

〈論 文〉

중공 원통형 고체연료의 열분해 및 연소특성

민 성 기* · 김 호 영**

(1989년 2월 23일 접수)

The Characteristics of Pyrolysis and Combustion for a Hollow Cylindrical Solid Fuel

Seong Ki Min and Ho Young Kim

Key Words : Pyrolysis(열분해), Volatile Combustion(휘발분 연소) Char Combustion(숯 연소)

Abstract

A theoretical analysis for the characteristics of pyrolysis and combustion of solid fuel was carried out in the present study. The hollow cylindrical combustion model including gas phase and solid fuel at inside and outside respectively was developed for the numerical analysis and parametric studies. The effects of volatile contents in the porous solid fuel and Reynolds number at inlet of gas phase on the characteristics of pyrolysis and combustion such as the radial, axial and time variations of volatile mass flux through porous solid fuel, temperature, mass fractions of gaseous fuel and oxidizer, and flame shape were investigated in the parametric studies. The results of the present study show that the flame produced by the volatiles moves to the downstream of fuel with accelerating velocity with time until extinction is occurred resulting from the completion of pyrolysis. When flame is employed with smaller amount of volatiles content in the solid fuel, the flame sheet exists closer to the inner wall of solid fuel. As Reynolds number at inlet increases, the flame sheet moves to the inner wall due to effect of convection even though the volatiles by pyrolysis increases.

기 호 설 명

a_p : Pre-exponential coefficient (1/sec)
 C_p : 기체상 정압비열 (cal/g°C)
 C_{pf} : 착(char)의 정압비열 (cal/g°C)
 C_{pg} : 열분해 가스의 정압비열 (cal/g°C)
 \bar{C}_{ps} : 무차원 고체상의 정압비열
 C_{pw} : 원 고체연료의 정압비열 (cal/g°C)
 E_p : 활성화 에너지 (cal/mole)
 h : 열전달 계수 (cal/cm² sec°C)
 k_g : 기체의 열전도 계수 (cal/cm sec°C)

\bar{k} : 무차원 고체의 열전도 계수
 k_f : 착의 열전도 계수 (cal/cm sec°C)
 k_w : 원 고체연료의 열전도 계수 (cal/cm sec°C)
 L : 고체연료의 높이 (cm)
 M : 열분해 가스의 질량유속 (g/cm² sec)
 \bar{M} : 무차원 M
 Pr : 프란틀 수
 Q : 연소열 (cal/mole)
 Q_p : 열분해 잠열 (cal/mole)
 \bar{Q}_p : 무차원 Q_p
 r_i : 고체연료의 내반경 (cm)
 r_o : 고체연료의 외반경 (cm)
 R : 반경방향 무차원 좌표

*정회원, 고려대학교 대학원

**정회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

- Re : 레이놀즈 수
 t^* : 특성시간
 T_g : 기체상 온도
 U : 축 방향 무차원 속도
 v^* : 특성속도 (cm/sec)
 V : 반경방향 무차원 속도
 W_i : i 성분의 분자량
 X : 축방향 무차원 좌표
 Y_i : i 성분의 질량분율

그리스 문자

- β : Schvab-Zeldovich 변수
 γ : Schvab-Zeldovich 변수
 θ : 무차원 고체상 온도
 θ_g : 무차원 기체상 온도
 θ_e : 무차원 활성화 에너지
 μ_g : 기체의 점도 (g/cm sec)
 ν_i : i 성분의 정량반응 계수
 ρ : 고체의 밀도 (g/cm³)
 $\bar{\rho}$: 무차원 ρ
 ρ_f : 착의 밀도 (g/cm³)
 ρ_g : 기체의 밀도 (g/cm³)
 ρ_w : 원 고체연료의 밀도 (g/cm³)
 τ : 무차원 시간

하첨자

- F : 연료
 O : 산소

1. 서 론

현대 산업사회 발전의 원동력인 에너지원으로서 여러 종류의 연료들이 사용되어 왔다. 그 중에서도 비교적 높은 밀도와 화염온도 및 연소열을 가진 고체연료는 취급과 저장이 용이하고 가격이 저렴할 뿐만 아니라 다양한 용도를 가지고 있으므로 연료들 중 상당한 비중을 차지하고 있다. 이와 같은 장점을 가진 고체연료의 연소현상에 대한 연구, 즉 고체연료의 연소현상을 규명함으로써 고체연료를 사용하는 연소기의 효율증대 및 공해물질 생성의 억제, 화재와 산불같은 인위 및 자연재해의 예방, 국내 가정용 연료로 주로 사용되고 있는 연탄등의 열효율 제고를 위한 기초자료의 제공을 위하여 연구의 필요성은 증대되고 있다.

지금까지 밝혀진 고체연료의 연소기구(combustion mechanism)는 고체연료의 가열과정에서 전달된 에너지에 의해 연료내에 함유된 고형의 휘발분이 열분해 과정을 거쳐 탄화수소등의 열분해 가스 와 착(char)등으로 분리되고 이때 생성된 열분해 가스가 외부로 유출되어 화염을 형성하고 형성된 화염으로부터 증대된 고체연료의 열전달에 의해 열분해현상이 촉진되어 열분해 가스의 생성이 증대됨으로 화염이 유지되고 동시에 생성된 착로 산소가 유입되어 착의 연소가 일어나게 된다⁽¹⁾. 이와 같은 고체연료의 연소기구는 고체연료의 형성과정과 내부구조 및 함유된 휘발분의 성분과 함유량 뿐만 아니라 연료의 연소조건에 따라서도 변하게 되므로 매우 복잡하여 해석하기에 어려움이 있으므로 대부분의 연구자들은 열분해에 의해 생성되는 가연성 열분해 가스가 외부로 유출되어 화염을 형성하는 휘발분 연소(volatile combustion)와 생성된 착로 산소가 유입되어 일어나는 착 연소(char combustion)로 나누어 연소현상을 연구하고 있다.

