

배열회수보일러 복수에열기 부식 파손 분석

채호병¹ · 김우철² · 김희산³ · 김정구⁴ · 김경민² · 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 2월 23일 접수, 2021년 3월 4일 수정, 2021년 3월 16일 채택)

Corrosion Failure Analysis of Condensate Pre-Heater in Heat Recovery Steam Generator

Hobyung Chae¹, Woo Cheol Kim², Heesan Kim³, Jung-Gu Kim⁴, Kyung Min Kim²,
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 February 23, 2021; Revised March 04, 2021; Accepted March 16, 2021)

In this work, we have performed a corrosion failure analysis of a leaking tube connected to an upper header of a condensate pre-heater in a heat recovery steam generator. It was revealed that the leakage position in the tube was the location where the materials were easily vulnerable due to tensile residual stresses induced by the material manufacturing process and welding process. In addition to an imbalance in the module induced by temperature difference during operation of the pre-heater, the weight of the modules and thermal fatigue provoked a type of stress of tensile-tensile fatigue on the tube. Thus, the leakage position of the pre-heater was exposed to the tensile stress on the inner surface of the tube facing the gas, which rendered the unstable oxide layer susceptible to corrosion and the formation of pits on the water side. The cracks propagated along with the degraded microstructure in a transgranular cracking mode under fatigue loading and finally resulted in water leakage.

Keywords: Heat Recovery Steam Generator, Condensate Pre-Heater, Corrosion, Fatigue

1. 서론

구조 재료 부품에 부식과 파손이 발생한 경우, 정보의 범람에도 질적 정보의 부재로 담당 기관은 문제를 해결할 방법을 찾기 매우 어렵다. 파손 사례가 발생했을 때 누적된 정보가 있다면 이로부터 직접적인 원인을 점검해볼 수 있을 뿐만 아니라 사례에서 사용된 원인 분석 방법론을 활용할 수 있으므로, 파손 사례 연구에 대한 경험과 지식은 매우 중요하다.

지역난방과 같은 시스템은 열 생산에서부터 열 수송을 거쳐 열 사용에 이르기까지 매우 넓은 범위의 환경을 포함하기 때문에, 사용되는 구조 소재의 사양은 다양하며 발생하는 파손의 사례와 그 원인도 다양하다. 열 생산 시설 파손 분석 관련한 연구로 Hong *et al.* [1]은 지역난방용 보일러 화실 내 열 교환 튜브의 부식 파손을 다뤘으며, 이는 염기성 부식으로 발생한 튜브의 수소 취성 증가와 열적 크리프로 인한 응력 부식 균열 (Stress corrosion cracking)이 원인임을 밝혀내었다. 이외에도 배열회수보일러(Heat recovery steam generator, HRSG) 내의 유동 가속 부식 [2]과 침투부하보일러 내 대류부의 국부 부식 [3]에 의한 파손 등이 보고되었다.

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

채호병: 석박통합과정, 김우철: 책임연구원, 김희산: 교수, 김정구: 교수, 김경민: 책임연구원, 이수열: 교수

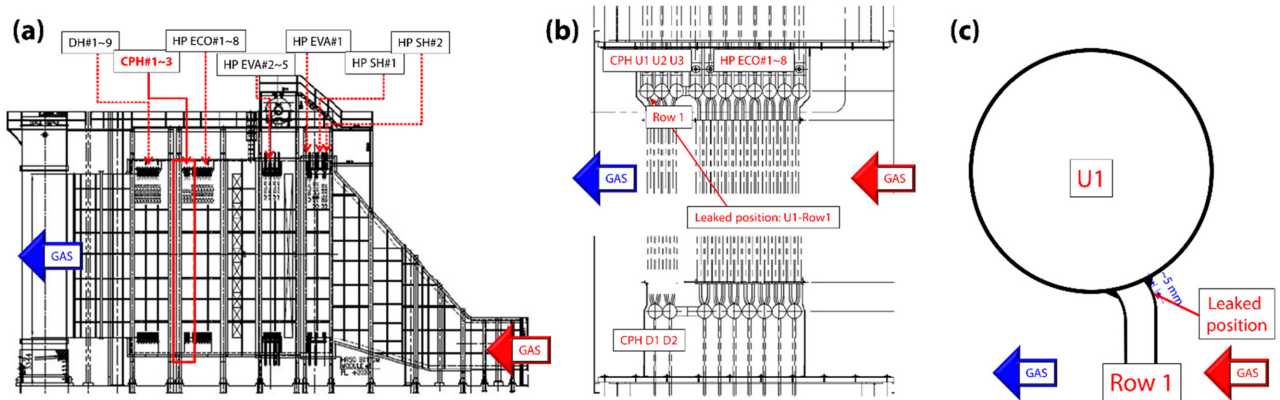


Fig. 1. (a) Schematics of heat recovery steam generator (HRSG), (b) Schematics of condensate pre-heater (CPH), and (c) Structure of upper head (U1) welded with a bent tube (R1), where a leakage occurred

열 수송 시설은 지하에 매설된 시설이므로 관리가 쉽지 않고 소재의 열화를 직접적으로 확인하기 어려우며 파손 후 유지보수 후에 샘플 채취를 통한 고품 분석을 진행한 사례가 다른 설비에 비해 적은 편이다. 열 수송 시설에 대한 고품 사례로는 맨홀 내 환경에 의한 부품들의 파손 [4,5]과 열 수송 파이프의 조직 내 개재물에 의한 파손 [6] 등이 보고되었다. 열 사용 시설에서는 급수용 구리관의 응력 부식 균열로 열 전달에 문제가 발생하는 경우가 보고되었다 [7].

