

# 미분탄 연소로의 운전조건이 연소특성에 미치는 영향

강 일 만\* · 김 호 영\*\*

## Effect of Operating Conditions on Characteristics of Combustion in the Pulverized Coal Combustor

Ihl Man Kang and Ho Young Kim

**Key Words:** 탄소전환율(Carbon Conversion), 입자체류시간(Particle Residence Time), 화염선단(Flame Front),

### Abstract

In order to analyze the effect of operating conditions on pulverized coal combustion, a numerical study is conducted at the pulverized coal combustor. Eulerian approach is used for the gas phase, whereas Lagrangian approach is used for the particle phase. Turbulence is modeled using standard  $\kappa-\epsilon$  model. The description of species transport and combustion chemistry is based on the mixture fraction/probability density function(PDF) approach. Radiation is modeled using P-1 model. The turbulent dispersion of particles is modeled using discrete random walk model. Swirl number of secondary air affects the flame front, particle residence time and carbon conversion. Primary/Secondary air mass ratio also affects the flame front but little affects the carbon conversion and particle residence time. Air-fuel ratio only affects the flame front due to lack of oxygen. Radiation strongly affects the flame front and gas temperature distribution because pulverized coal flame of high temperature is considered.

### 1. 서 론

석탄의 연소는 주로 화염의 안정화를

위하여 선회형 연소기에 의해 연소되는 미분탄 연소로 이루어지고 있다. 이러한 연소기의 최적 설계를 위해서는 화염 안정성, 석탄 종류에 대한 민감성, NO<sub>x</sub> 저감

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

\*\* 고려대학교 기계공학과

과 차의 완전 연소 등에 대한 정확한 이해가 필요하다. 또한, 미분탄 연소기의 최적 설계를 위해서는 운전조건에 따른 연소특성 파악이 필요하다. 그래서 이러한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어왔다.

Lockwood<sup>11)</sup>는 연소로의 성능평가에 있어서 휘발분 방출율, 차 연소율, 복사열전달의 soot 효과, 선회의 영향을 조사하였다. Abbas<sup>12)</sup>는 버너 근처의 유동장이 화염형태, 강도, 안정성, 배기가스에 미치는 영향을 조사하였다. Milosavljevic<sup>13)</sup>는 2차 공기의 선회가 있는 경우의 화염 안정성을 평가하기 위하여 선회수, quarl 길이, 2차 공기 축방향 속도등을 변수로 하여 조사하였다. 부착화염, 부상화염의 경계가 quarl 길이와 공기속도에 따라 선회수 0.3-0.6 사이에서 존재함을 보였다. Smith<sup>14)</sup>는 탈휘발화 과정과 차의 반응이 연소효율, NO<sub>x</sub> 생성, 기체상의 온도에 중요한 영향을 미치는 인자이며 복사열전달은 덜 중요한 인자임을 보였다. 또한, 고체상에 대한 난류의 영향은 2차적인 인자임을 보였다.

본 연구에서는 단일 환형 오리피스(SAO) 버너가 장착된 연소기에 대하여 운전조건이 탄소전환율, 화염위치, 온도장, 입자체류시간 등에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 본 연구에서 사용된 운전조건으로는 2차 공기의 선회수, 1차/2차 공기 질량유량비, 복사열전달, 공기-연료비 등이다.

## 2. 이론해석

### 2.1. 기체상의 지배방정식

기체-고체간의 2상 유동장을 해석하기 위하여 시간 평균 보존 방정식을 사용하였고 기체상은 Eulerian, 고체상은 Lagrangian 방법을 택하였다. 축대칭 원통

좌표계의 난류 유동장에 대한 기체상의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V \phi) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) = S_{\phi} + S_{\phi b} \quad (1)$$

