한국에너지공학회 (2002년도)
춘계 학술발표회 논문집 P245-250

에너지환경 플랜트에서의 유량 분배 해석

김종현, 이진욱, 심성훈*, 김석준*
에이티이에스(주), 한국기계연구원*

Flow Distribution Analyses for the Energy and Environmental Plant

J.H. Kim, J.W.Lee, S.H. Shim*, S.J. Kim*
ATES Ltd., Korea Institute of Machinery and Materials*

1. 서론

보일러의 압입송풍기 토출구로부터 나온 연소용 공기를 버너가 있는 장소로 이동시키기 위해 설치하는 풍도(air duct)는 보다 원활한 연소용 공기의 공급과 효율적인 운송을 통하여 연소로에서 배출되는 연소 배출물인 SOx, NOx 등이 최소가 될 수 있도록 연소운전조건을 개선하여 연소로 내부에서의 화염을 안정화시킴으로 고효율 보일러의 운전환경을 제공할 수 있기 때문에 설계 단계에서 충분한 연구가 필요하다고 보여진다. 일반적으로 풍도(air duct)는 보일러의 연소로를 중심으로 각 플랜트마다 장치의 배치관계로 곡관이나 축소/확대관이 필요하기 때문에 공동공기실(common air chamber)로부터 3부분으로 균등한 분배가 가능하도록 적절한 배플(baffle)과 안내깃(guide vane) 등의 보조장치를 설치하여야 한다. 이러한 관의 형상이나 보조 장치 등을 설계하기 위해서는 실험이나 수치해석이 선행되는 것이 일반적으로써, 본 연구에서는 상용 CFD 코드인 FLUENT를 이용하여 연소용 공기의 균등 분배가 이루어질 수 있도록 배플과 안내깃이 있는 풍도에 대한 해석을 통하여 현장의 설계단계에서 도움이 되도록 하였다.

또한 전산유체역학 해석 기술을 생활폐기물 열분해용융 시스템의 2차 연소실의 Air Jacket에 적용하여 유량을 균일하게 공급할 수 있는 설계안을 도출하기 위한 방안으로서 Air Jacket의 중앙 후면에서 공기를 공급하는 방법과 중앙 하단에서 공기를 공급하는 방안에 대한 해석을 수행하였다.

2. 수학적 모델링

본 연구에 적용된 덕트내에서의 유동 및 열분해용융 시스템 Air Jacket 내부의 유동 특성을 고려하여 3차원 비압축성 난류유동으로 가정하였으며, 질량 및 운동량의 보존 법칙을 적용함하여 정상상태에 대한 속도, 압력의 물리량들을 해석하였다. 비선형 편미분 형태로 표현되는 유동을 지배하는 보존 방정식은 다음과 같다.

1) 질량보존 : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m$ (1)

2) 운동량 보존 : $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho g_i+F_i$ (2)

3) 스칼라 보존 : $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\phi)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right)+S_\phi$ (3)

3. 결과 및 고찰

압입송풍기로부터 유입된 연소용공기가 공동공기실에서 각 분기 덕트로 균등하게 분배될 수 있도록 안내깃 및 'T'자형 배플에 대한 연구를 수행하였다. 그림 1, 2는 계산 대상인 풍도의 형상 및 격자계로서, 분기 덕트 아래쪽에 위치하고 있는 압입송풍기로부터 연소용 공기를 공동공기실로 공급하기 위해서 90도로 꺾이는 곡관을 사용하고 있으며, 그리고 배플의 위치는 case study를 통하여 확대관으로부터 유입된 유동을 양쪽 덕트로 유도하는데 효과적이며, 중앙 덕트에서 배플 뒤에 발생하는 Vortex로 인한 영향이 작은 공동공기실의 중앙 하단에 설치하는 것으로 하였다. 배플의 위쪽 '—'의 폭이 중앙에 위치한 덕트의 입구폭을 기준으로 15%인 경우를 Case 1로, 다음은 25%인 경우를 Case 2로, 그리고 마지막으로 34%에 해당하는 경우를 Case 3으로 설정하고 case study를 수행하였다. 배플의 아래 'I'의 길이는 어느 정도 양쪽으로 유동을 유도하여야 하므로 공동공기실의 세로길이의 1/3에 해당하는 길이로 하였다.

