

## 맨홀에 설치된 지역난방 열공급관 에어벤트의 전단부 파손 원인 규명

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

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

<sup>2</sup>홍익대학교 재료공학과, 세종특별자치시 조치원읍 세종로 2639

<sup>3</sup>성균관대학교 신소재공학부, 경기 수원시 장안구 서부로 2066

<sup>4</sup>한국지역난방공사 미래개발원, 경기 용인시 기흥구 기곡로 92

(2020년 7월 14일 접수, 2020년 7월 29일 수정, 2020년 7월 29일 채택)

## Failure Analysis of Air Vent Connected with Heat Supply Pipeline Under Manhole

Jeongmin Cho<sup>1</sup>, Hobyung Chae<sup>1</sup>, Heesan Kim<sup>2</sup>, Jung-Gu Kim<sup>3</sup>, Woo Cheol Kim<sup>4</sup>,  
Joon Cheol Jeong<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>Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Republic of Korea

<sup>3</sup>School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

<sup>4</sup>R & D Institute, Korea District Heating Corp., Yongin 17099, Republic of Korea

(Received July 14, 2020; Revised July 29, 2020; Accepted July 29, 2020)

The air vent connected to a heat supply pipeline in the district heating system has been used to eliminate the existing air in the pipe, which has a detrimental effect on corrosion durability and heat efficiency. Recently, the air vent installed under a manhole for 22 years was corroded and several pinholes were detected in the front-end of the air vent. To identify the cause of the failure, thickness reduction, corrosion products, and water quality were examined. The corrosion damage was significant at the outside of the front-end of the air vent where the insulator was covered. While a thin oxide layer was formed in the interior of the tube, the coarse and porous corrosion products consisting of magnetite and hematite were found externally. Water flowing into the thermal insulator was absorbed by the insulator following hydrolysis. The hydrolyzed insulator ejected the corrosion factors such as  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{NH}_4^+$ . The findings suggest that the corrosion under insulation due to rain water is the main cause of the underlying failure in the air vent.

**Keywords:** District heating, Air vent, Corrosion, Manhole, Rain water

### 1. 서론

지역 난방 시스템은 에너지 생산 시설 중 하나로서, 에너지 수요가 많은 대규모 사용 시설에 열을 생산하여 공급하는 시스템을 말한다 [1-9]. 지역 난방 시스템은 크게 생산 시설, 수송 시설, 사용 시설로 구성되어 있으며, 생산 시설로부터 얻어진 난방수는 공급관을 통해 사용자에게 전달되고 회수관을 통해 돌아온다. 난방수가 공급관 혹은 회수관을 통과하는 과정에서 공기가 관 내부로 유입되는 경우가 발생

하는데, 이는 난방수의 흐름에 지장을 주며 관 부식의 원인이 된다 [6]. 따라서 관 내부의 공기를 제거하기 위해 공급관 및 회수관에는 일정 길이 마다 에어벤트(Air Vent)가 설치되어 있다.

지역 난방 시스템의 열수송 공급 시설에 설치된 에어벤트는 난방수의 열 손실을 방지하기 위해 보온재로 싸여 지하에 매설되어 있다. 에어벤트는 공급관 내부의 난방수에 항상 노출되어 있고 보온재로 싸여 있는 관계로 부식에 의한 파손 예방에 어려움이 있으며 파손의 발생을 쉽게 발견하기가 어렵다. 생산 또는 사용자 시설에서의 부식 또는 파손 사례는 상대적으로 접근이 유리하기 때문에 시편 확보가 용이하여 이에 대한 체계적인 연구가 가능했던 반면에 [1-5], 수송관 및 부품에 대한 문제로 인한 파손 원인 분석 및 대책

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

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

강구는 최근 들어서야 중요하게 여겨지고 있다. 대부분 열수송관에 대한 연구는 수송관 자체에 집중되어 있기에 [7-9], 전혀 다른 환경에 놓여 있는 맨홀 내 수송관 및 부품에 대한 연구 사례가 많지 않은 실정이며, 특히 에어벤트의 노후화와 파손에 대한 연구는 거의 보고되지 않았다. 도심에 설치된 수송관 및 부품의 파손은 인명 피해를 야기할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 보수하기 위한 경제적 비용과 국가적 시스템에 대한 사회적 비용이 많이 요구되기에 파손 원인에 대한 철저한 분석과 이에 대한 효과적인 대책을 강구하는 것은 매우 중요하다.

