

배열회수보일러 고압 슈퍼히터 튜브 열화도 평가

송민지¹ · 최가현¹ · 채호병¹ · 김우철² · 김희산³ · 김정구⁴ · 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

(2022년 2월 10일 접수, 2022년 2월 10일 수정, 2022년 2월 10일 채택)

Degradation Evaluation of High-Pressure Superheater Tube in Heat Recovery Steam Generator

Min Ji Song¹, Gahyun Choi¹, Hobyung Chae¹, Woo Cheol Kim², 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 February 10, 2022; Revised February 10, 2022; Accepted February 10, 2022)

In this work, the degradation of high-pressure superheater tubes exposed to the flame of a duct burner in a heat recovery steam generator of a district heating system was evaluated. To assess the deterioration of the used superheater tube, the microstructure, microhardness, and tensile properties were investigated by comparison to an unused tube. The study found that a fin bound at the outer surface of the used tube became fragile only in the location facing the flame. This indicates that the tube was directly exposed to the flame from the duct burner or underwent abnormal overheating. While the unused tube showed a uniform value in hardness and equiaxial grain structure, the used tube revealed a decrease in hardness up to 105 HV and an increase in grain size with a plate-like morphology in the location facing the flame. The coarsening of the grain structure by the flame weakened the mechanical properties of yield strength, tensile strength, and elongation.

Keywords: Heat recovery steam generator, High-pressure superheater, Degradation, Flame, Overheating

1. 서론

지역난방 시스템은 열 생산시설에서 난방수를 생산해 지하 매설된 열수송 배관망을 통해 지역 단위로 공급하는 시스템이다[1,2]. 열 생산시설 중 열병합발전시설은 가스터빈으로 1차전력을 생산한 후 배출되는 열을 회수하여 난방에 사용한다. 열병합발전시설인 배열회수보일러는 효율적인 열 생산을 위해 여러 개의 모듈로 구성되며, 배열회수보일러의 기본 구조는 superheater, evaporator,

economizer로 이루어진다. 전단에는 고압부(high-pressure, HP), 후단에는 저압부(low-pressure, LP) 모듈이 위치하며, 모듈의 위치마다 가스 및 보일러 수 온도, 유속, 설계 형태 등이 다르기 때문에 다양한 부식 사례가 보고되고 있다. 전단 고압부에서는 주로 열 응력 및 재료 열화에 의한 크리프 및 피로 파손[3-7]이 발생하며, 후단 저압부에서는 온도 하강으로 화학적 또는 물리적 반응에 의해 복합적인 형태로 부식 파손이 발생하는데, 대표적으로 침식 및 유동가속부식[8-11]이 있다. 파손 발생으로 인한 열 공급 차질은 경제적인 손실 문제뿐만 아니라 안전사고로 이어질 수도 있기에 이에 대한 연구는 매우 중요하다.

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

송민지: 박사과정, 최가현: 석사과정, 채호병: 박사후연구원, 김우철: 책임연구원, 김희산: 교수, 김정구: 교수, 이수열: 교수

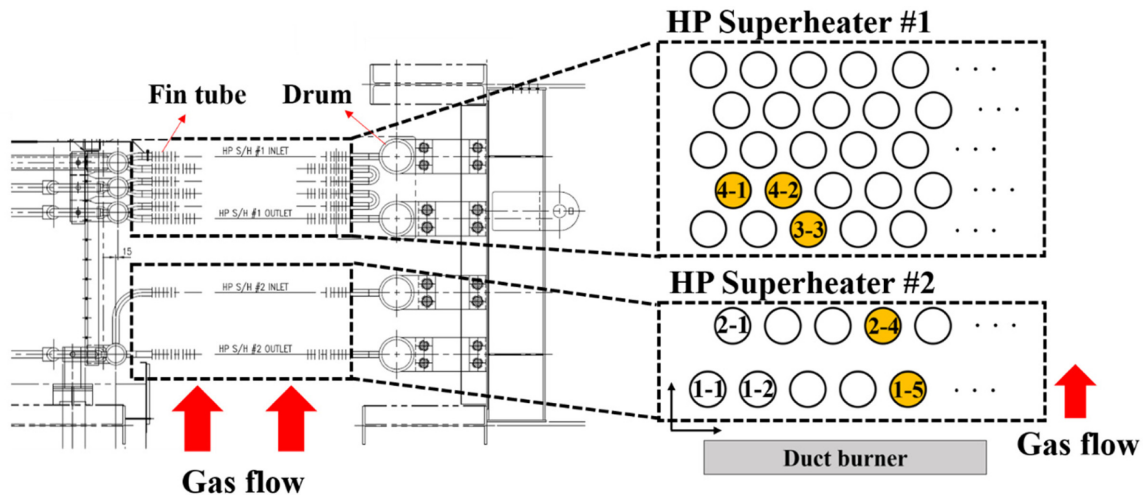


Fig. 1. Schematic diagram of the high-pressure superheater and location of the collected tube samples