고체연료의 열분해 및 열분해 가스의 연소현상에 대한 기존 연구들을 살펴보면 Tinney⁽²⁾의 땀나무(wooden dowels)의 연소에 관한 연구와 Pantan과 Rittmann⁽³⁾의 다공성 평판의 열분해에 관한 연구에서는 고체연료내부를 유동하는 열분해 가스의 대류 열전달을 고려하지 않았다. 또한 Kung^(4,5)은 나무 평판의 열분해에 관한 연구에서 한쪽 면이 외부 열원에 의해 가열되고 다른 한 면은 열전달 및 물질 전달이 차단된 경우에 대해 고체상의 열분해 현상 및 기체상에서의 연소현상에 관하여 연구한 결과 열분해 가스의 유동에 의한 대류열전달항이 중요하다고 입증하였고 이외에도 Matsumoto 등⁽⁶⁾ 및 Kosdon 등⁽⁷⁾의 연구가 발표되었고 실험연구로서는 Roberts와 Clough⁽⁸⁾ 및 Noland 등⁽⁹⁾의 연구들이 발표되었다.

이상과 같은 지금까지의 연구는 주로 단순한 형상인 평판형 고체연료에 관한 연구에만 국한되어 있으므로 국내의 가정용 주연료로 사용하는 연탄의 연소현상 규명에 사용하지 못하고 있다. 본 연구에서는 국내 난방용 주연료인 연탄의 연소특성의 규명을 위한 기본 모델로서 일차적으로 형상을 단순화한 중공 원통형 고체연료의 연소모델을 개발하여 고체연료의 열분해 및 열분해 가스의 연소현상을 이론적으로 고찰하여 고체연료의 연소특성을 규명한다.

2. 이론해석

2.1 고체연료의 중공 원통형 연소모델

본 연구에서 사용된 고체연료의 연소 모델은 고체연료 밀부분으로부터 열전달에 의하여 고체연료 내부의 고형의 휘발분이 열분해되며, 이때 생성된 열분해 가스가 기체상으로 유출되어 밀면에서 주입되는 고온의 공기와 접하여 화염을 형성하고 형성된 화염으로부터의 열전달에 의해 고체상의 열분해가 촉진되어 화염이 유지되는 Fig. 1과 같은 모델을 택하였다.

본 모델에 대한 이론 해석을 보다 간편히 하기 위하여 다공성 고체상 내부의 열분해 가스는 생성되는 즉시 반경방향으로만 유출되고 고체내부를 유동하는 열분해 가스와 고온의 좌 사이의 화학반응은 없으며 또한 열평형상태하에 있고 복사에 의한 열전달 및 시간에 따른 고체상의 형상변화는 무시하였다. 기체상에 대해서는 물리화학적 상태량은 일정하고 Lewis 수는 1로 가정하였으며 또한 연료와 산소간의 발열화학반응은 1단계 반응이며 반응열은 산소와 연료의 확산속도에 비해 무한히 크다는 확산화염모델을 택하였다.

위의 가정들을 이용하여 축대칭 원통좌표에서의 무차원화된 지배 방정식은 다음과 같다.

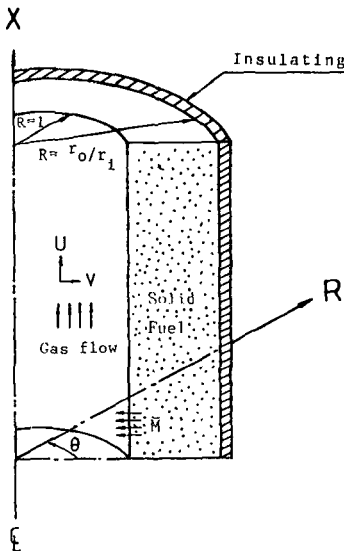


Fig. 1 A schematic model for combustion of cylindrical solid fuel

● 고체상

* 단일 Arrhenius반응식

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} = -\bar{a}_p (\bar{\rho} - \bar{\rho}_f) \exp\left(-\frac{\theta_e}{\theta}\right) \quad (1)$$

* 질량 보존 방정식

$$C \frac{\partial (\bar{\rho} R)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial R} (R \bar{M}) = 0 \quad (2)$$

* 에너지 보존 방정식

$$C \frac{\partial}{\partial \tau} (\bar{\rho} \bar{c}_{ps} R \theta) + \frac{\partial}{\partial R} (R \bar{C}_{ps} \bar{M} \theta) + C \bar{Q}_p \frac{\partial}{\partial \tau} (\bar{\rho} R) = \frac{\partial}{\partial R} (R \bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial R}) + \frac{\partial}{\partial X} (R \bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial X}) \quad (3)$$

이상의 식에서 \bar{M} 는 고체연료 내부를 유동하는 무차원 질량유속을 나타내며, 계수 C와 에너지보존방정식에 나타나는 $\bar{\rho} \bar{c}_{ps}$ 및 \bar{k} 에 대해 부분적으로 열분해된 고체 연료에서 열분해되지 않은 부분에 대한 값들은 선형 보간법에 의해 구한 다음 식들을 사용하였다⁽⁴⁾.

$$C = \frac{\rho_w C_{pw} r_i^2}{k_w t^*}$$

$$\bar{\rho} \bar{c}_{ps} = \frac{\bar{\rho} - \bar{\rho}_f}{1 - \bar{\rho}_f} + \frac{1 - \bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}_f} \bar{\rho}_f \bar{c}_{pf} \quad (4)$$

$$\bar{k} = \frac{\bar{\rho} - \bar{\rho}_f}{1 - \bar{\rho}_f} + \frac{1 - \bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}_f} \bar{k}_f$$

● 기체상

중공 원통형 고체연료의 안쪽 즉 원통 공간에서의 기체상에 대한 지배 방정식들 중 에너지 보존 방정식과 성분 보존 방정식에는 화학 반응에 의한 생성, 소멸항이 존재하여 해석하기 복잡하므로 무한 화학 반응열을 가진 1단계 화학반응에 대한 정량반응 방정식(stoichiometric equation)을 이용하여 생성, 소멸항을 소거하는 Schvab-Zeldovich 변형법을 이용하여 방정식들을 간단화 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

* 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial R} (RV) + \frac{\partial}{\partial X} (RU) = 0 \quad (5)$$

* 운동 방정식

$$\begin{aligned} \frac{r_i}{L} R \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial R} (RVU) + \frac{\partial}{\partial X} (RUU) \\ = -R \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} + \frac{2}{Re} \left\{ \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial U}{\partial R} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial X} \left(R \frac{\partial U}{\partial X} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{r_i}{L} R \frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial R} (RVV) + \frac{\partial}{\partial X} (RUV)$$

$$= -R \frac{\partial \bar{P}}{\partial R} + \frac{2}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(R \frac{\partial V}{\partial X} \right) - \frac{V}{R} \right] \quad (7)$$