최근 맨홀 내 공급관에 설치된 에어벤트가 부식 파손으로 인해 누수가 발생되어 공급관으로부터 철거되었고, 해당 위치는 새로운 에어벤트로 교체된 사례가 있었다. 이에 본 연구에서는 에어벤트가 설치된 맨홀의 환경과 부식에 대한 영향을 고찰하고, 고품 분석을 통해 부식 파손의 원인을 규명함으로써 파손 방지 대책을 제시하고자 한다. 얻어진 결과는 맨홀 환경 내 소재 부품의 부식 파손 사례로서 중요하게 활용될 수 있다.

## 2. 연구방법

본 연구에서 다루는 누수가 발생한 에어벤트는 1997년에 배수가 원활하지 않은 맨홀(Fig. 1a,b)에 설치되었고, 설치 당시 에어벤트에 대한 방식처리에 대한 규정이 없었기 때문에 전단부에는 어떠한 코팅도 되어있지 않았다. 열 수송 공급관에 설치된 에어벤트이기 때문에, 내부는 최고 120 °C의

난방수에 노출되어 있으며 사용된지 약 22년만에 누수가 발생하였다.

누수가 발생한 에어벤트는 크게 연결구(Quick coupling), 90° 엘보우(Elbow), 볼밸브(Ball-valve)로 구성되어 있으며, 볼밸브는 몸체부(Ball-valve body)와 전단부(End Piece Front-end), 후단부(End Piece Back-end)로 이루어져있다(Fig. 1c). 연결구, 엘보우, 후단부는 상대적으로 내부식성이 높은 STS304로, 볼밸브 몸체부와 전단부는 탄소강인 SPPS380으로 제작되었으며, 누수가 발생한 위치는 전단부로 SPPS380의 화학적 조성이 Table 1에 제시되었다.

Fig. 2는 누수가 발생한 에어벤트 전단부를 분석의 편의를 위해 보온재가 제거된 상태에서 축방향을 따라 절반으로 절단한 외면(a)과 내면(b)을 보여주며, 구분을 위해 각각 임의로 샘플A와 B로 명명하였다. 전단부에서 발견된 핀 홀들의 위치는 Fig. 2a에 빨간색 원으로 표시하였으며, Fig. 2b에는 분석을 위한 시편 가공 위치를 나타내었다. Fig. 2a의 빨간 점선은 축방향을 따라 상대적으로 적게 부식이 발생한 구역(Less corroded area)과 많이 발생한 구역(More corroded area)을 구분하는 기준이며, Fig. 2b의 샘플 B에서 빗금으로 채워진 사각형은 원통형의 에어벤트 전단부를 축방향을 따라 반으로 산소 절단하는 과정에서 오염된 부분이다.

모든 시편 가공은 시편의 변형 및 추가적인 산화막 형성 방지를 위해 방전가공(Electric discharge machining)으로 진행되었다. Fig. 2b의 표시된 시편 ①은 부식으로 인한 두께 변화를 측정하기 위해 전단부 하단부터 18.5 cm의

