

배열회수보일러의 부분부하 운전에 따른 유동불균일이 과열기의 성능에 미치는 영향

정재현* · 송정일[†]

*두산중공업, [†]창원대학교

(2008년 10월 8일 접수, 2008년 11월 19일 수정, 2008년 12월 2일 채택)

Effect on Thermal Performance of Superheater Module under Part Load Operation in HRSG

Chae-hon Chong* and Jung-il Song[†]

*Doosan heavy industries & construction,

[†]Changwon National University

(Received 8 October 2008, Revised 19 November Accepted 2 December 2008)

요 약

본 논문은 배열회수보일러에서 부분부하 운전이 과열기 열성능에 미치는 영향을 조사하였다. 첫 단계로 가스터빈 최대부하와 부분부하 운전시 배열회수보일러 형태에 따른 가스터빈 배가스의 유동 특성을 전산유체해석을 통해 조사하였다. 다음으로는 수직형 배열회수보일러 과열기 튜브관군의 가스터빈 최대부하와 부분부하 운전 시 온도분포를 전산유동해석 결과를 이용해 계산하였으며, 이 결과와 실제 발전소 측정을 통해 획득한 온도분포 결과를 비교하였다. 마지막으로 부분부하 운전이 과열기 열성능에 미치는 영향을 살펴보고, 또한 부분부하 운전시에 유동의 불균일 현상을 제거할 수 있는 장치를 고안하였다.

주요어 : 배열회수보일러, 열성능, 부분부하 운전

Abstract— The purpose of this study is to apprehend the behavior of exhaust gas flow from gas turbine during part load operation in Heat Recovery Steam Generator. As a first step of this work, internal flow characteristics according to HRSG types were examined by CFD analysis. Next step, tube temperature according to gas turbine 53% and 100% load conditions were calculated by results of CFD and those were compared with temperature data gathered from real plant. Finally, thermal performance due to part load operation was calculated to estimate the influence of heat transfer in superheater. In addition, new type of device is suggested to eliminate the uneven temperature distribution of tubes during part load operation.

Key words : HRSG, Thermal performance, Part load operation

1. 서 론

가스터빈의 배열을 이용해 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동하는 역할을 하는 배열회수보일러는 복합화력발전소의 핵심장치 중의 하나이며, 가스터빈과 배열회수보

[†]To whom correspondence should be addressed
Dept. of mechanical engineering, 9 Sarim-dong, Changwon,
Gyeongnam, 641-773, Korea
Tel : 055-213-3606
E-mail : jisong@changwon.ac.kr

일리는 천이덕트로 연결된다. 가스터빈으로부터 배출되는 배가스 유동은 가스터빈의 부하에 따라 선회각(Swirl angle)이 달라지는 선회유동이며, 가스터빈과 배열회수보일러를 연결하는 천이덕트를 거치는 동안 급격히 확산되는 확산유동이다. 이러한 복합적인 유동특성으로 인해 가스터빈 배가스와 가장 먼저 만나는 전열관군인 과열기(HPHTSH : High Pressure High Temperature Super-Heater) 입구단면에서 편향된 배가스 속도 분포가 형성되어 불균일한 열전달이 발생될 수 있다. 따라서 편향된 배가스의 속도분포가 성능저하와 전열관 손상을 일으키는 것을 방지하기 위해 전열관군으로 유입되는 배가스 유동을 균일하게 만들어야 한다¹⁾. 유동을 균일하게 만들기 위해 전산해석기법을 이용하여 천이덕트가 설계되며, 필요에 따라 유동조절장치(FCD: Flow Correction Device)가 사용되기도 한다. 이때 천이덕트와 유동조절장치의 설계는 100% 부하를 기준으로 수행된다. 그러나 복합화력발전소는 기저부하용이 아닌 첨두부하용으로 건설되기 때문에 전력수요에 맞추어 잦은 기동정지 및 부하변동 운전을 하게 된다. 이로 인해 기저부하용처럼 일정 부하에서 지속적인 운전을 하는 발전소에서는 예상하지 못하는 문제가 발생하는데, 그 중 하나가 부하변동 운전시 배가스 유동 불균일에 의해 과열기가 받는 영향이다.