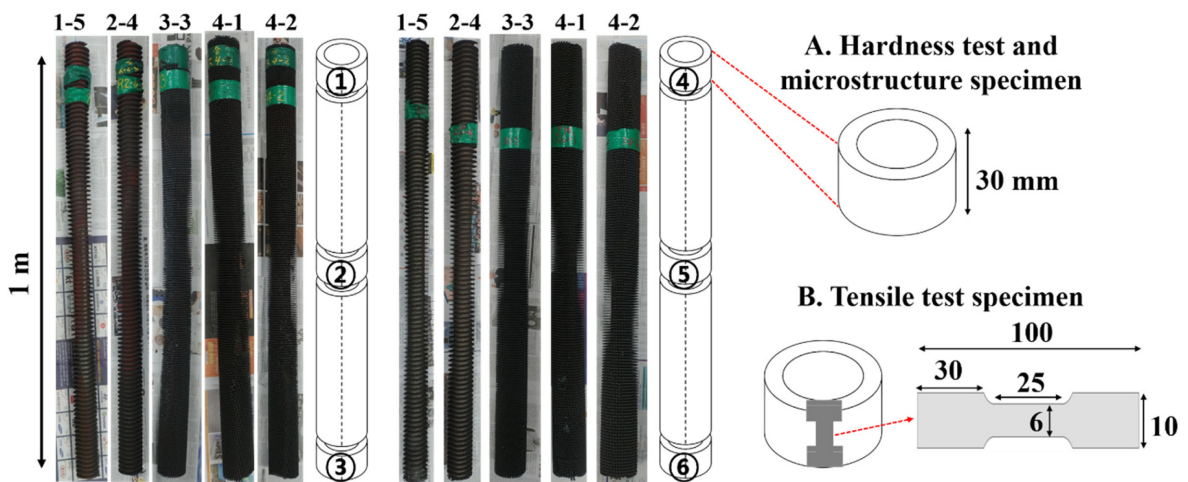


Fig. 2. Deteriorated high-pressure superheater tube samples; specimen geometry (a) for hardness and microstructural investigation and (b) for the tensile test

본 연구에서는 배열회수보일러 HP superheater 튜브에 덕트버너(duct burner)에서 발생한 화염이 닿는 문제가 발생하여 이에 대한 소재의 열화도 평가를 수행하였다. 본 연구에서 다루는 덕트버너는 배열회수보일러 내 보일러와 가스터빈 사이의 후연소 시스템을 말한다. 덕트버너 내 추가적인 연소는 가스터빈의 배기가스 열 효율 및 균일도를 향상시키지만[12], 연소 과정에서 화염이 HP Superheater에 닿는 경우, 튜브의 열화가 발생할 수 있다. 따라서 약 10년 동안 사용된 HP Superheater 튜브 중 이와 같은 열화가 발생했을 것으로 추정되는 튜브들을 선정하여 수집하였다. 경도 및 인장 시험과 미세조직 관찰을 통해 해당 부품들의 기계적, 미세조직적 열화도를 평가하였으며, 이를 기반으로 대책이 수립되었다.

2. 연구방법

배열회수보일러의 HP superheater의 튜브는 덕트버너에서 발생한 화염에 의해 열화가 의심되어 부분 교체되었고, 그 중 5개의 위치(1-5, 2-4, 3-3, 4-1, 4-2)에서 샘플이 수집되었다(Fig. 1). superheater의 튜브는 열 교환 성능 향상을 위해 외면에 핀(Fin)이 나선으로 감겨지며 용접되어 있는 형태이다(Fig. 2). 이 튜브는 ASME A213 T91 (SA213-T91) 규격에 따르는 8-9.5%의 크롬이 함유된 소재로 이루어져 있으며, 핀은 AISI 409 (409SS) 규격을 따르는 스테인리스강으로 구성되어 있다(Table 1). 규격에 제시된 튜브에 대한 기계적 물성은 Table 2에 제시되어 있으며, 수집된 튜브들에 대한 열화 정도를 비

Table 1. Nominal chemical composition of ASME T91 tube and AISI 409SS fin [unit: wt%]

Spec. No.	C	Mn	S	P	Si	Mo	Ni	Cr	Fe
SA213-T91	0.07~0.14	0.3~0.6	0.01	0.02	0.20~0.50	0.85~1.05	0.4	8.0~9.5	Bal.
409SS	0.08	1.0	0.045	0.045	1.00	-	0.5	10.5~11.74	Bal.

Table 2. Mechanical properties of ASME T91 tube

Spec. No.	Yield strength	Tensile strength	Elongation to failure	Hardness	
				Vickers	Brinell
SA213-T91	415 MPa	585 MPa	20%	196~265 HV	190~240 HBW

교 평가하기 위해 경도 및 인장 시험, 미세조직 관찰이 수행되었다.

