

발전용 보일러 전열 튜브 유로내 온도분포 불균일 개선기법

정훈* · 김범신* · 장석원* · 안연식* · 박건복** · 황정호***

The improvement method for power plant boiler temperature nonuniformity of heat transfer tube bank flow path

Hoon Jung, Bum-Shin Kim, Suck-Won Jang, Yeon-Shik Ahn, Gun-Bok Park, Jung-ho Whang

Key Words: power plant boiler(발전용 보일러), heat transfer tube bank(전열튜브군), Numerical Analysis(수치해석), temperature ditribution nonuniformity(온도분포 불균일), Operating Condition(운전조건), flow network(유로망), connetion matrix(접속행렬)

Abstract

Almost all power plant boiler has temperature distribution nonuniformity problem in heat transfer tube flow path. It can cause hot spot damage of superheated or reheated heat transfer section and reduce maintenance schedule when nonuniformity is severe. There are two solutions for improvement temperature nonuniformity. one is change of gas flow distribution of gas path and the other is contorl steam flow in tube bank. Of course, first method is very difficulty to apply but second method isn't. In this paper, contorl steam flow is used to solve temperature nonuniformity of power plant boiler.

기호설명

- D : 유로망 접속행렬
- E : 기본행렬
- G : 질량유량(kg/s)
- H : 엔탈피 행렬
- I : 단위벡터
- P : 압력
- ΔH : 엔탈피차
- ΔP : 압력차

윗첨자

- T : 전치행렬
- : -행렬
- + : +행렬
- D : 대각화 행렬

S : 경계행렬

1. 서론

현재 상업운전 중인 보일러는 연소형식, 전열부 배치방식, 사용연료 등에 의해 분류되며 크게 산업용 보일러와 발전용 보일러로 구분한다. 국내의 경우 대부분의 발전용 보일러는 기저부하를 담당하는 유연탄 보일러와 중간부하를 담당하는 중유, 첨두부하를 담당하는 가스 보일러로 나뉘며 유연탄 보일러의 경우는 대향형 연소와 탄젠셜 연소방식을 중유의 경우는 대부분 대향형 연소방식을 채택하고 있다.

이러한 다양한 보일러는 각각의 연소방식과 증기온도조절 방식 등 고유특성의 차이점으로 상이한 문제들을 안고 있으나 공통적으로 한가지 문제점에서 일치점을 보이고 있다. 그것은 대류전열부에서 발생하는 온도불균일 현상이다. 대류전열부의 온도불균일현상의 원인은 대류전열부를 흐르는 고온가스의 유량과 온도가 일정한 분포를

* 한전 전력연구원

** 한국 중부발전(주) 보령화력본부

*** 연세대학교 기계공학과

형성하지 못한 때문이며, 이는 고유의 연소 형식, 연료유량 및 연소용 공기유량 분배, 노내 연소가스 재순환 등의 다양한 원인에 의해 나타날 수 있다.

보일러 대류전열부에서 나타나는 온도 불균일 현상을 개선하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫 째는 연소가스 유로에 유량을 조절하는 보조 설비를 장치하는 방법이다. 이 방법은 고온영역에서 연소가스 온도가 1000℃에 근접하여 가스유량조절장치가 별도의 냉각계통을 가지고 있지않는 한 사용하기 어려우며 또한 보일러 연소가스가 운전부하, 과잉공기조건 등에 따라 유량과 온도가 바뀌므로 현실적으로 현장에 적용하기는 매우 곤란하다. 두 번 째 방법은 증기유량을 조절하는 방법이다. 거의 모든 보일러는 동일한 형상의 대류전열부 유로로 구성되어있다. 즉 가스흐름에 대해 수직인 방향으로는 동일한 전열튜브군으로 구성되어있으며 균일한 유량이 흐르고 있다. 이러한 균일한 유량을 조절하여 저온부는 유량을 적게 공급하고 고온부는 유량을 상대적으로 많이 공급하여 온도불균일 문제를 해결 할 수 있다. 그러나 이 방법도 보일러 운전조건 변화에 따라 고온과 저온구역의 위치가 변화한다면 적용하기 어렵다.