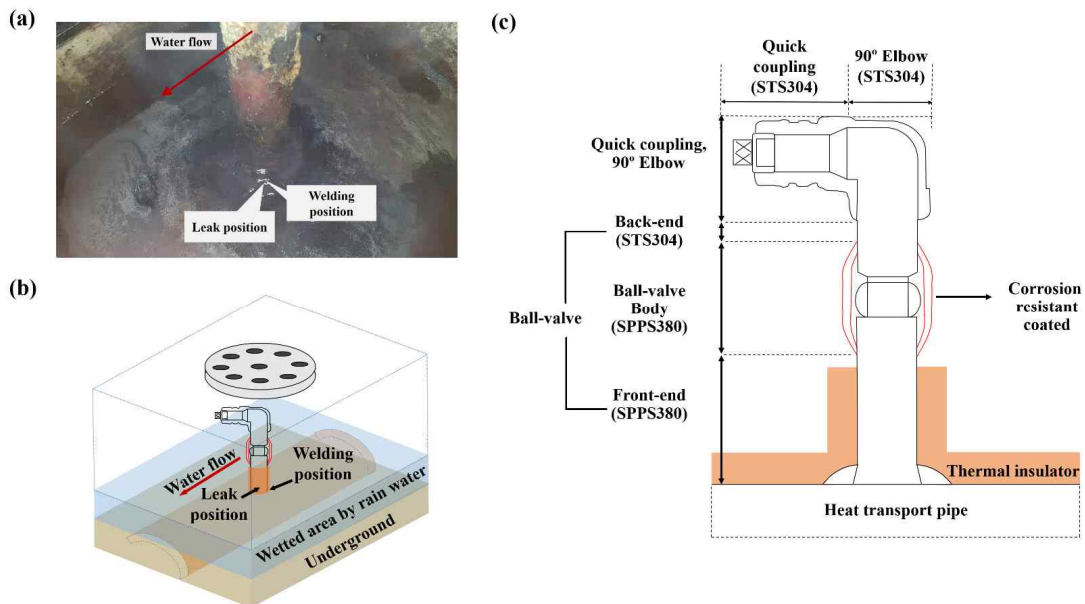
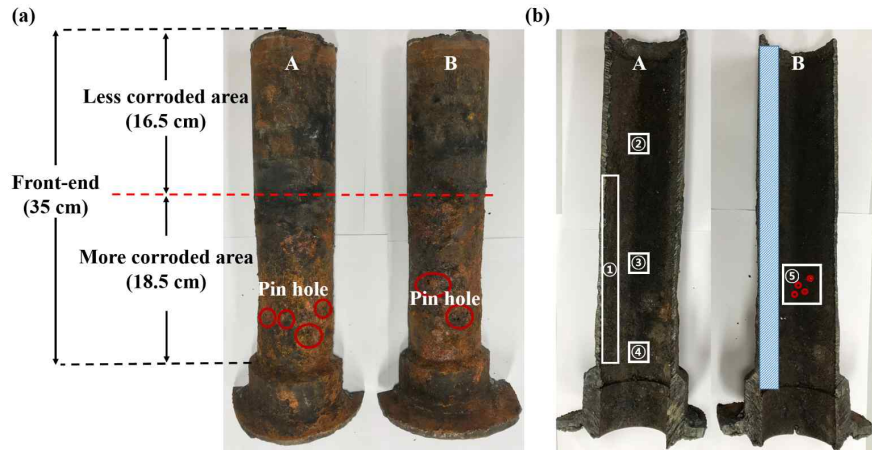


Fig. 1 (a) Picture of a leakage at the front-end under manhole, (b) schematic view of the installation of air vent, (c) structure of the leaked air vent installed in the heat-transport pipe.

**Table 1** Nominal chemical composition of SPPS380 (wt%)

SPPS380 (SPPS250)	C	Si	Mn	P	S
	~ 0.30	~ 0.35	0.30 ~ 1.00	~ 0.040	~ 0.040



**Fig. 2** The corroded front-end samples removed from the air vent, (a) outside view with pinholes, and (b) inside view.

길이를 축방향으로 따라 가공하였다. 시편 ②는 핀 홀 주변의 산화막 두께 및 형상 확인을 위해 핀 홀로부터 1 cm의 여유를 두고 가공되었다. 시편 ③, ④, ⑤는 전단부 내/외면의 산화 거동을 살펴보기 위한 것으로 부식이 적게 발생한 위치와 핀 홀이 발생한 위치 위아래에서 10 mm × 10 mm × t mm의 크기를 갖도록 제작되었다.

전단부의 두께는 광학현미경으로 촬영한 시편 ①의 단면 이미지를 통해 Image J 소프트웨어를 활용하여 2 mm 간격으로 측정하였다. 축방향에 따라 측정된 두께 데이터를 통해 높이에 따른 부식 정도를 파악하고, 감육이 심한 위치와 핀 홀이 형성되어 있는 위치를 비교하였다. 에어벤트 내/외면에 형성된 부식 생성물 분석을 위해서 주사전자현미경 (Scanning electron microscopy, SEM)과 에너지 분산 분광법 (Energy dispersive spectroscopy, EDS), Cu K $\alpha$ 를 사용한 X선 회절 (X-ray diffraction, XRD)을 활용하였다. 에어벤트가 노출되는 내부의 환경 분석을 위해 지역난방수 (District heating water) 수질검사를 하였고 이를 지역난방공사의 지역난방수 관리기준을 참고하여 비교하였으며, 외부의 환경 분석을 위해 전단부를 감싸고 있는 보온재와 맨홀이 만드는 환경 인자를 검토하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 두께 감육 양상

