

## 2단 분류층 석탄가스화기 내의 열유동 및 미분탄/재 입자거동 계산

박선호\* · 황정호† · 정진도\*\*

(2000년 8월 16일 접수, 2001년 4월 6일 심사완료)

### Numerical Calculations on Flow and Behavior of Pulverized Coal and Ash Particles in 2-Stage Entrained-Flow Gasifier

Sun-Ho Park, Jung-Ho Hwang and Jin-Do Jung

**Key Words:** 2-Stage Entrained-Flow Coal Gasifier(2단 분류층 석탄가스화기), Swirl Number(선회수), Particle Residence Time(입자 체류 시간)

#### Abstract

Flow fields, temperature distributions, and particle trajectories in a 2-stage entrained-flow gasifier are calculated using a CFD code, FLUENT. Realizable  $k-\epsilon$  model is used as a turbulent model. Because of swirling flow there appear recirculation regions near the burners. The characteristics of flow fields and temperature distributions in the gasifier are dependent on the swirl number of the system. Mean residence time of the particles in the reductor is inversely proportional to particle size, particle density and swirl number. As the swirl number is increasing, the particles injected from the combustor burners approach the wall near the combustor burners, which prevents the particles from entering the reductor and thus attaching the reductor wall. If the lower combustor burner angle is larger than the higher combustor burner angle for a given swirl number, the particles may move toward the reductor and cause ash/slag deposition problem.

#### 1. 서 론

석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated Coal Gasification Combined Cycle)은 기존의 복합발전과 석탄가스화 장치를 결합한 것으로 석탄을 가스화제(산소 또는 공기, 수증기)와 반응시켜 생성된 CO, H<sub>2</sub>가 주성분인 연소성 합성가스(Syngas)를 천연가스 대신 사용한다. 기존의 미분탄(Pulverized coal) 화력발전 방식에 비해서 효율이 높으며, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, 분진 등의 배출량이 크게 감소되어 석탄을 이용한 차세대 발전시스템으로 주

목받고 있다.<sup>(1~3)</sup>

미분탄을 가스화제와 함께 분사하여 가스화시키는 분류층(Entrained-flow) 가스화기는 연료탄의 사용범위가 넓고 대용량화가 가능하여 발전용에 적합하다는 평가를 받고 있으며 고정층, 유동층 방식에 비해서 석탄가스화율이 높고 작동하기가 쉬울 뿐만 아니라 로내 온도가 높으므로 미분탄이 반응하고 나온 재(Ash)가 녹아 슬래그(Slag) 형태로 배출된다는 장점이 있다. 분류층 석탄가스화기에서는 버너를 접선방향으로 설치하여 선회유동을 형성함으로써 미분탄과 가스화제의 혼합을 원활하게 하고 슬래그를 분리하여 벽에 달라붙게하여 아래쪽으로 배출한다.

분류층 석탄가스화기에서는 가스화제로 공기 또는 산소를 사용하는데 산소를 사용하는 경우 가스터빈을 안정적으로 구동할 만큼의 충분한 열량의 합성가스를 생산할 수 있지만 공기분리장치

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

\*\* 호서대학교 환경공학과

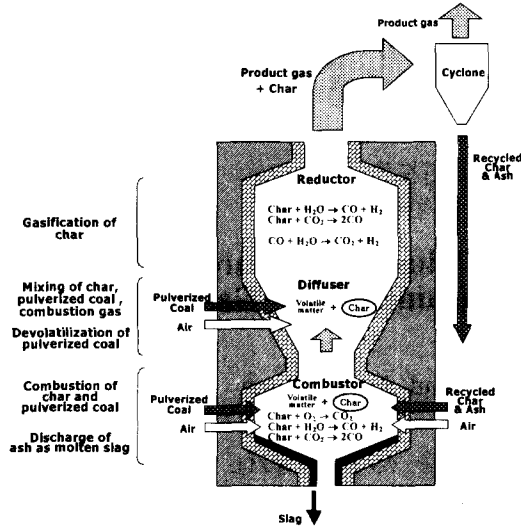


Fig. 1 2-stage entrained flow gasifier

가 필요하므로 설비비가 증가하고 공기분리장치가 발전출력의 8~10%를 소모하므로 전체 발전 효율이 공기를 사용하는 경우보다 약 1.5% 정도 낮아지는 단점이 있다.

반면 공기를 사용하는 경우 질소가 가스화기 내의 연소가스 온도를 낮추기 때문에 재가 슬래그의 형태로 배출되기 어렵고, 가스터빈을 안정적으로 구동할 만큼의 높은 열량을 가진 합성가스를 생산하기 어려운 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 제안된 방법중의 하나가 2단 분류층 석탄가스화기이다.(Fig. 1) 이는 연소 영역(Combustor)과 환원 영역(Reducor)의 두 개 영역으로 구성되어 있는데, 두 영역 사이는 스로트(Throat)와 디퓨저(Diffuser)가 있다. 20~40%의 미분탄과 재순환된 찌(Char)/재가 전체 공기의 80% 정도와 함께 연소실 내로 공급되며, 나머지 미분탄과 공기는 환원실 내로 공급된다.

