

발전용 보일러 주증기 튜브 과열방지용 오리피스 설계기법

김범신⁺, 유성연^{*}, 하정수^{**}, 김의현^{**}

The design method of overheat protection orifice for power plant boiler super heated tube

Bum-Shin Kim, Seong-Yeon Yoo, Jung-Su Ha, Eui-Hyun Kim

Key Words: power plant boiler(발전용 보일러), pulverized coal(미분탄 연소), gas temperature distribution(가스온도분포), overheat protection orifice(과열방지 오리피스), steam flow distribution(증기유량분포), flow net analysis(유로망해석), design process(설계효율), steam header configuration(증기헤더구성), intermediate manifold header(중간분배관)

Abstract

It is important that overheat protection of super heated tube in boiler operation and maintenance. The overheat of super heat tube can make damage and rupture of tube material, which causes accidental shutdown of boiler. The super heated tube overheat is almost due to the lack of uniformity of gas temperature distribution. There are two ways to protect overheat of super heated tube. The one is to control hot gas operation pattern which is temperature or flow distribution. the other is to control super heated steam flow distribution. The former is difficult than the later, because of control device design. In this paper steam flow control method which uses orifices is proposed to protect overheat of super heat tube.

기호설명

A : 배관/튜브 단면적(m²)
 C : 보정계수
 D : 배관/튜브 직경(m)
 f : 마찰계수
 g : 중력가속도(m/s²)
 HL : 수두손실(m)
 k : 조도(mm)
 K : 손실계수
 L : 배관/튜브 길이(m)

n : 유로갯수
 Q : 증기유량(kg/s)
 Re : 레이놀즈수
 T : 온도(K)

아래첨자

b : bend
 n : n번째 유로
 p : path

1. 서 론

현재 발전용으로 사용되는 대용량 보일러는 크게 드럼이 설치된 아임계압 보일러와 드럼이 없는 One through형 초임계압 보일러로 구분된다. 아임계압 보일러와 초임계압 보일러는 증발방식에서 차이가 있을 뿐 과열기 및 재열기의 과열증기유로구성은 상호 유사하다.

† 전력연구원 발전연구실

E-mail : kimbs@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5228 FAX : (042)865-5304

* 충남대학교 기계설계학과

** 전력연구원 발전연구실

보일러 과열증기유로의 구성은 크게 헤더와 열교환 튜브로 나눌수 있으며 헤더는 열교환튜브로 증기를 공급하는 입구헤더와 열교환 튜브에서 가열된 증기가 모여 다른 헤더 또는 외부시스템으로 공급되는 출구헤더가 있다. 열교환 튜브들은 입구헤더와 출구헤더 사이에 위치하며 통상 10 ~ 20개가 모여 하나의 관벌을 형성한다. 이 관벌들은 다시 20 ~ 30 개 정도가 모여 입구헤더와 출구헤더 사이에 연결된다.

본 논문은 차세대 화력발전시스템 설계 및 신뢰성 평가수행과 관련하여 보일러 과열증기유로 설계에 따른 유량분포특성 해석기법을 제시하고 이를 이용한 열교환 튜브의 열용량 평가 및 과열특성에 대해 고찰하였다.

2. 해석이론

2.1 과열증기 유로의 구성형태

Fig. 1은 일반적인 과열증기 유로의 구성형태를 나타낸 것이다. Fig. 1의 (a)는 입구헤더로 공급되는 증기의 방향과 출구헤더에서 배출되는 증기의 방향이 반대인 경우이며 (b)는 공급되는 증기의 방향과 배출되는 증기의 방향이 동일한 경우이다. (c)는 입구헤더의 중앙으로 증기가 공급되며 출구헤더에서는 측면방향으로 배출되는 경우이고 (d)는 입구헤더 중앙으로 공급되고 중앙으로 배출되는 경우이다.