에어벤트 전단부의 아래쪽 (More corroded area)은 외관 상으로 축방향에 따라 오목해지는 형태를 보여 상대적

으로 부식이 많이 발생해 보였을 뿐만 아니라, 가장 오목한 위치에는 핀 홀들이 집중적으로 형성되어 있었다 (Fig. 2a). 축방향에 따른 감육 정도를 정량적으로 파악하기 위해서 부식이 심한 전단부 하단 (More corroded area)부터 축방향 18.5 cm까지를 포함하는 시편 ①의 단면 이미지를 Image J 프로그램을 활용하여 축방향에 따른 두께를 2 mm 간격으로 측정하였다 (Fig. 3a). 부식이 상대적으로 덜 발생한 영역 (Less corroded area)의 평균 두께는 ~ 6 mm인 반면, 시편 ①의 평균 두께는 ~ 3.96 mm, 가장 얇은 위치의 두께는 ~ 2.158 mm로 나타났다. 감육의 양상을 보면 내경은 축방향에 따라 직선의 형태를 보였으나, 외경은 위치에 따라 차이가 많은 것을 확인할 수 있었다. 핀 홀들이 발생한 영역의 두께는 가장 얇게 측정되었다.

시편 ②를 이용하여, 핀 홀들이 발생한 영역의 원주 방향에 따른 두께 감육도를 조사하였다 (Fig. 3b). 축방향 감육 양상과 유사하게 내경은 매끄러운 곡선을 나타낸 것으로 보아 부식의 영향을 비교적 적게 받은 것으로 확인된 반면에, 외경은 부식이 많이 진행된 모습을 보였다. 시편의 단면은 핀 홀을 보이고 있지 않음에도 불구하고, 위치에 따라 50% 수준의 감육이 발생한 곳도 관찰되었다. 빨간색 점선으로 표시된 감육 전의 두께 형태와 비교해볼 때 감육은 명백하게 외부로부터 진행되었음을 알 수 있었으며, 축방향에 따른 감육 양상을 통해서 부식이 전단부 외면에 광범위하게 발생해 있음을 알 수 있었다.

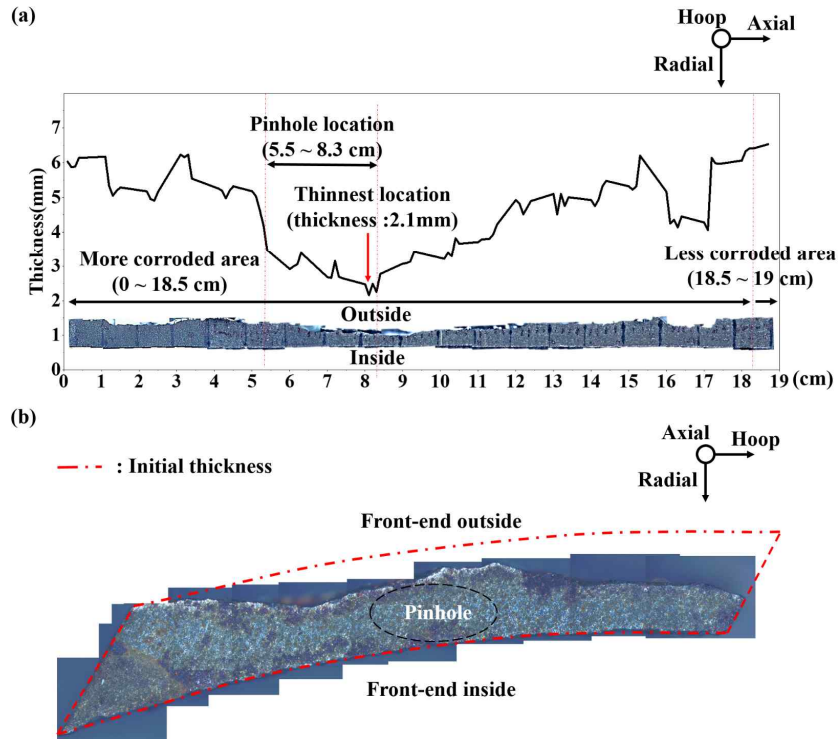


Fig. 3 (a) Thickness measurements along the axial direction in the sample ① shown in Fig. 2b, (b) Cross-section view along the hoop direction in the sample ② shown in Fig. 2b.

