

2단 연소방법에 의한 미분탄 연소기의 특성에 관한 이론적 연구

주남로(고려대 대학원), 최상일(에너지기술연구소), 김호영 (고려대 기계공학과)

Theoretical Study on the Characteristics of Pulverized Coal Combustor with 2 Stage Combustion

Nahm-Roh Joo(Grad. School, Korea Univ.),

Sang-II Choi(Korea Institute of Energy Research), Ho-Young Kim (Korea Univ.)

ABSTRACT

In the combustion of the pulverized coal compared with that of liquid fuel or gaseous fuel, serious pollutants such as ash, NO_x and SO_x are released to surroundings. The objective of this study is the reduction of such pollutants in the combustion process. The modeling of cyclone combustor which uses the method of two stage combustion was carried out. The main burner length, scattering angle and air/fuel ratio were considered as parameters. The results show that the shorter the main burner length is, the less the amounts of coals which exit the combustor directly are, but the scattered input of coal is required anyway in order to collect all ashes. It is recommended that the shorter the main burner length is, the less the scattering angle is. And in the case of the scattered input compared with no scattering, the temperature in the combustor is more uniform and the amount of volatile is more reduced.

1. 서론

기체 연료나 액체 연료에 비해 석탄의 연소시에는 보다 심각한 공해 물질이 발생되며 그 중 가장 문제시되고 있는 것으로는 배기 가스 중의 분진, 질소 산화물, 아황산가스 등이 있다. 미분탄 연소 설비에서 발생하는 이러한 공해 물질의 방지 대책은 다음과 같다. 첫째, 연소 후 발생하는 분진에 대하여는 집진기에 의해 비교적 완벽하게 제거되고 있지만, 연소 과정에서 발생하는 분진에 의한 보일러 내의 슬래깅(slagging) 현상과 파울링(fouling) 현상에 대한 대책이 필요하다. 둘째, 질소 산화물은 아직까지 연소용 공기의 단계적 공급, 배기 가스 재순환 기술 등을 이용하여 부분적으로 NO_x 를 저감하고 있으나 아직까지 미흡한 상태이다. 셋째, 아황산가스의 경우는 아직까지 아무런 방지 설비 없이 단지 저 유황 석탄만을 선택적으로 사용함으로써 배출을 감소시키고 있으나 연료 수급의 다양화와 배출량 감소를 위하여는 고 유황 석탄 사용을 위한 근본적인 대책이 필요하겠다.

이러한 공해 물질의 제거를 위하여 연소 전의 석탄 전처리 방법과 연소 과정에서의 공해 물질의 제거 방법 그리고 연소 후의 배기 가스 정화 방법이 있으나 본 연구에서는 연소 과정에서의 공해 물질의 제거 방법에 의한 저공해 연소 기술에 대하여만 검토하기로 한다.

본 연구에서는 2단 동축형 사이클론 연소기에 대하여 주버너의 길이를 변화시키며 또한 미분탄 입자에 분사각을 주어 연소기에 공급할 때 각각의 공기비에 대하여 연소기 내의 유동 및 연소 특성을 계산하였다. 결과로서 공기와 미분탄 입자간의 상호 작용을 고려한 공기의 유동장 및 미분탄 입자의 궤적을 파악하여 출구로 바로 빠져나가는 입자를 감소시키려 하였으며 또한 연소기내의 온도장을 해석하여 균일한 온도 분포를 제시하고자 하였으며, 미분탄 입자에서 방출된 휘발성분의 분포를 해석하여 연소 결과를 고찰하였다.

2. 이론

본 연구에 사용된 모델은 2단계 동축형 사이클론 연소기로서 예연소기(pre-combustor)와 주연소기(main combustor)로 구성되어 있으며, 측면에는 선회를 주기위해 85° 경사진 채 원주에 대하여 접선 방향으로 그리고 원점에 대하여 대칭으로 각각 2개씩의 보조 버너가 설치되어 있고 중심 축에는 주버너가 있다. 미분탄의 연소를 위해서는 첫째, 미분탄의 이송에 사용되는 1차 공기가 필요하며 둘째, 1차 공기와 함께 분사되는 미분탄을 완전히 연소시키기 위한 추가의 2차 공기가 필요하다. 예연소기는 주연소기에 고온의 공기를 공급하는 것이 주된 목적이므로 공기비를 높게 유지하게 한다. 그에따라 예연소기로부터 유입되는 가열 공기와 주연소기에 공급되는 고온의 예열 공기에 의해 주연소기내에서는 고온의 연소가 이루어지게 된다.

본 연구에서는 예연소기와 주연소기에 부착되어 있는 보조 버너를 3차원 형상으로 보지 않고 원주 전체를 통해 균일하게 공급된다고 가정하여 2차원 축대칭 문제로 이상화시켰다. 축대칭 원통 좌표계에서 비압축성 유체에 대한 지배방정식은 다음과 같다. 이 경우 지배방정식은 θ (azimuthal) 방향의 변화 즉 $\frac{\partial}{\partial \theta}$ 를 0 으로 취하여 간단히 한다.

