한국에너지공학회지(1995), 제4권 제3호
Energy Engg. J(1995), Vol. 4, No. 3, pp. 331~337

석탄 가스화기내의 기체-고체 이상유동장에 대한 수치해석 연구

이진욱 · 윤용승
고등기술연구원 전력에너지연구실

Numerical Study for Solid-Gas Two Phase Flow in a Coal Gasifier

Jin Wook Lee and Young Seung Yun
Electric Power System Laboratory, Institute for Advanced Engineering

요 약

석탄가스화 복합발전 시스템은 고효율 및 우수한 환경보전성으로 인하여 차세대 화력발전 시스템으로 각광받고 있다. 본 연구는 석탄가스화기내의 비반응 유동장에 대한 연구로서, 순수유동장 및 미분탄 입자를 포함한 이상유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 가스화기내의 유동장을 기술하는 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법에 의하여 해석하고 그 결과를 나타내었다. 특히 선회유동의 영향에 의한 미분탄입자의 거동 및 재순환영역의 특성에 대하여 선회강도의 함수로 고찰하였다. 해석결과에 의하면 가스화기내에서는 몇개의 재순환영역이 형성됨을 알 수 있었다. 비반응유동장의 해석결과이지만, 선회유동은 화염안정화에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 추측되는 결과를 보였다.

Abstract—The Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) is considered as one of the next generation fossil power plant due to its high thermal efficiency and superior environmental performance. In this study, interest is focused on turbulent swirling flow in a coal gasifier with and without coal particles. Results of appropriate Navier-Stokes equations are presented. Effects of swirl flow on the behavior of coal particles and on the formation of recirculation zone in a typical gasifier are scrutinized. The simulation results have shown that several recirculation zones were formed in the gasifier. It can be deduced that swirling flow may have positive effect on the flame stabilization and on the slagging behavior of molten ash.

1. 서 론

석탄가스화 복합발전 시스템은 고효율 시스템 및 환경오염물질의 감소라는 측면에서, 전세계적으로 각광받고 있는 기술이다. 우리나라에서는 이런 장점외에도 전력에너지의 안정적 공급 및 에너지원의 다양화라는 측면에서 많은 관심을 끌고 있다. 본 연구에서는 석탄가스화 복합발전 시스템의 핵심장치중의 하나인 석탄가스화기내의 유동장에 대한 전산해석을 수행하여 그 결과를 보고하고자 한다.

석탄가스화기내에서는 난류선회유동장하에서 석탄의 각종 물리/화학반응이 일어나게 된다. 즉 가스화기내로 투입된 미분탄은 중력, 유체의 항력 및 선회유동에 의한 원심력 및 난류유동에 의한 복잡한 물리적 거동을 하게 된다. 또한 고온의 분위기로 유입한 미분탄은 수분 및 휘발분이 분리되고, 차(char) 입자는 산소, 이산화탄소 및 수증기 등과 산화/환원 반응을 일으키게 된다. 분리된 휘발분은 공급 또는 생성된 가스와 산화 및 환원반응을 일으키게 된다. 또한 미분탄 입자는 석탄의 특성에

*본 논문에 관한 문의 및 우편물은 이 저자에게로 연락바랍니다.
*To whom all correspondence should be addressed.

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.

석탄가스화기는 복합발전 및 화학공정 분야에 응용성이 높을 뿐만 아니라, 위에서 언급한 바와 같이 복잡하고도 흥미로운 현상이 존재하므로 이 분야에 많은 연구가 진행되고 있으며, 전산해석 분야에서도 많은 관심을 끌고 있다. 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 수치해석상의 불안정성 등으로 인하여 전산해석에 관한 연구는 상당히 적은 편이다. 그럼에도 불구하고 미국 BYU(Bringham Young University)의 ACERC(Advanced Combustion Engineering Research Center) 연구소에서는 석탄가스화에 대한 전산해석을 활발하게 수행중이며 일련의 연구결과를 발표하고 있다[1,2]. 그러나 대부분의 석탄가스화기가 고압에서 운전되는 점에 비해 BYU의 연구결과는 대부분이 상압 가스화에 관한 것이다. 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 해석하는 것이다. 그 첫단계로서 비반응 난류유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 대부분의 가스화기내에서는 레이놀즈수(Reynolds number) 및 선회수(swirl number)가 충분히 크므로 가스화기내에서는 강선회 난류유동장이 형성된다. 본 연구에서는 난류 및 선회를 수반하는 순수유동장 및 입자를 포함한 기체-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.