연소실에서는 산소/석탄 비가 크고 미분탄의 연소 반응이 주로 일어나므로 온도가 높으며 이 열량으로 가스화 반응에 필요한 반응열을 공급한다. 환원실에서는 산소/석탄 비가 작고 흡열 반응인 환원 반응이 주로 일어나며, 가스정제 공정을 위해 미리 합성가스를 냉각시키므로 온도가 낮다. 연소실에서는 재 입자가 녹아서 슬래그 형태로 존재해야 하므로 내부 온도가 재 입자의 녹는 점보다 높아야 하고, 환원실에서는 재 입자가 녹지 않은 상태로 존재해야 하므로 내부 온도가 재

입자의 녹는점보다 낮아야 한다. 재 입자의 녹는 점은 약 1500~1800K 정도이고, 연소실의 내부 온도는 1900~2300K, 환원실의 내부 온도는 900~1350K며, 내부 압력은 20기압 이상에서 구동된다.(4,5)

Brown 등(6)은 4가지 석탄 종류에 대해서 실험을 수행하고 2차원 축대칭 형상에 대해서 가스화 반응과 연소 반응을 고려한 계산결과와 비교하였다. Kane와 McCallister(7)는 연속방정식과 운동량식, 에너지방정식을 무차원화하여 중요한 변수로 선회수, 반경/길이의 비, 입자와 기체의 부피비 등을 제시하였으며, 이 변수들을 이용하여 상사법칙을 성립할 수 있음을 보였다. Chen 등(4)은 scale-up 이론을 정리하고, 2단 분류층 석탄 가스화기 내부에서 입자의 거동에 영향을 미칠 유동 특성을 파악하여 입자의 부착을 방지할 설계조건을 제시하였다. Moritsuka와 Hamamatsu(8)는 공기를 가스화제로 사용하는 2단 형상의 200t/d 가압 분류층 석탄 가스화기에 대해서 질량 및 열정산으로부터 각 단의 가스화제와 미분탄의 공급 비율을 계산하는 과정을 제시하였다. Moritsuka와 Hamamatsu(9)는 2단 분류층 석탄 가스화기를 사용한 석탄가스화 복합발전 사이클의 성능과 가스화 특성을 연구하였다. 이진욱과 윤용승(10)은 축벽 하단부에 4개의 버너가 접선방향으로 설치된 가스화기를 대상으로 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 입자를 포함하는 비반응 난류 이상유동장을 계산하여 미분탄 입자의 거동 및 재순환 영역의 특성이 선회강도와 관계가 있으며 선회유동은 화염안정화에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 추측하였다. 조한창과 신현동(11)은 미분탄과 가스화제를, 상부에 설치된 1개의 버너로 공급하는 분류층 석탄반응로에 대해서 실험을 수행하고, PSIC 방식과  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 2차원 축대칭 형상에 대해서 계산한 결과와 비교하였다. 이선경 등(12)은 SIMPEC 알고리즘과  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 2차원 축대칭 형상에 대해서 미분탄 입자의 거동과 비반응 유동장을 계산하였다. Vamvuka 등(13,14)은 열, 물질 정산과 비균질 반응을, 가스상 균질평형을 고려한 1차원 정상상태 분류층 가스화를 모델링하였으며 석탄 주입량(증기/석탄 주입비, 산소/석탄 주입비), 입자크기 및 가스화기 내부의 압력 등의 작동변수별 결과를 도출하였다.

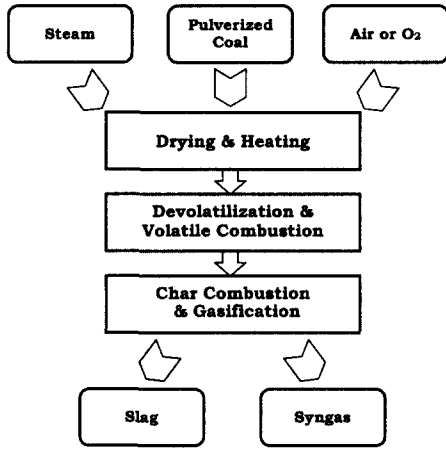


Fig. 2 Gasification process

Fig. 2에는 가스화 과정을 나타내었다. 미분탄이 가스화제와 함께 가스화기 내로 주입되면 건조과정(Drying)을 거친 후에 미분탄에 포함된 휘발분이 배출되는 탈휘발 과정(Devolatilization)을 거친다. 탈휘발 과정을 거친 미분탄 입자는 보통 구형이며, 내부에서부터 휘발분이 배출되었기 때문에 표면에는 작은 구멍과 틈이 나있으며, 다공성으로 변하여 원래 미분탄보다 부풀어서 크기가 커지게 된다. 탈휘발 과정이 끝난 후에 휘발분 연소(Volatile combustion)와 고정탄소 연소 반응(Char combustion)이 일어나게 된다. 기존 미분탄 연소와는 다르게 석탄가스화에서는 미분탄의 탄소 성분 중 일부분만이 완전연소되어 이산화탄소로 전환되는데, 이 때 발생된 열에너지는 가스화 반응에 필요한 에너지를 제공하는데 대부분 사용된다. 가스화 반응이 끝나고 남은 재는 높은 내부 온도로 인하여 녹아 슬래그 상태로 변하고 벽에 붙어서 아래쪽으로 배출하게 된다. 미분탄과 같이 가스화기 내로 주입되는 증기는 가스화기 내의 온도를 제어하는데 사용된다. 분류층 가스화기에서 사용되는 미분탄은 크기가 200 메쉬(74 $\mu$ m) 이하인 것이 사용되고, 평균 크기는 50 $\mu$ m 정도이다. 이 정도 크기의 미분탄이 완전히 가스화 과정을 거치는데 필요한 체류시간은 석탄의 종류에 따라 차이가 있지만 최소 3초에서 최대로는 10초 정도이다.<sup>(15)</sup>

2단 분류층 석탄가스화기에서 재 입자의 거동과 부착 문제는 재 입자가 벽에 달라붙어 응고되면 부식이 일어날 수도 있으며, 녹아있는 재가 D

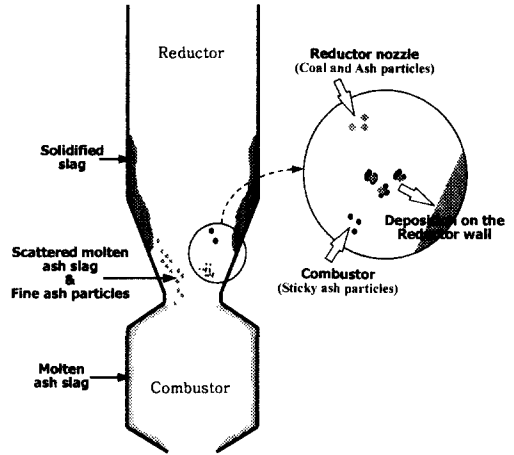


Fig. 3 Slagging problem in reductor

디퓨저의 벽에 달라붙게 된다면 쓰로우트가 막히는 현상이 일어날 수도 있으므로, 설계시에 꼭 고려해야할 사항이며 성능을 좌우하는 중요한 문제이다. 연소실과 환원실의 내부 온도 차이가 있으므로 재 입자가 연소실 내에서는 높은 온도 때문에 녹아서 끈적끈적한 상태로 존재하며, 환원실 내에서는 비교적 낮은 온도 때문에 녹지 않은 상태로 존재한다. 재 입자의 부착 문제는 연소실 내의 끈적끈적한 상태의 재 입자가 환원실 내로 유입되어 벽에 달라붙어 응고되어 발생한다. 재 입자의 부착은 Fig. 3와 같이 세 가지 형태로 일어나게 되는데, 첫 번째는 연소실 벽의 위쪽 부분에 생긴 슬래그가 쓰로우트 쪽으로 이동하면서 환원실 내부로 유입되어 벽에 부착되는 경우와 두 번째로 연소실 내의 끈적끈적한 상태의 재 입자가 환원실로 유입되어 벽에 부착되는 경우, 세 번째로는 연소실 내의 끈적끈적한 상태의 재 입자가 환원실 내로 유입되어 버너를 통해 주입된 미분탄 입자에 달라붙어 벽에 부착되는 경우이다.<sup>(4,5)</sup>

이와 같은 재 및 미분탄 입자의 거동은 유동특성에 의해 영향을 받는다. 특히 가스화제로 공기를 사용하는 경우, 산소를 사용하는 경우보다 유량이 많으므로 가스화기 내부의 유동특성이 석탄 가스화 효율에 미치는 영향이 커지고, 가스화기 내부의 유동특성은 시스템의 선회강도 및 출구면적의 변화, 쓰로우트 면적의 변화 등에 의해 좌우된다. 본 연구에서는 FLUENT를 사용하여 설계 변수에 따른 가스화기 내부의 유동특성 및 미

Table 1 Constants

$\theta_1$	30°	D	1.2m	L <sub>C</sub>	1.4m	H <sub>1</sub>	0.37m
$\theta_2$	23°	D <sub>out</sub>	0.6m	L <sub>R</sub>	6.0m	H <sub>2</sub>	0.77m
$\theta_3$	69°	D <sub>s</sub>	0.6m				
$\theta_4$	9°	D <sub>th</sub>	0.72m	L <sub>th</sub>	0.1m	H <sub>3</sub>	0.1m

분탄과 재 입자의 거동에 대한 수치계산을 수행하였다.

2. 수치 계산

수치계산을 위한 시스템은 Chen 등<sup>(4)</sup>에서 연구 대상으로 설정한 파일럿 플랜트를 참고하였다. 1996년 일본 Nakoso에 건설된 이 파일럿 플랜트는 200톤/일의 용량으로 산화제로는 공기를 사용하고 연소실에 2열, 환원실에 1열의 미분탄 버너가 각 열마다 4개씩 설치되어 있다. 시스템의 형상은 Fig. 4와 같으며 세부 치수는 Table 1에 나타내었다. Fig. 4에서와 같이 2단 분류층 가스화기에서는 버너를 접선방향으로 설치하여 선회유동을 형성하는데, 보통 연소실 버너 (1), (2)는 각도  $a_1, a_2$ 를 15~20° 정도로 설정하고 환원실 버너 (3)은 각도  $a_3$ 를 0°로 설정하여 중심축 방향을 향하게 한다. 연소실과 환원실 버너의 크기는 각각 한변이 5.4, 3.8cm인 정사각형이고, 모든 버너 입구에서의 속도는 40m/s로 일정하게 설정하였다.

냉간 유동 계산에서는 가압 상태의 비반응 유동장의 계산을 위해 3MPa, 1973K에서의 공기의 물성치를 사용하여 수행하였으며, 입자의 궤적은 50, 70 $\mu$ m의 두 가지 크기에 대해서 각각의 크기마다 입자의 밀도를 600, 800, 1400kg/m<sup>3</sup>으로 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 입자의 밀도는 반응이 완전히 끝나 재만 남아있는 입자(600kg/m<sup>3</sup>)와 건조와 탈휘발 과정을 거치고 반응이 완전히 끝나지 않아 고정탄소가 주성분인 입자(800kg/m<sup>3</sup>)와 버너를 통해 가스화기 내로 들어가는 초기 상태의 미분탄 입자(1400kg/m<sup>3</sup>)의 세 가지 경우를 선택하였다. 온도 분포를 알기 위한 열간유동 계산에서는 벽으로의 열손실은 무시하였다. 연소실 버너로 건조와 탈휘발 과정, 연소반응이 모두 끝난 2100K의 기체가 주입된다고 하였고, 환원실에서는 상대적으로 연소 반응이

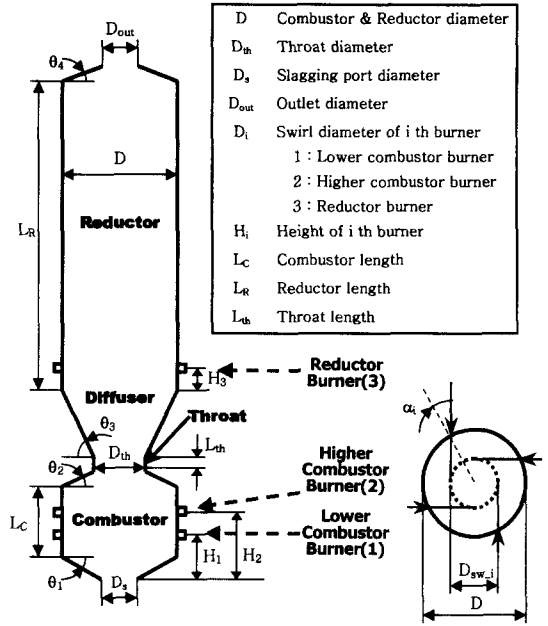


Fig. 4 Geometry of 2-stage entrained flow gasifier

적게 일어나므로 환원실 버너로는 1300K의 기체가 주입된다고 하였다. 환원실에서 일어나는 가스화 반응(흡열 반응)은 환원실에 에너지 방정식의 열소멸 항을 추가하는 것으로 대체하였다.<sup>(16)</sup> 기존의 논문들로부터 출구 온도는 약 1000-1200°C 정도이므로<sup>(8,9)</sup> 환원실의 열소멸 항은 출구 온도를 기준으로 설정하였다.

상용코드인 FLUENT의 타당성을 검증하기 위해 모의계산을 수행하였다. 모의계산은 1단 분류층 석탄가스화기내의 정상상태 유동에 대해 수행되었으며, 계산조건은 유영돈 등<sup>(17)</sup>을 참고하여 선정되었고, 계산결과는 이진욱 등<sup>(18)</sup>의 결과와 잘 일치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동특성 및 온도분포

Fig. 5는 환원실 버너의 설치각도( $a_3$ )를 0°로 설정하고, 연소실 버너에서의 설치각도( $a_1, a_2$ )를 0°, 5°, 15°, 30°로 변화시켰을 때의 계산 결과를 나타낸 것이다. 각각의 경우에서의 선회수는 0, 2.7, 8.0, 15.5이며, 가스화기 형상이 좌우대칭이므로 오른쪽 반의 결과만을 나타내었다. Fig. 5(a)는 선회가 없는 경우의 계산결과이다. 연

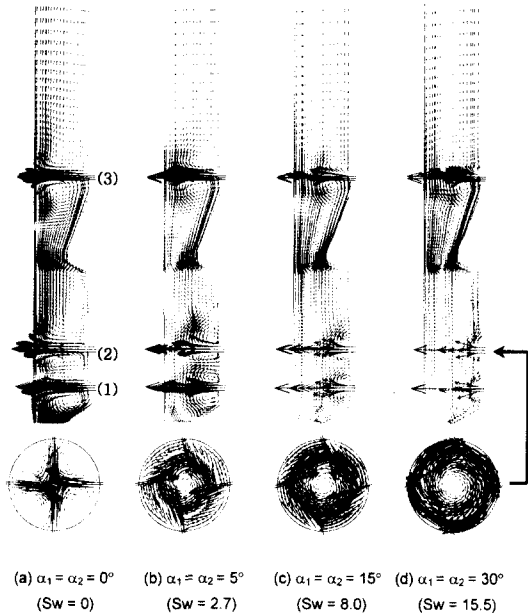


Fig. 5 Effect of swirl number on flow field

소실 버너 (2)에서 주입된 기체가 중심부에서 일부는 하부로 향하다가 버너 (1)에서 주입된 기체와 만나며 나머지는 Throat 쪽으로 빠르게 움직인다. 환원실 버너 (3)에서 주입된 기체는 중심부에서 일부는 상부로 이동하며, 나머지는 Throat를 통해 상부로 이동하는 기체와 만나 시계반대 방향으로 재순환 하는 영역이 형성된다. Fig. 5(b)는 선회유동의 효과가 작을 때의 계산결과이다. 연소실 버너 (1), (2) 주변에는 선회유동의 영향으로 재순환 영역이 나타나며, 연소실과 환원실 사이의 Throat에서는 상부로 향하는 유동이 형성된다. 환원실에서는 중심방향으로 기체가 주입되므로, 버너에서 주입된 기체가 중심부에서 만나 일부분은 하부로 향하다가 Throat에서 상부로 향하는 유동과 만나서 다시 상부로 향하며, 나머지는 상부로 향하는 유동이 형성된다. 환원실 버너에서 어느 정도 상부로 움직이면 균일한 유동을 나타내게 된다. Fig. 5(b)처럼 선회의 효과가 비교적 미약할 경우, Throat에서 상부로 향하는 유동이 형성되므로, 연소실에서 슬래그 상태로 존재하는 재 입자가 환원실로 유입되어 재의 부착 문제를 일으킬 가능성이 있다.

Fig. 5(c), (d)는 선회수가 증가함에 따라서 원심력의 영향이 커지므로(별첨 참조) 선회유동이 강

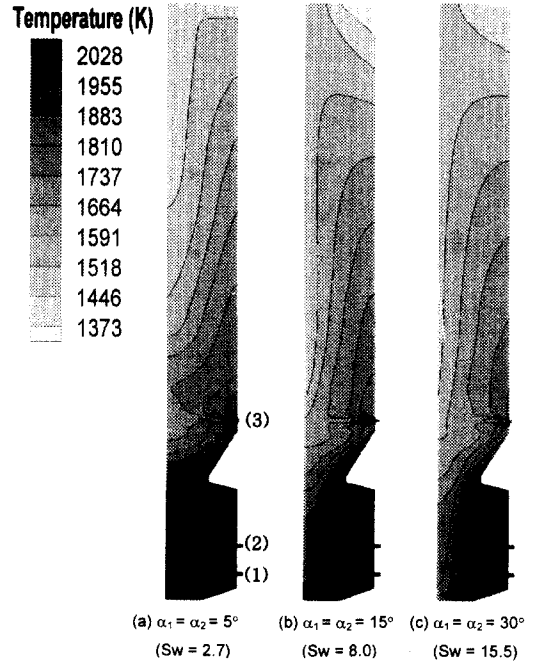


Fig. 6 Effect of swirl number on temperature distribution

해지며, 연소실 버너 주변의 재순환 영역이 축소되고 환원실과 Diffuser, Throat의 중심부에는 하부로 향하는 유동이 형성되고 벽 근처에서 상부로 향하는 유동이 형성된다. 선회유동이 강해질수록 Throat와 Diffuser의 중심부의 하부로 향하는 유동의 영역은 확대되며, 벽 근처의 상부로 향하는 유동의 영역은 축소되는 경향을 보여준다.

Fig. 6에서는 열간 유동 계산 결과로, 선회수에 따른 온도분포를 나타내었다. 연소실 내의 평균 온도는 2000K 이상이고 환원실 내에서는 온도가 위로 올라갈수록 감소하여 출구에서의 평균 온도는 약 1430K 정도이다. 연소실과 환원실을 분리하여주는 Throat에서의 평균 온도는 선회수가 증가할수록 낮아지지만, 벽면 근처의 상부로 향하는 유동의 영향을 받아서 Throat와 Diffuser의 벽면 근처에서의 온도는 연소실 내의 평균 온도와 거의 비슷하다. 선회수가 작을 때는 반경 방향의 온도차이가 적고 축 방향의 온도차이가 크게 나타나지만, 선회수가 증가할수록 반경 방향의 온도차이가 커지고 중심축 근처에 주위보다 온도가 낮은 영역이 확대되는 경향을 볼 수 있다. 이것

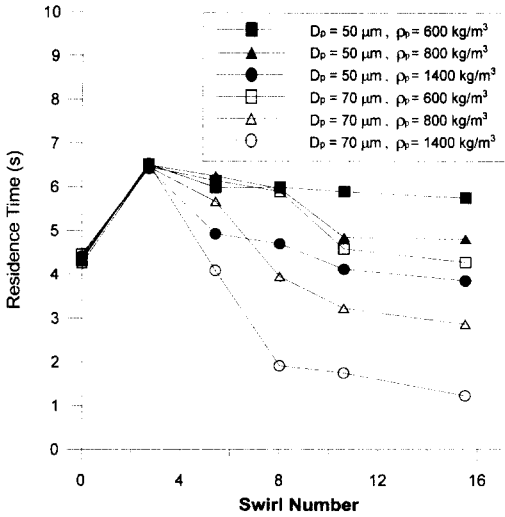


Fig. 7 Effect of swirl number on particle residence time in reductor

은 선회수가 증가할수록 기체가 벽면 쪽으로 치우치며 중심축 근처에는 아래쪽으로 향하는 유동이 형성되기 때문이라고 할 수 있다. 재 입자가 녹아서 슬래그 상태로 변하는 온도가 1500-1800K 정도이고 환원실 버너의 약간 위 부분까지의 내부 온도가 1600K 이상이므로 연소실 내에 존재하던 입자가 환원실 버너 근처까지 유입되거나 환원실 내의 중심축 근처에 생기는 재순환 영역 때문에 환원실 내의 입자가 버너 근처에 오래 머물게 된다면 녹아서 슬래그 상태로 변해 벽에 달라붙게 되어 응고되는 문제점을 발생시킬 수 있다고 예상할 수 있다.

3.2 입자거동

본 절에서는 유동계산 결과를 바탕으로 입자 거동을 논하기로 한다. 2단 분류층 석탄가스화기의 경우 환원실에서는 주로 가스화 반응이 일어나므로 환원실 내에서의 미분탄 입자의 체류시간이 가스화 효율에 커다란 영향을 미치게 되며, 서론에서 언급했던 것과 같이 환원실 내에서 입자의 체류시간은 경험적으로 약 3초 이상이어야 한다고 한다.

Fig. 7은 환원실 버너를 통해 주입된 입자의 평균 체류시간을 선회수에 따라 표시한 그래프이다. 선회유동이 없는 경우 입자의 평균 체류시간은 약 4.3초 정도이며, 약한 선회유동이 존재하는 경우 입자가 나선형 궤적을 그리며 움직이므로

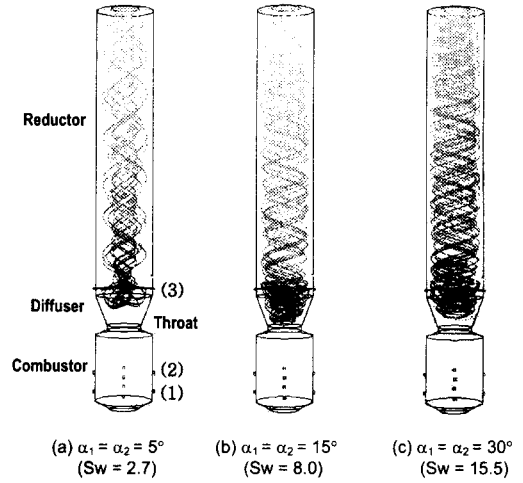


Fig. 8 Effect of swirl number on particle trajectory in reductor ( $D_p = 50 \mu m, \rho_p = 600 \text{ kg/m}^3$ )

선회가 존재하지 않는 경우의 직선 궤적보다 긴 행로를 거치게 되므로 체류시간이 약 6.5초 정도로 길어지지만 선회유동이 강해짐에 따라서 체류시간이 감소하고 입자의 크기 또는 밀도가 큰 경우 체류시간이 감소한다. Fig. 7의 결과로 미루어 보아 선회수가 약 8 이상인 경우에는 체류시간의 감소를 초래하며 이는 불완전한 가스화 반응이 일어날 수 있음을 의미한다.

일반적으로 입자는 기체의 유동장을 따라 움직이게 되는데, 환원실 버너를 통해 주입된 입자의 평균 체류시간은 기체의 출구방향 속도의 크기에 영향을 받게 된다. 선회수가 증가하면 원주방향 속도가 증가하므로 입자가 받게되는 원심력의 크기가 커지고 Fig. 8에서 보는 것과 같이 입자의 궤적은 벽면 쪽으로 치우치게 된다. Fig. 5의 결과와 같이 선회유동이 존재하면 중심축에서 벽에 가까워질수록 출구 쪽으로 향하는 기체의 속도가 증가하며 선회수가 커질수록 속도가 증가하는 비율이 커진다. 선회수가 증가하면 입자가 영향을 받는 기체의 출구방향 속도의 크기는 증가하며, Fig. 7에서 설명한 바와 같이 입자의 평균 체류시간은 감소하게 된다. Fig. 7에서는 또한 입자의 크기가  $70 \mu m$ 인 경우에 입자의 크기가  $50 \mu m$ 인 경우보다 체류시간이 작으며, 입자의 밀도가 커질수록 체류시간이 작아지는 경향을 보인다.

원심력은 입자 크기의 세제곱에 비례하고(원심력 ~ 입자질량) 입자의 밀도에 비례하므로, 입자의

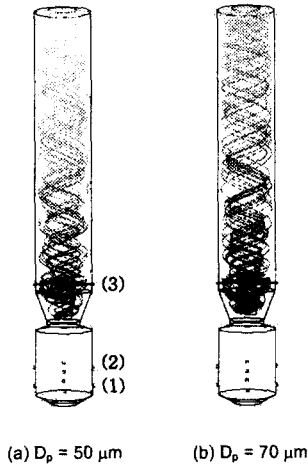


Fig. 9 Effect of particle diameter on particle trajectory in reductor ( $Sw=8$ ,  $\rho_p=600 \text{ kg/m}^3$ )

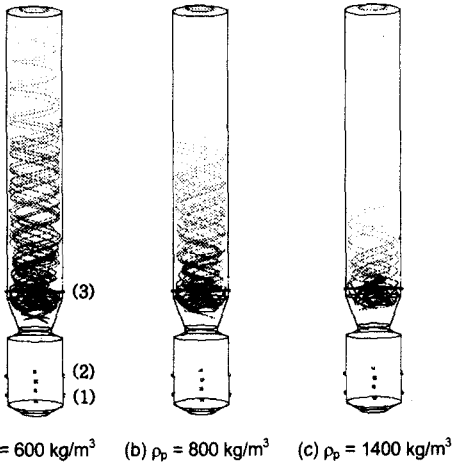


Fig. 10 Effect of particle density on particle trajectory in reductor ( $Sw=15.5$ ,  $D_p=70\mu m$ )

크기가 커지거나 입자의 밀도가 증가하면 Fig. 9, 10에서와 같이 입자의 궤적이 벽 쪽으로 치우치는 경향을 보이며, 벽에 가까워질수록 기체의 출구 방향 속도의 크기가 증가하므로, 입자의 평균 체류시간이 감소한다. 그리고 입자의 크기가 커지거나 밀도가 증가하면 관성이 크게 작용하므로 미처 유동을 따라가지 못하고, 출구까지 도달하여 밖으로 나가기 전에, 환원실 벽면에 부착되는 입자의 개수가 많아져서, 입자의 평균 체류시간이 급격하게 감소한다. 입자의 크기가  $70\mu m$ 이고

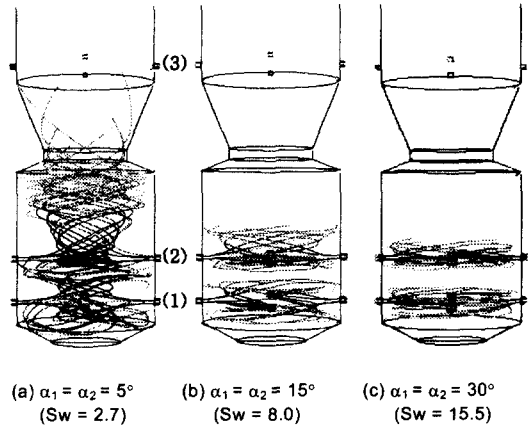


Fig. 11 Effect of swirl number on particle trajectory in combustor ( $D_p=50 \mu m$ ,  $\rho_p=1400 \text{ kg/m}^3$ )

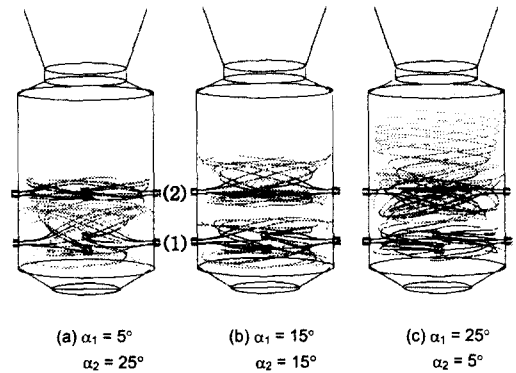


Fig. 12 Effect of combustor burner angle on particle trajectory in combustor ( $Sw = 8$ ,  $D_p = 50 \mu m$ ,  $\rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3$ )

밀도가  $1400\text{kg/m}^3$ 일 때 선회수가 8.0 이상인 경우에 평균 체류시간이 2초 이하인데, 이 경우 환원실 버너 (3)을 통해 가스화기 내로 주입된 모든 입자가 출구로 빠져나가기 전에 벽면에 부착되기 때문이다.

Fig. 11에서는 선회수에 따른 연소실에서의 입자의 거동을 나타내었다. 환원실로 주입되어 가스화 반응을 거친 후 남은 재 입자와 미처 반응을 끝내지 못한 미분탄 입자는 가스화기 출구를 통해 밖으로 배출된 다음 사이클론을 통해 분리되어 연소실 버너를 통해 다시 주입된다. 연소실 내로 주입되면 연소 반응을 통해 재만 남게 되

고, 높은 내부온도로 인하여 슬래그 상태로 변한다. 다음, 선회유동에 의하여 분리되어 벽으로 달라붙어 아래쪽으로 배출된다. Fig. 11(a)에서 선회수가 작은 경우 연소실의 2열의 버너를 통해 주입된 입자 중 일부가 연소실을 벗어나 환원실 쪽으로 유입되거나 Throat에 달라붙었다. Fig. 11(b), (c)에서 선회수가 증가할수록 연소실 위쪽으로 이동하지 못하고 연소실 버너 근처에 부착된다. 따라서 선회수의 증가는 입자의 환원실 유입을 방지하는 효과가 있다.

Fig. 12에서는 선회수를 8.0으로 고정시키고 연소실에 설치된 2열의 버너의 설치각도를 3가지로 다르게 변화시켰을 때 연소실 내의 입자 궤적을 나타내었다. Fig. 12(a)와 같이 버너 (1)의 설치각도를 작게 하고, 버너 (2)의 설치각도를 크게 했을 경우, 입자의 궤적이 버너 위쪽으로 올라가지 않으며 부착높이가 낮아진다. Fig. 12(c)와 같이 버너 (1)의 설치각도를 크게 하고, 버너 (2)의 설치각도를 작게 했을 경우, 입자의 궤적이 위쪽을 향하며 부착높이가 높아진다. Fig. 12는 주어진 시스템의 선회수와 밀도의 경우이지만 밀도가 낮은 입자나 선회수를 낮게 설정하였을 경우에는 버너 (1)의 설치각도가 버너 (2)의 설치각도보다 크게 한다면, 연소실 내에 존재하는 입자가 환원실 쪽으로 유입되거나 Throat에 달라붙어 입자의 부착문제를 일으킬 수 있는 가능성이 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2단 분류층 석탄가스화기에 대해서 냉간 및 열간 유동 계산을 통하여 선회수 및 버너의 각도에 따른 유동특성 및 온도분포와 입자 궤적을 계산하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 선회수가 증가할수록 버너 주위의 재순환 영역이 축소되고, 벽 쪽으로 기체가 물리게 되며 중심축 근처의 하부로 향하는 유동의 영역이 확대되는 형성되는 경향이 나타난다.

(2) 선회수가 작을 때는 반경 방향의 온도차이가 적고 축 방향의 온도차이가 크게 나타나지만, 선회수가 증가할수록 반경 방향의 온도차이가 커지고 중심축 근처의 저온 영역이 확대되는 경향을 볼 수 있다. 중심축 근처의 저온 영역은 냉간 유동 계산의 결과에서 중심축 근처의 하부로 향

하는 유동의 영역과 일치한다.

(3) 연소실 버너를 통해 주입된 입자는 선회수가 증가하면 위쪽으로 이동하지 못하고 버너 주위에 부착되며 환원실 쪽으로 유입되는 입자의 개수가 줄어든다.

(4) 선회수가 같고 연소실에 설치된 두 열의 버너의 설치각도가 다를 때, 아래 열 버너의 설치각도보다 위 열 버너의 설치각도를 크게 하면 연소실 내의 입자가 환원실 쪽으로 유입되는 것을 방지하기에 용이하다는 것을 알 수 있다.

(5) 환원실 버너를 통해 주입된 입자의 평균 체류시간은 선회수가 증가할수록, 입자가 커질수록, 입자의 밀도가 증가할수록 감소한다.

분류층 석탄가스화기에서는 선회유동을 형성하여 미분탄과 가스화제의 혼합을 원활하게 하고 슬래그를 분리하여 벽에 달라붙게 하여 아래쪽으로 배출한다. 선회수가 작으면 선회유동이 미약하므로 미분탄과 가스화제의 혼합, 슬래그의 분리 등의 효과를 기대하기 어렵고, 연소실 내의 슬래그 상태의 입자가 환원실 쪽으로 유입되거나 Throat에 달라붙어 슬래그가 벽에 부착되어 응고되는 문제가 생길 수 있다. 선회수가 크면 강한 선회유동의 영향으로 기체가 벽 근처로 집중되어 미분탄과 가스화제가 잘 혼합되지 못하고 연소실과 환원실 내의 입자가 연소 반응과 가스화 반응을 미처 끝내지 못하고 벽에 부착될 가능성이 있으므로 최적의 선회수를 결정할 필요가 있다. 또한 같은 선회수에 대해서는 선회수를 증가시키지 않고 연소실의 위 열 버너의 설치각도를 아래 열 버너의 설치각도보다 크게 설정함이 환원실로의 입자 유입 방지에 유리하다.

