

보일러빌딩에서 자연환기에 의한 냉각 효과의 수치적 연구

김철환, 유근중, 최훈기
국립창원대학교

Numerical Study of Cooling effect by Natural Ventilation on Boiler Building.

Kim Chul Hwan, Yoo Geun Jong, Choi Hoon Ki
Changwon National University

1. 서론

다수의 열원을 갖는 대형 작업장에서 최적의 작업환경을 유지하기 위하여 적절한 실내온도 유지가 필요하다. 밀폐된 작업장에서의 강제적인 환기시스템은 여름철 및 겨울철과 같이 외부의 온도와 많은 차가 있을 경우 실내온도 유지를 위하여 많은 시스템적 비용이 소요되므로 비효율적인 반면, 온도차에 의한 자연대류를 이용한 자연환기 방식은 열원과 공기와 의 원활한 에너지 전달을 통하여 작업장에서 실내온도를 적절히 유지하므로 비용 및 에너지소모 측면에서 효율적이다. 자연환기 방식은 내부의 구조물 및 내부의 열원 및 열적조건에 따라 환기량이 다르게 나타내며 또한 외부온도에 따라서도 변화하게 된다. 따라서 자연환기 방식을 채택한 경우 최적의 효과를 얻기 위해서는 환기구의 위치 및 크기, 그리고 외부온도 등과 같은 영향에 대하여 자연환기의 효과가 어떻게 변화하는지에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 다수의 열원을 갖는 보일러빌딩을 해석 대상으로 하고 있으며, 내부에는 주 열원인 화로와 다수의 기기들이 있으며 단열장치가 설치되어 있다 하더라도 통상 높은 온도를 유지하는 특징을 가지고 있는 대형 작업공간이다. 더욱이 빌딩내부의 배관시설 및 Duct들은 공간의 제한성으로 인해 매우 밀집되고 복잡하게 배치되어 있어 열원에서의 원활한 에너지 전달을 방해하므로 빌딩내부의 전체 평균온도를 상승시키고, 공기의 흐름이 정체되어 특정 영역에서 국지적으로 높은 온도를 유지하게 된다. 이러한 고온 환경은 작업환경을 악화시키고 특정기기들의 성능에도 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 실내온도 유지가 필요하며, 이를 위해서는 보일러빌딩과 같은 대형 작업장에서는 자연환기를 이용하여 적절한 실내온도를 유지할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 보일러빌딩에서 자연환기에 의해 이루어지는 냉각효과에 대해 보일러빌딩 내부의 온도장 및 유동장을 해석을 통하여 평가하였다.

2. 지배방정식

2-1. 난류모델

자연환기는 해석대상의 형상과 열적조건에 의해 유동장이 난류를 형성하게 되므로 정확한 해석을 위해서는 적절한 난류모델을 선택할 필요가 있다. 대류현상에 관련한 난류모델의 연구로 Q.Chen[1][2]과 N.Z.Ince와 B.E.Lauder[3]은 자연, 강제, 혼합대류에 대해 각종 $k-\epsilon$ 형태의 모델 및 Reynolds Stress 모델을 이용하여 적용성을 연구하였으며, D.Blair 등[4][5]은 Low Reynolds 모델에 대해 정확성을 연구하였다. 그리고 최근에는 Q.Chen[6], Q.Chen와 Y. Jiang[7]은 LES 모델이 자연대류 현상의 예측에 있어 그 성능이 가장 우수한 것으로 보고하였다. 고성능 컴퓨터의 등장으로 고밀도 격자가 가능해짐으로서 LES모델이 대류현상에 대한 예측 성능이 우수하지만, 벽면부분에 대해서 많은 격자를 요구하므로 형상이 간단하고

작은 해석대상에 대해서만 적용이 가능하며 또한 과도상태 계산을 수행함으로써 해석에 상당한 시간을 소요되는 단점을 안고 있다. 그러나 본 논문에서 선택한 표준형 k-ε 모델의 경우에는 벽면부분에 대해 Wall Function을 사용함으로써 성긴 격자에 대해서도 대체적으로 정확한 해석결과를 얻어낼 수 있으며, 정상상태 계산이 가능하고 계산되는 변수의 개수 또한 작아서 해석시 소요되는 시간이 짧아 다양한 사례에 대한 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 선행연구로 표준형 k-ε 모델에 대한 검증을 위해 보일러빌딩 내부의 유동 현상과 물리적으로 유사한 Blay 등[4]의 실험결과를 바탕으로 하여 수치해석결과를 비교하여 검증한 후, 보일러빌딩에 대한 환기해석을 수행하였다.