표 1에서는 각 Case의 계산 결과로부터 각 분기 덕트의 출구 유량을 비교하여 보여 주고 있다. 100% Load의 운전 조건하에서 이론적으로 각 분기 덕트로 균등하게 분배되는 유량은 45501 Nm^3/hr로, Case 3으로 갈수록 각 덕트로 분배되는 유량이 동일해 짐을 알 수 있다.

표 1 각 분기 덕트 출구에서의 유량

Case	좌측 덕트 유량 Nm^3/hr	중앙 덕트 유량 Nm^3/hr	우측 덕트 유량 Nm^3/hr	중앙유량-우측유량 Nm^3/hr
Case 1	44989	46524	44989	1535
Case 2	45233	45996	45233	763
Case 3	45501	45501	45501	-

그림 3은 Case 3에 대한 공동공기실을 중심으로 한 속도벡터를 보여 주고 있다. 공동공기실 중앙으로 유입되는 유동을 배플이 좌·우측으로 흐르도록 유도하고 있으며, 다시 양쪽으로 분배된 유량이 중앙 덕트 유입면의 가장자리를 기준으로 측면 덕트와 중앙 덕트로 흘러들어가 전체적으로 각 덕트에서 유량의 균등 분배가 이루어지도록 하고 있다. 또한 공동공기실의 안내깃이 설치된 부분을 중심으로 아래쪽에 커다란 재순환영역이 발생하여 유동이 상부쪽으로 편중되어 양쪽 분기 덕트로 유입되고 있다. 그림 4는 전체 풍도 내의 유동의 흐름을 보여주는 3차원 유선(path-line)으로, 위에서 언급한 유동특성들을 잘 보여 주고 있다.

또한 3부분으로 분기된 덕트 중앙 단면에서의 압력 분포를 보여주고 있는 그림 5로부터 전체 압력 강하의 대부분이 벤츄리관에서 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, 그림 6은 공동공기실 중앙에서의 압력 분포로서, 연소용 공기의 분배가 이루어지는 배플과 중앙 덕트의 가장자리에서 높은 압력 분포를 보여 주고 있다. 표 2에서는 입구를 포함한 벤츄리관을 중심으로 하여 세 부분에서의 압력 값들을 보여 주고 있다. Up-Stream Pressure와 Throat Pressure 사이의 압력 강하 ΔP는 약 111.7mmH_2O정도로 벤츄리관의 설계시 사용된 100 mmH_2O보다 11.7 mmH_2O정도의 차이를 보이고 있지만 일반적으로 공기의 밀도변화에 따라

3~5%정도 ΔP의 변화가 생긴다는 것을 고려한다면 비교적 신뢰할 수 있는 값을 얻었다고 보여진다. Outlet Pressure와 Throat Pressure사이의 압력 상승은 약 76mmH_2O정도로, 벤츄리관 전체에 발생하는 압력 강하 ΔP는 약 35.7mmH_2O정도가 됨을 계산결과로부터 확인하였다. 그리고 계산 영역인 압입송풍기 토출구로부터 윈드박스 전단의 출구까지의 전체 압력 강하 ΔP는 55.3mmH_2O정도로, 전체 압력 강하의 64% 정도가 벤츄리관에서 발생하고 있다.

표 2. 계산영역 내 각 위치에서의 압력값 (100% Load 운전조건)

위 치	압 력 (mmH_2O)
Inlet Pressure(입구)	614.6
Up-Stream Pressure(벤츄리관 전단)	595.0
Throat Pressure(벤츄리관의 좁은 부분)	483.3
Outlet Pressure(출구)	559.3
ΔP (F.D Fan출구에서 Wind Box입구까지)	55.3

다음은 상기와 같은 전산유체역학 해석 기술을 연소실 공기 공급부(Air Jacket)에 적용한 결과를 보고하고자 한다. 해석 대상의 연소실은 생활폐기물 열분해용융 시스템의 2차 연소실의 Air Jacket으로서, 연소실의 전후면에 각각 57개씩의 노즐을 설치할 예정이다. 좌우 대칭인 점을 고려하면 1/2영역에서는 27개의 노즐 및 1/2이 포함되는 노즐 3개를 합하여 총 30개의 노즐이 설치된다. 그림 7은 Air Jacket과 노즐을 포함한 형상으로서 좌우대칭인 점을 고려하여 1/2영역에 대한 격자를 보여주고 있다. 실제 플랜트의 운전시에는 각 노즐로 공기가 균일하게 공급되는 것이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 유량을 균일하게 공급할 수 있는 설계안을 도출하기 위한 방안으로서 Air Jacket의 중앙 후면에서 공기를 공급하는 방법과 중앙 하단에서 공기를 공급하는 방안에 대한 해석을 수행하였다.

