

미분탄 연소로내 난류 반응유동장의 수치해석적 연구

나혜령, 이진욱, 윤용승
고등기술연구원 에너지/환경연구소

Numerical Analysis of Turbulent Reacting Flow in the Pulverized Coal Combustor

Hye Ryung Na, Jin Wook Lee, Yongseung Yun
Institute for Advanced Engineering, Energy and Environment Research Lab.

1. 서론

미분탄 연소로는 산업현장, 특히 화력발전플랜트에서 널리 사용되는 설비로서 국내외의 많은 현장에서 적용되고 있다. 이에 따라 연소로내의 난류유동장과 연소현상 등에 대한 이해 및 이를 설계에 응용하고자 하는 노력들이 진행되고 있다. 특히 연소로내의 복사열전달 특성의 이해를 통한 연소로 크기 결정 및 수순환 해석, 화로출구온도 계산에 의한 대류전열부 설계 등에 응용하고자 시도하고 있다. 그러나 미분탄연소로내에서는 난류유동장, 대류 및 복사열전달, 기체-고체 이상유동장하에서의 반응 등의 복잡한 현상이 존재하는 특성상 이에 대한 상세한 이해를 통하여 설계에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 이러한 특성으로 인하여 국내의 미분탄연소로 제작업체의 외국기술 의존도가 비교적 높은 것으로 알려져 있다.

미분탄연소로는 연료탄의 성상 및 설계 또는 운전조건에 따라 화염의 안정성, 열효율, 오염물질의 배출을 등이 매우 민감하게 변하는 특성을 지니고 있다. 따라서 연소로내 제반현상에 대한 이해를 통하여 효율 증대 및 환경오염 물질 배출규제치를 만족시키기 위해서는 효과적인 운전 및 설계 조건 제시를 위해 여러 가지 조건변수에 따른 데이터의 축적이 필수적이다. 그러나 로내에 유입된 미분탄의 난류혼합 및 연소반응에 따른 복잡한 시스템내 현상이 명확히 규명되지 않았으므로 최적의 미분탄 연소로 설계를 위해서는 로내 물리적/화학적 현상의 충분한 이해가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 적절한 모델 선정을 통해 연소로내 석탄의 연소반응을 전산해석하여 난류반응유동장 특성을 이해하고자 시도하였다. 또한 로내 중심부에 형성되는 유동형상이 입자의 연소 및 로벽에 어떤 영향을 줄 수 있는지도 검토하여 보았다.

2. 수학적 모델 및 해법

미분탄 연소로 내부의 기상지배방정식을 3차원 직각좌표계상에서 나타내면

다음과 같다.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{v}\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{w}\phi)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial z}) = S_{\phi}$$

위식에서 ϕ 는 해석하고자하는 일반 종속변수이며, u, v, w 는 x, y, z 방향의 각각의 속도성분, ρ 는 기체의 밀도, Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 종속변수에 대한 확산계수와 생성항을 각각 나타낸다. 그리고 입자의 휘발, 반응, 속도변화 등에 따른 기상의 질량, 엔탈피, 운동량의 변화량 등은 생성항에 포함되어 고려된다. 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을, 복사모델은 P-1 모델을 사용하였으며 가스상 난류반응은 혼합분율 및 확률밀도함수를 이용한 보존 스칼라모델을 사용하여 계산하였다. 연소가스의 국부적 조성은 주어진 제어체적(control volume)내에서 'Gibbs energy minimization' 방법에 의하여 계산되도록 하였다. 미분탄입자의 반응은 입자에 포함된 휘발분이 배출되는 탈휘발화 반응, 그리고 고정탄소분이 가스상 물질과 표면에서 반응하는 확의 산화반응으로 나누어 고려하였다.