본 연구에서는 유연탄 500MW Drum형 보일러인 보령화력 1, 2호기 보일러를 해석대상으로 하였으며 보령화력의 경우 운전조건에 무관하게 대류전열부 측벽부근에서는 항상 낮은 온도를 나타내는 점을 이용하여 증기유량을 조절, 대류전열부 온도불균일 문제를 향상시키는 방법을 제시하였다.

2. 해석 이론

2.1 유로망 해석(Flow Network Analysis)

유로망 해석은 복잡한 유로망(Flow Network)의 유량, 압력, 온도 등의 물성치에 대한 해석 및 설계를 위해 개발된 기법으로 질량보존법칙, 운동량보존법칙, 에너지보존법칙을 적용한다. 유로망은 크게 유로 분기점(Node)과 유로(Flow Branch)로 구성되며 그림1에 예시하였다.

원으로 표시된 부분이 유로망의 분기점이고 분기점과 분기점을 잇는 화살표가 유로이다. 각 유로에는 일정한 유량이 흐르고 이 유량들은 각 분기

점에 대해 질량보존법칙을 만족시킨다. 유로는 실제 배관이나 튜브 등 유체가 흘러가는 관로이

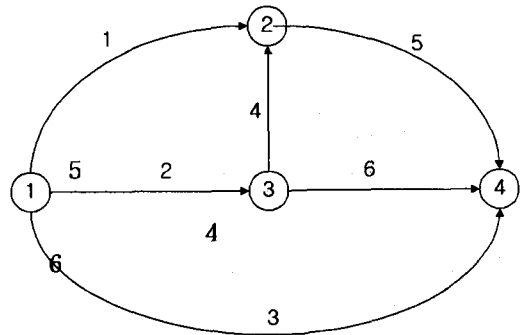


그림 1 유로망 구성도

고 이러한 관로에는 마찰이나 유동변화 등에 따른 압력손실이 수반된다. 각 유로의 입구압력은 유로 출발 분기점의 압력이고 출구압력은 유로 최종 분기점의 압력이므로 각 분기점과 이를 잇는 유로에 대해서는 운동량보존법칙이 성립한다. 각 유로에는 가열이나 냉각에 따른 출입 열량이 주어질 수 있으며 출입 열량에 따른 온도변화를 계산하기 위해서 각 유로와 유로 분기점에 대해 에너지 보존법칙을 적용한다. 결론적으로 유로망 해석은 복잡한 유로에 대한 모든 물성치 정보를 얻기 위해 하나의 유로망을 해석대상 모델로 설정하여 이 모델에 대한 지배방정식을 연립하여 풀어내는 기법이라 정의할 수 있다. 유로망은 시작점과 종점의 수, 각 분기점의 수에는 제한이 없으나 유로와 유로 분기점의 숫자가 증가할수록 계산식은 복잡해지고 풀어야할 방정식은 증가하여 컴퓨터를 이용하지 않고는 해석이 불가능해질 뿐 아니라 극단적으로 많은 유로와 유로 분기점에 대해서는 고성능의 컴퓨터가 요구된다.

2.2 지배방정식 및 계산기법

유로망 해석의 요체는 유로망 접속행렬을 구성하는 것이다. 유로망 접속행렬은 유로가 출발하는 분기점을 1, 유로의 종점을 -1로 표시하여 행렬의 열수는 유로수와 일치하고 행수는 분기점수와 일치하겠끔 행렬을 구성한다. 그림1과 같은 경우 유로망 접속행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

