

## 지역난방 냉각수 배관의 용접부 파손 분석

정 준 철<sup>1</sup> · 김 우 철<sup>2</sup> · 김 경 민<sup>2</sup> · 손 흥 균<sup>3</sup> · 김 정 구<sup>4</sup> · 이 수 열<sup>5</sup> · 김 희 신<sup>6,†</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 인공지능·데이터사이언스학과, 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

<sup>2</sup>한국지역난방공사 미래개발원, 경기도 용인시 기흥구 기곡로 92

<sup>3</sup>한국부식방식학회, 서울시 강남구 테헤란로 7길 22

<sup>4</sup>성균관대학교 신소재공학부, 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

<sup>5</sup>충남대학교 신소재공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99

<sup>6</sup>홍익대학교 재료공학과, 세종시 조치원읍 세종로 2639

(2020년 11월 27일 접수, 2020년 12월 10일 수정, 2020년 12월 11일 채택)

## Failure Analysis of Welded type 304 in Cooling Water Pipeline of District Heating System

Joon-Cheol Jeong<sup>1</sup>, Woo-Cheol Kim<sup>2</sup>, Kyung Min Kim<sup>2</sup>,  
Hong-Kyun Sohn<sup>3</sup>, Jung-Gu Kim<sup>4</sup>, Soo-Yeol Lee<sup>5</sup>, and Heesan Kim<sup>6,†</sup>

<sup>1</sup>Department of AI and Data Science, Ajou University, Suwon 16499, Republic of Korea

<sup>2</sup>R&D Institute, Korea District Heating Corp., Yongin 17099, Republic of Korea

<sup>3</sup>The Corrosion Science Society of Korea, Seoul 06130, Republic of Korea

<sup>4</sup>School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

<sup>5</sup>Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

<sup>6</sup>Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Republic of Korea

(Received November 27, 2020; Revised December 10, 2020; Accepted December 11, 2020)

Failure analysis on the welded type 304 pipe used for cooling water piping in the district heating primary side was conducted. Inorganic elements and bacteria in the cooling water and in corrosion products were analyzed, and the weldment was inspected by microscopy and a sensitization test. Corrosion damages were observed in the heat-affected zone, on weld defects such as incomplete fusion or excessive penetration caused by improper welding, or/and at the 6 o'clock position along the pipe axial direction. However, the level of concentration of chloride in the cooling water as low as 80 ppm has been reported to be not enough for even a sensitized type 304 steel, meaning that the additional corrosive factor was required for these corrosion damages. The factor leading to these corrosion damages was drawn to be the metabolisms of the types of bacteria, which is proved by the detection of proton, sulfur containing species, biofilms, and both bacteria and corrosion product analyses.

**Keywords:** HAZ, Sensitization, District heating, Bacteria, Cooling water pipeline

### 1. 서론

지역난방이란 열병합발전소 등 첨단 오염방지설비가 완비된 대규모 열생산 시설에서 경제적으로 생산된 열을 물을

매개체로 하여 대단위 지역에 일괄적으로 공급하는 도시기반 시설을 말하며, 중앙 집중식과 같은 기존의 난방 방식에 비하여 에너지 절약과 오염물질 감소 효과가 우수한 난방시스템이다. 최근 환경보호에 대한 관심 및 에너지의 사용량 증가에 따른 에너지 효율성이 높아짐에 따라 에너지의 생산, 전환, 수송, 저장, 및 이용에 있어서 지역난방 관련 설비에 대한 유지관리의 중요성이 점차 더 부각되고 있다 [1-6].