수집된 5개 위치의 고품 튜브들의 외관이 Fig. 2에 제시되어 있으며, 샘플은 각각 동일한 위치(Fig. 1)에서 1m의 길이를 갖는 샘플을 수집하였고 각 위치별 2개씩, 총 10개가 수집되었다. 운영 중 발생하는 순간적인 가열은 해당 튜브들의 큰 기계적 특성 저하를 야기할 것으로 예상되어, 사용되지 않은 미사용 튜브(used)와의 비교 평가가 요구된다. 이에 따라 미사용 튜브도 수집하였으며, 미사용 튜브 및 고품 튜브를 30 mm의 길이로 방전 가공하여 경도와 미세조직을 분석하였고(Fig. 2a), 기계적 물성 평가를 위해 인장 시험편(Fig. 2b)을 제작하였다. 화염의 영향을 튜브 내 위치별로 비교하기 위해 고품 튜브의 경도 및 미세조직 평가 시편은 Fig. 2에서 나타냈듯이 총 6개의 위치에서 제작하였다. 경도는 비커스 경도계를 사용하여 단면을 0.5 mm 간격으로 측정함으로써 단면 위치별 경도 변화를 관찰하였다. 미세조직 관찰을 위해 시편 단면을 ASTM E 407 Vilella's reagent (글리세롤 45 mL, 질산 15 mL, 염산 30 mL)를 사용하여 에칭하였고, 이를 광학현미경 및 주사전자현

미경을 사용하여 조직을 관찰하였다. 재료 내 발견된 석출물의 크기 및 면적을 정량적으로 평가하기 위해 Image J 소프트웨어가 사용되었다. 인장 시험은 ASTM E8 규격을 따라 수행되었다.

3. 연구결과

3.1 육안 검사

Fig. 3은 수집된 고품 튜브 1-5, 3-3 위치의 튜브 외면에 나선 형태로 용접된 핀의 모습을 보여준다. 튜브 단면을 보았을 때, 핀은 회색의 부식생성물로 덮혀있었으며, 위치에 따라 산화막의 박리 및 파손이 관찰되었다. 일반적인 스테인리스강은 대기 중 850-950 °C의 온도에서 크롬 산화물을 형성하지만 1000 °C 이상에서는 내산화성이 저하된다고 보고되고 있으며[13-15], 산화물과 모재 간의 열팽창의 차이가 박리 및 파손을 일으킨다고 알려져 있다[15]. 하지만 수분이 적은 HP superheater의 가동 환경(500-600 °C)에서는 이러한 현상이 발생되긴 어려울 것으로 예상되기 때문에 비정상적인 과열로 인해 이와 같은 핀의 열화 현상이 발생된 것으로 생각

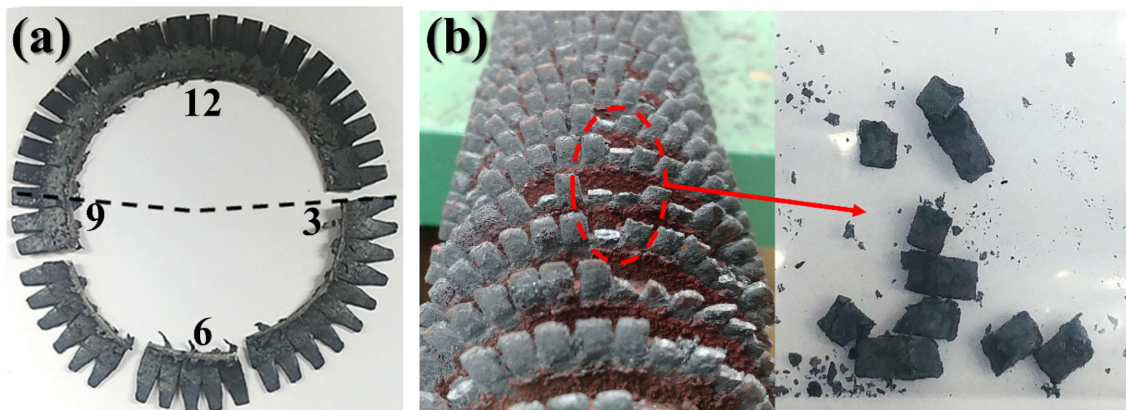


Fig. 3. Visual inspection of deteriorated high pressure superheater fin tube; (a) fin discolored in a specific direction (fin of tube 1-5) and (b) crumble due to deterioration (fin of tube 3-3)

Table 3. Minimum data of hardness test measurements of each cross-section tube sample [unit: HV]