*에너지 보존 방정식

$$\frac{r_i}{L} R \frac{\partial \gamma}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial R} (RV\gamma) + \frac{\partial}{\partial X} (RU\gamma) = \frac{2}{RePr} \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \gamma}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(R \frac{\partial \gamma}{\partial X} \right) \right] \quad (8)$$

*성분 보존 방정식

$$\frac{r_i}{L} R \frac{\partial \beta}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial R} (RV\beta) + \frac{\partial}{\partial X} (RU\beta) = \frac{2}{RePr} \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \beta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(R \frac{\partial \beta}{\partial X} \right) \right] \quad (9)$$

이상의 방정식들에서 사용한 무차원 수 및 Schvab-Zeldovich변수들은 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho_g v^* 2r_i}{\mu_g}, \quad Pr = \frac{\mu_g C_p}{k_g} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{C_p T_g}{Q} + \frac{Y_F}{W_F \nu_F}, \quad \beta = \frac{Y_o}{W_o \nu_o} - \frac{Y_F}{W_F \nu_F}$$

2.2 초기조건 및 경계조건

본 연구에서 채택한 확산화염의 연소 유동장을 해석하기 위하여는 위의 지배 방정식 뿐만 아니라 정확한 초기조건 및 경계조건이 필요하다. 초기조건으로서 고체상에서는 밀도는 반응이 안된 고체밀도이고 열분해 가스의 유속은 없고 대기온도와 같은 온도를 가지며 기체상에서는 제 변수들의 값을 0으로 사용하였다. 또한 경계조건으로서 기체상에서의 유동은 축 대칭 유동이므로 중심축 상에서 반경방향의 속도는 없고 다른 변수들은 Neumann형 경계조건이 된다. 고체상과 접하는 경계면에서 반경방향의 질량유속은 열분해 가스의 질량유속과 동일하며 이는 대류 및 확산에 의한 항의 합과 같아진다. 또 X 방향 속도 U 는 미끄럼이 없는 경계조건으로서 0이 되며 온도는 고체상의 온도와 같다. 고체상에서는 원통형 연료의 외벽면에서는 단열조건 및 질량 전달이 없는 조건을 사용하였고 연료 밀면에서는 기체상과 고체상에서 모두 주어진 값을 사용하였다. 이상의 초기조건 및 경계조건들을 수식으로 나타나면 다음과 같다.

*초기 조건 (즉 $\tau=0$ 일 때)

$$\bar{\rho} = 1, \quad \bar{M} = 0, \quad \theta = 1$$

$$U = 0, \quad v = 0, \quad \gamma = 0, \quad \beta = 0 \quad (11)$$

*경계 조건

○ $R=0$ 에서

$$\frac{\partial U}{\partial R} = 0, \quad V = 0, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial R} = 0, \quad \frac{\partial \beta}{\partial R} = 0 \quad (12)$$

○ $R=1$ 에서

$$U = 0, \quad V = \frac{k_w}{\rho_g v^* C_{pw} r_i} \bar{M}, \quad \theta_g = \theta,$$

$$-\frac{1}{W_F \nu_F} = \beta - \frac{2}{RePr} \frac{1}{V} \frac{\partial \beta}{\partial R} \quad (13)$$

○ $R = \frac{r_o}{r_i}$ 에서

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = 0, \quad \bar{M} = 0 \quad (14)$$

○ $X=0$ 이고 $0 \leq R \leq 1$ 일 때

$$U = U_{given}, \quad V = 0, \quad \gamma = \gamma_{given}, \quad \beta = \beta_{given} \quad (15)$$

○ $X=0$ 이고 $1 \leq R \leq \frac{r_o}{r_i}$ 일 때

$$\theta = \theta_{given} \quad (16)$$

○ $X = \frac{L}{r_i}$ 이고 $0 \leq R \leq 1$ 일 때

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \beta}{\partial X} = 0 \quad (17)$$

○ $X = \frac{L}{r_i}$ 이고 $1 \leq R \leq \frac{r_o}{r_i}$ 일 때

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{hr_i}{k_w} (\theta - 1) \quad (18)$$

2.3 해석 방법

앞에서 유도한 무차원화된 지배 방정식들을 초기조건 및 경계조건등과 함께 풀기 위하여 전 계산영역에 대해 기체상에서는 고체연료의 내벽면부근을 좀더 자세히 해석하고자 불균일 격자를 사용하였으며, 비정상항에 대해서는 Fully Implicit Scheme을, 대류와 확산항에 대해서는 Power Law Scheme⁽¹⁰⁾을 사용하여 수치해석 하였으며, 고체상과 기체상의 경계면의 온도를 가정하여 고체상과 기체상의 제 변수들의 값을 계산하고 계산결과로부터 경계면의 에너지보존식에 의해 이 문제의 일종의 고유치인 새로운 경계면 온도를 구하여 모든 변수들이 수렴할 때까지 반복 계산하고 고체 연료의 전 영역이 열분해가 완료될 때까지 계산을 수행하여 수치해를 구하였다. 이때 수렴조건들로는 기체상에 대하여는 입구운동량 및 입구질량에 대한 전영역의 잔류생성항(residual source)의 합과 질량잔류항(mass residual)합의 비가 0.5% 이내로 하였고, 고체상의 온도에 대하여는 상대오차 0.5% 이내를 수렴조건으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치적인 해를 얻기 위하여 고체 연료로서는 형상비 r_o/r_i 가 1.67이고 L/r_i 이 3.33인 나무를 사용하였고 산소의 공급원으로서는 공기를 사용하였으며 이때 사용한 물리 화학적인 값들은 다음과 같다^(4,5,7).

- $\rho_w = 0.58 \text{ g/cm}^3$
- $k_w = 2.7 \times 10^{-4} \text{ cal/cm sec}^\circ\text{C}$
- $Q = 120000 \text{ cal/mole}$
- $k_f = 4.5 \times 10^{-4} \text{ cal/cm sec}^\circ\text{C}$
- $a_p = 2 \times 10^7 \text{ sec}^{-1}$
- $C_{pw} = 0.55 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $W_{FV} = 30$
- $E_p = 30000 \text{ cal/mole}$
- $C_{pf} = 0.242 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $W_{VO} = 32$
- $Q_p = -180 \text{ cal/g}$
- $C_{pg} = 0.264 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

중공 원통형 고체연료의 연소특성을 고찰하기 위하여 기체상으로 유입되는 공기의 입구 레이놀즈수 변화 및 고체연료 내부에 함유된 휘발분 양의 변화에 따른 고체연료의 연소특성에 대해 얻은 수치해의 결과는 다음과 같다.

