

지역난방 증기 터빈 내 조속기 밸브 Inlet pipe 파손 원인 분석

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

(2021년 12월 16일 접수, 2022년 1월 22일 수정, 2022년 1월 22일 채택)

Failure Analysis of an Inlet Pipe of a Governor Valve in a Steam Turbine of a District Heating System

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 and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

(Received December 16, 2021; Revised January 22, 2022; Accepted January 22, 2022)

The objective of this study was to perform failure analysis of an inlet pipe located in a governor valve of a steam turbine in a district heating system. During the operation, the temperature of the governor valve was increased to as high as ~500 °C, which induced thermal expansion of the inlet pipe along both axial and radial directions. While the inlet pipe did not have contact with the valve seat, the side plane of the upside was constrained by the casing part, which led the inlet pipe to experience stress field in the form of fatigue and creep. The primary crack was initiated at about 30 mm below the top where the complex stress field was anticipated. These results suggest that the main failure mechanism is a combination of thermal fatigue and creep during the operation supported by the observation of apparent beach marks on the fracture surface and pores near the cracks, respectively.

Keywords: District heating, Steam turbine, Inlet pipe, Thermal fatigue, Creep

1. 서론

4차 산업 시대가 도래하면서 모든 산업 분야에서 데이터의 중요성이 강조되고 있다. 이는 구조 재료의 파손 분야에서도 동일하게 적용되는데, 구조 재료를 사용하는 모든 분야에서 발생할 수 있는 파손에 대한 정보를 분류하여 이를 4차 산업의 새로운 기술과 접목할 수 있으리라는 기대 때문으로 풀이된다. 본 연구는 지역난방 시스템에서 발생하는 다양한 파손 사례를 수집하고 이를 데이터 베이스화 하고자 하는 목적에서 이루어진 파손 사례 연구로서 [1-7], 지역난

방 시스템 내 증기 터빈의 조속기 밸브에 위치하고 있는 Inlet pipe의 파손 사례를 다룬다.

조속기 밸브는 터빈의 부하 또는 증기 상태로 인한 회전속도를 일정하게 유지하기 위한 제어 장치로서, 증기의 공급량을 조절하여 회전속도 및 부하를 조절하고 고장 정지 시에 증기 공급을 차단하여 터빈을 보호한다. 조속기 밸브는 Fig. 1a에 제시되어 있는데(증기터빈 내 조속기의 자세한 위치 및 구조는 보안상 생략함), 파손이 발생한 부분은 Inlet pipe로서 아래쪽의 노즐 박스 시트(Nozzle box seat) 위에 얹어져 있으며 위로는 밸브 시트(Valve seat)가 위치하고, 케이싱(Casing)에 의해 둘러싸여 있다. Fig. 1a의 빨간색 사각형을 확대한 부분이 Fig. 1b에 제시되어 있으며, 밸브 시트와 케이싱, Inlet pipe의 구조가 자세