$\phi$ 는 질량 보존에서는 1이고, 축방향, 반경방향, 접선방향 운동량에서는 각각 U, V, W가 된다. 기상 난류 모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 위의 식에서  $\phi$ 가  $k$ 일 때는 난류운동에너지이고  $\epsilon$ 일 때는 난류소산율이 된다. 에너지 보존에서는 기체상의 엔탈피를 나타낸다. 난류교환계수인  $\Gamma_{\phi}$ 는 운동량에서는 유효점성인  $\mu_{eff} (= \mu + C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon)$ 을 나타내고  $k$ 와  $\epsilon$  방정식에서는 각각  $\mu_{eff} / \sigma_k$ 와  $\mu_{eff} / \sigma_{\epsilon}$ 을 나타낸다. 또한 성분보존과 에너지 보존에서는  $\mu_{eff} / \sigma_{\phi}$ 를 나타낸다. 여기서  $\sigma_{\phi}$ 는 난류 Prandtl/Schmidt 수이다.  $S_{\phi}$ 는 기체상의 생성항이고  $S_{\phi b}$ 는 고체상의 생성항이다. 기체상의 성분들과 기체상의 연소반응은 화학평형반응에 기초를 둔 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)에 의해서 구해진다. 또한 본 연구에서는 PDF 함수로써  $\beta$ 함수를 사용하였다.

### 2.2. 고체상의 운동방정식

고체 입자의 속도와 궤적은 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{\tau}(u_i - u_{pi}) + g(\rho_p - \rho_g) / \rho_p \quad (2)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

여기서, 하첨자 p는 고체상, g는 중력가 속도이다.  $\tau$ 는  $\rho_p D_p^2 / 18 \mu C_D (Re_p / 24)$ 이다. 레이놀즈 수,  $Re_p = \rho_g |u_i - u_{pi}| d_p / \mu$ 로 정의된다. 항력계수  $C_D$ 는 Morsi and Alexander<sup>15)</sup>식을 사용하였다.  $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ 가 되며,  $u_i'$ 는  $\zeta \sqrt{2k/\epsilon}$ 가 되며,  $\zeta$ 는 난수

(random number)이다.

입자의 온도는 다음과 같은 에너지 수지에 의해 구한다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fk} + \varepsilon_p a_p \sigma (T_R^4 - T_p^4) \quad (4)$$

대류열전달 계수,  $h$ 는 Ranz and Marshall<sup>[8],[9]</sup>식에서 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{hd_p}{k} = 2.0 + 0.6 Re^{(1/2)} Pr^{(1/3)} \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 기체상의 열전도 계수이며, Pr은 Prandtl 상수이다.

### 2.3. 탈휘발화 과정

미분탄의 반응을 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다. 입자는 완전한 구형이며, 입자의 쪼개짐이나 합체는 없다. 입자는 초기에 휘발분, 차, 수분, 재료 구성되어 있다.

먼저 수분이 방출된 후, 휘발분이 방출된다. 휘발분이 방출된 후 석탄은 차 덩어리만 남게 된다. 이 차가 산소와 반응하게 된다. 또한, 생성된 기체상은 여러 가지 반응을 거쳐 연소를 완료하게 된다. 본 연구에서는 수분을 제거한 석탄을 공급한다고 가정하여 예열기간 동안 수분의 방출은 없다고 하였다.

탈휘발화 과정(Devolatilization)은 2-경쟁률 모델 (two-competing rate model)로써 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>[10]</sup>

$$\frac{m_v(t)}{m_{v,0} - m_a} = \int_0^t (a_1 R_1 + a_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (R_1 + R_2) dt\right) dt \quad (7)$$

여기서,  $m_v(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 휘발분이고  $m_a$ 는 재의 양이다. 여기서,  $a_1 = 0.421$ ,  $a_2 = 0.842$ 이며,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 다음과 같은 Arrhenius식으로 표현된다.

$$R_1 = A_1 \exp(-E_1/RT_p) \quad (8)$$

$$R_2 = A_2 \exp(-E_2/RT_p) \quad (9)$$

여기서,  $A_1 = 3.7 \times 10^5$ ,  $A_2 = 1.5 \times 10^{13}$ ,  $E_1 = 7.4 \times 10^7$ ,  $E_2 = 2.51 \times 10^8$  이다. 또한, 탈휘발화 과정중의 부풀음(Swelling) 효과에 의한 직경 증가는 20%를 고려하였다.