유로망 접속행렬 D 를 이용하여 각 유로를 흐르는 질량유량에 대해 적용하면

$$D \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \\ G_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + G_2 + G_3 \\ 0 \\ 0 \\ -G_3 - G_5 - G_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때 D 는 접속행렬이고 (2)식의 우변항 G^S 는 경계유량행렬이라 한다. 경계유량행렬은 각 분기점에서 질량평형을 나타내며 시작 분기점은 그림1과 같이 1, 2, 3번 유로를 통해 전체 유로망에 유량을 공급하며 이는 경계유량행렬의 첫 번째 요소로 나타난다. 또한 최종 분기점은 유로망에서 3, 5, 6 유로를 통해 유량을 공급받으며 이는 경계유량행렬의 마지막 요소에 나타나있다. (2)식과 같은 형태를 압력과 엔탈피에 대해 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$D^T P = \Delta P \quad (3)$$

$$D^T H = \Delta H \quad (4)$$

(3)식과 (4)식에서 ΔP 와 ΔH 는 각각 유로에서 발생하는 압력차와 엔탈피 차이이고 D^T 는 접속행렬의 전치행렬이다. 압력차는 각 유로를 흐르는 유체의 질량유량과 온도 배관조건, 상(Phase), 배관형상 등에 의한 함수로 나타낼 수 있으며 엔탈피 차는 유로의 출입 열량과 유량, 압력 등의 함수로 나타낼 수 있다. (2)식과 같은 형태를 엔탈피에 대해 적용하면

$$DH = H^S = \begin{bmatrix} (G_1 + G_2 + G_3)H_1 \\ 0 \\ 0 \\ -(G_3 + G_5 + G_6)H_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같은 결과식을 얻을 수 있다. 여기서 H^S 를 경계엔탈피행렬이라 하며 경계유량행렬과 마찬가지로 첫 번째 행은 유로망 입구 분기점의 총 엔

탈피이고 마지막 행은 유로망 출구 분기점의 총 엔탈피이다. 시작 분기점과 최종 분기점을 제외한 각 분기점에 대해서 에너지 보존법칙의 입장에서 고찰하면 경계엔탈피행렬은 각 분기점을 빠져나가는 유체의 총 엔탈피와 분기점으로 유입되는 유체의 엔탈피는 같다. 따라서 시작 분기점과 최종 분기점을 함께 고려한다면 각 분기점에 대한 에너지평형은 (5)식과 같은 형태로 나타날 것이다. 이를 이용해 (5)식을 두 개의 별도의 행렬로 나타낼 수 있다. 즉 분기점으로 유입되는 엔탈피 행렬과 분기점을 빠져나가는 엔탈피 행렬이다. 이를 나타내면

$$H_{\text{node, out}} = [(D^+ G^D) \tilde{I}]^D H \quad (6)$$

$$H_{\text{node, in}} = (D^- G^D) H_{\text{out}} \quad (7)$$

와 같으며 여기서 $H_{\text{node, out}}$ 은 분기점을 빠져나가는 엔탈피, $H_{\text{node, in}}$ 은 분기점으로 유입되는 엔탈피, H 는 분기점의 엔탈피이고 H_{out} 은 유로 출구의 엔탈피를 나타내며 단위벡터 I 는 유로수를 행수와 열수로 갖는 정방행렬로 다음과 같다.

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(6)식과 (7)식은 시작 분기점과 최종 분기점을 포함하는 식이므로 두 식을 더하면 경계엔탈피행렬과 같다.

$$[(D^+ G^D) \tilde{I}]^D H + (D^- G^D) H_{\text{out}} = H^S \quad (9)$$

각 유로에 대해서 유로의 출구 엔탈피에서 입구의 엔탈피를 뺀 값은 유로에서 발생하는 엔탈피차를 나타낸다. 이를 식으로 나타내면

$$H_{\text{out}} - H_{\text{in}} = \Delta H \quad (10)$$

와 같으며 다음과 같은 관계도 각 유로에 대해서 성립한다.

$$D^+ H = H_{\text{in}} \quad (11)$$

(9),(10),(11)식을 연립하여 Block 행렬형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} [(D^+ G^d)]^d & D^- G^d & 0 \\ D^+ T & 0 & -E \\ 0 & E & -E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ H_{out} \\ H_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^s \\ 0 \\ \Delta H \end{bmatrix} \quad (12)$$

와 같다. (12)식이 각 유로에 대한 에너지방정식의 최종형태이다. 그리고 (2)식과 (3)식을 연립하여 (12)식과 같은 형태로 표시하면

$$\begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & D^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^s \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (13)$$

와 같이 나타낼 수 있다. (13)식은 각 유로의 유량과 압력차에 대한 식으로 (12)식과 (13)식을 풀면 유로망을 구성하는 모든 유로와 분기점의 물성치를 계산 할 수 있다.

3. 해석조건 및 결과

3.1 해석조건

- 보일러 과열기 출구조건은 터빈출력에 의해 제어됨
- 보일러 과열기 유량분배를 위한 오리피스 설치에 따른 압력강하량 변화는 미소
* 출구압력기준 1% 미만
- 과열기 유량과 흡열량은 일정
- 과열기 열흡수량은 최근 성능진단자료를 기준으로 계산
- 과열기 형상 및 튜브 재질자료는 설계자료 및 최근 보수자료에 기초
- 과열기 출구온도분포는 97년 9월, 98년 1월, 99년 12월, 2000년 1월 자료 이용

3.2 현재 운전현황

현재 과열기 출구온도 분포는 그림 2, 3과 같이 부분적으로 580 °C에 이르는 고온상태로 운전되고 있다. 튜브 재질을 고려하였을 때 최대 과열증기 출구온도는 약 560 °C이나 현재 대부분의 운전조건에서 국부적인 최고온도는 560 °C를 상회함을 그림 2, 3에서 알 수 있다. 따라서 이러한 국부적인 최고온도를 낮추지 못한다면 보일러 튜브의 국부과열에 의한 손상과 기계적인 수명감소 효과를 발생시킬 가능성이 높다.

본 연구에서는 이러한 국부과열현상제어를 위해 가장 일반적으로 사용되는 오리피스를 이용한 증기유량 제어방식을 사용하였다. 오리피스를 이용한 증기유량 제어방식은 보령화력보일러 제작사인 B&W사에서 보령화력 준공 직 후 주증기 국부과열 감소를 위해 이미 사용되어졌으며

현재 과열기 측벽부근 1, 2번 및 28, 29번 유로에 직경비 67%의 오리피스가 설치되어있다

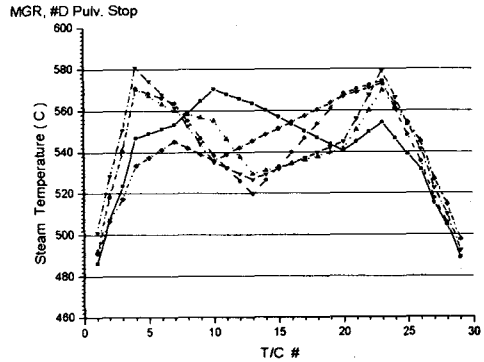


그림 2 보령화력 과열기 출구증기 온도분포(1)

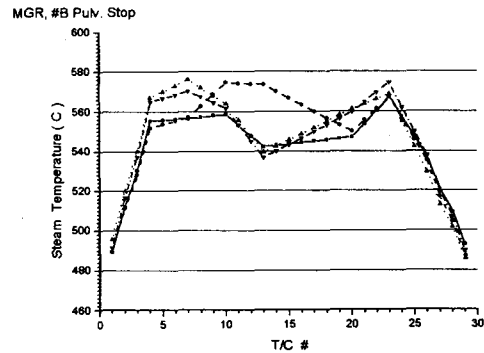


그림 3 보령화력 과열기 출구증기 온도분포(2)

3.2 해석결과

첫 번째 해석은 기존의 과열기 유로에 설치된 2개의 오리피스의 직경비를 67%에서 35%로 감소시켜 보았다. 35%로 감소시킨 이유는 튜브의 수명과 현재 운전상태를 고려할 때 국부적인 최대 온도강하량은 10 °C이며 이를 만족시킬 수 있는 오리피스 직경비가 35%이기 때문이다.

그림 4의 결과에서 2번째 및 28번째 유로에서 과도한 온도상승이 나타남을 알 수 있다. 이는 2번째 및 28번째 유로를 흐르는 유량이 평균유량에 비해 상대적으로 적어져 증기유로의 열용량이 감소했기 때문이다. 이러한 현상은 오리피스 직경이 감소함에 따라 더욱 2, 28번째 유로의 급격한 온도상승 경향을 나타낸다.