Position	Samples					
	Unused tube	#1-5	#2-4	#3-3	#4-1	#4-2
1	240	218	217	216	216	213
2		217	214	200	188	215
3		218	214	216	182	217
4		222	221	189	219	212
5		223	218	211	216	212
6		190	218	209	213	218

Table 4. Average data of hardness test measurements of each cross-section tube sample [unit: HV]

Position	Samples					
	Unused tube	#1-5	#2-4	#3-3	#4-1	#4-2
1	226	176	192	193	198	199
2		191	186	172	130	196
3		176	171	194	124	205
4		197	196	121	199	185
5		203	200	173	194	172
6		133	204	161	173	205

된다. 핀의 열화는 3시부터 시계 방향으로 9시까지(Fig. 3a)의 구간에 주요하게 나타났으며, 각 시계 방향에 따른 열화도 평가를 수행하였다.

3.2 경도 시험

육안검사를 통해 핀의 열화가 확인되었기 때문에, 위치에 따른 열화도 평가를 위해 샘플 단면에 경도 시험을 실시하였다. 단면 전체의 경도 측정 후 경도 평균값을 Table 3에 나타내었고, 측정된 단면의 경도 데이터

중 최저 값 5개의 평균값을 Table 4에 정리하였다. 측정된 HP superheater 튜브 재료인 SA213-T91은 196~265 HV의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Table 2). 수집된 미사용 튜브의 경도시험 결과값이 해당 범위에 포함되므로 제작과정에서의 재료 문제는 없는 것으로 판단된다. 하지만 화염이 닿은 튜브의 평균 경도 값이 미사용 튜브 대비 최대 약 58 HV 저하된 것으로 분석되었다. 최소 경도 값의 차이를 비교하면 경도 저하가 더욱 뚜렷하게 나타나며, 수치적으로 미사용 튜브가 가지는

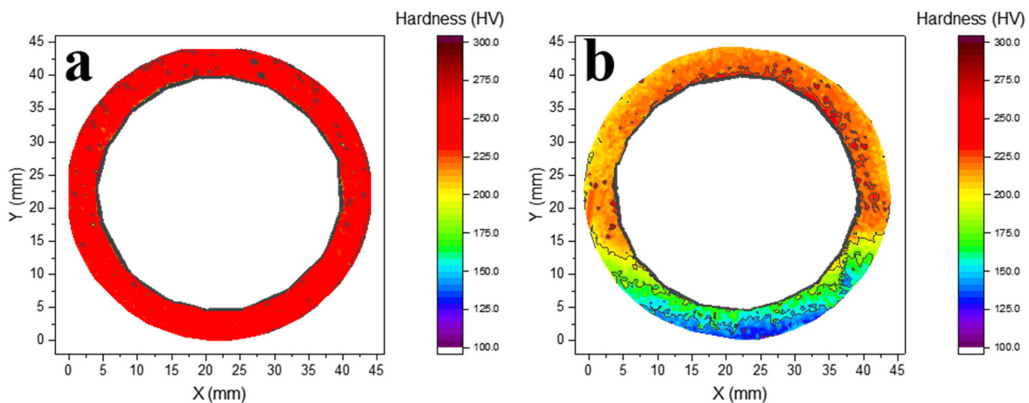


Fig. 4. Contour map for the hardness test result of tube cross-section samples; (a) unused tube, (b) tube 1-5, (c) tube 2-4, (d) tube 3-3, (e) tube 4-1, and (f) tube 4-2