### 2.4. 차 연소 과정

차 연소 과정은 차와 산소와의 반응만을 고려하였으며, 가스화 반응인 차-이산화탄소, 차-스팀 등의 반응은 고려하지 않았다. 차 연소 모델은 반응/확산을 한계모델(kinetics/diffusion limited rate model)로써 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>[11],[12]</sup>

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p^2 P_O \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

이때,  $R_1$ 은 확산율로  $C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{D_p}$

이고  $R_2$ 는 반응율로  $C_2 \exp(-E/RT_p)$  이다. 각각의 상수는  $C_1 = 5 \times 10^{12}$ ,  $C_2 = 3 \times 10^2$ ,  $E = 9.2 \times 10^7$ 이다.

### 2.5. 석탄성상

본 연구에서 사용된 석탄은 높은 휘발분을 가진 UK Gelding으로 하였다. 석탄의 원소분석(Element Analysis)은 다음과 같다. C 72.60%, H 5.05%, N 1.29%, S 1.55%, O 15.31%이다. 석탄의 공업분석(Proximate Analysis)의부터 휘발분(Volatile) 35.8%, 고정탄소(Fixed Carbon) 53.7%, 수분(Moisture) 6.3%, 회분(Ash) 4.2%의 조성을 얻었다. 석탄의 크기는 평균입경이 45  $\mu\text{m}$ 이며,  $\text{Wt}\% < 75 \mu\text{m}$ 가 80%이고  $\text{Wt}\% < 25 \mu\text{m}$ 가 40%이다.

### 2.6. 복사 열전달

복사 방정식은 복사강도  $I$ 를 조화함수로 전개시킨 간단한 P-1 모델을 이용하였다. 이 급수중 네 개의 항만을 고려한다면 복사 열량  $q$ 에 관한 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$q = -\frac{4\sigma}{3(a + \sigma_s)} \nabla \theta_R^4 \quad (12)$$

여기서,  $a$ 는 흡수계수,  $\sigma_s$ 는 산란계수,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $\theta_R (= 1/4\sigma)$ 은 복사온도이다.

### 2.7. 계산과정

본 연구에 적용된 연소기의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 원통형으로 직경이 0.6m 이고 길이는 2.5m이며, 중심부에 단일 환형 오리피스(SAO) 버너가 부착되어 있다. 미분탄은 353K의 1차공기와 함께 공급되고 있으며, 선회가 있는 573K의 2차공기가 환형 주위로 공급되고 있다. 압력-속도 coupling은 SIMPLE 알고리즘(algorithm)으로 계산하였고 대수방정식은 Multigrid 방법을 사용하였다.<sup>13)</sup>

## 3. 해석 결과

본 연구에서 사용된 탄소전환율은 다음과 같은 식으로부터 구해진다.

$$\text{탄소전환율} = \frac{(CO_2)_{act}}{(CO_2)_{max}}$$

여기서,  $(CO_2)_{max} = \frac{\text{완전연소시 } CO_2 \text{ 발생량}}{\text{완전연소시 연소발생량}}$ 이다.

또한, 미분탄과 함께 1차공기가 공급되는 입구(Inlet1)로부터 1000K가 되는 축방향 거리를 화염선단(flame front)이라고 가정하였다.