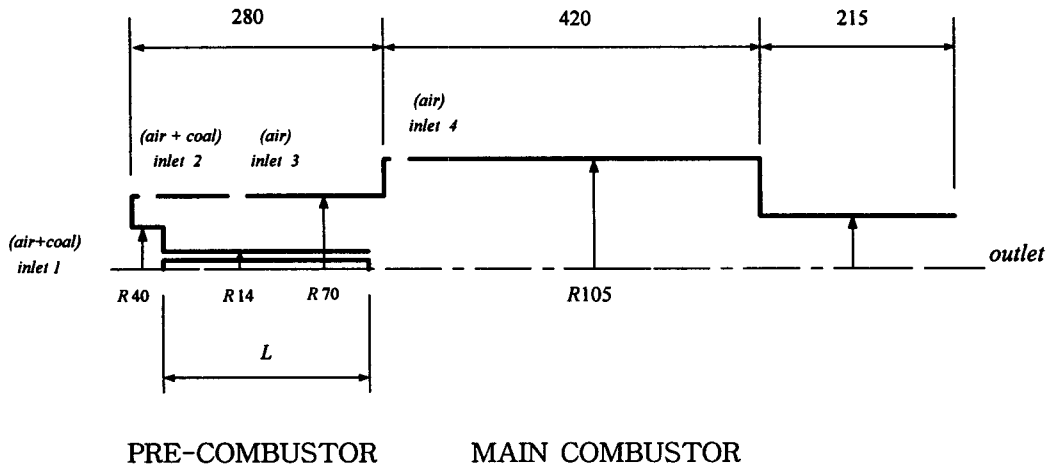


Fig. 1 Schematic shape of two-stage combustor

- 연속방정식

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

- 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{xr})}{\partial r} + f_x \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\rho v^2}{r} + \frac{\partial(\tau_{xr})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial r} + f_r \quad (2b)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v w) = -\frac{\rho v w}{r} + \frac{\partial(\tau_{x\theta})}{\partial x} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + f_\theta \quad (2c)$$

$k-\epsilon$ 모델을 사용하여 레이놀즈 응력 항을 해석하고 와류 점성을 구한다.

- 성분 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u m_{i'}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v m_{i'}) = -\frac{\partial}{\partial x}(J_{i',i}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r J_{i',i}) + R_{i'} + S_{i'} \quad (3)$$

- 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v h) = \frac{\partial}{\partial x}((k+k_t) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r(k+k_t) \frac{\partial T}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial x}(\sum_j h_j J_{j'}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \sum_j h_j J_{j'}) + S_h \quad (4)$$

- 복사에너지

복사 에너지는 복사 강도 I를 조화 함수의 수열로 전개시킨 간단한 P-1 모델을 이용하였다.

- 화학 반응 모델

생성률 R_i 는 반응 k 에서의 생성률 $R_{i,k}$ 의 합으로 나타내어진다. 즉, $R_i = \sum_k R_{i,k}$ 이다.

반응률 $R_{i,k}$ 는 Arrhenius 반응률 모델 또는 Eddy breakup 모델에 의해 결정되는데 이 두 모델 가운데 작은 값을 반응률 $R_{i,k}$ 로 채택한다.^[7]

- ① Arrhenius 반응률 모델

순수 화학 반응에 대한 Arrhenius 반응률은 다음과 같다.

$$R_{i,k} = \nu'_{i,k} M_i T^{\beta_k} A_k \prod_{j' \text{ reactants}} C_{j'}^{\nu_{j'}} \exp(-E_k/RT) \quad (5)$$

- ② Eddy breakup 모델

반응률에 미치는 난류의 영향은 Magnussen & Hjertager 모델을 적용하여 고려한다.

이 모델은 와류(eddy)가 있는 성분의 소멸률을 반응률과 서로 관련시킨 것이다.

$$R_{i,k} = \nu'_{i,k} M_i A \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{m_R}{\nu_{R,k} M_R} \quad (6a)$$

$$R_{i,k} = \nu'_{i,k} M_i A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P m_P}{\sum_P \nu_{P,k} M_P} \quad (6b)$$

- 입자의 운동 방정식

힘은 입자와 기체상간의 항력만을 고려하고 기타 중력, 부력, Virtual mass 효과, Basset 힘, 회전효과 등은 무시한다. x 방향에 대한 입자의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re_D}{\rho_p D_p^2 24} (u - u_p) \quad (7)$$

- 물질전달 및 열전달 방정식

- ① 불활성 가열

$T_p < T_{vap}$ 일 때로서 물질전달은 없고 열전달만 있는 상태로서 입자가 가열되고 있는 상태이다. 물질전달이 없으므로 입자의 질량은 변화가 없다.

$$\frac{dm_p}{dt} = 0 : m_p = m_{p0} \quad (8)$$

입자로 전달되는 열은 대류 열전달과 표면에서의 복사열흡수와 관련된다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (T_R^4 - T_p^4) \quad (9)$$

- ② 휘발성분의 방출

입자에 존재하는 초기 휘발성분율을 f_{v0} 라 할 때, 이 상태는 $T_p \geq T_{vap}$ 이고 $m_p > (1 - f_{v0}) m_{p0}$ 일 때로서 물질전달과 열전달 모두 존재하며 입자의 지름도 변한다.