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

채호병: 연구원, 김우철: 책임연구원, 김희산: 교수, 김정구: 교수, 이수열: 교수

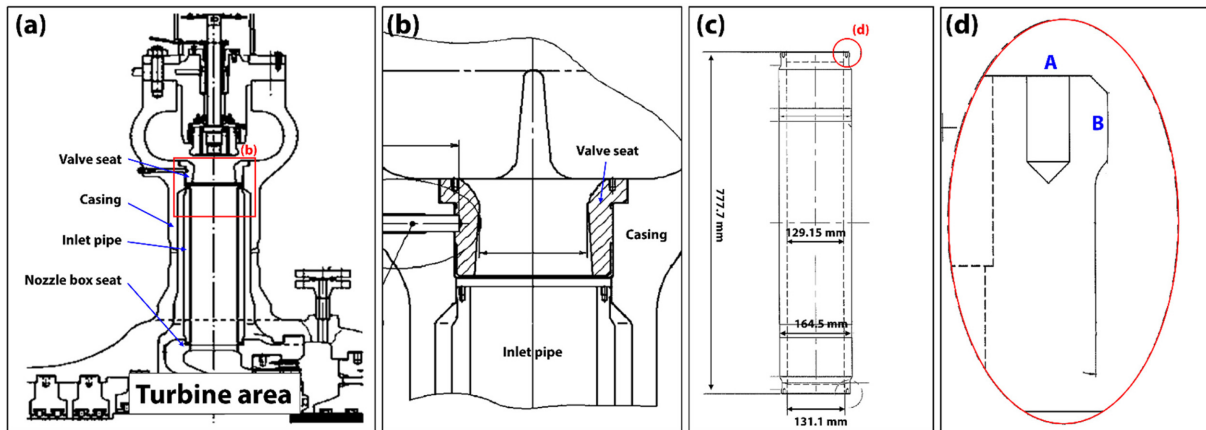


Fig. 1. (a) The structure of governor valve in steam turbine, (b) the magnification of red square marked in Fig. 1a, (c) the structure of inlet pipe, and (d) the magnification of red circle marked in Fig. 1c

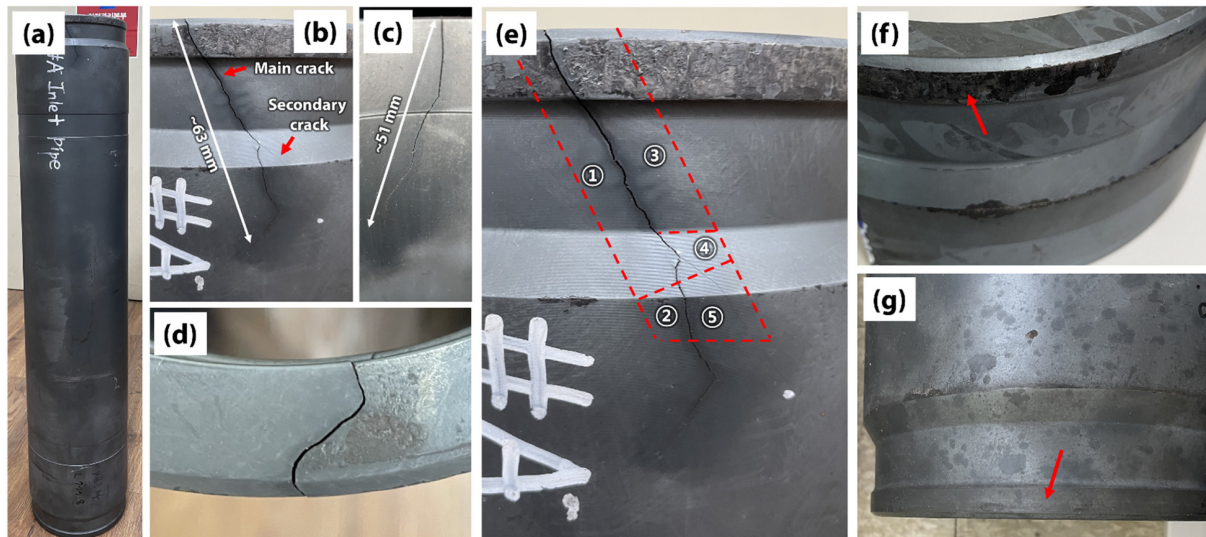


Fig. 2. (a) Failed inlet pipe, (b) primary and secondary cracks on the outer surface, (c) primary crack on the inner surface, (d) primary crack on the upper surface, (e) sampling positions analyzed for the failure analysis, (f) outer surface in the upper side near the valve seat, and (g) outer surface in the bottom side near the nozzle box seat

하게 보여진다. Inlet pipe는 조속기 밸브와 그 아래에 위치한 증기 터빈을 이어주는 배관으로서, Fig. 1c에 제시된 것과 같이 설계도면 기준으로 777.7 mm의 길이, 약 164.5 mm의 지름, 약 12 - 17 mm의 두께를 가진다. Fig. 1c의 빨간색 원 부분을 확대한 그림이 Fig. 1d에 제시되어 있는데, Inlet pipe의 A면은 밸브 시트의 아래 면과 마주 보고, B면은 케이싱의 내면과 마주보는 형태로 이루어져 있다. Inlet pipe는 약 537 °C 및 약 97 bar의 온도 및 압력을 겪는 것으로 확인되었다.

