

유동 불균일이 전열관 튜브에 미치는 영향

정재현*, 송정일**

*창원대학교 기계공학과 대학원(dooheavy@daum.net),**창원대학교 기계공학과(jisong@changwon.ac.kr)

Influence on heat transfer tubes due to uneven flow

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

* Dept. of Mechanical engineering, Graduate School, Changwon National University(dooheavy@daum.net)

**Dept. of Mechanical engineering, Changwon National University(jisong@doosan.com)

Abstract

The purpose of this study is not only to evaluate thermal performance but also to find the stress behavior of heat transfer tubes under the part load operation in Heat Recovery Steam Generator. Flow analysis was performed to know the behavior of exhaust gas from gas turbine and thermal performance was calculated using distribution of hot exhaust velocity. In addition, tubes temperature during operation were gathered from actual plant to verify the uneven flow distribution under part load operation. Stress analysis was performed using tubes temperature data gathered from actual plant under both part and full load operations to know the stress behavior of tubes.

Keywords : 배열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator), 유동조절장치(Flow Correction Device), 전산유동 해석(Computational Flow Analysis), 해석에 의한 설계(Design By Analysis)

기호설명

A_o	: 튜브 단위길이당 총면적(m^2/m)	C_1	: Renolds수에 따른 j-factor 보정 계수
A_{fo}	: 튜브 단위길이당 핀의 바깥 면적 (m^2/m)	C_3	: 형상에 따른 j-factor 보정계수
A_{po}	: 튜브 단위길이당 핀 제외 면적 (m^2/m)	C_5	: 튜브배열에 따른 j-factor 보정계 수
C_p	: 정압비열(J/kg K)	$d_f(m)$: 핀의 외경
		$d_o(m)$: 튜브의 외경
		E	: 핀 효율

- G_n : 질량유속(kg/m^2s)
- j : Colburn 열전달 factor
- Nu : Nusselt수
- Pr : Prandtl수
- T_b : 외부유체온도의 평균($^{\circ}C$)
- T_s : 외부 핀온도의 평균($^{\circ}C$)

1. 서론

최근 들어 청정에너지 사용에 대한 요구가 증가하면서 천연가스를 이용해 발전을 하는 복합화력발전소에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다. 복합화력발전소의 주요장치 중 배열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator)는 가스터빈의 배열을 이용해 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동하는 역할을 담당하는 핵심장치 중의 하나이다. 대부분의 복합화력발전은 전력부하 수요에 탄력 있게 대처할 수 있도록 설계되기 때문에 잦은 기동정지와 부하변동운전이 수반되므로 이를 추종할 수 있는 배열회수보일러의 신뢰성을 요구한다. 신뢰성은 성능적 측면과 구조적 측면으로 나눌 수 있으며, 성능적 측면은 배열회수보일러 출력과 관계되며, 구조적 측면은 설비의 안전 및 요구수명과 관계된다.

먼저, 배열회수보일러의 성능은 전부하(100%부하)와 일부 부분 부하(Off design)를 기준으로 설계되며, 요구 성능을 만족할 경우 신뢰성을 확보했다고 할 수 있다. 성능은 가스터빈에서 나오는 배가스의 유동분포와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 성능계산으로부터 이미 설정되어 있는 기준에 대해 유동 분포의 대한 조건을 만족해야 한다. 유동분포는 전열관군에서 유동의 균일한 분포를 의미하는데, 이는 전부하를 기준으로 하고 있으므로 부분부하 운전에 대한 배가스 유동연구는 전무한 상태이다.