휘발성분의 방출율은 Kobayashi가 제안한 Two Competing Rates 모델을 사용하여 계산되는데 이는 온도 범위에 따라 휘발성분의 방출율이 다르다고 가정한다.

$$R_1 = A_1 \exp(-E_1/RT_p), \quad R_2 = A_2 \exp(-E_2/RT_p) \quad (10)$$

이러한 방출율에 따라 입자의 질량은 입자에 남아있는 휘발성분의 양에 선형적으로 비례하여 감소한다.

$$\frac{dm_p}{dt} = -R(m_p - (1 - f_{v0})m_{p0}) \quad (11)$$

입자로 전달되는 열은 대류 열전달, 휘발성분이 증발되는 동안 소비된 열량, 표면에서의 복사열 흡수와 관련된다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (12)$$

휘발성분이 방출되는 동안 입자의 지름은 swelling 계수 (C_{sw})에 따라 다음과 같이 변한다.

$$D_p/D_{p0} = 1 + (C_{sw} - 1) \frac{m_{p0} - m_p}{f_{v0} m_{p0}} \quad (13)$$

③ Char의 연소

입자에 있는 휘발 성분이 완전히 방출된 후 입자의 가연 분율을 f_{comb} 라 할 때, 이 상태는 $(1 - f_{v0} - f_{comb}) m_{p0} < m_p < (1 - f_{v0}) m_{p0}$ 일 때로서 차(char)의 연소가 시작된다. 차의 연소 반응식은 다음과 같다.



이 때는 물질 전달과 열전달이 모두 존재하지만 입자의 지름은 변하지 않는다.

차의 반응율을 구할 때는 Baum & Street 와 Field의 diffusion/kinetic rate 모델을 적용한다.

$$R_1 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{D_p}, \quad R_2 = C_2 \exp(-E/RT_p) \quad (15)$$

이러한 차의 반응율의 조화 평균에 따라 입자의 질량 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p^2 P_O \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

입자로 전달되는 열은 대류 열전달, 차의 반응열 중 입자에 흡수된 열량, 표면에서의 복사열 흡수와 관련된다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (17)$$

④ 재

휘발성분도 방출되고 고정 탄소도 연소되고 난 후 남은 불활성 상태로서 질량 분율이 $m_p < (1 - f_{v0} - f_{comb}) m_{p0}$ 인 상태이다. 이 때는 물질전달 및 열전달은 없다.

● 기체상과 고체상의 에너지 교환

입자의 궤적이 계산되는 동안 그 궤적을 따라 입자는 물질, 운동량 및 열을 기체상과 교환한다. 물질 교환은 기체상 연속 방정식, 성분보존방정식의 생성원이 되며, 운동량 교환은 기체상 운동량 보존방정식의 생성원이 되며, 열교환은 기체상 에너지 보존방정식의 열 생성원이 된다.

3. 조건 및 상태량

본 연구에 사용된 석탄은 알래스카(Alaska) 석탄으로서 휘발성분이 비교적 많이 함유되어 있다. 그 성분 분석 결과는 다음 Table 1과 Table 2에 나타나 있다. 입구 1과 2에서 공급된 석탄 입자는 $70\mu\text{m}$ 이하의 입자가 70%가 되도록 분쇄되어 있으며 Rosin-Rammler 분포를 따르고 있다. 그리고, 휘발성분은 C_3H_8 로 가정하였다. 유량에 따른 입구에서의 속도 조건은 다음 Table 3과 같고, 벽면은 단열조건이며 벽면함수를 사용하였다.

Table 1 Proximate Analysis^[9]

Volatile	Fixed Carbon	Ash	Moisture
44.85	35.64	14.42	5.09

Table 2 Ultimate Analysis^[9]

C	H	O	N	S
54.4	4.55	26.16	0.64	0.17

Table 3 Inlet Velocity Condition and coal feedrate

CASE	Inlet			
	Inlet 1 (상온)	Inlet 2 (상온)	Inlet 3 (250℃)	Inlet 4 (250℃)
CASE 1	5.5	12.0	12.0	26.0
	Pre-combustor A/F=1.8		Main combustor A/F=1.33	
CASE 2	5.5	14.0	14.0	23.0
	Pre-combustor A/F=2.0		Main combustor A/F=1.33	
Coal Feedrate (kg/hr)	Pre-combustor : 5 kg/hr		Main combustor : 10 kg/hr	

