

석탄가스화기내의 미분탄 입자를 동반한 유동장 해석

이진옥*, 마수만, 김원배
고등기술연구원 전력에너지연구소

요 약

본 연구는 석탄가스화기내의 비반응 유동장에 대한 연구로서, 순수유동장 및 미분탄입자를 포함한 이상유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 가스화기내의 물리적 현상을 기술하는 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법에 의하여 해석하고 그 결과를 나타내었다. 특히 선회유동의 영향에 의한 미분탄입자의 거동 및 재순환영역의 특성에 대하여 상세히 고찰하였다. 해석결과에 의하면 가스화기내에서는 몇개의 재순환영역이 형성됨을 알 수 있었다. 비반응유동장의 해석결과이지만, 선회유동은 화염안정화에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 추측되는 결과를 보였다.

1. 서 론

석탄가스화기내에서는 난류선회유동장하에서 석탄의 각종 물리/화학반응이 일어나게 된다. 즉 가스화기내로 투입된 미분탄은 중력, 유동장내에서의 유체의 항력 및 선회유동에 의한 미분탄 입자의 원심력 등의 여러가지 힘에 의한 복잡한 물리적 거동을 하게 된다. 또한 고온의 분위기로 유입한 미분탄은 수분 및 휘발분이 분리되고, 이후의 차(char) 입자는 산소, 이산화탄소 및 수증기 등과 산화/환원 반응을 일으키게 된다. 분리된 휘발분은 공급된 또는 생성된 가스와 산화 및 환원 반응을 일으키게 된다. 또한 미분탄 입자는 석탄의 특성에 따라 팽창을 할 수도 있으며, 반응을 일으키는 도중에 밀도 및 크기에 변화를 일으키기도 한다. 따라서 가스화기의 보다 정확한 설계를 위해서는 이들 복잡한 물리/화학반응을 상세히 이해하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 즉, 미분탄 입자의 거동, 가스화기 내에서의 체류시간 및 가스화 반응특성 등을 충분히 이해함으로써 보다 나은 설계자료를 확보할 수 있을 것이다.

석탄가스화 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 기체-고체 이상유동장, 각종 화학반응 및 대류/복사열전달 등이 연립된 복잡한 편미분 방정식에 대한 해석을 수행하여야 할 것이다. 그러나 이의 완전한 해석을 가능하게 하는 정확한 수학적 모델링을 설정하기도 힘들 뿐만 아니라, 설정된 모델의 해석을 위해서도 상당한 컴퓨터 계산시간 및 수렴성의 어려움으로 인하여 전산해석에 관한 연구는 상당히 적은 편이다. 그럼에도 불구하고 미국 BYU(Brigham Young University)의 ACERC(Advanced Combustion Engineering Research Center) 연구소에서는 석탄가스화에 대한 전산해석을 활발하게 수행중이며 상당한 연구결과를 발표하고 있다 [1,2]. 한가지 아쉬운 점은 대부분의 석탄가스화기가 고압에서 운전되는 점에 비해 BYU의 연구결과는 대부분이 상압가스화에 관한 것이라는 점이다. 현재까지의 문헌조사에 의하면, 석탄가스화 복합발전 시스템에 필수적인 가압 가스화기에 대한 전산해석 연구는 거의 이루어 지고 있지 않다. 본 연구의 최종적인 목표는 가압가스화기내에서의 물리적/화학적 현상을 수치해석 방법에 의하여 해석하여 보고자 하는 것이다. 그 첫단계로서 일단 비반응 난류유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 본 연구에서는 난류 및 선회를 수반하는 순수유동장 및 입자를 포함한 기

체-고체 이상유동장에 관한 해석을 수행하였다. 입구의 선회유속의 변화에 따른 가스화기내 유동특성의 변화에 대한 고찰을 시도하였으며, 특히 선회의 강도에 따른 재순환영역의 형성 및 특성의 변화에 대하여 고찰하였다.

2. 수학적 배경

본 연구에 적용된 가스화기는 그림 1과 같은 원통형 형상을 지니며, 원통의 축벽에서 산화제 및 미분탄이 분사된다. 기체는 Newtonian 유체 및 연속체이며, 시간에 대하여 정상상태라고 가정한다. 이와 같은 경우에는 가스화기 내부의 기체의 유동장은 2차원 축대칭 좌표계상에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\theta_1 \rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\theta_1 r \rho v \phi) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\theta_1 \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\theta_1 r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S_\phi$$

여기서 ϕ 는 전달방정식의 종속변수로서 각 방향의 속도성분(축방향 u , 반경방향 v 및 접선방향 w), 난류운동에너지 k , 난류운동에너지의 소멸율 ε 및 기체의 부피분율(volume fraction) θ_1 등을 나타내며, 전달방정식에서 ϕ 가 1인 경우는 연속방정식이 된다. Γ_ϕ 및 S_ϕ 는 각 종속함수의 확산계수 및 생성항을 나타낸다.