지역난방 시스템은 Fig. 1과 같이 대규모 열원에서 에너

<sup>†</sup>Corresponding author: hskim@hongik.ac.kr

정준철: 부처장, 김우철: 책임연구원, 김경민: 책임연구원, 손흥균: 연구원, 김정구: 교수, 이수열: 교수, 김희산: 교수

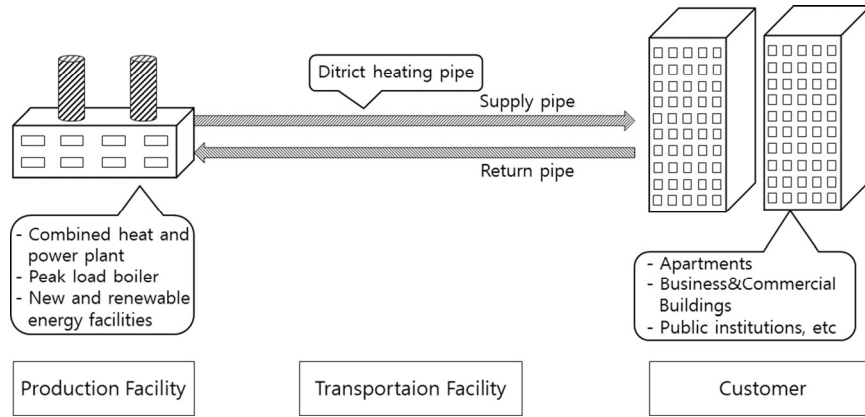


Fig. 1 Schematic diagram of district heating system.

지를 생산하는 열생산시설과 이를 수송하는 열수송시설 그리고 열을 사용하는 열사용시설로 구분된다. 열생산시설을 통해 생산된 열은 펌프등의 공급설비를 통해 열수송시설을 통하여 사용자에게 전달되는데 공급설비들에 문제가 생길 경우 안정적인 열수급에 문제를 유발하여 경제적 손실 및 사용자 민원등의 문제를 유발할 수 있다. 따라서 현장에서 발생한 설비의 파손 및 고장등의 원인을 분석하여 재발을 방지하는 것은 안정적인 설비의 운영을 위해 필수적인 요소이다.

본 연구에서는 열공급 설비의 냉각을 위해 설치된 1차기 냉각수 배관재 (type 304)의 용접부에서 발생한 파손 현상을 분석하고 원인을 고찰하였다.

## 2. 연구방법

1차기 냉각수 환경에서 2년간 운영 후 누수가 발생하여 보수 용접을 통해 수명을 연장시킨 직경이 약 140 mm인 type 304 스테인리스 강관의 보수 용접 전 누수에 대한 원인을 조사하고자 광학 및 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM)으로 표면을 분석하고 노출 환경



Fig. 2 A OM image representing a damaged T-type connector.

인 냉각수의 무기물과 미생물 분석을 시행하였다.

배관에 연결된 강관의 맞대기 용접부에서 누수가 관찰되어 정비 기간에 Fig. 2처럼 맞대기 방식으로 용접된 부위를 포함시켜 T 자 형태로 시편을 채취하였다.

파손된 강관에 대해 부식생성물 전후의 표면 모양을 육안으로 분석하였다. 부식생성물 제거를 위해 ASTM G1 표준에 따라 질산 100 mL와 불산 20 mL에 증류수에 넣어 총 부피 1000 mL로 만든 상온의 용액에서 약 10분간 초음파 세척기를 사용하여 부식생성물을 제거하였다. 용접부 결함과 용접부에서 예만화를 조사하고자 시편을 아래와 같이 준비한 후 광학현미경과 SEM으로 표면을 관찰하였다. 절단하고 마운팅 및 경면 연마된 시편을 ASTM A262에 따라 10% 옥살산 용액에서 1 A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도로 90초간 전해 에칭을 시켰다. 이외에 부식생성물의 조성을 조사하고자 부식생성물의 단면에 대해 energy dispersive spectroscopy (EDS)로 원소 분석을 실시하였다.

또한, 냉각수의 부식도를 조사하고자 사용 전과 후 냉각수의 pH, 전기 전도도 및 음이온들의 농도를 분석하였다. 여기서 음이온은 ion chromatography (IC)로 분석되었다. 마지막으로 미생물의 영향을 확인하고자 BTI products LLC사의 MICKit<sup>®</sup>5를 이용하여 냉각수와 배관에 쌓여있는 슬러지에 존재하는 미생물을 분석하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 고품의 육안 분석

Fig. 2는 T 연결부 중 오른쪽 (1번으로 표시) 및 아래 (2번으로 표시) 강관의 용접부에서는 누수의 발생과 이로 인한 보수 용접의 시행을 그러나, 왼쪽 강관(3번으로 표시)의 용접부에서는 누수의 미발생을 보이는 그림을 나타내었다. Fig. 3은 부식이 관찰된 2번 용접부의 내관 표면은 부식생성물이 형성된 것처럼 표면이 울퉁불퉁하나 부

