

배열회수보일러의 부하변동 운전에 따른 과열기 튜브들의 응력거동

정재현*, 송정일**

*두산중공업(chaeon.chong@doosan.com), **창원대학교 기계공학과(jisong@changwon.ac.kr)

Stress Behaviors of Superheater Tubes under Load Change Operation in HRSG

Chong, Chae-Hon*, Song, Jung-Il**

*DOOSAN heavy Industries & construction(chaeon.chong@doosan.com)

**Dept. of Mechanical engineering, Changwon National University(jisong@changwon.ac.kr)

Abstract

The purpose of this study is not only to evaluate the stress behavior of tubes in superheater in HRSG during the load change operation but also to find root causes of failure from stress behavior. Firstly, temperature during operation was collected to perform stress analysis from actual HRSG. Part load and full load stress analysis which can be represented as the whole load change operations were performed using commercial finite element software. The possibility that can lead to tubes failure is found by stress analysis and its results is compared with metallurgical microstructure of failed tube which was taken from actual HRSG.

Keywords : 배열회수보일러(Heat recovery steam generator), 유동조절장치(Flow correction device), 1차응력 (Primary stress), 2차응력(Secondary stress), 막응력(Membrane stress), 굽힘응력(Bending stress)

1. 서 론

배열회수보일러는 가스 및 증기터빈과 함께 높은 발전 효율 및 저공해로 인해 각광 받고 있는 복합화력발전의 핵심 장치이며, 최근 들어 신재생에너지로 기대 되는 석탄가스화

복합발전(integrated gasification combined cycle) 및 연료전지 복합발전 등으로 적용범위가 확장되고 있다.

배열회수보일러는 전력의 변동 수요에 대처하기 위해 잦은 기동정지 및 부하변동운전을 하기 때문에 설계단계에서 운전횟수 및

투고일자 : 2008년 10월 16일, 심사일자 : 2008년 10월 20일, 게재확정일자 : 2008년 12월 8일
교신저자 : 송정일(jisong@changwon.ac.kr)

운전시간에 대한 예측 시나리오가 만들어지며, 이를 만족하는 설계가 이루어진다. 그러나 실제 배열회수보일러의 강도 설계는 전부하(full load)를 기준으로 이루어지기 때문에 많은 시간을 부분부하(part load) 운전으로 소비하는 특성을 반영하지 못하고 있다.

한편, 설계단계에서 구조적 건전성 확보를 위한 응력 및 수명평가 등은 주로 고온 고압의 환경에 있는 기기류를 대상으로 이루어지며, 특히 높은 온도와 압력을 동시에 받는 과열기 헤더 및 가장 후속부인 고압 드럼이 주 고려 대상이다. 그러나 실제로 상업 운전을 시작한 후 파손은 과열기 헤더나 고압드럼보다 과열기 헤더와 연결된 튜브파손이 대부분이다. 특히 본 논문에서 다루고자하는 수직형 배열회수보일러의 경우는 국내외 복합 화력발전소에서 많은 손상이 보고된 적이 있다. 운전 초기 단계에서 튜브의 주된 파손 원인은 주로 용접불량 등 제작과정에서 일어나는 실수로 알려져 있지만, 일부는 제작과정의 오류로 인한 파손이 아닌 시스템적 문제에 기인한 파손 가능성도 배제할 수 없다. 본 연구는 수직형 배열회수보일러를 대상으로 운전 초기 단계에서 과열기 튜브 파손의 원인이 될 수 있는 시스템적 문제인 부하변동에 따른 튜브관군의 응력거동에 대해서 살펴보았다.

2. 부하변동에 따른 과열기 튜브 관군의 거동

2.1 수직형 배열회수보일러 및 과열기

그림 1은 일반적 수직형 배열회수보일러의 형상을 보여 주고 있다.