4. 결과 및 고찰

4.1 속도 분포

Fig.2는 각각의 위치에서 유체의 속도 분포를 그린 것이다. 연소 현상이 없는 유체의 유동만을 계산한 결과를 보면 복잡하지 않은 유동장을 형성하고 있으며 또한 조건의 변화에 따른 속도 분포의 변화는 거의 없다. 연소 현상이 있을 때의 속도 분포를 보면 연소 현상이 없을 때에 비해 상당히 크고 복잡한 모습을 보이고 있다. 이는 연소 결과 휘발성분이 방출되면서 새로운 유동장이 생겼으며 미분탄 입자와 공기와의 물질, 운동량 및 열 전달은 유체의 속도 분포에 많은 변화를 주게 된 것이다. 예연소기에서는 유량이 큰 조건 2의 경우가 큰 속도 분포를 보이고 있다. 그리고 분사각이 있는 경우 주연소기의 앞부분에서 유동이 위로 상승하는 것을 볼 수 있다.

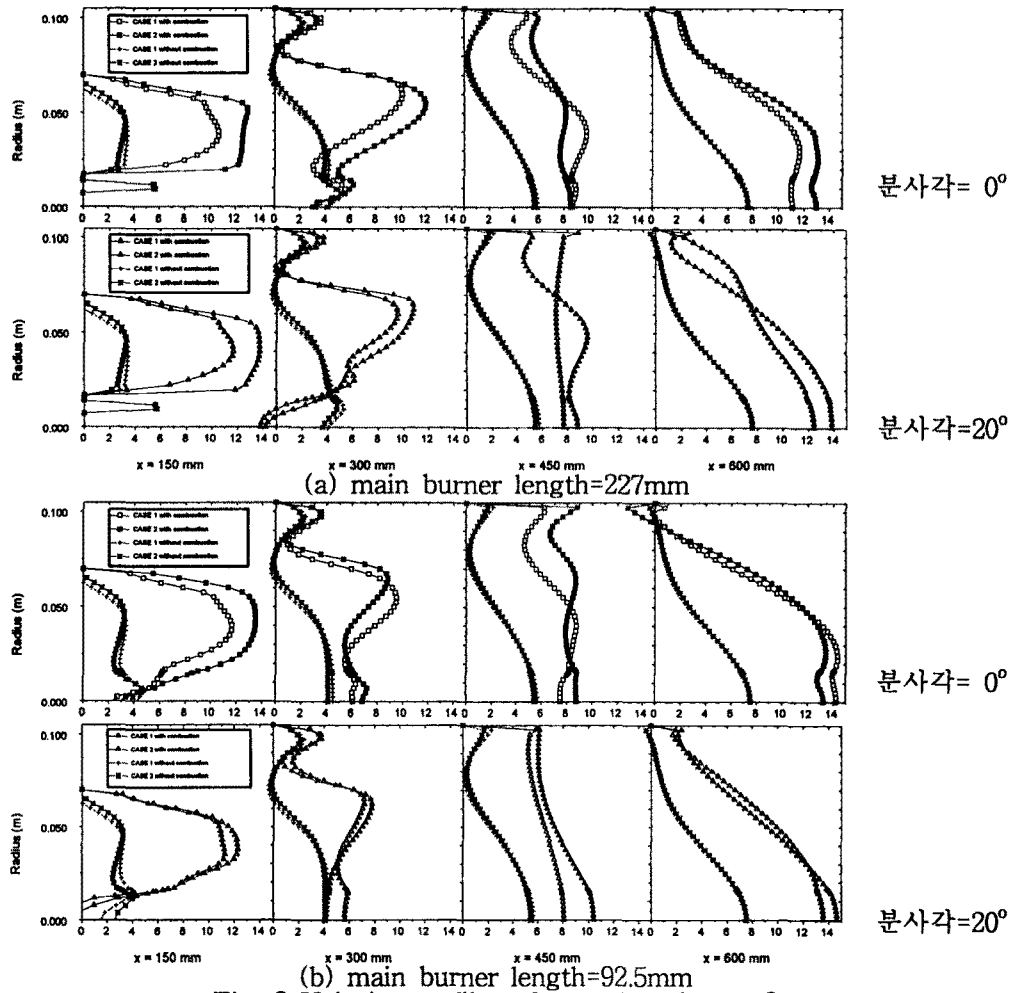


Fig. 2 Velocity profiles of case 1 and case 2

4.2 입자 궤적

Fig.3은 입구 1과 입구 2에 각각 15개의 입자를 위치시켰을 때 이들의 궤적을 그린 것이다.

Fig. 3 (a)는 주버너의 길이가 227mm일 때 입자 궤적의 모습이다. 분사각이 0° 일 때, 입구 1에서 유입된 입자는 거의 주연소기의 중앙 부분까지 직진하다가 바깥 부분에 있는 1/3 가량의 입자는 선회의 영향으로 회전 운동을 하게 되고, 중심축 부분에 있는 2/3 가량의 입자는 계속 직진 운동을 하여 곧바로 출구로 빠져나가고 있다. 회전하게 된 입자는 입구 2에서 유입된 입자와 함께 주연소기의 끝에서 회전하면서 충분히 연소하지만 바로 빠져나간 입자는 보일러 내에서 슬래깅(slugging) 현상과 파울링(fouling) 현상을 일으키게 되어 열전달과 가스의 흐름을 방해한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주버너의 길이의 변화 또는 분사에 의한 방법이 필요하게 된 것이다. 분사각이 20° 일 때는 바로 빠져나가는 입자는 거의 사라지게 되며 모든 입자가 주연소기의 끝부분에서 회전하면서 그 부분에서 고온 영역을 만들게 된다.