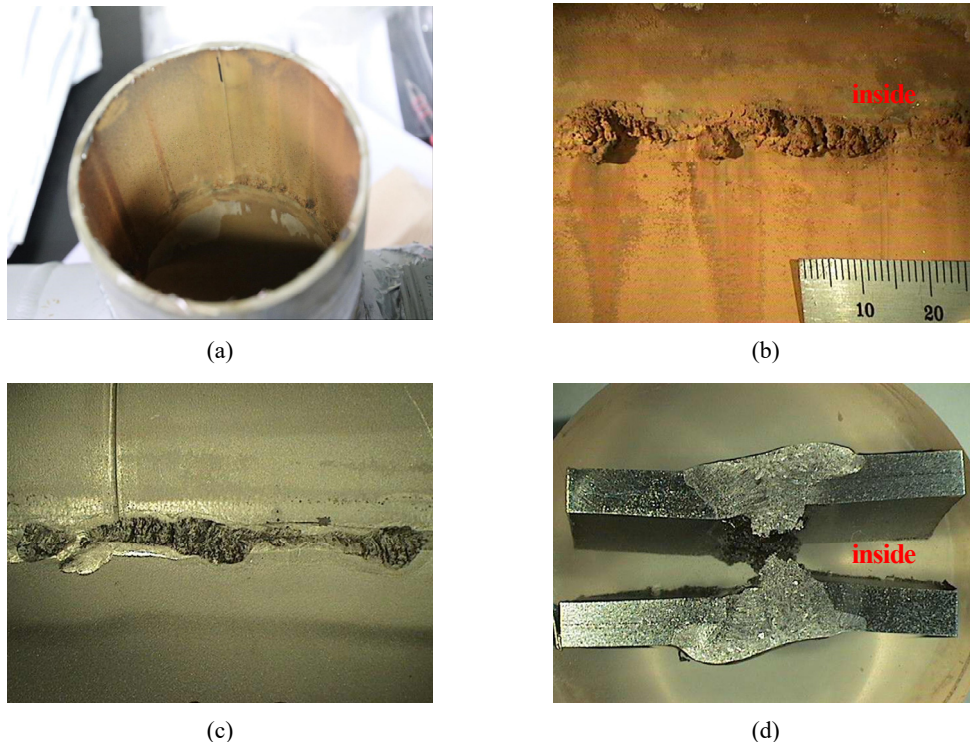


Fig. 3 OM images showing inner surface of weldment in No 2 of Fig. 2 (a) and (b), after descaling (c), and cross section (d).

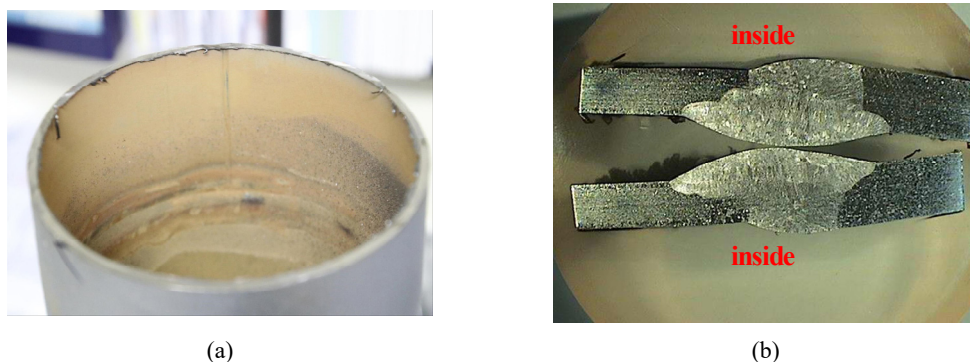


Fig. 4 OM images showing inner surface of weldment in No 3 of Fig. 2 (a) and after descaling (b).

식이 관찰되지 않은 3번 용접부(Fig. 4)는 2번 용접부와 달리 표면 및 용접부가 매끈한 것을 확인할 수 있다. 2번 용접부에서 나타난 매끈하지 못한 표면은 부식생성물이 원인이 아니라 맞대기 용접시 부적합한 용접 조건에 의해 용융 금속의 침투 때문이다. 이는 산세 이후 관찰된 금속 표면(Fig. 3c와 d)으로 확인되었다.

### 3.2 단면 분석

Fig. 5 - Fig. 7은 용접부의 예민화 조사 결과를 나타낸 그림으로 누수가 관찰된 용접부와 무관하게 모든 열영향부에서 예민화가 관찰되었다. 이는 예민화가 부식 속도를 증

가시켰다고 볼 수 있지만 [7,8] 누수의 직접적인 원인은 아님을 의미한다.