본 연구는 앞서 언급하였듯이, 지역난방 시스템 증기 터빈 내 조속기 밸브의 Inlet pipe의 파손을 다룬다. 파손 현상을 정밀 분석하기 위해, 파손 부품의 이

력과 운영 조건을 확보하였고, 파손이 발생한 Inlet pipe에 대한 고품 분석을 수행함으로써 파손의 원인을 규명하고 이에 대한 대책을 확립하였다.

2. 연구방법

Fig. 2a는 약 1년간 사용된 후 균열이 발생되어 수집된 Inlet pipe를 보여준다. 이 배관의 강종은 P22 UT로서 화학 조성을 Table 1에 제시하였다. 밸브 시트와 마주보는 위치인 Inlet pipe의 윗면으로부터 주요 균열(Main crack)이 약 63 mm의 길이로 성장하였으며, 외면에서는 주요 균열로부터 성장한 2차 균열(Secondary crack)도 발견되었다(Fig. 2b). Inlet pipe의

Table 1. Nominal chemical composition of the inlet pipe (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe
0.05-0.15	0.30-0.60	>0.025	>0.025	>0.5	1.90-2.60	0.87-1.13	Bal.

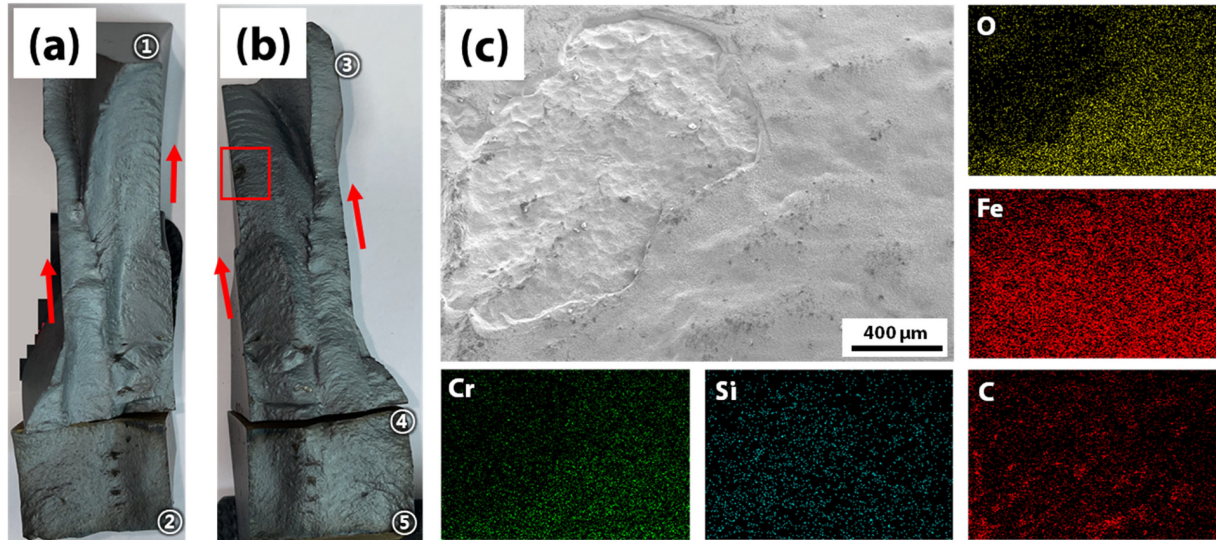


Fig. 3. (a), (b) Fracture surfaces showing the beach marks, and (c) the magnification of the fracture surface marked as the red square in Fig. 3b, which was identified from scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy

내면에서 관찰된 균열의 길이는 약 51 mm 수준으로 나타났으며, 2차 균열은 발견되지 않았다(Fig. 2c). 외면의 균열은 Fig. 2d와 같은 형태로 나타났다. 균열이 발생한 Inlet pipe를 Fig. 2e에 나타낸 5개의 샘플로 가공하였다. 각각을 샘플 1~5로 명명하였을 때, 샘플 1~3은 파단면 분석을 위해, 샘플 4는 파단면 분석 및 외면 분석을 위해, 샘플 5는 두께 방향 단면 분석을 위해 사용되었다.

3. 결과

3.1 외관 분석

Fig. 2는 파단된 Inlet pipe의 형상을 보여준다. 배관의 외면에는 회색의 부식 생성물이 고르게 형성되어 있었다. Fig. 2f의 빨간색 화살표로 표시한 위치는 Inlet pipe가 밸브 시트 방향의 케이싱과 맞닿은 면(Fig. 1d의 B면)으로, 회색의 고른 부식 생성물들이 박리와 생성이 반복적으로 일어나 얼룩덜룩한 반면에, 아래쪽인 노즐박스 시트 방향 Inlet pipe의 B면은 윗쪽과 다르게 상당히 고른 표면 상태를 보이고 있었다. 한편, Inlet pipe의 외면에는 상대적으로 긴 길이의 주요 균열과 2차 균열이 발견된 반면에(Fig. 2b), 내면에서는 상대적으로 짧은 길이의 주요 균열이 발

견되었다(Fig. 2c). 이를 통해 균열이 외면으로부터 발생하여 내면으로 진행했다는 것을 유추할 수 있다.

3.2 파단면 분석

Figs. 3a, b는 Fig. 2e에서 샘플링한 시편 1~5의 파단면을 보여준다. 샘플 1, 3의 파단면에는 아래쪽으로부터 위쪽으로 진행되는(빨간색 화살표로 진행 방향 표시) 뚜렷한 Beach marks가 나타났으며, 이는 피로로 인한 균열 성장의 증거로 볼 수 있다. 반면에 샘플 2, 4, 5의 파단면에는 Beach marks가 발견되지 않았다. Beach marks의 흔적으로부터 균열은 아래쪽에서 생성되어 축방향을 따라 밸브 시트가 위치한 위쪽의 방향으로 균열이 성장한 것으로 판단된다. 균열의 진행 방향은 축 방향으로부터 약간의 각도를 갖는 것으로 보이지만, 전반적으로 축 방향을 따라서 진전되어 있으며, 두께 방향으로도 진행하여 관통된 상태이므로, 주요하게는 원주 방향의 응력이 균열의 성장에 기여했음을 추측할 수 있다. 다만, 파단면이 복잡한 구조로 구성되어 있고, 파단면의 기울어짐(Plane normal vector)이 조금씩 차이가 나는 것을 통해서 원주 방향 응력이 주요하게 작용했지만, 다른 여러 방향의 복잡한 응력 장이 파단면 형성에 동시에 영향을 준 것으로 추정된다.

