

## 과열기 관군에서의 증기유량 균일 배분 연구

박 호 영<sup>\*†</sup>, 김 성 철<sup>\*</sup>

한전 전력연구원 신발전연구소그룹

### A Study on the Uniform Distribution of Steam Flow in the Superheater Tube System

Ho Young Park<sup>\*†</sup>, Sung Chul Kim<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Advanced Power and Combustion Group, KEPRI, Munji-Ro 65, Yusung-Gu, Daejeon, 305-380, Korea

(Received March 12, 2008; revision received May 23, 2008)

**ABSTRACT:** The boiler tube failure often experienced in the superheater of a utility boiler can seriously affect the economic and safe operation of the power plant. It has been known that this failure is mainly caused by the thermal load deviation in the superheater tube system, and deeply intensified by the non-uniform distribution of steam flow rates. The non-uniform steam flow is distinctively prominent at low power load rather than at full power load. In this paper, we analyze the steam flow distribution in the superheater tube system by using one dimensional flow network model. At 30% power load, the deviation of steam flow rate is predicted to be within 0.8% of the averaged flow rate. This deviation can be reduced to 0.1% and 0.07% by assuming two cases, that is, the removal of 13th tube at each tube rows and the installation of intermediate header, respectively. The assumed two cases would be effective for the uniform steam flow distribution across 85 superheater tube rows.

**Key words:** Flow network system(유동망 시스템), Superheater(과열기), Boiler tube(보일러 튜브), Power plant(발전소)

#### 기 호 설 명

$\dot{m}$  : 질량 유량 [kg/s]  
 $P$  : 압력 [ $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ ]  
 $a$  : 선형방정식 계수

#### 1. 서 론

화력발전소 보일러의 과열기(Superheater)와 재열기(Reheater)에서 종종 발생하는 튜브의 파열(Tube Failure)은 발전소의 비상정지로 이어지기

때문에 전력 에너지의 안정적인 공급을 저해할 뿐만 아니라 보일러 자체의 안전성과 유지보수 측면에서도 큰 손실을 가져온다. 따라서 과열기와 재열기는 튜브 재질의 엄격한 선정과 관리, 지속적인 튜브 온도의 모니터링, 그리고 과열 방지를 위한 안정적인 연소, 운전측면에서의 급격한 부하 변동이나 기동/정지 등을 피하는 것이 필요하다.<sup>(1)</sup>

Fig. 1은 본 연구의 대상 발전소인 A 화력발전소 보일러의 개략도로서 보일러 본체로 공급된 미분탄은 화로(Furnace)에서 연소되고 연소 가스는 화로 상부로 이동하여 대류 전열부의 복사 과열기, 최종 재열기, 최종과열기, 재열기, 절탄기와 열교환을 거친 후에 보일러 출구를 나가게 된다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-865-5342; fax: +82-42-865-5364

E-mail address: hypark@kepri.re.kr

A화력발전소 보일러에서 채용한 미분탄 연소 방법은 Fig. 2와 같은 접선연소방식(Tangential firing system)으로서, 보일러 화로내 6개 층(level)의 4개 코너에 각각 미분탄 버너가 총 24개 설치되어 있으며 각 버너 상하에는 각종 연소용 공기 노즐들이 연달아 설치되어 있다.<sup>(2, 3)</sup> 각 코너에서 분사된 석탄-공기 혼합물은 화로 중앙부에서 시계방향으로 선화하면서 연소하며 구형의 화염(Fire ball)을 형성하게 된다(Fig. 2). 화로 출구의 코(Nose) 부분을 지난 연소 가스는 각종 전열관군이 설치되어 있는 대류 전열부로 이동한다(Fig. 1 참조).

Fig. 3은 A화력발전소의 최종 과열기의 헤더를 포함한 튜브 관군을 나타낸 것이다. 복사 과열기를 거친 고온, 고압의 증기는 최종 과열기의 입구 헤더에 모이게 되며 13개 튜브를 갖는 85개 튜브 열로 이루어진 최종과열기로 분배되어 압력과 온도가 약 264 kgf/cm<sup>2</sup>, 565 °C까지 상승된 후 출구 헤더로 모여서 고압 터빈으로 향하게 된다.

그림에서 보는 바와 같이 증기의 흐름은 상단 오른쪽의 입구 헤더에서 상단 왼쪽의 출구 헤더로 흐르게 되며 연소 가스는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 접선연소방식을 채용하고 있는 보일러의 경우 최종 과열기(Final Superheater) 및 재열기(Final Reheater)의 튜브 파열은 주로 보일러 횡방향(Fig. 3의 지면에 수직인 방향)인 85개 튜브 열에서의 가스온도 편차로 인한 열부하 불평형 때문에 발생하는 것으로 보고되고 있다.<sup>(4-6)</sup>

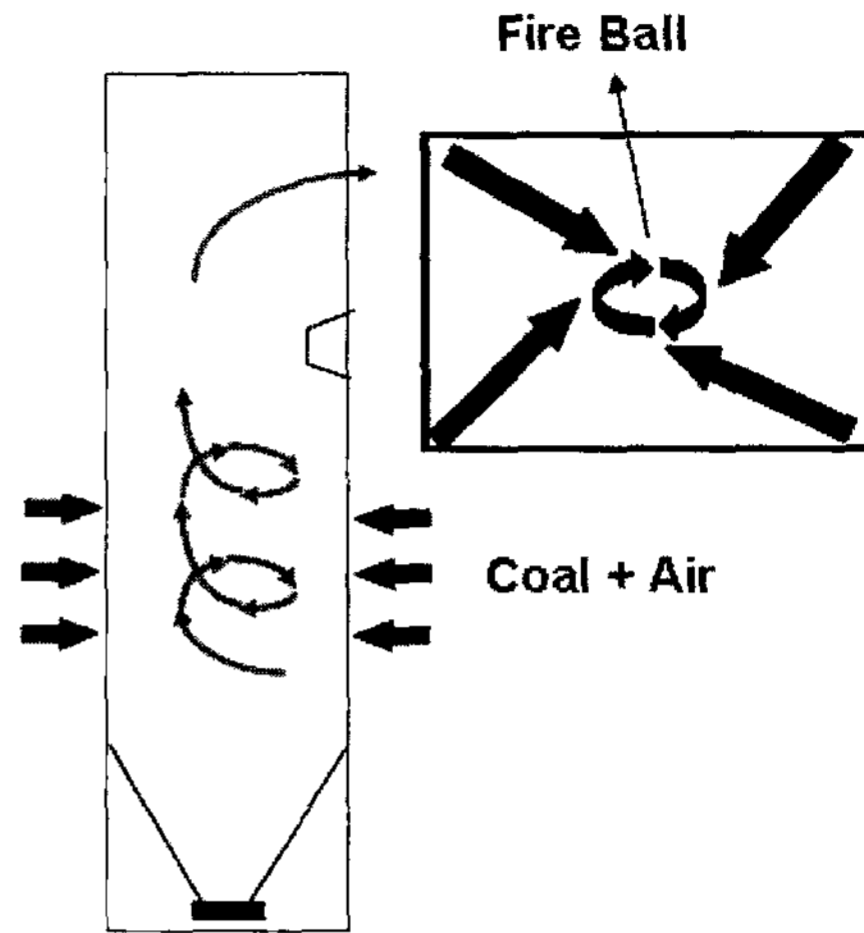


Fig. 2 Tangential firing system.

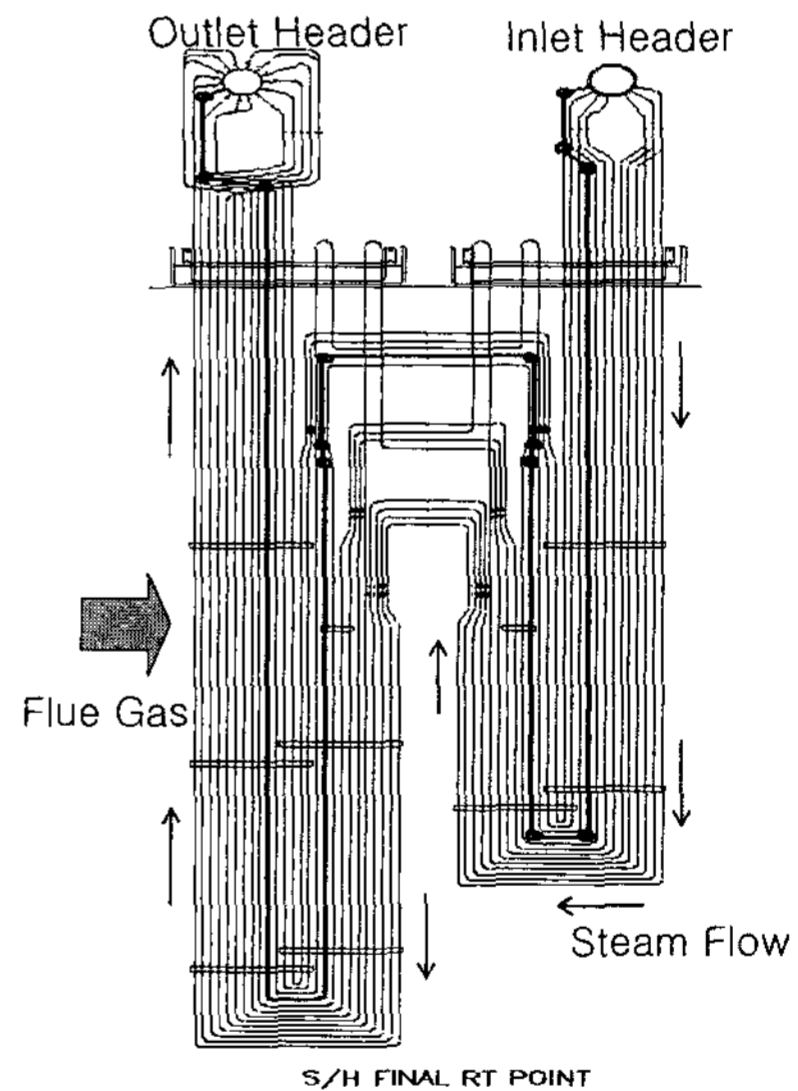


Fig. 3 Superheater header tube.

