

루프 환기구에 따른 보일러빌딩 내부 환기성능에 관한 수치적 연구

최훈기 · 유근종* · 이상현¹

창원대학교 기계공학부, ¹창원대학교 대학원 기계공학부

Numerical Study on the Ventilation Performance in the Boiler Building with and without Roof Openings

Hoon Ki Choi · Geun Jong Yoo* · Sang Heon Lee¹

School of Mechanical Engineering, Changwon National University

¹*Graduate School, Changwon National University*

ABSTRACT

Objectives: The objective of this paper is to find flow and heat transfer characteristics numerically in boiler buildings for three different ventilation window configurations.

Methods: Turbulent natural convection flow in boiler buildings with a constant heating wall temperature was analyzed numerically. Governing equations were solved with standard finite-volume method using the SIMPLE algorithm.

Conclusions: Flow and heat transfer characteristics are found for three different ventilation types. In the lower area under furnace, velocity and temperature distributions show similar patterns among the three different ventilation types. In the upper area over furnace, however, air flow is well mixed with lower peak temperatures for types B and C, which have roof ventilation windows, compared to type A which has side wall louvers only. Also, type B, with a single large roof window, shows better ventilation effect than does type C with its distribution roof windows.

Key words: boiler building, cooling performance, louver type ventilation, numerical analysis, peak temperature, roof type ventilation

I. 서 론

화력발전소의 보일러빌딩 내부는 화로(furnace)를 포함하는 다수의 열원을 갖는 복잡한 설비들로 이루어져 있다. 연료를 연소시키는 장치인 화로와 연소에 필요한 연료, 공기 및 온수를 공급하는 복잡한 배관들, 그리고 이러한 장치들을 지지하기 위한 각종 구조물로 구성되어 있다. 보일러빌딩 내부의 온도가 높은 화로 외벽은 열전달을 차단하기 위하여 단열재를 시공하고 있으나 완벽하지 않아 빌딩내부로 많은 에너지가 방출된다. 방출된 열을 냉각시키지 않으면 빌

딩 내부의 공기 온도가 상승하여 작업자의 작업환경에 심각한 문제를 초래할 수 있고 각종 운전을 위한 계기들의 오작동을 유발하는 원인이 된다. 하지만 복잡한 구조와 거대한 규모로 인하여 냉각을 위한 특별한 장치를 설치하지는 못하고 있는 실정이다. 일반적으로 냉각은 빌딩 측벽과 상부에 설치된 루버 및 루프 환기구를 개방하여 순수한 자연대류에 의하여 수행하고 있다. 내부 화로 벽면에서 방출되는 열로 인해 벽면 근처의 공기는 밀도가 낮아져 부력이 형성되어 하부에서 상부로 유동이 형성된다. 이때 하부 통풍구로 유입된 찬 공기는 내부 열원에 의해 발생

*Corresponding author: Geun Jong Yoo, Tel: 055-213-3626, E-mail: gjyoo@changwon.ac.kr

School of Mechanical Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon, Gyeongnam 51140
Received: August 25, 2016, Revised: September 13, 2016, Accepted: September 14, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

된 열들을 상부에 설치된 통풍구를 통해 방출시키게 한다. 복잡한 내부구조는 자연대류에 의하여 형성된 유체유동의 원활한 흐름을 방해하게 되며 냉각성능을 감소시키는 원인이 된다. 이로 인하여 국소적으로 공기의 흐름이 정체되는 영역이 발생하여 온도가 상승하게 된다. 특히 화로가 설치된 상부영역에서 온도가 상승하면 화로 위에 설치된 계기의 오작동을 초래하는 여러 가지의 운전상 문제가 일어나기도 한다. 이러한 문제점에 대응하기 위하여 최적의 통풍구(루버 or 루프 환기구)를 설치함으로 보다 원활한 자연환기를 발생시켜 최적의 실내온도를 유지할 필요성을 인식하게 되었다.