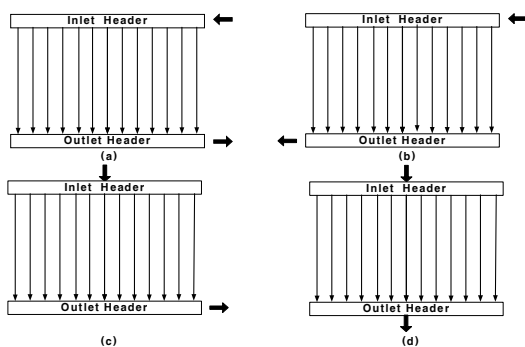


Fig. 1 The basic types of superheated steam flow path

이 밖에도 입구헤더의 양측에서 증기가 공급되거나 출구헤더의 양측으로 증기가 배출되는 형태까지 고려한다면 매우 다양한 형태의 과열증기유로시스템이 존재할 수 있다. 이러한 다양한 형태

의 과열증기유로시스템은 각각의 독특한 헤더에서 압력분포특성과 유량분포특성을 가지며 이로 인해 유로시스템의 고온부 유로와 저온부 유로가 결정된다.⁽¹⁾ 즉 가스온도분포가 일정하다면 유량이 상대적으로 많이 공급되는 유로는 저온부가 되며 유량이 적은 유로는 고온부가 된다.

2.2 지배방정식

증기유로는 앞에서 언급하였던 것과 같이 헤더와 튜브로 연결된다. Fig. 2는 증기가 증기유로 내를 흐를 때 각 유로에서 유량분배와 유로 분기점 및 유로에서 발생하는 손실을 설명한 것이다.

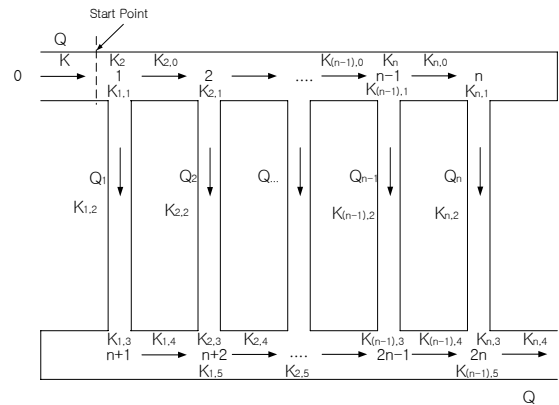


Fig. 2 The head loss Coefficient and flow rate distribution in flow path

Fig. 2에서 입구헤더로 유입된 증기량 Q는 첫 번째 유로분기점 '1'에서 유량 Q₁과 Q - Q₁으로 분리되어 Q₁은 첫 번째 유로를 거쳐 출구헤더로 흐르고 Q - Q₁은 입구헤더의 두 번째 분기점 '2'로 흐른다. 유로분기점 '2'에서 유량은 다시 Q₂와 Q - Q₁ - Q₂로 나뉘어지며 출구헤더의 유로분기점 'n+2'에서 첫 번째 유로의 흐름과 두 번째 유로의 흐름이 합쳐진다. 유로의 입구(유로분기점 '0')에서 'n+2'까지 흐른 두 유로의 수두차는 동일하다. 즉 경로 0 - 1 - n+1 - n+2로 흐른 첫 번째 유로와 0 - 1 - 2 - n+2로 흐른 두 번째 유로는 다르지만 동일한 입구(유로분기점 '0')와 출구(유로분기점 'n+2')를 공유하므로 압력손실도 동일하여야 한다. 유로출구의 총유량은 Q이고 각 유로의 입구에서 최종출구점 '2n'간의 손