### 3.2 부식 양상

에어벤트 전단부의 외관을 살펴보면, 상대적으로 감육이 많이 발생한 전단부 아래쪽 외면(More corroded area)은 대체적으로 적갈색을 띠고 있었으나, 위쪽 외면(less corroded area)은 어두운 색의 산화막으로 덮여 있었다(Fig. 2a). 반면에, 내면의 경우 위치와 관계없이 검은색 부식 생성물이 주로 관찰되었다. 전단부 내/외면의 위치에 따른 부식 생성물 성분을 확인하기 위해 Fig. 2b의 시편 ③, ④, ⑤의 표면에 대한 EDS와 XRD 분석을 진행하였다. 각 시편들의 EDS 분석 결과를 Table 2, XRD 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 정도의 차이는 있었지만 내/외면과 관계없이 형성된 부식 생성물은 대다수의 마그네타이트( $Fe_3O_4$ )

와 일부의 헤마타이트( $Fe_2O_3$ )로 확인되었다. 헤마타이트는 마그네타이트가 다량의 산소와 접촉하게 되면 산화되면서 적갈색을 띠는 헤마타이트로 변한다고 잘 알려져 있다 [10]. EDS 결과를 보면, 내면에서 상대적으로 더 많은 양의 인(P)이 검출되었으며, 이는 강관내 조밀한 마그네타이트 보호 피막을 형성시키기 위해 지역 난방수에 인산염 처리를 하였기 때문으로 생각된다 [11]. 따라서 수처리의 결과가 내/외면 보호 피막의 질적 차이를 만들어 냈음을 알 수 있다. 심한 부식이 발생한 전단부 하부 시편 ⑤의 외면에서는 상대적으로 높은 염소 이온 농도가 검출되었으며 이는 난방수와 모래에 존재하기 힘든 성분들로, 보온재와 같은 외부환경으로부터 기인한 것으로 판단된다.

내/외면의 부식 생성물의 두께 및 형태를 측정하기 위해

Table 2 Chemical composition of the corrosion products on the samples ③-⑤ (shown in Fig. 2b) measured by EDS (at.%)

Position		Fe	O	P	Zn	Mg	Al	Si	S	Ca	Cl	K	Mn
Sample ③	Inside	34.3	59.2	3.99	0.58	0.32	0.31	0.22	0.20	0.17	0.14	0.10	0.48
	Outside	51.99	43.09	1.96	0.25	-	0.06	0.38	0.12	0.44	0.02	0.18	1.49
Sample ④	Inside	42	45.4	4.62	1.25	0.36	0.4	1.87	0.45	0.98	-	0.16	0.64
	Outside	34.3	43.1	3.99	-	-	-	-	-	-	-	-	0.48
Sample ⑤	Inside	49.38	44.62	4.22	-	-	-	0.60	0.08	0.12	-	-	0.67
	Outside	41.80	53.29	2.07	-	-	-	0.04	0.27	0.99	0.88	0.03	0.34

