

## 지역난방 열수송관 국부 부식 파손 분석

김 유 섭<sup>1</sup> · 채 호 병<sup>1</sup> · 김 우 철<sup>2</sup> · 정 준 철<sup>2</sup> · 김 희 산<sup>3</sup> · 김 정 구<sup>4</sup> · 이 수 열<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 신소재공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99

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

<sup>3</sup>홍익대학교 재료공학과, 세종시 조치원읍 세종로 2639

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

(2020년 4월 8일 접수, 2020년 5월 18일 수정, 2020년 5월 19일 채택)

## Failure Analysis on Localized Corrosion of Heat Transport Pipe in District Heating System

You Sub Kim<sup>1</sup>, Hobyung Chae<sup>1</sup>, Woo Cheol Kim<sup>2</sup>, Joon Cheol Jeong<sup>2</sup>, Heesan Kim<sup>3</sup>, Jung-Gu Kim<sup>4</sup>,  
and Soo Yeol Lee<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

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

<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Republic of Korea

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

(Received April 08, 2020; Revised May 18, 2020; Accepted May 19, 2020)

In this study, a corrosion failure analysis of a heat transport pipe was conducted, as the result of a pinhole leak. Interestingly, the corrosion damage occurred externally in the pipeline, resulting in severe thickness reduction near the seam line. Also, while a stable magnetite protective film formed on the inner surface, the manganese oxide formation occurred only on the outer surface. The interior and exterior of the pipe were composed of ferrite and pearlite. The large manganese sulfide and alumina inclusions were found near the seam line. In addition, the manganese sulfide inclusions resulted in grooving corrosion, which progressed in the seam line leading to the reduction in the thickness, followed by the exposure of the alumina in the matrix to the outer surface. To note, the corrosion was accelerated by pits generated from the boundaries separating the inclusions from the matrix, which resulted in pinhole leaks and water loss.

**Keywords:** District heating, Heat transport pipe, Localized corrosion, Inclusion

### 1. 서론

최근, 전세계적으로 미세먼지 및 지구온난화로 인해 친환경적이고 경제적인 에너지 생산 시설의 중요성이 강조되고 있다. 지역 난방 시스템(District heating system)은 차세대 친환경 에너지 생산시설 중 하나로, 생산한 열을 활용하여 전기 및 온수를 에너지 수요가 많은 대규모 지역의 사용자들에게 일괄 공급하는 시스템이다 [1-10]. 국내의 지역

난방 시스템의 손상 사례에 대한 기존 연구 내용들을 살펴보면, 배열 회수 보일러 및 침두 부하 보일러 튜브의 순환수에 따른 부식 특성 연구가 진행되었으며, 그 결과 지역 난방수가 순수한 증류수에 비해 부식 전위 및 피팅 전위를 낮춘다고 보고되었다 [1]. 침두부하 보일러 대류부의 부식 파손 분석에 대한 연구 결과의 경우에는, 보일러수에 포함된 Na 및 Cl의 영향으로 인해 강한 산성 물질이 형성되었으며, 이 슬점 부식으로 인해 파손이 발생했다고 보고되었다 [2]. 배열 회수 보일러의 유동 가속 부식 원인 고찰에 대한 연구 결과, 유입되는 가스와 직접 접촉하는 방향의 튜브에서 가장 많은 두께 감육이 발생했으며, 전형적인 유동 가속 부식 패턴을 보여주었다 [3]. 해외의 보일러 손상 사례의 경우,

<sup>†</sup>Corresponding author: sylee2012@cnu.ac.kr

김유섭: 석·박사통합과정, 채호병: 석·박사통합과정, 김우철: 책임연구원, 정준철: 부처장, 김희산: 교수, 김정구: 교수, 이수열: 교수

구리 용해로 사용되는 폐열보일러관의 파손 원인 분석에 대한 연구가 진행되었으며, 그 결과 공기 누출 및 순환 온도에 의한 황산 이슬점 부식이 발생하여 파손되었다고 보고되었다 [4].

본 파손 분석 연구에서 기술된 열수송관은 열원 시설에서 만들어진 온수를 아파트와 같은 대단위 시설에 공급하기 위해 사용되는 수송용 배관이다. Fig. 1는 임시 보수 및 회수 절차의 이해를 돕기 위한 그림으로, 초기 열수송관 모식도 (Fig. 1a), 임시보수 이후의 열수송관 모식도 (Fig. 1b) 및 파손 분석을 위한 클램프 구조물 분해 절차이다(Fig. 1c). 열수송관은 강관(Steel, 내부), 폴리우레탄(Polyurethane, PU, 중간) 보온재 및 고밀도 폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE, 외부) 순서로 내부에서부터 외부까지 구성되어 있다. 강관은 KS규격에 명시된 압력 배관용 탄소강을 [11] 사용하며, 운전 수명은 최소 30년 이상이다. 열수송관은 1.5 m 깊이의 토양 내부에 매설되어 17년 동안 75 ~ 120 °C의 온도 범위 및 16 kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 운전 압력에서 사용되었다. 열수송관 직관부에 핀홀(Pin-hole)이 발생하여 누수가 발생하였고, 매설 지역 주변 온도가 상승해 스티