2-2. 지배방정식

(1) 지배방정식

해석대상인 보일러빌딩에서는 형상이 3차원 형상이고 내부 유동장이 높은 Reynolds 수를 보임으로서 3차원 난류유동을 형성하고 있으며 혼합대류에 의한 열전달을 수반한 형태이다. 이러한 특성을 반영한 유동장의 지배방정식은 다음과 같이 제시할 수 있다.

질량보존식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0$$

운동량보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_i u_j}) + \rho g \beta \Delta \theta$$

에너지보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \theta) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \theta) = -\frac{\partial j_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i \theta})$$

여기서 운동량 방정식의 부력항($\rho g \beta \Delta \theta$)에 대하여 계산상의 수렴성을 용이하게 하기 위한 방법으로 밀도의 변화를 온도에 대한 함수로 정의한 Boussinesq Approximation을 적용하여 나타낼 수 있으며, 부력항의 밀도변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = -\rho_0 \{1 - \beta(T - T_0)\}$$

(2) 수치해석 기법

제시된 유체 유동의 지배방정식은 압력장에 대하여 직접 풀어내는 방식이 아니라 질량보존식과 운동량보존식의 연계관계를 이용하여 각 지배방정식이 모두 만족할 때까지 보정작업을 반복하여 해를 구하는 방법인 SIMPLE 기법을 이용하여 해석하였으며, 각 지배방정식의 대류항과 확산항은 Upwind Scheme을 기본으로 한 Hybrid 기법을 채택하였다.

3. 해석결과

3-1. 난류모델 검증

표준형 k-ε 모델의 신뢰성 검증을 위하여 Blay 등[4]의 실험결과와 수치해석결과를 비교하였으며 검증에 사용된 형상은 Fig.1과 같다. 해석에 사용한 격자의 수는 61×61×56으로 3

차원 해석을 하였으며, 경계조건은 Blay 등[4]의 논문의 실험결과에서 얻어진 값과 동일하게 하였다.