본 연구에서는 비록 미분탄 입자의 반응을 고려하지는 않았지만, 입자의 존재여부 및 선회의 강도 등을 변화시켜 가면서 연구를 수행하였다. 따라서 해석결과는 가스화기내의 주요한 현상중의 하나인 난류선회유동장의 특성을 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 수학적 배경

본 연구에 적용된 가스화기는 Fig. 1과 같은 원통형 형상을 지니며, 원통의 측벽에서 산화제 및 미분탄이 분사된다. 가스화기내의 유동은 엄격히 말해서 3차원 현상이나 분사부위 근처를 제외하면 자오선 방향으로는 온도 및 속도 구배가 거의 존재하지 않을 것으로 예측된다. 기체는 Newtonian 유체 및 연속체이며, 정상상태라고 가정한다. 이 경우에 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 ϕ는 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 ϕ가 1인 경우는 연속방정식이 된다. Γ_ϕ및 S_ϕ는 각 종속함수의 확산계수 및 생성항을 나타낸다.

상기와 같은 연립 편미분 방정식의 해를 구함에 있어서, 가장 어려운 부분중의 하나는 난류유동에 대한 예측이다. 난류모델중에서 가장 일반성을 내포하고 있다고 생각되는 모델로서 레이놀즈 응력 난류모델(Reynolds Stress Turbulence Model)을 생각할 수 있다. 특히 레이놀즈 응력 난류모델은 본 연구와 같이 선회 및 재순환을 포함하여, 비등방성이 심한 난류유동에서도 비교적 정확한 예측을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그

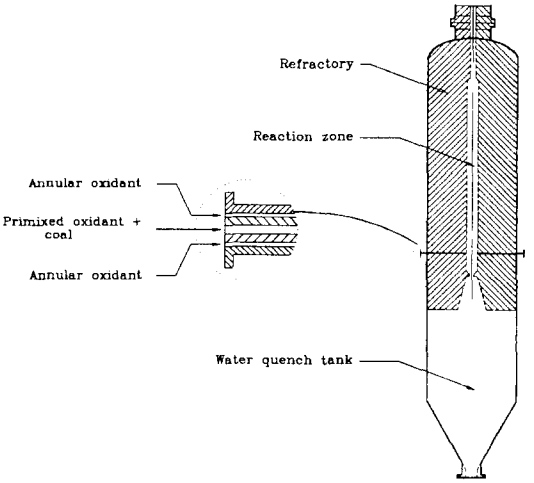

Fig. 1. Schematic diagram of bench scale unit gasifier.

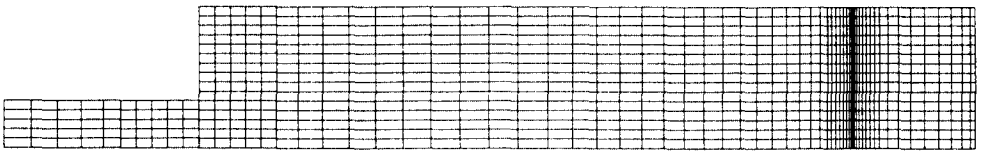

Fig. 2. Grid net used.

러나 레이놀즈 응력 난류모델은 본 연구와 같이 강선회 및 재순환유동이 동시에 존재하는 경우에는 수렴성이 좋지 않다는 단점이 있다. 표준 k-ε 난류모델은 난류유동의 예측을 위하여 가장 널리 쓰이는 모델이다. 그러나 표준 k-ε 난류모델은 기본적으로 난류구조의 등방성을 가정하여 구성되었기 때문에 난류응력의 비등방성이 유동장의 구조 및 특성을 결정하는데 중요한 역할을 하는 재순환유동이나 선회유동과 같은 경우에는 만족할만한 예측결과를 얻기 힘들다. 이러한 모델의 정확성 및 수렴성 등을 고려하여 표준 k-ε 난류모델을 수정하여 비등방성을 갖는 유동을 해석하기 위하여 k-ε 난류모델에 대한 여러가지 변형 및 개선이 제안되어 왔다[3,4,5]. 본 연구에서는 비교적 정확하다고 알려진 RNG(Re-Normalized Group) 난류모델[5]을 이용하였다.