Fig. 3 (b)는 주버너의 길이가 92.5mm일 때 입자 궤적의 모습이다. 분사각이 0° 일 때는 입구 1에서 유입된 입자는 2/3 가량은 회전 운동을 하게 되며 1/3 가량은 계속 직진 운동을 하여 그대로 출구로 빠져나간다. 주버너의 길이가 짧아짐에 따라 바로 빠져나가는 입자는 줄어들지만 여전히 바로 빠져나가는 입자가 있게 되므로, 약간의 분사각이 필요하다고 판단된다. 분사각이 20° 일 때는 주버너의 길이가 짧아짐에 따라 20° 분사각까지 있어 입자가 주연소기의 앞부분에서 강한 선회에 의해 제자리 회전하기도 하고 주연소기의 중앙 부근에서 제자리 회전하기도 한다. 입자의 궤적이 너무 앞쪽에 치우쳐 있으며, 입구 2에서 유입된 입자가 주연소기로 들어오지 못하는 것도 있기 때문에 그다지 좋은 조건이 아니라고 판단된다.

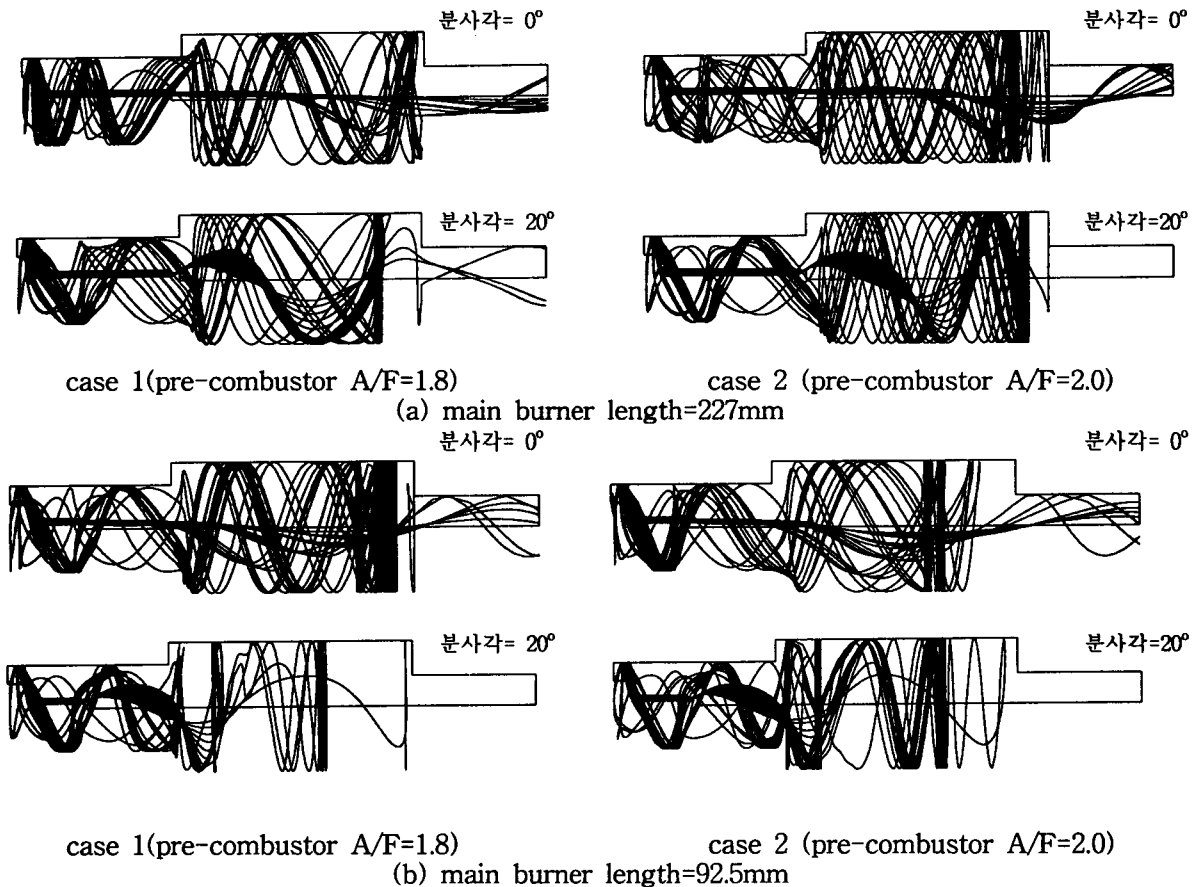


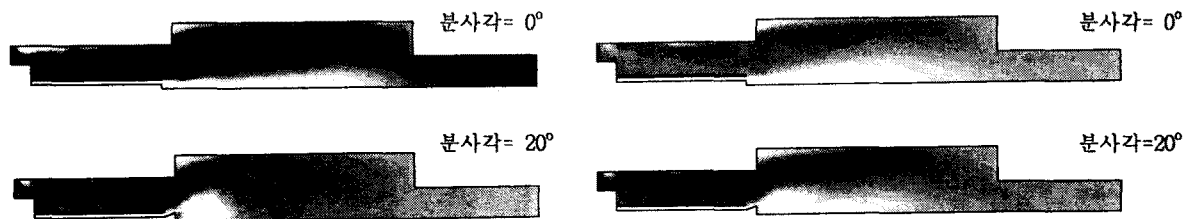
Fig. 3 Particle trajectories of case 1 and case 2

4.3 온도장 및 온도 분포

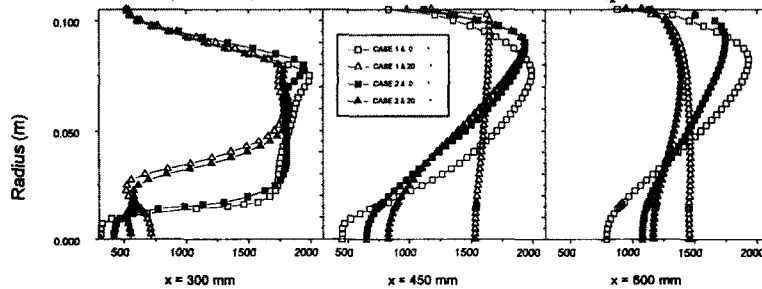
Fig.4는 연소기 내의 온도장 분포를 도시한 것으로서 검은색 일수록 높은 온도임을 보여준다.