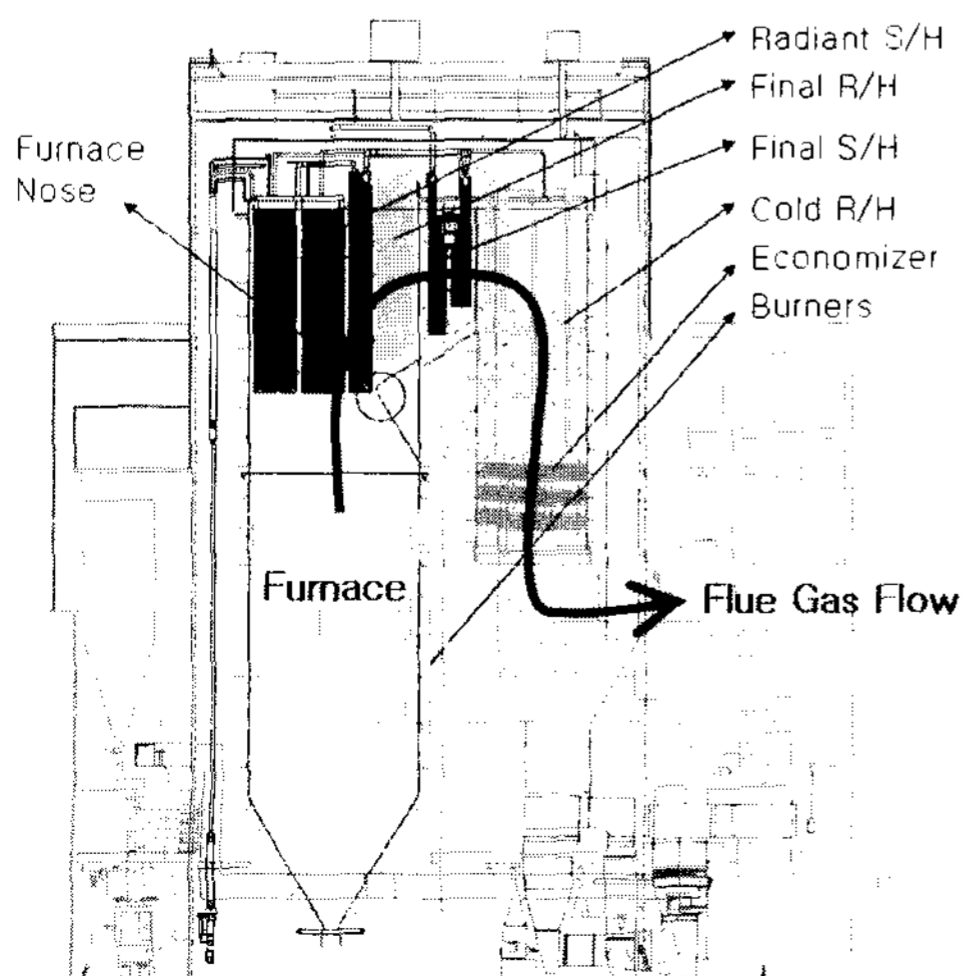


Fig. 1 Front view of the boiler.

한편, 저부하시 보일러의 증기유량은 전력 부하에 비례하여 적어지게 되는데 이때 헤더를 포함한 최종 과열기/재열기 튜브 관군에서의 증기유량 흐름이 불균일하게 분포하며 이는 열부하 불평형에 부가하여 튜브 파열을 가중시키는 원인 중 하나로 알려져 있다. 적은 양의 증기가 흐르는 튜브는 상대적으로 튜브의 금속 온도가 상승하게 되며 이 온도가 튜브의 허용 금속온도를 초과할 경우 파열에 이르게 된다.

증기 헤더로부터 85개 튜브 열로 흐르는 증기의 유량을 균일하게 분포시키기 위해서 다음과

같은 설비 개선측면에서의 방안을 적용할 수 있다. 첫 번째, 과열기 튜브의 85개 열을 구성하고 있는 튜브의 개수를 13개에서 12개로 줄여서 각각의 튜브에서의 증기 유량을 증가시키는 방법이다. 이로부터 85개 튜브 열에서의 증기 유량 분포가 좀 더 균일하게 되리라 기대할 수 있다. 두 번째로 입, 출구 헤더 사이에 중간 헤더를 설치하여 최종 과열기 관군 중간에서 과열증기 유량을 다시 한번 배분함으로써 85개 튜브 열의 증기 유량을 균일화하는 방법을 생각할 수 있다. 실제 대부분의 국내 석탄화력발전소 보일러의 최종과열기 전열관군은 중간 헤더가 있다.

본 논문에서는 국내 A화력 발전소에서의 설계 데이터를 기준으로 최종과열기 전열관군의 85개 튜브 열에서의 증기 에너지, 즉 증기의 유량 분포를 살펴보고자 한다. 최종 과열기 관군의 증기 유량 분포를 계산하기 위해서는 일차원 유동망(One dimensional flow network) 해석 방법을 통해 접근하는 것이 편리하다. 이를 위해 유동망 해석 상용 프로그램인 Flowmaster를 이용하여 A화력 발전소 보일러의 최종과열기 튜브시스템을 모델링하고 100%, 70%, 50%, 30% 부하에서 증기의 유량 분포를 먼저 계산하였다. 그리고 앞서 설명한 바와 같이 증기 유량 분포를 좀 더 균일하게 하기 위하여 85개 튜브 열의 13번째 튜브를 각각 제거한 경우와 입, 출구 헤더 사이에 중간 헤더를 설치한 경우에 대하여 일차원 유동망 해석(One dimensional flow network analysis)을 수행하고자 한다. 이로부터 설계데이터를 기준으로 최종과열기 85개 튜브 열에서 증기 유량이 균일하게 분포하는지, 상기의 두 가지 방법을 통하여 증기 유량을 어느 정도까지 균일하게 분포시킬 수 있는지를 검토하고자 한다. 본 연구 결과는 기존의 최종 과열기 튜브 시스템이 적합하게 설계되었는지의 판단 자료와 상기의 두가지 방법으로 튜브 시스템을 개선하였을 때 어느 정도의 효과가 있는지를 분석하여 발전소의 유지 보수측면에서의 정책 결정 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 일차원 유동망 해석

일차원 유동망 해석은 파이프, 펌프 및 파이프

접합부(연결부, 밴드 등)와 같이 유로를 형성하고 있는 요소를 나타내는 컴포넌트(Component)와 이런 컴포넌트를 서로 연결하는 노드(node)로 구성된다. 일차원 해석의 예로서 2~3개의 입, 출구를 갖는 요소들이 노드에 연결되었을 때 유동 네트워크를 구성하고, 이때 풀어야 하는 매트릭스(matrix)가 어떻게 나타나는지를 Fig. 4의 유동망을 예로 들어 살펴볼 수 있다.<sup>(7)</sup> 각 컴포넌트에서 수학적 모델을 구축하기 위하여 아래와 같은 질량 유량(mass flow,  $\dot{m}$ )과 압력(Pressure,  $P$ )에 대한 선형 연립 방정식을 구성하게 되며 이는 매트릭스로 나타낼 수 있다.

Fig. 4에서 보여진 유동 네트워크에 대해서 다음과 같이 질량유량 선형방정식을 구성하면 다음과 같다.

For component 1,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} &= a_{11}^1 P_1 + a_{12}^1 P_2 + a_{13}^1 \\ \dot{m}_{21} &= a_{21}^1 P_1 + a_{22}^1 P_2 + a_{23}^1 \end{aligned} \quad (1)$$

For component 2,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{32} &= a_{11}^2 P_3 + a_{12}^2 P_2 + a_{13}^2 \\ \dot{m}_{23} &= a_{21}^2 P_3 + a_{22}^2 P_2 + a_{23}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

For component 3,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{42} &= a_{11}^3 P_4 + a_{12}^3 P_2 + a_{13}^3 \\ \dot{m}_{24} &= a_{21}^3 P_4 + a_{22}^3 P_2 + a_{23}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

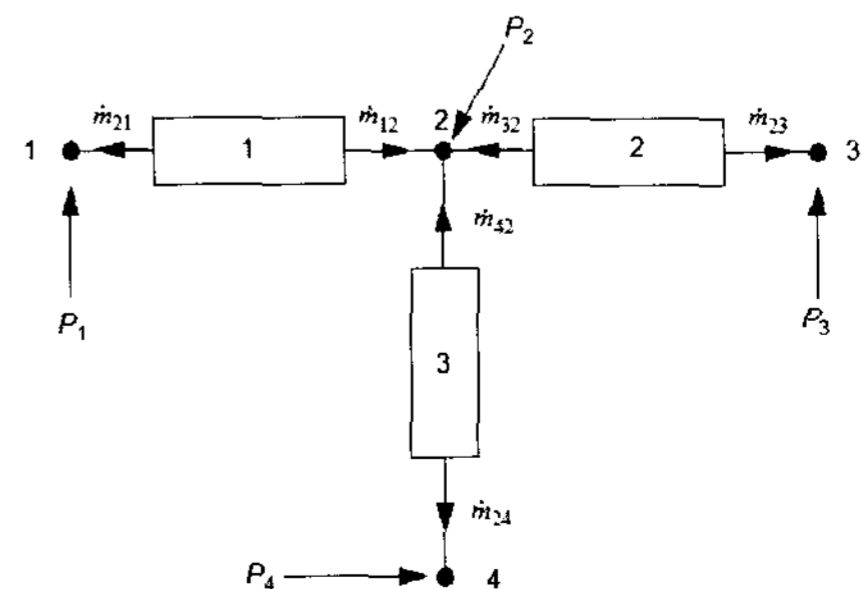


Fig. 4 Example of one dimensional flow network.