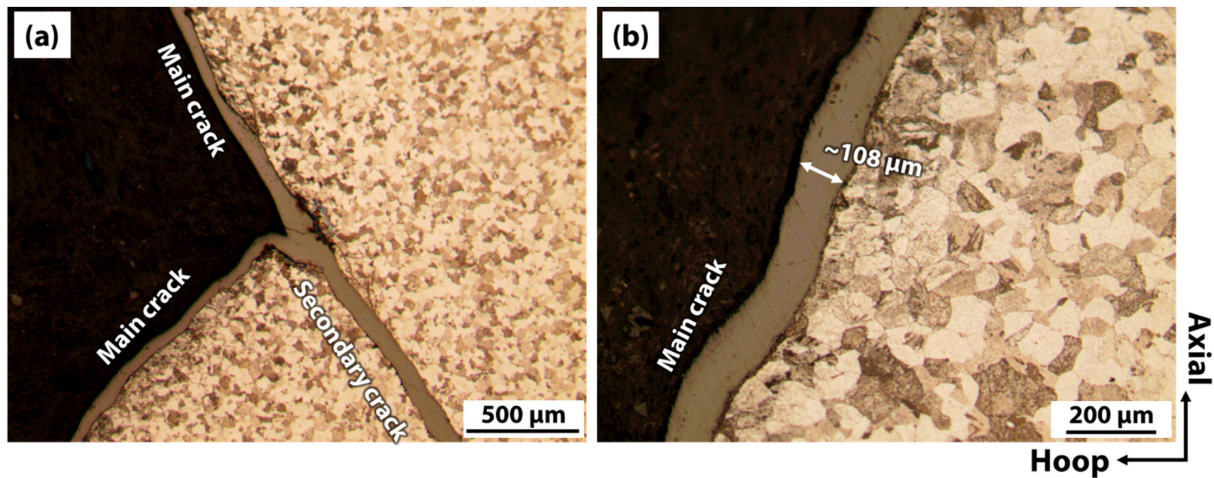


Fig. 4. Optical microscopy images on (a) the outer surface near the primary and secondary cracks, and (b) the microstructure near the primary crack with the oxide layer

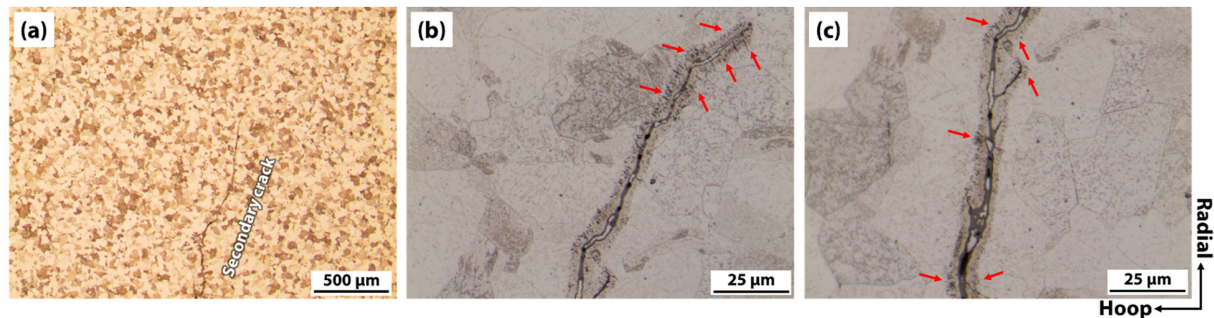


Fig. 5. Optical microscopy images near the secondary crack tip in (a) low magnification, (b) high magnification, and (c) the cracks with the oxide scale

Fig. 3c에는 Fig. 3b 내 빨간색 사각형으로 표시된 어두운 부분에 대한 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM) 결과를 보여준다. 어두운 부분은 파단면의 표면으로부터 물리적으로 박리된 형태에 의한 것이었으며, 이를 에너지 분산형 분광분석법(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)을 통해 산화막의 탈락으로 인해 나타난 결과임을 확인하였다.

3.3 미세조직 및 균열 분석

Fig. 2e에 나타난 샘플 4의 외면 미세조직 및 균열을 광학현미경을 통해 Fig. 4에 나타내었다. Inlet pipe의 미세조직은 밝은 색의 무른 페라이트와 어두운 색의 상대적으로 강한 펄라이트 조직으로 구성되어 있었다. 전반적으로 미세조직의 열화는 발견되지 않았으나, 주요 균열 주변의 미세조직들은 많은 전단 변형으로 인해 상대적으로 더 어둡게 나타났다(Fig. 4b). 주요 균열에는 약 108 μm 두께의 산화막이 밀도 높게 형성되어 있었다.

