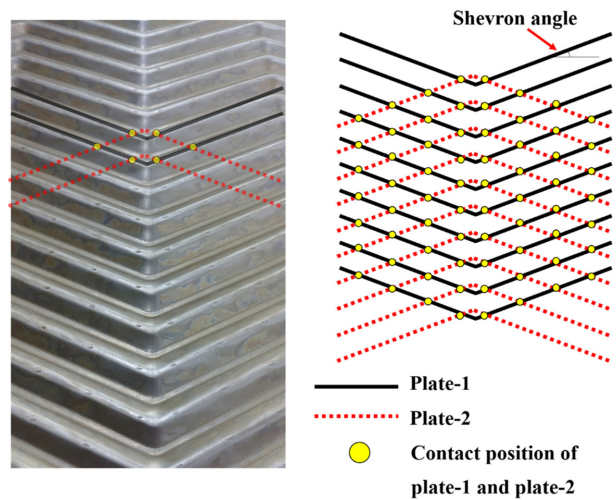


Fig. 6. The position of gap formed due to the contact between plate-1 and plate-2

태 피막을 파괴하고 부식속도를 촉진하여 금속용해속도를 가속한다. 이때 수질 내 염화 이온은 스테인리스강의 공식을 일으킬 만큼 충분하지는 않았지만, 틈 부식에 의해 국부적으로 축적된 염화 이온 농도 상승으로 공식이 충분히 발생 가능하며, 이러한 틈 부식은 처음 pit 발생 이후부터 급속하게 진행된다고 보고된다 [11,12].

판형 열교환기 전열판 사이의 밀착을 위해 사용되는 고무 개스킷의 접착용으로 화학 접착제가 사용되고 있다. 표면 산화물 분석 결과 접착제 성분으로 확인되었

으며, 열 교환기 고무 개스킷 접착용으로 시중에 판매되는 접착제에 포함되는 성분(C, Si, Mg)이 확인되었으므로 표면의 물질은 접착제로 판단된다. 접착제는 전열판이 접촉하는 볼록한 위치에서 공통적으로 발견되었으며, 접착제는 가수분해로 열 경화되면서 전열판 사이에 붙어 좁은 틈을 형성하면서 이온의 확산을 저해하여 틈 부식을 가속화할 수 있다. 접착제가 전열판 내 무작위로 나타나므로, (1) 설치 과정 중의 오염, (2) 운영 중 떨어져 나온 접착제가 전열판 내부로 유입된 것이 부식의 원인으로 추측된다.

5. 결론

판형열교환기의 전열판에서 발생한 부식은 미세한 틈에서 기인한 부식으로 판단된다. 육안검사를 통해 표면의 규칙적인 위치에서 부식에 의한 pit이 관찰되었으며, Pit이 발생한 위치 주변으로 산화물 및 오염물이 확인되었다. 오염물은 판형열교환기 전열판 사이를 밀착시키기 위한 접착제로 추정되며, 난방수를 통해 미량의 접착제가 유입된 것으로 판단된다. 난방수 내 염화 이온의 농도는 30 ~ 40 ppm 수준으로 스테인리스강의 부식을 일으킬 수준은 아닌 것으로 확인되었다. 하지만 판형 열교환기의 구조상 얇은 전열판이 서로 맞대어 있으며, 체결을 위해 일정수준 압력이 가해져 금속-금속 간의 매우 미세한 틈이 형성된다. 표면 오염물은 그 틈을 더욱 좁게 형성함과 동시에 수질 내 원소의 확산을 저해하기 때문에 틈 부식을 가속시켰을 것으로 추측된다. 국부적으로 용존 산소의 감소와 염화 이온 농도 증가는 강산성 환경을 형성하고, 스테인리스강의 부동태 피막을 파괴해 부식을 일으킨 것으로 판단된다. 판형 열교환기의 설계 상 미세한 틈 형성은 피할 수 없으므로, 틈 부식을 방지하기 위해서는 설비를 정기적으로 검사하여 틈 사이 오염물을 제거할 필요가 있으며 수질 내 염화 이온을 제거 또는 감소시켜야 한다.

Acknowledgement

본 연구는 한국지역난방공사와 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 연구를 수행하였습니다(P0002019, 2021년 산업전문인력역량강화사업).

References

1. H. Lee, H. Chae, J. Cho, W. C. Kim, J. C. Jeong, H. Kim, J. Kim, and S. Y. Lee, Corrosion Failure Analysis of Air

- Vents Installed at Heat Transport Pipe in District Heating System, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 189 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.189>
2. J. Cho, H. Chae, H. Kim, J. Kim, W. C. Kim, J. Kim, and S. Y. Lee, Failure Analysis of Air Vent Connected with Heat Supply Pipeline Under Manhole, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 196 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.196>
3. Corrosion failures(Eds: K. Elayaperumal, V. S. Raja), pp. 88 - 92, *Wiley*, Hoboken, NJ (2015).
4. W. Faes, S. Lecompte, Z. Y. Ahmed, J. V. Bael, R. Salenbien, K. Verbeken, and M. D. Paepe, Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers, *Corrosion Reviews*, **37**, 2 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0054>
5. Z. D. Fan, J. S. Du, Z. B. Zhang, Y. C. Ma, S. Y. Cao, K. Niu, and C. X. Liu, Internal leakage of plate heat exchangers caused by cooperation of pitting, crevice corrosion, and fretting, *Engineering Failure Analysis*, **96**, 340 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.007>
6. K. M. Deen, M. A. Virk, C. I. Haque, R. Ahmad, and I. H. Khan, Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion, *Engineering Failure Analysis*, **17**, 886 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.023>
7. J. Marjanowski, Leakages and Scaling in Stainless Steel Heat Exchangers, *European Journal of Engineering Research and Science*, **4**, 4 (2019). Doi: <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2019.4.8.1424>
8. S.H. Khodamorad, N. Alinezhad, D. Haghshenas Fatmehsari, and K. Ghahtan, Stress corrosion cracking in Type.316 plates of a heat exchanger, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, **5**, 59 (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csefa.2016.03.001>
9. ASM Handbook, Vol. 13B (Eds: S. D. Cramer, J. Bernard, S. Covino), pp.78-84, *ASM International*, Materials Park, OH (2005).
10. T. Ohmi, Y. Nakagawa, M. Nakamura, A. Ohki, and T. Koyama, Formation of chromium oxide on 316L austenitic stainless steel, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, **14**, 2505 (1996). Doi: <http://dx.doi.org/10.1116/1.580010>
11. E. D. Mackey and T. F. Seacord, Guidelines for Using Stainless Steel in the Water and Desalination Industries, *Journal American Water Works Association*, **5**, E158 (2017). Doi: <https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0044>
12. S. Kim, J. Lee, J. Kim, and W. Kim, Effect of the Crevice Former on the Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Chloride-Containing Synthetic Tap Water, *Metals and materials international*, **24**, 516 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0062-2>