배가스가 전열관군에 수직으로 흐르기 때문에 수직형이라고 하며, 여러 개의 전열관군을 두고 배가스와 열 교환을 하고 있다. 또한, 전열면에 균일한 배가스의 유동을 만들기 위해 그림 1에서 보는바와 같이 유동조절장치(flow correction device)가 설치되며, 전부하 운전을 가정하여 특정한 기준을 만족하도록 설계 되어야 한다.

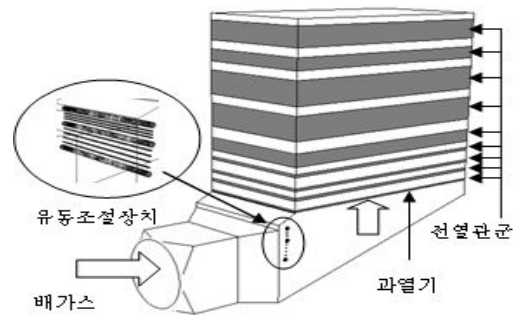


그림 1. Shape of vertical HRSG

한편, 과열기는 주로 배가스와 가장 먼저 만나는 위치에 있으므로 고온의 환경에 노출되며, 또한 고압을 받고 있는 기기이다. 그림 2는 과열기의 형상을 보여주고 있다. Inlet 헤더와 Outlet 헤더의 원주방향으로 Row1, Row2, Row3 등 3개의 튜브 열이 있으며, 각 Row에 대해 헤더 길이 방향으로 105개의 튜브가 장착되어 총 315개의 튜브로 과열기 전열관군이 구성되어 있다.

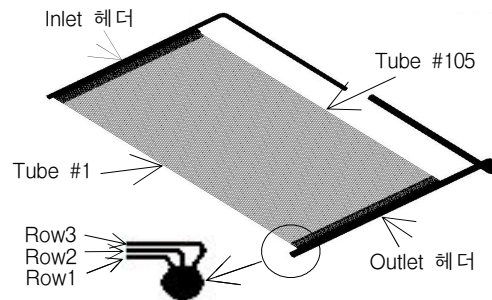


그림 2. Geometry of superheater section

2.2 온도측정 및 결과

부하변동 운전에 따른 과열기 튜브들의 온도 거동을 살펴보기 위해 수직형 배열회수보일러가 설치되어 있는 400MW급 복합화력발전소에서 과열기 튜브들을 대상으로 온도를 측정하였다.

그림 2에서 보는 바와 같이 과열기를 구성하고 있는 3개 Row에서 1개 Row 당 동일 간격으로 8개씩의 열전대를 Inlet 측과 Outlet 측 튜브에 각각 설치하여 총 48곳의 온도 데이터를 수집하였다. 온도 데이터 수집을 위해 Yokogawa MW100 장비를 사용