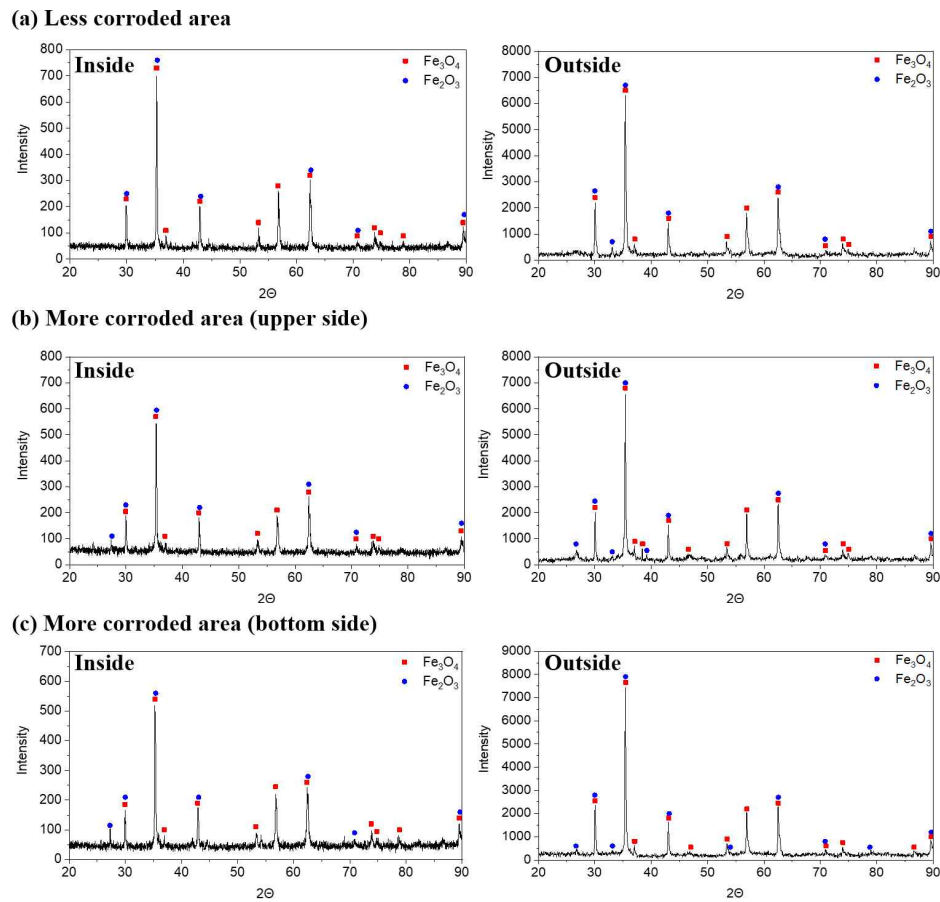


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of the inside and outside of the corroded areas.

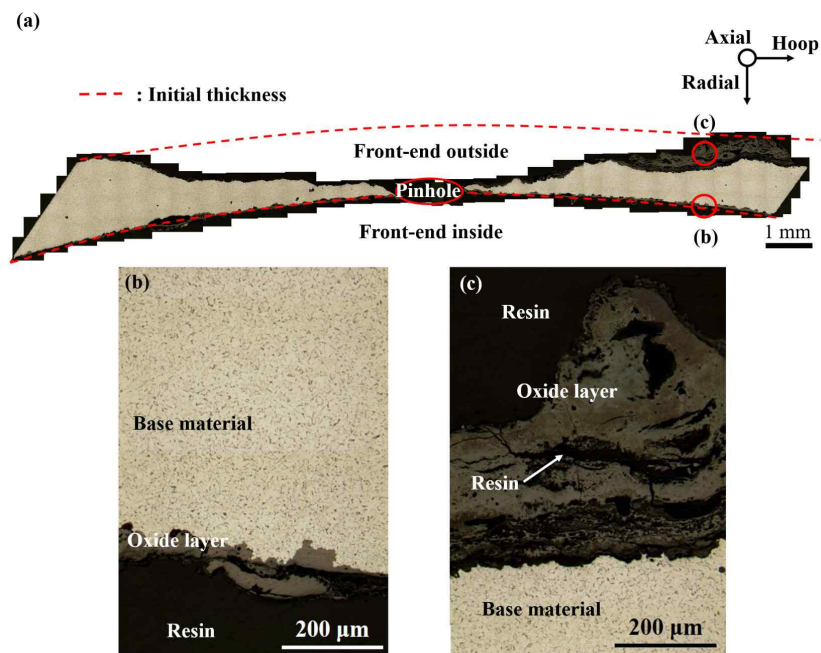


Fig. 5 Cross-section view of (a) pinhole area in the sample ⑤ shown in Fig. 2b, (b) magnification of inside oxide layer shown in (a), (c) magnification of outside oxide layer shown in (a).