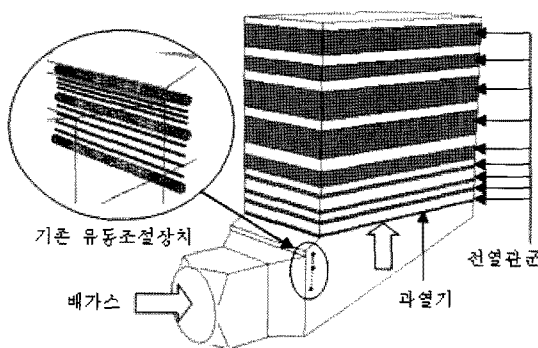
본 연구에서는 배가스 흐름 방향을 기준으로 구분되는 배열회수보일러의 유형에 따른 덕트 내부유동 특성을 비교하고, 100% 부하를 기준으로 설계된 천이덕트와 유동조절장치가 부분부하에서도 균일한 유동 분포를 유지할 수 있는지 살펴보았다. 또한 부분부하에서 배가스 유동이 크게 편향되는 수직형 배열회수보일러를 대상으로 유동 불균일이 과열기의 열흡수에 미치는 영향을 확인하고 실제 발전소 운전데이터 측정결과와 비교하였다. 마지막으로 100% 부하와 부분부하 조건에서 과열기 입구 유동분포를 개선할 수 있는 Vane형 유동조절장치를 고

안 하고 이를 전산유체해석을 통해 검증하였다.

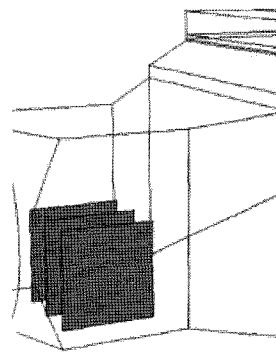
2. 배열회수보일러의 내부 유동 특성

Fig. 1과 같이 배가스의 흐름 방향이 수직인 경우를 수직형 배열회수보일러라 하고 Fig. 2와 같이 수평인 경우를 수평형 배열회수보일러라 한다. 덕트버너가 배열회수보일러 내부에 설치되지 않는다면, 수평형의 경우 유동조절장치를 사용하지 않는 경우가 일반적이며 수직형은 일반적으로 Fig. 1 (a)와 같은 유동조절장치를 사용한다. Fig. 1 (b)는 본 연구를 통해 개발된 Vane형 유동조절장치를 나타낸 것이다. 두 가지 형태의 배열회수보일러 내부 유동특성을 비교하고 Vane형 유동조절장치의 성능을 확인하기 위해 상용해석 툴인 Fluent 6.3을 사용하여 전산유체해석을 수행하였다. Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 배열회수보일러를 3차원 모델로 형상화하였으며, 배열회수보일러 입구부터 stack 입구까지의 영역을 모델에 포함하였다. 본 연구의 주 관심 대상은 첫 번째 전열관군인 과열기 입구 유동분포로 stack의 유무에 영향을 받지 않으므로 유동해석모델에서 stack을 제외하였다^{2,3)}. 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 Fig. 3 및 Table 1과 같으며 천이덕트 설계를 위해 가스터빈 제작사의 무차원 속도 데이터를 활용하였다.

Fig. 4는 전산유체해석을 통해 확인한 배열회수보일러의 과열기 입구단면에서 확인한 유동 균일도를 그래프와 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 4 좌측열의 그래프에서 Sec1 ~ Sec10은 과열기를 횡방향으로 나누었을 때 각 구간별 위치를 의미하며, 세로축 좌표는 각 구간별 평균유



(a) Conventional Flow Correction Device



(b) Vane type Flow Correction Device

Fig. 1. Flow analysis model for vertical type HRSG.

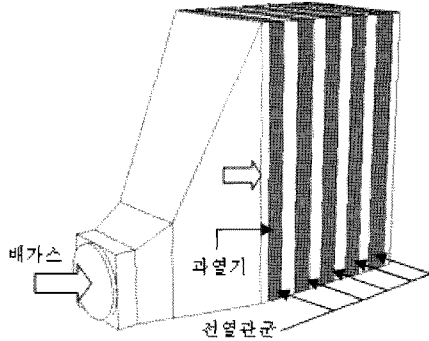


Fig. 2. Flow analysis model for horizontal type HRSG.

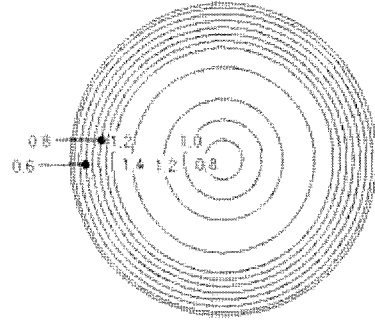
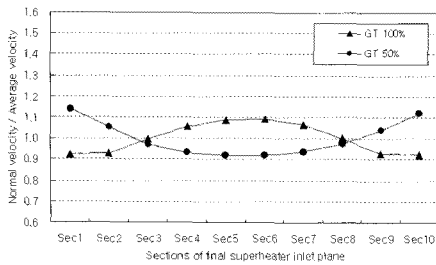


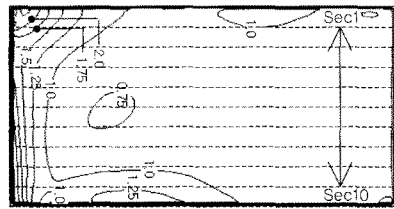
Fig. 3. Axial velocity distribution.