### 3.3 부식생성물 분석

Fig. 8은 보수 용접의 영향을 받지 않은 1번의 용접부에서 관찰된 부식 생성물의 EDS 분석을 나타내었다. 부식 생성물 중 염소는 거의 관찰되지 않은 반면 부식생성물 외층부와 달리 내층부에서 약 2 at.% 황이 관찰되었다. '4. 결론'에서 언급한 바와 같이, 황의 관찰은 미생물 부식을 누수의 원인으로 결론 내리는 하나의 증거로 사용되었다.

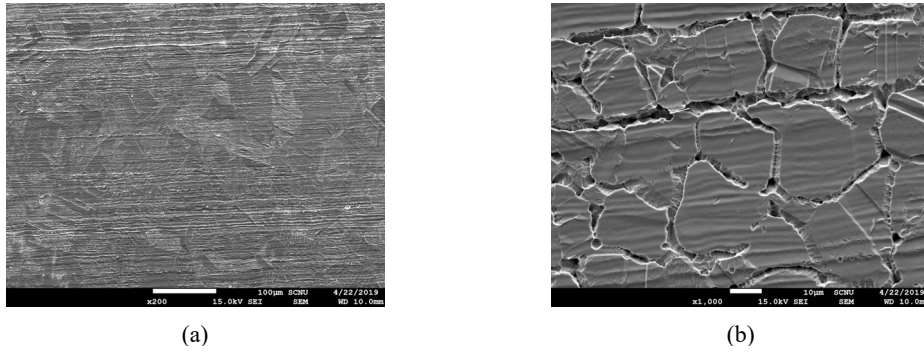


Fig. 5 SEM images of base metal (a) and heat affected zone (HAZ) of No 1 weldment (b) after etching in oxalic solution.

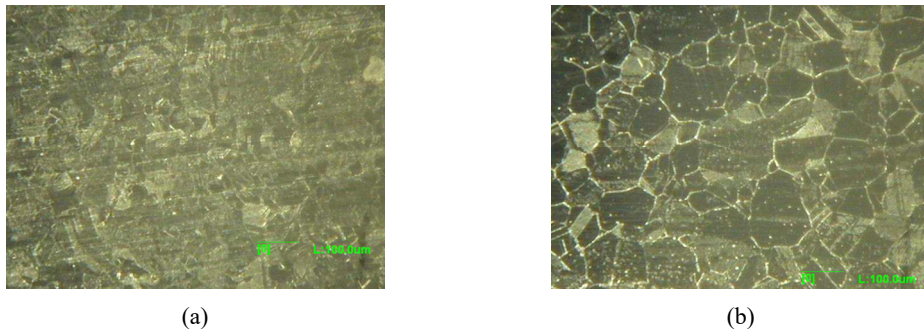


Fig. 6 OM images of base metal (a) and heat affected zone (HAZ) of No 2 weldment (b) after etching in oxalic solution.

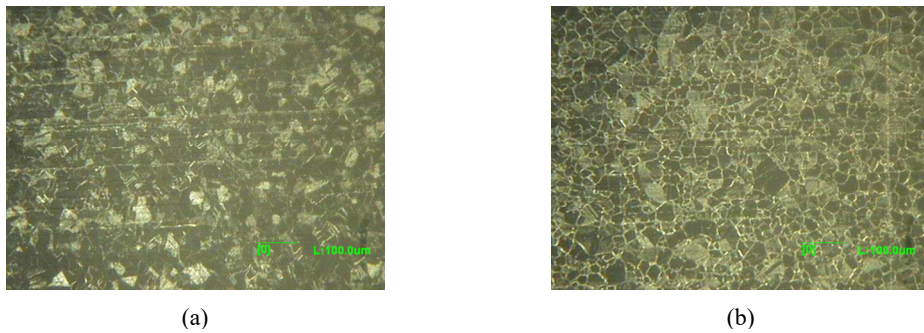
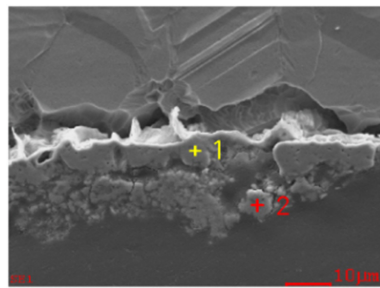


Fig. 7 OM images of base metal (a) and heat affected zone (HAZ) of No 3 weldment (b) after etching in oxalic solution.