그림 8은 공기공급부 내부에서의 유체의 진행경로를 나타내고 있다. 뒷면 중앙에서 공급되는 경우 공기는 일단 전면으로 진행한 후 수평방향으로 비교적 균일하게 퍼지는 경향을 보여주고 있다. 이에 반해 중앙 하단에서 공급되는 경우는 Air Jacket으로 공급된 공기가 일단 상부로 진행한 후 다시 상부에서 수평방향으로 진행하고 다시 벽에 부딪히면서 방향을 바꾸는 경향으로 진행하게 되어 상당히 큰 와류를 형성하고 있다. 이와 같이 와류 영역이 클 경우에는 와류 유동의 시간에 따른 크기 변화가 발생할 가능성이 있으므로 바람직하지 않은 유동 패턴이라고 판단된다.

그림 9에는 Air Jacket 각 노즐에서의 유량 분배에 대한 결과를 평균 유량에 대한 편차(%)로 나타내었다. 노즐 번호는 1~10번이 상단, 11~20번이 중단 그리고 21~30번이 상단을 나타내며 측벽 근처에서 1, 11, 21번이며, 중앙쪽이 10, 20, 30번으로 표기하였다. 중앙 후면에서 공급되는 경우, Air Jacket으로 유입된 공기가 바로 벽에 부딪히는 중앙 노즐에 비하여 서서히 퍼져서 공급되는 우측 벽면(대칭을 고려할 때 좌우 벽면) 근처의 노즐에 약간 많이 공급되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 모든 노즐에서 평균값에서 벗어나는 정도는 ±2% 이내로서 상당히 균일하게 공급됨을 알 수 있었다. 중앙 하단에서 공급되는 경우에는 중앙과 벽 근처의 노즐로 약간 많이 공급되는 경향을 보여주고 있다. 특히 하단에서 공급되어 상단 벽과 부딪히며 방향을 바꾸는 중앙 상단의 노즐에서 편차가 비교적 심하게 나타나고 있으며 전반적으로 유량 편차가 중앙 후면에서 공급되는 경우에 비하여 약간 큰 경향을 보여주고 있다. 이와 같이 중앙 하단에서 공급되는 경우에는 플랜트의 설치 공간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 그림 8에서 관찰한 바와 같이 와류 영역이 크고, 또한 유량 분배

도 후면 중앙 공급에 비하여 좋지 않은 것으로 나타났기에 실제 플랜트 설치 시에는 후면 중앙에서 공급하는 방향이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학 해석 기술을 에너지플랜트 배관 설계 및 환경플랜트 Air Jacket에 적용하였다

전산유체역학 해석 기술을 에너지플랜트의 배관 설계에 적용한 결과로서 덕트의 방향이 급격히 변화하는 영역에서 안내깃 설치에 대한 기본설계를 수행할 수 있었다. 또한 공기 분배부에서 적절한 크기의 'T'자형 배플을 설치함으로써 3개의 덕트로 균일한 유량이 분배됨을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로부터 수치적인 오차나 다른 요소들을 고려하더라도 실제 시스템에서는 윈드박스가 포함되어야 하므로, 본 연구의 계산 결과 및 이에 기초한 설계는 실제 시스템에서 균일한 유량 분배를 위한 설계에 충분히 적용될 수 있는 정확도의 결과라고 판단된다. 또한 풍도 내에서 발생하는 압력 강하 ΔP는 공기의 밀도변화에 따라 3~5%정도의 변화가 생긴다는 것을 고려한다면 해석을 통하여 얻어진 압력값들은 송풍기의 용량을 결정하는 주요한 인자를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

유량 분배 해석 기술을 다수개의 노즐을 포함하는 Air Jacket에 적용한 결과로서, 중앙 후면에서 공기를 공급하는 방안이 중앙 하단에서 공급하는 경우에 비하여 유동 패턴에서나 유량의 균일 분배 특성에서나 우수한 것으로 나타났으며 이를 기본설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

상기 해석 결과 중 에너지 플랜트 배관 해석 결과는 이미 기본설계에 반영되었으며 환경플랜트 해석 결과는 현재 진행중인 기본설계에 반영될 예정이다. 또한 이러한 유동해석 기술은 최근의 전산유체역학 기술의 발달 추세로 볼 때, 해석의 결과와 실제 현상과의 오차가 비교적 적은 분야에 속하므로 향후 유사 분야의 기본설계에 많이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