### 3.1. 2차 공기의 선회수

2차 공기의 선회수에 따른 입자체류시

간, 기상최고온도, 화염선단, 탄소전환율을 조사하기 위하여 선회수를 강선회 조건인 1.0부터 1.6사이에서 변화시켜 가며 살펴 보았으며 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 입자체류시간, 탄소전환율과 기상최고온도는 2차공기의 선회가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 화염선단은 감소하는 경향을 보인다. 즉, 미분탄이 고온의 2차 공기와의 효과적인 혼합으로 인하여 버너의 출구 근처에서 일찍 점화된 것으로 보인다. 또한, 연소기의 성능을 판단할 수 있는 탄소전환율은 입자의 체류시간과 관계가 있는 것으로 보인다. 즉, 입자의 체류시간이 증가함에 따라 고온의 2차 공기와의 접촉시간이 길어져 석탄의 완전연소가 상대적으로 잘 일어난다고 판단된다.

### 3.2. 1차/2차 공기의 질량 유량비

Fig. 3에 1차/2차 공기의 질량 유량비 ( $m_1/m_2$ )에 따른 입자체류시간, 기상최고온도, 탄소전환율, 화염선단, 축방향 온도분포를 도시하였다. 1차/2차 공기의 질량 유량비가 증가함에 따라서 화염선단과 기상최고온도는 증가하며, 입자체류시간과 탄소전환율은 약간 감소하는 경향을 보인다. 1차 공기의 증가에 따라서 고온의 2차 공기와의 혼합이 상대적으로 늦어져 화염선단의 위치가 연소기 후류로 이동하였음을 알 수 있다. 이는  $r/R=0.04$ 일 때의 축방향 온도분포를 보면 확실히 알 수 있다. 즉, 화염 선단은 후류로 이동하였으며 최고온도는 상승하였다. 탄소전환율은 1차/2차 공기의 질량유량비가 심하게 증가하였을 때는 감소하였지만 정상적인 운전조건에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 입자체류시간에 미치는 영향도 상대적으로 작음을 알 수 있다.

### 3.3. 공기-연료 비(Air-Fuel Ratio)

공기-연료 비를 조절하는 방법에는 공기량을 조절하는 방법과 연료의 양을 조절하는 두 가지 방법이 있다. 공기량을 조절하면 연소기내의 유동특성이 변하기 때문에 절대적인 비교가 불가능하다. 그래서 유동장에 영향이 없도록 연료의 양을 조절하였다. Fig. 4에 공기-연료 비에 따른 화염선단, 기상최고온도, 축방향 온도분포를 나타내었다. 공기-연료 비는 당량조건일 때에 대한 비로써 나타내었다. 연료의 양을 증가하면 화염선단은 증가하고 최고온도는 감소한다. 공기부족의 조건하에서 연소가 지연되면서 화염선단이 연소기의 후류로 이동하며 이로 인한 영향으로 기상최고온도는 감소한다. 또한 본 해석에서는 산소 부족조건 하에서 차-이산화탄소, 차-스팀 등의 가스화 반응을 고려하지 않았기 때문에 화염선단이 후류로 이동하는 것으로 보인다. 이는  $r/R = 0.04$ 일 때의 축방향 온도분포를 보면 알 수 있다.

### 3.4. 복사 열전달

고온의 미분탄 화염에서는 입자를 포함하는 복사열전달의 효과가 연소기내의 온도분포에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한, CO와 NO<sub>x</sub>의 조성에도 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 본 연구에서는 미분탄 입자에 대한 emissivity는 1.0으로 하였고, scattering 계수는 0.9를 사용하였다.

