

유동변수들이 석탄가스화에 미치는 민감도에 대한 수치적연구

조한창* · 신현동**

Parametric Sensitivity of the Flow Characteristics on Pulverized Coal Gasification

Han Chang CHO*, and Hyun Dong SHIN**

Key Words: Coal gasification(석탄가스화), Flame front(화염선단); Coal burnout (석탄연소률); Residence time(체류시간)

Abstract

In order to analyze the sensitivity on the pulverized coal flames of the several variables, a numerical study was conducted at the gasification process. Eulerian approach is used for the gas phase, whereas lagrangian approach is used for the solid phase. Turbulence is modeled using the standard $k-\epsilon$ model. The turbulent combustion incorporates eddy dissipation model. The radiation was solved using a Monte-Carlo method. One-step two-reaction model was employed for the devolatilization of Kideco coal. In pulverized flame of long liftoff height, the initial turbulent intensity seriously affects the position of flame front. The radiation heat transfer and wall heat loss ratio distort the temperature distributions along the reactor wall, but do not influence the reactor performance such as coal conversion, residence time and flame front position. The primary/secondary momentum ratio affects the position of flame front, but the coal burnout is only slightly influenced. The momentum ratio is a variable only associated with the flame stabilization such as flame front position. The addition of steam in the reactor has a detrimental effect on all the aspects, particularly reactor temperature and coal burnout.

1. 서 론

많은 연구자들이 실험실 규모의 석탄

반응로에서 여러변수들이 석탄가스화와 연소에 미치는 민감도를 실험적 수치적 방법론을 통하여 조사하였다. 그들은 다양한 결론을 도출하였다. 실험적 연구에서는 Beer⁽¹⁾는 벽면냉각, 입경분포, 1차/2차의 속도비등을 이용하여 화염선단 위치와 화염길이등을 조사하였다. 2차공기가 지속적으로 공급될수록, 화염선단이 상

* 한국과학기술원 기계기술연구소

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

류로 이동하고 화염길이도 짧아지는 등 화염이 더욱 안정된다. Sowa⁽²⁾는 석탄가스화기에서 비너형상, 압력, 그리고 스팀/석탄비에 따른 노내 연소성능의 민감도를 조사하였다. Brown⁽³⁾은 석탄종류와 스팀의 공급에 대한 효과를 평가하였다. Azuhata⁽⁴⁾는 스팀, 석탄유량, 그리고 입경이 석탄전환률과 냉가스효율(cold gas efficiency)에 미치는 영향을 평가하였다.

실험적으로 평가하기 어려운 많은 변수들에 대한 평가를 위해 수치적 연구가 많이 수행되었다. Smith⁽⁵⁾는 PCGC-2를 이용하여 탈휘발과정과 최악의 반응물이 연소효율은 물론 점화위치에 주요한 인자임을 밝혔다. 반면 복사열전달과 초기 난류강도는 2차적인 인자임을 보였다. Lockwood⁽⁶⁾는 석탄조성, 1차/2차류의 속도비, 그리고 복사열전달의 영향을 수치적으로 조사하였다.

기존의 변수들에 민감도 조사는 주로 1800K이상의 고온 미분탄화염에 대하여

수행되었다. 본 연구에서는 가스화조건의 부상거리가 긴 저온의 미분탄화염에서 여러변수들이 부상거리와 석탄전환률 등에 미치는 영향을 수치적으로 평가해보고자 한다. 본 연구에서 채택한 변수는 초기난류강도, 복사열전달, 벽면열손실, 운동량비, 그리고 스팀의 공급등이었다. 수치해석 코드는 PSIC(Particle-Source In Cell) 방식을 이용하여 완성하고 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 채택된 변수는 복사열전달, 초기난류강도, 스팀, 그리고 1차/2차류의 운동량비였다.

2. 수치해석

PSIC방식은 입자를 Lagrangian관점으로 계산하고 가스유동을 Eulerian관점에서 풀이한다.

2.1. 기상의 지배방정식

Table 1. Gas-phase equations for particle trajectory model

| ϕ | Γ_ϕ | S_ϕ | $S_{\phi\phi} \text{Vol}$ |
|---|---------------------------|--|---|
| 1 | 0 | 0 | $S = -\sum n_k \dot{m}_{c,k}$ |
| u | μ_e | $-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ | $S \vec{u} - n_k m_c \frac{d\vec{u}}{dt}$ |
| v | μ_e | $-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu_e v / r^2 + \rho w^2 / r$ | $S \vec{u} - n_k m_c \frac{d\vec{u}}{dt}$ |
| w | μ_e | $-\rho v w / r - \mu_e w / r^2 - (w/r) \partial \mu_e / \partial r$ | $S \vec{u} - n_k m_c \frac{d\vec{u}}{dt}$ |
| k | μ_e / σ_k | $G_k - \rho \epsilon$ | 0 |
| ϵ | μ_e / σ_ϵ | $\epsilon / k (c_1 G_k - c_2 \rho \epsilon)$ | 0 |
| Y_s | μ_e / σ_Y | $-\nu_s w_s R_f$ | $a_s S$ |
| h | μ_e / σ_h | $\nu_s w_s R_f H_f + Q_r$ | $\sum n_k Q_k + c_p T S$ |
| $G_k = \mu_e \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \mu_e = \mu_L + \mu_T, \quad \mu_T = c_\mu \rho k^2 / \epsilon$ | | | |
| $\sigma_k, \sigma_Y, \sigma_h = 0.9, \quad c_\mu = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.92, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$ | | | |

축대칭 2차원 화로에서 기상의 지배방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v \phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} + S_{\phi\phi} \quad (1)$$

이때 종속변수 ϕ 는 연속방정식에서 1이고, 이외의 변수는 기상속도(u, v, w), 엔탈피(h), 난류운동에너지(k), 에디소산률(ϵ), 화학종의 질량분률(Y_i , 여기서 $i=O_2, H_2O, CO_2, CO, H_2, N_2, C_mH_n$ 등) 등이다. 각 변수의 $\Gamma_{\phi}, S_{\phi}, S_{\phi\phi}$ 은 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 기상밀도는 이상기체 상태방정식에서 계산하였다. 엔탈피는 각 화학종의 비열을 온도의 1차함수로 가정하고 계산하였다. Q_r 은 복사열전달에 의해 생성항이다.