난류유동장내에 고체 입자가 있는 경우, 고체입자는 기체와 운동량을 교환하면서 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. 이 두가지 방법은 모두 궁극적으로는 주로 경험식을 이용하여 해에 접근하고 있다. 이 두가지 방법에는 각각 장단점이 있는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 분산된 고체입자를 새로운 유체로 취급하는 Eulerian 방법을 적용하여 해석하였다. Eulerian 방법은 Lagrangian 방법에 비하여 비교적 많은 계산시간과 컴퓨터 용량을 필요로 하지만, 입자의 국부적 분포량을 쉽게 예측할 수 있다는 장점이 있다. Eulerian 방법에 의한 고체입자의 특성을 결정하는 지배방정식은 기체상의 지배방정식과 비슷한 형태로 쓰여진다. 그러나 일반적으로 확산항은 무시되고 생성항에 기체의 항력 및 난류분산에 의한 영향 등이 주로 경험식에 의해 결정된다. 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[6].

위의 연립편미분 방정식은 수치해석 방법중의 하나인 유한체적법(Finite Volume Method)에 의하여 해석될 수 있다[7]. 가스화기의 입구에서는 유체와 입자가 동일한 속도로 유입하는 것으로 가정하였으며, 반경방향의 속도는 10 m/sec로 일정하게 두고 접선방향 속도(선회속도)의 크기를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 기체의 물성치는 30기압에서의 산소의 근사적인 값을 이용하였다. 입자가 존재하는 경우는 입구에서의 기체의 부피분율을 95%로 설정하였으며, 입자는 50 m의 균일한 크기 및 600 kg/m^{3}의 균일한 밀도를 갖는 것으로 가정하였다. 이 조건은 기체와 고체의 질량비가 약 1 : 1로서, 이는 실제 가스화기에서의 산화제와 미분탄의 비와 유사한 값이다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 반경방향 및 축방향으로 (15×67)의 제어체적(control volume)을 갖는 격자계에서 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 가스화기의 종횡비는 약 33으로서 상당히 크기 때문에 해석결과의 관찰의 편의성을 도모하기 위하여 반경방향으로는 5배로 확대하여 나타내었다. 입구는 1 cm의 길이를 가지는 틈새(slit)로 가정하였으며, 이 근처에서 종속변수의 변화가 급할 것으로 예상되므로 격자를 밀집시켜 해석을 수행하였다. 위의 연립방정식의 해를 구함에 있어서 Hewlett Packard 9000-755 웍스테이션(workstation)을 이용하였는데, 순수유동장의 경우에는 약 1시간, 미분탄 입자를 동반한 이상유동장의 경우에는 선회의 강도에 따라 2시간내지 4시간 정도의 계산시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 고등기술연구원과 아주대학교에서 연구중인 가스화기를 대상으로 하여 전산해석을 수행하였다. 연구중인 가스화기에서의 버너는 가스화기의 하단부 근처에 4개가 설치되어 있으며, 미분탄과 산화제가 측벽에서 반경방향의 속도와 선회속도를 가지고 가스화기 내부로 공급되게 설계되어 있다. 가스화기 내부의 유동장 특성을 결정짓는 중요 인자로서 선회강도 및 출구면적(또는 면적축소비)을 들 수 있으며, 기타 종횡비, 유입속도 및 입구면적등의 변화는 비교적 적은 영향을 주는 것으로 알려져 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 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 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 되며, 대략 버너 위치로 부터 가스화기 반경의 10배정도 되는 위치에서 거의 균일한 유동장의 형태를 지니게 되는 것을 보여주고 있다. 출구 근처에서는 유로의 면적이 급격히 줄어드는 영향으로 축방향 속도가 급격히 증가하게 된다. Fig. 3(b), 3(c) 및 3(d)는 선회유동이 존재하는 경우의 순수 유동장에 대한 해석결과이다. Fig. 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. 이 경우 선회속도가 비교적 작음에도 불구하고 하단부의 재순환영역에는 비교적 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 즉, 하단부에서는 축방향의 속도가 적으므로, 원심력을 지닌 기체는 하류에서와는 달리 쉽게 측벽으로 향하게 되고 그 결과로서 반시계방향의 재순환영역은 선회가 없는 경우에 비하여 상당히 좁아지게 되며, 하단부의 나머지 영역은 시계방향의 재순환영역이 형성하게 된다. 이와 같이 선회유동이 존재하게 되면 선회속도가 비교적 적은 경우에도 유동형상에는 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 선회속도가 조금 더 증가한 경우의

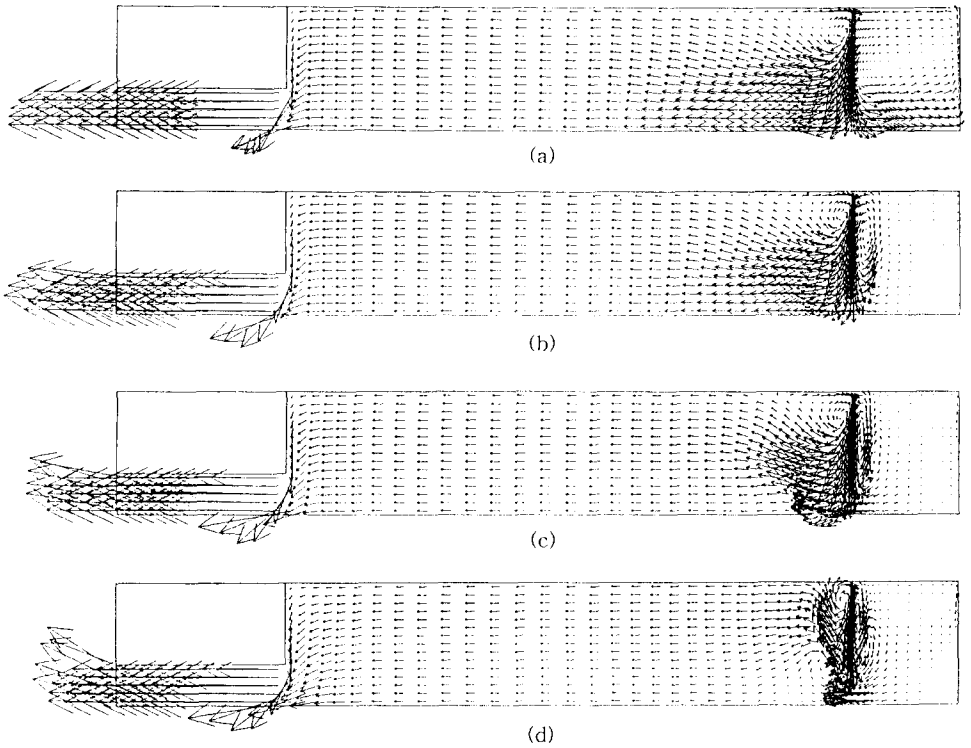

Fig. 3. Vector plot of single phase flow for (a) R_v=0.0, (b) R_v=0.088, (c) R_v=0.175 and (d) R_v=0.350 (R_v=swirl-velocity/radial-velocity, at the inlet).

결과를 보여주고 있다. 입구에서 유입된 기체는 비교적 강한 원심력의 영향으로 인하여 중심축 방향으로 충분히 진행하지 못하고, 가스화기의 측벽방향으로 진행하게 된다. 따라서 입구 좌우의 2개의 재순환 영역의 크기는 더욱 적어지게 된다. 또한 많은 양의 유체가 측벽방향으로 향하게 되므로 중심축 부근에서 축방향 속도가 상당히 약하게 된 영역이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 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 축방향으로 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. Fig. 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. Fig. 4(a)는 미분탄을 포함한 기체가 반경방향만의 속도성분을 가지고 유입하는 경우에 대한 해석결과로서 속도벡터를 나타내고 있다. 유동의 형상은 순수한 유동장의 계산결과(Fig. 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. 본 연구에서는 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 상당히 기여하게 될 것이다. 반면에 재순환영역내의 유동의 방향은 슬래깅(slagging) 특성에 미약하나마 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측된다. 즉, 입구의 좌우에 위치한 재순환영역에서의 벽면에서 입구쪽으로 향하는 유동은 용융슬랙이 입구쪽으로 흐르는 것을 도와 버너입구를 막을 가능성이 존재하게 된다. 또한 하단부의 반시계 방향의 회전은 벽면에서 상부로 향하는 유동을 유발하여 용융슬랙이 원활하게 흐르는 것을 방해할 가능성이 존재한다. Fig. 4(b)는 미분탄 입자의 부피분율의 분포도를 나타내고 있다. 전반적으로 미분탄 입자가 고루 분포된 결과를 나타내고 있지만, 중심축 방향으로 강하게 분사된 입구조건에 의하여 중심축 부근에 입자의 부피분율이 비교적 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 분포는 용융재를 가스화기 벽면을 따라 흘러내리게 하려는 슬래깅 가스화기에는 적합하지 않을 것으로 추측된다. 즉, 선회유동이 없는 경우는 부정적인 슬래깅 특성을 보일 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 기체 및 미분탄입자가 비교적 강한 선회속도를 가지고 유입되는 경우의 해석결과를 보여주는 있는데, 기체의 유입조건은 Fig. 3(c)의 경우와 같다. Fig. 5(a)에서 특이할 만한 사실은 Fig. 3(c)에서는 관찰되지 않았던 중심축 부근의 재순환영역이 형성되었다는 점이다. 이는 미분탄입자의 원심력이 기체의 원심력에 비하여 훨씬 크기 때문에(원심력은 밀도에 비례한다) 발생한 결과로 판단된다. 즉, 일반적으로는 미분탄입자는 기체의 항력으로 인하여 기체의 유동장에 편승하여 진행하게 된다. 그러나 이 경우에는 기체보다 훨씬 강한 원

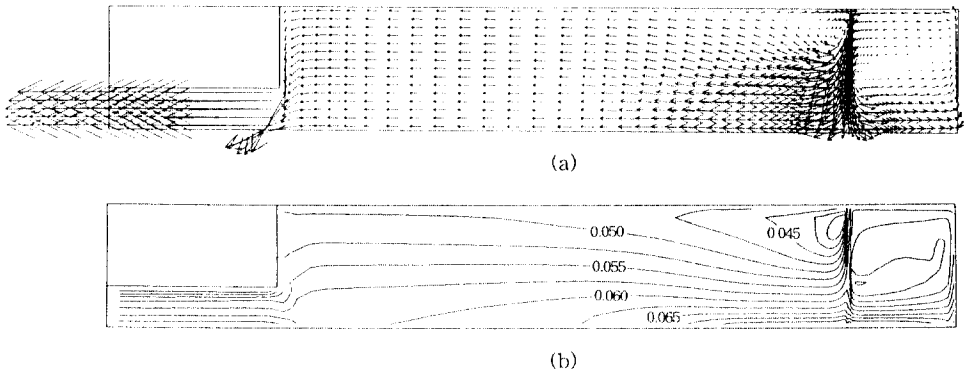

Fig. 4. (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow (R_v=0.0).

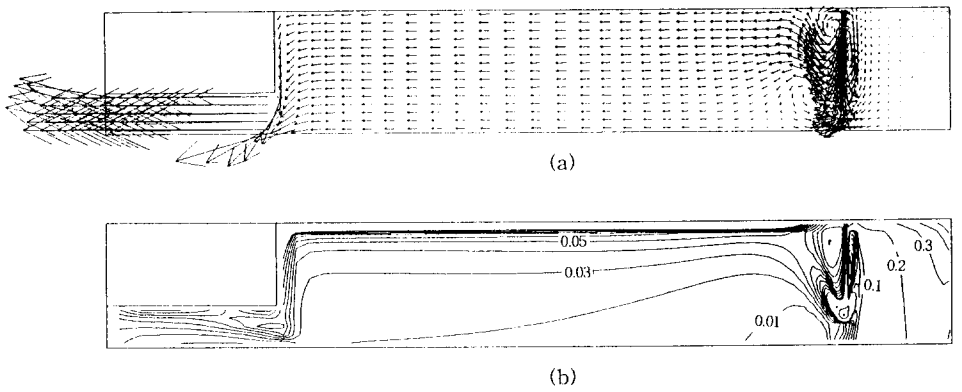

Fig. 5. (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow (R_v=0.175).