3.1 축 방향에 따른 연소특성

Fig. 2에서 Fig. 4는 활(char) 밀도가 0.45 g/cm^3 이고 입구 레이놀즈수 500인 경우에 대하여 시간 $\tau = 5.95 \times 10^3$ ($t^* = 0.0605 \text{ sec}$)에서의 고체상과 기체상에서의 축 방향 위치에 따른 제 변수들의 반경방향 분포를 도시한 것들이다.

Fig. 2는 다공성 고체상 내부를 반경방향으로 이동하는 열분해 가스의 질량유속(volatile mass flux)의 반경방향 분포를 각각의 축 방향 위치에서 도시한 것으로써, 축 방향으로 진행함에 따라 열분해 가스의 질량유속은 감소하며, 중심축 쪽으로 갈수록 질량유속은 증가한다. 또한 열분해가 일어나는 위치 즉 질량유속이 0 보다 큰 반경방향으로의 범위는 축 방향으로 감에 따라 감소함을 보여준다. 이는 축 방향으로 진행할수록 열전달이 감소하여 고체연료의 온도 상승률이 감소함으로써 열분해 가스생성률이 감소되어 일어나는 현상으로 해석된다.

Fig. 3은 전 영역 즉 고체상과 기체상의 반경방향 온도분포를 각각의 축 방향 위치에서 도시한 것으로 입구 가스온도와 같은 값을 갖는 중심축의 온

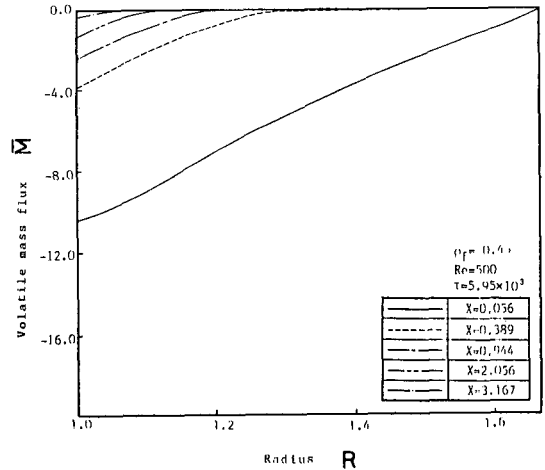


Fig. 2 Radial distribution of volatile mass flux at various axial locations and given time

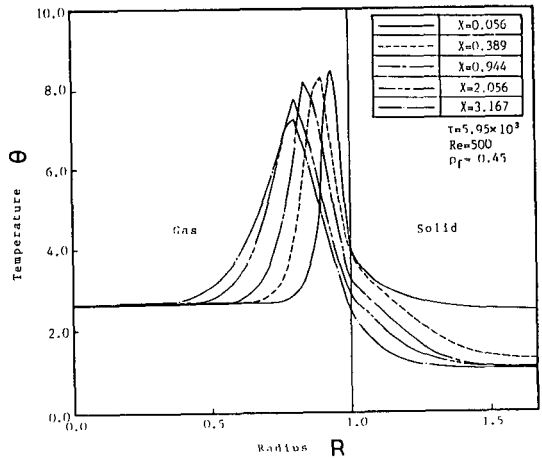


Fig. 3 Radial distribution of temperature at various axial locations and given time

도에서부터 고체연료와 기체의 경계면 쪽 즉 반경 방향으로 가며 온도가 급격히 증가하여 최고값을 갖은후 급격히 감소하고 고체상에서는 서서히 감소를 보여준다. 또한 축 방향으로 감에 따라 최고 온도가 나타나는 위치는 중심축 선 쪽으로 이동하며 최고온도 즉 화염의 온도는 감소하고 고체상의 온도는 낮은 값을 갖는다. 이는 유출된 열분해 가스의 양은 하류로 갈수록 감소하나 축 방향 대류의 영향으로 화염은 질량 경계층 형태로 존재하게 되며, 이로 인하여 고체상의 온도는 하류쪽이 낮은 값을 갖는 것으로 해석된다.

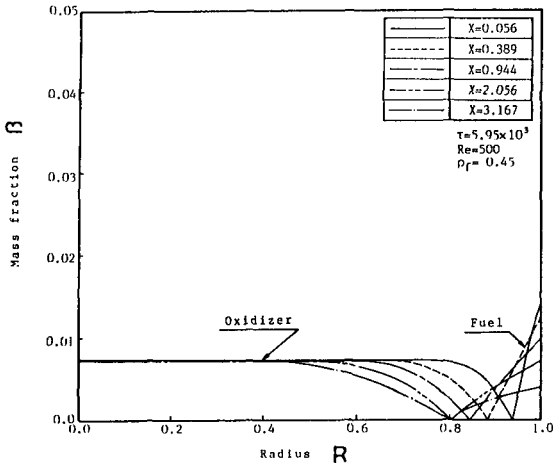


Fig. 4 Radial distribution of mass fraction at various axial locations and given time

Fig. 4는 기체상에서의 연료와 산소의 질량분율의 반경방향 변화를 나타낸 것으로 입구와 같은 분율을 갖는 산소는 고체연료와 기체의 경계면 즉 고체연료의 내벽면 쪽으로 갈수록 감소하여 화염면에서 0이 되며 연료는 고체연료 내벽면에서 최고값을 갖으며 중심축 선쪽으로 갈수록 감소하여 화염면에서 역시 0이 됨을 보여준다. 또한 축 방향으로 진행함에 따라 유출되는 열분해 가스의 양이 감소하므로 고체연료 내벽면에서의 연료의 질량분율은 감소하고, 화염면의 위치 즉 질량분율 β 가 0인 위치도 고체연료 내벽면으로부터 중심축 쪽으로 먼 곳에 위치함을 보여준다.

3.2 시간에 따른 연소 특성

Fig. 5부터 Fig. 8까지는 입구 레이놀즈수가 500이고 화 밀도가 $0.45g/cm^3$ 인 경우에 대해 주어진 축 방향 위치 즉 $X=0.389$ 에서 시간에 따른 제 변수들의 분포 변화를 도시한 것들로서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 고체연료 내부를 유동하는 열분해 가스의 질량유속은 처음 열분해되기전 0에서 부터 시간이 경과함에 따라 열전달이 증가되어 열분해되는 양은 증가하고 열분해가 시작되는 위치도 고체연료 내벽면으로부터 먼 곳에 위치하나 더욱 시간이 경과한 경우 ($\tau=1.49 \times 10^4$)에 대해서는 열분해가 완료되어 0이 됨을 보여주고 있다.