2.2. 입자의 운동방정식

Lagrangian 방식에 의한 입자속도와 위치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

$$du_{p,i}/dt = \tau(u_i + u_i' - u_{p,i}) + g_i \quad (3)$$

여기서 하첨자 p 는 입자를, g 는 중력을 의미한다. 또한 $\tau = (3/4) \cdot (\mu/\rho_p d_p^2) C_D Re_p$, 레이놀즈수는 $Re_p = \rho |u_i - u_{p,i}| d_p/\mu$ 로 정의된다. 항력계수 C_D 는 Wallis-Kliachko식을 사용하였다.⁽⁸⁾ 식(3)에서 u_i' 는 기상의 난류변동속도향으로 난류에너지의 등방성분, $(2k/3)^{1/2}$ 에 발생된 난수를 곱한 값으로 결정하였다. 에디와 입자간 접촉시간(interaction time)은 에디가 존재하는 동안(lifetime), $L_{eddy}/(2k/3)^{1/2}$ 이거나 입자가 에디를 횡단하는 동안, $L_{eddy} = c_{\mu}^{3/4} k^{3/2}/\epsilon$ 에만 일어난다.⁽⁹⁾

케직을 따르는 입자의 평균온도는 입자내 에너지 보전식에서 얻을 수 있다.

$$m_c c_p \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p^2 [\epsilon \alpha (T^4 - T_p^4) + h(T - T_p)] + \sum_i \dot{m}_{c,i} \Delta H_i \quad (4)$$

이때 m_c 는 입자질량, c_p 는 입자비열이며, $\dot{m}_{c,i}$ 와 ΔH_i 는 반응과정 i 에서의 반응률과 발열량이다. 대류열전달계수 h 는 다음 식에서 계산하였다.⁽⁷⁾

$$Nu = hd_p/\lambda_g = 2 + 0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.33} \quad (5)$$

여기서 Pr 는 0.7을 사용하였다.

2.3. 미분탄의 가스화과정

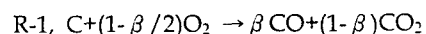
미분탄의 반응과정을 단순화하기 위하여 다음의 가정을 하였다. 입자는 구형이며, 반응중에 입자의 쪼개짐이나 합체는 무시하였다. 입자는 초기에 휘발분과 착(char)로 구성된 원탄(raw coal), 수분과 회분으로 구성되었다. 이때 착은 탄소만으로 구성되고 회분은 불활성이다.

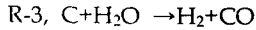
입자가 노내로 공급되면 빠르게 가열되면서 수분이 증발되고 휘발분의 방출, 즉 탈휘발과정(devolatilization)이 일어나며, 생성된 고체성분의 잔류 착가 반응하게 된다. 발생된 기상은 여러 균일반응을 거치게 된다. 입자의 반응에서 수분의 방출은 액적의 증발과정과 동일한식을 사용하였다.⁽⁷⁾ 탈휘발과정은 일단계 반응모델(one-step two reaction model)을 이용하여 해석하였다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{m}_r = m_m \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \cdot e^{-\int_0^t (k_1 + k_2) dt} dt \quad (6)$$

이때 k_1, k_2 는 아레니우스식(Arrhenius)으로 정의된다. 하첨자 o 는 초기상태를 의미하며, α_1 과 α_2 는 입자의 당량계수이다. 탈휘발과정의 잠열은 0.626MJ/kg이라 가정하였다.⁽¹¹⁾ 탈휘발과정에서 부풀음(swelling)효과에 의해 10%의 입경증가를 고려하였다.⁽¹²⁾

화반응은 세 가지만을 고려하였다.





산소와의 최반응(R-1)은 비가역적인 일차반응으로 가정하고 그 반응률은 다음과 같이 조절된다.⁽¹¹⁾

$$\frac{dm_{c,1}}{dt} = \pi d_p^2 \rho_{O_2} \frac{k_c \cdot k_d}{(k_c + k_d)} \quad (7)$$

이때 확산률은 $k_d = 2.53 \times 10^{-7} \psi T_m^{0.75} / d_p$, 화학반응률은 $k_c = 0.918 \exp(-8200/T_p)$, 입자의 표면온도는 $T_m = (T + T_p)/2$ 을 사용하였다.⁽¹³⁾ R-1에서 CO/CO₂의 생성비율은 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$CO/CO_2 = 2500 \exp(-6250/T_p) \quad (8)$$

확산기구계수 ψ 는 주생성물이 CO인 경우에 2, CO₂인 경우에는 1이 된다.

가스화반응인 R-2과 R-3는 주로 산소가 고갈된 상태에서는 중요한 반응으로 취급되고 있다.⁽¹²⁾

$$\frac{dm_{c,2}}{dt} = C^* \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \quad (9)$$

$$\frac{dm_{c,3}}{dt} = C^* \frac{k_1 p_{H_2O}}{1 + k_2 p_{H_2} + k_3 p_{H_2O}} \quad (10)$$

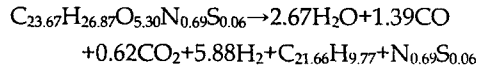
여기서 C*는 잔류탄소양, k_i 는 아레니우스식으로 정의된다.

2.4. 미분탄의 가스화과정

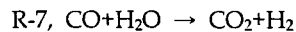
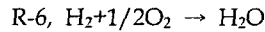
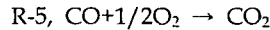
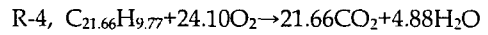
본 연구에서 사용된 탄은 인도네시아 산 키데코(Kideco)탄이다. 키데코탄은 원소분석(elemental analysis)으로부터 C 70.40%, H 4.79%, N 1.22%, S 0.25%, 회분 1.78%, O 21.56%등으로 구성되고, 공업분석(proximate analysis)으로부터 고정탄소 42.92%, 휘발분 43.30%, 수분 12.10%, 회분이 1.68%등으로 구성되어 있었다.