한편, 구조적 측면에서 신뢰성은 안전성 및 요구수명과 밀접한 관계를 가지고 있으며,

일반적으로 배열회수보일러는 요구수명 동안의 기동정지 횟수와 사용시간을 반영한 설계가 이루어진다. 설계단계에서 배열회수보일러의 수명계산은 주로 고온고압을 받는 기기류를 대상으로 이루어지며, 특히 가장 높은 압력과 온도를 받는 과열기(Superheater) 헤더 및 배열회수보일러 기기 중 가장 후육부인 드럼이 주 고려대상이다. 이는 튜브 등 다른 기기들에 비해 두꺼운 두께로 인한 큰 열응력 때문이다. 이러한 후육기기류의 요구수명계산을 위해 고려하는 하중조건은 주로 Cold/Warm/Hot 기동이다. 반면, 부하변동에 의한 부분부하 운전은 다른 기동/정지에 비해 운전온도와 압력의 변화가 크지 않기 때문에 관심대상에서 제외되어 왔다. 그러나 실제 배열회수보일러에서는 튜브파손으로 인한 운전정지 사례가 빈번히 발생하고 있기 때문에 본 연구는 배열회수보일러 형태 중 수직형을 대상으로 부분부하 운전이 과열기 전열관 튜브에 미치는 영향을 성능적 측면과 구조적 측면에서 살펴보았다.

2. 부분부하운전에 따른 튜브관군의 성능적 영향

2.1 내부유동 특성

그림 1.과 같이 가스터빈에서 나오는 배가스의 흐름 방향이 수직인 경우를 수직형 배열회수보일러라 하며 일반적으로 전열관군에 균등한 배가스 분포를 만들기 유동조정장치(Flow Correction Device)를 사용한다.

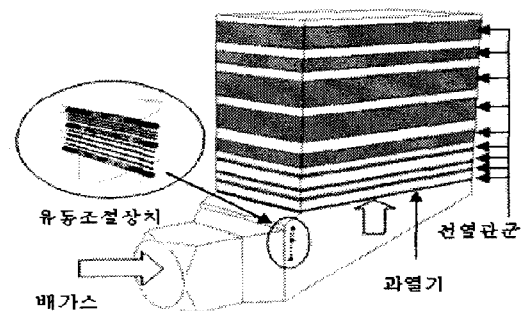


그림 1. Shape of vertical HRSG

먼저 내부유동특성을 살펴보기 위해 상용 해석 툴인 Fluent 6.3을 사용하여 전산유동 해석을 수행하였다. 그림 1과 같이 배열회수보일러를 3차원 모델로 형상화하였으며, 배열회수보일러 입구부터 stack 입구까지의 영역을 모델에 포함하였다. 본 연구의 주 관심 대상은 첫 번째 전열관군인 과열기 입구 유동분포이며, 이는 stack의 유무에 영향을 받지 않으므로 유동해석모델에서 stack을 제외하였다¹⁾²⁾. 산업계에서 일반적으로 사용되는 standard k-ε 모델을 난류 모델로 사용하였으며, 배가스는 비압축성 유체로, 밀도를 비롯한 배가스 물성치는 온도의 함수로 처리하였다. 전열관군에서의 열전달과 압력손실을 고려하기 위해 각 전열관군을 porous media로 처리하였다. 입구경계조건은 그림 2 및 표 1과 같으며 천이덕트 설계를 위해 가스터빈 제작사의 무차원 속도 데이터를 활용하였다.

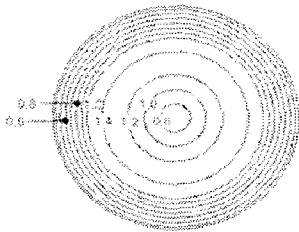


그림 2. Distribution of axial velocity

표 1. Flow swirl angle by gas turbine loads

가스터빈 부하	100%	53%
선회각	0.32°	-40.21°

그림3 전산유동해석을 통해 확인한 배열회수보일러의 과열기 입구단면에서 유동 균일도를 그래프로 나타낸 것이다. 그림3의 그래프에서 Sec1~Sec10은 과열기를 횡방향으로 나누었을 때 각 구간별 위치를 의미하며, 세로축 좌표는 각 구간별 평균유속을 전체 단면의 평균유속으로 나눈 단면 수직방향 무차원 유속이다. 각 구간은 그림 4에

서 횡방향 직사각형으로 표시되어 있으며, Sec1 은 상부영역에 해당한다.

