

지역난방수 공급관 에어벤트 부식 파손 분석

이형준¹ · 채호병¹ · 조정민¹ · 김우철² · 정준철² · 김희산³ · 김정구⁴ · 이수열^{1,†}

¹충남대학교 신소재공학과, 대전광역시 유성구 궁동 대학로 99

²한국지역난방공사 미래개발원, 경기 용인시 기흥구 기곡로 92

³홍익대학교 재료공학과, 세종특별자치시 조치원읍 세종로 2639

⁴성균관대학교 신소재공학부, 경기 수원시 장안구 서부로 2066

(2020년 5월 22일 접수, 2020년 6월 2일 수정, 2020년 6월 3일 채택)

Corrosion Failure Analysis of Air Vents Installed at Heat Transport Pipe in District Heating System

Hyeongjoon Lee¹, Hobyung Chae¹, Jeongmin Cho¹, Woo Cheol Kim², Joon Cheol Jeong²,
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 May 22, 2020; Revised June 02, 2020; Accepted June 03, 2020)

Two air vents situated on a heat transport pipe in district heating system were exposed to the same environment for 10 years. However, one air vent was more corroded than the other. It also had a hole on the top of the front-end pipe. Comparative analysis was performed for these air vents to identify the cause of corrosion and establish countermeasures. Through experimental observation of the damaged part and analyses of powders sampled from air vents, it was found that corrosion was initiated at the top of the front-end pipe. It then spread to the bottom. Energy dispersive X-ray spectroscopy results showed that potassium and chlorine were measured from the corroded product in the damaged air vent derived from rainwater and insulation, respectively. The temperature of the damaged air vent was maintained at 75 ~ 120 °C by heating water. Rainwater-soaked insulation around the front-end pipe had been hydrolyzed. Therefore, the damaged air vent was exposed to an environment in which corrosion under insulation could be facilitated. In addition, ion chromatography and inductively coupled plasma measurements indicated that the matrix of the damaged front-end pipe contained a higher manganese content which might have promoted corrosion under insulation.

Keywords: District heating system, Heat transport pipe, Air vent, Rainwater, Corrosion under insulation

1. 서론

지역난방시스템(District heating system)은 열병합발전소와 같은 대규모 열생산시설을 통해 전기를 생산하고 각 아파트나 빌딩 등에 온수를 일괄적으로 공급하는 시스템

을 말한다 [1-5]. 지역난방의 활용은 각 건물마다 난방시설을 따로 설치할 필요가 없도록 만들며, 열병합 발전의 경우 발전 과정에서 발생한 열을 이용하여 온수를 생산하기 때문에 안정성, 경제성, 환경적 측면에서 각광받고 있다 [6,7]. 지역난방시스템은 크게 열생산시설과 열수송관 망, 사용자 시설로 구성된다. 열수송관 망은 폐회로 형태로 공급관을 통해 온수를 사용처에 공급하고, 회수관을 통해 사용처에서 사용된 온수를 다시 열생산시설로 보내는 역할을 한다 [8]. 공급관과 회수관에는 외부에서 유입되거나 공급 과정에서 발생한 공기가 종종 존재하게 되는데, 관 내부의

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

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

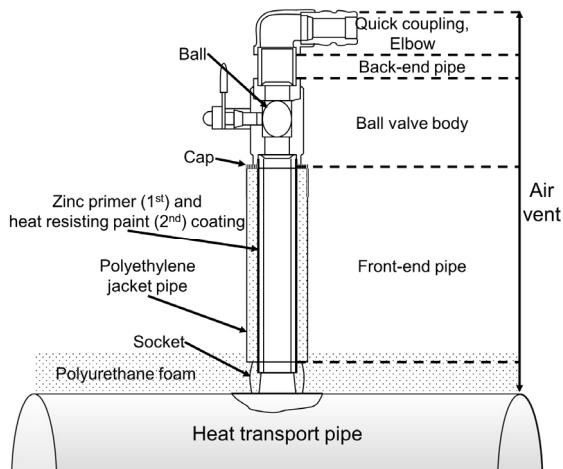


Fig. 1 Structure and components of the air vent installed at heat transport pipe in district heating system.