탈휘발과정중에 발산되는 휘발분은 가스와 타르의 혼합물이다. 그러나 그 양

과 조성은 석탄의 종류, 최종온도와 압력등에 따라 큰 차이가 발생한다. 공업분석에서의 휘발분량에 대한 실제 탈휘발량을 Q⁽¹⁴⁾라고 정의했을 때 실제 탈휘발량은 일반적으로 기준 휘발분량보다 많이 발생한다. 본 연구에서는 탈휘발온도가 비교적 낮기 때문에 공업분석에서의 휘발분량보다 약간 많은 Q=1.2를 적용하였다. 그때 휘발분의 분자식을 계산해 보면 C_{23.67}H_{26.87}O_{5.30}N_{0.69}S_{0.06}으로 정의할 수 있다. 휘발분이 탈휘발과정으로 여러 화학종으로 분해되면서 발산된다. 본 연구에서는 Govind⁽⁸⁾가 채택한 다성분의 휘발분조성에서 실험결과와 가장 근접된 결과가 도출됨에 따라 아래와 같은 휘발분 조성을 사용하였다.



기상연료의 반응은 아래와 같이 일단 반응으로 가정하고 계산하였다.



위 기상반응들의 반응률은 화학반응률과 확산률에 의해 지배된다. 본 연구에서 확산률은 에디소산모델(eddy dissipation model)을 채택하였다.⁽¹⁵⁾

$$R_{ju} = a_1 \rho \epsilon / k \min [Y_{ju}, Y_{O_2} / s, b_1 Y_{ju} / (1+s)] \quad (11)$$

여기서 s는 연료 1kg을 연소시키기 위한 산소의 질량을 뜻하며, a_1 과 b_1 은 4와 0.5가 사용된다. R-4, R-6의 반응률은 빠른 화학반응에 의해 확산률만으로 정의되며, R-5, R-7은 Howard⁽¹⁶⁾의 반응상수를 이용하여 화학반응률을 계산하였다.

2.5. 복사열전달

복사열전달은 Monte Carlo방법⁽¹⁷⁾으로 계산하였다. Monte Carlo방법은 복사열유

속이 격자를 이동할 때 그 이동거리와 흡수계수를 정확히 얻는 것이 중요하다. 이동거리는 유동장의 격자의 기하학적 형상에 따라 결정된다.⁽¹⁸⁾ 흡수계수중에 입자의 파장별 흡수계수는 $a_{\lambda}=kC/\lambda$ 로 표현된다.⁽¹⁷⁾ k 는 미분탄화염에서 3.7~7.5의 값을 갖는다. C 는 단위부피당 수트부피, λ 는 파장을 뜻한다. 입자의 프랑크(Planck)평균흡수계수는 파장별 흡수계수를 전파장에 대하여 적분하면 계산할 수 있다. 가스의 흡수계수로 CO_2 와 H_2O 만을 고려하면, 격자내 입자와 가스의 평균흡수계수를 계산할 수 있다.

$$a=266.3kCT_p+0.1(Y_{\text{CO}_2}+Y_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (12)$$

2.6. 계산과정

계산 유동장은 Fig.1과 같이 실험장치와 동일한 직경 50mm에 길이 1100mm인 상압의 하방향 실린더형 화로이다. 미분탄은 300K의 1차공기와 함께 공급되고 573K의 2차공기가 주위로 공급된다.

기상유동은 83×21 의 엇갈림 격자계에서 SIMPLE 알고리즘⁽¹⁹⁾으로 먼저 풀이하여 수렴시키고, 이후 입자궤적과 물성치를 10^{-6} sec의 시간간격과 2차 Runge-Kutta 방법으로 풀이하면서 기상-입자간 열전달, 운동량, 물질전달등의 생성항을 계산하여 격자점마다 저장한다. 그리고 저장된 생성항은 유동장의 풀이과정에 다시 대입하며 이 과정을 여러 번 반복하여 수렴시키게 된다.

경계조건으로 중심축에서는 대칭조건을 사용하였다. 벽면에서의 속도는 점착조건(no-slip)을 사용하고, 일정비율의 열손실을 가정하였다. 본 연구에서는 실험결과와 비슷하게 벽면열량중 20%가 손실된다고 가정하고 풀이하였다.

사용된 키테코탄의 입도는 $6 \mu\text{m}$ 15%, $22 \mu\text{m}$ 25%, $48 \mu\text{m}$ 25%, $80 \mu\text{m}$ 30%,

$120 \mu\text{m}$ 5%등으로 실험치와 비슷한 분포를 대입하였다. 모두 같은 성질의 초기 석탄입자가 버너출구의 7곳에서 면적에 대하여 일정한 수밀도를 갖고 분류된다고 가정하였다.

계산에 필요한 이외의 데이터는 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 수치계산에 적용된 당량비(equivalence ratio)는 연료과잉의 1.76이었다.

Table 2. The input data of base case for computations

| | |
|--|--|
| feed rates(kg/hr), velocity, turbulent intensity | |
| coal/1st air 2.40/1.80, 21.7(m/s), 10% | |
| 2nd air 10.81, 23.2(m/s), 20% | |
| $\epsilon=0.9$, $\rho_p=1350\text{kg/m}^3$, $\lambda_g=0.26\text{W/mK}$, $c_{p,c}=1260\text{J/kgK}$, wall heat loss 20% | |
| R-2 ⁽¹⁰⁾ | $\alpha_1=0.433$, $\alpha_2=0.9$ $A_{v1}=3.7 \times 10^5 1/\text{s}$, $A_{v2}=1.46 \times 10^{13} 1/\text{s}$ $E_{v1}=74\text{kJ/mol}$, $E_{v2}=252\text{kJ/mol}$ |
| R-4 ⁽¹²⁾ | $A_1=1.24 \times 10^6$, $E_1/R=29,600$ $A_2=1.24 \times 10^{10}$, $E_2/R=-22,900$ $A_3=3.12 \times 10^4$, $E_3/R=15,100$ |
| R-5 ⁽¹²⁾ | $A_1=3.12 \times 10^8$, $E_1/R=31,400$ $A_2=3.3 \times 10^{-1}$, $E_2/R=0$ $A_3=3.12 \times 10^2$, $E_2/R=10,100$ |

3. 결과 및 토의

위의 수치해석을 통한 그 결과는 실험결과와의 비교를 통하여 그 유용성을 확인하였다.⁽²⁰⁾ 다음의 인자들에 대한 반응특성을 평가해 보았다.