현상이 발생하여 임시 보수를 진행하였다. 누수를 막기 위하여 생성된 핀홀 위치에 HDPE를 덧대고 금속 클램프를 활용하여 강관과 밀착시켜 누수를 물리적으로 억제하였다. 그 뒤 보온을 위해 PU 보온재를 도포하고, 외부를 HDPE로 다시 감싸는 것으로 임시 보수하였고, 동절기 동안 사용 후 교체 및 회수하였다. 열수송관은 항상 고온수에 노출되어 부식되므로, 노후화 및 부식에 따른 파손이 주로 발생하며 [12], 파손이 될 경우 열 효율 감소 및 운영 중단으로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 동절기 난방 공급 중단으로 인한 불편함과 인명피해까지 발생할 수 있다. 따라서 해당 소재의 파손 원인 규명 및 대책 방안 마련에 대한 연구는 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 강관이 나타내고 있는 부식 특성을 기반으로, 고온수 공급용 열수송관에 발생한 부식 파손 현상을 분석하고 원인을 고찰하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 분석 계획 수립

본 연구에서 사용된 파손된 강관은 지역난방용 열수송관 (지름: 140 mm, 설계 기준 두께: 5.1 mm)으로, 전기저항 용접(Electric resistance welding, ERW)된 압력 배관용 탄소강이며, KS 규격에 명시된 해당 압력 배관용 탄소강의 화학적 조성 및 파손된 강관의 화학적 조성 분석 결과를 Table 1에 표기해 놓았다. EDS 분석결과 탄소 및 망간이 KS 규격보다 많이 함유되어 있었다. 누수된 강관은 외관에 대한 검사를 육안으로 마친 후, 표면 관찰, 미세조직 분석, 부식 생성물 정의, 내부 개재물 정의 및 감육 정도 분석을 위해 Fig. 2의 ①시편 위치의 핀홀이 발생한 부분을 기준으로 손상부(Damaged part)와 HDPE 및 클램프의 영향을 벗어나는 비손상부(Undamaged part)로 분류되었다. 강관은 핀홀 분석을 위해 핀홀 시편(①), 핀홀 파손부의 내부 미세조직 및 개재물 분석을 위한 단면 시편(①-a, ①-b), 비심라인에 위치한 모재의 내부 미세조직 및 개재물 분석을 위한 단면 시편(⑩), 표면(내외면)의 부식 생성물 분석을 위한 손상부 심라인 시편(②, ③), 손상부 열영향부 시편(④, ⑤), 비손상부 심라인 시편(⑥, ⑦), 비손상부 열영향부 시편(⑧, ⑨), 손상부 비심라인 시편(⑪, ⑫), 비손상부 비심라인 시편(⑬, ⑭), 두께 측정을 위한 손상부 링 시편(⑮) 및 비손상부 링 시편(⑯)으로 가공되었다.

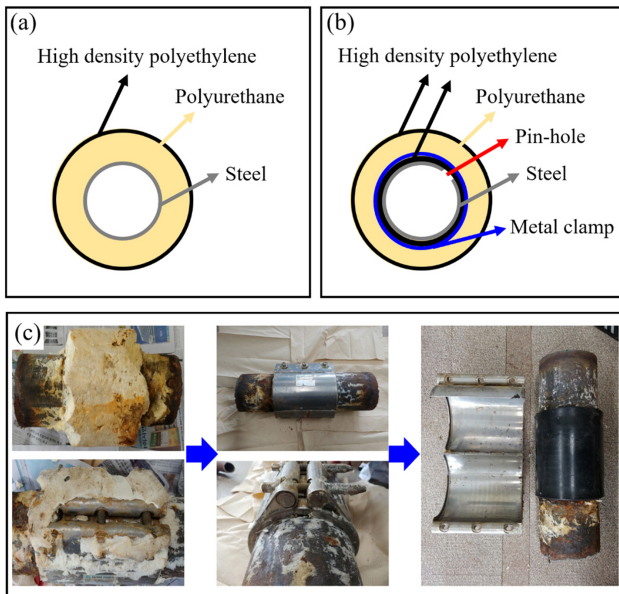


Fig. 1 Schematic of (a) heat transport pipe line, (b) after temporary maintenance and (c) disassembly procedure of polyurethane, clamp and high density polyethylene.

Table 1 Nominal chemical composition for KSD 3562 and failed steel [11]

| Element (wt%) | Fe   | C    | Si   | Mn      | P    | S    |
|---------------|------|------|------|---------|------|------|
| KSD 3562      | Bal. | 0.3  | 0.35 | 0.3 ~ 1 | 0.04 | 0.04 |
| Failed steel  | Bal. | 3.27 | 0.08 | 1.66    | 0.01 | 0.03 |

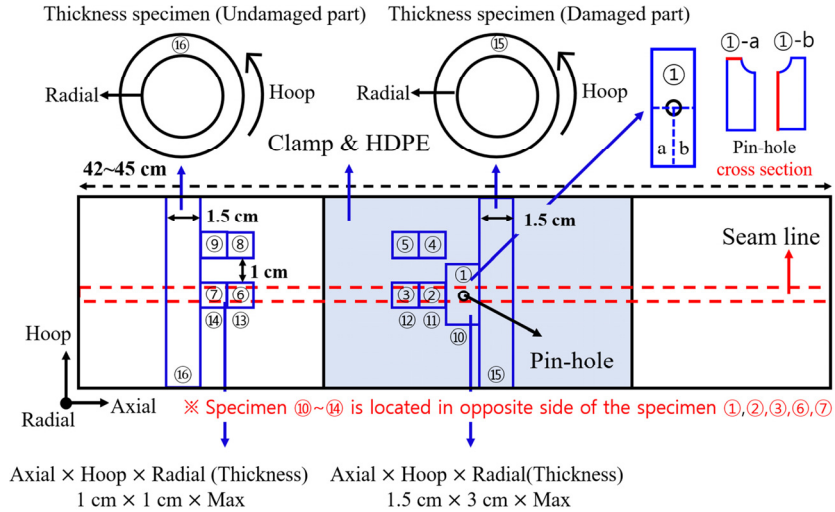


Fig. 2 Measurement positions and sample dimension for failure analysis on corroded heat-transport pipe.