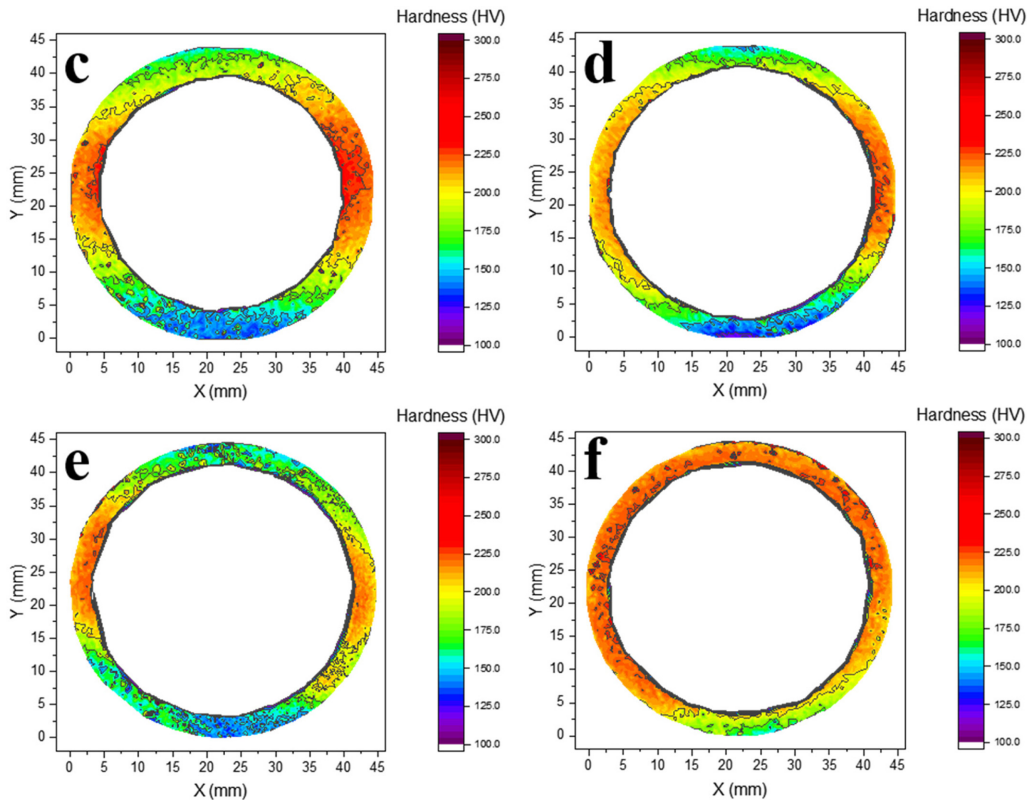


Fig. 4. Continued

최소 경도 값 대비 최대 105 HV 차이를 보였다. 고품은 전체적으로 경도 저하가 나타난 반면 특히 경도저하가 극심하게 일어나는 구역이 나타난 것으로 생각되어 이를 확인하고자 측정데이터를 시각적으로 비교하였다. 최저 경도 데이터(Table 4) 중 각 위치에서 가장 낮은 값을 나타낸 샘플을 선정하여 단면 경도 데이터를 맵핑하였고 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 미사용 튜브는 경도의 변화가 크지 않고 고른 경도 분포를 가졌으나, 고품 튜브는 특정 방향으로 경도 저하가 발생하였다. 경도 저하는 외면에서부터 발생한 것으로 보이며, 이를 통해 화염 진행 경로를 확신할 수 없지만, 가스의 흐름과 동일할 것으로 생각되어진다. 따라서 먼저 가스와 맞닿는 외면(6시 방향)은 가장 먼저 화염을 만나 급격한 물성 저하를 일으킨 것으로 예상되며, 경도시험 결과를 통해 6시방향에서 가장 두드러진 경도의 변화가 확인되었다. 특이한 점은 1-5, 3-3, 4-1 위치의 튜브는 가스 및 화염 방향과 반대되는 12시 방향에서도 경도저하 발생이 관찰되었기에, 화염과 반대 방향에서도 경도 저하를 일으키는 원인은 불분명하기에 이에 대한 추가 조사가 필요하다.

3.3 인장 시험

위치에 따라 서로 다른 경도 값을 보인 2-4, 3-3 튜브

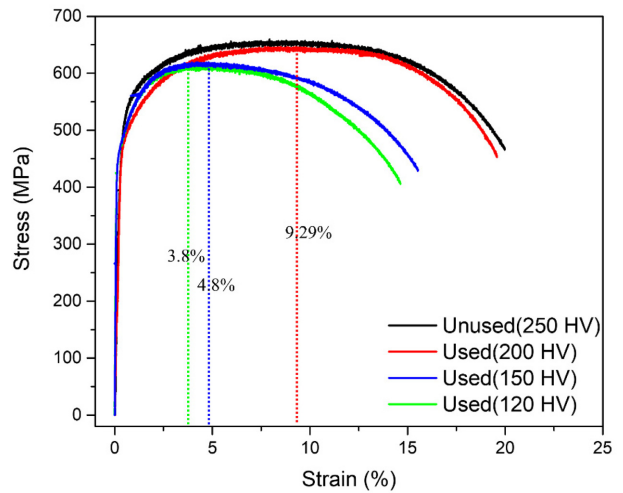


Fig. 5. Strain-stress curves for the specimens machined in the locations corresponding to the hardness measurement positions in the unused tube (250 HV) and the used tubes (200 HV, 150 HV, 120 HV)

에 대해서 200 HV, 150 HV, 120 HV의 경도를 보인 위치에서 각각 인장 시편을 Fig. 2b와 같이 가공한 뒤, 이를 미사용 튜브의 인장 시편과 함께 비교를 위해 인장 시험을 진행하였고, 이에 대한 응력-변형률 실험 결과 값을 Fig. 5와 Table 5에 나타내었다. 검은색의 미사용

Table 5. Mechanical properties for unused (250 HV) and used (200 HV, 150 HV, 120 HV) tubes

Tube	Hardness [HV]	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
Unused	250	503	660	20
Used	200	479	647	20
	150	475	620	16
	120	472	614	15