수치해석 대상 미분탄연소로는 $5.4 \times 1.9 \times 1.9(\text{m}^3)$ 의 크기로서 총 44,528개의 제어체적을 구성하여 FLUENT 프로그램으로 계산을 수행하였으며, HP9000/770 워크스테이션을 사용하였다. 이 연소로는 약 10t/hr의 스팀을 생산하는 접선분사형(tangentially-fired type) 실험용 연소로[1]로서 4군데의 측벽으로부터 40°의 각도로 공기와 미분탄입자가 공급되며, 사이클론 연소기에 비하면 상당히 약한 선회(swirl)를 수반하는 연소로이다. 일반적인 연소로의 벽면이 수관벽으로 구성된 점을 고려하여 벽면에는 일정온도 경계조건을 부여하였고, 입구에서의 과잉공기량이 30%되게 미분탄과 공기가 분사되는 것으로 입구조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 연소로내 비반응 난류유동장에서의 각각의 단면에 대한 속도벡터장을 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 (x-y)단면의 속도벡터로서 입구 근처와 'nose' 상부에 작은 재순환영역을 보여주고 있다. 'nose' 상부의 이러한 재순환 영역은 열전달 특성을 저하시키고, 유동이 출구의 상부로 집중되게하여 대형연소로의 경우에는 연소로 출구 이후의 대류전열부에 침식 및 국부적 가열 등의 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 판단되므로 가능한 작게 유지되게 주입조건 또는 운전조건을 변경시킬 필요성이 존재한다고 볼 수 있다. Fig. 2(b)는 (x-z)단면의 속도벡터로서 측벽에서 일정한 각도로 공기가 유입될 때 중심부에 동심인형태의 'vortex'가 형성됨을 명확히 보여준다. 이 'vortex'는 연소반응시 로내에서 화염을 안정화시켜 주는데 커다란 역할을 하는 것으로 알려져 있다[2]. 입구 부근에 생성된 'vortex'는 상부로 진행함에 따라 상승유동의 영향으로 인하여 서서히 약화되어 'nose' 이상의 위치에서는 완전히 사라졌음을 관찰할 수 있다. Fig. 2는 연소로내

반응유동장에서의 각각의 단면에 대한 속도벡터장을 나타낸 것으로서 전체적인 유동장의 형상은 비반응유동장과 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 비반응유동장에 비해 'nose' 상부의 재순환영역이 작아졌으며, 연소로 내부 및 출구에서 온도증가에 의하여 속도가 현저히 증가하였음을 관찰할 수 있다. 또한 상방향 속도증가의 결과로 선회강도가 약화되어 중앙부의 'vortex'의 크기가 상당히 감소하였음을 보여주고 있다.

Fig. 3은 비반응 및 반응유동장내의 입자궤적을 입자의 직경에 따라 추적한 결과로 로내의 'vortex' 형성에 따라 나선형의 운동을 하면서 상부로 진행한 후 출구로 배출되는 모습을 보여주고 있다. 전반적으로 약선회유동의 특성상 입자들이 연소로의 벽쪽으로 치우치지 않음을 보여주고 있다. 반응유동장(Fig. 3(b))의 경우 비반응유동장의 경우(Fig. 3(a))에 비해 나선형운동이 약화되었음을 관찰할 수 있는데, 이는 상방향 유속증가로 인하여 기체의 항력이 증가하였기 때문으로 판단된다. 선회가 보다 강한 경우에는 입자들이 벽면에 부딪혀 부착 및 침식 문제를 야기시킬 수 있으므로, 연소로의 크기 및 형상에 따라 미분탄과 산화제(공기)의 적절한 분사각도를 설정하는데 이러한 해석결과들이 중요한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 반응 유동장내 온도분포를 보여주고 있다. 우선 화염대가 벽쪽으로 치우치지 않고 'vortex' 형성대를 따라 안정화되고 있음을 보여주며 출구에서의 평균온도는 약 1400K 정도로서 미분탄연소로의 설계 제약조건중의 하나인 회재(ash)의 용융온도 이하로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 상부로 진행함에 따라 온도가 균일화되고는 있으나 'nose' 상부의 재순환영역에서는 비교적 낮은 온도 분포를 보여 완전히 혼합되지는 않았음을 알 수 있다. Fig. 5는 연소생성물질중의 하나인 CO₂의 농도분포(mole fraction)로서 화염대 부근에서는 당량비 연소시의 이론값(약 17.5%)에 근접하는 16.3% 정도의 높은 값을 보여주며 상부로 진행함에 따라 서서히 혼합되어 가는 모습을 보여주고 있다. 그러나 이 경우에도 'nose' 상부의 재순환영역에서는 낮은 농도분포를 보여주고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 'nose' 상부의 재순환영역은 가능한 작게 유지하는 것이 바람직하며, 영향이 심각한 경우에는 분사각도 또는 기하학적 형상 변경을 통하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