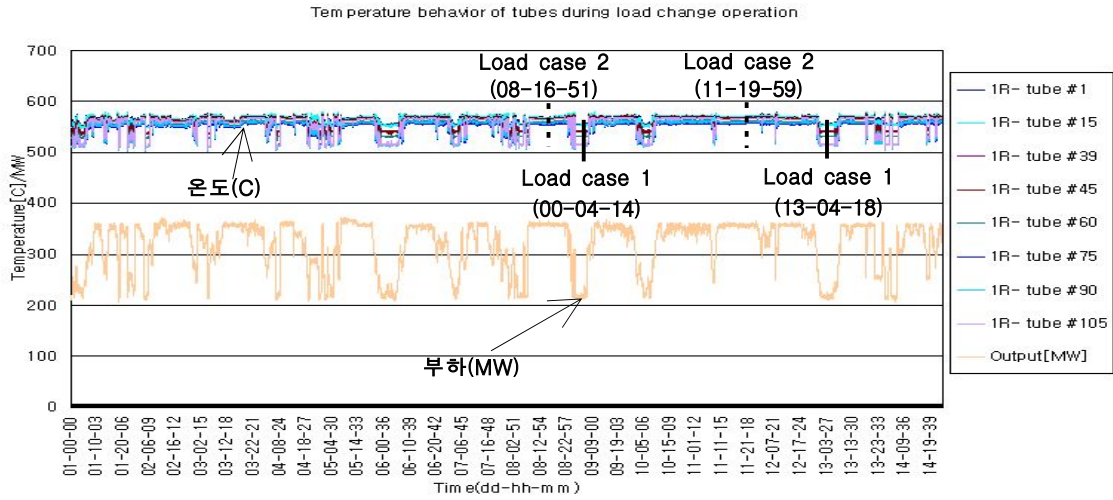


그림 3. Temperature behavior of tubes at row1 during load change operation

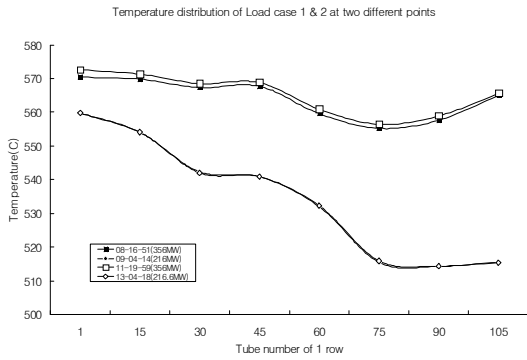


그림 4. Comparison of temperature at each load case

하였으며, 총 15일 동안 측정이 이루어 졌다. 측정 기간 동안 반복되는 부분부하(Load case 1, 210MW) 및 전부하 (Load case 2, 360MW) 운전의 튜브 온도 데이터가 확보 되었다. 그림 3은 획득한 데이터의 일부로, 3개의 Row 중에서 배가스와 가장 먼저 만나는 Row1 튜브들의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 전부하나 부분부하 운전 구간 각각에서는 튜브들의 온도가 유사한 거동을 보여줌을 알 수 있다. 또한 전부하의 경우는 같은 Row에서 튜브별 온도가 큰 차이를 보이지 않고 있음을 볼 수 있고, 부분부하

의 경우는 전부하에 비해 튜브들의 온도차이가 크게 나고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 그림 3에서 전부하와 부분부하에서 임의의 두 시점을 각각 선택해 온도 거동을 비교한 결과이다. 부하에 따라 각 튜브의 온도거동이 같음을 볼 수 있다. 이로부터 각 부하별로 한 시점씩만 선택해도 각 부하에 대한 대표성을 가질 수 있다는 것을 알 수 있었다.

한편 Row별 온도 분포는 그림 5, 6과 같다. 부분부하나 전부하에서 Row1과 Row2 및 Row2와 Row3의 온도 차이 비는 비슷하나 온도의 크기는 부분부하에서 매우 큼을 알 수 있었다.