Fig. 6은 시간이 경과함에 따른 고체상과 기체상의 반경방향 온도분포를 도시한 것으로, 초기 즉

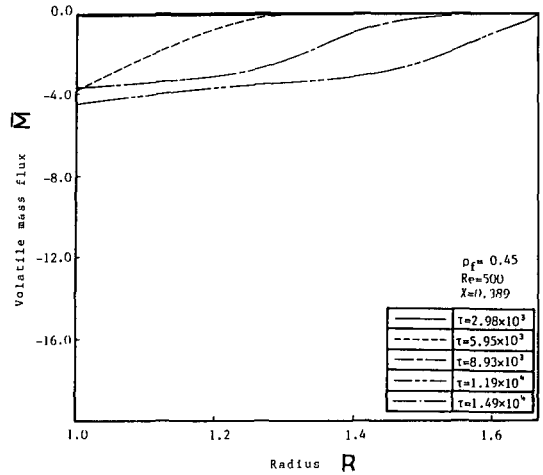


Fig. 5 Radial variation of volatile mass flux with time

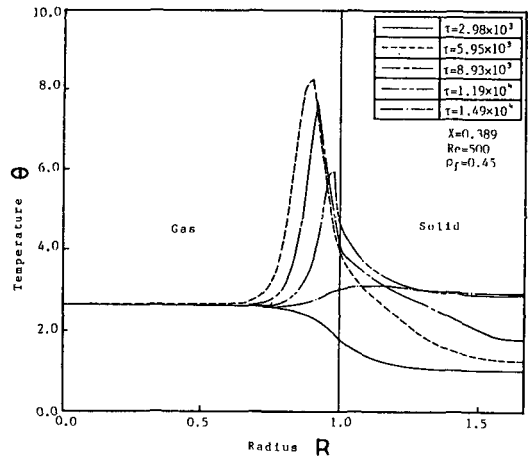


Fig. 6 Radial variation of temperature with time

$\tau=2.98 \times 10^3$ 에는 유출되는 열분해 가스량이 미소하여 아직 화염이 형성되지 않았기 때문에 대류의 영향에 의해 기체상의 온도가 고체상보다 높으며 이후에는 유출되는 열분해 가스량이 증가하여 기체상에서 형성된 화염때문에 기체상의 온도는 급격히 증가하고 시간이 더욱 경과함에 따라 $X=0.389$ 이하 즉 연료하부로 부터 열분해가 완료되기 시작하므로 최고온도는 낮아지고 그 위치도 고체연료 내벽면쪽으로 접근하는 경향을 보여준다. 또한 열분해가 완료된 시점($\tau=1.49 \times 10^4$)에는 유출되는 열분해 가스가 없으므로 화염은 소멸하나 기체상에 비해 고체상의 열용량이 크므로 기체상보다 고체상

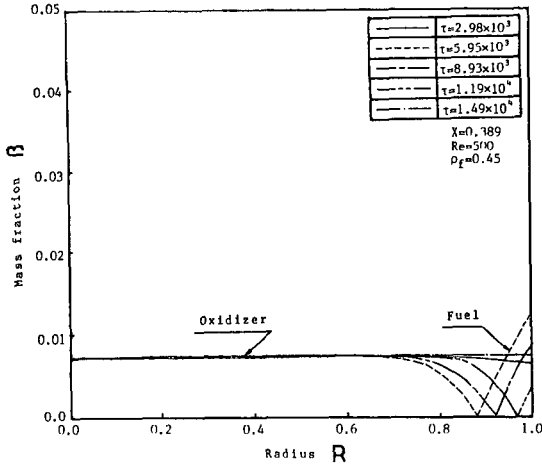


Fig. 7 Radial variation of mass fraction with time

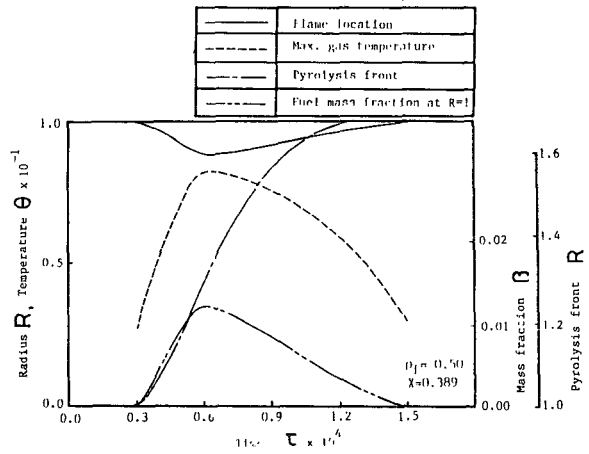


Fig. 8 Time variation of flame location, max. gas temperature, pyrolysis front and interface mass fraction at given axial location

의 온도가 높음을 알 수 있다.

Fig. 7은 기체상에서의 시간의 변화에 따른 연료 및 산소의 질량분율의 반경방향 분포를 나타낸 것으로 열분해가 시작되어 화염이 형성되고 소멸되어 감에 따라 연료의 질량분율은 초기에 급격히 커진 후 점차 감소하고, 화염면의 위치($\beta=0$)도 고체연료 내벽면으로 접근하며, 열분해가 완료된 후 ($t=1.49 \times 10^4$)에는 연료의 질량분율이 0이 됨을 보여 준다. 이는 Fig. 6의 최고점의 온도분포의 시간에 따른 변화나 Fig. 8의 $X=0.389$ 위치에서의 화염 위치의 시간에 따른 변화와도 일치한다. 또한 산소의 질량분율도 고체연료 내벽면 근처에서만 유출된 열분해 가스와의 연소반응에 의해 감소함을 보여주고 있다.