그림 3~4에 나타난 것처럼 100% 부하에서 과열기 입구로 유입되는 구간별 단면 수직방향 무차원 유속 분포는 0.8~1.2 이내로 균일하다. 그러나 53% 부분부하에서 상당히 큰 유동 불균일이 발생하며 이때 최소값과 최대값의 비는 1.8이상이다. 이와 같은 결과의 주원인은 선회유동 특성이 천이덕트의 형상에 따라 각각 다른 영향을 미쳤기 때문이다.

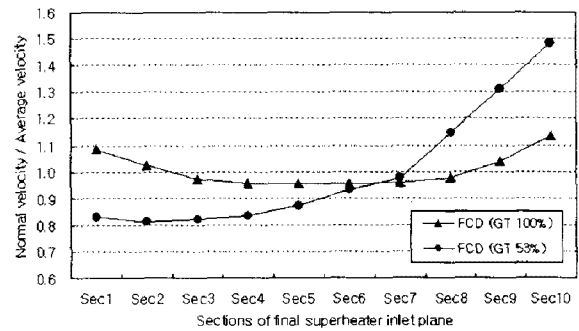


그림 3. Distribution of normalized normal velocity in superheater section under GT100% & GT 53% loads.

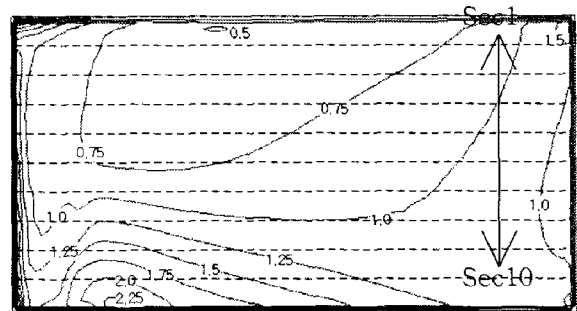


그림 4. Distribution of normalized normal velocity in superheater section under GT53% load

2.2 열 흡수량에 미치는 영향

부분부하에서 발생하는 유동 불균일 현상이 과열기 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 기존 유동조절장치가 장착된 수직형 배열회수보일러의 과열기에 대한 성능계산을 수행하였다. 전산유동해석과 마찬가지로 과열기를 10개 구간으로 나누고 각 구간별로 공급되는 배기가스의 유량에 그림2의 데

이터를 적용하였다. 이때 과열기 입구 배가스 온도는 모두 동일한 것으로 간주하였으며, 과열기 전열관 내부를 통과하는 증기 유량과 온도는 동일한 것으로 가정하였다. 성능계산에 사용된 주요 열전달 관계식은 다음과 같다.

관내열전달계수

성능 계산시 과열기 전열관 내부를 흐르는 유체가 과열증기이므로 Heineman 식을 이용하여 관내 열전달 계수를 계산하였다.

$$N = 0.0133 Re^{0.84} Pr^{1/3} \quad (1)$$

관의열전달계수

과열기 전열관은 serrated finned tube로 구성되어 있으므로 식(2)와 같은 finned tube 제작사인 ESCOA사의 관외열전달계수 예측식을 사용하였다.³⁾⁴⁾

$$h_e = h_o(EA_{fo} + A_{po})/A_o \quad (2)$$

$$h_o = 1/1/(h_c + h_r) + R_{fo}, h_c = jG_n C_p Pr^{-2/3} \quad (3)$$

$$j = C_1 C_2 C_3 \left(\frac{d_f}{d_o}\right)^{0.5} \left(\frac{T_b}{T_s}\right)^{0.25} \quad (4)$$

표 2는 성능계산결과를 정리한 결과이다. 53%부하에서 과열기 출구 증기온도가 배가스 유속 분포가 전체구간에서 균일한 경우에 상대적으로 낮아지며 power도 약 0.84% 감소됨을 알 수 있다.