Fig. 5에는 복사가 있는 경우와 복사가 없는 경우에 대하여 무차원화 된 반경방향 거리( $r/R$ )가 0일 때와 0.04일 때의 축방향 온도 분포와 화염선단을 도시하였다. 화염선단의 위치는 복사가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 상류쪽에 위치하고 있다. 이는 입자가 없는 기상유동에 있어서 복사의 영향이 없어 상대적으로 낮은

연소기의 온도 분포 하에서 미분탄이 분사됐기 때문이다. 축방향 온도분포를 보면 화염 근처에서의 온도 분포는 복사의 유무에 관계없이 비슷하지만 화염대 이후는 차이가 많이 있다. 복사가 없는 경우는 화염대 이후 즉, 연소기 후류로 갈수록 급격한 온도의 감소를 보인다. 그에 반해 복사가 있는 경우는 화염대 이후에 일정한 온도 분포를 보인다. 위에서 살펴본 바와 같이 복사에 의한 영향이 상당히 큰 것으로 나타나고 있는 데 이는 본 연구가 고온의 미분탄 화염에서 이루어지고 있어서 복사에 의한 효과가 상당히 크게 나타나고 있다고 판단된다.

## 4. 결론

2차 공기의 선회수의 증가는 입자체류 시간과 기상최고온도를 증가시키며, 화염선단의 위치를 연소기 상류로 이동시킨다. 또한 선회수의 증가에 따라 탄소전환율이 증가한다. 즉, 연소기의 성능을 향상시키기 위해서는 선회가 있는 2차 공기의 공급이 효과적임을 알 수 있다. 그러나 기상최고온도가 증가하는 결과를 초래해 NO<sub>x</sub> 생성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

1차/2차 공기의 질량 유량비의 증가는 화염 선단을 연소기 후류로 이동시켰으며 기상 최고온도도 약간 증가시켰다. 입자의 체류시간에 대한 영향은 상대적으로 작았으며, 탄소전환율은 정상적인 운전조건에서는 거의 변화가 없는 것으로 파악된다. 즉, 과도한 1차 공기의 공급은 연소성능을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

공기-연료비에 대한 영향은 연료의 양이 증가할수록 산소 부족 조건 때문에 화염선단이 연소기 하류로 이동하며, 이로 인하여 기상최고온도도 감소한다. 산소 부족 조건에서의 정확한 결과를 얻기 위해서는

차-이산화탄소, 차-스팀 등의 가스화 반응에 대한 모델을 적용할 필요가 있다.

복사에 대한 영향은 고온의 미분탄 화염일수록 증가한다는 것을 알 수 있다. 복사에 의한 영향으로 화염 선단이 상류쪽에 나타나며 화염대 이후의 온도 분포가 균일하게 나타난다.

### 참고문헌

- (1) Fred C. Lockwood, Tariq Mahmud and Mohammed A. Yehia, "Simulation of Pulverized Coal Test Furnace Performance", *Fuel* Vol 77, No.12, pp. 1329~1337, 1998
- (2) T. Abbas, P. Costen, M. A. Hassan and F. C. Lockwood, "The Effect of the Near Burner Aerodynamics on Pollution, Stability and Combustion in a PF-Fired Furnace", *Combust. Sci. and Tech.*, 1993, Vol. 93, pp. 73-90
- (3) V. D. Milosavljevic, A. M. K. P. Taylor and J. H. Whitelaw, "Stability of Pulverized Coal Burners", *Twenty-Third Symposium(International) on Combustion*, 1990/pp. 957-962
- (4) Joseph D. Smith, Philip J. Smith and Scott C. Hill, "Parametric Sensitivity Study of a CFD-Based Coal Combustion Model", *AIChE Journal*, 1993, Vol. 39, No. 10
- (5) O. Faltsi-Saravelou, P. Wild, S. S. Sazhin and J. E. Michel, "Detailed Modeling of a Swirling Coal Flame", *Combust. Sci. and Tech.*, 1997, Vol. 123, pp. 1-22
- (6) B. Epple, R. Schneider, U. Schnell and K. Hein, "Computerized Analysis of Low-NO<sub>x</sub> Coal-Fired Utility Boilers", *Combust. Sci. and Tech.*, 1995, Vol. 108, pp. 383-401
- (7) Morsi, A. P and Alexander, A. S, "An Investigation of Particle Trajectories in Two Phase Flow Systems", *J. Fluid Mech.*, 55, pp. 193-208
- (8) Ranz, W. E and Marshall, W. R, "Evaporation form Drops, Part I", *Chem Eng Prg.*, 48(3), pp. 141-146
- (9) Ranz, W. E and Marshall, W. R, "Evaporation form Drops, Part II", *Chem Eng Prg.*, 48(4), pp. 173-180
- (10) Kobayashi, H., Howard, J.B., and Sarofin, A. F., "Coal Devolatilization at High Temperatures", *Sixteenth Symposium. (International) on Combustion*, The Combustion Inst., pp. 411-425, 1976
- (11) Baum, M. M and Street, P. J, "Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles", *Combustion Science and Technology*, 3, p.231
- (12) Field, M. A, "Rate of Combustion of Size-Grated Fractions of Char from a Low Rank Coal Between 1200k-2000k", *Combust. Flame*, 13, pp. 237-252
- (13) Hutchinson, B. R and Raithby, G. D, "A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy", *Numerical Heat Transfer*, 9, pp. 511-537