3.1. 초기난류강도의 영향

이전 연구들은 버너출구에서의 초기난류강도를 평균속도에 10~20%의 임의값을 대입하였다.⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽²¹⁾ Smith⁽⁵⁾는 초기난류강도는 입자의 연소과정에 큰 영향을

주지 못한다고 보고하였다. 그러나 $k-\epsilon$ 모델은 때때로 초기난류강도에 민감해서 재순환영역의 초기위치를 정확히 예측할 수 없다.⁽²²⁾ 그러므로 정확한 재순환영역의 크기와 위치를 얻기 위해서는 보다 엄밀한 값을 대입해야 한다.

Figure 2는 반응로출구에서의 석탄전환률, 반응로내 입자의 체류시간, 기상온도가 1000K가 되는 축방향거리, 그리고 노내 최고온도를 여러 초기난류강도에 대하여 도시한 것이다. 여기서 기상온도가 1000K되는 축방향거리를 화염선단이라고 가정하였으며, 초기난류강도는 평균유속에 대한 난류속도의 비로 정의하였다. 버너출구에서 1차류의 난류강도는 10%로 고정하였으며, 2차류의 난류강도를 10~20%로 변화시켰다. 증가된 2차류의 난류강도는 석탄전환률과 입자의 체류시간, 그리고 노내 최고온도를 증가시켰으며 화염선단을 상류로 이동시켰다. 난류강도의 증가는 난류변동속도의 증가를 의미한다. 즉 입자의 분산(dispersion)과 기상간의 혼합이 증대되면서 예열대가 짧아지고 석탄이 상류에서 점화하게 된다. 1차류의 난류강도를 변화시켜도 2차류의 난류강도변화와 동일한 경향의 결과가 도출되지만 그 결과의 변동은 훨씬 작게 나타난다. 이는 2차류의 운동량이 1차류의 운동량에 비해 월등히 크기 때문으로 판단된다.

Smith⁽⁵⁾의 연구결과와 달리 본 연구에서는 화염선단의 위치가 초기난류강도에 큰 영향을 받았다. 이는 본 연구에서의 미분탄화염이 낮은 기상온도와 긴 부상거리를 갖고 있기 때문에 난류강도에 민감하게 변동된다고 사료된다. 이 결과로부터 화염선단의 위치를 정확히 예측하기 위해서는 엄밀한 초기난류강도의 대입이 요구됨을 알 수 있다.

3.2. 복사열전달의 영향

입자를 포함하는 반응로내 온도분포는 입자로부터의 복사열전달에 큰 영향을 받게 된다. Bradley⁽²³⁾는 미연지역보다는 화염대 후류에서 복사열전달이 더욱 중요한 요소임을 보였다. 즉 미연부분은 온도가 상승하나 화염대이후는 온도가 저하되었다. 또한 그는 복사가 CO 농도를 저하시킨다는 것을 확인하였다. Smith⁽⁵⁾는 그러나 복사열전달의 영향이 입자의 분산과 탈휘발과정의 영향보다 적다는 것을 수치적으로 밝혔다.

Figure 3은 복사열전달을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 얻은 축($r/R=0.0$)과 벽($r/R=1.0$)에서의 축방향 기상농도분포를 도시한 것이다. Bradley의 결과처럼 복사효과가 화염대이후에서 더욱 컸다. 그러나 낮은 노내온도에 의해 복사에너지의 총량이 적어 온도분포와 화염선단의 위치는 복사열전달의 영향을 거의 받지 않았다. 그렇지만 석탄전환률은 복사열전달에 의해 75.5%에서 74.9%으로 감소되었다. 전반적으로 복사열전달이 석탄가스화에 미치는 영향은 예상보다 적었다고 사료된다.

3.3. 벽면열손실 효과

Soelberg⁽²⁴⁾는 79%의 석탄전환률을 갖는 분류층 석탄가스화기에서 벽면열손실이 석탄전환률에 미치는 영향을 평가하였다. 그는 단열조건에서 92%, 40%의 벽면열손실이 존재할 때 75%의 석탄전환률을 수치적으로 얻었으며, 그로부터 벽면열손실이 실제 석탄전환률의 계산에 있어 매우 주요한 인자임을 주장하였다.

Figure 4는 벽면열손실에 따른 축($r/R=0.0$)과 벽($r/R=1.0$)에서의 축방향 기상농도분포를 도시한 것이다. 여기서 벽

면열손실은 벽면에서의 엔탈피중 손실된 엔탈피의 비율로 벽면에 대하여 동일하게 정의하였다. 벽면열손실이 증가되면서 화염선단은 하류로 이동하였으며, 벽면온도는 빠르게 낮아졌다. 벽면에서 중점적으로 열손실이 이루어지기 때문에 중심축의 온도보다 빠르게 하강하게 된다. 반응로 출구에서 석탄전환률은 단열에서 76.6%, 20%의 벽면열손실에서 74.9%, 40%의 벽면열손실에서는 74.4%로 점차 감소하였다. 이로부터 비록 열손실의 감소로 연소성능은 향상되지만 그 크기는 Soelberg의 예상보다는 매우 적었다. 이는 기본적으로 노내 온도가 낮기때문으로 판단된다.