Table 1. Flow swirl angle by gas turbine loads.

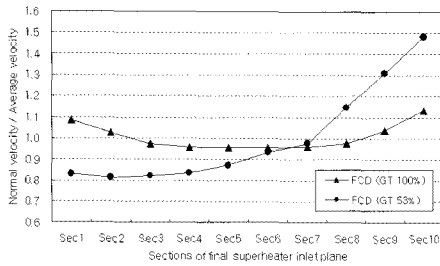
가스터빈 부하 선회각	수평형		수직형	
	100%	50%	100%	53%
선회각	4.06°	-41.73°	0.32°	-40.21°



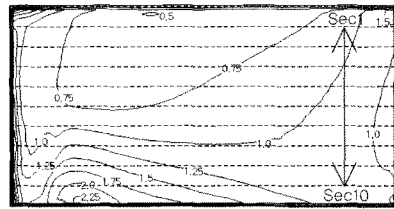
(a) Horizontal type HRSG



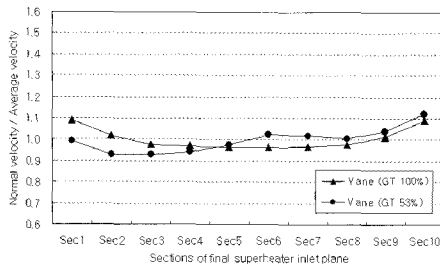
과열기 입구단면 Contour GT 50%



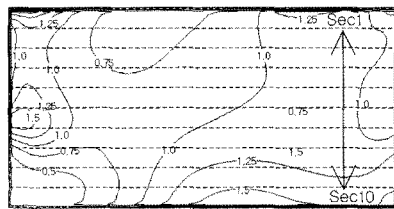
(b) Vertical type HRSG (Conventional FCD)



과열기 입구단면 Contour GT 53%



(c) Vertical type HRSG (Vane type FCD)



과열기 입구단면 Contour GT 53%

Fig. 4. Distribution of normalized normal velocity in superheater section.

속을 전체 단면의 평균유속으로 나눈 단면 수직방향 무차원 유속이다. 각 구간은 Fig. 4 우측열 그림에서 횡방향 직사각형으로 표시되어 있으며, Secl은 상부영역에 해당한다. Fig. 4 (a)~(c)에 나타난 것처럼 100% 부하에서 과열기 입구로 유입되는 구간별 단면 수직방향 무차원 유속 분포는 수평형과 수직형 모두 0.8~1.2 이내로 균일하다. 그러나 기존의 유동조절장치를 장착한 수직형 배열회수보일러의 경우 53% 부분부하에서 상당히 큰 유동 불균일이 발생하며 이때 최소값과 최대값의 비는 1.8 이상이다. 이와 같은 결과의 주원인은 선회유동 특성이 천이덕트의 형상에 따라 각각 다른 영향을 미쳤기 때문이다. 선회측과 출구방향이 동일한 수평형의 경우 선회유동은 확대되는 천이덕트 내에서 유동의 확산을 돕고 경사벽면에서의 유동 박리를 억제하는 역할을 하지만 선회측이 출구방향과 수직인 수직형에서는 유동이 덕트 한쪽 측면으로 편향되게 하는 원인이 되기 때문이다. 반면 Vane형 유동조절장치를 장착한 수직형 배열회수보일러는 53% 부분부하에서도 균일한 유동분포를 유지한다. 이는 덕트 아래쪽에 장착한 Vane형 유동조절 장치가 선회유동에 의해 유동이 한쪽 벽면으로 편향되는 것을 막아주기 때문이다.

3. 유동 불균일이 과열기 열흡수량에 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 Fig. 3의 데이터를 적용하였다. 이때 과열기 입구 배가스 온도는 모두 동일한 것으로 간주하였으며 과열기 전열관 내부를 통과하는 증기 유량과 온도는 동일한 것

으로 가정하였다. 성능계산에 사용된 주요 열전달 관계식은 다음과 같다.