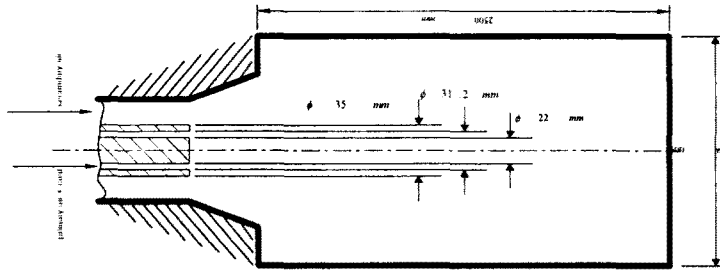
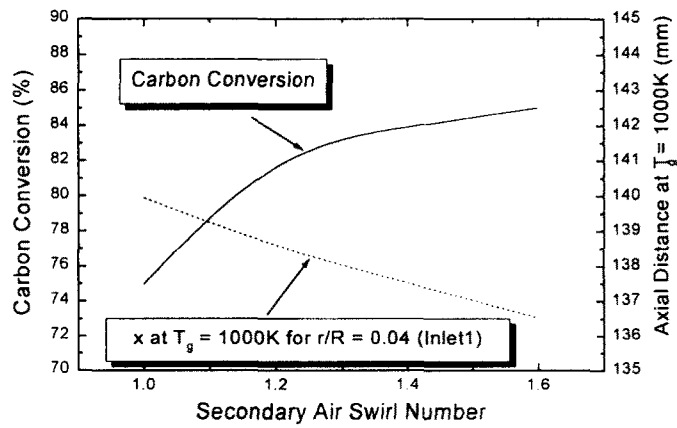
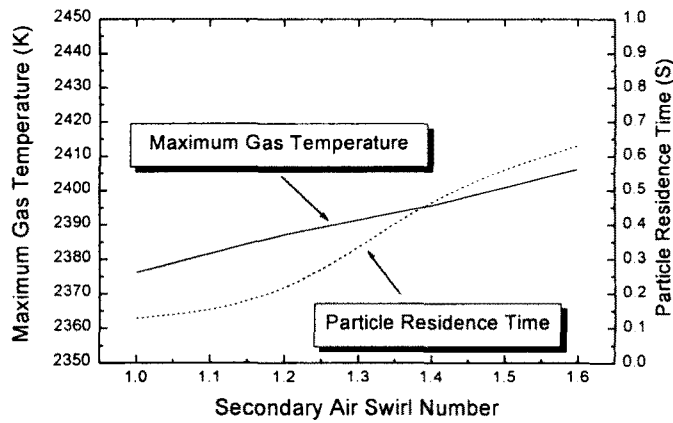


Fig. 1 Schematic diagram of furnace

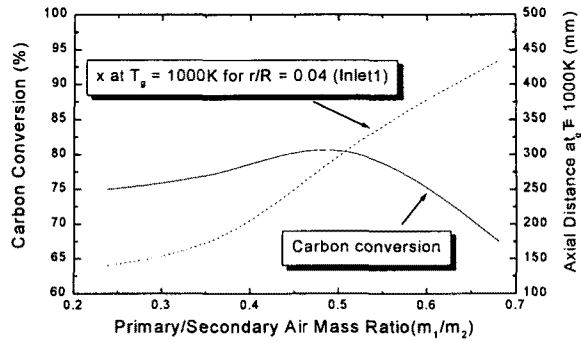


(a) Characteristics of carbon conversion and flame front position

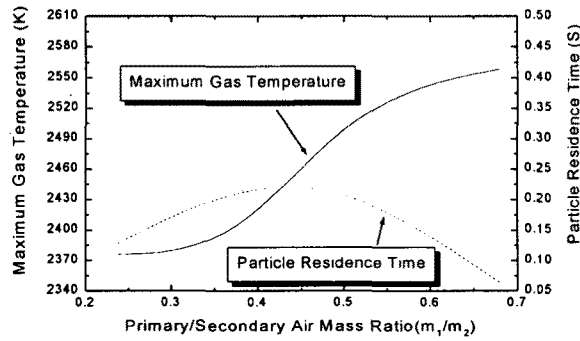


(b) Characteristics of maximum gas temperature and particle residence time

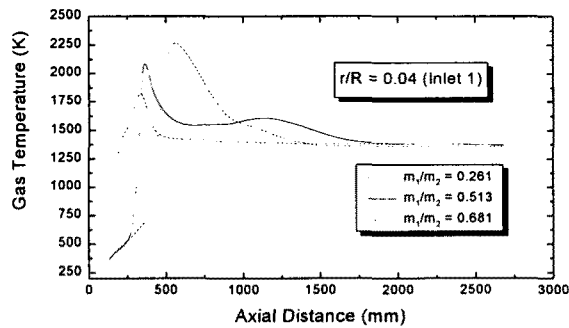
Fig. 2 Effects of secondary air swirl number on flame characteristics



(a) Characteristics of carbon conversion and flame front position



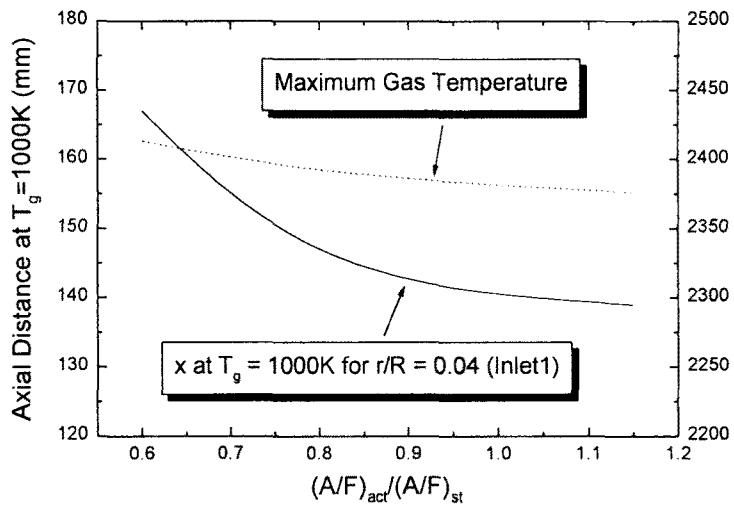
(b) Characteristics of maximum gas temperature and particle residence time