상기와 같은 연립 편미분 방정식의 해를 구함에 있어서, 가장 어려운 부분중의 하나는 난류유동에 대한 예측이다. 가장 보편적으로 많이 사용되는 표준 $k-\varepsilon$ 난류 모델은 본 연구와 같이 선회 및 재순환을 포함하여, 유선의 곡률이 심하여 비등방성을 지니는 난류유동에서는 비교적 정확한 예측을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 난류의 유선의 곡률이 심한 경우에도 비교적 정확하다고 알려진 RNG(Re-Normalized Group) 난류모델[3]을 이용하였다. 난류유동장내에 고체 입자가 있는 경우, 고체입자는 기체의 유동에 편승하면서 기체의 유동에 영향을 미치므로 기체 및 고체 각각의 유동특성을 연립하여 해석하여야 한다. 수치해석 방법에서는 고체 입자의 기체 유동에 미치는 영향과 기체의 고체 운동에 미치는 영향의 상관관계를 해석하는 방법에 따라 크게 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법이 있다. 본 연구는 열유체 상용 패키지인 PHOENICS를 이용하여 전산해석을 수행하였으며, 이상유동의 해석에 대해서는 Eulerian 방법의 하나로서 PHOENICS에서 제공되는 모델인 IPSA(Inter-Phase Slip Algorithm) 모델을 사용하였다[4].

위의 연립편미분 방정식을 유한체적법(Finite Volume Method, [5])을 이용하여 그림 2와 같이 반경방향 및 축방향으로 (15 x 67)의 제어체적(control volume)을 갖는 격자계에서 수치해석을 수행하였다(그림 2에서 본 연구에 적용된 가스화기의 세장비(aspect ratio)가 상당히 큰 점을 고려하여 반경방향으로는 실제 형상에 비하여 5배로 확대하여 나타내었다). 가스화기의 벽면에 위치한 입구에서는 유체와 입자가 동일한 속도로 유입하는 것으로 가정하였으며, 반경방향의 속도는 10m/sec로 일정하게 두고 접선방향 속도(선회속도)의 크기를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 적용된 가스화기에서의 버너는 가스화기의 하단부 근처의 벽면에 4개가 설치되어 있으며, 미분탄과 산화제가 측벽에서 반경방향의 속도와 선회속도를 가지고 가스화기 내부로 공급되게 설계되어 있다. 본 연구에서는 측벽에서 산화제와 연료가 공급되는 가스화기 내부의 유동특성 및 미분탄 입자의 거동에 가장 큰 영향을 미칠것으로 예상되는 선회속도의 크기를 변화시켜 가면서 전산해석을 수행하였다. 먼저 미분탄 입자를 포함하지 않은 순수한 기체의 유동장에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 기체가 선회속도를 가지지 않고 완전히 반경방향으로 유입되는 경우에 대한 결과이다. 빠른 속도로 유입된 기체의 대부분은 가스화기의 중심축 근처에서 급격하게 방향을 바꾸어 출구쪽으로 진행하게 되며, 일부분은 가스화기의 하단부 방향으로 진행하여 반시계 방향으로 회전하는 재순환영역을 형성하게 된다. 가스화기의 입구 근처에서는 반경방향으로 급격하게 유입하는 기체의 관성으로 인하여 하류방향의 측벽부에 작은 재순환 영역을 형성하게 된다. 이와 같이 입구 근처에서는 비교적 복잡한 유동형상을 보이고 있지만 하류로 갈수록 균일 유동장의 형상으로 천이하게 된다. 그림 3(b), 3(c) 및 3(d)는 선회유동이 존재하는 경우의 순수 유동장에 대한 해석 결과이다. 그림 3(b)는 선회속도가 아주 작은 경우에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 가스화기 하류방향으로는 내부의 유동형상이 전반적으로 선회가 없는 경우와 비슷한 결과를 보여주고 있다. 그러나 선회유동이 존재하는 경우는 회전속도로 인하여 측벽방향으로 향하는 원심력이 존재하므로, 이의 영향으로 인하여 선회가 없는 경우에 비하여 기체의 진행방향이 측벽방향으로 치우치는 경향을 보여주고 있다. 이로 인하여 입구 근처의 재순환영역은 축소하게 되며, 재부착거리도 짧아지게 된다. 그림 3(c)는 선회속도가 조금 더 증가한 경우의 결과를 보여주고 있다. 입구에서 유입된 기체는 비교적 강한 원심력의 영향으로 인하여 중심축 방향으로 충분히 진행하지 못하고, 가스화기의 측벽방향으로 진행하게 된다. 많은 양의 유체가 측벽방향으로 향하게 되므로 중심축 부근에서 측방향 속도가 상당히 약하게 된 영역이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 3(d)는 선회속도가 상당히 강한 경우의 해석결과이다. 더욱 강해진 원심력의 영향으로 유입된 기체는 중심축 쪽으로 깊이 진행하지 못하고 급히 측벽방향으로 치우치게 된다. 따라서 입구 좌우의 재순환 영역은 더욱 좁아지게 된다. 또한 중심축 부근에는 압력이 아주 낮은 영역이 형성되고 이 영역으로 상류에서 하류로 향하는 유동이 발생하여 중심축 부근에 재순환 영역이 형성되게 된다. 중심축 부근의 이런 형태의 재순환 영역은, 선회를 지니고 측방향으로 분사되는 연소기나 가스화기에서 흔히 발견되는 영역으로서, 연소 또는 가스화 반응이 존재할 시 화염안정화에 큰 도움을 주는 영역이다.