공기는 열 전달을 방해하고 부식을 발생시키는 등 악영향을 미치기 때문에 에어벤트(Air vent)를 열수송관에 설치함으로써 공기를 배출시키고 공기 장해를 방지한다 [9,10].

대형 주요 공급관이 설치된 맨홀에서 증기의 누출이 발견되었고 해당 공급관에 설치된 두 에어벤트 중 한 에어벤트에서 누수가 발생한 것을 확인하였다. 파손 분석을 위해 두 에어벤트는 보수과정에서 함께 철거되었다. 해당 공급관에는 75 ~ 120 °C의 온수가 흐르고 있었으며 온수는 에어벤트 내부 볼(Ball) 바로 아래까지 채워져 있었다(Fig. 1). 두 에어벤트는 10년 동안 사용되었으며 동일한 맨홀에 함께 위치하였고 철거될 때까지 사용 빈도가 높지 않다고 보고되었다. 또한, 두 에어벤트가 부착되어 있던 공급관의 밸브가 항상 열려 있어 두 에어벤트가 내부에서 받는 온도와 압력은 동일했다. 비가 오면 맨홀 내부로 빗물이 유입되었으며 공급관의 상단까지 빗물로 채워져 있었던 것으로 추정된다.

두 에어벤트는 동일한 기간, 위치, 환경 하에서 존재했으나 한 에어벤트에서만 부식에 의한 구멍이 발생하였다. 따라서, 두 에어벤트를 비교 분석하여 명확한 부식 파손의 원인을 밝혀낼 필요가 있다. 열수송관 및 열수송관 부속 장치들의 부식 파손은 심각한 경제적, 인적 손실을 발생시킨다 [11,12]. 하지만 이와 관련된 논의는 부족한 실정이며, 특히 에어벤트의 노후화 및 부식에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서, 에어벤트와 같은 열수송관 및 열수송관 부속 장치들의 고장 사례에 대한 원인 규명 및 예방 대책을 수립하는 것은 지역난방 시스템 운영의 안정성을 가져올

뿐만 아니라 사회적 안전을 확보하는 일이 될 것이다. 본 연구에서는 철거된 두 에어벤트를 비교 분석하여 에어벤트에서 발생할 수 있는 부식 파손의 원인을 고찰하고 이를 방지할 수 있는 방법들을 제시하였다.

2. 연구방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 에어벤트의 구조를 보여준다. 두 에어벤트 중 부식 파손이 발생한 에어벤트에서는 전단부 관(Front-end pipe)의 구멍을 통해 누수가 발생하고 있었다. 전단부 관은 압력 배관용 탄소강(SPPS 250)으로 Table 1에 명시되어 있으며, 이를 제외한 주요 구성 요소들은 스테인리스강 304로 이루어졌다. 전단부 관의 외부 표면은 징크 프라이머(Zinc primer)와 내열 도료로 도장되어 있으며 단열재와 폴리에틸렌 피복관(Polyethylene jacket pipe)이 전단부 관을 감싸고 있었다. 또한, 전단부 관 상단에 외부 부식 요인의 유입을 방지하는 캡(Cap)이 위치한다.

전반적인 부식 경향의 확인과 분석 계획 수립을 위해서 외관 검사를 실시하였고, 이후에는 두 에어벤트를 정밀하게 비교 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 가공하였다. 두 에어벤트 부식 정도를 정량화하기 위해서는 전단부 관의 두께 감육 정도를 측정하는 것이 요구되므로, 에어벤트에서 전단부 관을 절단하고 이를 다시 축방향을 기준으로 반으로 절단하였다. 두께 측정은 전단부 관의 축방향을 따라 폭 1 cm로 최대한 길고 두껍게 가공한 시편(①)을 광학 현미경과 Image J 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 부식 및 감육의 진행 방향을 확실하게 하기 위해, 구멍이 생긴 에어벤트에 한해 구멍 주변을 가로와 세로 2 cm 그리고 최대 두께로 가공하여 시편(②)을 채취하고 광학 현미경으로 관찰하였다. 부식 원인 파악을 위해서 부식 생성물을 두 전단부 관 외부와 내부에서 채취하여 에너지 분산형 분광 분석(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)과 X선 회절(X-ray diffraction, XRD) 측정을 통해 정성적으로 분석하였다. 또한, 이온 크로마토그래피(Ion chromatography, IC) 분석, 유도 결합 플라즈마(Inductively coupled plasma, ICP) 분광 분석을 통해 부식이 상대적으로 덜 발생한 전단부 관 하단에서 가로와 세로 1 cm 그리고 최대 두께로 가공한 금속 모재 시편(③)의 성분 분석을 수행하여 전단부 관에 사용된 SPPS 250의 성분 차이가 부식 파손에 영향을 끼쳤는지를 확인하였다.