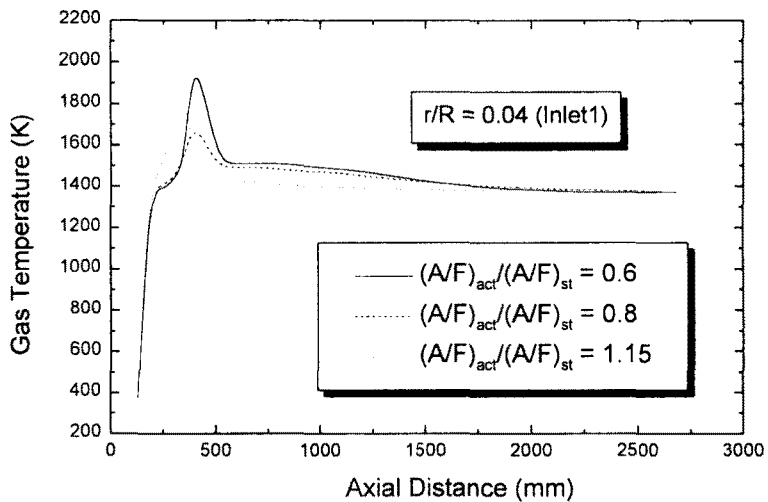
(c) Distribution of axial gas temperature at  $r/R = 0.04$

Fig. 3 Effects of primary/secondary air mass ratio on flame characteristics



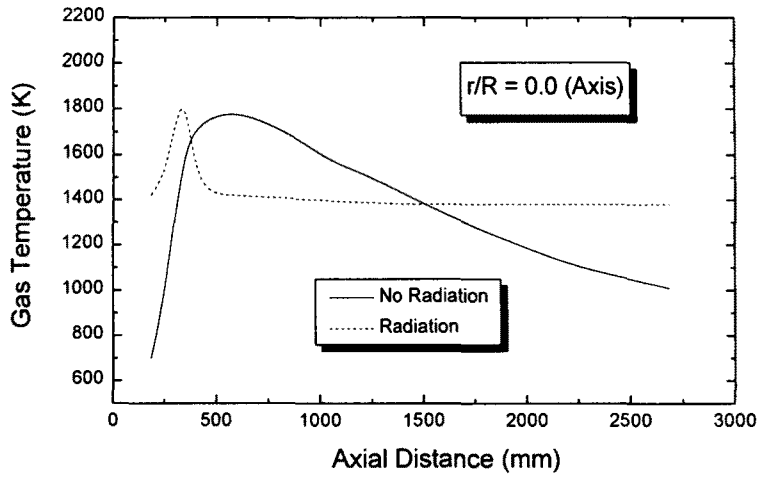


(a) Characteristics of maximum gas temperature and flame front

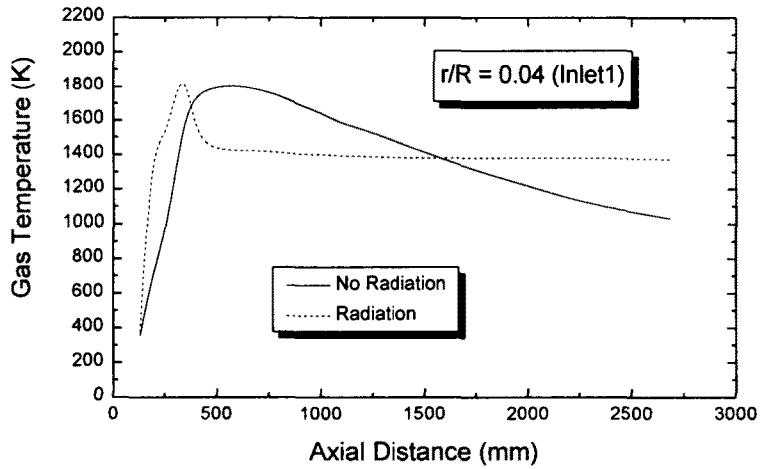


(b) Distribution of axial gas temperature at  $r/R = 0.04$

Fig. 4 Effects of air-fuel ratio on flame characteristics



(a) Distribution of axial gas temperature at  $r/R = 0.0$  (axis)



(b) Distribution of axial gas temperature at  $r/R = 0.04$

Fig. 5 Effects of radiation on flame characteristics