다음은 미분탄입자가 기체와 함께 유입하는 경우에 대한 해석결과를 고찰하고자 한다. 그림 4는 미분탄을 포함한 흐름이 반경방향만의 속도를 가지고 가스화기 내부로 유입하는 경우의 해석결과를 보여주는 것이다. 유입되는 기체와 미분탄의 양은 부피분율로서 각각 95%와 5%이며, 기체와 고체 입자의 밀도조건을 고려할 때, 질량비는 약 1:1이다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 유동의 형상은 순수한 유동장의 계산결과(그림 3(a))와 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다. 즉, 대부분의 유체는 중심방향으로 진행하다가 방향을 바꾸어 하류방향으로 진행하며, 입구 근처의 작은 재순환 영역 및 하단부의 큰 재순환 영역을 형성하게 된다. 그림 4(b)

는 미분탄 입자의 부피분율의 분포도를 나타내고 있다. 전반적으로는 미분탄 입자가 고루 분포된 결과를 나타내고 있지만, 중심축 방향으로 강하게 분사된 입구조건에 의하여 중심축 부근에 입자의 부피분율이 비교적 큰 값을 나타내고 있다. 본 연구는 미분탄 입자의 화학반응이 없는 냉간유동에 대한 해석결과이지만, 유동장의 형상에서 반응이 존재할 시의 현상에 대하여 주요한 몇가지 관점을 유추해 볼 수 있다. 즉, 반응이 존재할 경우에는 일반적으로 재순환영역내에서는 비교적 고온의 가스가 존재하므로 결과에 나타난 2개의 재순환영역은 화염안정화에 어느정도 기여하게 될 것이다. 그러나 중심축 근처에 부피분율이 큰 분포는 용융재를 가스화기 벽면을 따라 흘러내리게 하려는 슬래깅 가스화기에는 적합하지 않을 것으로 추측된다.

그림 5는 기체 및 미분탄입자가 비교적 강한 선회속도를 가지고 유입되는 경우의 해석결과를 보여주는 있는데, 기체의 유입조건은 그림 3(c)의 경우와 같다. 그림 5(a)에서 특이할 만한 사실은 그림 3(c)에서는 관찰되지 않았던 중심축 부근의 재순환영역이 형성되었다는 점이다. 이는 미분탄입자의 원심력이 기체의 원심력에 비하여 훨씬 크기 때문에 발생한 결과로 판단된다. 즉, 일반적으로는 미분탄입자는 기체의 항력으로 인하여 기체의 유동장에 편승하여 진행하게 된다. 그러나 이 경우에는 기체보다 훨씬 강한 원심력을 지닌 미분탄입자가 축방향으로 진행하면서 오히려 기체를 끌어 당겨주는 역할을 하기 때문에, 기체가 반경방향으로 급히 진행함으로써 생긴 결과로 해석할 수 있다. 이러한 영향으로 미분탄입자가 존재하는 경우는 순수한 유동장에 비하여 유체의 선회가 강해진 것과 같은 효과를 나타내게 된다. 또한 선회유동의 결과로 가스화기의 중심부근에서의 미분탄입자의 부피분율은 비교적 낮은 값을 나타내었으며, 축벽면 근처로 가면서 부피분율이 커지는 경향을 나타내었다.