튜브와 비교하여 고품의 빨간색(200 HV), 파란색(150 HV), 녹색(120 HV)의 항복 강도, 인장 강도, 연신율 모두 감소하였다. 경도 200 HV 위치의 경우 미사용 튜브와 거의 유사한 인장 거동을 보이므로, 비이상적인 화염으로 인한 열화가 거의 발생하지 않은 위치라고 말할 수 있으나, 급격한 경도 저하를 보인 위치들은 경도의

감소뿐만 아니라 부품 건전성에 치명적인 강도와 연신율의 감소가 나타났다. 이는 잔여 수명에도 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3.4 미세조직

Fig. 6은 광학현미경으로 관찰된 미사용 튜브 및 고품

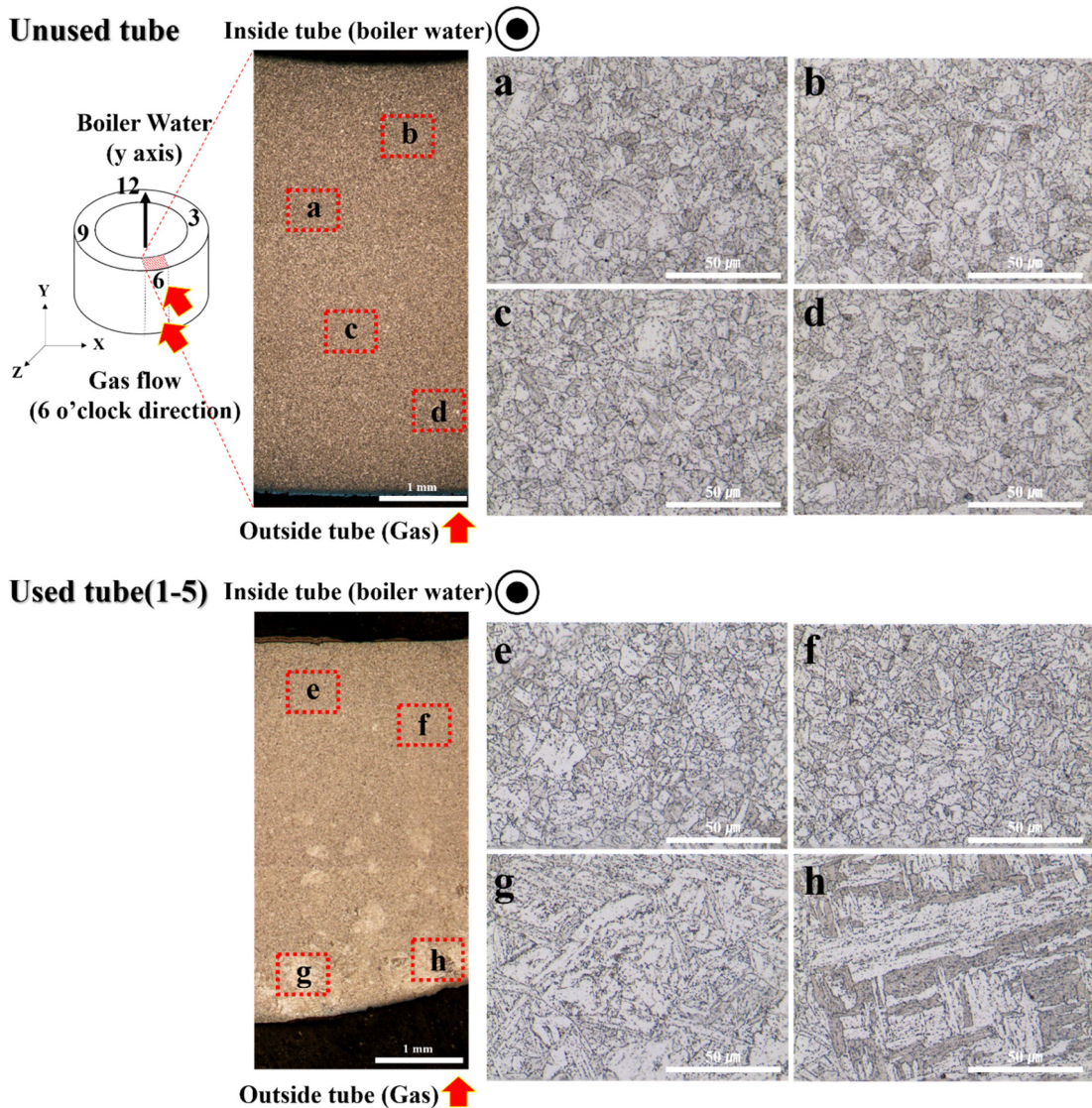


Fig. 6. Optical microscope images measured at 6 o'clock direction of the unused and used cross-section tube sample