Fig. 4 (a)는 주버너의 길이가 227mm일 때 온도장 및 온도 분포의 모습이다. 분사각이 0°일 때, 중심축의 상당한 부분이 저온 상태이지만 입자가 회전하고 있는 벽면 부분에는 입자의 체류 시간이 길기 때문에 충분한 연소가 이루어지면서 고온 영역이 생겨 있다. 그에 따라 중심축 부분과 벽면 부분 사이에 여러개의 등온 곡선이 존재하며 온도가 대각선 형태임을 볼 수 있다. 분사각이 20° 일 때는 입구 1에서 유입된 대부분의 입자도 회전하면서 오랫동안 체류하기 때문에 등온선이 별로 존재하지 않는 균일한 온도 분포를 보이고 있다.

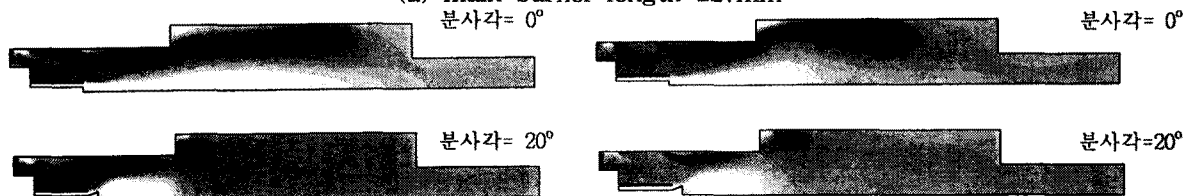
Fig. 4 (b)는 주버너의 길이가 92.5mm일 때 온도장 및 온도 분포의 모습이다. 분사각이 0°일 때는 주버너의 길이가 짧기 때문에 입구 1에서 유입된 입자는 예연소기로부터 보다 많은 열을 받아 연소가 빨리 이루어지므로 주연소기의 고온 영역이 입구 4 부근으로 약간 이동되어 있다. 그리고 주연소기에서 중심축 부근의 온도는 상당히 높아져 있음을 볼 수 있다. 분사각이 20°일 때는 주연소기내의 온도가 거의 균일해졌다.



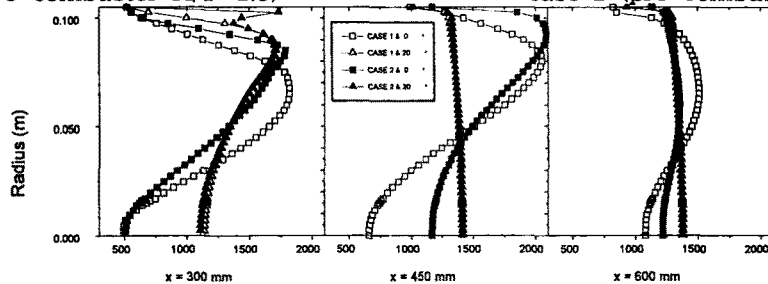
case 1(pre-combustor A/F=1.8) case 2 (pre-combustor A/F=2.0)