1. S.V. Patankar:"Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemispher Publishing(1980)
2. K.A. Hoffmann:"Computational Fluid Dynamics for Engineers", Engineering Education System(1993)
3. Fluent 5 User's Manual, Fluent Inc., 2000
4. Milligan Jr, M. W. Proceedings of the 1987 International Conference on Fluidized Bed Combustion v.2, 873-879(1987)
5. 전상언, 오세종:"풍동 실험시 발생하는 벽면효과(Wall effect)의 해석연구", 한국항공우주학회 1994년도 추계 학술강연회 논문집. 227-230(1994. 11)

Acknowledgement

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술 개발사업 과제인 '생활폐기물 열분해용융 시스템 개발' 과제의 일부 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

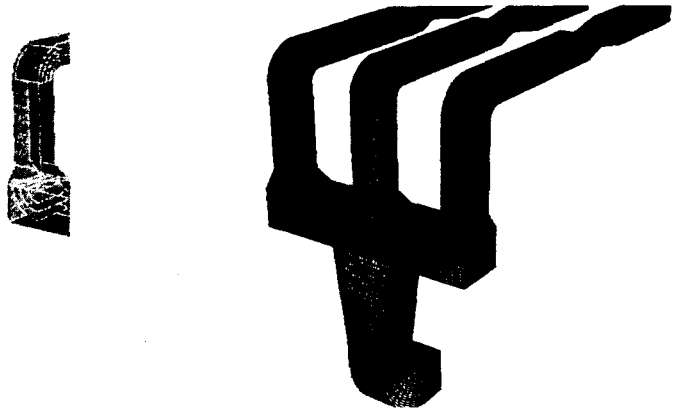
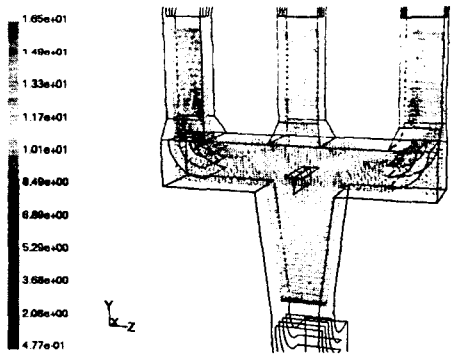
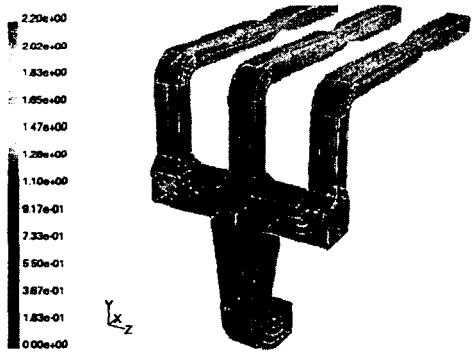
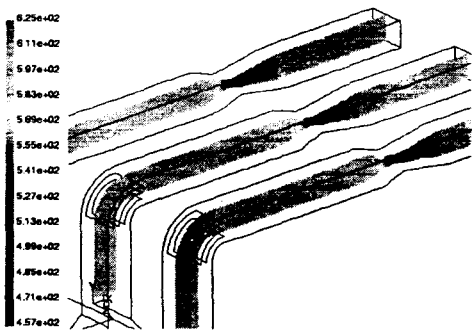
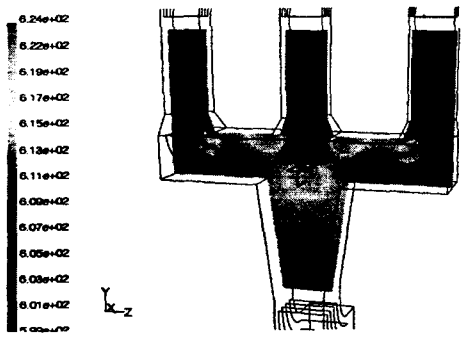