3.4. 1차/2차류의 운동량비

1차/2차류 운동량비는 $(m_c + m_i)u_1/m_2u_2$ 으로 정의되는데 화염안정화와 NOx 생성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Lockwood⁽⁶⁾는 1차/2차류의 속도비를 감소시키면 화염이 길어짐을 예측하였다. Beer⁽¹¹⁾는 2차류의 속도가 느릴수록 안정된 화염이 버너부근에서 생성되고 화염도 단염화됨을 실험적으로 확인하였다. 이들 현상은 여러 연구자들에 의해 확인되었다.⁽⁹⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾ 그러나 Cogoli⁽²⁸⁾는 1차류의 속도를 증가시키면 느린 혼합(mixing)에 의해 부상거리가 길어진다고 주장했다.

Figure 5는 전체 유량을 일정하게 하고 1차/2차류의 운동량비를 변화시켰을 여러 반응특성을 도시한 것이다. 운동량비를 증가시키면, 화염선단은 빠르게 하류로 이동하였다. 또한 입자의 체류시간도 화염선단의 상류이동과 반응로온도의 하강에 의해 증가되었으나 석탄전환률은 거의 차이가 없었다. 이들 결과로부터 운동량비는 단지 화염선단의 위치와 같

은 화염안정화에만 관련되는 인자이며 연소성능에는 관여하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.5. 스팀의 영향

스팀은 C-H₂O 반응을 증진시켜 노내 온도저하와 탄소전이를과 수소농도를 증대시키기 위하여 미분탄과 함께 주입하고 있다.⁽²⁹⁾ 그러나 여러 연구자들이 과도한 반응로내 온도저하에 의한 역효과를 제시하고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

Figure 6는 스팀/석탄비에 따른 반응특성을 도시한 것이다. Figure 6에서 스팀/석탄비를 증가시키면, 석탄전환률이 감소하고 입자의 체류시간이 감소한다. 또한 화염선단이 하류로 이동하며 기상의 최고온도 역시 급격히 하강한다. 본 연구에서 스팀은 기존의 유량에 단순히 추가되어 공급되는 것이기 때문에 스팀/석탄비의 증가는 기상속도의 증가와 예열대에서 스팀온도의 상승을 위해 보다 많은 현열이 필요하게 된다는 것을 의미한다. 그러므로 체류시간과 석탄전환률이 감소하고 노내 온도가 저하되는 것은 당연하다. 이러한 부정적인 역할에 대한 결과는 Azuhata의 결과와 동일한 경향이며, 산소를 산화제로 사용하는 가스화기에서는 노내 온도저하를 위해 필요할 것으로 판단되나 공기를 산화제로 사용하는 경우에는 부정적인 역할을 할 것으로 사료된다.

4. 결론

석탄가스화과정에 대한 해석을 수행하기 위해 개발된 수치코드를 이용하여 미분탄화염에서 변수들의 민감도를 조사, 평가하였다. 수치코드는 PSIC방식을 사

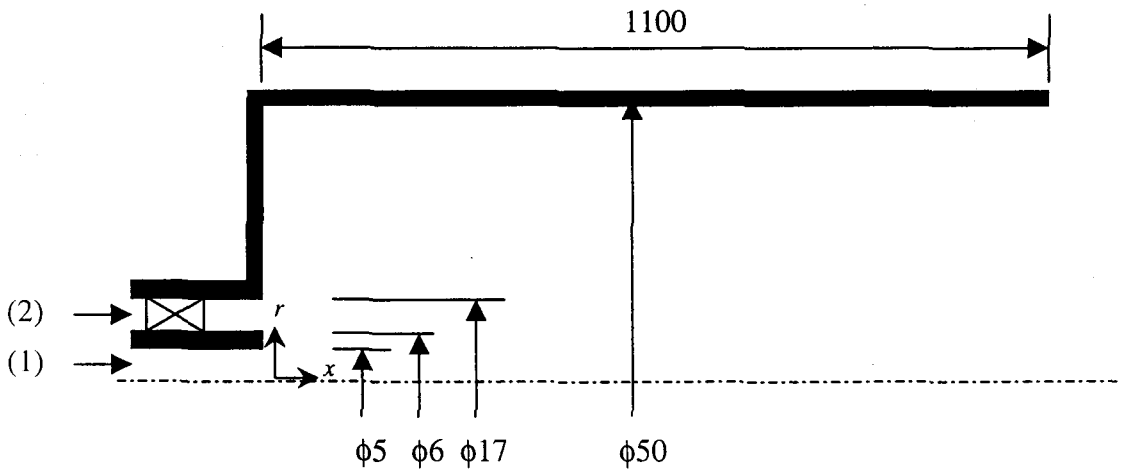
용하였다. $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 난류유동을 해석하였으며, Monte-Carlo 방식으로 복사열전달을 해석하였다. 기상의 반응은 에디소산모델을 사용하였다.

초기난류강도는 기존 연구자들의 주장과 달리 화염선단의 위치에 민감한 영향을 주었다. 복사열전달은 화염대이후 지역의 온도분포를 왜곡시켰으나, 반응로의 성능에는 큰 영향을 주지는 못하였다. 1차/2차류의 운동량비는 화염안정화에는 중요한 역할을 하였지만, 체류시간이나 연소성능에는 영향이 없었다. 스팀의 공급은 전반적으로 노내 연소성능은 물론 화염안정화에도 부정적인 역할을 하였다.