2.2 미세조직, 부식 생성물 및 내부 개재물 분석법

부식이 발생한 강관 내외부 표면의 부식 생성물 종류를 정의하고, 구조 분석을 위해 X선 회절법(X-ray diffraction, XRD, AXS/D8 discover)과 에너지 분산형 분광 분석법(Energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS, EDAX)을 사용하였다. 핀홀부 단면 및 강관 단면의 미세조직과 내부 개재물 분석을 위해서 광학 현미경(Optical microscopy, OM, Olympus/BX51M)과 주사 전자 현미경(Scanning electron microscopy, SEM, TESCAN/LYRA3 XMU)을 활용하였으며, 내부 개재물의 종류를 정의하기 위해 EDS를 사용하였다. 미세조직 분석을 위해 사포(SiC, #2000) 및 다이아몬드 서스펜션(Diamond suspension, 1 ~ 6)을 활용하여 폴리싱(Polishing)한 뒤, 5% 나이탈(Nital) 용액으로 에칭(Etching) 하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 외관 검사 및 감육도 측정

Fig. 3는 핀홀이 발생한 열수송관의 외관 및 핀홀을 보여 준다. 외면(Fig. 3a)과 핀홀 주변의 내면(Fig. 3b)을 비교 하였을 때, 외면의 부식이 매우 심하게 발생했으며 내면은 균일한 보호 피막이 잘 형성되어 있는 것을 확인하였다. 누수의 직접적인 원인이 된 핀 홀은 1개로 용접부인 심라인에 위치하고 있었으며(Fig. 3b), 지름은 약 1.8 mm 정도의 크기를 가졌다(Fig. 3c). 그 외 누수의 원인이 될만한 심각한 파손은 발견되지 않았다.

핀홀이 발생한 위치를 중심으로 부식이 강관의 두께 방향에 대해 미치는 영향을 살펴보기 위해, 실제 매설된 강관이 지표면을 향하는 방향을 시계 방향 12시로 두고 손상부 및

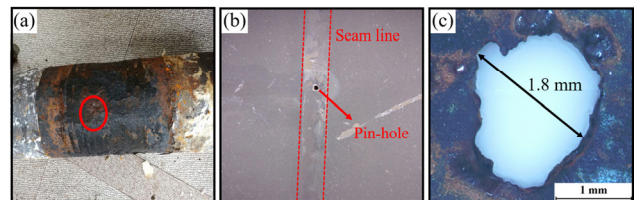


Fig. 3 (a) Corroded heat-transport pipe (Red circle: pin-hole position), (b) inner surface of the pipe with a pin hole in the seam line, (c) a pin hole with a diameter of 1.8 mm (outside view).

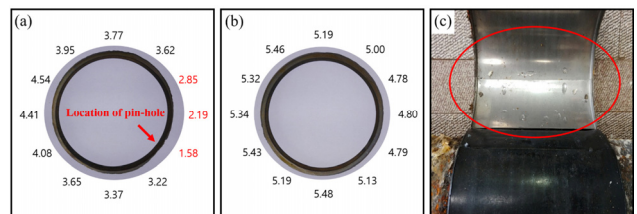


Fig. 4 Thickness measurements for (a) damaged part (specimen 15 shown in Fig. 1), (b) undamaged part (specimen 16 shown in Fig. 1), and (c) water existed between metal clamp and HDPE pad (unit: mm).

비손상부의 두께를 원주방향에 따라 측정하였다(Fig. 4). 손상부의 경우, 누수 및 핀홀이 발생한 지점(4시 방향, 심라인)의 주변 두께는 정상 두께의 약 31% 수준인 1.58 mm를 보였으며, 비손상부의 경우에도 1-4시 방향의 두께가 정상 두께보다는 낮은 수준을 보였다. 손상부 및 비손상부에서 모두 확인 가능했던 심라인 주변에서의 감육 정도가 크게 측정된 것은 전기저항용접된 강관의 용접부에서 종종 발생한다고 보고되는 황화망간 개재물의 생성에 의한 국부

적 부식(Grooving corrosion)을 먼저 고려해 볼 수 있다 [13,14].

명확한 결과를 얻기 위하여 손상부 및 비손상부의 원주방향에 따른 내/외경을 측정된 결과 손상부와 비손상부의 내경은 평균  $129 \pm 0.25$  mm로 유사했지만, 손상부의 외경은 평균  $136 \pm 0.53$  mm, 비손상부의 외경은 평균  $139 \pm 0.15$  mm로 차이가 있음을 알 수 있었다. 강관의 표면 관찰로부터 알게 된 외면의 심각한 부식 정도와 내면의 건전한 표면, 내경은 차이가 없지만 외경은 차이가 있는 것을 통해, 외부에서부터 부식이 진행되어 두께 감육이 일어난 것을 알 수 있었다.