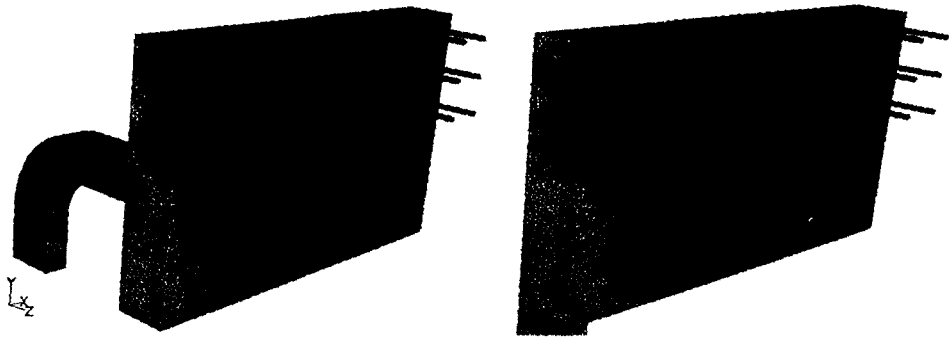
그림 1


1.65e+01
1.49e+01
1.33e+01
1.17e+01
1.01e+01
8.49e+00
6.89e+00
5.29e+00
3.68e+00
2.08e+00
4.77e-01


2.20e+00
2.02e+00
1.83e+00
1.65e+00
1.47e+00
1.28e+00
1.10e+00
9.17e-01
7.33e-01
5.50e-01
3.67e-01
1.83e-01
0.00e+00

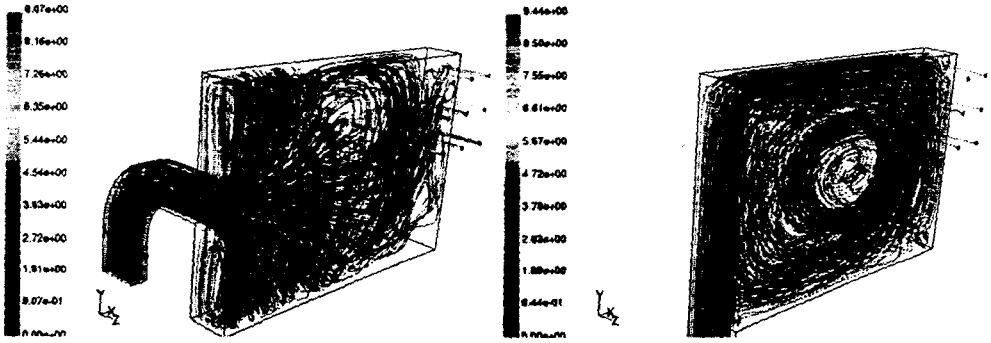

6.25e+02
6.11e+02
5.97e+02
5.83e+02
5.69e+02
5.55e+02
5.41e+02
5.27e+02
5.13e+02
4.99e+02
4.85e+02
4.71e+02
4.57e+02


6.24e+02
6.22e+02
6.19e+02
6.17e+02
6.15e+02
6.13e+02
6.11e+02
6.09e+02
6.07e+02
6.05e+02
6.03e+02
6.01e+02



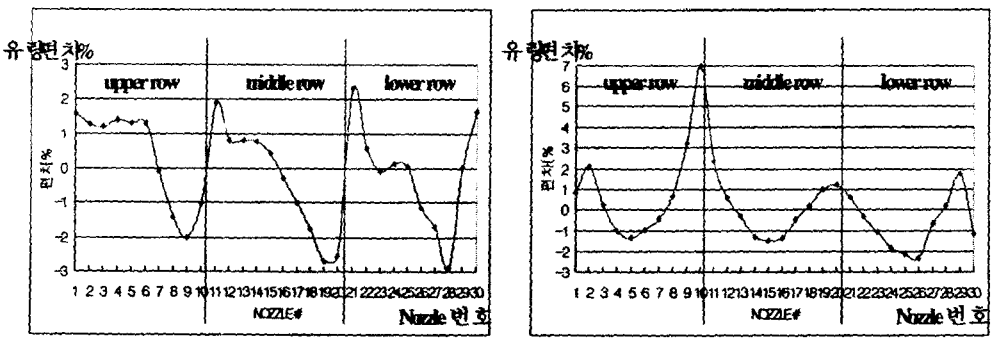
(a) (b)

그림 7. 입구의 위치에 따른 연소실 Air Jacket 및 노즐 격자의 형상(1/2 영역)
(a) 후면 중앙 공급, (b) 중앙 하단 공급



(a) (b)

그림 8. 연소실 Air Jacket 내부에서의 공기의 진행 경로(pathline)
(a) 후면 중앙 공급, (b) 중앙 하단 공급



(a) (b)

그림 9. 연소실 각 노즐에서의 유량 분배 편차
(a) 후면 중앙 공급, (b) 중앙 하단 공급