참고문헌

- (1) Beer, J. M., 1969, International flame research foundation: The effect of fineness and recirculation on the combustion of low-volatile pulverized coal, *Journal of institute of Fuel*, 286-313
- (2) Sowa, W. A., Hedman, P. O., Smoot, L. D., and Riochards, D. O., 1992, The sensitivity of entrained-flow coal gasification diffusion burners to changes in geometry, *Fuel*, 71, 593-604
- (3) Brown, B. W., Smoot, L. D., and Hedman, P. O., 1986, Effect of coal type on entrained gasification, *Fuel*, 65, 674-678
- (4) Azuhata, S., Hedman, P. O., and Smoot, L. D., 1986, Carbon conversion in an atmospheric-pressure entrained coal gasifiers, *Fuel*, 65, 212-217
- (5) Smith, J. D., Smith, P. J., and Hill, S. C., 1993, Parametric sensitivity study of a CFD-based coal combustion model, *AIChE Journal*, 39, 1668-1679
- (6) Lockwood, F. C., Salooja, A. P., and Syred, S. A., 1980, A prediction method for coal-fired furnaces, *Combustion and Flame*, 38, 1-15
- (7) Lixing, Z., 1993, Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion, CRC press
- (8) Govind, R. and Shah, J., 1984, Modeling and simulation of an entrained flow coal gasifier, *AIChE Journal*, 30, 79-91
- (9) Anagnostopoulos, J. S., Sargianos, N. P., and Bergeles, G., 1993, The prediction of pulverized greek lignite combustion in axisymmetric furnaces, *Combustion and Flame*, 92, 209-221
- (10) Ubhayakar, S. K., Stricker, D. B., Von Rosenberg, C. W., and Gannon, R. E., 1976, Rapid devolatilization of pulverized coal in hot combustion gases, *The 16th Symposium (International) on combustion*, 427-435
- (11) Baum, M. M. and Street, P. J., 1971, Predicting the combustion behaviour of coal particles, *Combustion Science and Technology*, 3, 231-243
- (12) Smoot, L. D. and Pratt, D. T., 1979, *Pulverized coal combustion and gasification*, New York, Plenum Press
- (13) Smith, I. W., 1971, Kinetics of combustion of size-graded pulverized fuels in the temperature range 1200-2270K, *Combustion and Flame*,

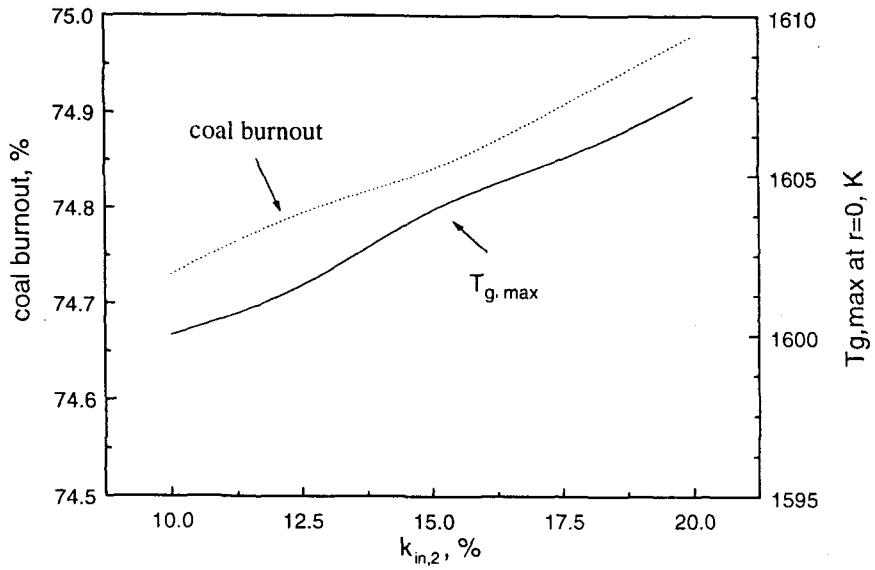
- 17, 303-314
- (14) Lockwood, F. C. and Salooja, A. P., 1983, The prediction of some pulverized bituminous coal flames in a furnace, *Combustion and Flame*, 54, 23-32
- (15) Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1976, On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, The 16th Symposium(International) on Combustion, 719-729
- (16) Howard, J. B., Williams, G. C., and Fine, D. H., 1974, Kinetics of carbon monoxide oxidation in postflame gases, The 14th Symposium (International) on Combustion, 975-986
- (17) Siegel, R. and Howell, J. R., 1981, Thermal radiation heat transfer, Hemisphere publishing Corporation
- (18) 정종수, 1989, 축대칭난류 확산화염에서의 매연 농도 및 화염구조 예측에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문
- (19) Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw Hill Book Company
- (20) Cho, H. C. and Shin, H. D. 1999, A numerical study on the effect of flow distribution on reactor performance, accepted for publication in *International Journal of Energy Research*
- (21) Peters, A. A. F. and Weber, R., 1997, Mathematical modeling of a 2.4MW swirling pulverized coal flame, *Combustion Science and Technology*, 122, 131-182
- (22) Smoot, L. D., 1984, Modeling of coal-combustion processes, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 10, 229-272
- (23) Bradley, D., Chen, Z., El-Sherif S., Habik El-Din, John, G., and Dixon-Lewis G., 1994, Structure of laminar premixed carbon-methane-air flames and ultrafine coal combustion, *Combustion and Flame*, 96, 80-96
- (24) Soelberg, N. R., Smoot, L. D., and Hedman, P. O., 1985, Entrained flow gasfication of coal, *Fuel*, 64, 776-788
- (25) Godoy, S., Hirji, K. A., Lockwood, F. C., and Miller, J., 1986, "Stability limits of pulverized coal burners", *Combustion Science and Technology*, 44, 319-335
- (26) Abbas, T., Costen, P., Hassan, M. A. and Lockwood, F. C., 1993, "The effect of the near burner aerodynamics on pollution, stability and combustion in a PF-fired furnace", *Combustion Science and Technology*, 93, 73-90
- (27) Wendt, J. O. L. and Pershing, D. W., 1977, "Physical mechanisms governing the oxidation of volatile fuel nitrogen in pulverized coal flames" *Combustion Science and Technology*, 16, 111-121
- (28) Cogoli, J. G., Gray, D. and Essenhigh, R. H., 1977, Flame stabilization of low volatile fuels, *Combustion Science and Technology*, 16, 165-176
- (29) Littlewood, K., 1977, Gasfication: Theory and application, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 3, 35-71