Fig. 8은 주어진 축 방향 위치($X=0.389$)에서의 시간에 따른 화염의 위치, 기체상의 최고온도, 고체상 내부의 열분해 시작위치, 고체연료 내벽면에서의 기체화된 연료의 질량분율들의 변화를 도시한 것으로서 시간이 경과함에 따라 기체상의 최고온도와 연료의 질량분율은 증가하여 최고값을 갖은 후 감소하며 화염의 위치 또한 고체연료 내벽면에서 멀어지다가 온도 및 질량분율이 최고가 된 시점부터 다시 감소함을 보여준다. 또한 고체상 내부의 열분해 시작위치는 어느 시간 동안 예열기간을 거친 후 열분해가 시작되면 시간이 감에 따라 고체연료 외벽면쪽으로 이동하여 고체연료 외벽면 까지 도달한 후 열분해를 완료함을 보여준다. 이들은 열분해가 시작된 후 시간이 경과하면 열분해 가스가 양이 증

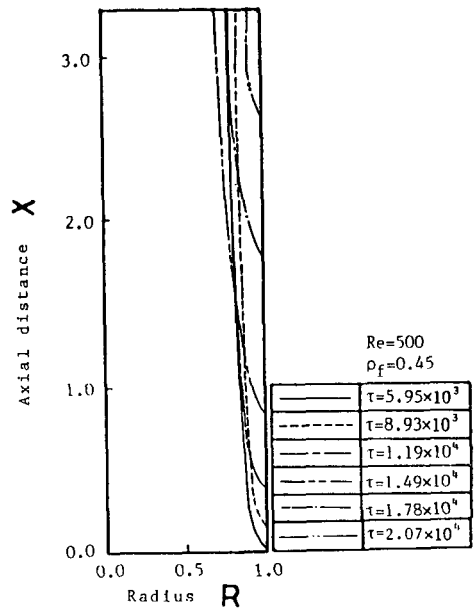


Fig. 9 Variation of flame shape with time

가하여 이로 인하여 화염의 위치는 고체연료 내벽면으로 부터 멀어지며 최고온도는 상승하다 어느 시간 이상이 지나면 열분해 양이 감소함으로써 화염도 고체연료 내벽면 쪽으로 이동하고 최고온도는 낮아지며 고체연료 내벽면의 연료 질량분율 또한 연계되어 감소하는 것으로 해석된다.

Fig. 9는 시간이 경과함에 따른 기체상에 형성되

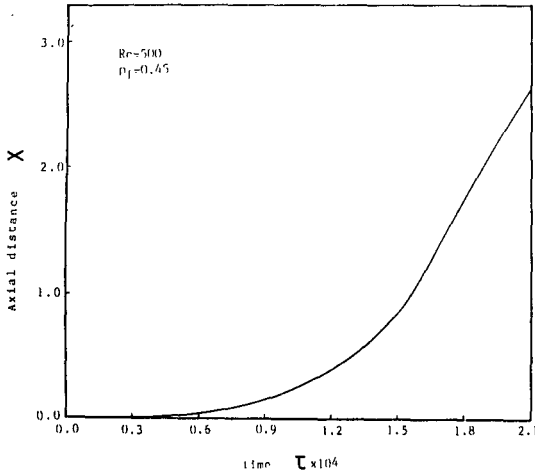


Fig. 10 Time variation of starting point of flame at inner wall

는 화염의 형상을 도시한 것으로 고체상에서의 열분해가 활발한 위치가 시간에 따라 하류로 이동하므로 기체상에서 형성되는 화염은 연료 하부 즉 상류로부터 점차 연료 상부 즉 하류로 이동하고 또 형성된 화염으로 부터의 열전달에 의해 고체상의 열분해가 촉진되므로 시간이 지남에 따라 같은 시간동안에 이동한 화염의 거리도 증가하는 현상을 보여주고 있으며 결국 열분해가 완료되면 소화됨을 보여준다. 이때 화염의 형상은 질량 경계층 유동의 형태를 형성한다.

Fig. 10은 기체상에 형성되는 화염의 고체연료 내벽면 상의 시작(starting point) 위치의 시간에 따른 변화를 도시한 것으로 Fig. 9에서 고찰한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 시작점의 위치가 하류로 이동하고 또 이동속도도 점차 증가함을 보여준다.

3.3 휘발분의 함유량에 따른 연소 특성

Fig. 11은 입구 레이놀즈수가 500인 경우에 대해 주어진 시점($\tau=5.95 \times 10^3$)과 주어진 축 방향 위치($X=0.389$)에서 각각의 휘발분 함유량의 변화에 따른 세 변수들 즉 온도, 열분해 가스의 질량유속, 산소와 연료의 질량분율의 반경방향 분포를 비교 도시한 것이다. 이때 휘발분 함유량은 각각 5.2%, 13.8%와 22.4%(즉 좌 밀도가 $0.55g/cm^3$, $0.50g/cm^3$, $0.45g/cm^3$)로써 온도, 질량유속, 산소와 연료의 질량분율의 반경방향 분포들의 대체적인 경향

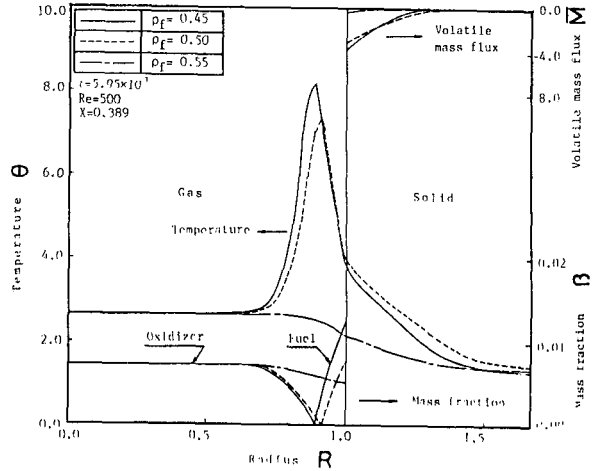


Fig. 11 Radial variation of temperature, mass fraction and volatile mass flux for various char density at given time and position