지역난방공사에서 제공한 손상부 진단 보고서에 따르면, 초기 누수가 발견되어 임시 보수를 진행할 당시, 표면의 HDPE는 변형되었으며, 강관과 HDPE 사이의 PU 보온재는 가수분해 된 채로 발견되었다. 강관과 보온재를 보호하는 HDPE의 변형이 발생함에 따라, 외부로부터 수분 및 오염물이 내부로 유입되었을 가능성이 크고, 이로 인해 보온재가 가수분해 되었다고 생각된다. 이러한 환경조건에서는, 강관 외면이 내면보다 열악한 부식 환경에 노출되기 때문에, 외부에서부터 부식이 진행되어 편흔이 발생했을 것으로 추정된다. 또한, 임시 보수기간인 동절기 운영 중에도 편흔을 통해

물이 소량씩 지속적으로 누수 되어, HDPE를 뚫은 구조물 사이로 물이 흘러 들어오면서 강관의 부식이 가속화되었기 때문에 비손상부(Fig. 4b)보다 손상부(Fig. 4a)에서 두께 감소가 심각하게 발생하였다. 이는 누수된 강관을 회수한 시점으로부터 수개월이 지난 이후에도 HDPE 및 클램프 구조물 사이에 존재한 수분이 결과를 뒷받침한다 (Fig. 4c).

### 3.2 부식 생성물 분석

Fig. 5는 손상부 및 비손상부의 외면 및 내면에 대한 XRD 분석결과이며, 내외면의 EDS 분석 결과를 Table 2에 정리하였다. 손상부 및 비손상부의 심라인, 열영향부 및 비심라인 위치(specimen ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭)의 모든 XRD 결과는 유사하였기에, 심라인(specimen ②, ③, ⑥, ⑦) XRD 그래프를 대표로 제시하였다.

손상부 및 비손상부의 심라인, 열영향부 및 비심라인 위치의 내면(Fig. 5a, 5b)에서는 공통적으로 부식을 억제하는 보호성 피막인 마그네타이트(Magnetite) 부식생성물로 이루어져 있는 것을 확인할 수 있으며, 높은 회절 강도로 보아 외면에 비해 치밀한 막을 형성하고 있는 것으로 보인다. 반면 내면보다 부식에 취약한 환경에 놓인 외면(Fig. 5c, 5d)의 경우, 마그네타이트뿐만 아니라 망간산화철이 함께 형성

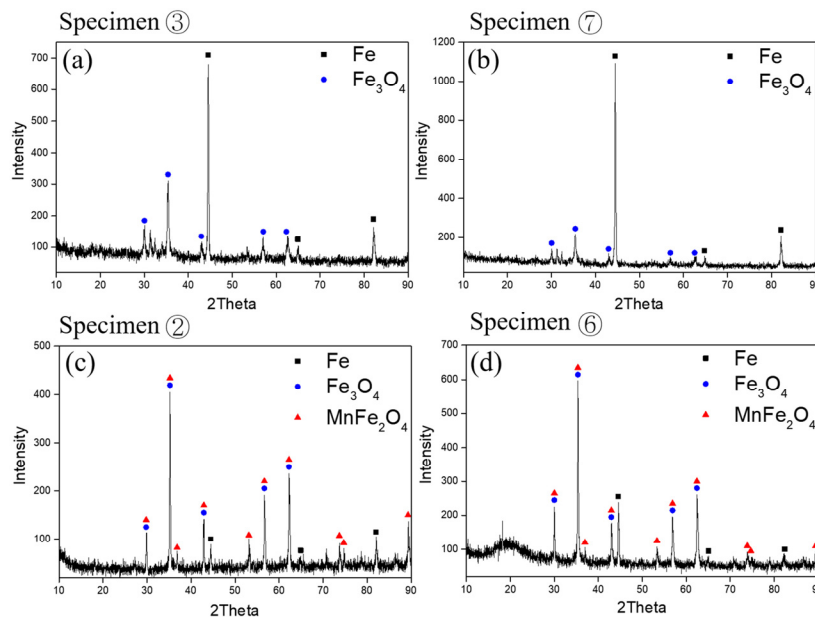


Fig. 5 X-ray diffraction patterns on (a, b) inner surface and (c, d) outer surface in the damaged and undamaged part.

Table 2 EDS measurement results (in wt%)

| Element (wt%) | Fe    | O     | Si   | Mn   | P    | S    |
|---------------|-------|-------|------|------|------|------|
| Inner         | 64.14 | 26.61 | 0.17 | 0.60 | 5.73 | 0.09 |
| Outer         | 71.15 | 25.82 | 0.27 | 0.62 | 1.65 | ▪    |



되어 있었다. 용접부에 망간이 존재하는 경우 치밀한 마그네사이트 형성을 방해하여 부식을 가속화시킨다고 알려져 있다 [15–17]. 따라서 망간산화철이 외면에만 형성되었다는 사실을 기반으로, 열악한 환경에 노출된 외면에서부터 부식이 진행되었음을 알 수 있다. 또한, 표면 관찰을 통해 발견한 심라인 근처에서의 부식 가속화 현상은 망간의 영향으로 인한 국부적인 부식 때문임을 알 수 있다.