Table 1 Nominal chemical composition of SPPS250 (in wt%)

	Fe	C	Si	Mn	P	S
SPPS 250	Bal.	< 0.30	< 0.35	0.35 ~ 1.00	< 0.04	< 0.04

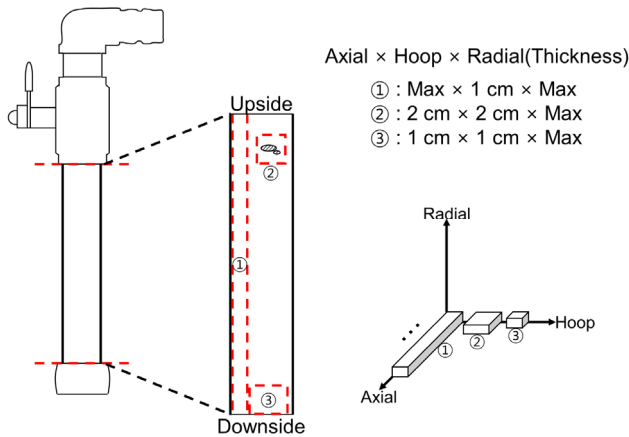


Fig. 2 Positions and dimension of specimens of both air vents for comparative analysis.

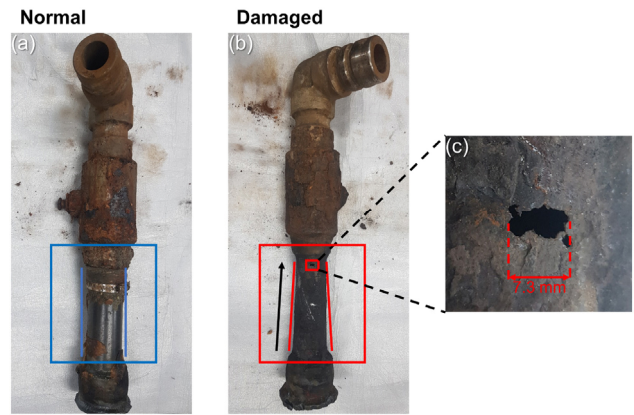


Fig. 3 (a) Normal, and (b) damaged air vents (c) with leak hole removed from the heat transport pipe.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 외관 검사 및 두께 감육

Fig. 3은 정상 에어벤트(Normal)와 파손 에어벤트(Damaged)의 외관과 파손 에어벤트에 발생한 구멍을 보여준다. 두 에어벤트의 전반적인 부식 정도는 유사하였으나 전단부 관의 부식 정도는 큰 차이를 보였다. 정상 에어벤트의 전단부 관은 외부 표면에 도장된 도료가 남아있어 육안으로는 두께 감육을 확인하기 어려웠다(Fig. 3a). 반면에, 파손 에어벤트의 전단부 관은 외부 표면 전체가 부식 생성물로 덮여 있었고 전단부 관의 하단에서 상단으로 갈수록 가늘어지는 형태를 보였다(Fig. 3b). 파손 에어벤트에 발생한 구멍은 최대 폭이 약 7 mm 정도로 전단부 관의 상단에 위치하고 있었으며 이외의 다른 구멍은 관찰되지 않았다(Fig. 3b, c).