여기서 각각의 계수  $a$ 는 각 컴포넌트에 따라 고유하게 정의되게 된다. 방정식 상에서 위 첨자는 각 컴포넌트의 번호를 나타내고 있으며 아래 첨자는 각 방정식의 매트릭스에서 선형화 계수의 행과 열을 의미한다.

각 노드에서는 질량 보존의 법칙을 적용하면 다음과 같다.

At node 1,

$$\dot{m}_{21} = a_{21}^1 P_1 + a_{22}^1 P_2 + a_{23}^1 \quad (4)$$

At node 2,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{42} &= a_{11}^1 P_1 \\ &+ (a_{12}^1 + a_{12}^2 + a_{12}^3) P_2 + a_{11}^2 P_3 \\ &+ a_{11}^3 P_4 + a_{13}^1 + a_{13}^2 + a_{13}^3 \end{aligned} \quad (5)$$

At node 3,

$$\dot{m}_{23} = a_{22}^2 P_2 + a_{21}^2 P_3 + a_{23}^2 \quad (6)$$

At node 4,

$$\dot{m}_{24} = a_{22}^3 P_2 + a_{21}^3 P_4 + a_{23}^3 \quad (7)$$

위의 4개의 선형 방정식은 다음과 같은 매트릭스로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(4)~식(7)을 매트릭스에 대입하면 다음과 같이 나타나지며 이로부터 압력과 질량유량을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{22}^1 & 0 & 0 \\ a_{11}^1 & a_{12}^1 + a_{12}^3 + a_{12}^3 & a_{11}^2 & a_{11}^3 \\ 0 & a_{22}^2 & a_{21}^2 & 0 \\ 0 & a_{22}^3 & 0 & a_{21}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{m}_{21} - a_{23}^1 \\ \dot{m}_{12} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{42} - a_{13}^1 - a_{13}^2 - a_{13}^3 \\ \dot{m}_{23} - a_{23}^2 \\ \dot{m}_{24} - a_{23}^3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

이상의 일차원 유동망 모델의 신뢰성을 확인하기 위하여는 해석한 결과를 측정값과 비교하여야 한다. 그러나 13개 튜브를 가진 85개열, 총 1,005개의 튜브로 이루어진 보일러 과열기에서 증기의 유량을 실제로 측정하는 것은 불가능하다. 본 연구에서 채택한 일차원 유동망 해석 모델링의 건전성 검증은 문헌상의 기존 연구 결과로부터 살펴 볼 수 있다. Massey *et al.*<sup>(8)</sup>은 자동차의 머플러(Muffler), 곡관부 및 축소관, 배기계통(Exhaust system)의 촉매(Catalyst)등에 대한 일차원 유동망 모델을 Flowmaster를 이용하여 구성하고 배기 시스템에서의 질량 유량을 해석하였는데 실험값과 비교하여 ±1.0%의 오차 범위내로 예측되었다. Blisset and Austin<sup>(9)</sup>은 0.02의 마찰계수를 갖는 직경 0.5 m, 길이 100 m의 파이프를 대상으로 정상 압축성 유동에 대하여 Flowmaster 코드로 모델링하고 해석 결과를 MathCAD 프로그램으로 구한 엄밀해(Exact analytical solution)와 비교하였다. 질량 유량, 마하 수(Mach Number), 정압, 온도, 밀도 등을 엄밀해와 비교한 결과 최대 0.2%의 오차를 보여주어 매우 정확한 해석임을 보여주었다. 최근 Jeong *et al.*<sup>(10)</sup>은 공동 주택의 온돌 난방용 온수 분배 시스템에 대한 일차원 배관망을 Flowmaster 코드로 모델링하고 유량 분배와 압력 저하에 따른 캐비테이션 소음 연구를 수행한 바 있다. 온배수 시스템의 밸브를 지나는 유량의 해석 결과는 실험 값 대비 약 3%의 편차를 보여주고 있어 실제 온배수 배관 시스템의 코일, 펌프, 밸브 등의 유동 특성을 잘 모사하고 있다. 이상의 기존 연구 결과로부터 본 연구의 일차원 유동망 모델을 이용한 최종 과열기에서의 증기 유량 분포 해석은 이미 건전성이 확인된 코드와 모델링 기법을 이용함으로써 신뢰성 있는 결과를 보여줄 것이다.

## 2.2 해석 조건

현재 A화력 발전소의 최종과열기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 13개의 튜브가 입, 출구 헤더에

연결되며 이러한 튜브 열이 보일러 횡방향(지면에 수직방향)으로 85열로 설치되어 있다. 최종 과열기의 입구 헤더는 단일 구조로 이루어져 있고 두개의 출구 헤더는 각각 두 개의 출구가 있어 증기가 이곳을 지나 고압터빈으로 향한다. 이러한 입, 출구 헤더는 일정한 압력을 유지하고 있으며 각 85개의 튜브 열에 증기 유량이 고르게 흘러야 한다. 증기유량 분포 해석은 아래의 세 가지 경우에 대하여 수행하였다.

- Case 1 : 기존의 튜브시스템에 대한 해석
- Case 2 : 85개 튜브 열 각각의 13번째 튜브를 제거한 경우
- Case 3 : 입, 출구 헤더 사이에 중간헤더를 설치한 경우

Case 2와 Case 3은 85열의 튜브 열로 흐르는 증기량의 분포를 균일하게 하기 위하여 가정된 경우이다. 이상의 세 가지 경우에 대한 해석은 100%, 70%, 50%, 그리고 30% 부하에서 각각 수행하였으며 그 결과를 서로 비교하였다. 각 부하에서의 설계 데이터, 즉 과열기로 흐르는 총 증기유량, 입구온도/압력 및 열흡수량은 Table 1과 같다.

2.3 모델링

Fig. 5(a)는 기존의 튜브 시스템에 대한 개략도이며 이를 Flowmaster 코드로 모델링한 1차원 유동망 모델(Flow Network Model)이 Fig. 5(b)에 주어져 있다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 Case 1과 Case 2의 경우에 대한 모델링 결과를 보여주고 있으며 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 중간헤더를 설치한 Case 3에 대한 튜브시스템의 개략도와 모델링 결과를 보여준다.

Table 1 Design data for final superheater

Load	Mass Flow Rate (kg/hr)	Inlet Temp. (°C)	Inlet Pr. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Absorbed heat (MW)
100%	2,290,800	515	256.7	115.95
70%	1,642,700	512	211.4	80.13
50%	1,068,700	512	139.6	45.12
30%	666,800	538	82.2	13.95

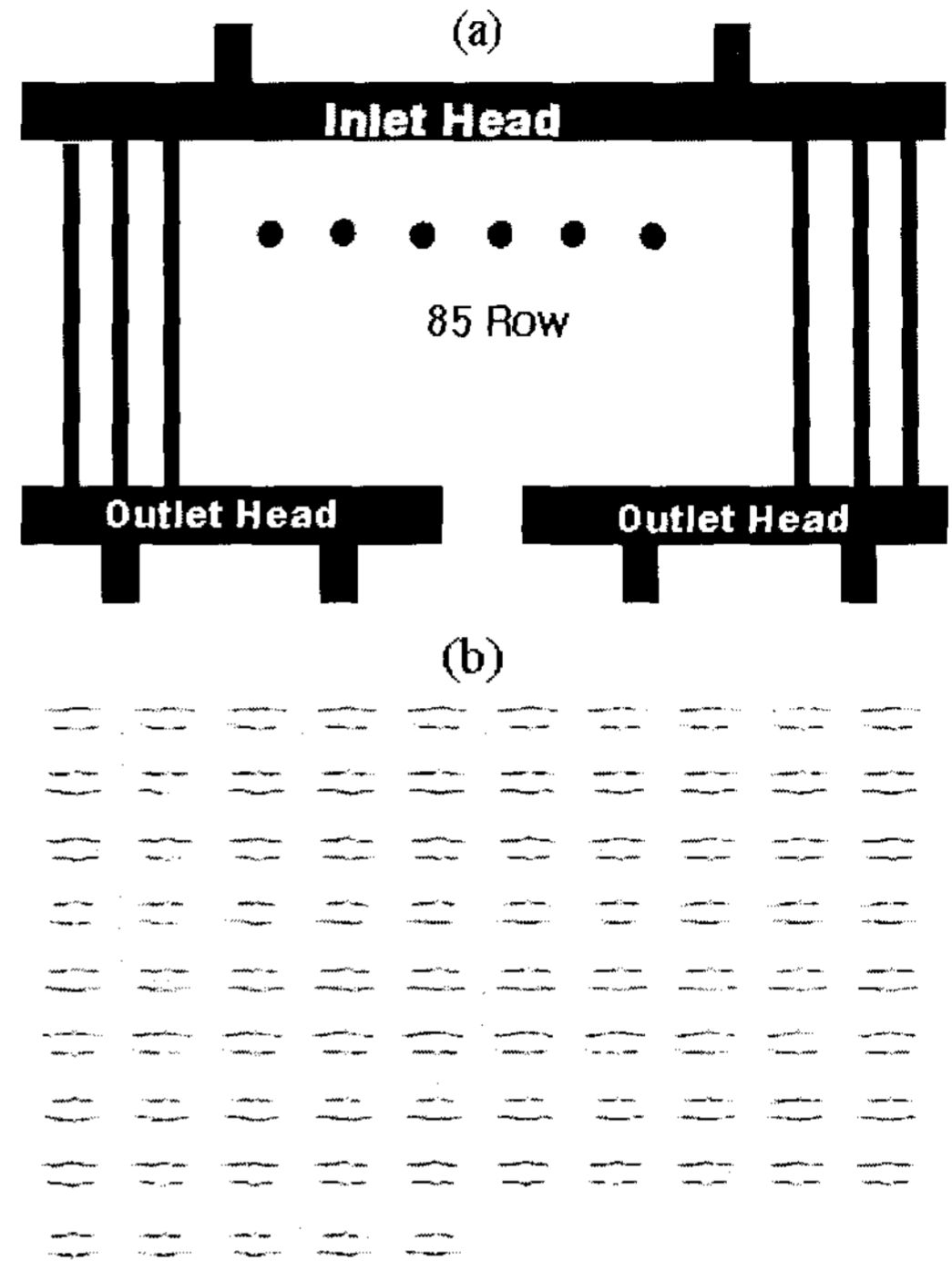


Fig. 5 (a) Schematic overview of the final superheater system.  
(b) Flow network model of the final superheater tube system for case 1.

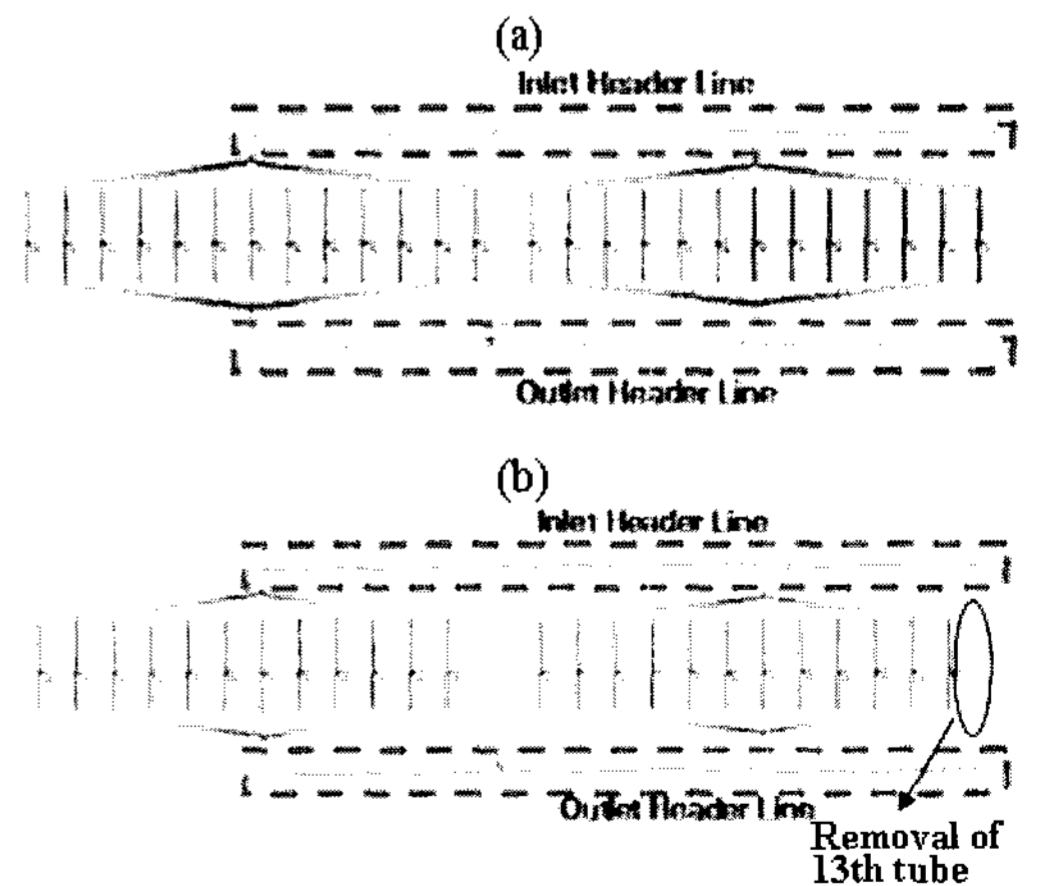


Fig. 6 (a) Flow network model of a unit row of the final superheater tube system for case 1.  
(b) Flow network model of a unit row of the final superheater tube system for case 2.

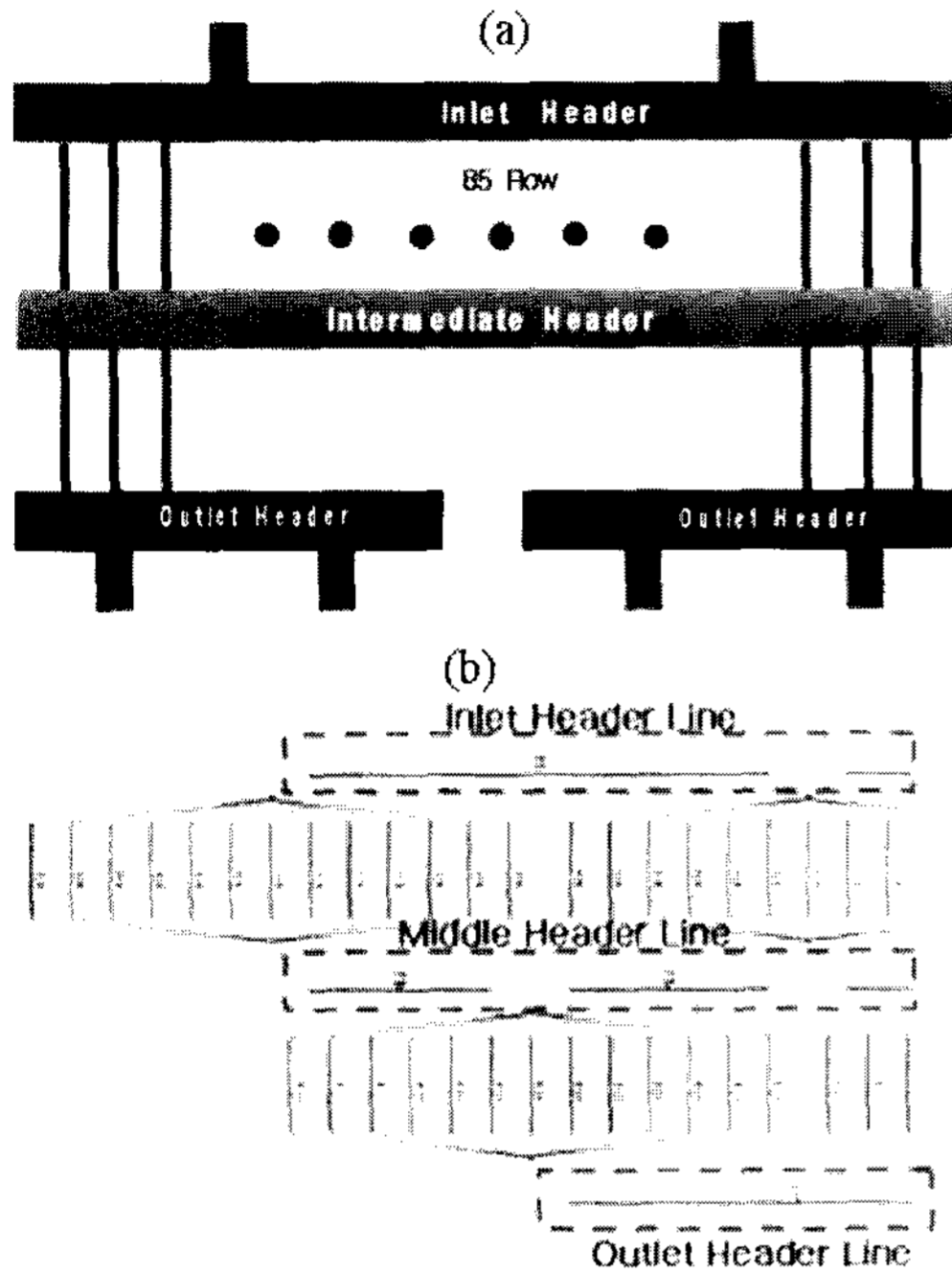


Fig. 7 (a) Schematic overview of the final superheater tube system for case 3.  
 (b) Flow network model of a unit row of the final superheater tube system for case 3.

### 3. 결과 및 고찰

최종과열기의 85개 튜브 열을 Flowmaster 코드로 모델링을 하고 설계 데이터를 기준으로 부하별로 각 열에 흐르는 증기의 유량을 계산하였다(Case 1). 이 해석 결과를 바탕으로 85열에서의 증기 유량을 균일하게 분포시키기 위하여 각 열의 13번째 튜브를 제거한 경우(Case 2)와 입, 출구 헤더 사이에 중간헤더를 설치한 경우(Case 3)에 대한 입구 헤더에서의 압력 분포와 증기 유량 분포를 부하별로 서로 비교하였다.

#### 3.1 기존 튜브시스템의 부하별 해석

기존의 최종 과열기 튜브 시스템의 85개 튜브 열로 흐르는 증기 유량 편차를 100%, 70%, 50%, 30% 부하에서 계산하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 입구 헤더의 증기 유입부분과 가장 가

까운 열인 22열과 63열에서의 증기 유량이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 동일 압력과 온도하에서 입구 헤더로부터의 유입부와 가장 가까운 튜브 열에서의 유체 저항에 작기 때문으로 생각된다. 반면 입구 헤더의 유입부와 가장 멀리 위치한 양쪽의 가장자리 부분과 가운데 부분의 튜브 열들은 상대적으로 적은 증기가 흐르고 있음을 볼 수 있다. 100% 혹은 70% 부하에서는 유량의 편차는 약 0.2% 내외로 계산되며, 50%와 30% 부하에서는 그 편차가 약 0.35%, 0.8%까지 커지는 것을 알 수 있다. 최종 과열기로 공급되는 증기 유량과 입구 압력은 Table 1에서 보는 바와 같이 부하가 작아짐에 따라 작아진다. 통상 유로를 구성하는 요소의 압력 손실은 유량의 제곱에 비례하는 특성을 갖는다. 따라서 공급되는 유량이 적어지면 튜브 열로 들어가는 유량이 상대적으로 작게 되고 유량의 제곱에 비례하여 튜브에서의 압력손실 또한 감소하게 된다. 즉 유량이 많은 경우 보다 적은 경우에 압력 손실이 급격하게 감소한다고 볼 수 있다. 따라서 저부하시 급격히 감소된 유동 저항 때문에 입구에서 가까운 쪽의 튜브 열로 상대적으로 많은 유량이 흐르게 되어 전체적인 유량 불균일이 커지게 된다.