실수두를 ΔH 라하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \Delta H_{path1} &= \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_1^2}{2g}K_{1,1} + \frac{U_2^2}{2g}K_{1,2} + \frac{U_3^2}{2g}K_{1,3} + \frac{U_4^2}{2g}K_{1,4} + \frac{U_5^2}{2g}K_{1,5} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,4} \\ &+ \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,5} + \dots + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),4} + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),5} \\ &+ \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)+n}^2}{2g}K_{n,4} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{path2} &= \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_2^2}{2g}K_2 + \frac{U_3^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,1} + \frac{U_5^2}{2g}K_{2,2} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,3} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,4} \\ &+ \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,5} + \dots + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),4} + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),5} \\ &+ \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)+n}^2}{2g}K_{n,4} \end{aligned} \quad (2)$$

.....

$$\begin{aligned} \Delta H_{path(n-1)} &= \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_3^2}{2g}K_3 + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_5^2}{2g}K_3 + \frac{U_6^2}{2g}K_{3,0} + \dots + \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1)} \\ &+ \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),0} + \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),1} + \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),2} + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),3} \\ &+ \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),4} + \frac{U_{1+2+\dots+(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),5} + \frac{U^2}{2g}K_{n,4} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{pathn} &= \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_3^2}{2g}K_2 + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_5^2}{2g}K_3 + \frac{U_6^2}{2g}K_{3,0} + \dots + \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1)} \\ &+ \frac{U_{(n-1)}^2}{2g}K_{(n-1),0} + \frac{U_n^2}{2g}K_n + \frac{U_n^2}{2g}K_{n,0} + \frac{U_n^2}{2g}K_{n,1} + \frac{U_n^2}{2g}K_{n,2} + \frac{U_n^2}{2g}K_{n,3} \\ &+ \frac{U^2}{2g}K_{n,4} \end{aligned} \quad (4)$$

윗 식에서 K 는 입구헤더에서 유로분기점 '1'까지 배관손실계수이고 $K_{1,1}$ 은 유로분기점 '1'에서 총유량과 첫 번째 유로유량 Q_1 의 유량분기에 의한 손실계수, $K_{1,2}$ 는 첫 번째 유로의 배관손실계수, $K_{1,3}$ 는 첫 번째 유로와 출구헤더의 유량합류에 의한 손실계수, $K_{1,4}$ 는 출구헤더의 유로분기점 'n+1'과 'n+2'사이의 배관손실계수, $K_{1,5}$ 는 첫 번째 유로유량 Q_1 과 두 번째 유로유량 Q_2 와 합류에 의한 손실계수이다. K_2 는 총유량과 총유량에서 첫 번째 유로유량 Q_1 을 뺀 나머지 유량과 분기에 의한 손실계수이며, $K_{2,1}$ 은 유로분기점 '2'에서 $Q - Q_1$ 과 두 번째 유로유량 Q_2 의 유량분기에 의한 손실계수이고 이하 손실계수는 첫 번

째 유로에서의 손실계수와 동일한 의미를 지니고 있다. 그리고 입구헤더에서 U_n (n=2, 3, 4, ... n-1)은 n 번째 유로로 가는 총유량의 유속을 의미한다. 즉 $U_3 = Q - Q_1 - Q_2$ 로서 입구헤더의 세 번째 유로로 가는 총유량으로 총유량에서 첫 번째와 두 번째 유로의 유량을 뺀 값을 의미한다. 또 U_{m+n} 은 유로 m과 n의 유량의 합이 출구헤더를 흐른다고 가정한 유속이다.

첫 번째 유로의 유량 Q_1 과 Q_2 는 출구헤더의 분기점 'n+2'에서 합류된다. 따라서 유로분기점 'n+2'를 첫 번째 유로와 두 번째 유로의 출구로 고려하면 입구 '0'와 출구 'n+2' 사이의 첫 번째 유로와 두 번째 유로의 수두손실은 같아야 한다. 첫 번째 유로의 '0'와 'n+2'사이의 수두손실을 $HL_{p1,1}$, 두 번째 유로의 손실 $HL_{p1,2}$ 은 다음식과 같다.

$$HL_{p1,1} = \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_1^2}{2g}K_{1,1} + \frac{U_2^2}{2g}K_{1,2} + \frac{U_3^2}{2g}K_{1,3} + \frac{U_4^2}{2g}K_{1,4} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{1,5} \quad (5)$$

$$HL_{p1,2} = \frac{U^2}{2g}K + \frac{U_2^2}{2g}K_2 + \frac{U_3^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,1} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,3} \quad (6)$$

(5)식과 (6)식은 일치해야 하므로 다음과 같은 관계가 성립하여야 한다.

$$\begin{aligned} &\frac{U_1^2}{2g}K_{1,1} + \frac{U_2^2}{2g}K_{1,2} + \frac{U_3^2}{2g}K_{1,3} + \frac{U_4^2}{2g}K_{1,4} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{1,5} \\ &= \frac{U_2^2}{2g}K_2 + \frac{U_3^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,1} + \frac{U_{1+2}^2}{2g}K_{2,3} \end{aligned} \quad (7)$$

이를 단순하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$HL_{p1,1} = HL_{p1,2} = HL_{p1} \quad (8)$$

출구헤더의 유로분기점 'n+3'을 다시 최종출구로 고려하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} &HL_{p1} + \frac{U_{1+2+3}^2}{2g}K_{2,4} + \frac{U_{1+2+3}^2}{2g}K_{2,5} \\ &= \frac{U_3^2}{2g}K_2 + \frac{U_4^2}{2g}K_{2,0} + \frac{U_5^2}{2g}K_3 + \frac{U_6^2}{2g}K_{3,0} + \frac{U_7^2}{2g}K_{3,1} + \frac{U_8^2}{2g}K_{3,2} + \frac{U_9^2}{2g}K_{3,3} \\ &= HL_{p2} \end{aligned} \quad (9)$$

출구헤더의 유로분기점 'n+4'에 대해 고려하면

$$HL_{p2} + \frac{U_{1+2+3+4}^2}{2g}K_{3,4} + \frac{U_{1+2+3+4}^2}{2g}K_{3,5}$$

$$= HL_{p2} - \left(\frac{U_3^2}{2g} K_{3,1} + \frac{U_3^2}{2g} K_{3,2} + \frac{U_3^2}{2g} K_{3,3} \right) + \frac{U_4^2}{2g} K_{4,1} + \frac{U_4^2}{2g} K_{4,2} + \frac{U_4^2}{2g} K_{4,3}$$

$$= HL_{p3} \tag{10}$$

출구헤더의 $n+m(3 \leq m \leq n)$ 번째 유로분기점에 대해서

$$HL_{p(m-1)} = HL_{p(m-2)} + \frac{1}{2gA^2} (K_{m-1,4} \sum_{i=1}^m Q_i^2 + K_{m-1,5} \sum_{j=1}^m Q_j^2) \tag{11}$$

$$\frac{1}{2gA^2} (K_{m-1,4} \sum_{i=1}^m Q_i^2 + K_{m-1,5} \sum_{j=1}^m Q_j^2)$$

$$= \frac{Q_m^2}{2gA^2} (K_{m,1} + K_{m,2} + K_{m,3}) - \frac{Q_{m-1}^2}{2gA^2} (K_{m-1,1} + K_{m-1,2} + K_{m-1,3}) \tag{12}$$

와 같은 식이 성립한다.

(1)식에서 (12)식까지 살펴보면 미지수는 각 유로의 수두손실과 유량으로 개수는 $2n$ 개이다. 방정식의 개수는 (11), (12)식과 같은 일반손실수두식이 $2n-4$ 개와 (5),(6),(7)식 및 유량보존식을 포함하면 $2n$ 개가 존재하여 미지수의 풀이가 가능하다. (2) (3) (4)

3. 해석결과 및 검토

실제 발전용 보일러 증기유로 내의 유량분포특성을 고찰하기 위하여 500MW 미분탄 연소 보일러 과열증기 유로형상을 모델로 계산을 수행하였다. 보일러 유로의 형상은 Fig. 5 및 6과 같다.

Fig. 5는 증기유로의 측면도이고 Fig. 6는 상부에서 관찰한 유로형상으로 주 입구헤더에서 29개의 분배관으로 증기가 공급되며, 각 분배관은 20개의 튜브열과 연결되어있다. 20개의 튜브열은 출구헤더 측의 분배관에 다시 연결된다. 이 분배관에서 Fig. 5의 우측 출구헤더부와 같이 20개의 튜브가 다시 시작되어 출구헤더로 직접 연결된다.

유로형상의 복잡성은 계산의 복잡성과 연결되며 계산의 수렴성을 떨어뜨리는 중요한 요인이 된다. 보다 명확하게 계산모델을 이해하기 위하여 29개 분배관 각각을 단위유로로 고려하고 29개 단위유로 중 하나의 단위유로에 대한 유로손실을 Fig. 7와 같이 제시하였다. 유로의 시작은 입구헤더이므로 입구헤더에서 배관마찰손실이 고려되어야하며 다음은 헤더에서 분배관으로 유로가 분기되며 유로분기에 의한 손실이 나타난다.

또한 분배관에서 20개의 튜브로 유로가 나뉘어지기 때문에 다시 유로분기에 의한 손실이 나타나고 각 튜브에서는 관로마찰손실과 bend에 의한 손실이 발생한다. 튜브를 거치고 난 후 출구측 헤더 분배관에서 튜브유로가 모여 이때 유로합류에 의한 손실이 생기고 다시 튜브로 유로분기에 의한 손실이 반복되어 나타난다.

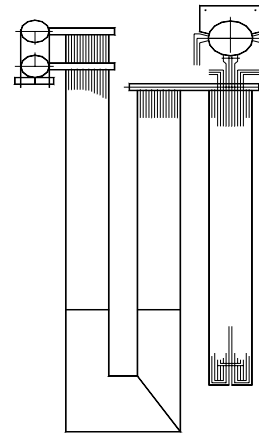


Fig. 3 Side view of model steam flow path

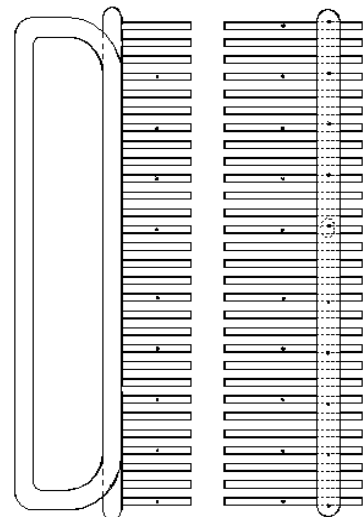


Fig. 4 Upper view of model steam flow path

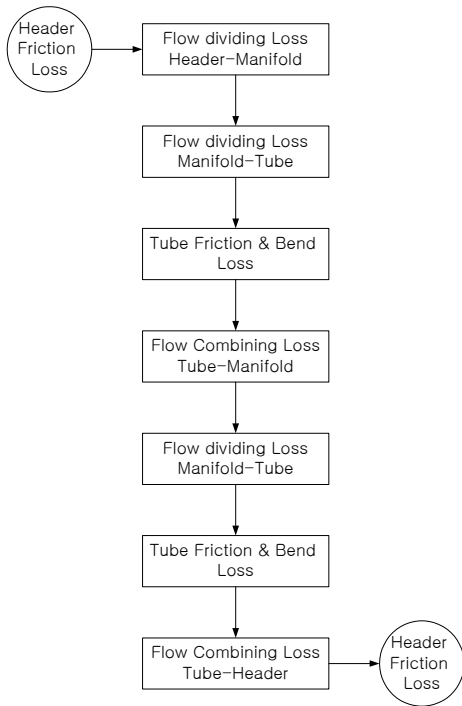


Fig. 5 Head loss diagram

튜브유로가 끝나면 헤더에서 모든 튜브유로가 모여며 이때 유로합류에 의한 손실과 헤더를 통과하며 마찰손실이 같이 나타난다. 이러한 손실 모델과 Fig. 8의 유로구성을 조합한 해석모델에 Table. 1의 운전조건과 Table. 2의 형상자료를 적용하면 Fig. 9과 같은 유량분포결과를 얻을 수 있다.

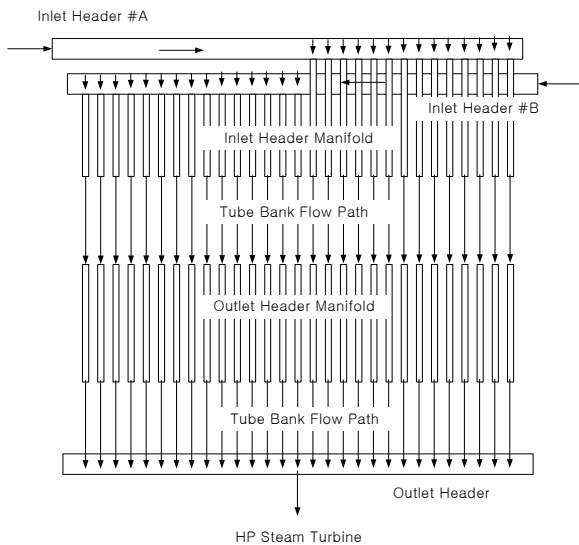


Fig. 6 Steam flow path configuration

Table 3 Flow operation condition of 500MW boiler SH system

Item	Operation Value	Remark
Total Steam Flow	1,610 T/Hr	Gen.PWR 500MW
Outlet HDR Steam Pr.	169 kg/cm ²	
Ref. Steam Temp.	481.5 °C	Avg. In/out Temp.

Table 4 SH Steam flow path geometry data

Item	Design Value	Remark
Inlet Header Dia.(mm)	489	Inner Dia.
Inlet Header Length(m)	17.06	
Manifold Dia.(mm)	140	Inner Dia.
Manifold Length(m)	1.1	
1st Bank Tube Length(m)	28.1	
1st Bank Tube Bend No.	2	
1st Bank Tube Band Angle	90°	
Outlet Manifold Dia.(mm)	148.5	Inner Dia.
Outlet Manifold Length(m)	0.48	
2nd Bank Tube Length(m)	24.22	
2nd Bank Tube Bend No.	2	
2nd Bank Tube Band Angle	90°	
Outlet Header Dia.(mm)	489	Inner Dia.
Outlet Header Length(m)	17.06	

Fig. 9를 살펴보면 15번째 유로 전후로 유량이 최대가 됨을 알 수 있다. 15번째 유로는 가스통로에서 가장 고온가스가 흐르는 가스통로 중앙에 위치하게 된다. Fig. 10은 일반적인 대향형 미분탄 연소보일러 화로출구의 가스통로 온도분포를 나타낸 것으로 중앙부에 최고온부가 발생함을 알 수 있다. 즉 모든 증기유로의 유량이 동일하게 되면 가스통로 중앙의 최고온부에 위치하는 15번째 전후 유로의 튜브온도는 다른 유로에 비해 높은 증기온도와 튜브표면온도를 가지므로 이를 보호하기 위해서는 다른 유로에 비해 많은 유량을 흘려야만 튜브를 보호할 수 있다.

Fig. 16을 살펴보면 입구헤더는 2개로 모두 중앙부에서 첫 번째 유로분기점이 위치해 있으므로 두 헤더 모두 중앙부에서 가장 높은 정압을 유지

하게 된다. 반면 출구헤더에서는 모든 유량이 중앙부에서 증기터빈으로 공급되므로 출구헤더 중앙의 유속은 가장 빠르고 정압은 가장 낮아진다. 이러한 관계에 의해 Fig. 17과 같은 입출구간의 압력차 분포가 나타나게 되고, 압력차는 유량에 비례하므로 유량역시 중앙쪽에 집중되는 분포를 나타내게 된다.