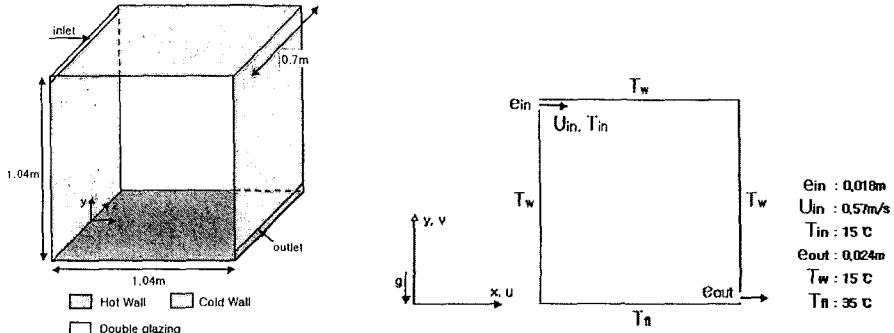


Fig.1 Blay 등[4]의 실험형상 및 경계조건

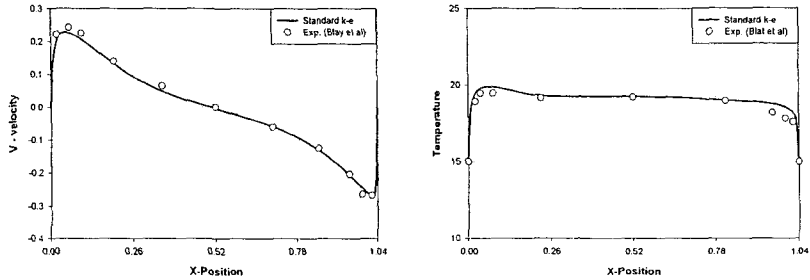


Fig.2a $y/L=0.5$ 에서의 속도 및 온도분포

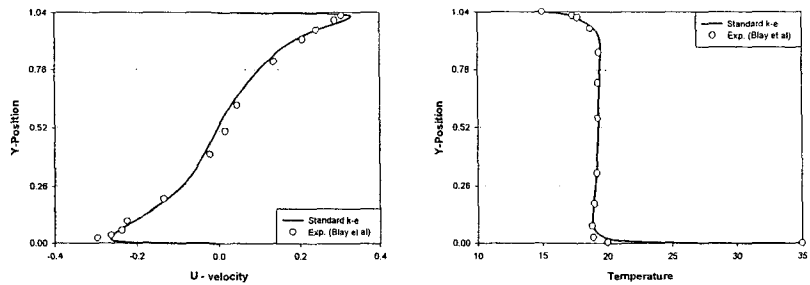


Fig.2b $x/L=0.5$ 에서의 속도 및 온도분포

Fig.2에 나타난 해석결과는 부력항의 영향이 큰 부분에서 미소한 차이를 보이고 있으나, 온도 및 속도분포 모두 실험결과와 전체적인 경향 및 크기가 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 실내 환기해석에 적용한 해석에 대하여 신뢰성을 확인할 수 있다.

3-2. 해석대상

해석대상인 보일러빌딩의 형상은 발전 시스템의 대부분을 빌딩내부에 수용한 형태로 Fig.3과 같이 내부 구조물이 밀집되고 복잡한 구조를 나타내고 있는 것으로 가상하였다. 그리고 빌딩내부에서는 Fan Duct를 통하여 내부의 공기를 강제 흡입하여 외부로 토출하는 장

제적인 환기시스템이 있으며, Fig.4와 같이 빌딩외벽의 하부에 5개의 하부루바와 상부에 2개의 상부루바, 그리고 최상부에 모니터루프가 있는 것으로 하였다. 해석에 사용한 보일러빌딩의 형상에서 전체 유동장 크기에 비해 상대적으로 매우 작아 유동장에 미치는 영향이 미미하다고 판단되는 구조물은 해석영역에서 생략하였으며, 유동장 형성에 큰 장애가 생길 것으로 판단되는 부분은 최대한 반영하였다. 해석에 사용된 격자는 빌딩내부 구조의 복잡함 때문에 격자작업이 수월한 삼각격자를 이용하여 대략 128만여 개의 격자계를 구성하였으며, 해석시 적용한 루바 및 벽면에 대한 경계조건은 Table.1과 같다.

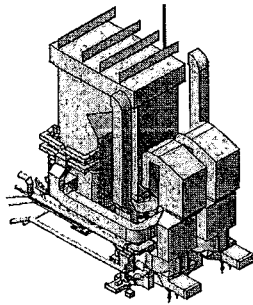


Fig.3 보일러빌딩 내부구조

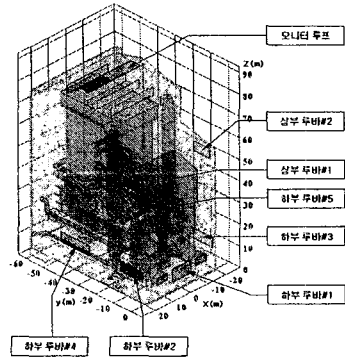


Fig.4 보일러빌딩 환기구(루바) 위치

Table.1 해석에 사용된 경계조건

영역	경계조건	비고
하부루바(#1~5)	압력경계조건	외기온도 : 32.4℃
상부루바(#1~2)		
모니터루프		
Fan Duct	속도 조건	송풍기 유량 : 498kg/s
빌딩 내부기기	No-Slip 등온 조건	내부기기 벽면온도 : 60℃
빌딩 외부벽면	No-Slip 단열조건	