은 Fig. 2에서 Fig. 7의 경향과 같다. 먼저 다공성 고체상내에서 기체상 쪽으로 전달되는 열분해 가스의 고체연료 내벽면에서의 질량유속은 휘발분의 함유량이 작을수록 감소함을 보여주며, 휘발분이 5.2%인 경우는 유출되는 유량이 작으므로 화염이 형성되지 않으며 고체연료 내벽면 근처에서만 열분해가 일어남을 보여준다. 화염이 형성되는 경우, 즉 휘발분이 13.8%, 22.4%인 경우들은 함유량이 작은 경우가 온도 또는 질량분율의 분포에서 보여주는 바와 같이 화염면이 고체연료 내벽면 가까이 존재하며, 고체연료 내벽면 상의 휘발분의 질량유속은 적으나 이 경우 열분해에 필요한 열량이 적게 필요하기 때문에 함유량이 큰 경우보다 열분해가 넓은 범위에서 일어남을 보여준다. 또한 화염이 형성되는 경우 즉 휘발분의 함유량이 큰 경우들에는 함유량이 큰 경우일수록 유출되는 열분해 가스량이 크기 때문에 함유량이 작은 경우보다 연료의 질량분율이 크며 화염의 위치($\beta=0$)는 중심축 선 쪽 가까이 있음을 보여준다. 이때 최고온도 즉 화염면의 온도는 연료의 휘발분 함유량이 클 수록 높은 온도를 나타내며 그 위치는 중심축 선 쪽 가까이 위치한다. 화염이 형성되지 않은 경우 즉 휘발분 함유량이 5.2%인 경우는 열분해 가스의 유량이 적고 반응이 없으므로 인하여 산소는 고체연료 내벽면 까지 존재하며 대류의 영향으로 인하여 기체상의 온도가 고체상의 온도보다 높음을 나타낸다.

Fig. 12는 입구 레이놀즈 수가 500인 경우 주어

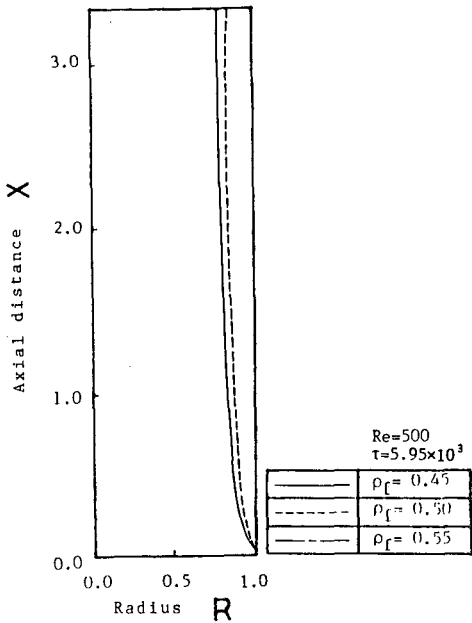


Fig. 12 Variation of flame shape for various char density at given time

진 시간에서의 각각의 휘발분 함량에 대한 화염의 형태를 도시한 것으로 화염이 형성되는 경우들의 화염형태는 경계층 유동의 형태를 갖으며 휘발분의 함량이 클 수록 화염면은 고체연료 내벽면으로 부터 중심축 쪽으로 이동하여 존재함으로 보여 준다. 또한 휘발분의 함량이 적은 경우는 화염이 형성되지 않음을 나타내고 있다.

3.4 입구 레이놀즈수에 따른 연소 특성

Fig. 13은 주어진 시점($\tau=5.95 \times 10^3$), 주어진 축 방향 위치($X=0.389$)에서 화 밀도가 0.50g/cm^3 인 경우의 기체상 입구 레이놀즈수에 따른 열분해 가스의 질량유속, 온도 및 산소와 연료의 질량분율의 반경방향 분포들을 비교 도시한 것으로 질량유속, 온도 및 질량분율의 반경방향으로의 변화경향은 앞에서 고찰한 것과 같다. 입구 레이놀즈수가 클때 즉 입구 기체상의 속도가 크게 되면 최고 온도 지점 즉 화염은 고체연료 내벽면 쪽으로 위치하며 최고 온도 값도 레이놀즈 수가 작을 때보다 낮은 값을 보여주며, 고체상을 유동하는 열분해 가스의 질량유속은 커지며 기체상의 연료 질량분율은 감소함을 보여준다. 이는 레이놀즈수가 증가하면 축 방향 대류 영향이 반경방향 확산 영향보다 상대

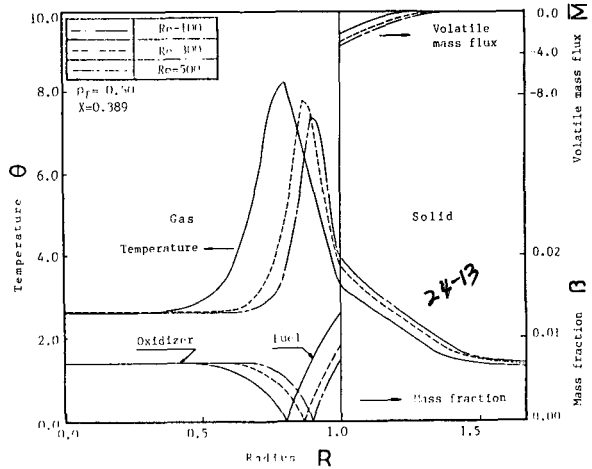


Fig. 13 Radial variation of temperature, mass fraction and volatile mass flux for various Reynolds number at given time and position

적으로 커지게 되므로 벽면으로 부터 나온 기체상의 연료가 중심축 쪽으로 퍼지는 범위가 작게되어 화염은 벽면 가까이 존재하고, 이로 인하여 화염면상의 표면적은 크게 되므로써 최고온도는 낮아지는 것으로 해석된다. 또한 화염이 벽면 가까이 존재함으로 기체상에서 고체상으로의 열전달은 커지게 됨으로써 레이놀즈 수가 클 때의 고체상 내를 유동하는 열분해 가스의 질량유속은 레이놀즈 수가 작은 경우에 비하여 상대적으로 크게 나타나며 열분해가 시작되는 위치도 고체연료 내벽면으로 부터 먼 곳에 위치하는 것으로 해석된다

Fig. 14는 화 밀도가 0.50g/cm^3 인 경우 주어진 시간($\tau=5.95 \times 10^3$)에서 기체상에 형성되는 화염의 형상을 도시한 것으로 앞에서 설명한 바와 같이 입구 레이놀즈수가 클 수록 질량 확산에 비하여 증대된 대류의 영향에 의해 화염은 고체 연료 내벽면 가까이에서 형성됨을 보여준다.