앞서 언급한 지역난방 시스템은 열 생산시설, 열 수송 시설, 열 사용 시설로 이뤄져 있으며, 특히 열 생산 시설은 고온 고압의 환경으로 구조용 금속 소재에 있어서 매우 가혹한 조건을 형성한다. 종종 부식으로 인한 파손 사례가 보고되는데, 이로 인한 보일러 가동 중지는 경제적 손실과 더불어 사고로 인한 인명손실이나 겨울철 열 공급 차질로 인한 시민의 불편을 야기할 수 있어 이에 대한 대책과 예방책을 수립하는 일은 항상 강조된다.

본 연구에서는 열 생산 시설 설비인 배열회수보일러 내 발생한 관통 균열에 의한 누수 사례를 다룬다. 복합 화력 배열회수보일러는 가스터빈과 같은 기관에서 전기를 생산하였지만 충분히 큰 열을 가지고 있는 배기가스의 열을 회수하여 증기를 발생시키는 설비를 말한다 [8]. 이 설비는 열 교환 효율을 높이기 위해 다양한 모듈로 구성되어 있는데, 그 중 복수예열기(Condensate pre-heater, CPH)는 급수가 상위 모듈로 진행되기 전에 배기가스의 잔열을 추가로 회수하여 효율 향상을 이끌어내는 모듈이다. 본 연구에서 다루는 복수예열기는 지역난방용 절탄기(District heating economizer, DH)와 고압 절탄기(High pressure economizer, HP ECO)사이 에 위치하고 있으며(Fig. 1a), 사용조건으로는 60 - 170 °C, 1.08-

1.43 MPa의 온도와 압력을 겪는다. 이 복수예열기는 상부 3개의 헤더(U1, U2, U3)와 하부 2개의 헤더(D1, D2)로 이루어져 있으며, 가스가 배출되는 방향으로부터 상부 헤더의 경우 U1에서 U3 순으로, 하부 헤더는 D1, D2 순으로 배열되어 있다(Fig. 1b). U1 헤더는 1개의 행(Row, R)으로 이루어진 튜브군과 용접되어 있는데, 1개의 행은 32개의 튜브 열(Column, C)으로 구성되어 있으며 헤더에 가까운 튜브는 곡관이다(Fig. 1c). 가스가 진입하는 방향을 등지고 왼쪽에서부터 첫번째 열(C1), 가장 오른쪽의 튜브가 32번째 열(C32)순이다. 복수예열기 튜브의 누수는 U1-R1-C (25, 28, 29) 3개소에서 헤더와 튜브간 용접부로부터 약 5 mm 떨어진 가스가 진입하는 방향 위치에서 발견되었다(Fig. 1c).

본 연구는 약 10년간 사용된 배열회수보일러 내 복수예열기의 누수의 원인을 분석하기 위해서, 누수가 발생된 튜브들의 외관을 관찰하여 누수 경향을 파악하고 파손부 주변의 미세조직 및 균열 분석을 통해 파손 기구를 도출하였다. 또한 해당 모듈 및 부품이 노출되는 환경과 그 원인을 파악할 수 있는 기존 연구 조사를 바탕으로 파손의 원인을 추론하여 파손을 예방하기 위한 대책을 수립하였다. 파손이 발생한 문제에 대한 정확한 원인 분석은 대책 수립을 위해서 필수적이며, 다양한 파손 사례 분석 결과 및 대책 수립 절차가 요구되는 산업계 및 학계에 경험적으로 의미 있는 정보를 제공하리라 기대한다.