Inlet pipe의 외면으로부터 내면으로 진행되는 단면

의 2차 균열의 끝단을 보여주고 있는 Fig. 2e에 표시한 위치의 샘플 5의 광학현미경 사진이 Fig. 5에 제시되어 있다. 이로부터 균열의 성질과 성장 기구를 확인할 수 있다. Fig. 5b는 Fig. 5a에 제시되어 있는 2차 균열 끝단의 고배율($\times 1000$) 광학현미경 사진이다. 결정립 상의 종류와 관계없이 결정립 내부로 관통하는 입내 균열의 형태를 보여주었다. 또한 균열 주변으로 균열의 전파 방향과 수직한 방향으로 누워있는 타원형의 무수한 기공들(Fig. 5b, 빨간색 화살표)이 발견되었으며, 이는 균열 끝단 뿐만 아니라 균열의 성장 도중에도 관찰되었다(Fig. 5c, 빨간색 화살표). 이는 균열 끝단 및 주변부가 고온의 환경 아래 응력 집중을 받기 때문에 크리프가 일어나면서 균열 주변에 기공이 형성된 것으로 생각된다.

4. 토의

Inlet pipe의 균열 생성 및 성장에 영향을 줄 수 있는 응력 장(Stress field) 형성에 대한 원인은 다음과

같은 세 가지로 예상된다: 1) Inlet pipe를 조속기에 설치할 때 발생할 수 있는 응력, 2) 증기 터빈 운영 중 고온의 증기가 Inlet pipe와 열 교환하면서 발생시킬 수 있는 응력, 3) Inlet pipe 제작 시 발생할 수 있는 잔류응력이다. Inlet pipe를 증기 터빈으로부터 분리할 때는 다음과 같은 절차를 따른다. 먼저 상부 케이싱을 들어올려 밸브 시트가 아래 방향이 되도록 뒤집고, 1단 다이어프램 및 노즐 박스를 분리하여 Inlet pipe를 인양한다. 조립은 이것의 역순으로 진행하게 되는데 Inlet pipe는 노즐 박스 밸브 위에 자연스럽게 올려져 있으며, 밸브 시트와도 단단하게 체결되어 있지 않기 때문에 설치 구조에 의해 Inlet pipe에 작용하는 축 방향 압축 응력 및 반경 방향 압축 응력은 배제하였다. 상온의 조속기 밸브가 운영 최고 온도인 약 500 °C까지 상승한다면, Inlet pipe는 축 방향과 반경 방향으로 열 팽창할 것으로 충분히 예상할 수 있다. Inlet pipe와 밸브 시트 사이에 ~14 mm의 틈이 존재하도록 설계되어 있다는 정보를 기반으로, 상온에서는 케이싱 등에 의해 통제(Constraint)되어 있지 않았던 Inlet pipe는 온도 증가에 따라 축 방향과 반경 방향으로 열 팽창하면서 마주보게되는 부품들에 의해 통제를 받을 것으로 예상된다. Paffumi et al. [8]에 따르면, 파이프가 열 피로를 겪을 때는 원주 방향 인장 응력이 발달하는 경향성을 보이고, 축 방향 응력이 파이프에 가해진 상태에서 열 피로를 겪는 경우에는 원주 방향 인장 응력보다 축 방향 응력이 유효함을 보인다고 보고하였다. 따라서 Fig. 2에 나타난 축 방향 균열은 Inlet pipe의 균열 성장이 원주 방향 인장 응력의 발달로 형성된 결과이며, 결국 가동 중 케이싱에 의한 통제가 Inlet pipe의 응력을 발달시킨 것으로 보인다. 이는 Figs. 2f, g를 통해서도 확인이 가능한데, Fig. 2g의 고른 표면과는 다르게, Fig. 2f의 얼룩덜룩한 면은 Inlet pipe가 지속적으로 상부 케이싱에 의해 구속이 발생하였음을 시사한다. 한편, Inlet pipe 제작 시 발생할 수 있는 해로운 잔류응력은 균열의 성장에 큰 역할을 하지 않는 것으로 보인다. Inlet pipe는 상하 대칭이므로 잔류 응력이 주효하다면, Inlet pipe의 밸브 시트 방향인 위쪽에만 균열이 발생된 것을 설명하기 어렵다.