(a) main burner length=227mm



case 1(pre-combustor A/F=1.8) case 2 (pre-combustor A/F=2.0)



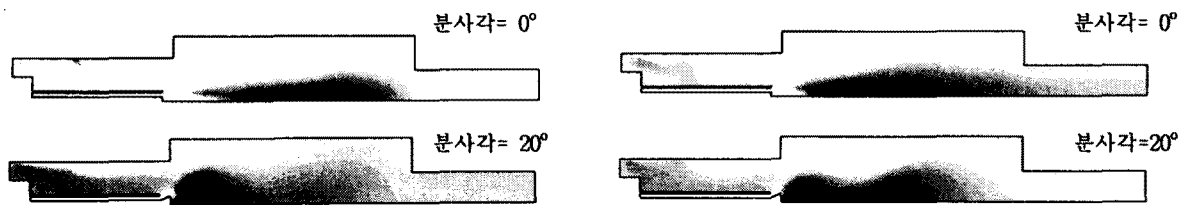
(b) main burner length=92.5mm

Fig. 4 Temperature contours and profiles of case 1 and case 2

4.4 휘발 성분

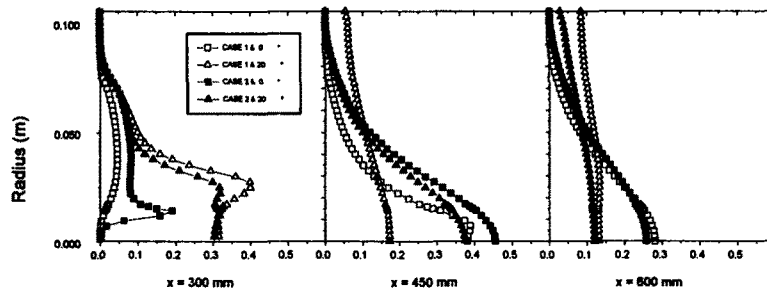
Fig. 5는 연소기 내의 휘발성분 분포를 도시한 것으로 검은색 일수록 많이 분포하고 있음을 보여준다. Fig. 5 (a)는 주버너의 길이가 227mm일 때 휘발성분장 및 휘발성분 분포의 모습이다. 분사각이 0° 일 때, 주연소기의 앞부분에서는 휘발성분이 방출되어 나오기에는 시간이 너무 짧기 때문에 휘발 성분이 거의 없지만 점차 많아지다가 연소에 의해 줄어들게 된 것을 볼 수 있다. 분사각이 20° 일 때, 주연소기의 앞부분에서는 입자의 체류 시간이 길어지기 때문에 훨씬 많은 휘발성분이 나오게 되지만 이 후 점차 줄어들게 된 것을 볼 수 있다.

Fig. 5 (b)는 주버너의 길이가 92.5mm일 때 휘발성분장 및 휘발성분 분포의 모습이다. 분사각이 0° 일 때는 휘발성분이 많이 분포하는 곳이 이동하여 주연소기의 앞부분에 많이 있음을 볼 수 있다. 분사각이 20° 일 때는 충분한 연소가 이루어지고 또한 주연소기 내의 온도가 균일해지므로 매우 적은 양의 휘발성분이 균일하게 분포하고 있다.

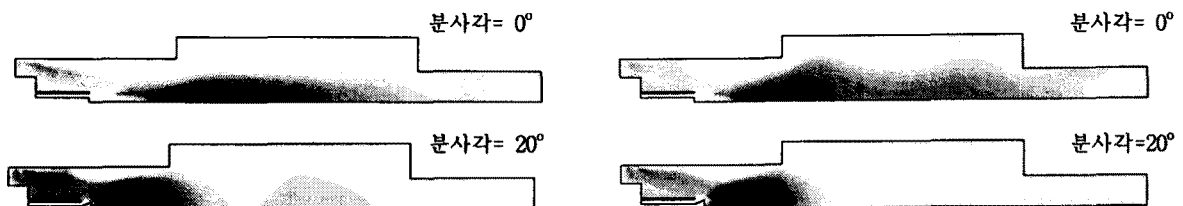


case 1 (pre-combustor A/F=1.8)

case 2 (pre-combustor A/F=2.0)

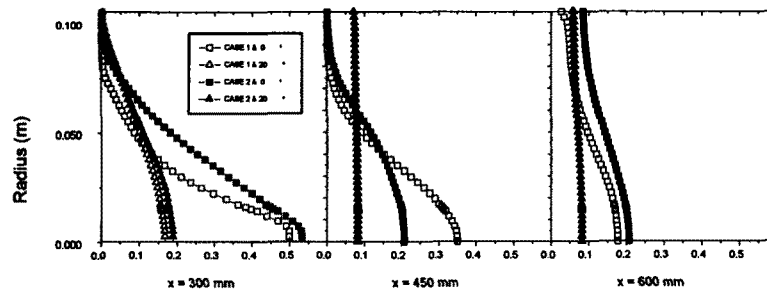


(a) main burner length=227mm



case 1 (pre-combustor A/F=1.8)

case 2 (pre-combustor A/F=2.0)