그림 5, 6은 성능계산결과를 실제 복합화력 발전소 운전데이터를 비교한 것이다. 발전소 측정 데이터를 살펴보면 100% 부하에서 최대 및 최소 온도차는 18.8°C이며 53% 부분부하에서 온도차는 46.2°C로 증가하며, 부분부하에서 좌우 온도 불균형이 발생한다. 이와 같은 경향을 성능계산 결과에서도 확인할 수 있다. 성능계산 결과 100% 부하에서 최대 및 최소 온도차는 5.8°C이며

53% 부하에서 30.3°C로 증가한다. 또한 부분부하에서 측정데이터와 유사한 경향의 좌우온도 불균형이 발생한다.

표 2. 수직형 배열회수보일러 성능계산 결과 비교

	출구온도 (°C)		Power (MW)	
	GT 100%	GT 53%	GT 100%	GT 53%
기존유동조정장치	567.74	561.97	21.155	23.223
전체구간균일유속	567.65	563.40	21.144	23.420

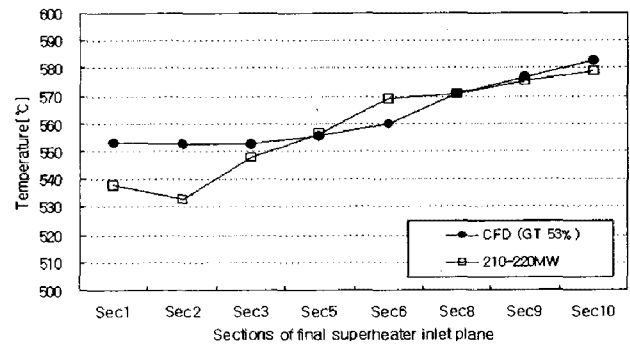


그림 5. CFD vs Real tube temperature at GT 53% loads.

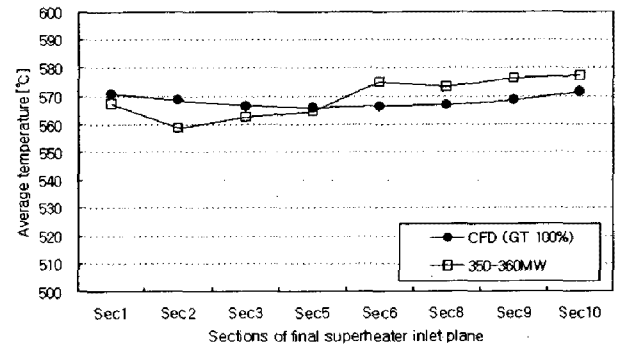


그림 6. CFD vs Real tube temperature at GT 100% loads.

3. 부분부하운전에 따른 튜브관군의 구조적 영향

부하변동 운전에 따른 과열기 튜브들의 응력거동을 살펴보기 위해 열전대로부터 얻은 튜브의 온도측정데이터와 발전소 운전시

스텝로부터 획득한 압력 데이터를 이용해 전부하와 부분부하 운전시에 대한 응력해석을 상용 소프트웨어인 ANSYS 11로 수행하였다. 그림 7은 유한요소해석을 위해 모델링 된 과열기 전열관군의 모양을 보여주고 있다.

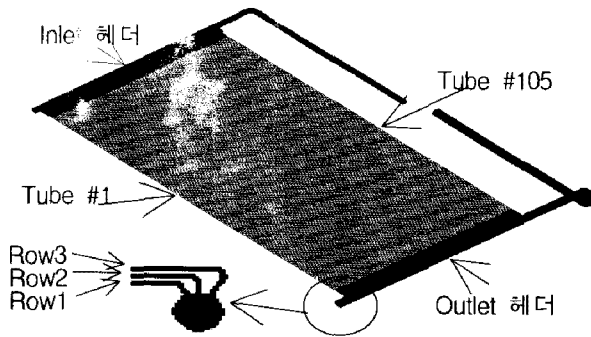


그림 7. Geometry of superheater section

3.1 경계조건 및 하중조건

과열기의 재질은 9Cr-1Mo강이며, 헤더 원주방향으로 3열의 튜브가 있으며, 각 열은 다시 헤더길이 방향으로 각 105개의 튜브를 가지고 있다. 유한요소해석을 위한 모델링은 그림7과 같이 Inlet/Outlet 헤더, 튜브들 그리고 배관을 포함 하는 모듈전체를 대상으로 하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 Shell, beam, solid요소를 조합하였으며, Outlet 쪽은 solid 요소를, Inlet부근은 shell 요소를, 그리고 Outlet과 Inlet 부근에 포함되지 않는 튜브는 beam요소를 사용하였다.

한편, 경계조건은 Inlet헤더 및 Outlet헤더와 연결된 배관의 끝에 모든 변위를 구속하였으며, Beam요소로 모델링된 튜브와 만나는 solid 및 shell로 모델링된 튜브의 끝부분에서 blowoff 응력을 적용하였다. 그러나 배관을 매달고 있는 hanger등의 정보를 알 수 없었기 때문에 해석시 자중은 고려되지 않았다.

하중조건은 실제 배열회수보일러로부터 측정한 값을 이용하였으며, 부분부하(Load case 1)과 전부하(Load case 2)시의 운전대

이터를 사용하였다. 그림 9,10는 부분부하시와 전부하시의 각 튜브별 온도를 나타낸다. 또한 표 3은 각 부하시의 운전압력을 나타내고 있다.

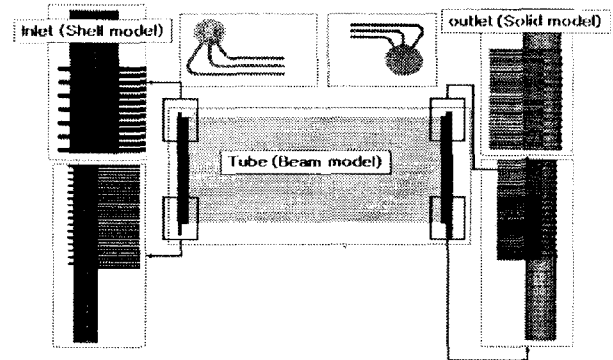


그림 8. FE model for superheater module

표 3. Operating pressure

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

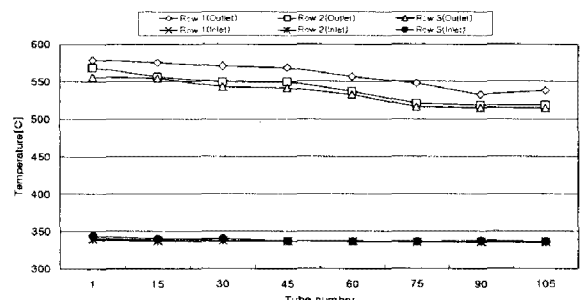


그림 9. Temperature behavior of tubes in Superheater at Load case 1

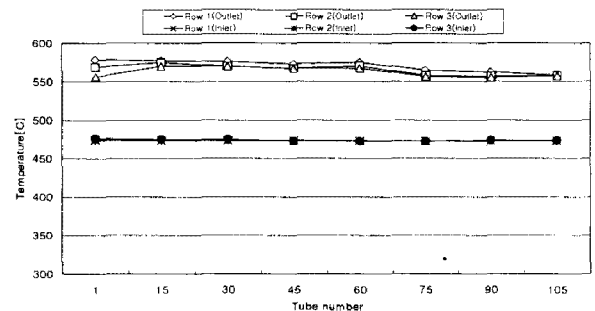


그림 10. Temperature behavior of tubes in Superheater at Load case 2

3.2 응력해석 및 결과

ASME나 EN코드 등에서 압력용기의 응력평가를 위해 사용하고 있는 “Design By Analysis” 방법을 적용하기 위해 계산된 응력을 선형화 하였다⁵⁾⁶⁾. 그림 11에서 보는 바와 같이 관심 부위에 선형화를 위한 Path를 지정하였다.

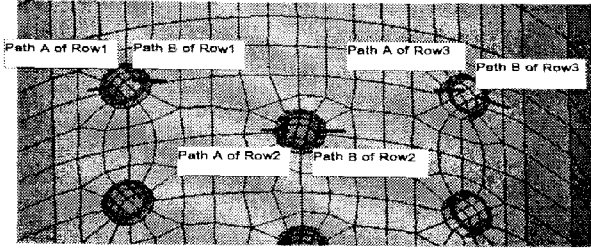


그림 11. Path for considered locations

헤더와 튜브의 연결부위 형상의 경우는 압력에 의한 1차응력(Primary stress)와 튜브 온도차이로 인한 상이한 열팽창에 의한 2차응력(Secondary stress)이 발생하기 때문에 계산된 응력을 2배의 항복응력과 비교할 수 있다⁷⁾.

해석 결과는 Outlet을 기준으로 정리하였으며, 먼저 응력해석결과로부터 Path A, B는 튜브별로 거의 비슷한 거동을 보여 줌을 알 수 있었다. 그림 12~13은 Row1의 A 및 B Path의 응력분포를 보여 주고 있다. 본문에서는 결과를 수록하지 않았지만 Row2, Row3에서 Path A, B의 응력값도 Row1에서와 마찬가지로 유사함을 보였다. 그림 14~15는 Row2 및 Row3의 Path A에서의 응력을 보여주고 있다.

해석결과로부터 전부하나 부분부하 운전시의 과열기 튜브열별 응력값은 모두 허용응력 아래임을 알 수 있었으나, 그림 11에서 Row1의 105번 열, 그리고 그림 15에서 Row3열의 1번 튜브와 75번 튜브에서 Load case에 따른 변동하중 즉 피로하중이 발생할 수 있었다. 피로응력은 Membrane

+Bending 응력에 Peak 응력을 더해 주어야 하는데, 일반적으로 Membrane+Bending 응력에 2.5~3.0 배를 해주면 피로를 계산할 수 있는 전체응력이 된다. 그리고 응력 계산부위가 용접부 근처이므로 열피로에 의한 파손의 가능성은 높다고 할 수 있다.