핀 홀을 중심으로 시편 ⑤의 단면을 관찰하였다(Fig. 5a). 핀 홀의 원주 방향 지름은, 외면에서 내면으로 부채꼴 형상을 나타내며 두께 감육이 진행되어 최종적으로 내경에 가까운 위치에 원주 방향 지름이 ~ 1.2 mm 수준의 핀 홀이 형성되었다. 이때 발생한 감육의 양상은 Fig. 3b와 유사하며, 외면에서부터 부식이 발생하여 두께 방향으로 진행된 것을 명확하게 보여준다. 부식의 방향과 같이, 부식 생성물의 두께도 내면에는 상대적으로 얇게 형성된 반면에 외면에는 상당히 조대하고 매우 다공성으로 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 부식 생성물의 차이로부터 에어벤트 전단부의 내/외면 부식 인자가 다를 수 있었으며, 특히 외면으로부터의 부식 인자는 핀 홀을 만들 만큼 치명적으로 보인다.

### 3.3 맨홀 내 환경

누수가 발생한 에어벤트는 맨홀 내에 설치되어 있고, 내부에는 지역난방수와 접촉하고 있으므로, 에어벤트 내/외부 환경을 잘 정의하는 것이 중요하다. 내/외면의 부식 생성물에서 인(P)이 상당히 검출되었으므로, 과한 인산염치리에 의한 Caustic corrosion을 의심해 볼 수 있다 [2]. 지역난방수의 관리 기준 및 누수 당시의 수질 검사 결과를 Table 3에 나타내었다. 검사된 수질 결과는 규정에 준수하는 수준이었고, pH도 높게 측정되지 않았다. 또한 에어벤트 전단부의 핀 홀 주변의 미세조직에서 Caustic corrosion에 의한 열화가 발견되지 않았고, 부식은 외부에서 진행된 것으로 보이므로 난방수로 인한 부식 가능성은 매우 낮다고 보여진다.

해당 에어벤트는 배수가 어려운 구조의 맨홀에 설치되어 있어, 빗물에 의해 종종 침수가 발생하였다. 서울 지역의 빗물에는 부식을 유발할 수 있는  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SiO_2$ , P 등을 포함할 뿐만 아니라 [12], 전단부는 방식처리가 되어 있지 않았기에 부식이 쉽게 발생할 수 있으며, 전단부를 감싸고 있는 보온재의 마감부를 통해 빗물이 유입되었을 가능성이 크다. 보온재에 수분이 흡수되면 보온재는  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$ 와 같은 부식성 이온들을 내놓는데, 이것들이 전단부 강관과 반응하면서 보온재하 부식이 발생할 수 있다 [13,14]. 특히, 보온재하 부식은 탄소강의 경우 60 ~ 80

°C의 온도에서 사용될 때 매우 취약한 것으로 알려져 있으며 [15,16], 이는 맨홀 내 환경과 매우 잘 부합하며 전단부 하단에서 검출된  $Cl^-$ 은 보온재하 부식으로부터 발생한 것으로 유추해 볼 수 있다.

### 3.4 맨홀 내 에어벤트의 부식 절차 및 대책

본 연구에서 분석한 에어벤트의 파손 과정은 다음과 같은 순서로 진행되었음을 예상해볼 수 있다. 에어벤트가 설치된 맨홀은 우천시 빗물이 배수되지 않아, 전단부는 항상 침수의 위험이 있는 상태로 존재하였다. 빗물이 맨홀 내로 유입되거나 침수된 상태에서 전단부의 보온재 마감부를 통해 빗물이 유입되었고, 빗물과 더불어 보온재하 부식이 전단부의 외면을 부식시켰다. 난방수 공급 중에는 보온재하 부식이 가속화될 수 있는 온도 조건을 만족하게 되므로, 전단부 하단에서부터 부식이 진행되어 핀 홀을 만들어 누수가 발생하였다.

부식으로 인한 에어벤트 전단부의 파손을 예방하기 위해서는 보온재로의 수분 유입이 안되도록 조치하는게 가장 좋은 방법이다. 따라서 보온재 마감부 틈을 방수, 방식 처리된 테이프 등으로 막아주면 수분 유입을 막을 수 있다. 부식성 물질을 적게 내놓는 보온재로의 교체 역시 부식 발생 및 진행을 늦출 수 있다. 또한 전단부는 설치 후 보온재에 싸여있어 설치 이후 상태 확인이 어려우므로 보온재 마감부의 방식 테이프 상태, 부식 상태 점검 등의 주기적인 관리가 필요하며 근본적인 수분 유입을 예방하기 위해 맨홀의 설치 전후 침수 여부 확인, 배수 가능 여부 확인이 요구된다.