### 3.3 미세조직 및 개재물 분석

Fig. 6은 손상부의 위치별 단면에 대한 미세조직 사진이다. 결정립크기는 심라인 2.15  $\mu\text{m}$  열영향부 2.19  $\mu\text{m}$ , 비심라인 2.1  $\mu\text{m}$ 로 모든 위치에서 결정립 크기 차이가 크

지 않고, Image J 소프트웨어를 이용한 모재 대비 펄라이트의 비율도 심라인 10%, 정상부 10.2%로 비슷하여, 미세조직은 큰 차이가 없었다. 이를 통해, 강관에 누수를 발생시킨 원인은 미세 조직적 차이로 인해 나타난 부식이 아닌 것을 확인하였다.

Fig. 7은 손상부 단면에서 발견한 두 종류의 개재물에 대한 SEM 사진이며, 원으로 표시한 위치의(Spot 1~5) EDS 화학적 조성 분석 결과를 Table 3에 정리하였다. Fig. 7a의 Spot 1은 철(Fe)의 함량이 높게 나타나는 모재로 개재물과의 화학적 조성 비교를 위해 제시하였다. Spot 2는 라멜라 구조로 이뤄진 점과 상대적으로 높은 탄소(C) 함량을 보이면서 전형적인 펄라이트 조직임을 알 수 있다 [18–20].

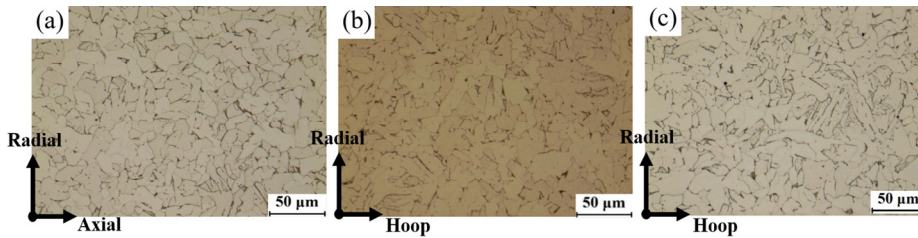


Fig. 6 Microstructures composed of ferrite and perlite in (a) seam line (specimen ①-a shown in Fig. 1), (b) heat affected zone (specimen ①-b shown in Fig. 1), and (c) non seam line (specimen ⑩ shown in Fig. 2).

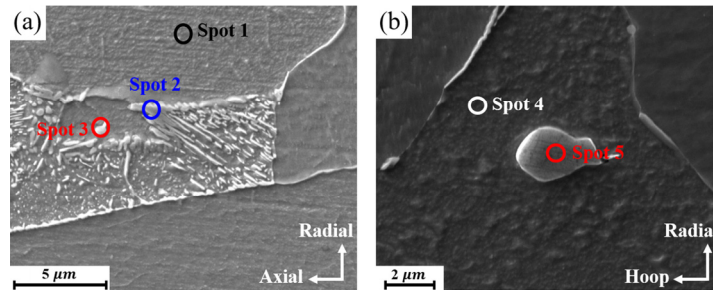


Fig. 7 Microstructures with inclusions in the cross section of damaged part (a) specimen ①-a shown in Fig. 2 and (b) specimen ⑩ shown in Fig. 2.

Table 3 EDS measurement results for the spots shown in Fig. 7 (in wt%)

| Position | Spot 1 | Spot 2 | Spot 3 | Spot 4 | Spot 5 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fe       | 84.39  | 79.58  | 42.69  | 89.01  | 0.18   |
| C        | 4.97   | 11.34  | 3.78   | 3.52   | 4.36   |
| O        | 2.96   | 2.59   | 2.70   | 2.95   | 41.24  |
| Al       | ▪      | ▪      | ▪      | ▪      | 52.40  |
| Si       | 0.66   | 0.64   | 0.53   | 0.06   | 0.08   |
| P        | 3.24   | 3.13   | 2.70   | 0.61   | 0.03   |
| S        | 0.41   | 0.39   | 13.60  | 0.67   | 0.30   |
| Mn       | 3.39   | 2.34   | 34.02  | 2.57   | 1.41   |

반면, Spot 3에서 페라이트와 펄라이트와는 이질적인 개재물이 발견되었고, 망간(Mn)과 황(S)의 함량이 매우 높은 것을 통해 황화망간(MnS) 개재물인 것을 알 수 있었다. Fig. 7b의 Spot 4는 모재인 반면, Spot 5의 개재물은 높은 알루미늄(Al)과 산소(O) 함량을 보였고, 이는 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 개재물인 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 손상부의 비심라인 및 심라인 시편 단면의 황화망간 사이즈 및 분포에 대한 SEM 사진이다. 빨간색 동그라미로 표시한 부분이 황화망간 개재물이며, 모두 EDS 분석을 통해 정의하고, 각각의 화학적 조성 결과를 Table 4에 정리했다. 심라인 및 비심라인 모두 황화망간이 발견되었지만, 비심라인(Fig. 8a-c)은 0.5 미만의 작은 개재물이 분포해 있는 반면, 심라인(Fig. 8d-f)은 0.5 이상의 큰 개재물이 존재하는 것을 확인하였다.