그림 6은 입구의 선회속도가 더욱 강해진 경우의 해석결과이다. 전반적인 형상은 그림 5의 경우와 비슷함을 나타내고 있다. 그러나 더욱 강해진 선회유동의 영향으로 인하여 중심축 부근의 재순환영역이 축방향 및 반경방향으로 확대되었으며, 축벽면 근처로 가면서 부피분율이 그림 5에 비하여 더욱 커지는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

전산유체역학 기법을 적용하여 가스화기내의 난류선회유동장에 대한 해석을 수행하였다. 고체-기체 이상유동장의 경우 축방향속도에 대한 선회속도의 비가 커지면 중심축 부근에 재순환영역을 형성하였으며, 이는 미분탄입자의 반응이 존재할 시 화염을 안정화시키는 역할을 할 것으로 예측된다. 미분탄입자가 존재하면, 순수한 유동장의 경우보다 선회유동의 영향이 더욱 강하게 됨을 알 수 있었다. 또한 선회유동은 가스화기의 슬래깅 특성에도 좋은 영향을 줄 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하는 “석탄가스화 복합사이클 발전시스템 실용화 개발” 과제의 지원에 의하여 수행된 것으로서, 이에 센터 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ubhayakar S.K., Stickler D.B. & Gannon R.E., "Modeling of entrained bed pulverized coal gasifiers", Fuel, Vol. 55, pp.281-291, 1977
2. Brown B.W., Smoot L.D., Smith P.J., Hedman P.O., "Measurements and prediction of entrained flow gasification processes", AIChE J., Vol. 34, pp.435-446, 1988
3. Yakhot V. & Orszag S.A., "Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory", J. Scientific Computing, Vol. 1, pp.3-51, 1986
4. CHAM, "PHOENICS user's manual : POLIS"
5. Patankar S.V. & Spalding D.B., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1980

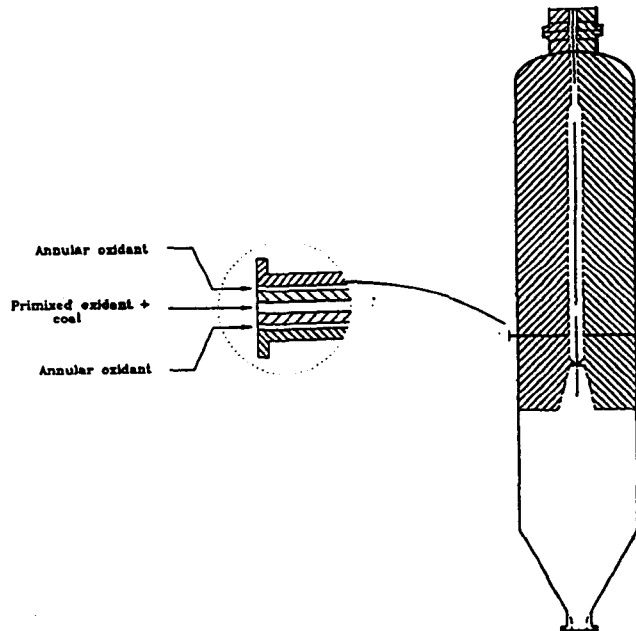


Fig. 1 Schematic diagram of bench scale unit gasifier.

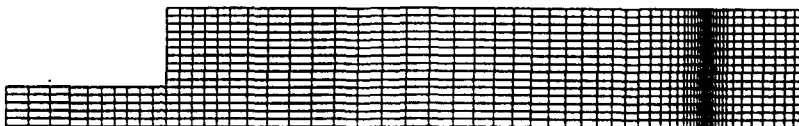


Fig. 2 Grid net used.

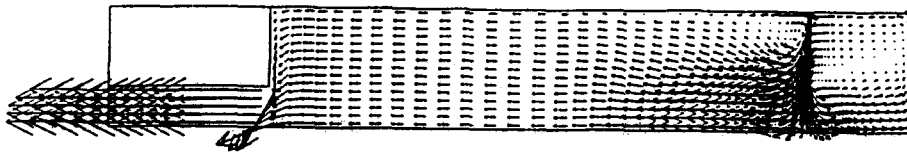


Fig.3(a) Vector plot of single phase flow ($R_v = 0.0$).
 ($R_v = \text{swirl-velocity/radial-velocity, at the inlet}$)

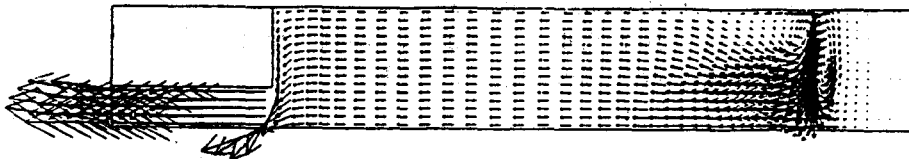


Fig.3(b) Vector plot of single phase flow ($R_v = 0.088$).