이상의 결과는 설계 데이터에 근거하여 최종 과열기에서 흡수되는 열량이 85열에 고르게 분포하는 경우, 즉 설계조건에 대하여 얻어진 것이다. 따라서 최종 과열기는 설계상으로는 85개 열로의 증기 유량이 매우 양호하게 분배되고 있음을 알 수 있다. 그러나 실제 보일러에서 최종과열기의 열효율은 85개 열을 따라 균일하지 않고 왼쪽으로 치우쳐져 있음을 보여준다. 발전소 현장에서 측정된 최종 과열기의 85개 열에서 측정된 22개의 튜브 금속온도는 왼쪽에서 특히 높은 것을 알 수 있으며 최종과열기 출구의 좌측 증기 온도가 우측의 그것보다 약 20℃까지 높게 나타나고 있다. Xu et al.<sup>(6)</sup>에 의하면 열부하 분포가 15% 편차를 보이게 되면 튜브 열에서의 증기 유량 편차가 약 12% 까지 발생하는 것으로 보고하였다. 최종 과열기의 설계측면에서 안정적인 증기 유량분배가 이루어졌더라도 실제 운전 상황에서는 증기 유량은 실제 열부하 분포에 따라 불균일하게 분배되며 이때 튜브의 온도가 그 금속의 허용 온도보다 높아지기도 하며 이때 튜브가 파열될 수도 있다.



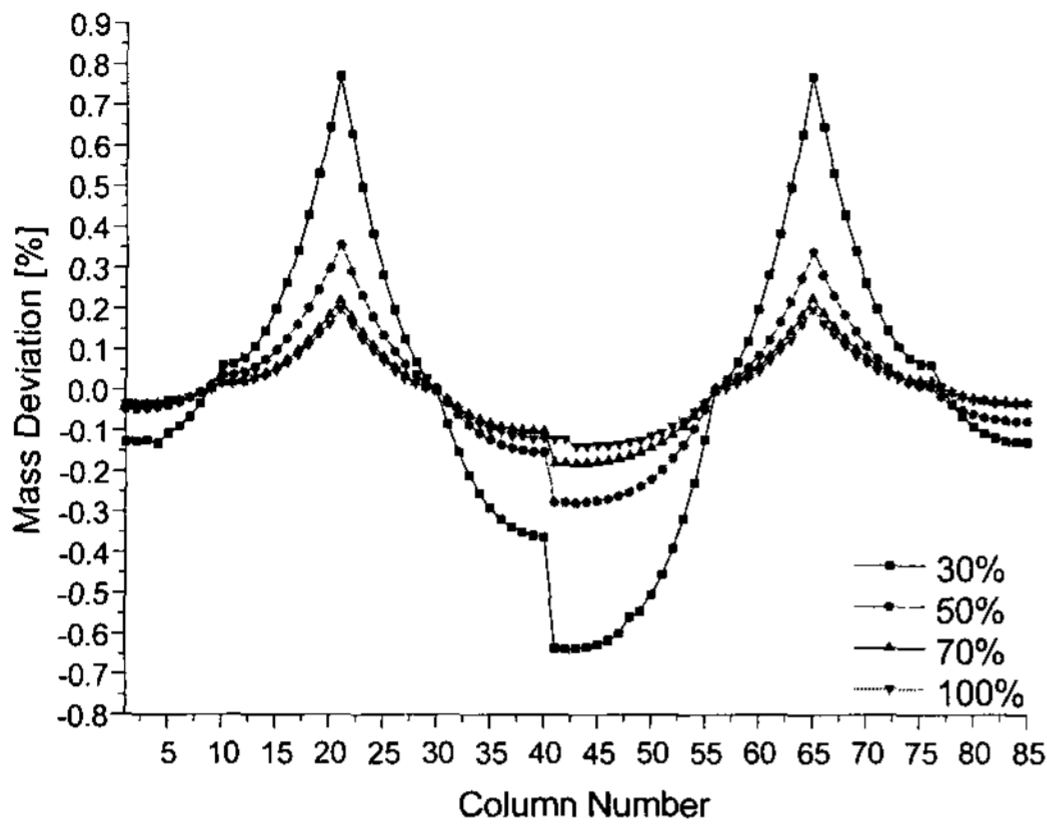


Fig. 8 Mass flow deviation of the final superheater along with the tube row for case 1 at various power load.

Fig. 8의 중간부분인 42번 튜브 열과 43번 튜브 열 사이에 불연속점이 발생되고 있다. 이는 입구 헤더에서 분기되어 나온 85개 튜브 열이 2개의 출구 헤더로 각각 43, 42개씩 연결됨에 따라 입구 유량이 정확히 절반으로 나누어지지 않은 결과로 나타난 것이다.

### 3.2 Case 별 입구 압력 분포

Fig. 9~Fig. 11은 100%, 50%, 그리고 30% 부하에서의 85 열의 입구 압력과 그 편차를 보여준다. 기존 튜브시스템(Case 1), 13번째 튜브를 제거한 경우(Case 2), 중간 헤더를 설치한 경우(Case 3)의 85열별 입구 압력과 편차를 각각의 그림에 함께 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 100% 부하에서 각 열의 13번째 튜브를 제거하면 입구에서의 평균 압력이 기존의  $256.43 \text{ kgf/cm}^2$ 에서  $256.75 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 각 열의 13번째 튜브를 제거한 경우 동일한 증기 유량을 보내기 위해서는 각 열의 입구에서 압력이 증가되기 때문이다. 100% 부하에서 중간 헤더를 설치하게 되면 이것이 전체 시스템에서 압력 강하로 작용하며 동일 증기유량을 유지하기 위해서는 중간 헤더로 인한 압력 손실만큼 입구에서의 압력이 상승하게 됨을 보여준다. 50%, 30% 부하에서도 13번째 튜브를 제거로 인한 각 열에서의 압력 손실 증가분 만큼 입구 압력이 증가되는 것을 볼 수 있다(Fig. 10, Fig. 11 참조).

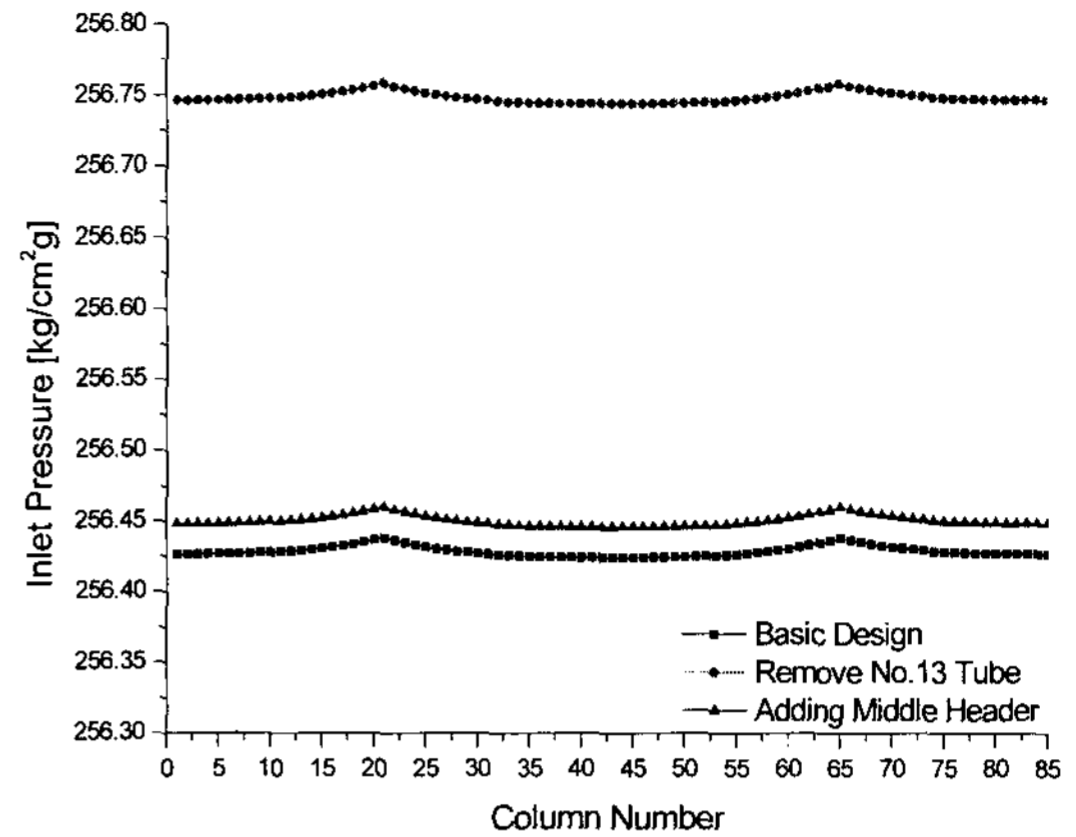


Fig. 9 Inlet pressure of the final superheater tube at 100% power load for Case 1, Case 2 and Case 3.

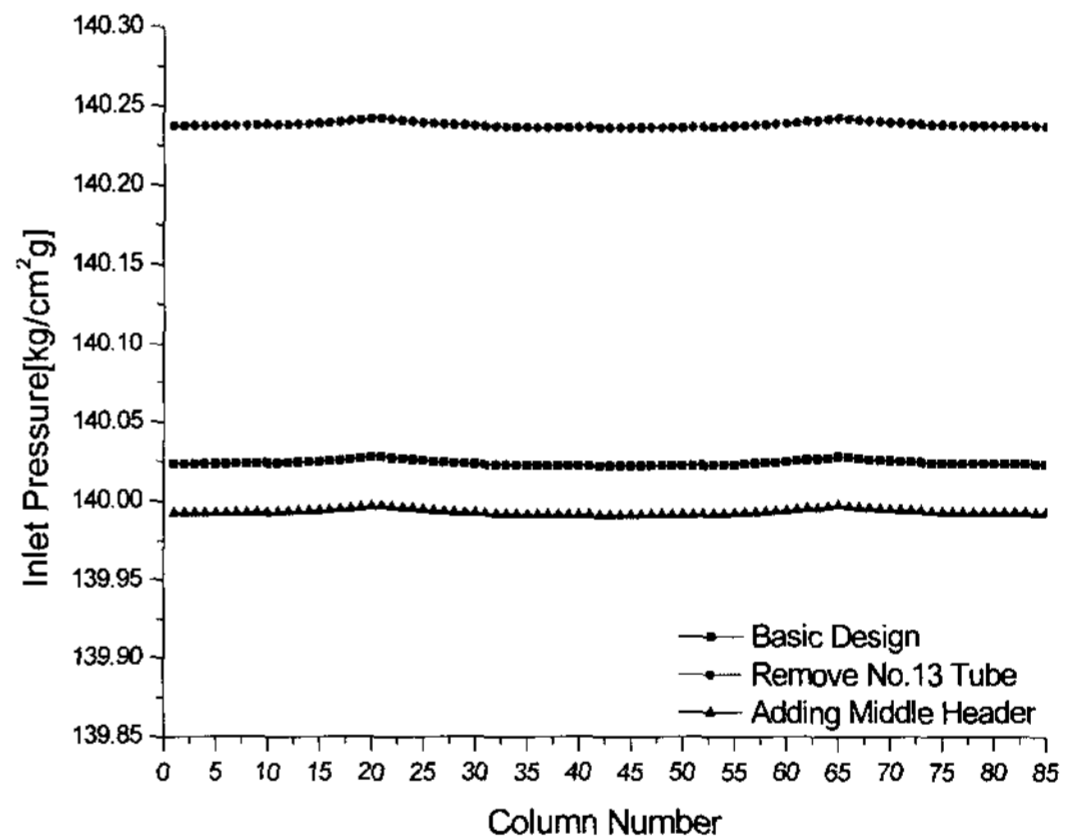


Fig. 10 Inlet pressure of the final superheater tube at 50% power load for Case 1, Case 2 and Case 3.

그러나 중간 헤더를 설치한 경우의 입구 압력은 기존 튜브 시스템에서의 입구 압력보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 저부하의 경우 증기의 유량과 압력은 100% 부하에 비하여 상대적으로 작아지게 된다. 100% 부하일 때와는 달리 저부하에서는 중간 헤더가 압력 저항이 아니라 압력을 흡수하는 버퍼(buffer)의 역할을 하여 입구 압력이 중간 헤더의 용량만큼 작아지는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 12는 100% 부하에서 최종 과열기 입구 헤더의 평균 압력 대비 85열에서의 압력 편차를 보여주는 것으로 각 열의 13번째 튜브를 제거한 경

우와 중간 헤더를 설치한 경우의 편차도 함께 나타내었다. 평균 작동 압력  $256.428452 \text{ kgf/cm}^2$ 에 대해 각 열에서 최대  $0.001821 \text{ kgf/cm}^2$ 의 압력차가 발생하였으며 Case 2와 Case 3의 경우도 거의 같은 압력차를 보여주고 있다. 50%, 30% 부하에서의 압력 편차와 분포는 100% 부하에서의 값들과 거의 비슷한 결과를 보여 주고 있다. 전체적으로 볼 때 각 열의 13번째 튜브를 제거한 경우(Case 2)와 중간 헤더를 설치한 경우(Case 3)의 각 튜브 열의 입구에서의 압력은 기준 조건(Case 1)과 비교하여 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

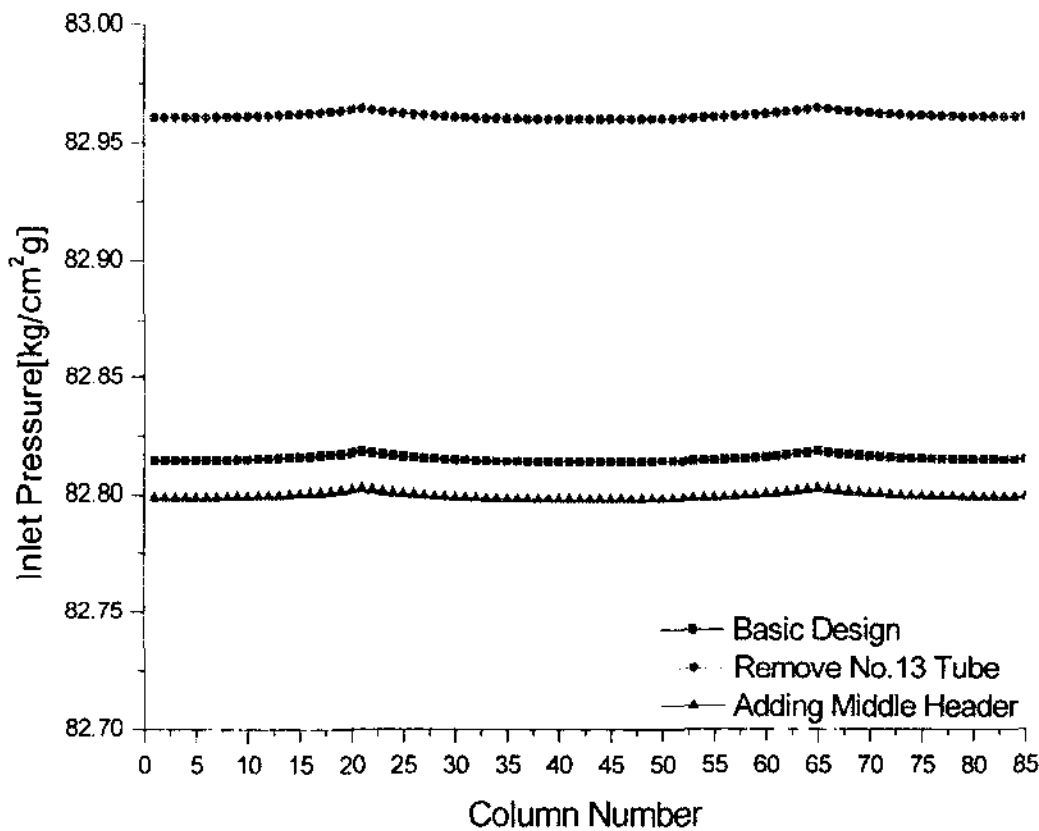


Fig. 11 Inlet pressure of the final superheater tube at 30% power load for Case 1, Case 2 and Case 3.

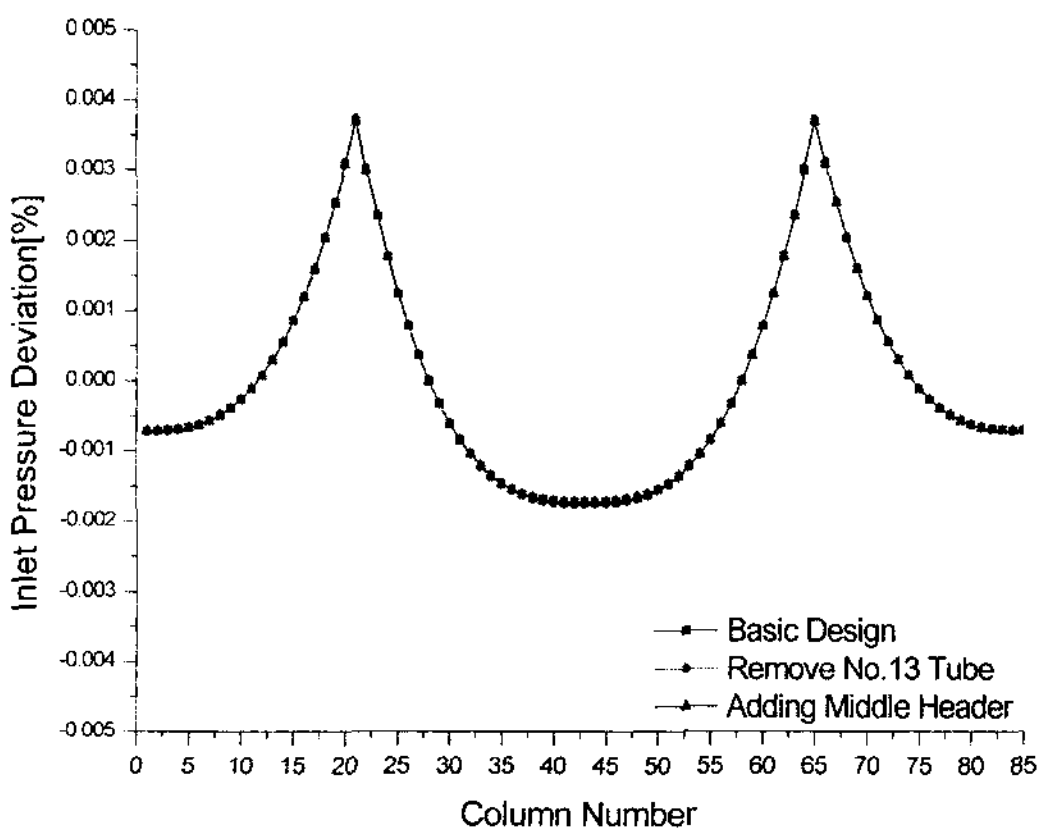


Fig. 12 Inlet pressure deviation of the final superheater at 100% power load for Case 1, Case 2 and Case 3.

### 3.3 Case 별 증기 유량 분포

Fig. 13~Fig. 15는 100%, 50%, 그리고 30% 부하에서의 증기유량과 편차를 나타낸 것이다. 기존 튜브시스템(Case 1), 13번째 튜브를 제거한 경우(Case 2), 중간 헤더를 설치한 경우(Case 3)의 증기 유량과 편차를 각각의 그림에 함께 나타내었다. 기존 튜브 시스템의 경우와 13번째 튜브를 제거한 경우의 해석 결과를 보면 상대적으로 13번째 튜브를 제거한 경우가 전체적으로 유량의 균일성이 높게 나타났다. 같은 증기 유량하에서 13번째 튜브를 제거한 경우는 기존의 튜브 시스템에 비하여 높은 압력 손실을 유발한다. 개념적으로 유로의 단면적이 줄어든 것으로 생각할 수 있는데 직경이 좁은 경우 넓은 경우에 비해 압력 손실이 높게 나타난다. 따라서 각 열에서는 기존의 시스템보다 높은 압력 저항 특성을 갖게 되어 입구에서 가까운 쪽의 튜브 열로 들어가는 유량은 감소하게 되고 이렇게 감소된 유량은 상대적으로 다른 위치의 튜브열로 들어가게 되어 전체적으로 유량의 균일성이 향상된 것으로 판단된다. 중간 헤더가 장착된 경우의 모델링은 기존의 튜브 길이를 반으로 줄여 중간 헤더를 설치하여 튜브 시스템을 두 단계로 구성한 것이다. 이 경우 중간 헤더 이전의 튜브 열에서 발생된 유량차는 중간헤더를 통해 합쳐지고 다시 재분배 되는 효과로 유량의 균일성이 향상된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이 100% 부하에서 85개 열의 13번째 튜브를 제거한 경우의 유량분포 편차는 기준 조건(Case 1)에서의 편차인 약 0.2%에서 0.18%로 약간 줄어든 것을 볼 수 있었다. 중간헤더를 설치한 경우 유량분포의 편차가 약 0.2%에서 0.07%로 상당히 줄어들었다. 증기유량 분포는 기존 튜브시스템이나 13번째 튜브를 제거한 경우의 증기 유량 분포와 그 형상이 매우 다른 것을 볼 수 있다. 출구 헤더의 4개 유출부와 가까운 튜브 열인 10, 30, 55, 75열에서 증기유량이 가장 많이 흐르고 있으며 가운데 튜브 열(42, 43열)에서 최소점을 나타내고 있다. 증기유량 분포로부터 기존의 튜브 시스템과 13번째열을 제거한 경우의 증기 유량 분포는 주로 입구 헤더의 영향을 받으나 중간 헤더를 설치한 경우는 출구 헤더의 영향을 받는 것으로 보인다.



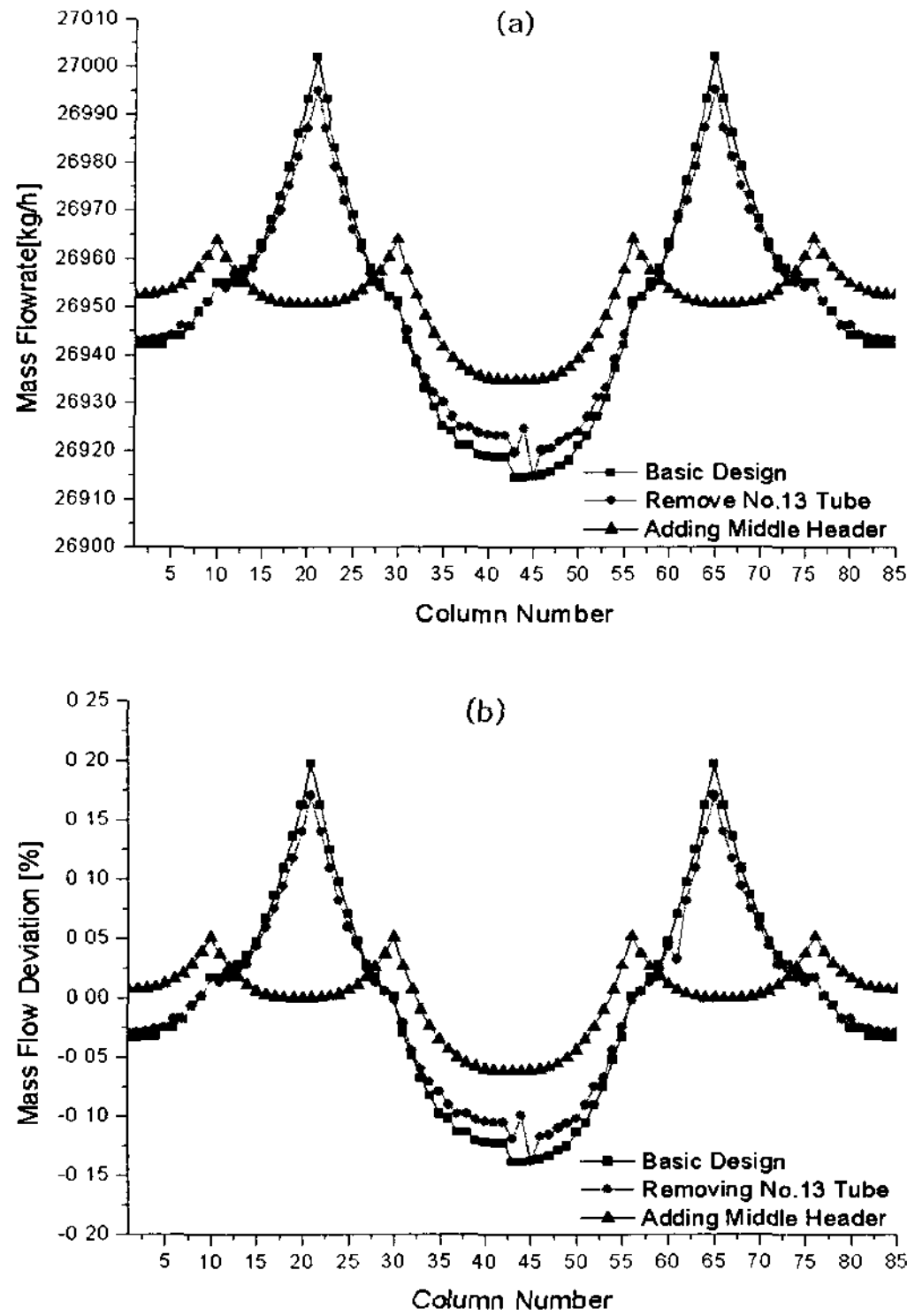


Fig. 13 (a) Mass flow rates of the final superheater tube at 100% power load.  
 (b) Mass flow deviation of the final superheater tube at 100% power load.

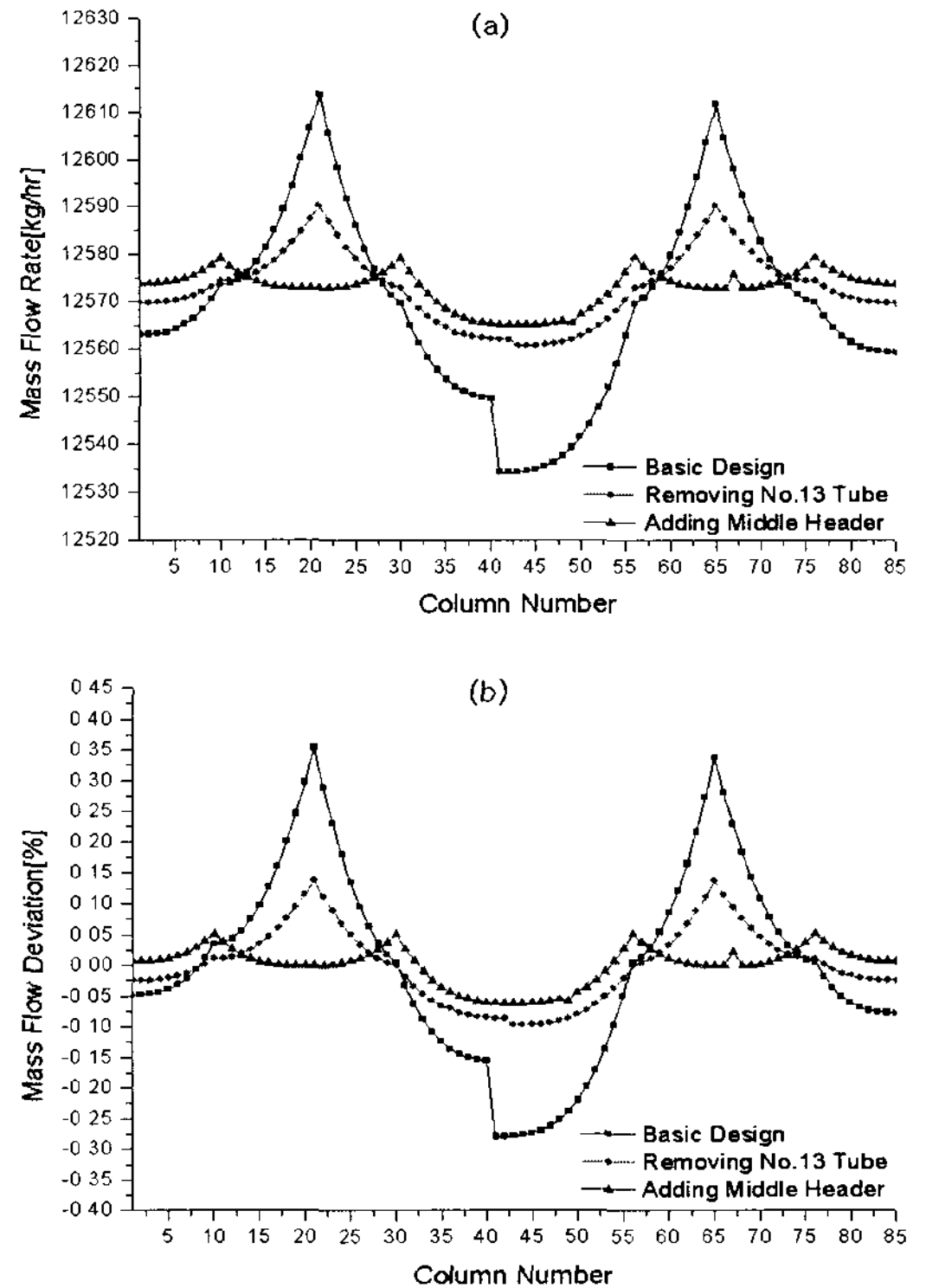


Fig. 14 (a) Mass flow rates of the final superheater tube at 50% power load.  
 (b) Mass flow deviation of the final superheater tube at 50% power load.

Fig. 14는 50% 부하에서 Case 1~Case 3의 증기 유량과 편차의 분포를 보여준다. 13번 튜브의 제거와 중간 헤더를 설치한 경우 유량 편차가 상당히 감소된 것을 볼 수 있다. 50% 부하에서 기존의 튜브 시스템은 약 0.37%의 편차를 보여주었으나 13번째 튜브를 제거한 Case 2의 경우 약 0.14%로 줄어들고 중간헤더를 설치한 Case 3의 경우 약 0.06% 까지 감소함을 볼 수 있다.

30% 부하에서는 기존의 튜브 시스템의 경우 약 0.8%의 유량 편차를 보이고 있으나 13번째 튜브를 제거한 경우 약 0.1% 까지, 중간 헤더를 설치한 경우 약 0.07% 까지 감소함을 보여주고 있다 (Fig. 15 참조). 저부하에서의 유량 편차 저감 효과는 13번째 튜브를 제거한 경우보다 중간 헤더를 설치한 경우 그 효과가 큼을 알 수 있다. 현재 국내의 표준 석탄화력발전소의 대부분이 최종과열기에 중간 헤더를 설치하고 있으며 본 연구의 대상 발전소인 A 화력의 경우도 중간 헤더

를 설치할 경우 과열기 튜브의 증기 유량분포가 저부하시 좀 더 균일하게 분포할 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 설계 데이터 기준으로 열부하가 일정한 경우 30% 부하에서 증기 유량 편차는 많아야 0.8%를 보여주고 있어 증기 유량 편차에 의한 튜브 과열은 크지 않을 것으로 보인다. 그러나 앞서 살펴 본 바와 같이 최종 과열기에서의 불균일한 열부하는 튜브 열에서의 증기 유량 편차를 더 크게 하며 이로 인한 튜브의 과열, 심한 경우 과열을 가져올 수 있다. 30% 부하에서 기존의 튜브시스템에서의 보여준 0.8%의 유량 편차는 13번 튜브의 제거, 혹은 중간 헤더 설치시에 각각 0.1%, 0.07% 까지 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 따라서 열부하 편차가 발생하는 실제 운전상황에서 13번 열을 제거하거나 중간 헤더를 설치하게 되면 각 열로 흐르는 증기 유량의 편차를 상당히 줄일 수 있으리라 예측할 수 있다.

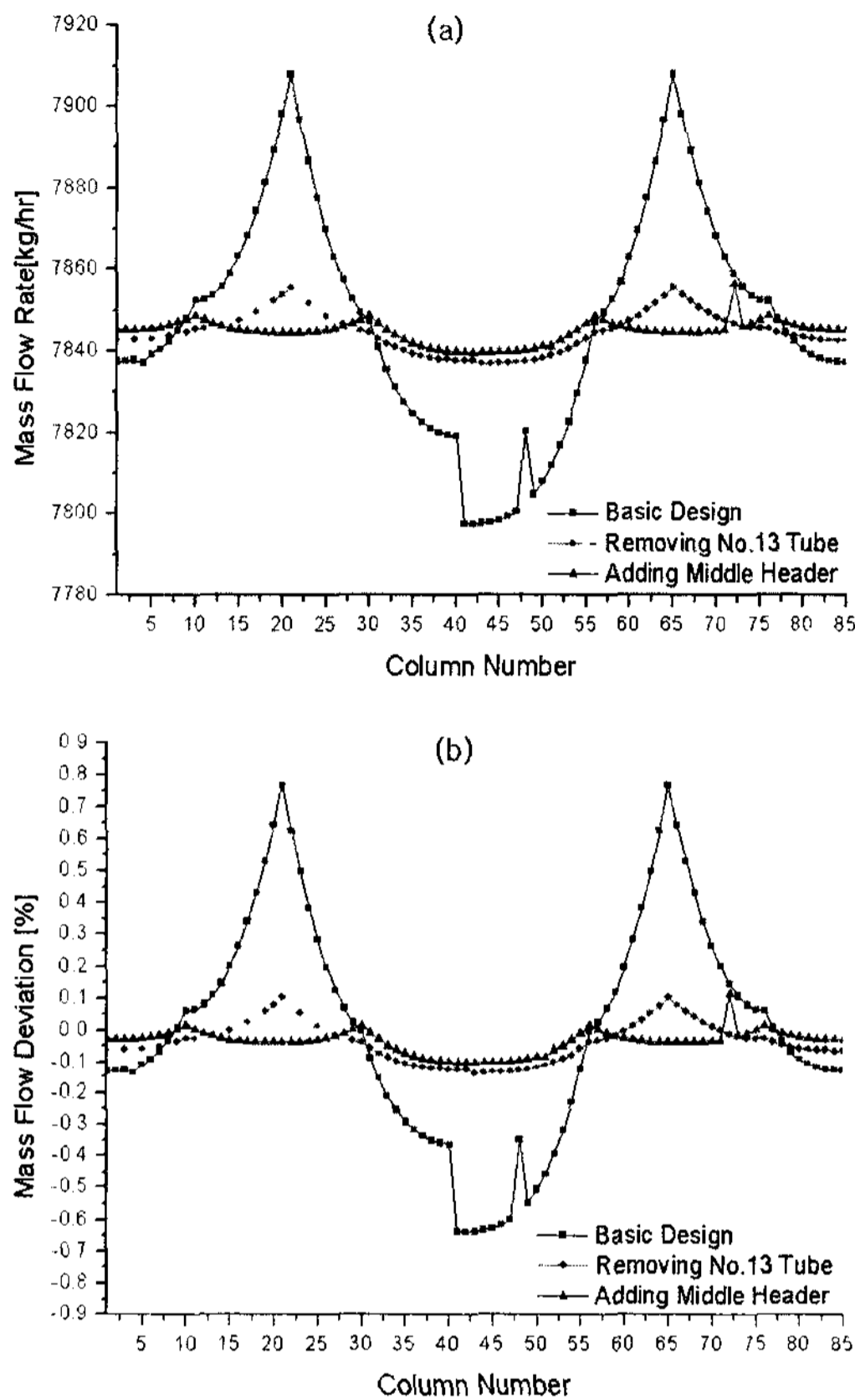


Fig. 15 (a) Mass flow rates of the final superheater tube at 30% power load.  
(b) Mass flow deviation of the final superheater tube at 30% power load.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 A화력 발전소 보일러의 최종과열기 튜브 시스템에 대한 일차원 유동망 모델 (One dimensional flow network model)을 구축하고 관군에서의 증기유량 분포를 해석하였다. 이러한 일차원 해석은 복잡한 네트워크를 구성하고 있는 열유동 시스템에서 강력하면서도 매우 편리한 기능을 제공한다. 기존의 최종 과열기 튜브시스템에 대한 증기유량 해석 결과 100% 부하에서 약 0.2%, 30% 부하에서는 약 0.8%의 유량 편차를 보여주었고 이로 인한 튜브 과열은 크지 않을 것으로 판단된다. 각 열의 13번째 튜브를 제거하거나 중간 헤더를 설치할 경우 30% 부하에서 증기 유량 편차를 각각 0.1%, 0.07% 까지

줄일 수 있어 유량 분배가 좀 더 균일하게 이루어짐을 알 수 있었다. 두 방법중 증기유량 균일화 효과는 중간 헤더를 설치한 경우가 좀 더 우수하였다. 열부하 편차가 발생하는 실제 운전상황에서는 13번 열을 제거하거나 중간 헤더를 설치하면 각 열에서의 증기 유량 편차를 상당히 줄일 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. Singer, J. G., 1981, Combustion-Fossil Power Systems, 3rd Ed., Combustion Engineering Inc., pp.22-31.
2. Basu, P., Kefa, C. and Jestin, L., 2000, Boiler and Burners, Springer, New York, pp. 269-301.
3. Smoot, L. D., 1993, Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use, Elsevier, New York, pp. 29-31.
4. Yin, C., Caillat, S., Harion, J. L., Baudoin, B. and Perez, E., 2002, Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler, Fuel, Vol. 81, pp. 997-1006.
5. Yin, C., Rosendahl L. and Condra, T. J., 2003, Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coalired boilers, Fuel, Vol. 82, pp. 1127-1137.
6. Xu, L., Khan, J. A. and Chen, Z., 2000, Thermal load deviation model for super-heater and reheater of a utility boiler, Applied thermal engineering, Vol. 20, pp. 545-558.
7. Klingebiel, F. and Kahlstorf, U., 2000, Simulating engine lubrication systems with 1-D fluid flow models, SAE 2000 world congress.
8. Messey, S., Williamson, P. S. and Chuter, R. J., Modelling exhaust systems using one-dimensional methods, 2002, SAE 2002 world congress.
9. Blisset, M. and Austin, K. A., 2008, Comparison between an analytical solution and FLOWMASTER II for steady compressible

- flow in a passage, FLOWMASTER INTERNATIONAL Technical Paper.
10. Jeong, H., Rhee, K. N., Ryu, S. R., Yeo, M. S. and Kim, K. W., 2007, A study on the strategy of noise prevention by cavitation for radiant floor heating (ondol) system, Architecture and urban research information center, Vol. 1, pp. 14-22.