강 내의 황화망간 개재물의 경우 Equation (1)과 같은 메커니즘으로 생성된다고 잘 알려져 있으며, 강 내부에 황화망간이 존재하게 되면 국부적으로 증가하는 황의 양 때문에 부식을 가속화시키는 역할을 한다 [13,14]. Table 1에

명시된 화학성분을 참고하면 해당 강관은 망간 0.3 ~ 1 wt% 및 황 0.04 wt% 이하가 첨가되도록 KS 규격에 설계되어 있다. 하지만 모재의 EDS분석 결과 함유되어 있는 망간의 양이 KS규격의 설계 기준보다 높은 것을 알 수 있으며, 특히 전기저항용접 및 열처리와 같은 생산 공정 중에 황화망간 개재물이 내부에 형성된 것으로 보인다 [21,22]. 따라서, 내부에서 발견된 황화망간 개재물의 부식에 대한 영향으로 인해 심라인 부근의 두께 감소가 심하게 발생한 것으로 생각된다(Fig. 4a-b).



Fig. 9는 손상부 비심라인 및 심라인의 단면에서 발견한 알루미늄 개재물에 대한 SEM 사진이다. 표시된 위치의 개재물은 EDS 분석을 통해 각각의 화학적 조성을 모두 확인하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 분석결과 위치에 관계없이 알루미늄 개재물을 모두 발견할 수 있었지만, 비심라인(Fig. 9a-b)에서 알루미늄 개재물은 약 2 μm 정

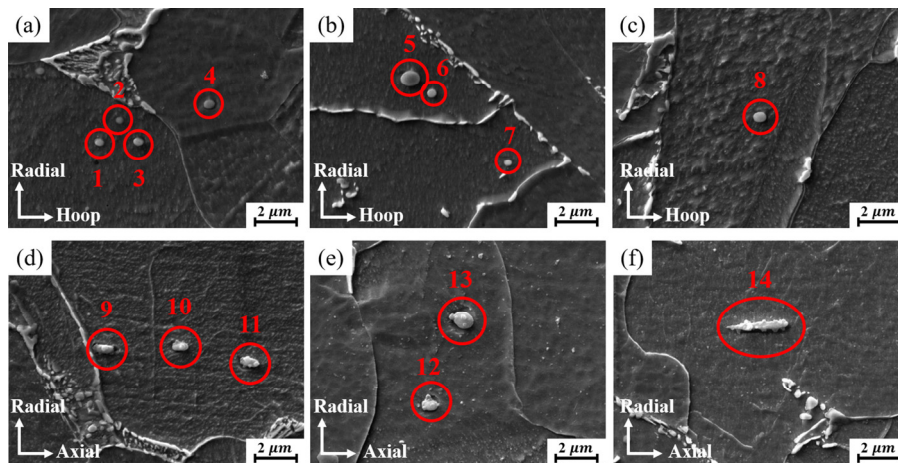


Fig. 8 MnS inclusions found in the damaged part shown in Fig. 1: (a-c) specimen ⑩ and (d-f) specimen ①-a.

Table 4 EDS measurement results for the MnS inclusions shown in Fig. 8 (in wt%)

| Spot | Fig. 8a-8c (specimen ⑩) |       |       |       |       |       |       |       | Fig. 8d-8f (specimen ①-a) |       |       |       |       |       |
|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9                         | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| Fe   | 32.47                   | 75.71 | 26.09 | 21.83 | ·     | 32.05 | 50.99 | 20.02 | 14.78                     | 19.96 | 27.70 | ·     | ·     | 32.49 |
| C    | 10.97                   | 5.51  | 11.40 | 9.74  | 11.13 | 8.36  | 10.18 | 10.20 | 14.06                     | 12.25 | 12.03 | 12.48 | 12.81 | 11.50 |
| O    | 3.38                    | 4.08  | 3.20  | 3.02  | 0.72  | 2.88  | 3.41  | 2.00  | 5.53                      | 3.54  | 5.38  | 2.51  | 5.08  | 5.02  |
| Si   | 0.33                    | 0.87  | 0.35  | 0.75  | 0.31  | 0.33  | 0.65  | 0.09  | 0.72                      | 0.42  | 0.65  | 0.36  | 0.22  | 1.26  |
| P    | 0.41                    | 0.57  | 0.12  | 0.42  | 0.16  | 0.22  | 0.46  | 0.07  | 5.23                      | 4.98  | 6.61  | 5.33  | 4.18  | 5.83  |
| S    | 17.09                   | 4.63  | 19.20 | 19.50 | 28.69 | 17.17 | 9.96  | 20.26 | 18.75                     | 16.50 | 13.99 | 24.81 | 24.27 | 12.77 |
| Mn   | 35.35                   | 8.63  | 39.64 | 44.75 | 57.28 | 38.98 | 24.35 | 47.36 | 40.93                     | 42.63 | 33.64 | 51.53 | 52.58 | 31.13 |

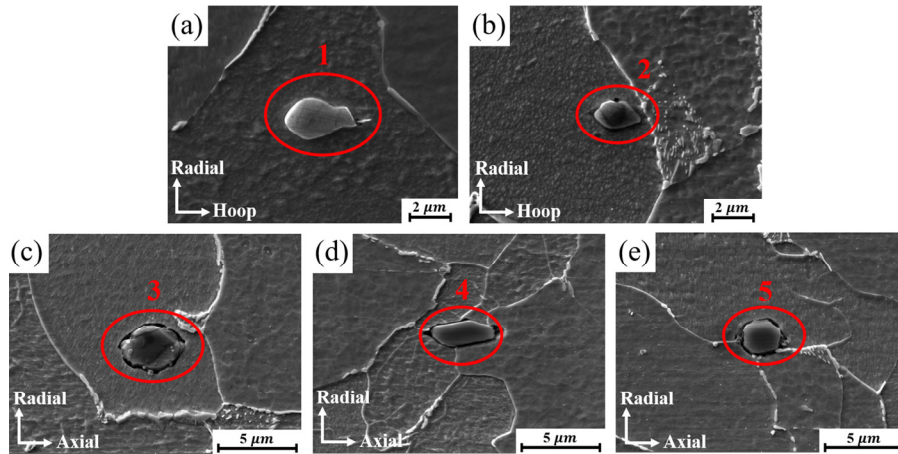


Fig. 9 Microstructures with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions found in the damaged part shown in Fig. 2: (a-b) specimen ⑩, (c-e) specimen ①-a.

Table 5 EDS measurement results for the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions shown in Fig. 9 (in wt%)

| Spot | Fig. 9a-9b (specimen ⑩) |       | Fig. 9c-9e (specimen ①-a) |       |       |
|------|-------------------------|-------|---------------------------|-------|-------|
|      | 1                       | 2     | 3                         | 4     | 5     |
| Fe   | 0.18                    | ▪     | 0.19                      | 0.38  | 0.25  |
| C    | 4.36                    | ▪     | 4.37                      | 2.91  | 3.58  |
| O    | 41.24                   | 44.79 | 34.78                     | 36.06 | 36.33 |
| Al   | 52.40                   | 55.21 | 54.17                     | 49.21 | 53.50 |
| Si   | 0.08                    | ▪     | 0.09                      | 0.02  | 0.08  |
| P    | 0.03                    | ▪     | 3.83                      | 2.92  | 3.56  |
| S    | 0.30                    | ▪     | 0.62                      | 0.34  | 0.27  |
| Mn   | 1.41                    | ▪     | 1.96                      | 1.95  | 2.42  |

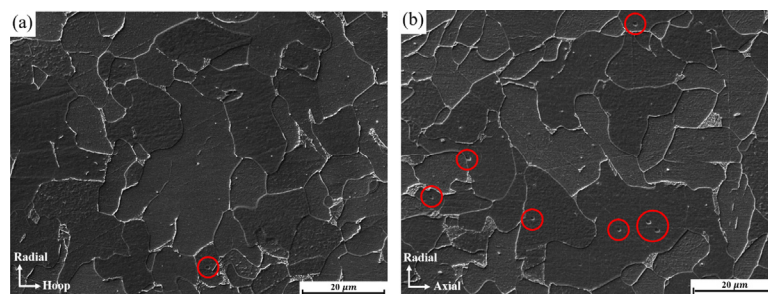


Fig. 10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traces (red circle) eliminated from the matrix in (a) specimen ⑩ and (b) specimen ①-a.n ①-a.

도의 크기를 가지고 있는 반면, 심라인(Fig. 9c-e)에서는 2 μm 이상의 알루미늄들이 분포하고 있었다.

또한 알루미늄이 모재로부터 떨어져 나간 흔적(Fig. 10a-b)을 발견할 수 있는데, 이는 시편 전처리 과정 중 (폴리싱 또는 에칭) 알루미늄이 모재보다 더 단단하기 때문에 연마되지 않고 모재로부터 떨어져 나간 것으로 판단된다. 특히, 비심라인(Fig. 10a)보다 심라인(Fig. 10b)에서 알루

미나가 떨어져 나간 흔적들이 많이 보였으며, 이는 심라인에서 더 많은 알루미늄 개재물이 존재하고 있음을 추측해 볼 수 있다.

손상부의 외면에서부터 내면까지의 단면에 대한 SEM 분석결과(Fig. 8, Fig. 9), 위치에 관계없이 손상부의 비심라인 및 심라인 모두에서 황화망간 및 알루미늄 개재물이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 주로 황화망간(Fig. 8)은 구형인

반면 알루미늄(Fig. 9)은 다각형이었으며, 두 가지 개재물 모두 심라인보다 심라인에서 상대적으로 크기가 큰 것이 확인되었다. 이와 같은 현상의 원인은 전기저항용접 때문으로 보인다. 전기저항용접에 의해 강관의 온도가 1600 °C까지 상승하였다가 수 초 내로 400 °C의 저온으로 빠르게 떨어지면서 용접부 심라인에 고용체(Solid solution) 및 재석출(Re-precipitation) 효과가 발생하게 되고, 이로 인해 내부 개재물의 크기가 커진다 [13].

알루미늄이 강 내부에 존재하면 외부로부터 응력이 가해졌을 때 응력집중현상이 유발되어 기계적 물성에 악영향을 주며, 개재물(알루미늄) 주변에서 미세한 틈이 생성되고, 높은 전위 밀도가 유발됨에 따라 공식(Pitting corrosion) 현상이 활발히 발생한다고 알려져 있다 [23]. 강관 내부에 존재하는 알루미늄은 부식 초기에는 용해되지 않고, 서로 다른 두 상인 알루미늄과 모재의 경계면에서 먼저 부식이 빠르게 진행된다. 결과적으로, 알루미늄과 모재 사이에 미세한 틈이 생기게 되고(Fig. 9a-f), 부식이 계속 진행됨에 따라 틈의 크기는 더욱 커지게 된다. 결국, 알루미늄 개재물은 모재로부터 떨어져 나와 커다란 구멍(Pit)을 만들게 되고(Fig. 10a-b), 이 구멍으로부터 부식이 가속화되면서 핀홀이 발생된 것으로 생각된다 [24,25].