정상 에어벤트와 파손 에어벤트의 두께 감육 정도를 확인 위해 전단부 관 두께를 축방향을 따라 위에서 아래로 내려오며 측정하였다(Fig. 4). Fig. 4b의 붉은색 상자는 파손부 구멍이 발생한 위치를 나타낸다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 볼 밸브 몸체(Ball valve body)와 전단부 관이 맞닿는 부분(볼 밸브로부터 약 25 mm 까지)은 두껍게 설계되었다. 두 에어벤트 모두 전단부 관 25~70 mm 구간에서의 두께 감육 정도가 가장 심각하였고 정상 에어벤트와 파손 에어벤트 전단부 관에서 가장 얇은 두께는 각각 3.98 mm, 0.92 mm였다. 정상 에어벤트는 전단부 관 70 mm 구간 이후 두께가 거의 일정한 반면(Fig. 4a), 파손 에어벤트의 두께는 정상 에어벤트의 두께의 50% 수준이었을 뿐만 아니라, 감육이 광범위하게 발생하여 130 mm 구간까지 전단부 관의 두께가 2 mm 미만이었다(Fig. 4b). 외관 검사 및 두께 측정 결과는 누수가 발생하지 않은 에어벤트보다 누수가 발생한 에어벤트에서 더욱 심각한 부식이 발생했음을 보여주며, 전단부 관 하단에 비해 심각한 상단의 두께 감육 정도

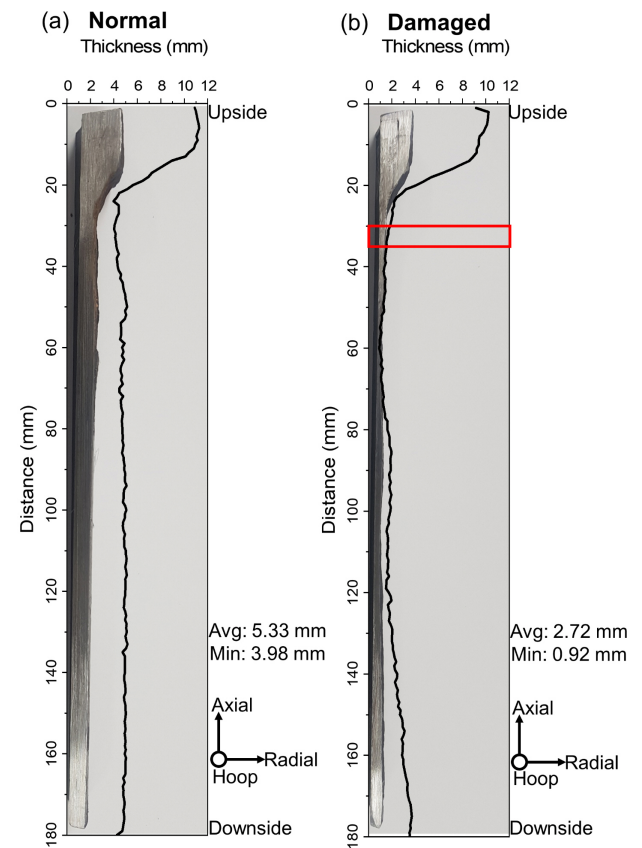


Fig. 4 Thickness for (a) normal, and (b) damaged air vents as a function of distance from the ball valve.

는 부식이 상단에서부터 시작되어 하단으로 진행되었음을 의미한다.

3.2 파손부 정밀 관찰

Fig. 5는 파손 에어벤트의 전단부 관 상단에 형성된 구멍

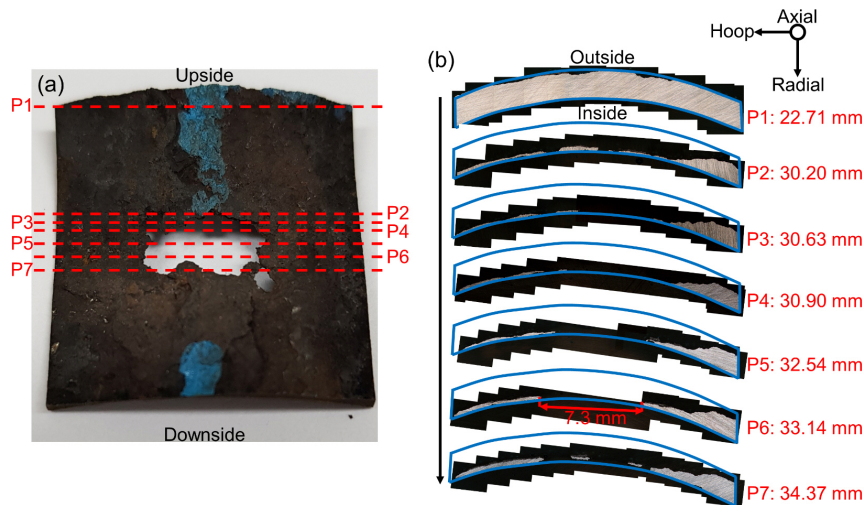


Fig. 5 (a) Leak hole specimen machined from the damaged air vent, and (b) its cross-section views in terms of axial distance indicated in (a).

을 축방향을 따라 위에서 아래로 연마하며 부식으로 인한 모재 손상의 형태를 단면으로 관찰한 결과를 보여준다. Fig. 5에서 빨간색 점선으로 표시된 위치 P1 ~ P7는 단면 관찰을 수행한 위치를 나타내며, Fig. 5b의 P1 ~ P7 옆에 적힌 수치는 볼 밸브로부터의 거리로 Fig. 4b의 축방향에서의 거리와 대응된다(Fig. 5a의 시편 표면에 존재하는 파란색 선은 가공 과정을 위해 표시한 흔적이다). Fig. 5b에서 확인할 수 있듯이 관 내부는 P1 위치에서 완벽한 내경의 호를 유지하고 있어 감육의 흔적이 발견되지 않았으나, 관 외부의 외경의 형태가 거친 것은 부식이 외부로부터 발생해 있었음을 의미한다. 이러한 양상은 P2 위치, P3 위치로 갈수록 두드러지는데, P2 위치에서부터 뚜렷한 구멍이 관찰되었으며 축방향을 따라 아래로 내려갈수록 깊고 넓어져서 P6 위치에서 약 7.3 mm의 최대 폭을 보였다.

파손부 정밀 관찰 결과 전단부 관 내부는 감육이 발견되지 않았으나, 부식에 의한 외부에서 내부로의 감육은 명확하게 발생하였음을 알 수 있었다. 이는 파손 에어벤트의 전단부 관 상단에 발생한 구멍이 에어벤트 내부의 요인보다는 외부 요인에 의한 것임을 의미한다. 이를 가능하게 할 요인으로 파손 에어벤트의 전단부 관 상단의 캡이나 폴리에틸렌 피복관이 제대로 된 기능을 수행하지 못한 것 등이 있을 수 있다.

3.3 부식 생성물 분석

두 에어벤트의 전단부 상단 외부의 부식 원인을 확인하기 위해서 부식 생성물에 대한 정성 평가가 수행되었다. 두 에어벤트의 전단부 관 내부와 외부에서 채취한 부식 생성물의 EDS 측정 결과와 XRD 분석 결과를 각각 Table 2, Fig. 6에 나타냈다. EDS 측정 결과에 따르면 부식 생성물은 주