Fig. 15는 Fig. 13 및 Fig. 14와 같은 경우 주어진 축방향 위치 즉 $X=0.389$ 에 대하여 입구 기체의 레이놀즈 수 변화에 따른 화염면의 위치, 화염면의 온도, 고체상 내부의 열분해가 시작되는 위치와 고체연료 내벽면 상에서의 기체화된 연료의 질량분율의 변화들을 도시한 것으로써 레이놀즈수가 증가할 수록 기체상의 화염의 위치는 고체연료 내벽면 쪽으로 이동하며 고체상 내부의 열분해가 시작되는 위치도 고체연료 외벽면 쪽으로 이동함을 보여준다. 또한 레이놀즈 수가 클 수록 형성되는

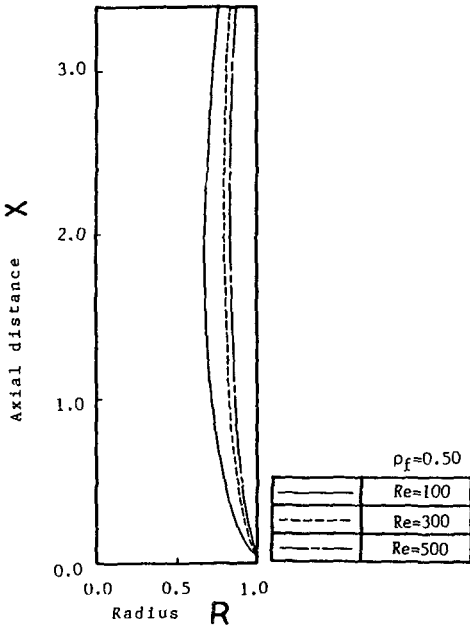


Fig. 14 Variation of flame shape with Reynolds number at given time

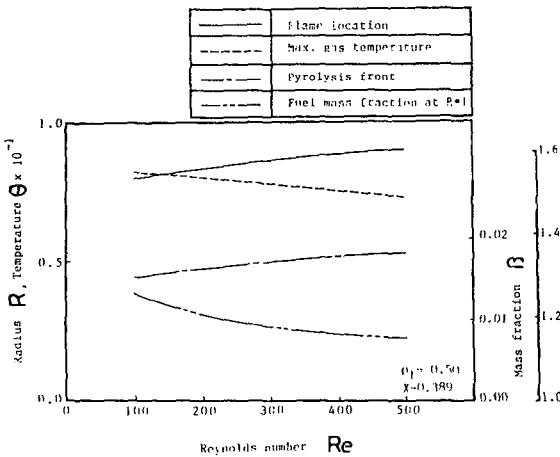


Fig. 15 Variation of flame location, max. gas temperature, pyrolysis front and interface mass fraction with Reynolds number at given axial location

화염의 온도는 낮아지며 고체연료 내벽면상의 연료 질량분률 또한 감소함을 보여준다. 이는 레이놀즈 수가 증가할수록 반경방향으로의 질량확산이 축방향의 대류영향에 비하여 상대적으로 작아져서 화염은 고체연료 내벽면 가까이에 존재하게 되고 이로 인하여 열분해 시작위치는 고체연료 외벽면 쪽으로

이동하며 온도 및 고체연료 내벽면의 연료 질량분률이 낮아지는 것으로 해석된다.

4. 결 론

연탄등의 열분해 특성 및 연소특성을 규명하기 위한 기본모델로서 중공 원통형 고체 연료의 연소 특성을 이론적 모델을 통하여 수치적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중공 원통형 고체연료에 형성되는 열분해 가스에 의한 화염은 질량 경계층 형태를 갖으면 시간이 경과함에 따라 열분해에 의해 생성되는 열분해 가스에 의한 화염의 시작 위치는 하류 측 고체연료의 상부로 이동하고 그 이동속도는 가속되며, 열분해가 완료됨에 따라 소화된다.

(2) 주어진 축 방향 위치에서 고체연료내에서 생성되는 열분해 가스의 질량유속, 기체상의 화염온도, 연료의 질량분률 등은 시간에 따라 증가하다 감소하며 화염은 연료 내벽면에서부터 중심축 선 쪽으로 이동하며 제일 멀어진 위치에서 최고온도를 유지한 후 다시 연료 내벽면 쪽으로 이동한다.

(3) 화염이 형성될 경우는 함유된 휘발분의 양이 적을수록 화염면은 고체연료 내벽면 가까이에 존재한다.

(4) 주어진 시간에서 입구 레이놀즈수가 증가할수록 열분해 현상이 촉진되어 유출되는 열분해 가수량은 많아지나 대류의 영향에 의해 화염면은 고체연료 내벽면 가까이에 형성되며 화염의 온도 및 연료의 질량분률은 감소하고 고체연료 내의 열분해가 일어나는 위치는 고체연료 외벽면 쪽으로 이동한다.

끝으로 본 모델은 연탄의 연소시 열분해 가스의 연소모델로 사용할 수 있으며, 고체연료의 연소특성을 보다 체계적으로 규명하기 위해서는 연료의 형상비(aspect ratio)에 대한 고려를 첨가함을 물론 복사열전달 및 가변상태량과 유한 화학반응모델을 채택함과 동시에 열분해가 완료된 순수한 탄소의 연소현상의 해석등이 요망된다.

후 기

본 연구를 수행함에 있어 컴퓨터 사용을 지원해 준 한국과학기술원 시스템공학센터의 SEC 관계자 여러분께 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- (1) Kanury A. Murty and Perry L. Blackshear, JR., 1967, "Pyrolysis Effect in the Transfer of Heat and Mass in Thermally Decomposing Organic Solids", 11th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 513~523.
- (2) E.Roy Tinney, 1965, "Combustion of Wooden Dowels in Heated Air", 10th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 925~930.
- (3) Ronald L. Panton and Jerrold G. Rittmann, 1971, "Pyrolysis of a Slab of Porous Material", 13th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 881~891.
- (4) Hsiang-Cheng Kung, 1972, "A Mathematical Model of Wood Pyrolysis", Combustion and Flame, Vol. 18, pp. 185~195.
- (5) Hsiang-Cheng Kung, 1975, "The Burning of Vertical Wooden Slabs", 15th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 243~253.
- (6) Matsumoto, T., Fujiwara, T. and Kondo, J., 1969, "Nonsteady Thermal Decomposition of Plastics", 12th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 515~524.
- (7) Kosdon, F.J., Williams, F.A. and Buman, C., 1969, "Combustion of Vertical Cellulosic Cylinders in Air", 12th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 253~264.
- (8) Roberts, A.F. and Clough, G., 1963, "Thermal Decomposition of Wood in an Inert Atmosphere", 9th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 158~166.
- (9) Nolan, P.F., Brown, D.J. and Rothwell, E., 1973, "Gamma-Radiographic Study of Wood Combustion", 14th Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1143~1150.
- (10) Suhas V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill.