

HRSG건물 온도제어를 위한 환기방안에 관한 수치적 연구

김철환[†] · 이종욱 · 최훈기 · 유근종

창원대학교 기계설계공학과

Numerical Study on Ventilation Method for Temperature Control of HRSG Building

Chul Hwan Kim[†] · Jong Wook Lee · Hoon Ki Choi · Geun Jong Yoo

Dept. of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National University

HRSG(Heat Recovery Steam Generator) building is large enclosed structure included various heat sources. This building needs to appropriately keep internal air temperature for worker's safety and operability of control devices. In this study, ventilation analysis is performed to find proper ventilation method for temperature control. Ventilation analysis is applied to entire internal space of the building with standard k- ϵ model and enhanced wall treatment because of large size of the structure. And the ventilation method is considered natural and forced convection with two louver structures which has damper

or not. Louver structure affect directly air circulation in near HRSG and lower region of the building. Forced ventilation provides strong inertial force which cause upward airflow. From the analysis, it is found that design requirement for internal air temperature can be satisfied by forced ventilation method with louver structure without damper.

Key Words: ventilation, HRSG building, numerical analysis, k- ϵ model, louver structure

I. 서론

복합화력발전에서 HRSG는 가스터빈을 통과한 고온의 배기가스를 이용하여 발전기를 구동하는데 필요한 고온·고압의 증기를 발생시킨다. HRSG는 내부에서 열교환이 일어나면서도 불구하고 표면을 통해 고온의 열을 방출한다. 과거의 HRSG 시설은 증기를 포집하는 드럼과 제어장치들을 제외한 구조물을 대기 중에 노출하였다. 그러나 폐열회수의 효율을 높이고 대기온도의 변화에 의한 관로의 파손과 노후화 문제를 염려하여 HRSG 시설 전체를 밀폐하게 되었다. 그리고

다수의 HRSG 구조물이 함께 건설됨에 따라 하나의 빌딩 내에 다수의 HRSG 시설을 포함하도록 하였다. 밀폐된 HRSG 건물의 구조는 HRSG와 주변 관로 및 기기들의 표면으로부터 전달되는 열에 의해 높은 실내온도를 형성하도록 하고, 제어장치가 오작동하거나 작업환경이 악화되는 문제를 야기하였다. 따라서 HRSG 건물의 설계 시 실내 온도를 적절하게 유지할 수 있는 방안을 모색하기 위해 환기현상에 대한 관심이 증가하였다.

열원을 포함한 밀폐된 공간 내의 환기에 대한 연구는 실험과 수치해석을 통해 유동현상과 대류열전달에 관한 특성을 평가하면서, 특히 수치해석의 경우, 일반성이 더욱 증진된

접수일: 2009년 5월 28일, 채택일: 2009년 9월 11일

[†] 교신저자: 김철환(경남 창원시 사림동 창원대학교 641-773 기계설계공학과,
Tel : 055-286-7576, E-mail : churani@changwon.ac.kr)

II. 해석방법

1. 지배방정식

HRSG 건물 내부는 HRSG와 드럼과 같은 주요 열원들로부터 주변의 공기로 대류에 의한 열전달 현상이 지배적이다. HRSG 부근에서 상승유동이 강하게 형성되므로 벽면의 온도를 50°C 로 가정할 때 높이를 기준으로 산출한 Ra (Rayleigh number)는 대략 10^3 범위의 크기를 갖는다. 유동을 층류와 난류로 구분 짓는 임계 Ra 의 크기가 10^4 임을 감안하면, 건물 내부의 공기 흐름은 대류 열전달을 수반한 난류유동 형태를 보인다. 따라서 HRSG 건물 내부의 환기해석을 위해서는 유체의 흐름과 환기구통을 통한 유체의 출·입에 따른 물리적 보존법칙을 만족시킬 수 있는 지배방정식을 바탕으로 유체의 열전달을 함께 풀이하여야 한다. 지배방정식인 연속방정식 (1)과 Navier-Stokes식 (2), 그리고 에너지 방정식 (3)은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] + \rho g_i \beta (T - T_{ref})$$

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

한편, 난류 특성을 갖는 유동장을 풀이하기 위해서는 각 지배방정식들의 Reynolds 평균을 통해 나타난 각각의 난류플럭스 항($\overline{\rho u_i u_j}, \overline{\rho u_i T'}$)들에 대한 평가가 이뤄져야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 공학계열 전반에 많이 이용되고 있는 표준형 $k-\epsilon$ 모델(Launder & Spalding, 1974)을 적용하였다.

일반적으로 자연대류 현상은 온도변화에 따른 공기의 물성치 변화가 반영되어야 한다. 열원 부근에서 온도의 변화는 경계층 발달과 주변 공기의 흐름에 영향을 미쳐 다시 온도를 변화시키는 요인이 된다. 이는 수치해석에서 해의 발산이나 주기적인 변화를 일으켜 수렴을 어렵게 만든다. 본 논문에서는 해석의 편의를 위해 지배방정식 내의 밀도 변화는 무시하였으나, 오직 식 (2)에 표현된 부력항($\rho g_i \beta (T - T_{ref})$)만 온도에 따라 변화하는 것으로 가정하였다. 이는 열원 주변의 상승유동이 밀도차에 의한 부력에 바탕을 두고 있으며, 열원으로 멀리 떨어진 곳에서 물성치의 변화가 벽면 부근에 비해 미미하기 때문이다. 부력항의 밀도 변화는 Boussinesq 근사식을 통해 반영되며, 식 (4)과 같이 열팽창계수(β)와 기준 밀도(ρ_{ref}), 온도에 대한 함수로 표현된다.

$$\rho = \rho_{ref}(1 - \beta(T - T_{ref})) \quad (4)$$

난류모델이 개발됨에 따라 보다 예측성능이 우수한 난류모델을 제안하는 방향으로 진행되어 왔다. Chen과 그의 동료는 공동 내의 자연, 강제, 혼합대류에 관한 문헌의 실험 자료를 바탕으로 RANS 모델들(Chen, 1995)과 Reynolds 응력 모델들(Chen, 1996), 그리고 LES 모델(Zhang & Chen, 2000)의 예측성능을 비교한바 있다. 그리고 Stavrakakis 등(2008)도 외부에 노출된 시험 공간 내의 자연환기에 대한 실험과 함께 RANS 모델들을 이용한 해석결과를 비교하였다. 다른 한편으로는 이러한 대류현상에 대한 연구가 난류모델의 개선에 영향을 미쳐 벽면부근의 Low-Reynolds 수 영역의 난류유동에 대한 해석성능을 키웠다. 그리고 이렇게 개발된 모델들이 다시 자연대류 현상의 해석에 적용되었다. Blay 등(1992)은 공동 내의 혼합대류 현상에 대한 실험과 함께 LRN(Low-Reynolds number) $k-\epsilon$ 모델들을 이용한 해석결과를 비교하여 예측성능을 살펴본 바 있다. Yilmaz와 Fraser(2007)도 위·아래가 개방된 평행한 수직 평판 사이의 자연대류 현상에 대해 실험하고 LRN $k-\epsilon$ 모델을 이용한 해석결과와 비교하여 예측성능이 우수한 모델들을 제안한 바 있다.

한편, 복잡한 내부구조와 다수의 열원을 포함하는 큰 밀폐 공간의 환기현상에 대한 연구는 거의 대부분 수치해석에 의존하고 있다. 실험의 경우 축소모형 제작 시 내부 구조물과 열원들을 필연적으로 생략함에 따라 실제 현상과 상사성을 유지하는데 매우 어려워 복잡한 형상에 대해서는 제한적이기 때문이다. 수치해석 경우, 비록 해석결과가 작업자의 물리적 현상에 대한 이해와 해석용 틀에 대한 숙련에 따라 영향을 받는다고 하지만(Kang et al., 2008), 반대로 해석방법과 물리적 현상에 대한 이해 및 해석 숙련도가 밀바탕이 된다면 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다. 그리고 이미 검증된 실험자료를 바탕으로 해석방법의 타당성을 확인함으로써 수치해석의 오차를 줄일 수 있다. 이와 같은 방법론으로 Kim et al. (2005, 2008)은 다수의 열원을 갖는 보일러빌딩 내부의 온도유지를 위해 적절한 환기구 위치를 수치해석을 통해 연구하였다. 이때 제안한 해석방법에 대한 타당성을 검증하기 위해 참고문헌에 제시된 실험결과를 이용하여 수치해석 결과와 비교하였다.

본 논문에서는 Kim et al.(2005, 2008)이 제안한 해석방법론을 바탕으로 HRSG 건물 내부의 환기현상을 수치해석을 통해 살펴보고자 한다. 그리고 본문에서 수직인 긴 공동 내의 자연대류 열전달에 관한 문헌(Betts와 Bokhari, 2000)을 바탕으로 수치해석방법에 대한 타당성을 확인하고 HRSG 건물 환기해석에 적용하고자 한다. 최종적으로 루버의 구조와 환기방식에 따른 HRSG 건물 내부의 환기특성을 살펴보고 최적의 환기방법과 구조에 대해 제안하고자 한다.

난류유동에서는 벽면 부근에서 속도와 온도 같은 물리량 변화가 크기 때문에 이를 모사하기 위해 조밀한 격자계가 요구된다. 그러나 조밀한 격자계는 격자의 수를 증가시켜 계산하는데 소요되는 시간을 증가시킬 뿐만 아니라 적절한 격자수를 구성하는 데 많은 노력이 요구된다. HRSG 건물은 일반 주거용 건물에 비해 규모가 매우 크고 내부구조가 복잡하여 조밀한 격자계 구성이 힘들다. 따라서 본 논문에서는 Two-layer 모델(Jongen, 1992)과 Kader (1981)에 의해 제안된 벽함수를 함께 사용하는 기법인 Enhanced wall treatment를 이용하였다(Fluent Inc., 2006). 이는 벽면부근의 유동해석에 있어 기존의 벽함수를 개선한 형태이다.

2. 수치해석기법

해석을 위해 Fluent v6.3.26을 이용하여 앞서 언급한 지배방정식들을 계산하였다. 이때 식 (2)에 나타난 압력을 계산하기 위해 압력장과 속도장간에 서로 연계시켜 계산하는 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 그리고 각 지배방정식에 포함된 대류항과 확산항은 1차 상류화 기법을 적용하고, 압력장은 정렬격자계에서의 엇갈린 격자계(Patankar, 1980)와 유사한 PRESTO 기법(Fluent Inc., 2006)을 적용하여 수치해의 진동을 방지하고자 하였다. 계산은 각 지배방정식에 대한 수렴기준을 만족하고 입·출구 부분의 유량 및 온도변화와 HRSG 벽면의 평균온도 및 해석영역 내 최대온도의 변화가 없을 때까지 진행하였다. 각 지배방정식의 수렴기준은 초기 5회 오차량을 기준으로 상대적인 양으로 에너지방정식은 10^{-6} , 그 외는 모두 10^{-3} 미만을 만족하는 것이다.

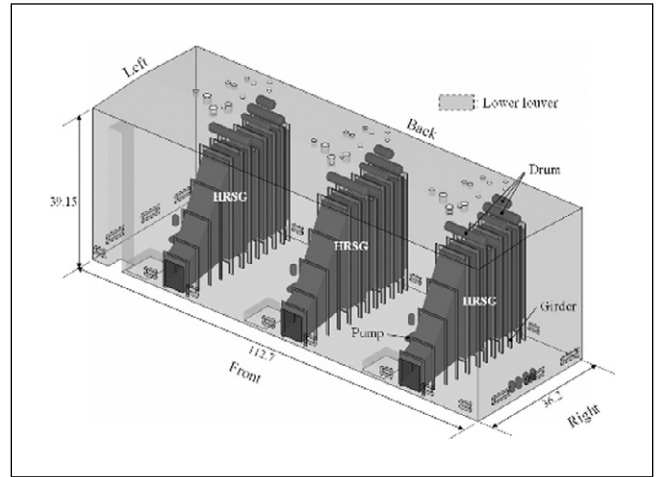


Fig. 1 Structure of HRSG

3. 해석대상

HRSG 건물의 외건은 Fig. 1과 같이 길이 36.2m, 폭 112.7m, 높이 39.15m의 장방형 구조를 가지고 있다. 내부에는 3개의 HRSG와 다수의 드럼 및 펌프, 그리고 기타 구조물들이 포함되어 있다. HRSG는 길이방향을 따라 덕트의 크기가 커지며 건물을 가로지르는 구조이고, 최대높이 27.8m, 폭 7.7m로 건물 내 가장 큰 열원이다. HRSG의 벽면에는 가로와 세로로 다수의 I자형 거더(Girder)들이 HRSG를 지지하고 있다. 각각의 HRSG 위에는 포화증기를 포집하는 3개의 드럼이 놓여있다.

건물 외벽의 하부루버들은 Fig. 2와 같이 좌·우로 대칭을 이루나, 전·후로는 비대칭 구조로 배열되어 있다. 그리고 천정에는 각 HRSG의 중심선을 기준으로 상부루버 혹은 송풍기가 Fig. 3과 같이 배치되어 있다. 루버의 구조는 형상에 의한 압력손실과 유량감소를 고려하기 위해 실제 루버형상

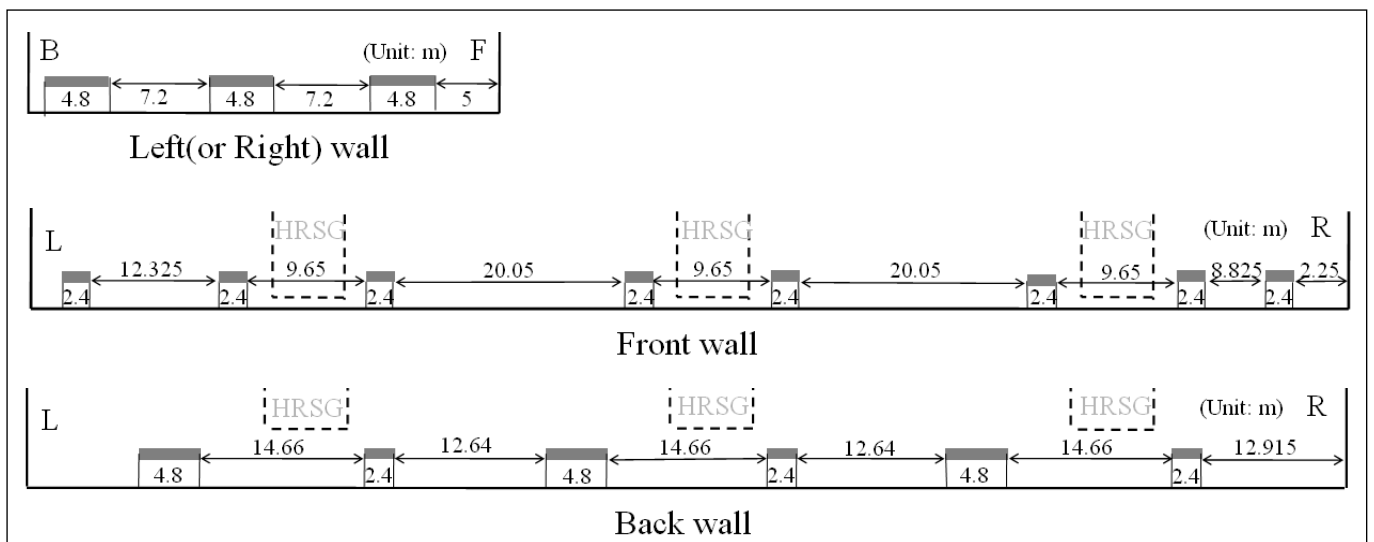


Fig. 2 Lower louvers location

을 바탕으로 단순화하였으며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 위치에 따라 다른 형상을 가지고 있다. (a)와 (b)는 모두 하부루버

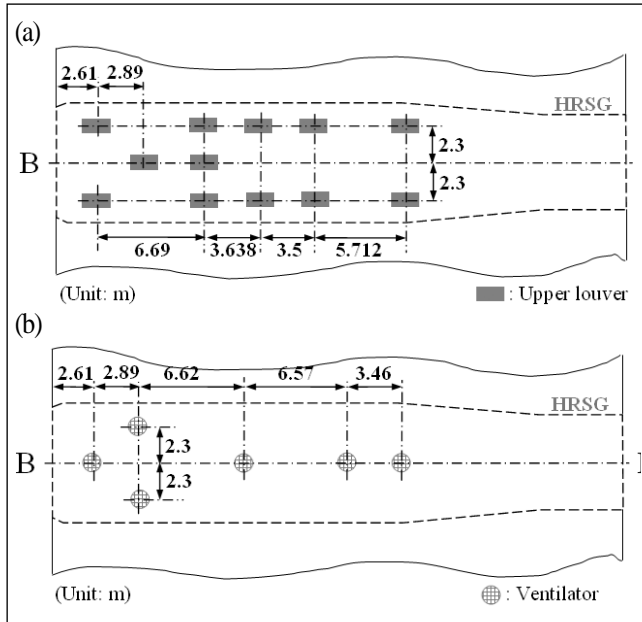


Fig. 3 Location of upper louvers and ventilators: (a) upper louvers, (b) ventilator

의 형상을 나타낸 것으로, 일반적인 루버의 구조는 (a)와 같이 루버의 개폐를 조절하는 댐퍼가 함께 설치된다. 본 연구에서는 자연환기의 경우 환기효과의 개선을 위해 댐퍼의 구조가 미치는 영향을 살펴보고자 댐퍼가 없는 구조 (b)를 함께 고려하였다. (c)는 자연환기의 경우 상부루버의 형상을 나타낸 것으로, 화살표를 따라 내부에서 유입된 공기가 외부로 토출되는 구조이다.

한편, HRSG 건물은 복합화력발전에서 가스터빈 외 다수의 건물들과 수 미터 내에서 서로 연결되어 사방으로 둘러싸여 있다. 이러한 구조는 주변건물이 풍향과 풍속에 영향을 미쳐 HRSG 건물 주위의 기류에 큰 변화를 일으키기 때문에 자연환기에서 외풍의 영향을 고려하는데 큰 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 보수적인 방법으로서 외풍의 영향을 배제하고 오직 건물 내부의 열원에 의해 형성되는 부력만을 고려하여 환기해석을 수행하고자 한다. 이는 건물의 외부영역을 배제함으로써 해석격자계를 구성하는데 있어 편의를 제공하고 해석용 하드웨어의 제약을 낮출 수 있기 때문이다.

해석격자는 HRSG와 드럼, 기타 구조물, 그리고 HRSG 사이의 빈 공간에 대한 블록작업과 비정렬격자 구성방법을 이용하여 사면체 격자들로 구성하였다. 선행적으로 해석결과

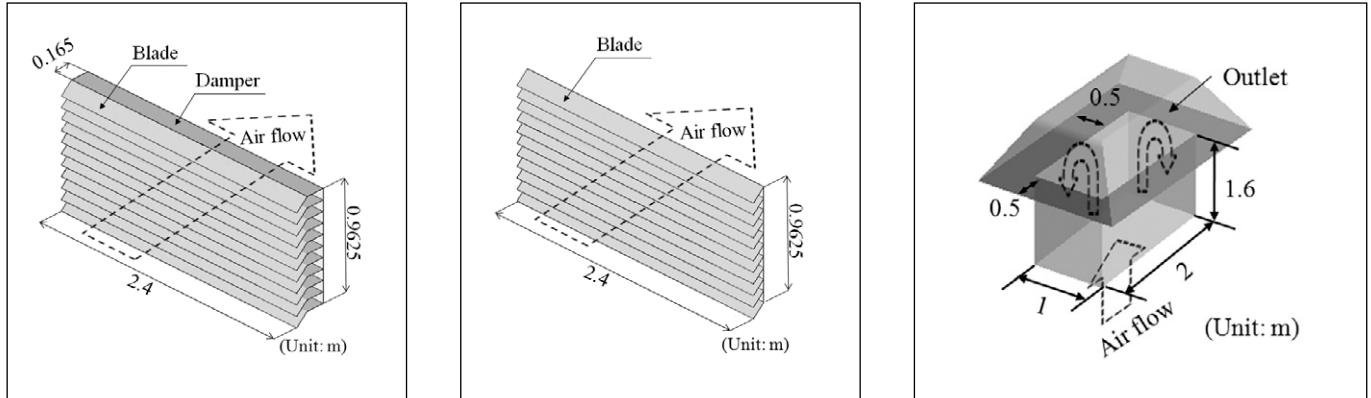


Fig. 4 Shape of louvers: (a) lower louver with damper, (b) lower louver without damper, (c) upper louver

Table 1 Summary of analysis results

| Cases | No. of Grid (million) | Ventilation method | Louver structure | total (kg/s) | Tm (°C) | Tw,avg (°C) | hw (w/m ² °C) |
|-------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 750 | Natural | (A) | 155.21 | 46.43 | 50.43 | 5.67 |
| 2 | 630 | Natural | (A) | 155.23 | 46.44 | 50.41 | 5.67 |
| 3 | 485 | Natural | (A) | 155.26 | 46.44 | 50.42 | 5.67 |
| 4 | 492 | Natural | (B) | 155.82 | 46.29 | 50.18 | 5.56 |
| 5 | 441 | Natural | (A) | 321.89 | 41.47 | 46.15 | 6.50 |

(A): without damper, (B): with damper

에 대한 격자독립성을 살펴보기 위해 490만여 개, 630만여 개 그리고 750만여 개의 격자계를 이용하여 HRSG의 평균온도, 유입 공기량, 건물 내 평균 온도를 비교하였다. Table 1은 수행된 전체 해석내용의 결과를 요약한 것으로, 세 경우(Case 1~3) 모두 상호간에 매우 유사하며 0.1% 미만의 작은 오차를 보여주고 있다. 따라서 본 논문에서는 해석에 소요되는 시간과 컴퓨터 자원의 효율을 고려하여 485만여 개의 격자계(Case 3)를 기준으로 환기방식에 따라 약 440만~490만여 개의 범위 내의 해석격자를 구성하였다. 이때 주요 열원부인 HRSG 주변의 격자는 변화가 없도록 하였다.

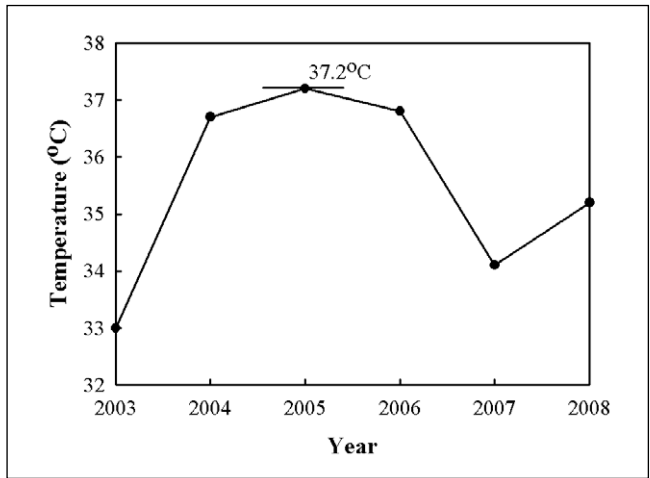


Fig. 5 The maximum temperature throughout the year

4. 경계조건

건물 내부를 둘러싼 각 요소들의 경계조건은 Table 2와 같다. 여기서 HRSG를 포함하는 열원들은 건물 설계 시 추정된 방산열량(Heat gain)의 크기를 바탕으로 벽면의 총면적을 나누어 균일한 열유속(Heat flux)을 갖는 것으로 가정하였다. 하부루버들은 자연대류와 강제대류 모두 대기압을 기준으로 하는 압력조건을 적용하여 내부의 압력변화에 따라 질량보존을 자연적으로 만족시킬 수 있도록 하였다. 강제대류의 경우 송풍기(Ventilator)의 토출유량을 기준으로 속도조건-Table 2에서 (-)부호는 외부로 유출되는 것을 의미함-을 주었으며, 자연대류의 경우 하부루버와 동일하게 압력조건을 적용하였다. 외기의 온도는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 인근지역의

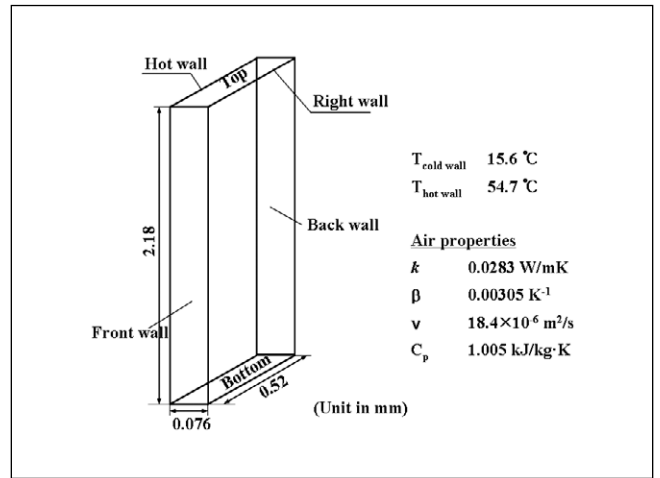


Fig. 6 Schematic of experimental geometry (Betts & Bokhari, 2000)

Table 2 Boundary conditions

| Components | | Boundary Conditions |
|-----------------|---------------|--|
| Lower louvers | | Pressure outlet: Atmosphere; |
| | | Temperature: 37.2°C |
| (Natural) | Upper louvers | Pressure outlet: Atmosphere; |
| | | Temperature: 37.2°C |
| (Forced) | Ventilator | Velocity: -19.62m/s |
| Heat sources | HRSG, Drums | Heat flux: 285.76 W/m ² (Heat gain: 2074 kW, Area: 7257.9 m ²) |
| | Pumps | Heat flux: 1690.07 W/m ² (Heat gain: 300kW, Area: 177.5 m ²) |
| etc. structures | | Adiabatic |
| Walls | | No-slip |

※ Negative velocity indicates outflow.

최근 6년 내 최고온도인 37.2℃를 적용하였다. 설계요건으로 는 건물 내 최고 온도를 갖는 영역이 50℃ 미만을 유지하는 것이다.

III. 결과 및 고찰

1. 해석방법의 타당성 검증

HRSG 건물처럼 규모가 크고 내부가 복잡한 대형 건물 내부의 환기에 관한 연구는 실험적인 방법으로 접근이 어려워 수치해석을 통해 수행하고 있다. 이러한 수치해석의 경우, 내부의 유동특성을 잘 반영할 수 있는 해석방법을 통해 해석 결과에 대한 오차를 줄이는 노력이 필요하다. 따라서 HRSG 건물의 환기해석에 앞서 해석방법에 대한 타당성을 확인하기 위해 자연대류 현상이 지배적인 긴 공동에 대해 수치해석을 수행하고 Betts와 Bokhari(2000)의 실험결과와 비교하였다.

Betts와 Bokhari(2000)의 실험형상은 Fig. 6과 같이 높이 2.18m, 폭 0.76m, 길이 0.52m인 긴 직육면체 모양을 하고 있다. 한쪽 면은 54.7℃의 고온부가 되며 마주보는 다른 한 면은 15.6℃의 저온부가 된다. 그리고 그 외 벽면은 단열되어 있다. 공동 내 유동은 $Ra=1.43 \times 10^6$ 의 난류 자연대류 특성을 갖는 것으로 문헌에서 밝히고 있다(Betts 와 Bokhari, 2000).

수치해석의 결과는 Fig. 7과 같다. 온도분포 (a)는 공동의 중심부를 제외한 대부분이 실험과 수치해석 간에 결과가 매우 유사하였다. 반면에 속도분포 (b)는 벽면부근에서 최대유속과 벽면으로부터 떨어진 위치에서 하강유동을 크게, 그리고 상승유동을 작게 예측하고 있다. 이러한 차이는 유체의 점성계수를 일정한 것으로 가정함에 따라 점도의 변화가 전단력 변화에 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 전반적인 속도변화의 경향은 실험과 유사하다. 따라서 본

논문에서 제시한 해석방법이 환기해석을 수행하는데 적절한 것으로 판단되어 HRSG 환기해석에 적용하였다.

2. 자연환기 결과

자연환기의 경우에 전열면적이 가장 넓은 HRSG의 주변에서 상승유동이 가장 강하게 나타난다. 그리고 따뜻해진 공기는 상부루버를 통해 배출되고 동시에 보존법칙을 만족시키기 위해 하부루버를 통해 저온의 외기가 유입되어 건물 내부를 순환하게 된다. Fig. 8은 루버 구조 차이에 따라 중심 및 우측 HRSG와 우측루버 부근의 유동장을 부분적으로 나타낸 것이다. 높이 10m 이상의 빈 공간에서 유동은 루버 구조에 상관없이 거의 정체되어 있다. 그러나 10m 미만의 하부영역에서는 루버 구조에 따라 외기의 유입각이 결정되기 때문에 다른 분포를 보인다.

하부영역의 유동분포 (b)는 댐퍼가 있는 구조일 때 외류와 순환류가 더욱 강하게 나타나고 있다. 이 경우에는 루버를 통과한 외기가 바닥과 수평하게 내부로 분사되어 우측 하부루버를 통해 유입된 공기의 대부분이 중심 HRSG쪽으로 이동하여 흐른다. 전·후면의 하부루버를 통해 유입된 외기가 동일한 높이에서 마주침에 따라 외류와 순환류가 수평방향으로 강하게 형성된다. 그러나 댐퍼가 없는 구조에서 루버를 통과한 외기는 상승한 후 하강하는 동안 수직방향으로 선회하는 외류를 형성하고 HRSG 측면 하부에 닿아 흐름이 바뀐다. 그 결과 중심 HRSG 쪽으로 흐르는 유속이 다소 느려지며 유동이 상대적으로 단순한 경향을 갖는 차이를 보인다.

한편, 루버를 통과하는 동안 유동면적 변화 때문에 관성력이 증가한 외기는 건물 내부에서 주변의 온도와 열원의 온도, 유속의 크기에 따라 관성력과 중력의 영향이 변하여 흐름 역시 바뀌게 된다. 이러한 이유로 Fig. 8(b)에서는 루버부

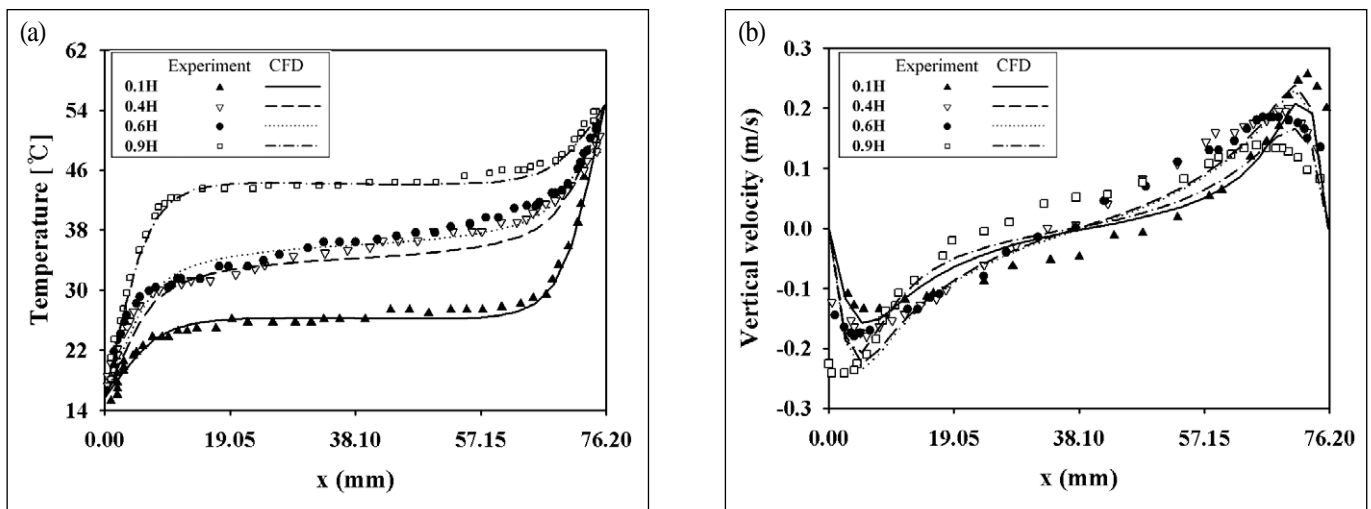


Fig. 7 Verification results of the analysis method: (a) temperature profiles, (b) velocity profiles

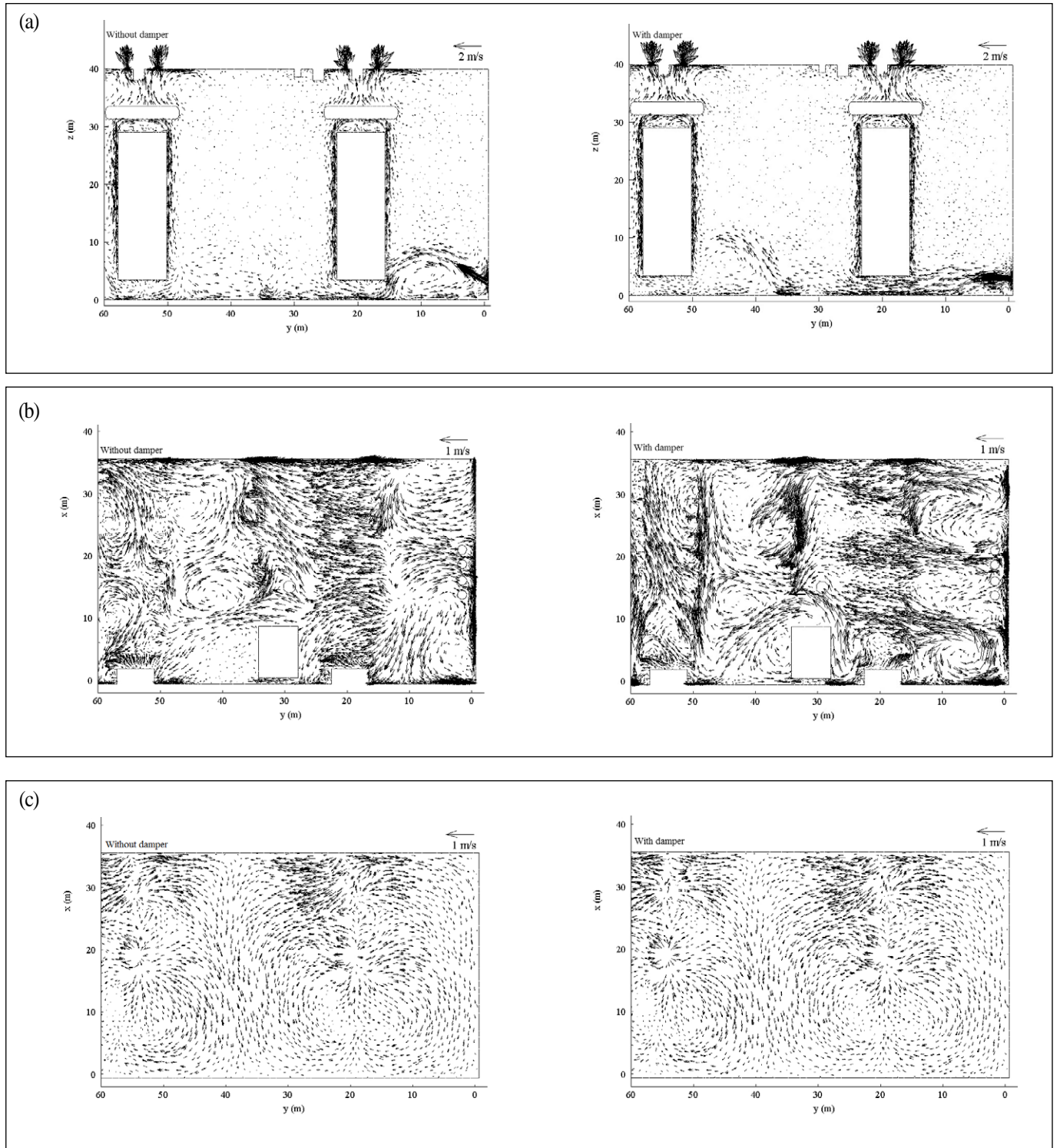


Fig. 8 Comparison of velocity distributions on the natural ventilation: (a) $x=19.4\text{m}$, (b) $z=1.8\text{m}$, (c) $z=38\text{m}$

근에서 유입된 외기가 상승하고 하강하는 특징을 보여준다. 유체에 미치는 관성력과 중력의 변화는 관성력과 중력의 비를 나타내는 Fr (Froude number)의 크기 변화를 통해 살펴볼 수 있으며, 식 (5)(Blay et al., 1992)를 통해 계산할 수 있다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\beta e_{in}(T_{w,avg} - T_{in})}} \quad (5)$$

Fig. 9는 내부의 Fr 수 분포를 나타낸 것이다. 관성력이 강한 하부루버 부근에서는 Fr 수가 2.5 이상을 보이며 유동이 상승

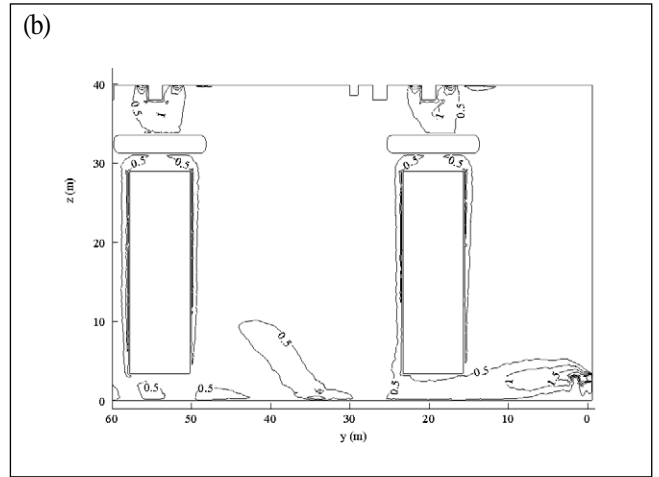
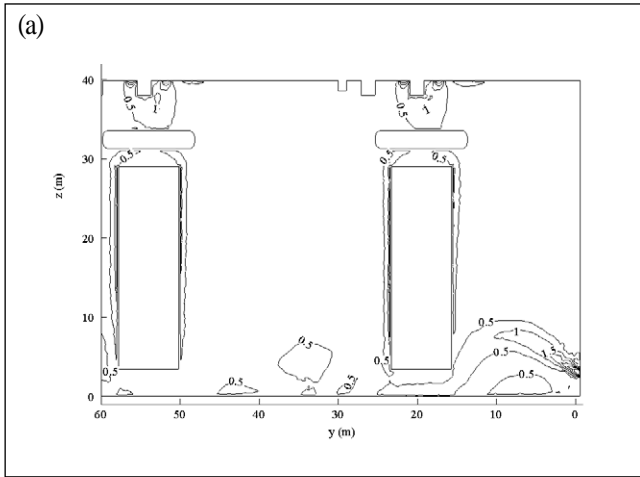


Fig. 9 Comparison of Froude number distributions on the natural ventilation: (a) without damper, (b) with damper

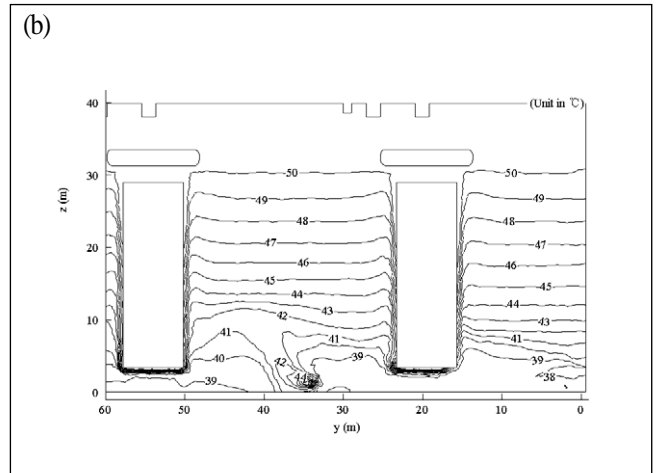
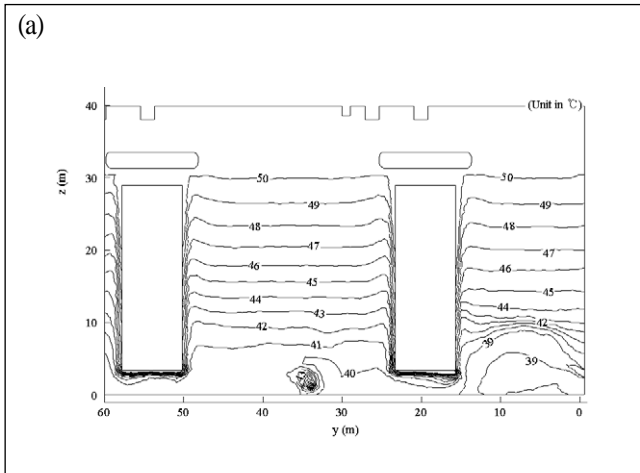


Fig. 10 Comparison of temperature distributions on the natural ventilation: (a) without damper, (b) with damper

하지만 점차 작아져서 하강하는 지점에서는 1 미만으로 바뀌고 있다. 이는 유입된 외기가 주변으로 확산되면서 관성력이 감소하고 주변 공기보다 밀도가 상대적으로 크기 때문에 중력의 영향이 커져 하강하게 된다. 반면, HRSG 부근에서는 Fr 수가 0.5 미만을 나타내며 관성력의 감소와 함께 밀도차에 기인한 부력의 영향이 크게 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 50°C 미만의 온도분포를 나타낸 것이다. $z=15\text{m}$ 미만의 하부영역은 저온공기의 혼합에 의해 41°C 미만의 불규칙적인 온도분포를 보인다. 상부로 갈수록 HRSG에서 멀리 떨어진 지역에서는 유동이 정체되어 성층화된 온도분포를 볼 수 있으며 루버 구조와 관계없이 모두 유사한 분포를 보여준다. 대략 $z=30\text{m}$ 이상의 상부지역에서 50°C 이상의 영역이 크게 나타나고 있다. 결과적으로 자연환기 방식에서 하부루버 구조의 차이는 하부지역의 유동분포를 변화시킬 수 있으나 두 경우 모두 설계요건을 충족시키지 못함을 볼 때,

HRSG 건물 내부의 환기에 기여하는 바가 작은 것으로 판단된다.

3. 강제환기 결과

강제환기의 경우에 루버를 통과하는 공기의 유속은 송풍기의 총유량에 따라 결정되므로 Table 1을 참고할 때 자연환기 방식에 비해 2.1배가량 크다. 그 결과 Fig. 11(a)에 나타낸 바와 같이 우측 하부루버를 통해 유입된 유체는 관성력이 매우 크고 주변으로 확산되는 운동량의 손실이 적어 HRSG 우측 벽면까지 상승하고 HRSG 측면에 부딪혀 수직하게 상승하던 공기는 HRSG로부터 멀리 떨어진 영역에서부터 주변 공기와의 밀도차에 기인한 중력의 영향 때문에 다시 하강하는 순환유동을 형성한다. 동시에 HRSG 측면에 부딪혀 하부로 하강한 공기는 HRSG 하부를 통과하여 건물 중심 쪽으로

흐른다. 여기서 HRSG 벽면부근의 유동은 Fig. 12에서 벽면부근의 Fr 수가 1 이상인 점을 볼 때 자연환기와는 달리 관성력의 영향이 지배적임을 알 수 있다. Fig. 11(b)에 나타난 하부지역의 유동은 우측 HRSG의 우측 영역을 둘러싼 하부루버들로부터 유입된 외기의 움직임으로 인해 유동분포가 크고 작은 와류와 순환류로 복잡하게 얽혀있는 반면 HRSG를 지나 중심 쪽으로 흐르는 유동은 상대적으로 단순한 형태를 보이고 있다. 그리고 Fig. 11(c)에서는 부력과 관성력에 의해 상승한 공기가 송풍기를 통해 외부로 배출되는 과정에서 유동면적이 감소하여 사방으로 분산되고 천정부근에서 선회하는 흐름을 형성하고 있다.

한편, 강제환기에 의한 건물 내부의 온도분포는 전 영역에 걸쳐서 48°C 미만을 나타냄에 따라 설계요건을 충분히 만족시키고 있음을 Fig. 13에서 볼 수 있다. 또한 강제유동에 의해 야기된 큰 관성력은 하부루버에서 유입된 공기가 상부까지 순환할 수 있는 충분한 운동량을 제공하여 원활한 순환과 함께 열원과 공기간의 열전달을 증가시켰다. 이는 Table 1에 나타난 건물 내부의 평균온도와 HRSG 벽면의 평균온도가 4°C 가량 낮고 HRSG 벽면의 열전달계수의 크기가 강제환기방식이 약 $1\text{ W/m}^2\text{C}$ 정도 큰 점을 통해 확인할 수 있다.

IV. 결 론

지금까지 HRSG 건물 내부의 온도유지를 위한 적절한 환기방식을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 이 과정에서 참고문헌의 자료를 바탕으로 해석방법에 대한 타당성을 확인하였다. 해석결과, HRSG 건물 내부의 온도가 설계요건을 충족하기 위해서는 공기 순환과 함께 열전달이 원활하게 이뤄져야하는데, 이를 위해서는 저온의 외기가 열원의 벽면에 도달할 수 있는 충분한 관성력이 필요하다.

자연환기방식의 경우, 루버를 통해 유입되는 공기량이 적어 외기가 HRSG 벽면에 직접 닿기에는 관성력이 부족하였다. 그리고 HRSG 벽면과 주변 공기간의 열전달, 내부의 공기 순환이 원활하지 못함에 따라 건물 내부에서 설계요건을 만족시키지 못하는 영역이 일부 존재하였다. 그러나 강제환기방식은 강제적으로 유입되는 유량을 통해 큰 관성력이 야기되어 저온의 외기가 HRSG 벽면에 직접 닿아 열전달과 공기 순환이 원활하게 이뤄져 설계요건을 충분히 만족시키는 것을 볼 수가 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 HRSG 건물에서는 열원과 환기구 간의 거리가 멀기 때문에 충분한 관성력을 갖도록 유량제어가 필요하며, 이를 위해서는 강제환기방식이 적절한 것으로 판단된다.

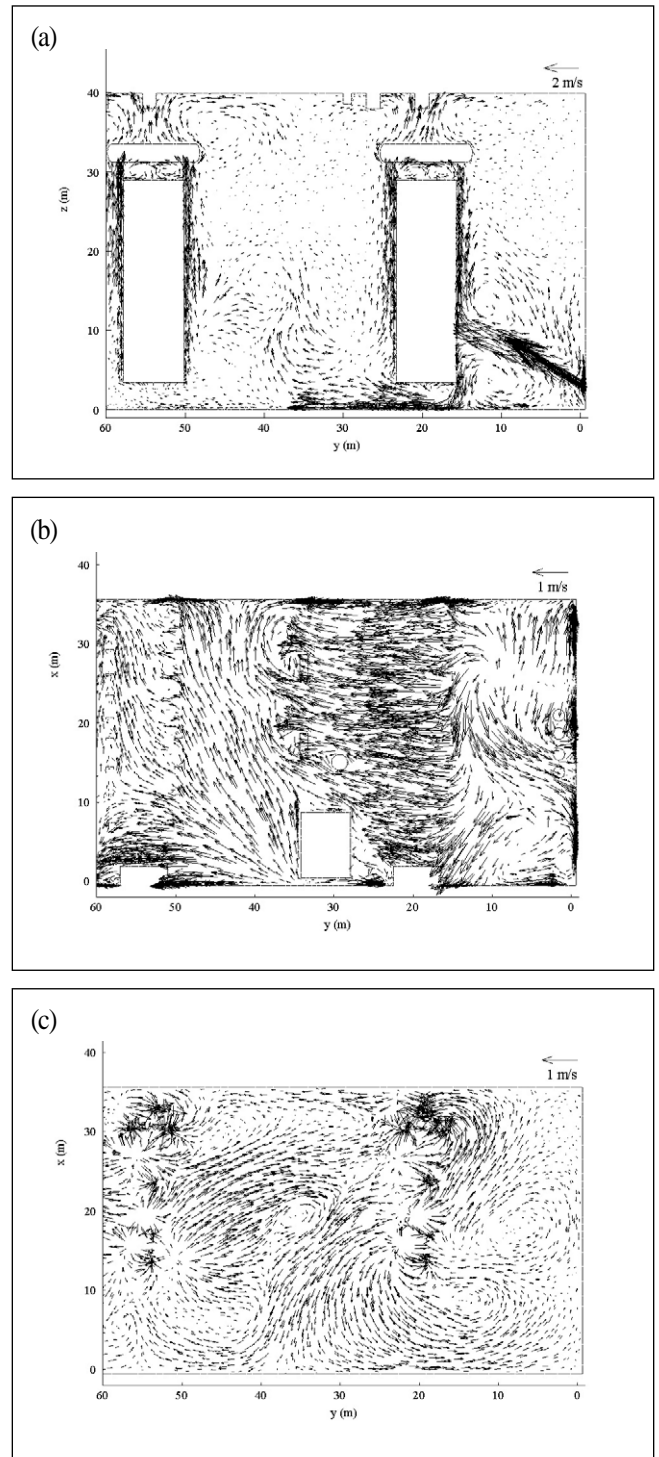


Fig. 11 Velocity distributions on the forced ventilation : (a)X=19.4m, (b)Z=1.8m, (c)Z=38m

V. 감사의 말씀

본 논문은 2009년 창원대학교 연구비에 의하여 수행되어 졌으며 이에 감사드립니다.

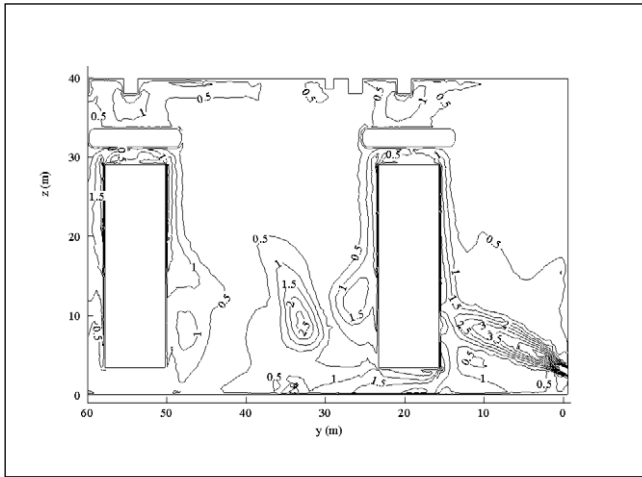


Fig. 12 Froude number distribution on the forced ventilation

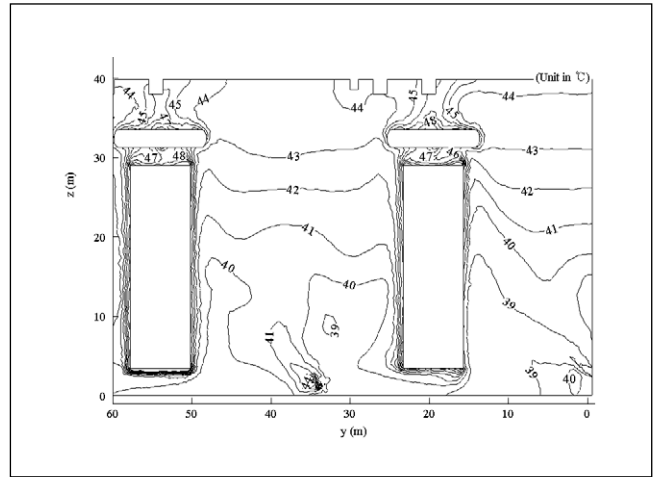


Fig. 13 Temperature distribution on the forced ventilation

REFERENCES

- 김철환; 유근중; 최훈기, 2005, 보일러빌딩 내부 환기현상에 관한 수치적 연구, 한국산업위생학회지, 15(3), 239-249
- B. E. Launder and D. B. Spalding, 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289
- D. Blay; S. Mergui; C. Niculae, 1992, Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet, ASME Fundamentals of Mixed Convection, 213, 65-72
- G. M. Stavrakakis; M. K. Koukou; M. Gr. Vrachopoulos; N. C. Markatos, Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation, 2008
- J. J. Costa; L. A. Oliveira; D. Blay, 1999, Test of several versions for k- ϵ type turbulence modeling of internal mixed convection flows, Int. J. Heat and Mass Transfer, 42, 4391-4409
- J. H. Kang; S. J. Lee, 2008, Improvement of natural ventilation in a large factory building using a louver ventilator, Building and Environment, 43, 2132-2141
- Q. Chen, 1995, Comparison of Different k- ϵ Models for Indoor Air Flow Computation, Numerical Heat Transfer, 28, 353-369
- Q. Chen, 1996, Prediction of Room Air Motion by Reynolds-Stress Models, Building and Environment, 31, 233-244
- Wei Zhang, Qingyn Chen, 2000, Large eddy simulation of airflow with a filtered dynamic subgrid scale model, Int. Heat Mass Transfer, 43, 3219-3231
- P. L. Betts; L. H. Bokhari, 2000, Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity, Heat and Fluid Flow, 21, 675-683
- T. Yilmaz; S. M. Fraser, 2007, Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating, Heat and Mass Transfer, 50, 2612-2623
- Fluent Inc. 2006 Fluent 6.3 User's guide,