튜브(1-5)의 단면 미세조직을 보여준다. 미사용 튜브의 경우, 내외면 위치와 관계없이 등축 결정립을 갖는 균일한 미세조직을 보였다(Figs. 6a-d)[4]. 고품 튜브의 경우에는 보일러 수와 접촉하는 내면 쪽의 미세조직은 미사용 튜브와 같은 미세조직을 보인 반면(Figs. 6e, f), 가스 접촉하는 외면의 미세조직은 이와 뚜렷한 차이를 보였다(Figs. 6g, h). 화염에 노출됐으리라 짐작되는 외면 쪽은 결정립 크기가 상당히 조대화 되어 있었으며 등축이 아닌 판상구조의 미세조직 형태로 변화된 것을 볼 수 있다. 이러한 조대화된 미세조직의 변화가 Hall-Petch 관계식에 따라 경도 및 인장 특성의 저하를 가져온 것으로 보인다.

Fig. 7은 미사용 튜브(Fig. 6b)와 고품 튜브(Fig. 6f)의 확대된 미세조직 사진을 보여준다. 고품 튜브내부의 미세조직은 미사용 튜브와 비슷하였지만 결정립계에 분포한 석출물의 크기가 증가된 것을 볼 수 있다. 고품 튜브의 석출물 크기는 $0.82\ \mu\text{m}$ 로, 미사용 튜브의 석출물 크기(평균 $0.43\ \mu\text{m}$)보다 약 2배 커졌으며, 동일 면적에서 계산된 고품 튜브 석출물의 면적비율은 미사용 튜브보다 약 3배 증가하였다(Table 6). 이러한 석출물의 조대화는 고용강화효과를 감소시켜 고온고압환경에서 장시간 사용하는 내열재료가 갖추어야 하는 열피로 특성을 약화시킨다[16,17]. 본 연구의 튜브와 비슷한 환경에서 사용된 SA-213 T91 슈퍼히터 튜브가 130,000 시간 가동 후 석출물 크기가 초기 $0.44\ \mu\text{m}$ 에서 $0.94\ \mu\text{m}$ 로 성장하였으며, 튜브의 경도가 217 HV에서 203 HV로 감소

하였다고 보고되었다[4]. 이를 통해 튜브 내면 방향으로 나타나는 석출물의 조대화는 정상 가동환경에서 장시간 사용된 튜브에서 나타나는 일반적인 현상으로 판단된다.

4. 결론

열 교환 성능 향상을 위해 외면에 감겨져 있는 핀의 열화가 튜브의 한쪽 면에만 규칙적으로 나타난 결과로부터 튜브가 화염을 직접적으로 받았거나 비정상적인 과열이 발생한 것으로 판단된다.

열화도 평가를 위한 경도 측정 결과, 미사용 튜브는 경도의 변화가 크지 않고 고른 경도 분포를 가지고 있었으나, 고품 튜브는 가스와 맞닿는 특정 방향으로만 경도 저하가 발생하였으며 미사용 튜브가 가지는 최소 경도 값 대비 최대 105 HV 만큼 차이를 보여주었다. 또한 급격한 경도 저하를 보인 위치들은 인장시험 결과 기계적 물성의 상당한 저하를 보여주었다.

고품의 미세조직 분석 결과, 보일러 수와 접촉하는 내면 쪽은 미사용 튜브와 거의 비슷한 미세조직을 갖고 있었지만 미사용 튜브 대비 석출물 크기와 양은 증가하였다. 하지만 이는 정상 가동 환경에서 장시간 사용된 튜브에서 관찰되는 일반적인 현상이다.

화염에 노출됐으리라 짐작되는 튜브 외면 쪽은 상당히 조대화된 결정립 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 조대화된 미세조직의 변화가 고품 튜브의 경도 및 인장 특성의 저하를 가져온 것으로 판단된다.

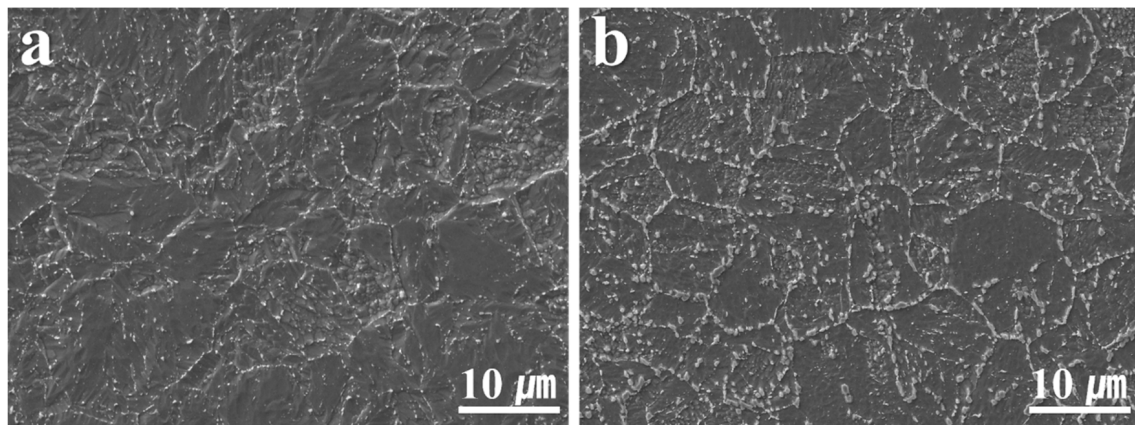


Fig. 7. SEM microstructure at the optical microscope image locations of the unused tube (Fig. 6b) and used tube (Fig. 6f)