3-3. 해석결과

보일러빌딩 내부의 전체적인 유동형태는 상부 및 하부루바를 통하여 외부로부터 공기의 유입이 이루어지고 있으며, 빌딩 내부에서 내부의 고온 기기들을 우회하여 모니터 루프 및 Fan Duct를 통하여 유출되는 개략적인 특성을 볼 수 있다. Fig.5b와 Fig.6b에 나타나는 속도분포에서는 전체 유동장에서 수직방향의 유동장의 크기가 강하게 나타나고 있으며, 특히 표면적이 넓은 보일러 부분에서 더욱 강하게 나타나고 있다. 한편 보일러빌딩 하부에는 대형관 및 평판과 같은 수직방향 유동을 방해하는 요소들로 인해 유속이 작게 나타나는 모습을 보인다. Fig.5a와 Fig.6a의 온도분포에서는 빌딩 내부의 전체적인 온도분포가 40℃이하로 나타나고 있으나, 일부 국지적으로 협소한 공간에서 40℃이상의 고온을 형성함을 알 수 있다. 이렇게 국지적으로 고온을 형성하는 부분은 배관계와 Duct들로 인해 협소한 공간을 형성함으로써 다소 공기의 유동이 원활하지 못하기 때문이다. 그러나 빌딩내부의 전체 평균온도는 35℃미만을 보여, 외기온도가 32.4℃인 것을 감안한다면 내부의 공기유동이 자연환기에