환기현상의 연구는 보일러빌딩의 규모가 너무 크고 여러 기기들이 복잡하게 설치되어 있어 실험적으로는 이루어질 수 없으며, 축소모형으로 제작한다 하더라도 상사성을 유지하기 힘들기 때문에 대부분의 연구는 수치해석에 의존하고 있는 실정이다. 이와 같은 방법으로 Sigey et al.(2004), Gratia et al.(2004) 및 Stavrakakis et al.(2008)은 수치해석적인 방법을 통해 다양한 실내 환기방법과 실내 환기 성능을 개선시키는 연구를 진행한 바 있다. Kim et al.(2005)은 다수의 열원을 갖는 보일러빌딩에서 혼합대류 현상에 대하여 적절한 통풍구 설치에 따른 냉각효과를 고찰한 바 있다. 또한 Kim et al.(2009)은 HRSG 건물에서 온도 제어를 위하여 루버를 설치하고 자연대류와 강제대류 현상의 특성을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 하지만 일반적으로 상부의 통풍구조는 내부 구조물들에 의해 각 경우마다 위치, 크기가 각기 다르게 설계되어 지고 있다. 하부에서 유입된 찬 공기가 화로 벽면에서 방출되는 열에 의하여 온도가 상승하여 상부 측면 벽에 설치된 창인 루버나 지붕에 설치된 창인 루프 환기구 등의 개방 통구를 통하여 외부로 빠져나가게 된다. Kim et al.(2009)의 연구에 의하면 냉각성능은 하부 루버의 개방되는 면적에는 영향을 받지만 형상에는 큰 영향을 받지 않고 상부 루버의 형상 및 개방면적에 큰 영향을 받는 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 Kim et al.(2009)이 수행한 해석방법을 기반으로 수치해석을 통해 내부 환기에 영향을 미칠 수 있는 또 하나의 요소인 상부 루프 환기구 구조에 대하여 수치해석을 수행하여 냉각성능에 미치는 영향을 고찰해보고자 한다.

II. 해석 방법

1. 지배방정식

보일러빌딩 내부 유동은 열전달을 통해 형성된 부력으로 상승하는 유동을 보인다. 화로 벽면을 비롯한 열원들의 벽면은 단열재가 시공되어 있지만 실제로는 60°C 근처의 높은 온도를 유지하고 있음을 확인하였다. 따라서 각 발열부의 벽면 온도를 60°C로 가정하였다. 아울러 이 경우 빌딩내의 Gr(Grashof Number)는 대략 10^{15} 크기를 가지므로, 자연대류는 난류형태를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Re(Reynolds Number)는 빌딩 내부의 공기 온도를 평균적으로 40°C로 가정하여 도출하면 약 10^5 크기를 가지므로 난류유동이 형성된다. 이러한 난류유동을 해석하기 위하여 본 연구에서는 Launder & Spalding.(1974) 및 다수의 연구를 통하여 검증되어 공학적으로 신뢰성을 인정받고 있는 표준 k-ε 모델을 적용하였다. 지배 방정식은 다음과 같이 제시할 수 있다.

1) 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

2) 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] + \rho g_i \beta (T - T_{ref}) \end{aligned} \quad (2)$$

3) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j T) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j T'} \right) \quad (3)$$

4) 난류 운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4)$$

5) 난류 운동에너지 소산율 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon U_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)의 부력항, $\rho g_i \beta (T - T_{ref})$ 은 밀도의 변화를 온도에 대한 함수로 정의한 Boussinesq 근사식을 적용하였으며, 이는 온도 변화만큼 유체의 밀도변화가 부력항에 반영되어 계산됨을 의미한다. 이때 식 (2)의 유도된 부력항은 식 (6)과 같이 밀도와 온도의 일차적인 함수로 표현된다.

$$\rho = \rho_{ref}(1 - \beta(T - T_{ref})) \quad (6)$$

2. 해석대상

Figure 1 및 Figure 2와 같이 본 연구 대상인 보일러빌딩은 길이 60 m, 폭 82 m, 높이 84.7 m의 구조로 빌딩 내부의 화로(Furnace)하부 부근에 Air Duct를 비롯한 배관들로 인해 밀집된 복잡한 구조를 가지며, 상부에는 NOx 제거용 SCR을 비롯하여 거더(Girder)들이 배치되어 있으며 Fan을 통해 공기에열

기(Air Pre-heater)에 필요한 공기가 흡입되어 진다.

본 연구에서는 3가지(Type A, B, C) 루버(측벽면의 창문)나 루프 환기구의 형상에 대하여 수치해석을 수행하여 냉각성능을 비교하고자 한다. Type A는 상부루버를 설치하고 루프 환기구는 없는 경우이고 Type B와 Type C는 상부루버는 없고 루프 환기구만 있는 경우이다. Type B는 루프 환기구를 단일화시켰으며 Type C는 루프 환기구의 구조를 다분화시켰다. 3가지 경우 모두 상부에 설치된 루버 혹은 루프 환기구의 총면적은 동일하고 나머지의 모든 하부 루버들은 3가지 경우 모두 동일하다. 찬 공기는 하부 루버로 유입되고 이 공기는 화로 등 열원들로부터 열을 받게 되면 부력이 형성되어 상승하게 된다. 상승한 공기는 상부 루버 또는 상부 루프 환기구를 통하여 외부로 빠져나가게 되어 보일러 빌딩 내의 공기를 냉각시키게 된다. Figure 2는 대표적인 Type A의

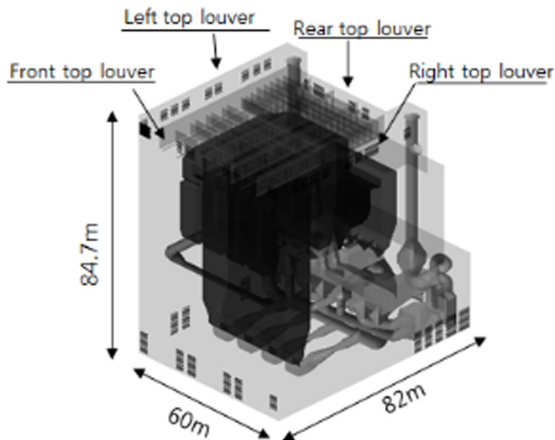


Figure 1. Internal structures in the boiler building

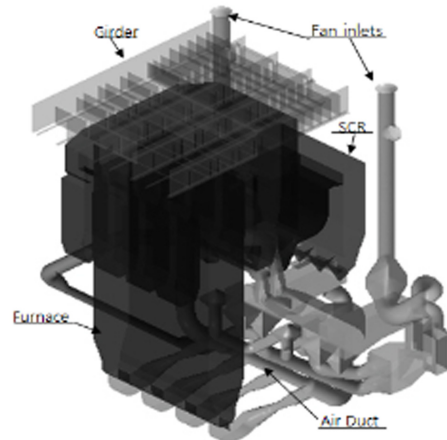


Figure 2. Top louvers arrangement for the Type A

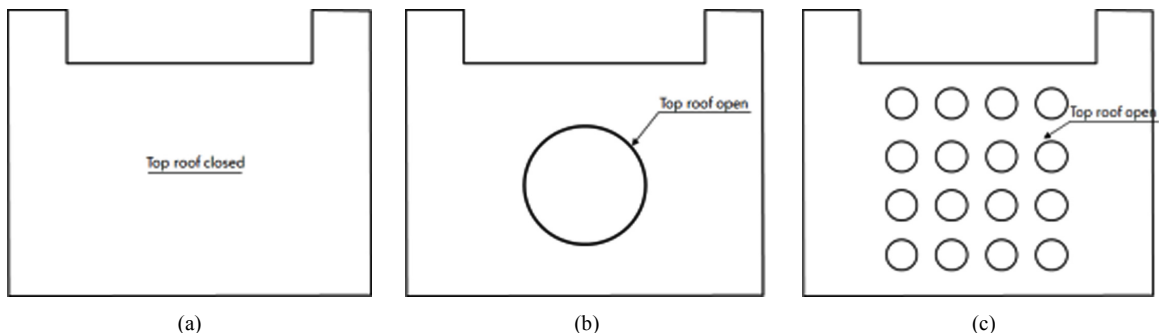


Figure 3. Arrangement of top roof openings : (a) Type A(side wall windows), (b) Type B(single roof window), (c) Type C(multi-roof windows)

Table 1. Summary of the analysis cases

Type	상부루버 및 루프 환기구의 개폐여부
A	상부루버 개방, 루프 환기구 닫음
B	상부루버 닫음, 루프 환기구 개방
C	상부루버 닫음, 루프 환기구 개방

형상을 나타내었으며, Table 1은 창문의 개/폐 여부를, Figure 3은 3가지 Type에 대한 루프 환기구들의 위치 및 크기를 나타내었다.

3. 격자계 및 경계조건

Figure 1과 2에 나타난 구조물들을 모두 반영하여 격자계는 약 400만 개 ~ 850만 개의 독립성 테스트를 통해 보일러 빌딩 내의 최대(peak) 온도의 오차가 1% 미만으로 나타나는 약 650만 개 Tetra 격자로 구성하였다. 또한 열원들을 포함하여 그 외 구조물들의 경계조건은 Table 2와 같으며, 외기온도는 특정지역의 여름 평균 외기온도인 34.2℃를 적용하였다. 실제 발열을 하는 고온 기기들은 단열재로 감싸져 있으나 여러 문제점들로 인하여 60℃ 정도의 온도크기가 실측되고 있다. 따라서 본 연구에서는 발열 기기의 모든 벽면온도를 60℃로 경계조건을 설정하였으며, 외부 벽면들은 단열조건으로 설정하였다. 또한 Fan은 공기에 열에 필요한 공기가 강제 흡입되므로 유속은 일정 유량을 흡입함을 가정하여 속도조건을 적용하였다. 상부 통풍구조를 같은 조건에서 비교하기 위하여 Figure 3에 나타내어진 Type B와 Type C의 루프 환기구는 Type A의 상부 루버의 통풍 전체 면적과 동일하도록 적용하였다. 공기의 물성치는 온도에 따라 변화하도록 하였다.

Table 2. Boundary conditions

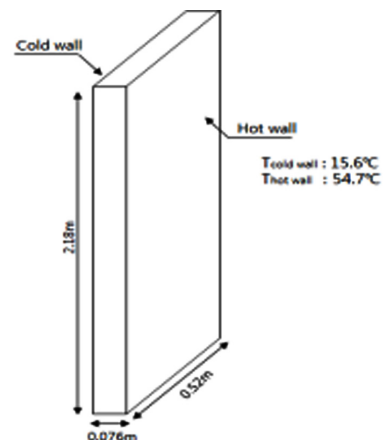
Section	Boundary conditions	Remarks
Louver	Pressure outlet	Atmosphere Temperature : 34.2℃
Fan	Velocity inlet	Velocity : 3.19445 m/s
Internal structures	Wall	Furnace : 60℃ Air ducts : 60℃ Etc : 60℃
Girder	Wall	Adiabatic, No-slip
External walls	Wall	Adiabatic, No-slip

4. 수치해석 방법

유체 유동장의 해를 얻기 위해 SIMPLE 기법을 이용하여 해석하였다. 이는 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시켜 압력과 유속의 관계식을 형성하고 이를 통해 각 지배 방정식이 모두 만족되도록 반복적으로 속도와 압력을 보정하여 해를 구하는 방법으로 신뢰도가 입증된 기법이다. 또한 각 지배방정식에 포함된 대류항과 확산항은 1차 상류화 기법을 이용하여 이산화된 식을 풀이하였다. 수렴기준으로는 에너지 방정식의 잔차(residual)가 10^{-7} 그 외는 10^{-3} 미만을 만족하고 보일러 빌딩 내의 최대(peak) 온도의 변화가 없을 때까지 진행하였다. 계산에는 CFD 상용 소프트웨어 ANSYS FLUENT v.14 (ANSYS Inc, 2011)를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

본 연구의 보일러빌딩 해석에 앞서 해석타당성 검증을 위해 Betts & Bokhari(2000)의 실험결과와 전산 해석 결과를 비교하였다. Figure 4의 형상과 같이 54.7℃의 Hot wall과 마주보는 15.6℃의 Cold wall이 설치된 공간 내부에서의 열전달 실험이다. Figure 5는 온도를 측정한 평면에 대한 온도분포를 나타낸 그림으로 실험값과 수치해석 결과는 매우 유사한 결과를 가진다. 따라서 본 연구의 해석방법은 보일러빌딩의 환기해석을 수행하는데 적절할 것으로 판단되어진다.

**Figure 4.** Schematic of experimental geometry (Betts & Bokhari, 2000)

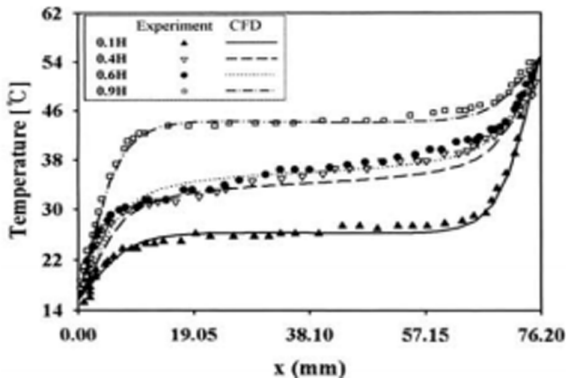


Figure 5. Temperature distribution on the optional section.

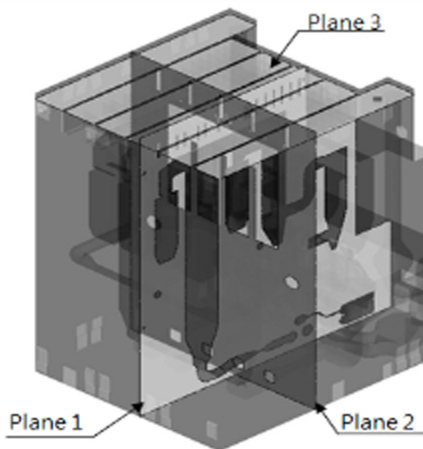


Figure 6. Data acquisition sections

보일러 빌딩내부는 매우 넓은 영역이므로 속도 및 온도분포를 도출하기 위하여 임의의 단면을 설정하였으며 Figure 6는 단면의 위치를 나타낸 그림이다.

Figure 7~9는 임의 단면에 대하여 속도분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 화살표로 표기한 속도벡터는 분포도의 이해를 돕기 위하여 그 수를 축소하여 간결하게 나타내었으며 주 흐름 방향은 굵은 화살표로 나타내었다. 루버 및 루프 환기구의 형상에 상관없이 하부 루버를 통해 유입된 찬 공기들은 화로 및 배관 등의 발열원들로부터 열을 받게 된다. 공기가 열을 받으면 밀도가 낮아져 중력반대 방향으로 부력이 형성되어 수직으로 상승하는 유동을 형성하게 된다. 대표적인 발열체인 화로 근처에서 중력의 반대방향으로 수직벽의 높이가 가장 높고 화로벽면과 빌딩내 공기와의 온도차가 많으므로 큰 부력이 형성되어 강

하게 상승하는 유동을 볼 수 있다. 또한 화로는 열원으로써 가장 큰 전열표면적을 가지며 유동을 방해하는 저항체가 없기 때문에 강한 수직의 상승유동이 형성된다. 물론 루버나 루프 환기구의 형상에 상관없이 화로 주위 조건은 3가지 모두 동일하므로 Type A, Type B 및 Type C 모두 화로 벽면 근처에서 상부 지역으로 상승하는 유동이 강하게 형성되며 전체적으로 하부영역에서는 비슷한 유동의 모습을 보인다. 상부지역에서는 보일러 빌딩내부에서 화로의 형상으로 인한 형상저항에 의해 부분적으로 큰 와류가 형성되어 다소 정체되는 구간이 존재한다.

보일러 빌딩의 상부에서는 중요한 계측기기들이 화로 위의 Girder 근처에 설치되어 있으므로 이 영역으로의 상승하는 공기 유입이 냉각적인 측면에서 아주 중요하다. 이 영역으로의 공기유입은 상부의 통풍구의 위치나 형상에 의하여 큰 차이가 발생된다. Figure 7~9에서 확인할 수 있듯이 상부에 측면창인 루버만 설치되어진 Type A는 복잡한 Girder 형상과 더불어 내부 구조물들을 타고 상승한 고온의 공기가 Girder 영역 중앙부까지 순환하고 측면벽 루버의 창으로 유출되기 때문에 Girder영역에서 국부적으로 온도가 크게 상승하게 된다. 이러한 냉각성능을 개선하기 위한 모델인 Type B와 Type C는 Type A의 상부 루버의 표면적과 동일한 크기로 보일러빌딩 옥상 천정에 루프 환기구를 설치한 경우이다. 빌딩 내부 열원의 구조물들을 주변에서 상승한 공기는 Girder 부근을 순환하고 곧바로 상부루프 환기구로 유출하게 되어 Girder부의 냉각성능을 향상시킬 수 있음을 볼 수 있다. 따라서 천정에 환기구가 설치된 Type B와 Type C는 측벽에 창이 설치된 Type A에 비하여 Girder영역에 공기의 유동이 효율적으로 형성되어 그 부분에서의 최대온도를 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