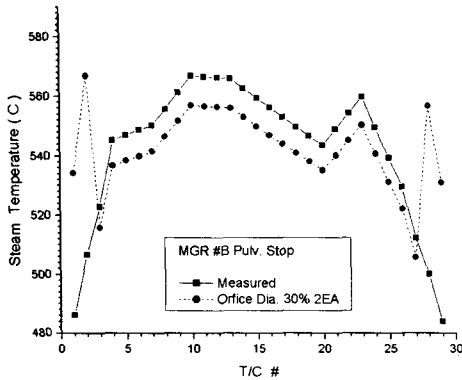


그림 4 과열기 측벽부근 35% 직경비 오리피스 2개 설치시

따라서 목표 온도강하량 10 °C를 만족시키기 위해서는 오리피스 설치수를 증가시켜야 한다. 그림 5는 오리피스 설치개수를 3개로 증가시키고 목표온도 10 °C를 만족시키는 오리피스 직경비 45%에서 결과이다.

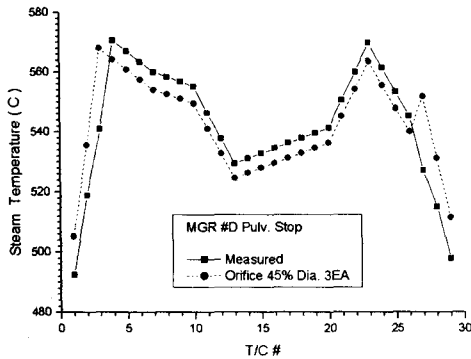


그림 5 과열기 측벽부근 45% 직경비 오리피스 3개 설치시

그림 5의 3번째와 27번째 유로에서 560 °C를 넘어서는 온도값이 나타나 45% 직경비의 오리피스도 현장적용에는 어려움이 있다. 따라서 측벽부근 유로에서 과도한 온도상승을 방지하면서 목표 온도강하를 만족시키는 오리피스 직경비는 반복 계산을 통해 측벽에서부터 40%, 40%, 55% 임을 알 수 있었으며 결과는 그림 6과 같다.

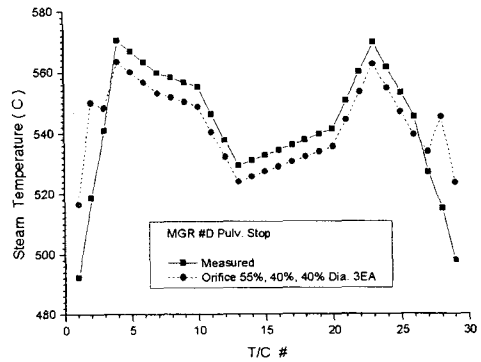


그림 6 과열기 측벽부근 40, 40, 55% 직경비 오리피스 3개 설치시

4. 결 론

보령화력 보일러 과열기 열전달 유로에 대해 유로망 해석기법을 이용 유량분배 및 온도분포를 해석하였다.

- 과열기 온도불균일을 개선하기 위해 유로내 오리피스를 설치하여 유량을 제어하는 방법을 고려했다.
- 기존의 설계사에서 설치한 직경비 67%의 오리피스는 효과가 거의 없어 오리피스 직경축소와 설치수를 증가시켜 해석을 수행하였다.
- 해석결과 최적 오리피스 직경비 및 설치수는 측벽에서 40%, 40%, 55% 직경비 및 3개입을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Frank M. White, 1986 "Fluid Mechanics", McGRAW-HILL pp287~pp371
- (2) V. Ganapathy, 1993, "Steam Calculation", Marcel Dekker, pp210~233
- (3) 김태국, 2000, "열시스템 설계 및 시뮬레이션", 인터비전, pp121~134
- (4) Prabir Basu, Cen Kefa, Louis Jestin, 1999, "Boiler and Burners Design and Theory", Springer, pp161~211
- (5) T. Kuppan, 2000, "Heat Exchanger Design Handbook", Marcel Dekker, pp27~157
- (6) 조형래, 홍은기, 김의환, 김경철, 1998, "보령화력 1호기 종합성능진단결과 보고서", 전력연구원