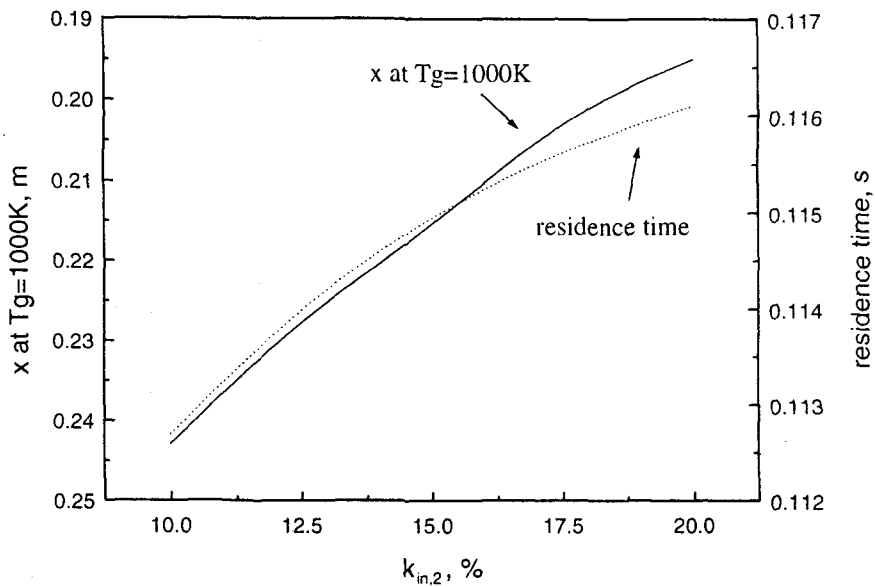
(1) coal + primary air, 300K

(2) secondary air, 573K

Figure 1. Schematic calculation domain



(a) coal burnout and maximum gas temperature



(b) particle residence time and the position of flame front

Figure 2. Effect of initial turbulent intensity on the flow characteristics

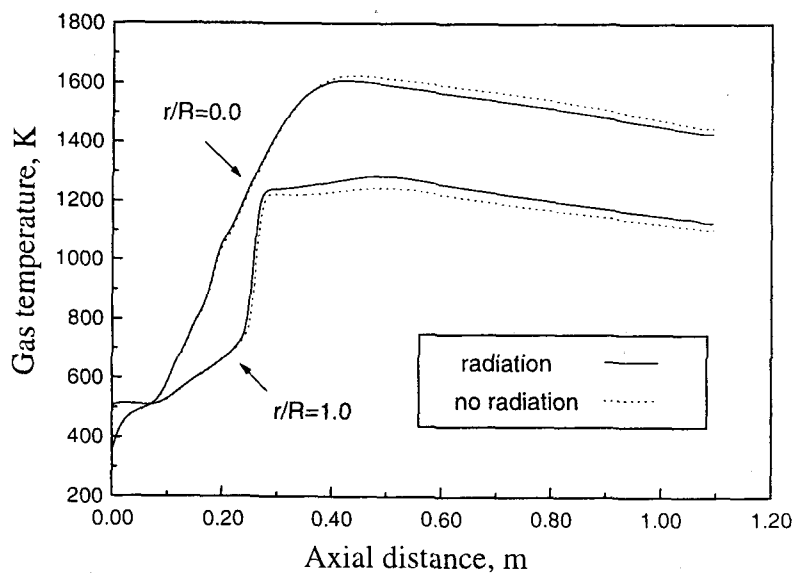


Figure 3. Effect of radiation heat transfer on the gas temperature profiles at $r/R=0.0$ and 1.0

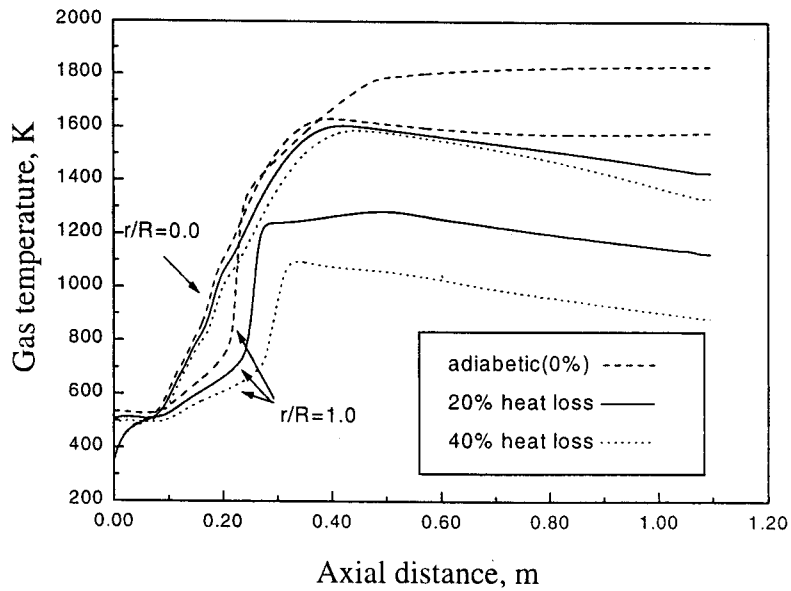
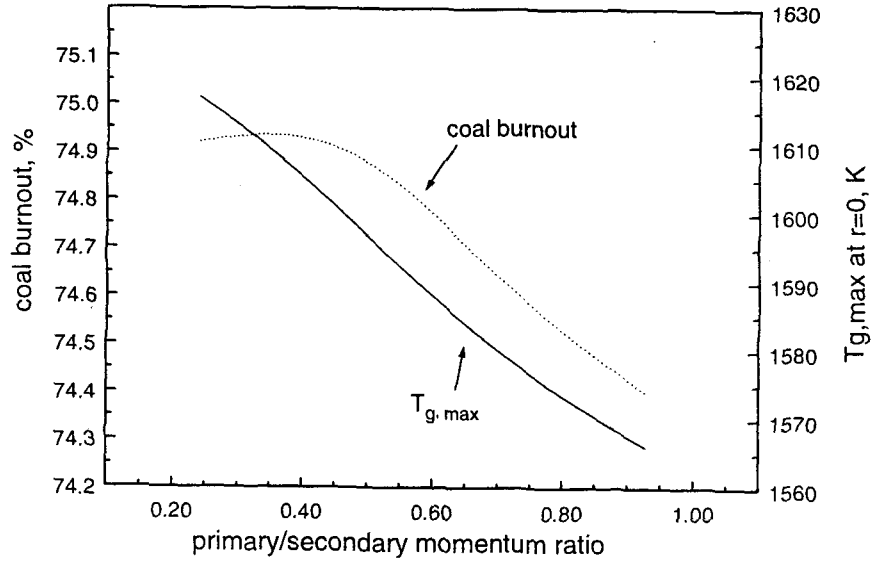
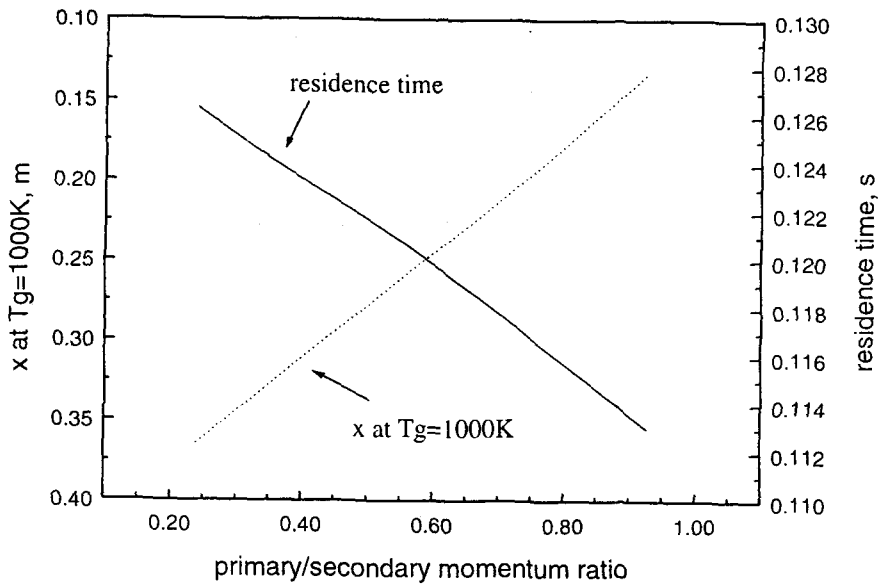