Figure 10~12는 3가지 통풍구 형상에 대한 온도분포를 나타낸 그림이다. 설치되어야 할 구조물 주변의 유체 유동이 정체되는 것은 상하부의 통풍구의 개수와 형상의 변화로 개선되지 않아 이 부분에서 국부적으로 온도상승이 발생하는 것은 피할 수가 없다. 하지만 그 이외의 영역에서는 작업자들의 안전과 화로 상부에 설치되어 있는 제어기기들의 원활한 운전을 위하여 최대(peak) 온도를 충분히 낮출 수 있는

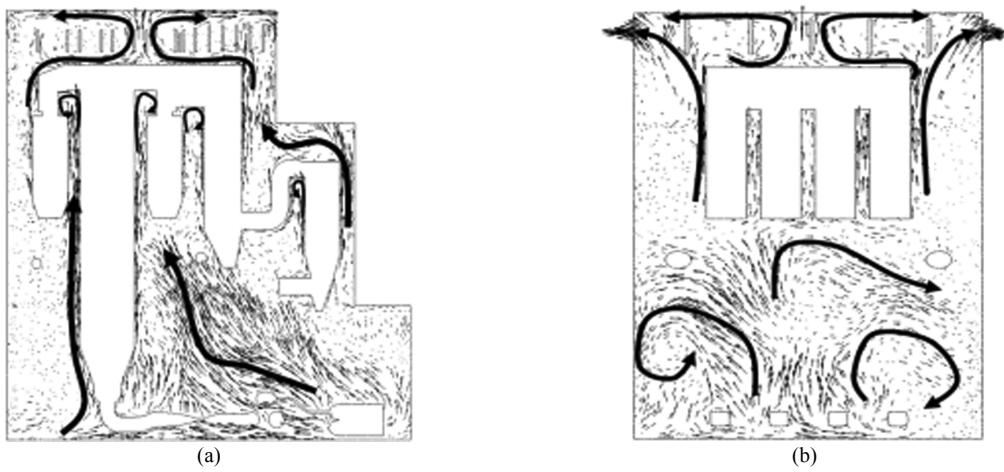


Figure 7. Velocity vectors distributions in the Type A (a) plane 1, (b) plane 2



Figure 8. Velocity vectors distributions in the Type B (a) plane 1, (b) plane 2

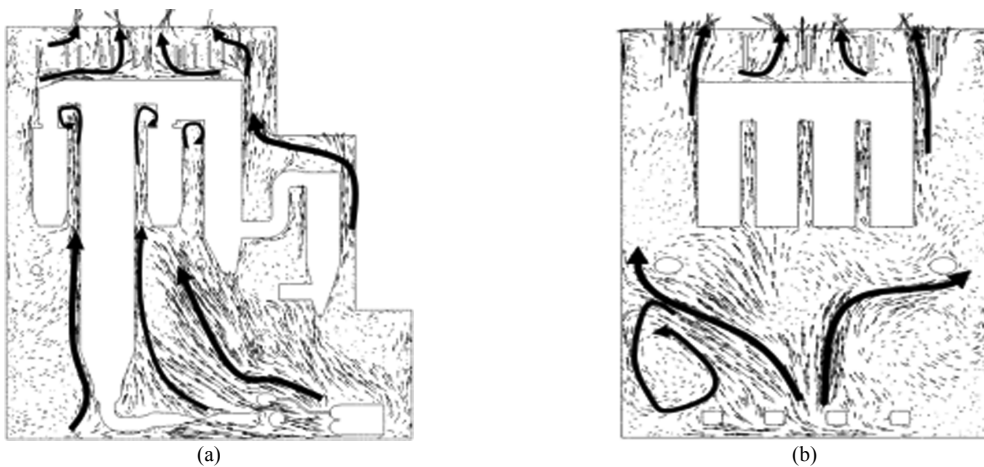


Figure 9. Velocity vectors distributions in the Type C : (a) plane 1, (b) plane 2