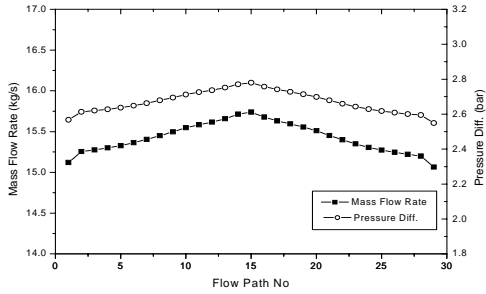


Fig. 7 Calculation Result : Mass flow rate & Pressure Difference

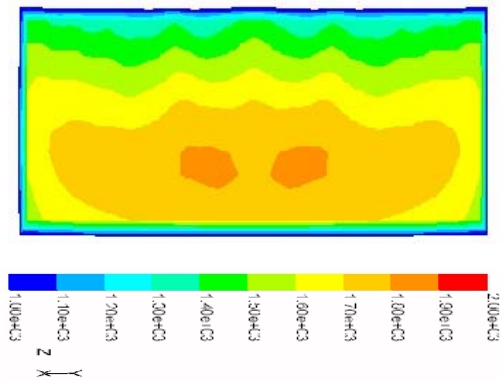


Fig. 8 Gas temperature distribution of gas flow path ⁽⁵⁾

4. 결론

발전용 보일러의 유지보수와 관련하여 보일러 튜브의 과열방지는 매우 중요하다. 튜브의 과열은 튜브재질의 수명을 감소시키며 손상으로 인한 과열발생 시 불가피하게 발전설비를 정지시켜야 한다. 발전설비의 정지와 튜브과열의 정비는 막대한 손실비용을 발생시키지만 현재 기술수준에서 운전 중 튜브의 과열을 방지할 수 있는 기술은 존재하지 않는다. 그러나 정지 중 보일러 튜브의 과열을 방지하는 방법은 튜브 내부의 스키프

일을 화학세정을 통해 제거하여 국부적 과열을 막는 방법과 튜브의 유량을 제어하여 가스온도분포에 따라 적절하게 유량을 분포시키는 두 가지 방법이 있다. 전자는 과열에 따른 사후조치이며 후자는 예방조치이다. 따라서 후자의 방법은 보일러의 설계단계에서 고려되어야 하며 이에 대한 핵심기술은 헤더 및 튜브배치에 따른 유량분포 예측기술이다.

본 보고서에서는 보일러 설계단계에서 과열방지를 위한 필수기술인 증기유로의 유량분포예측 기법을 제시하였으며 상세한 내용의 요약은 다음과 같다.

1. 본 논문에서는 복잡한 보일러 과열증기 유로의 유량분포를 예측하기 위한 수치적 해석방법과 절차를 제시하였다.
2. 수치적 방법을 사용하기 위한 증기유로 구성 요소의 손실계수를 계산하는 방법과 도표를 제시하였다.
3. 500 MW 대향형 미분탄 연소보일러의 과열증기유로를 계산예로 제시하여 실제 유량분포를 예측하여 보았다.

참고문헌

- (1) Prabir Basu, Cen Kefa, Louis Jestin, 2000, "Boiler and Burners Design and Theory", Springer, pp.174-178
- (2) D. S. Miller, 1990, "Internal Flow System", 2nd Ed, BHRA pp.346-349
- (3) I. E. Idelchik, 1996, "Handbook of Hydraulic Resistance" 3rd Ed, Begell house, pp. 36-40
- (4) 채은미, 사종엽, 1996, "배관망내 유동해석을 위한 코드개발에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 336-339
- (5) 안연식, 하정수, 장석원, 정훈, 김범신, 2002, "화력발전소 보일러 SH, RH 튜브의 증기유량 제어기술 개발", 전력연구원,