#### 4. 결론

지역 난방 시스템에서 사용된 열수송관에 핀홀 발생으로 인한 누수의 원인을 분석하였다. 강관의 부식은 HDPE의 변형 및 보온재의 가수분해로 인해 외부로부터 부식이 시작되었을 가능성이 높다. 강관의 외부는 심각하게 부식된 상태였으며, 특히 심라인 주변의 두께를 감소시켰다. 내면에는 보호성 피막인 마그네타이트가 상대적으로 치밀하게 형성되어 있는 반면, 외부에는 치밀한 마그네타이트의 형성을 억제하는 부식생성물인 망간산화물이 존재하였다. 강관은 위치에 관계없이 유사한 페라이트 및 펄라이트 조직을 가지고 있었으나, 심라인 부근에서 더 큰 크기의 황화망간 및 알루미늄 개재물이 발견되었다. 황화망간 개재물은 심라인 부근에서 국부 부식을 유발하기 때문에, 심라인 부근에서의 두께 감소가 심하게 일어났으며, 이에 따라 알루미늄이 표면으로 노출되었다. 노출된 알루미늄 개재물과 모재의 경계로부터 발생한 부식은 틈을 만들고, 지속적인 부식에 의해 개재물이 모재로부터 탈락되면서 작은 구멍을 형성한다. 이러한 알루미늄 및 황화망간 개재물의 복합적 작용으로 심라인에 핀홀이 형성되어 누수가 발생한 것으로 보인다. 따라서 강관 제조 시 추가 공정 또는 제조 라인의 엄격한 관리를 통해 알루미늄과 황화망간 같은 개재물의 생성을 억제할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국지역난방공사의 지원을 받아 진행되었습니다.

#### References

1. 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>
2. 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>
3. M. Hong, H. Chae, Y. Kim, M. J. Song, J. M. Cho, W. C. Kim, T. B. Ha, and S. Y. Lee, *Korean J. Mater. Res.*, **29**, 11 (2019). <https://doi.org/10.3740/MRSK.2019.29.1.11>
4. R. Ebara, F. Tanaka, and M. Kawasaki, *Eng. Failur. Analy.*, **33**, 29 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.04.007>
5. 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>
6. Y. S. Chang, S. W. Jung, S. M. Lee, J. B. Choi, and Y. J. Kim, *Appl. Therm. Eng.*, **27**, 2524 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.02.001>
7. H. Lund, B. Moller, B. V. Mathiesen, and A. Dyrelund, *Energy*, **35**, 1381 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.023>
8. P. A. Østergaard and H. Lund, *Appl. Energ.*, **88**, 479 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.018>
9. H. Gadd and S. Werner, *Appl. Energ.*, **106**, 47 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.030>
10. D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, S. Werner, B. Möller, U. Persson, T. Boermans, D. Trier, P. A. Østergaard, and S. Nielsen, *Energ. Policy*, **65**, 475 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.035>
11. KS D 3562, Carbon Steel Pipes for Pressure Service (2019).
12. H. Chae, H. Wang, M. Hong, W. C. Kim, J. G. Kim, H. Kim, and S. Y. Lee, *Met. Mater. Int.*, **26**, 989 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00386-0>
13. C. Kato, Y. Otoguro, S. Kado, and Y. Hisamatsu, *Corros. Sci.*, **18**, 61 (1978).



- [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(78\)80076-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(78)80076-6)
14. S. J. Luo and R. Wang, *Corros. Sci.*, **87**, 517 (2014).  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.044>
  15. B. Kim, S. Kim, and H. Kim, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2018**, 13, Article ID 7638274 (2018).  
<https://doi.org/10.1155/2018/7638274>
  16. R. M. Cornell, *Clay Minerals*, **23**, 329 (1988).  
<https://doi.org/10.1180/claymin.1988.023.3.10>
  17. R. M. Cornell and R. Giovanoli, *Polyhedron*, **7**, 385 (1988).  
[https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)80487-8](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)80487-8)
  18. Z. Bi, R. Wang, and X. Jing, *Corros. Sci.*, **57**, 67 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.033>
  19. P. C. Chung, Y. Ham, S. Kim, J. Lim, and C. Lee, *Mater. Des.*, **34**, 685 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.027>
  20. M. Rahman, S. P. Murugan, C. Ji, Y. J. Cho, J. -Y. Cheon, and Y. -D. Park, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 109 (2018).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.3.109>
  21. Q. Meng, G.S. Frankel, H. O. Colijn, and S. H. Goss, *Nature*, **424**, 389 (2003).  
<https://doi.org/10.1038/424389b>
  22. K. Oikawa, H. Ohtani, K. Ishida, and T. Nishizawa, *ISIJ Int.*, **35**, 402 (1995).  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.402>
  23. C. Liu, R. I. Revilla, D. Zhang, Z. Liu, A. Lutz, F. Zhang, T. Zhao, H. Ma, X. Li, and H. Terryn, *Corros. Sci.*, **138**, 96 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.007>
  24. Q. Liu, S. Yang, M. Zhao, L. Zhu, and J. Li, *Metals*, **7**, 347 (2017).  
<https://doi.org/10.3390/met7090347>
  25. C. Liu, X. Cheng, Z. Dai, R. Liu, Z. Li, L. Cui, M. Chen, and L. Ke, *Materials*, **11**, 2277 (2018).  
<https://doi.org/10.3390/ma11112277>