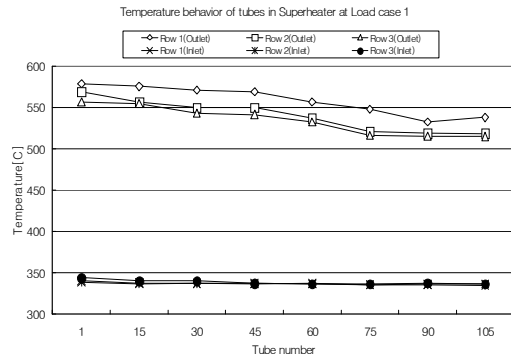


그림 5. Temperature behavior of tubes in Superheater under Load case 1

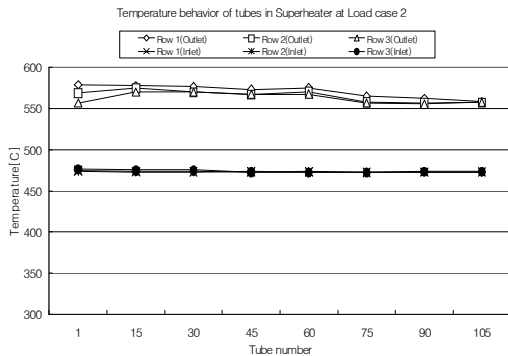


그림 6. Temperature behavior of tubes in Superheater under Load case 2

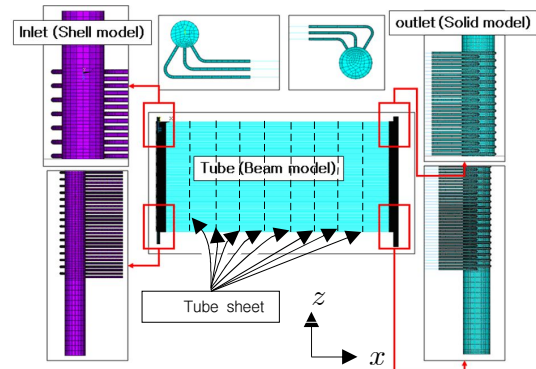


그림 7. FE model for superheater module

3. 응력해석

부하변동 운전에 따른 과열기 튜브들의 응력거동을 살펴보기 위해 열전대로부터 얻은 튜브의 온도측정데이터와 발전소 운전 시스템으로부터 획득한 압력 데이터를 이용해 Load case 1과 Load case 2에 대한 응력해석을 상용 소프트웨어인 ANSYS 11로 수행하였다.

3.1 모델링 및 경계조건

과열기의 재질은 9Cr-1Mo강이며, 유한요소해석을 위한 모델링은 그림 7과 같이 Inlet/Outlet 헤더, 튜브들 그리고 배관을 포함 하는 모듈전체를 대상으로 하였다. Shell, beam, solid요소를 조합하였으며, Outlet 쪽은 solid 요소를, Inlet부근은 shell 요소를, 그리고 Outlet과 Inlet 부근에 포함되지 않는 튜브는 beam요소를 사용하였다.

표 1. Number of nodes and elements

요소형태	절점수	요소수
Solid	322,716	219,042
Shell	96,311	94,737
Beam	11,340	11,204

한편 경계조건은 Inlet헤더 및 Outlet헤더와 연결된 배관의 끝에 모든 변위를 구속 하였으며, beam요소로 모델링된 튜브와 만나서 solid 및 shell로 모델링된 튜브의 끝 부분에서 blowoff 응력을 적용하였다. 또한 튜브의 처짐을 방지하기 위해 튜브에 설치된 8개의 tube sheet를 고려하였다. 그러나 배관을 매달고 있는 hanger등의 정보를 알 수 없었기 때문에 해석 시 자중은 고려되지 않았다.

3.2 하중조건

획득한 운전온도 및 압력을 바탕으로 Load case 1과 Load case 2에 대한 온도와 압력을 하중조건으로 가공하였다. 그림 5, 6의 온도 값을 하중 조건으로 사용하였으며, 이때 Load case 1 및 Load case 2의 운전압력은 표 2와 같다.

표 2. Operating pressure

	Load case 1	Load case 2
Outlet	72.9 MPa	97.2 MPa
Inlet	74.4 MPa	99.6 MPa

3.3 해석결과

ASME나 EN코드 등에서 압력용기의 응력평가를 위해 사용하고 있는 “Design By Analysis” 방법을 적용하기 위해 계산된 응력을 선형화

하였다.¹⁾²⁾⁵⁾ 그림 8에서 보는 바와 같이 관심 부위에 선형화를 위한 Path를 지정하였다.