#### 후 기

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 전력기술 기초연구 지원과제(99-지-13)로 수행한 연구의 일부이며, 이에 감사드리고, 도움을 주신 ATES(주)의 이진욱 박사님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 지평삼, 김종진, 정진도, 김남호, 1992, "석탄 가스화 복합발전 기술동향," 대한기계학회지, 제



- 32권, 제12호, pp. 1076~1086
- (2) McMullan, J. T., Williams, B. C. and Sloan, E. P., 1997, "Clean Coal Technology," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 211 Part A, pp. 95~107
- (3) 통상산업부, 1997, 석탄가스화 복합발전 기반 기술개발, 최종보고서.
- (4) Chen, C., Miyoshi, T., Kamiya, H., Horio, M. and Kojima, T., 1999, "On the Scaling-up of a Two-stage Air Blown Entrained Flow Coal Gasifier," *Canadian J. Chem. Eng.*, Vol. 77, pp. 745~750.
- (5) Koyama, S., Morimoto, T. and Ueda, A., 1996, "A Microscopic Study of Ash Deposit in A Two-stage Entrained-bed Coal Gasifier," *Fuel*, Vol. 75, No. 4, pp. 459~465.
- (6) Brown, B. W., Smoot, L. D., Smith, P. J. and Hedman, P. O., 1988, "Measurement and Prediction of Entrained-Flow Gasification Processes," *AIChE J.*, Vol. 34, No. 3, pp. 435~446.
- (7) Kane, R. S. and McCallister, R. A., 1978, "Scaling Laws and the Differential Equations of an Entrained Flow Coal Gasifier," *AIChE J.*, Vol. 24, No. 1, pp. 55~63.
- (8) Moritsuka, H. and Hamamatsu, T., 1990, "Study of Power Generation Use Large-Scale Pressurized Two-Stage Entrained Bed Gasifier's Dynamics," *CRIEPI Report*, EW90007.
- (9) Moritsuka, H. and Hamamatsu, T., 1989, "Evaluation Method of Coal Gasification Combined Cycle Power Generation Plant's Performance and Gasification Characteristics," *CRIEPI Report*, EW89001.
- (10) 이진옥, 윤용승, 1995, "석탄 가스화기내의 기체-고체 이상유동장에 대한 수치해석 연구," 한국에너지공학회지, 제4권, 제3호, pp. 331~337.
- (11) 조한창, 신현동, 1999, "분류층 석탄반응로에서 유동분포가 연소성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(B), 제23권, 제8호, pp. 1022~1030.
- (12) 이선경, 나혜령, 장동순, 정진도, 지평삼, 1995, "전산유체역학을 이용한 분류층 석탄가스화기 설계연구," 한국에너지공학회지, 제4권, 제1호, pp. 23~30.
- (13) Vamvuka, D., Woodburn, E. T. and Senior, P. R., 1995, "Modeling of an Entrained Flow Coal Gasifier: 1. Development of the Model and General Predictions," *Fuel*, Vol. 74, No. 10, pp. 1452~1460.
- (14) Vamvuka, D., Woodburn, E. T. and Senior, P. R., 1995, "Modeling of an Entrained Flow Coal Gasifier: 2. Effect of Operating Conditions on Reactor Performance," *Fuel*, Vol. 74, No. 10, pp. 1461~1465.
- (15) 이진옥, 2000, Personal communication
- (16) 이진옥, 윤용승, 안달홍, 1999, "석탄가스화기 내화재 온도분포 및 열손실 해석," 한국에너지공학회지, 제8권, 제1호, pp. 67~75
- (17) 유영돈, 윤용승, 박호영, 안달홍, 1997, "분류층 건식 석탄가스화기에서의 가스화 특성," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제12호, pp. 1690~1700.
- (18) 이진옥, 나혜령, 윤용승, 1997, "선회분류층형 석탄가스화기내의 비반응 난류 선회유동장 해석," 한국에너지공학회지, 제6권, 제2호, pp. 137~144.
- (19) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers.

## 부 록

선회유동의 강도는 선회수로 나타내는데, 선회수(Swirl number,  $Sw$ )는 축방향 운동량에 대한 원주방향 운동량의 비로 정의된다.<sup>(19)</sup>  $i$ 번째 열 버너의 설치각도가  $\alpha_i$ 이고 버너 입구에서의 기체의 속도가  $V_i$ 이고,  $i$ 번째 열로 주입되는 기체의 비율이  $\gamma_i$ 이다. 모두 3열의 버너가 설치되어있고, 각 열마다 4개의 버너가 존재한다면 선회수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이때  $R$ 은 가스화기의 반지름이고,  $R_{Bi}$ 는  $i$ 번째 열 버너의 반지름이다. 식 (1)로부터 선회수는 시스템의 형상에 의존함을 알 수 있다.

$$Sw = \frac{\text{Circumferential momentum}}{\text{Axial momentum} \times \text{Length scale}} = \frac{\dot{m} R \sum_{i=1}^3 \gamma_i \sin \alpha_i V_i}{4 \dot{m} \sum_{i=1}^3 \frac{R_{Bi}^2}{R^2} V_i \times R} \quad (1)$$

1개의 열에 대해서만 생각해보면, 식 (1)은 (2)와 같이 된다.

$$Sw = \frac{1}{4} \frac{R^2}{R_B^2} \sin \alpha \quad (2)$$

유량  $\dot{m}$ 의 기체를 각도  $\alpha$ 로 기울여 설치된 4개의 버너를 통해 주입하기 때문에 생기는 원심력  $F_c$ 는 버너입구에서의 원주방향 속도성분이  $V \sin \alpha$ 이므로 식 (3)과 같다.

$$F_c = \frac{\dot{m} (V \sin \alpha)^2}{R} = \frac{4\pi\rho R_B^2 V^3 \sin^2 \alpha}{R} \quad (3)$$

따라서 가스화기 내 기체에 작용하는 원심력  $F_c$ 는 식 (4)에서와 같이 선회수의 제곱에 비례한다.

$$F_c = 64\pi\rho \frac{R_B^6}{R^5} V^3 Sw^2 \quad (4)$$

$$\propto Sw^2$$