## 4. 결론

공급 시설의 보수 과정에서 에어벤트의 파손으로 인한 누수를 발견하였고, 파손 원인을 분석하기 위해 철거를 진행하였다. 파손이 발생한 에어벤트 전단부 하부 위치의 외면에서 상대적으로 감육이 많이 진행되었고, 감육도가 큰 위치에서 핀 홀들이 발견되었다. 따라서 외부 환경으로부터 부식 발생 원인이 제공되었다고 생각되며, 이는 내/외면의 감육두께 차이 및 부식 생성물 차이로도 확인할 수 있었다. 튜브 내면은 인산염에 의해 상대적으로 치밀한 형상을 보여

Table 3 Management standard and analyzed results of district heating water

	pH	Hardness (ppm)	Dissolved Oxygen (ppm)	Conductivity ( $\mu$ s/cm)	Oxygen Scavenger (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
Management standard	9~10	1.5	0.02	-	0.1 ~ 0.5	0.3	0.02	-	-
DH Water (Analyzed)	9.31	1.51	-	12.58	-	0.3	0.02	0.459	0.092

준 반면에, 외면은 조대한 다공성 산화막을 나타냈으며 여러 부식 인자를 포함하고 있었다. 에어벤트는 내부 고온의 난방수로 인해 높은 온도를 유지하고 있고 보온재 마감부의 틈을 통해 빗물이 들어갈 수 있는 환경이므로 외면에서 보온재하 부식이 원인이다. 더욱이 전단부는 방식 처리가 되지 않은 상태에서 설치되어 단열재하 부식에 의한 전단부의 파손이 더 빠르게 진행되었다. 이러한 부식 파손은 수분 유입에 의한 보온재하 부식으로 인해 발생하였으므로 설치시 보온재 마감부에 수분이 유입되지 않게 방식 테이프 등을 사용하여 마감부 틈을 막는다면 파손의 발생을 예방할 수 있으리라 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

### References

1. 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>
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. 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>
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. S. B. Kwon, A study on the improvement of air vent system in pipping, pp. 23 - 24, Land and Housing Institute (1997).  
<https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKNRK500230>
7. L. H. Kim, H. S. Kim, and G. B. Kim, *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**, 322 (2017).  
<https://doi.org/10.9713/kcer.2017.55.3.322>
8. J. E. Park, K. S. Kyung, Y. M. An, and S. C. Kwon, *J. Korean Soc. Steel Const.*, **23**, 569 (2011).
9. J. H. Kong and B. K. Sin, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, **14**, 81 (2005).  
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.4.119>
10. E. R. Monazam, R.W. Breault, and R. V. Siriwardane, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**, 13320 (2014).  
<https://doi.org/10.1021/ie501536s>
11. W. S. Kang, *Proc. KFMA Annual Meeting*, pp. 214 - 215, Korean Society for Fluid Machinery, Gangwon, Korea (2017).
12. M. Y. Han, H. I. Saleh, I. Y. Lee, and Y. J. Kim, *Proc. Eighth Int. Water Technology Conf.*, pp. 61 - 71, International Water Technology Association, Alexandria, Egypt (2004).
13. R. Javaherdashti, *J. Mat. Sci. Surf. Eng.*, **2**, 36 (2014).  
<http://www.jmsse.in/files/122corrosion%20under%20insulation%20%28cui%29%20a%20review%20of%20essential%20knowledge%20and%20practice.pdf>
14. J. S. Kim, *News and Info. Chem. Eng.*, **29**, 77 (2011).  
<https://www.cheric.org/PDF/NICE/NI29/NI29-1-0077.pdf>
15. KOSHA GUIDE M-116-2012,  
<http://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceM.do?mode=download&articleNo=263333&attachNo=143482>
16. KOSHA GUIDE M-143-2012,  
<http://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceM.do?mode=download&articleNo=263355&attachNo=143504>