관내열전달계수

성능 계산시 과열기 전열관 내부를 흐르는 유체가 과열증기이므로 Heinemann^[4] 식을 이용하여 관내 열전달 계수를 계산하였다.

$$Nu = 0.0133 \cdot Re^{0.84} \cdot Pr^{1/3} \tag{1}$$

관외열전달계수

과열기 전열관은 serrated finned tube로 구성되어 있으므로 식(2)와 같은 finned tube 제작사인 ESCOA사의 관외열전달계수 예측식^[5,6]을 사용하였다.

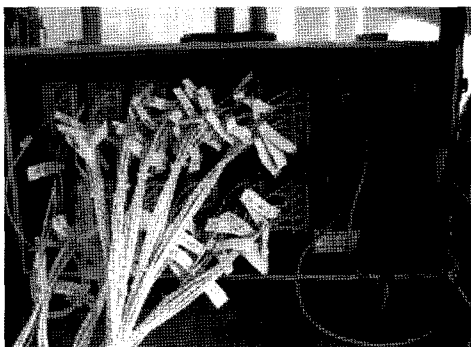
$$h_o = h_o(EA_{fo} + A_{po}) / A_o \tag{2}$$

$$h_o = 1 / (1 / (h_c + h_r) + R_{fo}) \tag{3}$$

$$j = C_1 C_3 C_5 \left(\frac{d_f}{d_o} \right)^{0.5} \left(\frac{T_b}{T_s} \right)^{0.25} \tag{4}$$

또한 이와 같은 현상이 실제 발전소에서도 발생하는지 확인하기 위해 전산유동해석과 매우 유사한 조건에서 운전되는 실제 400MW급 복합화력발전소를 대상으로 운전시 온도를 측정하고 성능계산 결과와 비교하였다. 과열기를 구성하고 있는 전열관 출구측에 총 90개의 K-Type 열전대를 부착하였으며, Yokogawa MW100 장비를 사용하여 온도 데이터를 취득하였다. Fig. 5은 온도데이터 획득을 위해 현장에 설치된 장비와 과열기 튜브에 설치된 열전대를 보여주고 있다.

Table 2는 수직형 배열회수보일러의 성능계산결과를



(a) Data acquisition system (MW100)



(b) Attached thermocouples on tubes

Fig. 5. Pictures of Data acquisition system and attached thermocouples.

Table 2. 수직형 배열회수보일러 성능계산 결과 비교

	과열기 출구온도 (°C)		과열기 출력 (MW)	
	GT 100%	GT 53%	GT 100%	GT 53%
기존 유동조정장치	567.74	561.97	21.155	23.223
Vane형 유동조정장치	567.68	563.16	21.155	23.391
전체구간 균일유속	567.65	563.40	21.144	23.420

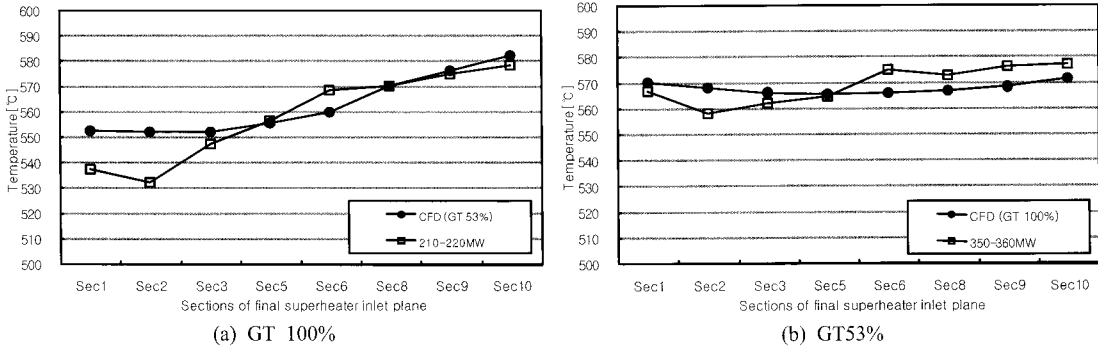


Fig. 6. Results from performance vs Data from actual plant.

정리하여 비교한 것이다. 기존 유동조정장치를 장착한 경우 53%부하에서 과열기 출구 증기온도는 배가스 유속 분포가 전체구간에서 균일한 경우에 비해 상대적으로 낮아지며 출력도 약 0.84% 감소된다. 반면 Vane형 유동조정 장치를 적용할 경우 과열기 증기 출구온도는 이상적인 경우와 거의 동일하며 출력 감소량도 0.12%에 불과하다. 이는 성능에 대한 설계여유가 없다면 저부하에서 설계 출력을 만족시키기 위해 기존 유동조정장치를 장착한 배열 회수보일러는 Vane형 유동조정 장치를 장착한 배열회수 보일러보다 전열면적을 더 설치해야 한다는 의미가 된다.