2. 연구방법

2.1 복수예열기 소재 및 샘플링

배열회수보일러 내 복수예열기의 튜브는 직경 38.1 mm, 두께 2.7 mm인 SA178A로 이루어져 있으며(Table 1), 상

Table 1. Nominal chemical composition of SA178A tube

Element	Fe	C	Mn	P	S
wt%	Bal.	0.06-0.18	0.27-0.63	~0.035	~0.035

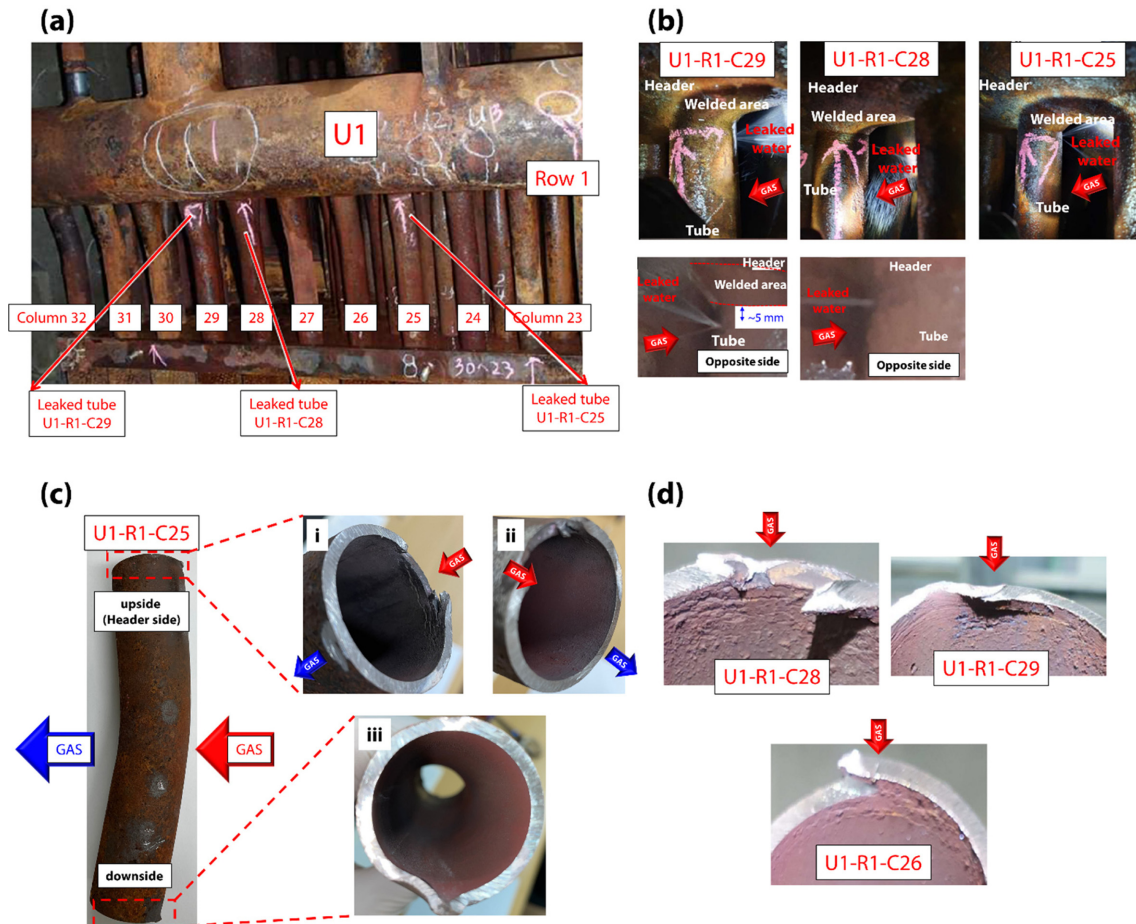


Fig. 2. (a) Upper header joined with bent tubes and the positions of leaked tubes, (b) Leaked water from the failed tubes, (c) U1-R1-C25 tube sampled from the CPH and a magnified view (i, ii, iii), and (d) Inner surfaces of the leaked tubes

부 헤더와 연결된 곡관부는 핀(Fin)이 없으나, 아래 직관부는 열 교환 효율 향상을 위해 탄소강으로 이루어진 핀이 달려있다.

Fig. 2a는 U1-R1을 가스가 배출되는 방향을 등지고 촬영한 사진으로서, 누수는 C25, C28, C29 3개소에서 발생하였다. 내부 보일러 수의 누수가 발생하고 있는 각각의 튜브에 대한 사진이 Fig. 2b에 나타나 있는데, 모든 누수는 가스가 유입되는 방향에서 발생하였으며 누수가 발생한 방향(배기가스 진입 방향, 곡관의 곡률반경이 큰 위치)에서 찍은 사진(Opposite side)을 통해 헤더와 튜브 사이의 용접부(Welded area)로부터 약 5 mm 아래 부분에서 누수가 발생한 것을 확인하였다.

과손 정밀 분석을 위해 누수가 발생한 세 개의 튜브

중 U1-R1-C25 튜브를 선정하였고, 헤더-튜브간 용접부로부터 약간 떨어진 위치에서부터 곡관 부분을 포함한 영역을 절삭하여 샘플링 하였다(Fig. 2c). 튜브의 상단(Header side)을 보면 누수가 발생한 배기가스 유입 방향의 튜브 내면에 원주 방향(Hoop direction)으로 주름 형태의 균열이 발생한 것(Fig. 2c)을 확인할 수 있는 반면, 반대쪽 내면과 튜브의 아래에서는 이와 같은 균열은 전혀 발견되지 않았다. C25의 균열과 유사한 균열이 C28, C29의 배기가스 진입 방향의 튜브 내면에서도 관찰되었다(Fig. 2d). 이외에도 누수가 발생하지 않은 C26 튜브를 절단하여 내면을 살펴본 결과, 관통 균열로는 성장하지 않았으나 원주방향으로의 주름 균열이 관찰되었다.

2.2 분석 계획

모듈이 겪게 되는 환경으로부터의 외부 응력이 균열에 영향을 미쳤다면, 균열의 진전 방향 관찰을 통해서 힘의 방향을 충분히 예측할 수 있으며, 누수가 헤더-튜브 용접부와 가까운 위치에서 방향성을 가지고 발생했으므로 용접부에 의한 열화 및 구조적인 문제를 검토할 필요가 있다. 따라서, 배기가스의 진입 방향쪽 튜브 내면으로부터 원주 방향을 따라 주름 형태로 발생한 균열이 어떤 특성을 가지고 전파했는지를 분석하는 것이 매우 중요하며, 주변 미세조직의 열화 분석도 필수적이다.

정상부(Sample 1,2) 및 파손부(Sample 3,4) 샘플은 C25 튜브로부터 Fig. 3a와 같이 방전가공을 통해 절삭하였다. 절삭된 관찰용 샘플은 두 가지 형태로 단면 관찰용(Sample 1,3)과 내면 관찰용(Sample 2,4)이며, 각각 $5 \times t \times 12 \text{ mm}^3$ 과 $18 \times t \times 15 \text{ mm}^3$ 의 크기를 가진다. 관찰된 단면 및 내면은 $1 \mu\text{m}$ 다이아몬드 서스펜션까지 기계적으로 연마된 뒤 나이트알 용액으로 에칭되었고, 광학현미경을 통해 분석이 이루어졌다. 산화막은 에너지 분산형 X선 분광법(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)를 통해 분석되었다. 발견된 균열의 형상이 원주 방향을 따라 진전하므로 축 방향 응력이 균열의 발생 및 성장에 기여했다고 추측해볼 수 있으며, 튜브에 가해질 수 있는 응력 상태 및 그 원인을 파악하기 위한 기존 연구 조사가 병행되었다.