(b) main burner length=92.5mm

Fig. 5 Volatile contours and profiles of case 1 and case 2

5. 결 론

2단 사이클론 연소기의 주버너 길이 및 분사각을 변화시켜가면서 각각의 공기비에 대해 연소기 내의 유동장, 입자 궤적, 온도 분포, 휘발성분 분포를 파악한 후 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 분사각이 0° 인 경우 주버너를 통해 유입되는 입자는 주버너의 길이가 짧아지면서 출구로 바로 나가는 입자는 줄어들지만 여전히 많은 양이 바로 나가고 있다. 따라서 분사각이 필요하다.
분사각이 있는 경우 주버너의 길이가 길면 분사각의 크기가 커야 하며 주버너의 길이가 짧으면 분사각의 크기가 작아야 한다.
- 2) 분사각이 0° 인 경우 주연소기내의 온도는 대각선형태로 되며 중심축 부분은 저온, 벽면은 고온이 된다.
분사각이 있는 경우 주연소기내의 온도는 균일하게 되며 주버너의 길이가 짧을수록 온도가 빨리 균일하게 된다.
- 3) 분사각이 0° 인 경우 휘발성분의 질량 분율은 중심축 부근에 많이 분포하며 주버너의 길이가 짧아질수록 휘발성분이 많은 지점도 앞으로 이동한다.
분사각이 있는 경우 휘발성분의 질량 분율은 경사판의 바로 앞에 많이 분포하며 주버너의 길이가 짧아지면 주연소기내의 휘발성분은 거의 소멸된다.

감사

본 연구는 통산산업부에서 지원하는 청정에너지 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. L.Douglas Smoot and David T. Pratt, "Pulverized-Coal Combustion and Gasfication", Plenum Press , 1979
2. L.Douglas Smoot and Philip J. Smith, "Coal Combustion And Gasification", Plenum Press , 1985
3. Lockwood, F.C., Salooja, A.P and S.A. Syed, "A prediction method for coal-fired furnaces", Combustion and Flame, Vol.38, pp.1~5, 1980
4. F. Boysan, R. Weber etc, "Modeling coal-fired cyclone combustors", Combustion and Flame, 1986
5. J.S. Truelove and A.S. Jamaluddin, "Modeling of High Intensity Combustion of Pulverized Coal in a Tubular Combustor", Combust.Sci. and Tech., Vol.55, pp.89~113, 1987
6. S. Acharya etc, "A parametric calculation in a thermal chlorination reactor", Technical Report presented to Dow chemical company, Plaquemine, LA, 1988
7. "FLUENT User's Guide Version 4.3", Fluent Inc, 1995
8. A. Murty Kanury, "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon and Breach Science Publishers, 1977

9. 최상일, "2단 연소 기술에 의한 저공해 미분탄 연소기 개발 (2)", 청정에너지 기술 개발사업 연구보고서, 한국에너지기술연구소, 1996
10. Kuzman, "Handbook of thermodynamic tables and charts", Hemisphere Publishing Corporation, 1975
11. K.K. Kuo, "Principles Of Combustion", Wiley-Interscience Publication, 1986
12. Suzuki, H., Hasegawa, E., and Matsukfuji, H., "Movement of Small Particles Caused by Air Flow in a Chamber", JSME international Journal, Series 2, Vol.2, 1988
13. Hedman P.O. and Smoot O.D., Particle-gas dispersion effects in confined coaxial jets , *AlchE J.* 24(3), 1978
14. Hinze, J.O., "Turbulence", McGraw-Hill, 1975
15. P.A. Libby and F.A. Williams, "Turbulent Reacting Flows", ISBN, Vol.44, 1980
16. Robert Siegel and John R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer", 3rd ed, Hemisphere Publishing Corporation, 1992
17. H.K. Versteeg and W. Malalasekera, "An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method", Longman Scientific & Technical, 1995
18. Elmer John Badin, "Coal combustion chemistry - Correlation aspects", Elsevier, 1984
19. Sotirchos, "Diffusion and reaction in a char particle and in the surrounding gas phase", University microfilms international, 1985
20. Tseng, Hsiaopin, "Identification of the combustion behavior of coal char between 350 and 900", University microfilms international, 1982
21. G. van der Honing, "Volatile and char combustion in large scale fluidized bed coal combustors", 1991
22. G.R.Gavalas, "Coal Pyrolysis-Coal science and technology 4", Elsevier, 1982
23. M.A.Field, D.W.Gill, "Combustion of pulverized coal", The British coal utilization research association, 1967
24. Martin A.Elliott, "Chemistry of coal utilization", 2nd supplementary vol, A Wiley-Interscience Publication, 1981
25. N.Berkowitz, "An introduction to coal technology", Academic Press, 1979
26. Fred Basolo, Aidney M.Cantor etc, "Coal Science", American Chemical Society Publications, 1966
27. Zhou Lixing, "Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion", Science Press, 1993