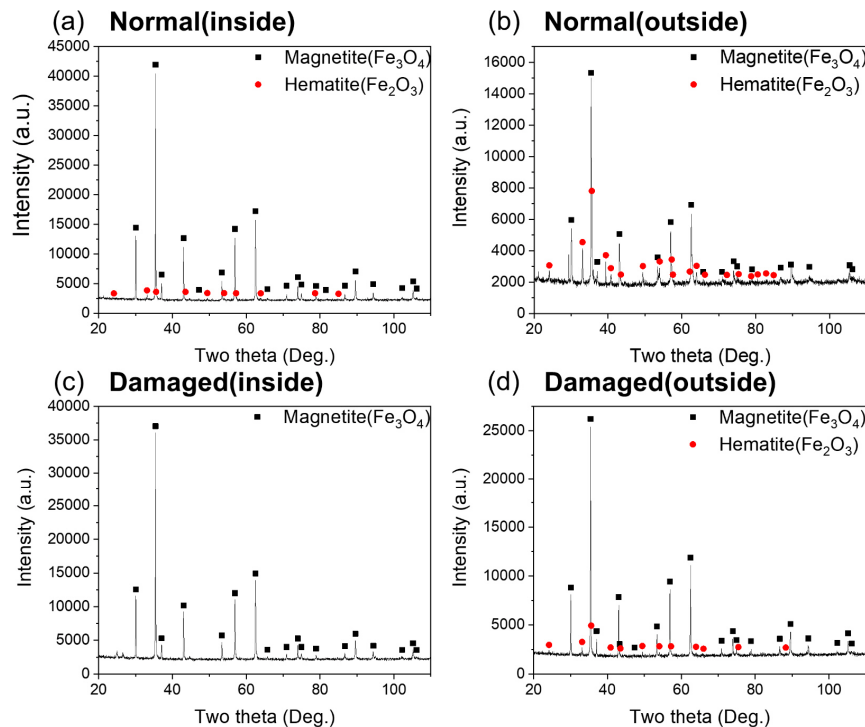
로 철(Fe), 탄소(C), 산소(O)와 같은 원소들로 이루어져 있었는데, XRD 분석 결과를 통해 이는 마그네타이트(Fe_3O_4)나 헤마타이트(Fe_2O_3)임을 알 수 있었다. 두 에어벤트의 XRD 패턴을 보면 전단부 관 내부에서는 관찰되지 않거나 매우 적은 양의 헤마타이트가 관찰된 반면에, 외부의 부식 생성물에는 헤마타이트 피크(Peak)가 상대적으로 선명한데, 마그네타이트에 비해 상대적으로 불안정한 산화 피막인 헤마타이트가 뚜렷하다는 것을 통해 전단부 관 외부의 환경이 더 열악하다는 것을 알 수 있다.

파손된 에어벤트의 EDS 분석 결과는 검출된 원소들의 내부와 외부의 뚜렷한 차이를 보이지 않는데, 이는 부식으로 형성된 구멍을 통해 외부와 내부의 부식 요인이 뒤섞인 결과로 예상해 볼 수 있다. 반면에 정상 에어벤트와 파손 에어벤트 전단부 관의 부식 생성물 성분에는 미량이지만 차이가 발견되었다. 파손 에어벤트의 경우 전단부 관의 내부 부식 생성물에서 염소(Cl)와 칼륨(K)이 검출되었고 외부 부식 생성물에서 염소가 검출되었다. 반면에, 정상 에어벤트의 경우 전단부 관의 내부와 외부 부식 생성물에서 염소와 칼륨이 검출되지 않았다. 염소와 칼륨은 금속 모재로부터 발견되는 어려운 성분으로 칼륨은 빗물이나 토양 성분에 포함되어 있으며 염소의 경우 빗물이나 보온재 성분에 포함되어 있다고 알려져 있다 [13-15]. 따라서, 파손 에어벤트로 외부의 빗물이 유입되었고 유입된 빗물이 보온재와 반응해 염소를 용출했을 가능성이 높다.

단열재 하 부식은 금속이 수분을 함유한 단열재와 접촉되어 있을 때 발생하며 탄소강은 특히 이 부식에 취약하다 [16,17]. 단열재 하 부식이 일어나기 위해서는 120 °C 이하의 온도에서 충분한 산소와 염소가 용해된 수분이 있어야 한다. 파손 에어벤트는 내부에 흐르고 있는 난방수로 인해

Table 2 EDS responses of powders sampled from inside and outside of normal, and damaged air vents, respectively (in at%)

	Fe	C	O	Mg	Al	Si	Cl	K
Normal (inside)	11.20	42.86	45.36	-	-	0.57	-	-
Normal (outside)	49.34	16.98	34.29	0.16	0.38	0.62	-	-
Damaged (inside)	15.67	12.84	64.27	0.44	3.38	3.21	0.48	0.66
Damaged (outside)	17.62	19.86	56.57	-	0.11	0.16	4.03	-

**Fig. 6** X-ray diffraction patterns of powders sampled from inside and outside of (a, b) normal, and (c, d) damaged air vents, respectively.