3. 연구결과

3.1 외관 관찰

C25, 26, 28, 29 튜브의 내면 관찰을 통해 배기 가스 진입 방향의 튜브 내면에 원주 방향을 따라 진전하고 있는 균열들을 발견하였으며, C25 튜브에서는 절삭 위

치 상단(헤더-튜브 용접부에서 ~5 mm 위치)에서부터 ~1 mm 지점 구간 사이에서 약 15 mm 길이의 균열들이 관찰되었다(Fig. 2).

Fig. 2c로부터 C25 튜브의 내외면 부식 상태를 확인할 수 있다. 외면은 적색의 산화물로 덮여 있으며, 내면에는 어두운 적색의 산화물이 고르게 퇴적되어 있다. 상대적으로 외면의 부식이 내면에 비해 더 많이 발생하였으나 심각한 수준은 아니며 균열이 내면에만 분포하고 있으므로 외면의 부식은 누수에 직접적인 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 균열이 발생한 위치를 제외한 내면 부분은 건전한 상태이며, 보일러에서 많이 보고되는 부식의 형태인 유동가속부식, 염기성 부식 및 공식 부식 등에 의한 손상은 없었다 [1-3].

3.2 미세조직 및 균열 분석

광학현미경으로 촬영된 정상부 샘플 1,2의 미세조직 사진이 Figs. 3c-d에 제시되어 있다. 평균 결정립 크기는 $\sim 16 \mu\text{m}$ 수준으로 밝은 페라이트(Ferrite)와 어두운 펄라이트(Pearlite)로 이루어져 있다. 축방향에 따른 미세조직적 차이가 없어 균열이 발견된 위치에서의 용접으로 인한 열화는 없었으며, 이는 C25의 절삭 위치(균열 발생 위치)가 헤더-튜브 용접 열영향부를 벗어날 만큼의 거리라고 해석할 수 있다.

Fig. 3c는 정상부 단면 관찰용 샘플 1의 200배, 500배율 미세조직 사진으로서, 두께 방향(Thickness direction)으로의 열화가 발견되었다. 튜브 내부 보일러 수와 접촉하는 산화막 주변의 결정립은 약 $50 \mu\text{m}$ 수준으로 조대화되어 있으며, 이 주변의 펄라이트 양은 매우 적게 나타났다. 보일러 수와 접촉하는 산화막은 모재 내면을 따라 고르지 못하게 형성되어 있는 것을 알 수 있었으며, 고배율 사진에서 $\sim 52 \mu\text{m}$ 의 두께를 가지며 다공성으

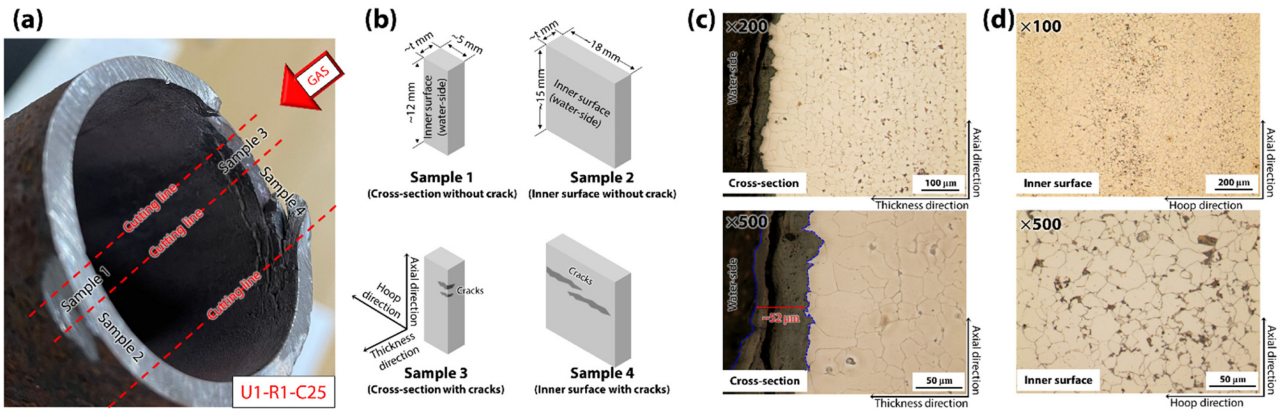


Fig. 3. (a) Sampling for the analysis of U1-R1-C25 tube, (b) Geometry of each sample, (c) Cross-section view showing the oxide layers in the sample 1, and (d) Microstructure of the sample 2

Table 2. Analyzed chemical composition of oxide layers observed by EDS

Element	C	O	Fe	Si
at.%	8.6 ± 1.8	53.8 ± 1.7	37.4 ± 0.9	0.2 ± 0.1

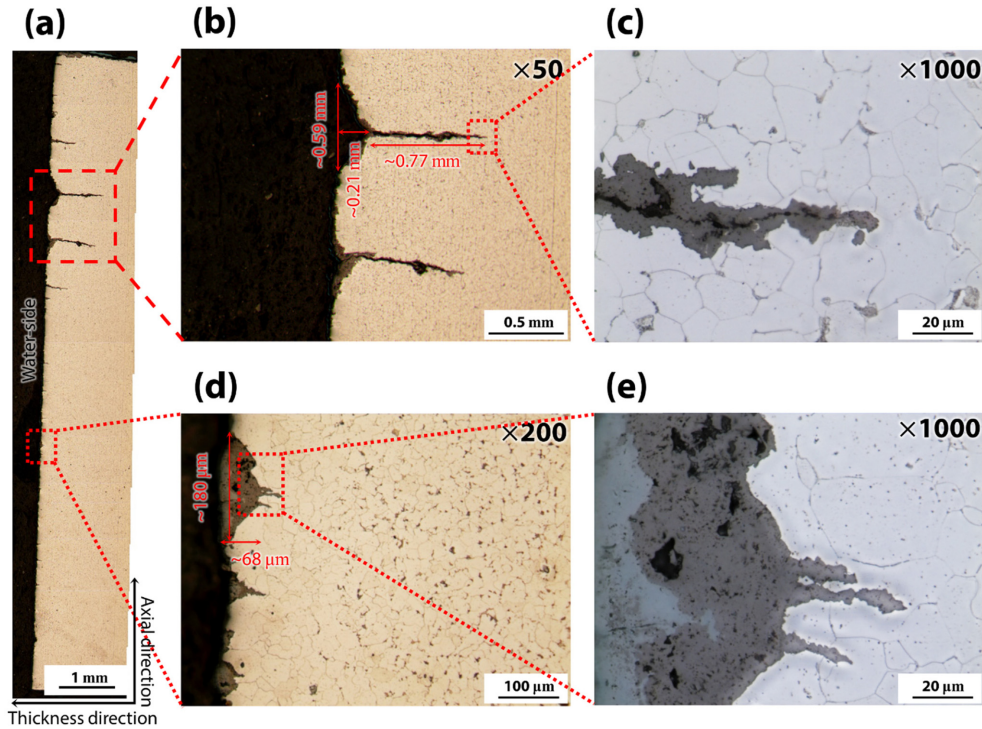


Fig. 4. (a) Cross-section view of the sample 3. (b) Cracks from the pits and (c) Its crack tip with oxide scale, (d) Pits, oxide products, and coarsened grain structure, and (e) Oxide scale propagated to the matrix.

로 이루어진 것을 확인하였다(전처리를 위해 사용된 성형용 수지에 의해 산화막이 수지와 모재로 각각 분리되었음). 산화막의 화학적 조성을 Table 2 나타내었으며, 검은색을 띠는 것으로 보아, 주로 마그네타이트(Fe_3O_4)로 구성되어 있음을 예측할 수 있었다. Fig. 3d는 정상부 내면 관찰용 샘플 2의 미세조직으로, 페라이트와 펄라이트가 축방향을 따라 약한 띠구조를 가지는 것이 관찰되었으며, 전반적으로 미세조직은 건전하였다.

Fig. 4는 파손부 단면 관찰용 샘플 3의 미세조직을 보여준다. 길고 짧은 균열들이 두께 방향을 따라 진전하고 있는 것이 관찰되었으며, 정상부 샘플들과 동일하게 내면에 산화막, 산화막 주변의 미세조직 조대화, 내면 주변 펄라이트의 부재가 발견되었다(Figs. 4b-e). 샘플 3의 단면에서 발견된 많은 균열들 중 두께 방향을 따라 가장 길게 전파한 균열이 Fig. 4b에 제시되어 있는데, 이 균열은 $\sim 0.59 \times 0.21 \text{ mm}^2$ 크기의 구덩이(pit)로부터 $\sim 0.77 \text{ mm}$ 길이를 가지며, 표면으로부터 $\sim 0.98 \text{ mm}$ 진전해 있는 것이 관찰되었다. 이 균열의 끝단에서는 균열의 끝단입에도 불구하고 회색의 부식생성물이 입내 균

열(Transgranular cracking)과 공존하고 있는데, 이를 통해 부식과 균열이 함께 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 4c). 균열의 초기는 Fig. 4d를 통해 유추해볼 수 있는데, $\sim 180 \times 68 \mu\text{m}^2$ 크기의 회색의 산화막이 발생 초기에 관찰되었고, 이를 고배율로 살펴보면 결정립 내로 날카롭게 전파하고있는 산화막이 관찰된다(Fig. 4e). 이는 산화막으로부터 균열이 전파되었다가 부식이 발생하면서 모재에 비해 부피가 큰 산화막이 균열을 채운 것으로 보인다.

전처리된 내면 관찰용 샘플 4는 내면에 수 mm 수준의 크고 작은 균열들이 원주 방향을 따라 진전해 있는 것을 보여준다(Fig. 5a). 충분히 벌어져 성장한 균열(Fig. 5b) 및 상대적으로 작은 균열(Fig. 5c)이 모두 관찰되었는데, 각각의 균열들은 모두 회색의 산화막과 함께 발견되었으며, 이는 Fig. 5d-e에도 잘 나타나 있다. 균열은 끝단과 끝단 근처에서 입내 균열 형태로 진전하였으며, 2차 균열의 전파도 입내 균열을 띄며 부식 생성물로 덮혀있었다. Fig. 5c에서, 페라이트와 펄라이트의 축방향을 따르는 약한 띠 구조가 발견되었고, 균열을 제외한 다른 미세조직적 열화는 발견되지 않았다.

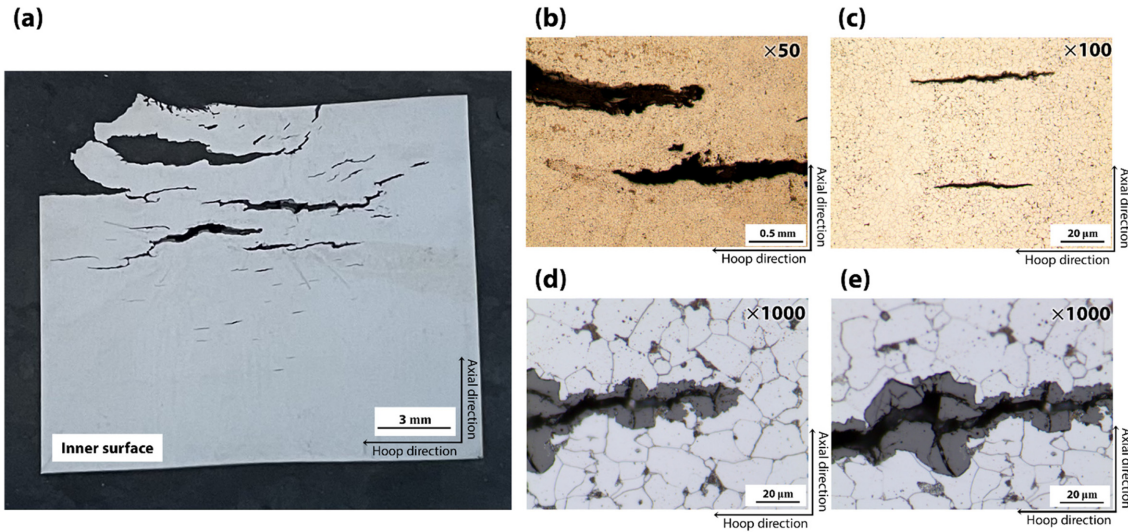


Fig. 5. (a) Inner surface view of the sample 4, (b) Coarse cracks, (c) Fine cracks, (d) Crack tip with the oxide products, and (e) Cracking path with branches and oxide products

4. 토의

복수예열기 U1-R1-C25 튜브에서 발견된 누수 및 균열은 헤더-튜브간 용접부로부터 5-6 mm 튜브 구간에서 발견되었으므로 용접에 의한 열화가 의심될 수 있다. 참고문헌[9]에 제시되어 있는 헤더-튜브간 용접 방법에 의하면 용접부 및 튜브 열영향부에 대하여 원주 방향으로의 용접 방향성은 존재하기 어렵다. 하지만 누수는 가스 및 맞닿는 면으로의 방향성을 가지고 발생했을 뿐만 아니라, 미세조직 평가 결과(Figs. 3-5)에 따라 축 방향에 따른 미세조직적 열화는 발견되지 않았으므로 용접에 의해 열화된 미세조직에 의한 누수는 고려되지 않는다.

튜브의 열화 요인은 튜브 내면의 결정립 조대화, 펄라이트의 부재, 불균일한 다공성 산화막이다. 결정립의 조대화는 Hall-Petch 관계에 따라 강도 저하에 기여하고, 펄라이트는 페라이트와 시멘타이트의 층상구조를 갖고 있으며 페라이트보다 기계적 물성이 우수하므로 펄라이트의 부재는 강도 저하를 일으킨다. 산화막의 불균일성은 외부의 응력이 가해졌을 때 국부적 응력 집중을 발생시키며, 다공성은 치밀한 산화막에 비해 깨지기 쉬운 모재를 보일러 수에 노출시키기 쉽다. 불균일한 다공성의 산화막은 보일러 수처리 방법에 따른 영향일 수도 있으나 외부로부터 지속적으로 가해지는 응력에 의해 치밀하게 형성되지 못했거나 손상된 것일 수 있다 [1]. 즉, 외부로부터 튜브가 응력을 받는다면, 내면의 균일하지 못한 산화막 주변으로 국부적 응력 집중 위치가 발생하고 산화막이 불안정해져 지속적으로 모재가 부식될 수 있으며, 해당 위치는 조대화된 결정립과 펄라이트의

부재로 인해 상대적으로 약한 강도를 갖기 때문에 외부의 응력에 쉽게 손상될 수 있다.

관찰된 균열은 항상 부식 생성물과 함께 발견되었으므로(Figs. 4-5), 이로부터 가장 쉽게 고려할 수 있는 파괴 기구는 응력 부식 균열이다. 보통의 응력 부식 균열은 부식이 발생하기 쉬운 입계를 따라 진행되며 결정립 간 결합력이 약화되면서 균열은 취약한 입계를 따라 성장한다. 그러나 본 연구에서 발견된 균열은 부식으로 인해 열화된 내면으로부터 시작하였으나, 전형적인 응력 부식 균열과는 다른 거동을 하였다. 균열은 결정립 내 슬립면(특정 결정면)을 따라 원주 방향으로 성장하는 입내 균열의 형태를 보였으며, 이는 균열의 성장을 구동시키는 축방향 인장 응력이 존재한다는 것을 의미한다. 한편, 균열을 따라 발생된 회색의 산화물은 큰 부피를 갖는 마그네타이트(Fe_3O_4)이므로, 결정립 내 부식 생성물 발생 및 균열의 성장을 촉진할 수 있어 기계적 건전성 저하를 일으킨다.

균열 생성 및 성장의 구동력은 축 방향 응력이므로, 튜브의 제작 및 헤더-튜브간 용접 시 발생할 수 있는 잔류응력과 해당 부품이 노출되는 환경을 고려해야 한다. Karthikeyan *et al.* [10]은 곡률을 갖도록 제작된 튜브는 곡률반경이 큰 쪽으로 인장 응력이 걸린다고 보고하고 있다. 한편, Jin *et al.* [11]은 헤더-튜브간 용접 토우부(Toe)쪽 튜브에서 약 200-300 MPa의 축 방향 압축 잔류응력이, 용접 루트(Root)쪽 튜브에는 약 300-330 MPa의 축 방향 인장 잔류응력이 걸린다고 보고하였다. 이 연구에서 용접 루트는 내면에 해당하고 용접 토우부는 외면에 해당하므로 용접부와 맞닿는 튜브 내면에 강한 인장

응력이 발생함을 의미한다. 본 연구에서 균열이 발생한 위치와는 차이가 있지만, 축 방향을 따라 용접부로부터 멀어질수록 내면에는 인장 잔류응력이, 외면에는 압축 잔류응력이 감소하면서 분포되어 있을 것으로 예상해 볼 수 있다. 인장 잔류응력은 변형과 파손을 일으킬 수 있어 기계적 건전성에 매우 해로우므로, 제작과 용접 시 발생하는 내면의 축 방향 인장 잔류응력은 내면에 생성된 산화막 및 구덩이로부터 원주 방향 및 두께방향으로 균열이 생성되고 성장하게 만드는 구동력이 된다.

예열기 및 절단기는 주기적 문제로 인해 모듈 내 불균형이 발생할 수 있다 [12]. 가동을 하지 않는 낮은 온도 조건일 때는 모듈 내 주입구(Inlet)과 배출구(Outlet)에 대해 균형을 이루고 있지만, 가동 중인 높은 온도 조건에서는 주입구와 배출구간의 온도 차이와 주입구에만 설치된 통제 장치로 인한 구속으로 인해 모듈 내에서 불균형이 발생한다. 모듈 내 불균형은 튜브로 하여금 모든 방향으로의 응력을 야기시킬 수 있는 요인이 된다. 실제로 본 연구에서 다루고 있는 복수예열기는 60 °C에서 하부 헤더 D2가 아래로 5.4 mm 내려가고, 170 °C에서는 아래로 21.6 mm 내려간다고 보고되었다. 즉 60-170 °C의 온도 변화는 16.2 mm의 변위 차를 만들어 내면서 피로 응력을 발생시킨다 [13]. 이부운 [14]의 연구는 이를 뒷받침하는데, 보일러 내 열교환에 사용되는 A210-A1과 A213-T11은 설계 압력 및 자체 무게에 의한 26.8-32.1 MPa의 하중을 겪으며, 열과 압력을 고려하면 24.4-29.6 MPa의 반복 하중을 겪는다고 보고하였다. 즉 비가동중에는 ~30 MPa 수준의 크리프를, 가동 중에는 30-57 MPa 수준의 인장-인장 피로를 겪는다고 해석할 수 있다. 본 연구팀의 사전 연구에 따르면 SA178A의 상온 항복강도, 인장강도, 연신율은 각각 204 MPa, 316 MPa, 36.3%로 나타났는데, 소재가 겪게 되는 피로 응력은 항복강도의 15-28% 였다. 비록 소재 차이는 있지만 고온 환경을 고려했을 때, 이러한 수준의 피로 응력 만으로도 충분히 균열의 발생 및 성장이 가능한 조건이며 부식 환경과 잔류응력이 결합된다면 이보다 낮은 응력 조건이어도 충분할 것으로 보인다.

잔류응력, 열 피로와 더불어 내재적 요인인 튜브의 구조가 균열에 기여할 수 있다. 정재현 *et al.* [13]에 따르면 헤더와 가장 가까운 튜브에서 응력이 가장 높다고 보고하고 있는데, 이는 실제로 잔류응력 등에 의한 취약 부위다. 장현운 *et al.* [15]의 연구에서는 짧은 피로 주기에도 곡관은 쉽게 관통 균열이 발생할 수 있음을 보였으며, Kusmono *et al.* [16]는 곡관의 곡률 반경이 큰 부분의 내면에 가장 높은 유속으로 인한 높은 압력이 걸린다고 주장하였다. 헤더와 연결된 곡관에 축 방향을 따라 인장 응력이 가해진다면, 곡률반경이 작은

부분(배기가스의 배출 방향)의 외면(배기가스 접촉면)에서 상대적으로 큰 축 방향 인장 응력이 걸릴 것으로 예상할 수 있으며, 반대로 내면(보일러 수 접촉면)에는 상대적으로 큰 축 방향 압축 응력이 발달할 것이다. 이와 같은 경향으로, 곡률반경이 큰 부분(배기가스 진입 방향)의 내면에서는 상대적으로 약한 축 방향 인장 응력이, 외면에는 상대적으로 약한 축 방향 압축 응력이 발달할 것이다. 따라서 인장 응력이 걸리는 위치인 곡률 반경이 작은 부분의 외면과 곡률반경이 큰 부분의 내면은 원주 방향을 따라 균열이 발생하기 쉬운 위치이다. 하지만 두 위치 중에 곡률반경이 큰 부분의 내면에 균열이 발생한 이유는 보일러 수와 맞닿는 면에서의 부식의 영향이 더 컸기 때문으로 생각된다.