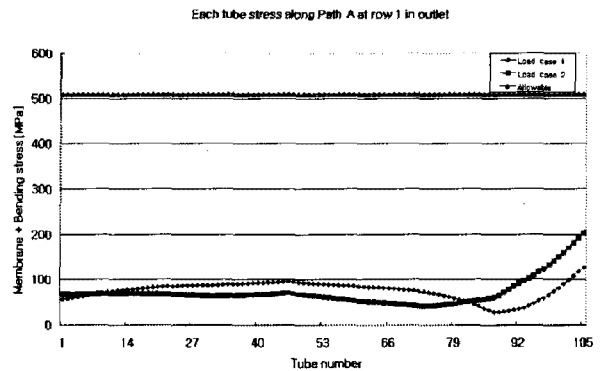


그림 12. Tube stress along Path A at Row 1 in outlet

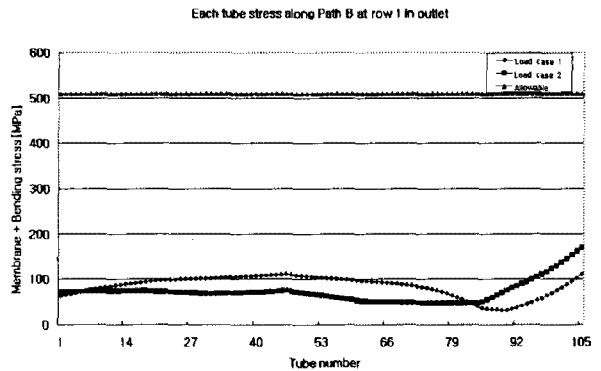


그림 13. Tube stress along Path B at Row 1 in outlet

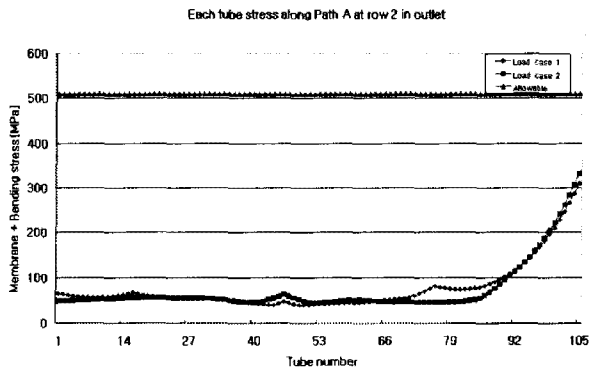


그림 14. Tube stress along Path A at Row2 in outlet

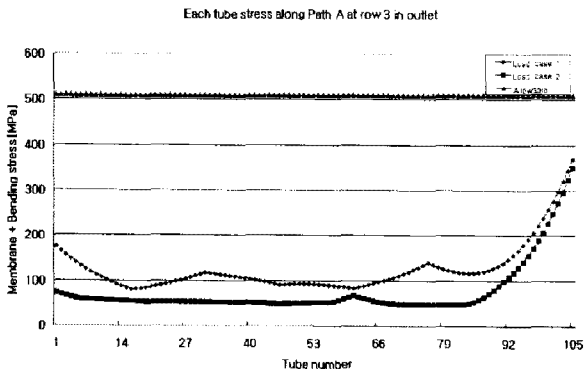


그림 15. Tube stress along Path A at Row3 in outlet

4. 결론 및 향후 연구방향

해석 결과로부터 배열회수보일러의 부분부하 운전에 대한 과열기 튜브들의 성능적 영향과 구조적 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 유동조절장치를 장착한 수직형 배열회수보일러도 53% 부분부하에서 유동 불균일 현상이 발생한다. 따라서 수직형 배열회수보일러의 경우 100% 부하를 기준으로 유동조절장치를 설계하는 것은 바람직하지 않으며, 유동 불균일 현상으로 인해 0.84%의 성능저하가 예측되었다. 만약 이 값이 설계여유를 초과 한다면 과열기에 설치할 전열관 수를 증가시켜야 한다.
- 구조적 관점에서 부분부하 운전시 헤더 길이 방향으로 튜브들의 온도차이는 특정 튜브에 피로응력을 발생시켜 파손의 위험성을 높일 수 있다.

위의 결론으로부터 새로운 유동조절장치의 개발 등 부분부하시 성능적, 구조적 문제를 제거하기 위한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Marie-Noelle Dumont, Georges Heyen, "Mathematical modeling and design of an advanced once-through heat recovery steam generator", Computers and Chemical Engineering 28, 2004, pp.651-660.
2. B.E. Lee, S.B. Kwon, C.S. Lee, "On the Effect of Swirl Flow of Gas Turbine Exhaust Gas in an Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, Vol. 124,
3. 이채수 외 3인, Flow Correction Device 를 이용한 HRSG 내부의 유동 제어, 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 추계 학술대회 논문집, 1999, pp. 38~42.
4. ESCOA, Fin tube manual, ESCOA Corp, 1979
5. Hechmer, J. L. and Hollinger, G. L., "Three-Dimensional Stress Criteria, " proceedings, ASME PVP-Vol, 210-2, San Diego, CA, pp181-191, 1991
6. ASME, "CRITERIA OF THE ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE FOR DESIGN BY ANALYSIS IN SECTION III AND VIII, DIVISION 2," 1969
7. 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, pp339-344, 1994