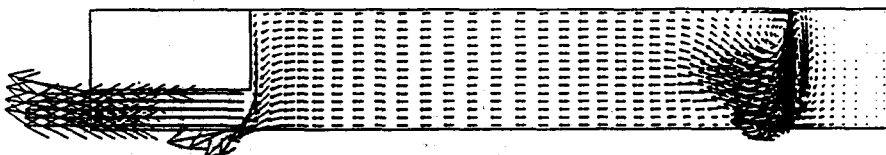


Fig.3(c) Vector plot of single phase flow ($R_v = 0.175$).

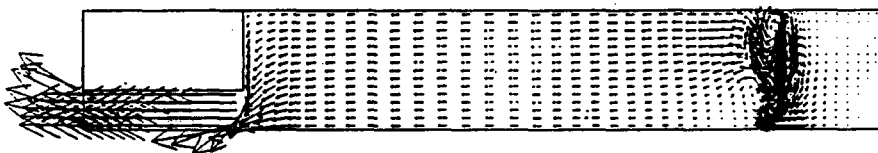
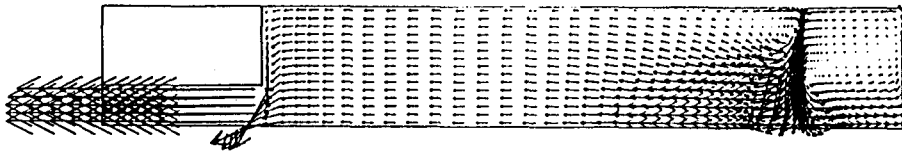
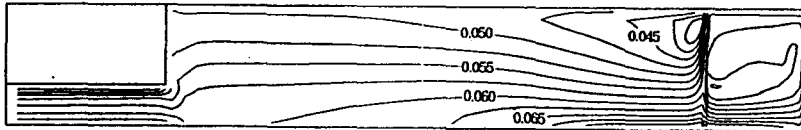


Fig.3(d) Vector plot of single phase flow ($R_v = 0.350$)

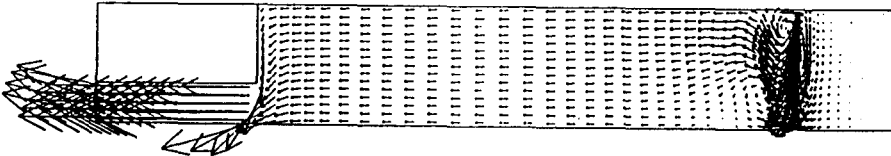


(a)

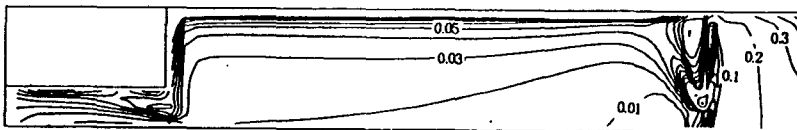


(b)

Fig. 4 (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow ($R_v = 0.0$).

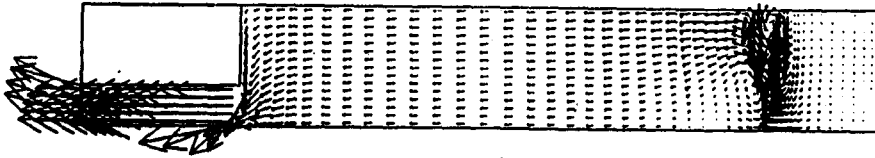


(a)

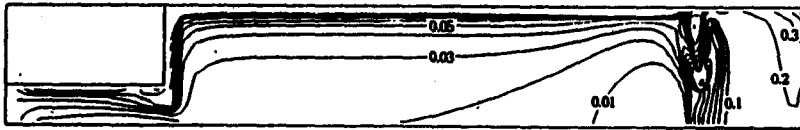


(b)

Fig. 5 (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow ($R_v = 0.175$).



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow ($R_v = 0.350$).