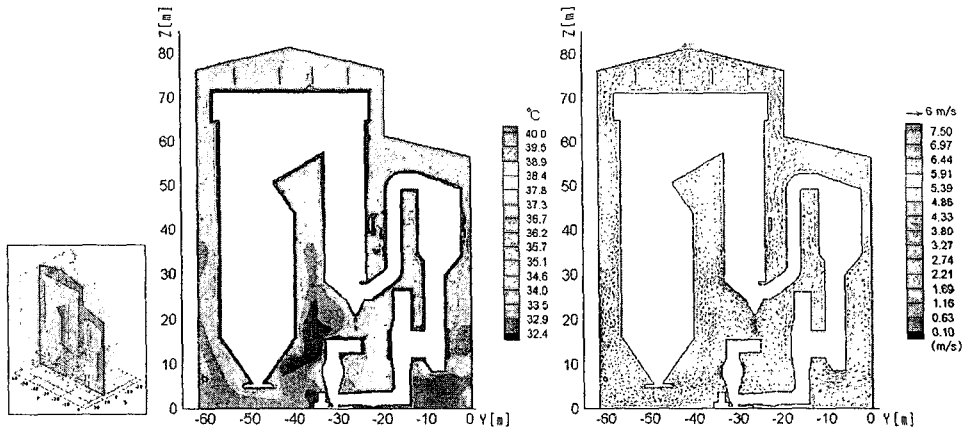


Fig.5a x=5.8m지점에서의 온도분포 Fig.5b x=5.8m지점에서의 속도분포

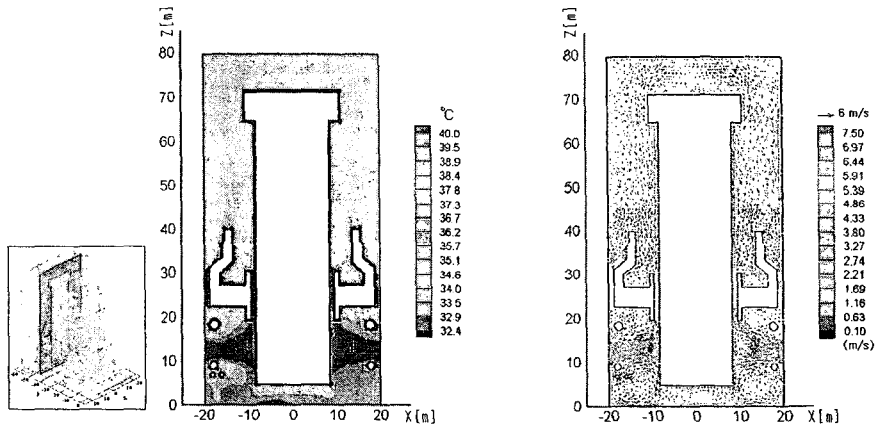


Fig.6a y=-47.3m지점에서의 온도분포 Fig.6b y=-47.3m지점에서의 속도분포

Table.2 각 루바에서의 유량 및 유속

구분		유량 (m ³ /s)	유속 (m/s)
Fan Duct		-431.39	-14.55
모니터루프		-285	-1.59
상부루바	#1	1.39	0.03
	#2	3.61	0.09
하부루바	#1	127.22	1.96
	#2	126.67	2.16
	#3	125.28	2.14
	#4	168.33	2.25
	#5	163.89	2.19

※음수는 유출유량을 의미함

의해 원활히 진행되고 있다고 판단할 수 있다. Table.2는 각 루바에서의 공기의 유출·입량을 나타낸 것으로, 자연 환기에 의해 이루어지는 환기를 위한 흡기량은 하부루바에서 빌딩 내부로 유입되는 공기량에 전체 공기량의 99%정도를 담당하고 있으며 유속은 2.1m/s 크기를 보이고 있다. 유입된 공기는 상부의 모니터루프와 강제적으로 흡입이 이루어지는 Fan Duct를 통하여 배출되는데, 모니터루프를 통하여 배출되는 공기의 유출량이 전체 공기유출량의 대략 40%를 차지하고 있다.

이상의 결과는 복잡한 내부구조와 다양한 열적 조건을 갖는 보일러빌딩에서 자연대류에 의해 이루어지는 환기현상이 원활히 진행됨을 나타내는 것으로, 고온의 기기표면과 저온의 공기사이에 원활한 에너지 전달에 의해 빌딩내부의 온도를 적절히 유지할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

다수의 열원을 포함하는 대형 작업장에서 작업환경을 유지하기 위하여 자연환기를 적용한 보일러빌딩에서의 자연환기에 의한 빌딩내부의 냉각효과에 대한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 보일러빌딩 내부가 3차원 형상이고 유동장이 높은 Reynolds 수를 보임으로써 3차원 난류유동을 해석하기 위하여 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택하였으며, Blay 등[4]의 실험결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

(2) 외기온도는 여름철 온도 32.4℃를 기준하였으며, 빌딩내부의 열원에 대해서는 단열이 잘되어 있는 것으로 가정하여 60℃의 온도조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

(3) 자연환기에 의해 이루어지는 환기량은 전체 환기량의 40%를 차지하고 하부루바를 통하여 99%정도의 외부공기 유입이 발생하였으며, 평균온도가 35℃를 나타내 보일러빌딩 내부에서 자연환기에 의한 냉각에 의한 온도유지의 효용성이 높음을 알 수 있었다.

6. 후기

본 논문은 2004년도 창원대학교 연구비의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- [1] Q.Chen, Prediction of Room Air Motion by Reynolds-Stress Models, Building and Environment, Vol.31, pp.233-244, 1996
- [2] Q.Chen, Comparison of Different $k-\epsilon$ Models for Indoor Air Flow Computations, Numerical Heat Transfer, partB, 28, pp.353-369, 1995
- [3] N.Z.Ince; B.E. Launder, Three-dimensional and heat-loss effects on turbulent flow in a nominally two-dimensional cavity, Int. J. Heat and Fluid Flow, 16, pp.171-177, 1995
- [4] D.Blai; S.Mergui; C. Niculae, Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet, ASME Fundamentals of Mixed Convection, 213, pp.65-72, 1992
- [5] J.J. Costa; L.A. Oliveira; D.Blai, Test of several versions for $k-\epsilon$ type turbulence modeling of internal mixed convection flows, Int.J. Heat and Mass Transfer, 42, pp.4391-4409, 1999
- [6] Wei Zhang; Qingyn Chen, Large eddy simulation of airflow with a filtered dynamic subgrid scale model, Int. Heat and Mass Transfer, 43, pp.3219-3231, 2000
- [7] Yi Jiang; Qingyan Chen, Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings, Int.J. Heat and Mass Transfer, 46, pp.973-988, 2003