Element	Concentration (at.%)	
	1 (outside)	2 (inside)
C	7.07	9.36
O	35.60	47.79
Si	2.32	4.27
S	0.12	1.73
Cl	0.03	0.00
Cr	2.44	16.45
Mn	0.20	0.40
Fe	51.73	19.40
Ni	0.50	0.60

(a) (b)

Fig. 8 Cross sectional SEM image (a) of corrosion product and the results of EDS analysis (b) of point 1 and point 2 in (a).

### 3.4 냉각수 분석 및 미생물 분석

냉각수의 사용 전후 분석결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 냉각수의 음이온 농도는 사용 전의 냉각수에 비해 약 4 ~ 5배 높은 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 사용되는 냉각수 시스템은 냉각탑의 증발량 만큼 지속적인 보충수 유입을 통해 이온의 농도를 유지하여야 하나, 증발량과 보충수의 비율이 맞지 않으면 지속적인 이온의 농축이 발생할 수 있다. 특히, 염소 이온의 농축은 스테인리스강의 부식에 영향을 미칠 수 있으나 type 304의 경우 염소 이온의 농도가 200 ppm 이하에서 내식성이 우수한 것으로 보고되고 있으므로 [12] 약 80 ppm 염소 이온을 함유한 냉각수 환경에서 type 304의 부식의 원인이 염소 이온에 의한 부식이 될 수는 없을 것으로 판단된다. 또한 비록 예민화가 강 중 크롬 이온의 농도를 감소시켜 내식성을 저하시키지만 강 중 농도를 10 ~ 16% Cr 정도 만큼 감소시키지 않는다면 [13] 예민화도 누수의 직접적인 원인은 아닐 것으로 판단된다. 또한 Table 1에 표시된 pH와 전도도 변화 정도는 스테인리스강의 내식성 변화에 거의 영향을 미치지 않는다.

Table 2는 배관에서 채취한 슬러지(sludge) 및 냉각수에서 채취된 박테리아를 배양시킨 후 얻어진 박테리아의 종류와 그 농도를 나타낸 표이다. 호기성 박테리아인 low nutrient bacteria (LNB), iron-related bacteria (IRB) 이 냉각수 와 슬러지 모두에서 관찰되었지만 acid-producing bacteria (APB)는 미량이지만 슬러지에서만 관찰

되었다. LNB는 호기성 박테리아로 수돗물과 같은 저영양 환경에 적응하여 증식하면서 biofilm을 형성하는 박테리아로 알려져 있으며, 이로 인하여 혐기성 박테리아의 생식환경을 조성하고 틈부식 등을 유발할 수 있다 [11]. IRB는 철의 산화를 촉진시키는 박테리아로 용해도가 높은  $Fe^{2+}$ 를 용해도가 작은  $Fe^{3+}$ 로 산화시켜서 부식반응을 촉진하는 것으로 알려져 있다 [12]. 이외에, APB는 유황을 이용하여 황산을 생성하여 부식을 촉진시키는 것으로 알려져 있다 [13]. 반면, 반면 호기성 박테리아인 anaerobic bacteria (ANA)와 sulfate-reducing bacteria (SRB)는 두 곳 모두에서 관찰되지 않았다.

이들 박테리아 중 금속의 내식성을 저하시키는 것으로 알려진 SRB의 미관찰은 본 누수가 미생물부식의 영향을

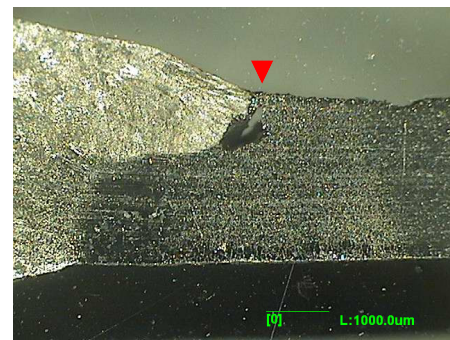


Fig. 9 OM images showing a typical defect formed during butt welding in No 1 weldment.