Fig. 6는 성능계산결과를 실제 복합화력 발전소 운전 데이터와 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 경향은 성능계산 결과에서도 확인할 수 있다. 성능계산 결과 100% 부하에서 최대 및 최소 온도차는 5.8°C이며, 53% 부하에서는 30.3°C로 증가한다. 또한 부분부하에서 측정 데이터와 동일한 경향의 좌우 온도 불균형이 발생한다.

4. 결 론

수평형 및 수직형 배열회수보일러의 유동특성을 비교하고 수직형 배열회수보일러에서 부분부하 운전시 발생하는 유동 불균일 현상이 과열기 전열관군에 미치는 영향

을 살펴보았으며, 또한 새로 고안된 Vane형 유동조정 장치의 성능을 확인하였다. 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 수평형 배열회수보일러는 100% 부하와 50% 부하 시 과열기 입구에서 균일한 유동분포를 유지하나, 기존의 유동조정장치를 장착한 수직형 배열회수보일러는 53% 부분부하에서 유동 불균일 현상이 발생한다. 따라서 수직형 배열회수보일러의 경우 100% 부하를 기준으로 유동조정장치를 설계하는 것은 바람직하지 않다.
- 기존 유동조정 장치를 장착한 수직형 배열회수보일러의 경우 유동 불균일 현상으로 인해 0.84%의 성능저하가 예측되었다. 만약 이 값이 설계여유를 초과한다면 과열기 출구 요구온도 기준을 만족시키지 못할 수도 있으며, 이 경우 과열기에 설치할 전열관 수를 증가시켜야 한다.
- 전산유동해석 결과를 이용하여 수행한 성능계산 결과는 400MW 실제 복합화력발전소 과열기 전열관 출구 온도측정 결과와 100% 부하와 53% 부하에서 동일한 경향을 나타내었다. 또한 기존 유동조정장치를 장착한 경우 실제 복합화력발전소에서는 46.2°C의 온도차가 발생했으며, 성능계산 결과를 통해 확인한 온도차는 30.3°C로 예측되었다. 이와 같은 온도 구배는 튜브 파손의 원인이 될 수 있다.
- 본 논문에 제시한 방법과 같이 전산유동해석과 성능계

산을 병행하면 부분부하에서 발생하는 배열회수보일러 과열기의 성능저하와 전열관 출구 증기온도 구배를 예측할 수 있으므로 보다 건전한 배열회수보일러 설계가 가능하다.

- Vane형 유동조절장치를 장착한 수직형 배열회수보일러의 경우 53% 부분부하에서도 과열기 입구로 균일한 유동을 공급할 수 있으므로 유동 측면에서 기존 유동 조절장치보다 성능이 우수하다.

G_n	$\text{kg/m}^2 \text{ s}$	Mass flux
j	-	Colburn heat transfer factor
Nu	-	Nusselt number
Pr	-	Prandtl number
T_b	$^{\circ}\text{C}$	Average outside fluid temperature
T_s	$^{\circ}\text{C}$	Average outside fin temperature

기호설명

A_{fo}	m^2/m	Fin or secondary outside surface area per unit length of tube
A_o	m^2/m	Total outside surface area per unit length of tube
A_{po}	m^2/m	Primary outside surface area per unit length of tube
C_p	J/kg K	Heat capacity at constant pressure
$C1$	-	Reynolds number correction to j-factor
$C3$	-	Geometry number correction to j-factor
$C5$	-	Nonequilateral and row correction to j-factor
d_f	m	Outside diameter of fin
d_o	m	Outside diameter of tube
E	-	Fin efficiency

참고문헌

1. A.F. Tenbusch, "CFD MODELING OF COGENERATION BURNER APPLICATIONS AND THE SIGNIFICANCE OF THERMAL RADIATIVE HEAT TRANSFER EFFECTS", Proceedings of IJPGC'03, 2003.
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, pp.496-502.
3. 이채수 외 3인, Flow Correction Device를 이용한 HRSG 내부의 유동 제어, 대한기계학회 에너지 및 동력공학부분 추계학술대회 논문집, 1999, pp.38-42.
4. J.B. Heinemann, "An Experimental Investigation on Heat Transfer to Superheated Steam in Round and Rectangular Channels," ANL-6213, 1960.
5. Marie-Noelle Dumont, Georges Heyen, "Mathematical modeling and design of an advanced once-through heat recovery steam generator", Computers and Chemical Engineering, 2004, 28, pp.651-660.
6. ESCOA, Fin tube manual, ESCOA Corp, 1979.