75 ~ 120 °C의 온도가 조성되고 우천 시 맨홀 환기구를 통해 유입된 빗물에 자주 노출되었을 가능성이 크다. 빗물에 젖은 단열재는 가수분해를 통해 염소를 용출하므로 파손 에어벤트가 놓여있던 환경은 단열재 하 부식이 일어나기 위한 조건을 충족한다. 따라서, 파손 에어벤트는 해당 환경에서 외부에서 유입된 수분과 이에 젖은 단열재에 의해 발생한 단열재 하 부식으로 파손되었다고 판단된다.

3.4 금속 모재 분석

같은 맨홀에 위치한 두개의 같은 에어벤트가 서로 다른 부식 경향을 보였으므로, 모재의 차이에 대한 평가는 반드시 수행되어야 한다. 따라서, Table 1에 제시한 SPSS250

의 nominal chemical composition을 바탕으로 두 에어벤트 전단부 관의 금속 모재에 대한 IC와 ICP 분광 분석을 수행하였고 Table 3에 그 결과를 정리하였다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 두 에어벤트 간 전단부 관의 금속 모재 성분에는 큰 차이가 없었다. 황(S), 인(P)은 거의 존재하지 않았으며 규소(Si) 또한 유의미한 함량차를 보인다고 판단하기 어려울 정도로 미량 존재하였다. 다만, 정상 에어벤트에 비해 파손 에어벤트가 전단부 관 금속 모재의 망간(Mn) 함량이 다소 높았다. 망간은 안정된 철 산화물인 마그네타이트의 형성을 저해한다고 알려져 있는데 [18,19], 파손 에어벤트 전단부 관의 상대적으로 높은 망간 함량은 이것의 표면에 안정적인 산화피막이 형성되는 것을 방해했을 가능

Table 3 IC and ICP measurement results of matrix of normal and damaged air vents (in wt%)

	Fe	Si	Mn	P	S
Normal	98.27	0.005	0.30	< 0.0001	< 0.0001
Damaged	97.87	0.01	0.36	< 0.0001	< 0.0001

성이 있다. 그 결과, 파손된 에어벤트의 전단부는 가속화된 단열재 하 부식에 노출되었을 것으로 판단된다.

3.5 파손 에어벤트의 부식 원인 및 파손 과정

위 결과들을 종합해보면 파손 에어벤트의 부식 원인 및 파손 과정을 다음과 같이 예상해 볼 수 있다. 두 에어벤트 중 파손 에어벤트의 캡이나 폴리에틸렌 피복관 상단에 손상이 생겼고 수분이 유입되기 쉬운 틈이 발생하여 우천 시 맨홀의 환기구를 통해 유입된 빗물이 틈을 통해 에어벤트 전단부 관을 감싸고 있는 보온재로 전단부 관 위에서부터 다량 스며들었을 것이다. 파손 에어벤트가 놓여있던 환경은 단열재 하 부식이 일어날 수 있는 조건에 부합하였기 때문에 전단부 관과 수분을 함유한 단열재 사이에서 부식이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 파손 에어벤트 전단부 관의 금속 모재는 상대적으로 높은 망간 함량을 가지고 있어 안정적인 산화피막이 형성되는 것이 보다 어려웠고 그 결과 단열재 하 부식을 가속시켰을 것이다.

이와 같은 부식 파손을 예방하기 위해서는 지역난방수 공급관이 빗물에 노출되는 것을 막거나 맨홀 내부로 유입된 빗물이 원활하게 배출될 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 또한, 주기적인 점검 및 보수를 통해 에어벤트의 캡이나 폴리에틸렌 피복관에 빗물이 유입될 수 있는 경로를 제거해야 한다. 보온재로는 수분 흡수나 가수분해가 어렵고 가수분해 되더라도 염소를 내놓지 않는 소재를 사용할 필요가 있다.