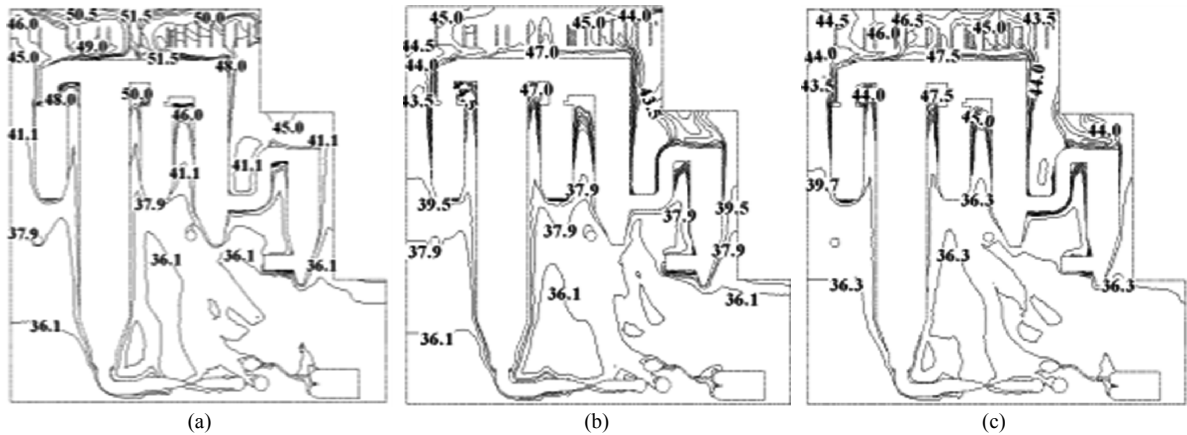


Figure 10. Temperature distributions on the plane 1 : (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C

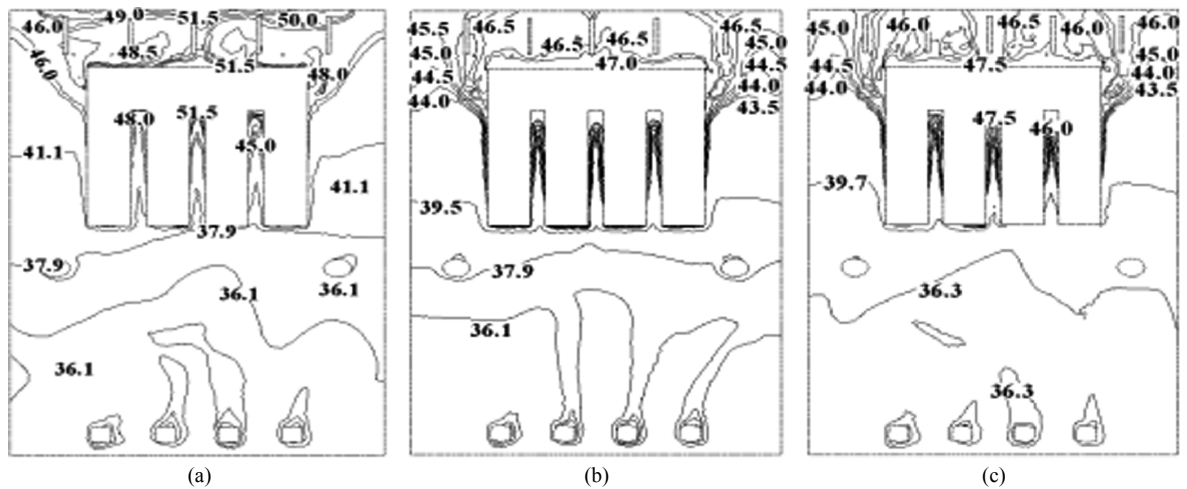


Figure 11. Temperature distributions on the plane 2 : (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C