균열은 상단으로부터 약 30 mm 아래의 Inlet pipe의 두께가 증가하는 부분에서 시작된 것으로 판단된다. Inlet pipe의 위쪽은 케이싱에 의해 상대적으로 반경 방향 압축 응력이 발생하지만, 아래에는 열 팽창을 구속하는 부품이 없기 때문에, 응력의 구배가 크게 일어날 것으로 예상해볼 수 있다. 균열은 Beach

marks(Figs. 3a, b)가 아래쪽에서 위쪽으로 진행된 결과와 2차 균열이 아래쪽으로 뻗어있는 결과를 기반으로 상단부로부터 약 30 mm 위치에서 생성된 것으로 생각된다. 이 위치가 균열이 발생할 수 있을 정도로 가장 큰 응력 장이 형성되었을 것으로 예상해볼 수 있으며 복잡한 응력 장의 형성으로 균열이 Figs. 3a, b와 같은 복잡한 파단면을 가지게된 것으로 여겨진다. 좀 더 정확한 진단을 위해서는 해당 환경에서 작동하는 Inlet pipe의 응력 장 해석에 대한 후속연구가 요구된다. 케이싱이 운영 중 열 팽창하는 Inlet pipe를 통제하면서, Inlet pipe는 온도의 증감 시에는 피로를, 운영 중에는 크리프를 겪었을 것으로 예상된다. Figs. 3a, b에 나타난 Beach marks는 전형적인 피로에 의한 결과이며, Figs. 5b, c에 나타난 균열 끝단의 기공들은 크리프에 의한 결과이다. 입내 균열의 성장과 함께 부식이 발생하였으며, 이것은 균열의 성장을 돕는 응력 부식 균열의 형태이다.

5. 결론 및 대책

본 연구에서는 지역난방 시스템의 증기터빈 조속기 밸브 내 Inlet pipe의 파손 원인을 분석하였다. 조속기 밸브는 운영 중에 ~500 °C까지 온도가 상승하며, Inlet pipe는 축 방향과 반경 방향으로 열 팽창하는데, Inlet pipe의 위쪽 옆면의 일부가 케이싱에 의해 통제되어 이를 구속하면서 응력 장을 형성하기 때문에 열 피로 및 크리프를 겪는다. 운영 중 지속적인 열 피로 및 크리프에 의해 복잡한 응력 분포를 가질 것으로 예상되는 상단으로부터 아래로 30 mm 떨어진 위치에서 주요 균열이 외면에서부터 형성되었으며, 이것이 축 방향 및 두께 방향으로 성장하였다. 조속기 밸브 내 Inlet pipe의 구조적 문제가 해당 균열을 야기한 것으로 추측되므로, 응력 해석을 반영한 구조적 변경이 필요하다. 균열의 생성 및 성장은 열 피로 및 크리프에 의한 것이므로, 이에 대한 저항성이 향상된 소재의 사용이 권고된다.

감사의 글

본 연구는 한국지역난방공사의 지원을 받아 진행되었습니다.

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/s1019-00386-0>
8. E. Paffumi, K.-F. Nilsson, and Z. Szaraz, Experimental and numerical assessment of thermal fatigue in 316 austenitic steel pipe, *Engineering Failure Analysis*, **47**, 312 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.010>