접선분사형 실험용 연소로 내에서의 난류유동장 및 미분탄의 반응특성에 관한 전산해석 연구를 수행하였다. 연소로내에서 안정적인 화염대를 형성하는데 기여할 것으로 판단되는 'vortex'가 형성되고, 미분탄 입자의 나선형 운동은 연소 반응에 의하여 약화됨을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 설정한 약선회유동장내에서 미분탄 입자는 벽면에 부딪히지 않고 출구로 진행하였으며, 이로 미루어 벽

면에 입자의 부착 및 침식문제가 발생하지 않을 것으로 추측할 수 있었다. 그러나 'nose' 상부의 재순환영역은 온도장 및 연소생성물질의 효과적인 혼합에 어느 정도 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 기초적인 연구를 바탕으로, 기하학적 형상 및 분사각도 등의 세부적인 유동변수의 고려 및 일반적인 연소로내에서 문제가 되는 질소산화물 생성예측 등의 연구를 보충하면, 효과적인 미분탄 연소로의 설계조건을 찾을 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. Paul A. Gills and Philip J. Smith; "An Evaluation of Three-Dimensional Computational Combustion and Fluid-Dynamics for Industrial Furnace Geometries", Twenty-third Symposium(International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 981-991(1990).
2. A.K. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred; Swirl Flows, ABACUS PRESS(1984).