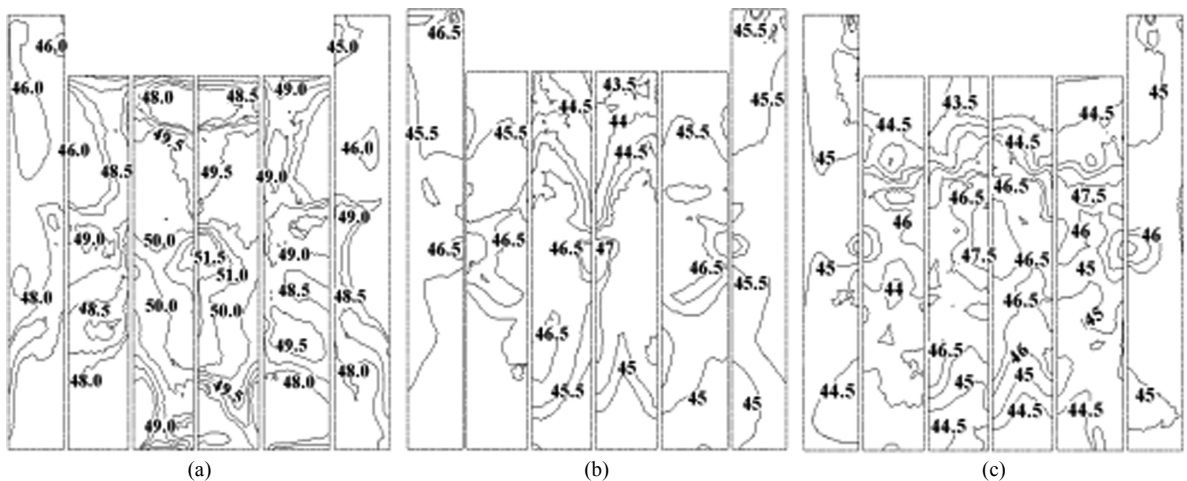


Figure 12. Temperature distributions on the plane 3 : (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C

환기성능을 가지도록 설계되어지는 것이 환기해석에서는 가장 중요한 요소이다. 3가지 통풍구의 형상에서 동일하게 하부영역의 온도분포는 비슷한 분포를 하고 있다. 상부로 공기의 유동이 진행될수록 발열원으로부터 열을 받아 온도는 상승하게 된다. 3가지 모두 보일러 빌딩 내에서 상부로 상승할 때 약 40℃까지 온도가 상승되며, 화로 상부의 기하학적인 저항요소에 의해 정체현상이 형성되어 최대 약 50℃ 이상의 온도분포를 보이고 있다. Type A의 경우 보일러빌딩 상부영역인 Girder에서 최대 온도는 약 52℃까지 상승하게 된다. 하지만 Type B와 Type C는 각각 약 47℃, 48℃의 최대 온도분포를 보여 Type A보다는 냉각성능이 향상됨을 볼 수 있다. 이는 속도분포를 통해 본 바와 같이 상부 루버를 밀폐시키고 동일한 면적만큼 루프 환기구를 개방시킴으로써 화로 상부 및 Girder 영역에 유동을 효율적으로 순환시켜 Type A보다 더욱 효과적으로 냉각성능을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 Type B와 같은 단일 원형형태의 상부 루프 환기구가 다분화시킨 상부 루프 환기구 구조를 가지는 Type C보다는 다소 좋은 냉각성능을 보이고 있다. 따라서 화력발전소 보일러빌딩의 외관 경관을 고려한 Type A는 통풍으로 인한 실내의 냉각효과에는 문제점을 안고 있으며 천정 중앙부 또는 화로 수직 윗부분의 지붕에 루프 환기구를 설치하는 것이 좋은 대안으로 판단된다.

IV. 결 론

Type A와 같이 상부 루버가 설치되어 있는 경우 복잡한 화로 위 Girder 배치되어 있는 영역에서 유체 유동은 다소 정체현상을 보이며 이로 인하여 최대 온도가 52℃까지 상승하게 됨을 확인하였다. Type B 및 Type C와 같이 상부 루프 환기구를 개방시키게 되면 최대 온도를 약 5℃ 정도 낮출 수 있다. 두 경우 중 상부 루프 환기구를 집중시킨 Type B가 가장

낮은 최대온도를 보이므로 다소 향상된 냉각성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 빌딩 상부영역에 효과적인 환기성능을 갖추기 위해서는 측면부 통풍창(루버) 설치보다는 상부 루프 환기구의 설치가 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2015-2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

References

- Anslys Inc. ANSYS FLUENT User's guide. 2011
- Betts PL, Bokhari LH. Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 2000;21(6):675-683
- Gratia E, Bruyere I, De Herde A. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Building and Environment* 2004;39(10):1157~1170
- Kim CH, Yoo GJ, Choi HK. Numerical study on the ventilation effect in the boiler building. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2005;15(3):239-249
- Kim CH, Lee JW, Choi HK, Yoo GJ. Numerical study on ventilation method for temperature control of HRSG building. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2009;19(3):240~249
- Launder BE, Spalding DB. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering* 1974;3(2):269-289
- Sigey JK, Gathen FK, Kinyanjui. Numerical study of free convection turbulent heat transfer in an enclosure. *Energy Conversion and Management* 2004;45(15-16):2571~2582
- Stavarakakis GM, Koukou MK, Vrachopoulos MGr, Markatos NC. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale seperiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings* 2008;40(9):1666~1681