5. 결론 및 대책

본 연구는 배열회수 보일러 내 복수예열기의 상부 헤더에 용접되어 있는 튜브의 누수에 대한 원인을 분석하였다. 누수가 발생한 위치는 용접과 생산 시 발생한 잔류 응력에 의해 취약한 위치이다. 보일러를 가동함에 따라 모듈 내 온도 차로 인한 불균형이 발생하였고, 이와 함께 지속 하중과 열 피로로 인한 반복 하중을 겪으면서 튜브에 인장-인장 형태의 피로가 발생하였다. 모듈에 인장 응력이 발생하면서 곡률 가진 튜브의 구조상 가스가 진입하는 방향인 큰 곡률 반경을 가지는 부분의 내면에 응력이 집중되면서 이 부분의 산화막이 불안정해졌으며, 특히 부식이 많이 발생한 위치에서부터 열화된 미세조직을 따라 피로에 의한 입내 균열이 발생하면서 두께 방향과 원주 방향을 따라 균열이 진전하였다. 지속적인 열 피로로 인해 균열의 진전과 부식이 반복되는 응력 부식 균열의 성장이 결국 관통 균열을 만들어 누수를 발생시켰다.

이에 대한 대책으로는 1) 헤더-용접간 용접시 잔류응력 완화가 가능한 용접법 사용 또는 개발, 2) 생산된 곡관에 대한 잔류응력 관리, 3) 운전 중 모듈 내 불균형 해소 방안 수립, 4) 상부 헤더 튜브와 같은 취약 부위의 두께 증가, 5) 튜브의 곡률 반경 검토, 6) 응력 부식 균열 저항성 소재 사용, 7) 치밀한 산화막을 형성할 수 있는 소재의 검토로 고려해 볼 수 있다.

Acknowledgements

본 연구는 한국지역난방공사의 지원에 의해 수행된 연구입니다. 김우철, 김경민은 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 연구를 수행하였습니다 (No. 2017010000190).

References

1. M. Hong, H. Chae, W. C. Kim, J.-G. Kim, H. Kim, and S. Y. Lee, Failure Analysis of a Water Wall Boiler Tube for Power Generation in a District Heating System, *Metals Materials International*, **25**, 1191 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00267-6>
2. M. Hong, H. Chae, Y. Kim, M. J. Song, J. Cho, W. C. Kim, T. B. Ha, and S. Y. Lee, Flow-Accelerated Corrosion Analysis for Heat Recovery Steam Generator in District Heating System, *Korean Journal of Materials Research*, **29**, 11 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2019.29.1.11>
3. Y. Kim, H. Chae, M. Hong, M. J. Song, J. Cho, S. Y. Lee, W. C. Kim, and T. B. Ha, Corrosion Failure Analysis of the Convection Part of District Heating Peak Load Boiler, *Corrosion Science and Technology*, **18**, 55 (2019). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.2.55>
4. H. Lee, H. Chae, J. Cho, W. C. Kim, J. C. Jeong, H. Kim, J. G. 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>
5. J. Cho, H. Chae, H. Kim, J.-G. Kim, W. C. Kim, J. C. Jeong, 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>
6. Y. S. Kim, H. Chae, W. C. Kim, J. C. Jeong, H. Kim, J.-G. Kim, and S. Y. Lee, Failure Analysis on Localized Corrosion of Heat Transport Pipe in District Heating System, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 122 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.3.122>
7. H. Chae, H. Wang, M. Hong, W. C. Kim, J.-G. Kim, H. Kim, and S. Y. Lee, Stress Corrosion Cracking of a Copper Pipe in a Heating Water Supply System, *Metals Materials International*, **26**, 989 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00386-0>
8. H. J. Kwon, Master Thesis, Yonsei University, Seoul, (2017).
9. T. Shyju, C. Saravanan, T. Senthil Kumar, and B. Kumaragurubaran, Static Analysis of Tube to Header Weld Joint Configurations, *International Journal of Engineering Research & Technology*, **5**, 440 (2016). Doi: <https://doi.org/10.17577/ijertv5is050631>
10. M. Karthikeyan, M. P. Jenarathanan, R. Giridharan, and S. J. Anirudh, Effects of Wall Thinning Behaviour During Pipe Bending Process—An Experimental Study, *Innovative Design Analysis and Development Practices In Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, pp. 315-324 (2019). Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4_35
11. H. Jin, D. Lee, S. Shin, and D. Park, A Study on Welding Distortion and Residual Stress for Tubular Welded Joint, *Journal of Welding and Joining*, **30**, 51 (2012). Doi: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.5.445>
12. J. M. Pearson and R. W. Anderson, *ETD: International Seminar on Cyclic Operation of Heat Recovery Steam Generators (HRSGs)*, (2005).
13. C.-H. Chong and Jung-Il Song, Stress Behaviors of Superheater Tubes under Load Change Operation in HRSG, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **28**, 33 (2008). Doi: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200819463917983.page>
14. B. Y. Lee, Evaluation of Stress and Fatigue Life of a Tube Bundle and Header for the High-Pressure Evaporator of a Heat Recovery Steam Generator, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, **42**, 1087 (2018). Doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.12.1087>
15. H. W. Jang, J.-W. Jung, and J.-W. Hong, Fatigue Fracture Analysis of Curved Pipes Under Cyclic Loading, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, **29**, 363 (2016). Doi: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2016.29.4.363>
16. Kusmono and Khasani, Analysis of a failed pipe elbow in geothermal production facility, *Case Studies In Engineering Failure Analysis*, **9**, 71 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2017.08.001>