Table 6. The average size and area fraction of the precipitates shown in the microstructure of Fig. 7

Precipitates at the grain boundaries	Average size [μm]	Area fraction [%]
Unused tube	0.43	3.0
Used tube	0.82	18.8

Acknowledgement

본 연구는 한국지역난방공사의 지원과 2022년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002019, 2022년 산업전문인력역량강화사업).

References

1. H. Lee, H. Chae, J. Cho, W.C. Kim, J.C. Jeong, H. Kim, J. Kim, 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>
2. J. Cho, H. Chae, H. Kim, J. Kim, W.C. Kim, J. Kim, 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>
3. B.Y. Lee, Evaluation of Safety of Corrosion Fatigue of High Pressure Drum for Heat Recovery Steam Generator Using Transient Thermal Stress Analysis, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, **35**, 1099 (2018). Doi: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.11.1099>
4. Y. Li, J. Du, L. Li, X. Pang, A.A. Bolinsky, Mechanical properties and phases evolution in T91 steel during long-term high-temperature exposure, *Engineering Failure Analysis*, **111**, 104451 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104451>
5. F. Abe, Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants, *Science and Technology of Advanced Materials*, **9**, 013002 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/1/013002>
6. Q. Gao, Y. Zhang, H. Zhang, H. Lim F. Qu, J. Han, C. Lu, B. Wu, Y. Lu, Y. Ma, Precipitates and Particles Coarsening of 9Cr-1.7W-0.4Mo-Co Ferritic Heat-Resistant Steel after Isothermal Aging, *Scientific reports*, **7**, 5859 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06191-2>
7. M. Godec, D.A. Balantic, Coarsening behaviour of $M_{23}C_6$ carbides in creep-resistant steel exposed to high temperatures, *Scientific Reports*, **6**, 29734 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1038/srep29734>
8. D. N. Adnyana, cavitation-erosion study in elbow tubes of a low-pressure evaporator outlet header, *Metallurgji*, **1**, 33 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14203/metallurgji.v35i1.561>
9. S. Tsubakizaki, T. Wada, T. Iwato, T. Nakahara, M. Nakamoto, Y. Noguchi, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, **54**, 3 (2017).
10. S. Tsubakizaki, A. Yoshida, K. Tagami, S. Sato, M. Nakamoto, K. Ohkubo, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, **52**, 105 (2015).
11. M. Nematollahi, M. Rezaeian, Failure Analysis of Low Pressure Evaporator Tubes in a Typical Combined Cycle Power Plant, *Applied Mechanics and Materials*, **110-116**, 4607 (2012). Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.4607>
12. D. Kim, S. Kim, S. Choi, B.J. Lee, J. Kim, Effect of Flame Radiative Heat Transfer in Horizontal-Type HRSG with Duct Burner, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering*, **37**, 197 (2013). Doi: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.2.197>
13. M. Zhang, Y. Han, G. Zu, J. Sun, W. Zhu, H. Chen, X. Ran, High-Temperature Oxidation Behavior of a Cu-Bearing 17Cr Ferritic Stainless Steel, *Scanning*, **2020**, Article ID 8847831 (2020). Doi: <http://doi.org/10.1155/2020/8847831>
14. M. Halvarsson, J.E. Tang, H. Asteman, J. E. Svensson, L. G. Johansson, Microstructural investigation of the breakdown of the protective oxide scale on a 304 steel in the presence of oxygen and water vapour at 600 °C, *Corrosion Science*, **48**, 2014 (2006). Doi: <http://doi.org/10.1016/k.corsci.2005.08.012>
15. K. Jung, S. Kim, Oxidation and corrosion characteristics of AISI 304 steel under atmospheric and SO₂ gas environments at high-temperatures, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **42**, 554 (2018). Doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.7.554>
16. H. Liu, L. Wei, M. Ma, J. Zheng, L. Chen, R. Misra, Laves phase precipitation behavior and high-temperature strength of W-containing ferritic stainless steels, *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 2127 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.043>
17. D. Oh, K. Han, S. Hong, C. Lee, Effects of alloying elements on the thermal fatigue properties of the 15 wt% Cr ferritic stainless steel weld HAZ, *Materials Science and Engineering: A*, **555**, 44 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.031>