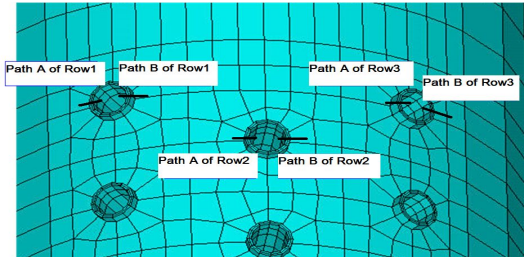


그림 8. Path for considered locations

본 논문에서 다루는 헤더와 튜브의 연결부위 형상의 경우는 압력에 의한 1차 응력(primary stress)과 튜브 온도차이로 인한 상이한 열팽창에 의한 2차 응력(secondary stress)이 발생하기 때문에 계산된 응력을 2배의 항복응력과 비교할 수 있다.³⁾⁴⁾

해석 결과는 파손의 가능성이 높은 Outlet을 기준으로 정리하였다. 먼저 응력해석 결과로부터 Path A, B는 튜브별로 거의 비슷한 거동을 보여 있음을 알 수 있었다. 그림 9, 10은 Row1의 A 및 B Path의 응력분포를 보여 주고 있다. 본 논문에서는 결과를 수록하지 않았지만 Row2, Row3에서 Path A, B의 응력 값도 Row1에서와 마찬가지로 유사함을 보였다. 그림 11, 12는 Row2 및 Row3의 Path A에서의 응력을 보여주고 있다.

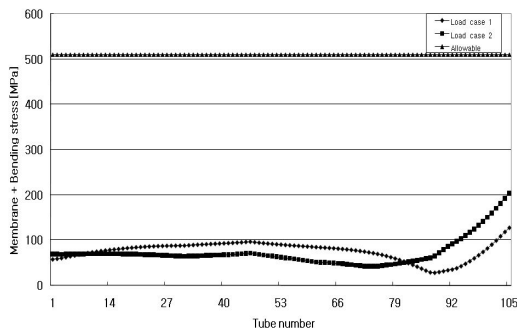


그림 9. Tube stress along Path A at Row 1 in Outlet

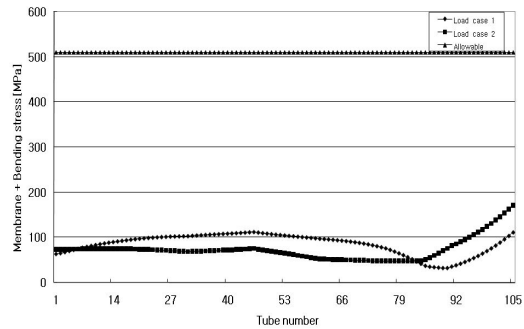


그림 10. Tube stress along Path B at Row 1 in Outlet

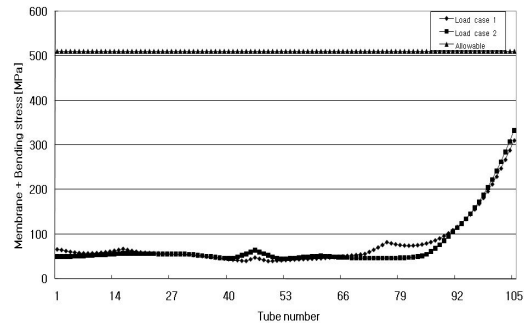


그림 11. Tube stress along Path A at Row 2 in Outlet

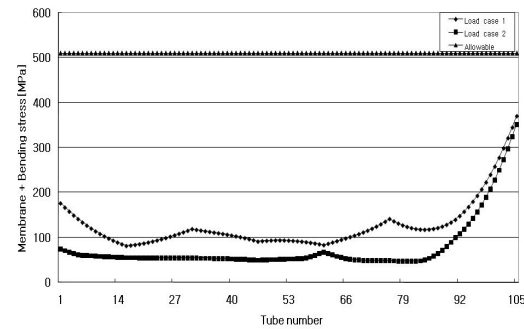


그림 12. Tube stress along Path A at Row 3 in Outlet

다음으로 튜브응력에 지배적인 영향을 미치는 원인을 찾아내기 위해 부분부하 운전인 Load case 1을 기준으로 압력만을 하중으로 주었을 경우, 그리고 측정된 튜브 온도를 Row 별로 평균하여 같은 Row에서는 튜브들의 온도가 같고 Row 별로는 온도가 다를 경우에 대해서 각각 응력해석을 수행하고, 두

해석 결과와 측정된 튜브 실제 온도를 이용해 응력해석을 수행한 결과와 비교해 보았다. 그림 13은 Row1의 튜브 응력 값을 보여 주고 있으며, 그림 14는 Row2, 그림 15는 Row3에 속한 튜브들의 응력 값을 보여 주고 있다.