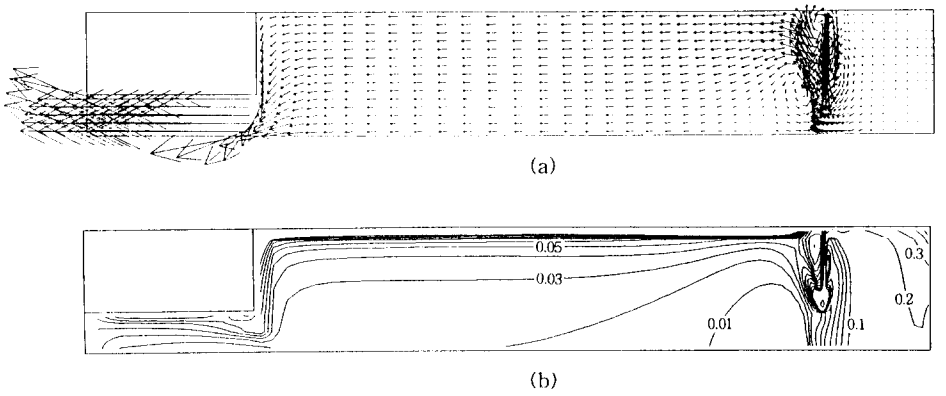

Fig. 6. (a) Vector plot and (b) contour plot of particle volume fraction of two phase flow (R_v=0.350).

심력을 지닌 미분탄입자가 측벽방향으로 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 나타내는 것이다. 선회유동의 영향으로 입구 옆의 재순환영역이 좁아지고, 하부의 재순환영역은 속도가 미약하지만 회전방향이 시계방향이므로 슬래깅 특성에서 선회유동이 존재하지 않는 경우에 비하여서는 나아질 것으로 예상할 수 있다. 또한 선회유동의 결과로 가스화기의 중심부근에서의 미분탄입자의 부피분율은 비교적 낮은 값을 나타내었으며, 측벽면 근처로 가면서 부피분율이 커지는 경향을 나타내었다. 또한 가스화기의 바닥부분에 부피분율이 상당히 높은 값을 보이고 있다. 이는 분사된 입자중 난류유동에 의하여 바닥으로 향한 입자들의 상당부분이 정체영역에서 빠져나오지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

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

선회의 강도가 커짐에 따라 발생한 중앙의 재순환 영역(Fig. 5 및 Fig. 6)은 화염의 안정화에 상당한 도움을 줄 것이다. 반면에 선회가 커지면 미분탄 입자의 부피분율은 측벽근처에서 높아지게 되므로, 선회가 너무 큰 경우에는 가스화기 내화재의 마모 및 가스화 반응의 탄소전환율을 떨어트릴 가능성이 있다. 따라서 향후에는 실험결과 및 해석결과의 비교를 통하여 최적 선회강도를 도출할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

전산유체역학 기법을 적용하여 가스화기내의 난류선회유동장에 대한 해석을 수행하였다. 고체-기체 이상유

동장의 경우 축방향속도에 대한 선회속도의 비가 커지면 중심축 부근에 재순환영역을 형성하였으며, 이는 미분탄입자의 반응이 존재할시 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.

감사의 글

본 연구는 통상산업부 에너지자원기술개발지원센타에서 지원하고, 한전전력연구원에서 주관하는 "석탄가스화 복합발전 기반기술 개발" 과제의 1차년도 사업으로 수행된 것으로서, 이에 센타 및 전력연구원 관계자들에게 감사드립니다. 또한 좋은 지적으로 본 논문의 질을 향상시켜 주신 심사위원들께도 감사드립니다.

참고문헌

1. Ubhayakar, S.K., Stickler, D.B. & Gannon R.E.: "Modeling of entrained bed pulverized coal gasifiers", Fuel, **55**, 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., **34**, 435-446 (1988).
3. Nishizima, S. & Yoshizawa, A.: "Turbulent channel and Couette flows using an anisotropic k- model", AIAA J., **25**, 414-420 (1987).
4. Hanjalic, K. & Launde, B.E.: "Sensitizing the dissipation equation to irrotational strains", J. Fluids Engineering, **102**, 34-40 (1980).
5. Yakhot, V. & Orszag, S.A.: "Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory", J. Scientific Computing, **1**, 3-51 (1986).
6. CHAM: "PHOENICS user's manual: POLIS".
7. Patankar, S.V. & Spalding, D.B., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corp., Washington (1980).