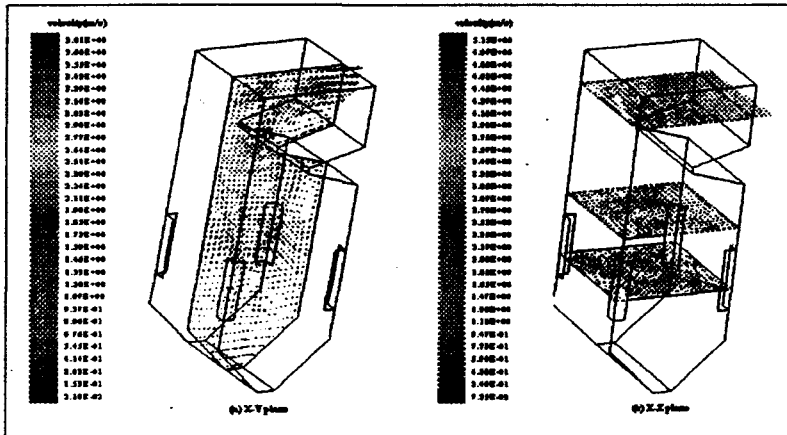


Fig. 1 Velocity vector plots in the non-reacting flow field

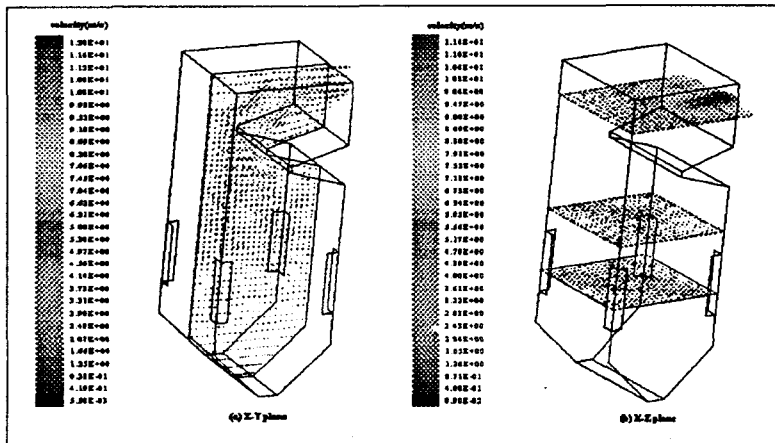


Fig. 2 Velocity vector plots in the reacting flow field

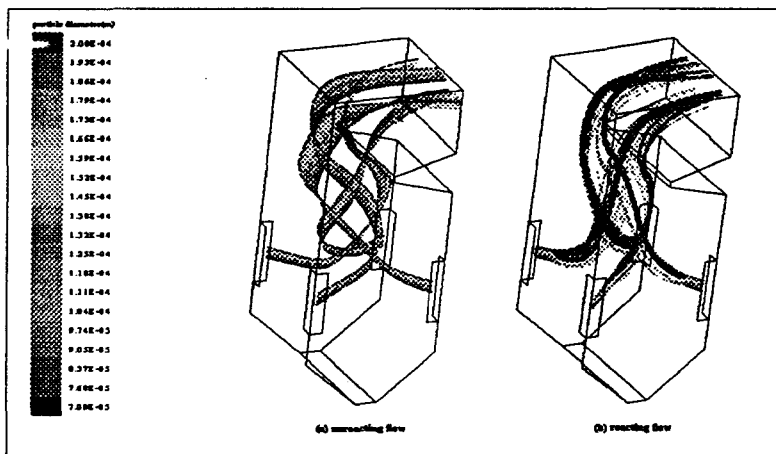


Fig. 3 Particle trajectory in the flow field

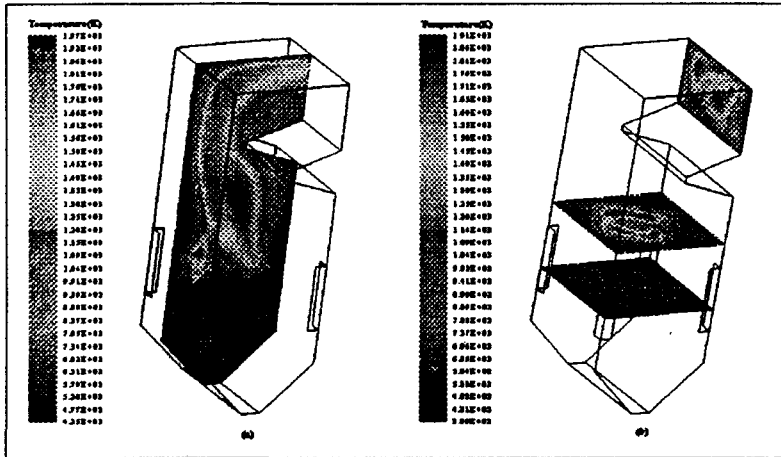


Fig. 4 Temperature contour plots in the flow field

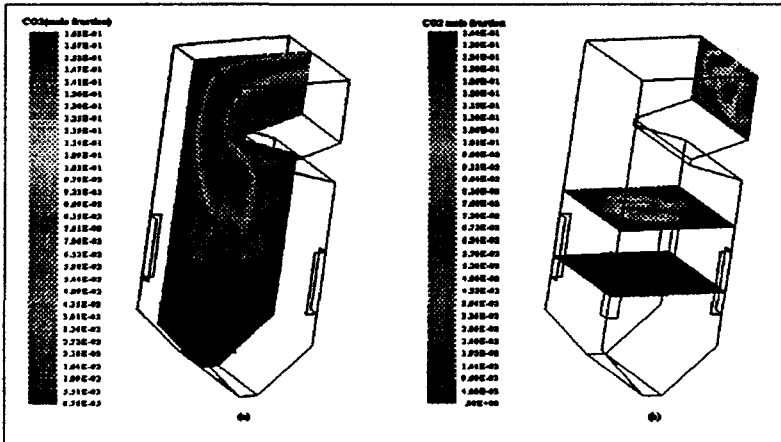


Fig. 5 CO₂ concentration contour plots in the flow field