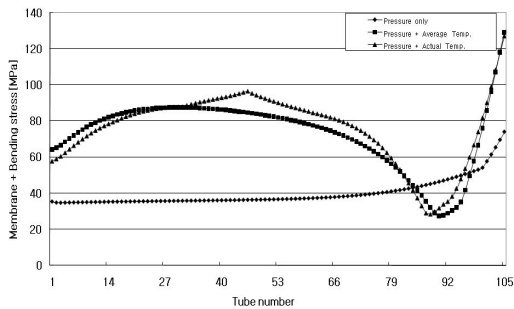


그림 13. Stress of Row1 tubes at Load case 1 in Outlet according to loading conditions

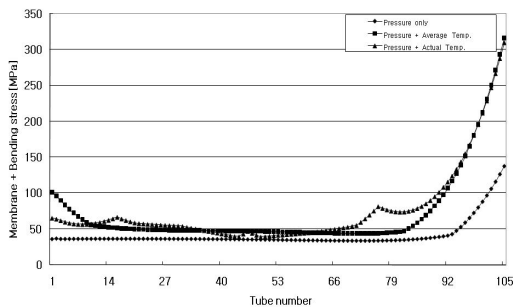


그림 14. Stress of Row2 tubes at Load case 1 in Outlet according to loading conditions

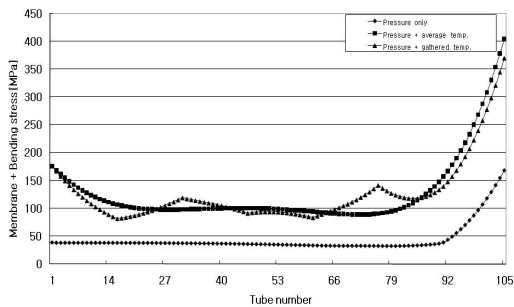


그림 15. Stress of Row3 tubes at Load case 1 in Outlet according to loading conditions

4. 해석결과 분석

먼저 응력이 가장 높게 나타나는 곳은 하중의 종류에 상관없이 헤더와 연결된 배관과 가장 가까운 105번 튜브 근처임을 알 수 있으며, 다음으로 응력이 많이 작용하는 곳은 Row별로 각각 다른 양상을 나타내고 있다. 전부하나 부분부하 운전시의 과열기 튜브별 응력 값은 모두 허용응력 아래임을 알 수 있었으나, 그림 9에서 Row1의 105번 튜브, 그리고 그림 12에서 Row3의 1번 튜브 및 75번 튜브에서 Load case에 따른 변동하중 즉 피로하중이 발생함을 볼 수 있었다. 피로응력은 Membrane + Bending 응력에 Peak 응력을 더해 주어야 한다. 즉 응력집중을 고려해야 하므로 현재 구해진 응력에서 응력집중계수를 곱해야 한다.2) 그러므로 현재 계산된 응력 보다 큰 응력이 작용할 것으로 판단되며, 또한 응력 계산 부위가 용접부 근처이므로 열피로에 의한 파손의 가능성이 훨씬 높다고 할 수 있다.