Figure 4. Effect of the ratio of wall heat loss on the gas temperature profiles at $r/R=0.0$ and $r/R=1.0$

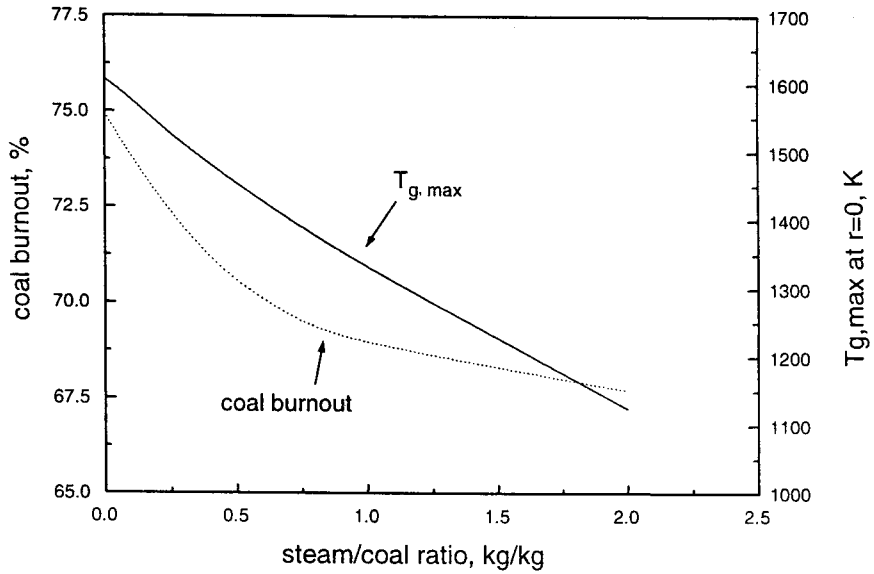


(a) coal burnout and maximum gas temperature

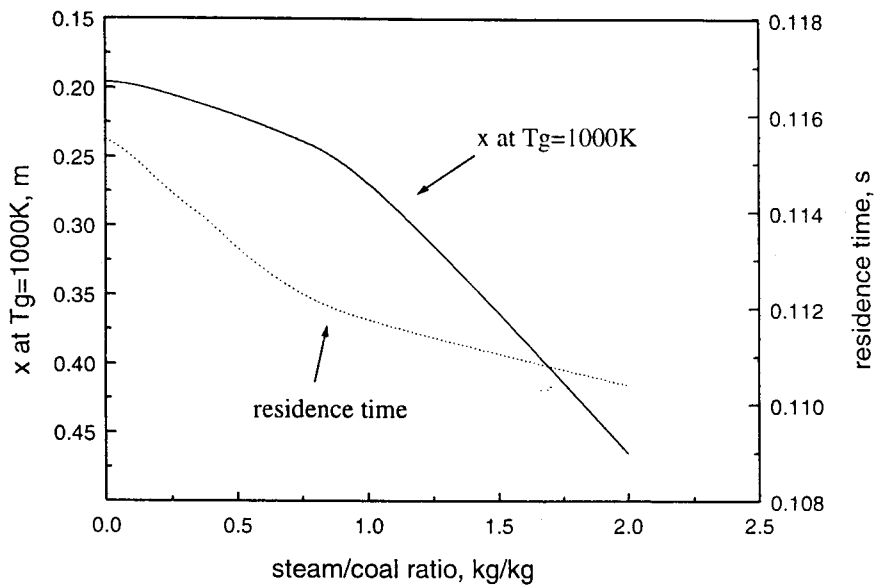


(b) particle residence time and the position of flame front

Figure 5. Effect of primary/secondary momentum ratio on the flow characteristics



(a) coal burnout and maximum gas temperature



(b) particle residence time and the position of flame front

Figure 6. Effect of steam/coal ratio on the flow characteristics