4. 결론

지역난방수 공급관에 설치되어 10년 동안 사용된 두 에어벤트 중 한 에어벤트의 전단부 관 상단에서 부식에 의한 구멍이 발생하여 부식 파손의 원인을 밝히고 예방 대책을 수립하기 위해 두 에어벤트의 전단부 관에 대한 비교 분석을 수행하였다. 두 에어벤트가 동일한 기간 및 환경에 위치하였으나 파손 에어벤트가 정상 에어벤트에 비해 전단부 관의 부식 정도가 심했으며, 심각한 두께 감육이 상단에서부터 시작되어 하단으로 더 넓게 진행되어 있었다. 파손부 정밀 관찰과 부식 생성물의 EDS 측정 및 XRD 분석 결과를 통해 외부 요인에 의해 에어벤트 전단부 관의 외부에서 내부로 부식이 진행되었음을 알 수 있었다. 이는 캡 또는 폴리에틸렌 피복관 상단의 손상으로 인해 생긴 틈을 통해 전단부 관을 감싸고 있는 보온재로 전단부 관 위에서부터 빗물이

다량 스며들었기 때문으로 보인다. 파손 에어벤트의 부식 생성물에서 염소와 칼륨이 존재한다는 것이 이를 뒷받침하며, 이로 인해 단열재가 가수분해 되었다. 에어벤트가 단열재 하 부식이 발생 가능한 조건에 놓여 있고 파손 에어벤트 내 상대적으로 높은 망간의 함량은 안정된 산화 피막을 형성하지 못하게 하면서 단열재 하 부식을 가속시켰다. 본 연구에서 다른 에어벤트의 부식 파손은 이것이 설치된 맨홀의 우수 차단 및 배출, 주기적인 점검 및 보수, 보온재 소재 교체 등으로 방지할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지역난방공사의 지원과 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002019, 2020년 산업전문인력 역량강화사업).

References

1. 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>
2. S. Ghafghazi, T. Sowlati, S. Sokhansanj, and S. Melin, *Appl. Energy*, **87**, 1134 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>
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. 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>
5. H. Gadd and S. Werner, *Appl. Energy*, **106**, 47 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.030>
6. M. Hong, H. Chae, Y. Kim, M. J. Song, J. 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>
7. H. Lund, B. Møller, B. V. Mathiesen, and A. Dyrelund, *Energy*, **35**, 1381 (2010).

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.023>
8. 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>
9. R. Wéber and C. Hős, *Period. Polytech. Mech. Eng.*, **62**, 1 (2018).
<https://doi.org/10.3311/PPme.10336>
10. G. Balacco and D. Laucelli, *Water Sci. Technol. Water Supply*, **19**, 2036 (2019).
<https://doi.org/10.2166/ws.2019.081>
11. H. S. Kim, G. B. Kim, and L. H. Kim, *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**, 322 (2017).
<https://doi.org/10.9713/kcer.2017.55.3.322>
12. Y. S. Kim and J.-G. Kim, *Eng. Fail. Anal.*, **83**, 193 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.09.014>
13. S. J. Cobbina, K. Michael, L. Salifu, and A. B. Duwiejua, *Int. J. Sci. Technol. Res.*, **2**, 1 (2013).
<http://www.ijstr.org/paper-references.php?ref=IJSTR-0213-5810>
14. K. M. Mullaugh, J. N. Byrd, G. B. Avery Jr., R. N. Mead, J. D. Willey, and R. J. Kieber, *Chemosphere*, **107**, 51 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.014>
15. R. Javaherdashti, *J. Mater. Sci. Surf. Eng.*, **1**, 36 (2014).
<http://www.jmsse.in/vol-1-iss-2.html>
16. S. Caines, F. Khan, and J. Shirokoff, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **26**, 1466 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.09.010>
17. S. Caines, F. Khan, J. Shirokoff, and W. Qiu, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **33**, 39 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.10.014>
18. Y. Hyun and H. Kim, *J. Korean Inst. Met. Mater.*, **54**, 68 (2016).
<https://doi.org/10.3365/KJMM.2016.54.2.68>
19. B. Kim, S. Kim, and H. Kim, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2018**, 1 (2018).
<https://doi.org/10.1155/2018/7638274>