그림 13~15로부터 부분부하 운전 시 튜브 응력에 영향을 미치는 주된 요인은 튜브 열별 온도차이, 즉 Row1~Row3의 온도 차이에 의한 응력이 가장 지배적임을 알 수 있었다. 이는 Row별 온도 차이에 의한 헤더 회전 및 열팽창에 의한 튜브길이 방향 변위를 헤더와 연결된 배관이 구속하고 있기 때문이다. 다음 요인으로는 그림 14 및 15의 75번 튜브에서 보는 바와 같이 같은 Row에서 튜브간의 온도차이로 인해 발생하는 응력을 들 수가 있다. 이러한 같은 Row에서 튜브 온도 차이는 주로 가스터빈으로부터 나오는 배가스의 유동 불균일에 의해서 일어나게 된다.

그림 16은 응력해석결과 피로하중이 발생하는 Row3 75번 튜브 부근에서 실제로 파손된 튜브의 사진을 보여 주고 있다. 튜브 바깥쪽 표면에 많은 접힘 현상과 튜브 전체적으로 많은 균열들을 볼 수 있으며, 큰 열응력을

받은 튜브에서 볼 수 있는 전형적인 손상 형태이다. 아울러 그림 17에서 보는 바와 같이 금속학적 조직 분석결과 고온 노출의 증거가 될 수 있는 탄화물 조대화(carbide coalescence) 등의 현상이 전혀 나타나지 않았으며, 크리이프 손상에 의한 기공(void) 또한 발견되지 않았다. 이를 통해 파손 튜브는 열하중에 의한 피로파괴임을 알 수 있었다. 그러므로 부분부하 운전 시 헤더 길이 방향으로 튜브온도의 차이가 파손에 주된 원인이 됨을 알 수 있다.

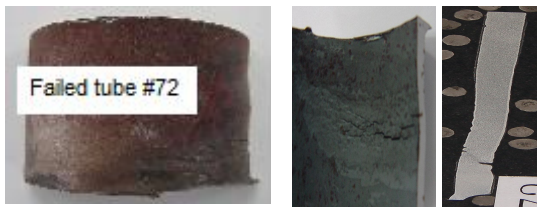


그림 16. Tube failure #72 tube at Row 3 in Outlet

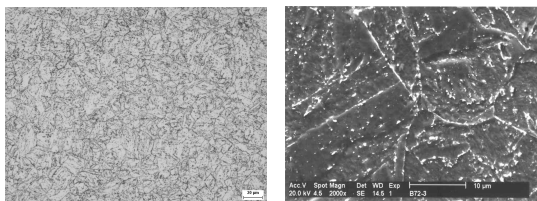


그림 17. Microstructure of failed #72 tube

5. 결 론

배열회수보일러의 부분부하 운전에 대한 튜브들의 응력거동을 살펴보기 위해 실제발전소 운전데이터 측정 및 이를 이용한 응력 해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 부분부하 운전 시는 전부하 운전 시와 달리 튜브들 간의 온도차가 크게 발생하여 전부하 운전 시 보다 전반적으로 튜브에 높은 열응력이 발생한다.
- (2) 부분부하 운전 시 튜브 응력에 가장 큰 영향을 주는 것은 튜브 Row별 온도차이

이므로 헤더와 연결된 배관의 영향을 최소화 할 수 있는 설계가 필요하다.

- (3) 부분부하 운전 시 같은 Row에서 튜브들의 온도 차이는 특정 튜브에 피로응력을 발생시키므로 유동조절장치 개선 등을 통해 튜브간의 온도 불균일을 제거해야 한다.

참고문헌

1. Hechmer, J. L. and Hollinger, G. L., Three-Dimensional Stress Criteria, proceedings, ASME PVP-Vol, 210-2, San Diego, CA, pp181-191, 1991
2. ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 2 - Alternate Rules, 2007 Edition, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY., 2007
3. ASME, Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Section III and VIII, Division 2, 1969
4. Mackenzie, D. and Boyle J. T., A Computational Procedure Calculating Primary Stress for the ASME B&PV Code, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 116, pp. 339-344, 1994
5. prEN 133445-3 Annex 2, Design By Analysis, 2002