Table 1 Summaries on pH, electrical conductivity, and ion concentrations in cooling water

	Used water	Fresh water
pH	7.66	6.83
Conductivity ( $\mu$ S/cm)	534	158
$Cl^-$ (ppm)	77.5	16.3
$SO_4^{2-}$ (ppm)	43.4	11.1
$NO_3^-$ (ppm)	5.6	1.1

Table 2 Types of bacteria and their concentrations measured in sludge and cooling water

Type of Bacteria	Number of Bacteria	
	Sludge	Cooling water
Low Nutrient Bacteria (LNB)	$\geq 1,000,000$	$\geq 100,000$
Iron-related Bacteria (IRB)	$\geq 1,000,000$	$\geq 100,000$
Acid-producing Bacteria (APB)	10 ~ 100	Negative
Anaerobic Bacteria (ANA)	Negative	Negative
Sulfate-reducing Bacteria (SRB)	Negative	Negative

받지 않았다고 생각할 수도 있으나 배관에서 절단 후 하루 정도 방치한 상태라 T자 시편을 인수할 시기에 sludge나 금속 표면이 건조된 상태로 유지되고 이로 인해 산소의 접근이 용이해짐에 따라 혐기성에서 호기성으로 환경의 변화하여 혐기성 박테리아의 활동도가 낮아진 것으로 생각될 수 있다. 이는 SRB 뿐만 아니라 혐기성 박테리아도 음성이었다는 결과와 잘 일치한다. 부가적으로 황을 sulfate로 산화시키는 APB가 슬러지에서만 관찰된 사실과 부식생성물의 내부에서 황의 관찰(Fig. 8)을 고려할 때 SRB에 의한 미생물 부식도 누수에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

지역난방 시스템에서 사용된 type 304 강의 누수는 용접부의 예민화와 부적절한 용접으로 인해 형성된 틈(Fig. 9)으로 인해 발생한 화학적 부식으로 판단될 수 있지만 아래의 사실로부터 앞의 두 원인 이외에 부적, 표면 조도의 증가에 의한 미생물 부착의 용이성 그리고 냉각수 관리 미흡으로 인하여 발생한 미생물유도 부식으로 결론지었다:

- 1) 맞대기 용접부 인근 6시 방향에서 부식이 내부에서 외부로 진행
- 2) 예민화에도 불구하고 부적절한 용접에 의해 거칠어진 표면(No. 2 강관)에서 선택적 부식의 발생
- 3) 예민화된 틈에서 부식이 발생하기 어려운 정도의 낮은 80 ppm의 염소 농도
- 4) 부식 생성물 내부에서 황 그리고 호기성 박테리아와 APB의 관찰

#### 감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2017010000190)

#### References

1. B. Skagestad and P. Mildenstein, *District Heating and*

*Cooling Connection Handbook*, IEA District Heating and Cooling (1999).

2. M. Hong, H. Chae, W. C. Kim, J. G. Kim, H. Kim, and S. Y. Lee, *Met. Mater. Int.*, **25**, 1191 (2019).  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00267-6>

3. Y. Kim, H. Chae, M. Hong, M. J. Song, J. Cho, W. C. Kim, T. B. Ha, and S. Y. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **18**, 55 (2019).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.2.55>

4. K. Eliseev, *District Heating System in Finland and Russia*, Mikkeli University of Applied Sciences (2011).  
<https://www.theseus.fi/handle/10024/25777>

5. M. Hong, J. Cho, M. J. Song, W. C. Kim, T. B. Ha, and S. Y. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 287 (2018).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.6.287>

6. N. R. Taylor and K. L. Stierhoff, *District Heating Handbook, 4th ed.*, International District Heating Association, Washington D. C. (1983).

7. C. K. Lee and J. W. Park, *J. Weld. Join.*, **31**, 49 (2013).  
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.2.49>

8. E. J. Oh, J. H. Lee, S. W. Cho, W. G. Yi, and K. W. Nam, *J. Weld. Join.*, **37**, 6 (2019).  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.4.6>

9. Duncan Munro et al., *Operational Guidelines and Code of Practice (OGCP) for Stainless Steel Products in Drinking Water Supply*, in *OGCP for Stainless Steel Products - DWI Application 56.4.477*, The Steel Construction Institute (SCI), Ascot, UK (2002).

10. C. P. Dillon, *Corrosion resistance of stainless steels*, Marcel Dekker, Inc., 96 (1995).

11. D. H. Pope and J. L. Lovell, *Fundamentals of MIC in Water-Based Fire Protection Sprinkler Systems*, *Fire Protection Contractor magazine*, 18, January (2014).

12. D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed.*, Prentice-Hall, Inc., 377 (1996).

13. M. G. Fontana, *Corrosion Engineering, 3rd ed.*, McGraw-Hill, Inc., 394 (1986).