

<論 文>

석탄입자가 존재하는 공기중에서의 화염전파에 관한 모사

윤길원\*·백승욱\*\*

(1987년 7월 20일 접수)

Simulation of Flame Propagation in Suspension of Coal Particles

Gil Won Yun and Seung Wook Baek

**Key Words:** Flame Propagation(화염전파), Radiation(복사열전달), Two Phase Flow(2상 유동), Burning Velocity(연소속도), Flame Structure(화염구조)

Abstract

A two phase model for the simulation of flame propagation has been developed and applied to a mixture of coal and air. The effects associated with changes in the initial coal partical equivalence ratio and the initial diameter of particles on the structure of laminar flame propagation have been studied qualitatively and quantitatively. Especially the flame structure, the burning velocity, and the thermal behavior were evaluated. It was found that the radiative heat transfer absolutely dominates over the conduction mode. The increase in particle size was seen to contribute to an obvious increase in burning velocity for fuel lean and stoichiometric mixture. But for fuel rich mixture, the burning velocity was found to exhibit a weaker dependence on particle size.

기 호 설 명

$a$  : 흡수계수  
 $A_{hc}$  : HC 반응의 예지수 ( $8.02 \times 10^6$ )  
 $C_{pc}$  : 석탄의 비열 ( $1.794 \times 10^3$  J/kg)  
 $C_{pg}$  : 가스의 비열 ( $1.185 \times 10^3$  J/kg)  
 $D$  : 확산계수 ( $1.81 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s)  
 $f$  : 비등방 산란 인자  
 $F_{sc}$  : 열전달 계수  
 $G$  : 복사열 전달의 평균 강도  
 $h$  : 비엔탈피  
 $h^0_c$  : 휘발성 물질의 잠열 ( $1.724 \times 10^6$  J/kg)

$h^0_{hc}$  : 휘발성 물질의 반응열 ( $-3.558 \times 10^7$  J/kg)  
 $h^0_{coal}$  : 고체상에서 나오는 에너지 ( $9.21 \times 10^6$  J/kg of C)  
 $h^0_{het}$  : 석탄의 이질 반응열 ( $-2.36 \times 10^7$  J/kg of C)  
 $K$  : 투과계수  
 $M$  : 질량유량  
 $MW$  : 분자량  
 $P$  : 압력  
 $Q_c$  : 열전도율  
 $Q_r$  : 복사열 전달율  
 $\bar{R}$  : 일반 기체 상수  
 $r$  : 고체반경  
 $T$  : 온도  
 $\lambda_g$  : 가스의 열전도성

\* 정회원, 대한항공 기술연구소

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

- $\rho$  : 밀도
- $\sigma$  : 스테판 볼츠만 상수
- $\sigma_s$  : 산란계수
- $\Gamma$  : 반응율
- $\phi$  : 당량비
- $\varepsilon$  : 석탄의 부피분
- $U$  : 속도
- $V$  : 확산속도
- $x$  : 거리
- $Y$  : 질량분율
- $Z, Z_{fc}, Z_o$  : 석탄, 고정탄소, 가스가 되지 않은 휘발성 물질의 질량분율

하 첨 자

- $c$  : 석탄
- $f$  : 궁극조건
- $i$  : 입의종
- $m$  : 혼합물
- $0$  : 초기조건
- $v$  : 휘발성물질
- $H_2O$  : 수증기
- $CO_2$  : 이산화탄소
- $g$  : 가스

서 가장 중요한 요소는 화염대로부터의 미연소 혼합물 방향으로의 열전달 및 가스의 확산 현상이다. 이러한 예혼합화염 (premixed flame)의 일반적 구조는 예열지역 (preheat zone), 화염대 (flame zone), 이완지역 (relaxation zone)의 세가지로 구분된다. 미연소 혼합물은 화염대로 접근해 가면서 화염대로부터의 진도, 대류, 복사 열전달에 의해 온도가 상승하여 점화되고(예열지역), 그후 화학적 발열반응에 의해 온도상승이 가속되면서 연소반응도 동시에 가속된 후 연료의 소모로 인해 반응속도가 감소하며 온도는 최고점에 이르고(화염대) 기체 및 고체입자의 온도는 점차로 평형상태에 도달한다(이완지역).

본 연구에서는 공기중에 석탄 또는 곡식가루등과 같은 고체미립자가 섞여 있는 반응물에서의 화염전파에 관한 모델을 수립하여 고체미립자 농도 및 가루의 입자 크기 변화에 따른 화염전파 속도와 예열거리를 예측한다. 이와 아울러 모델을 수립함에 있어 화염면으로부터의 복사열 전달에 의한 고체입자의 가열, 고체입자로부터의 대류와 화염면으로부터의 진도에 의한 공기의 가열과 같은 고체와 기체간의 상호 열전달 관계를 밝히며 최종적으로 이상유동에서의 화염전파에서 가장 중요한 요인을 밝히는데 목적이 있다.

1. 서 론

일반적으로 고체 또는 액체 상태의 연료와 공기와의 혼합물에서의 화염전파는 기체상태의 혼합물에서의 화염전파와 달리 매우 복잡하다. 이는 고체 또는 액체입자와 기체와의 상호관계가 중요시 되며 또한 복사열전달 효과를 무시할 수 없기 때문이다. 특히 석탄입자와 공기와의 혼합물에서의 실험에서 층류연소속도 (laminar burning velocity)가 여러 연소기에서<sup>(1-4)</sup> 측정되었고 또한 폐쇄된 노 (furnace)나 덕트 내에서도<sup>(5-7)</sup> 측정되었다. 후자의 경우 전자의 경우보다 10~30cm/s 정도 더 높게 나타났는데 이는 전자의 경우 현저한 열손실에 기인한다.

이론적으로는 석탄가루와 공기와의 혼합물의 경우 여러 사람에 의해<sup>(8-13)</sup> 다루어 졌으나 연료가 열은 (lean) 지역으로부터 연료가 진한 (rich) 지역까지를 포함하는 개괄적인 결과는 아직 제시되지 않았다.

공기중에 석탄가루가 분산되어 있을때 외부조건에 의해 점화되면 화염이 발생하여 전파되기 시작한다. 이때 화염대를 통과하면서 혼합물은 물리적·화학적 현상에 의해 매우 복잡한 현상을 수반한다. 화염전파에

2. 본 론

본 연구는 공기중에 석탄가루, 곡식가루 등 고체미립자가 섞여 있는 혼합물에서의 화염전파의 원리를 이해하고자 하는 것이 가장 주된 목적이다. 이와 아울러 화염전파속도·화염의 구조·고체 및 기체의 온도·농도분포 등 물리적·열적·화학적 특성을 구체화하기 위하여 본 연구에서는 석탄가루를 예로 취급하였다. 그 이유는 석탄가루는 고체형태의 연료인 고정탄소 (fixed carbon)와 여러 기체상태의 연료가 혼합되어 있는 매우 복잡한 구조물이기 때문이다. 석탄가루의 연소는 그러므로 휘발성 기체 (volatile gas)가 연소하는 동질반응 (homogeneous reaction)과 탄소가 연소하는 이질반응 (heterogeneous reaction)을 수반한다. 다음에 전개할 석탄가루에 대한 모델은 그러므로 여러 다른 고체상태의 연료나 액체상태의 연료에도 용이하게 변경·적용할 수 있다.

2.1 지배방정식

Fig. 1에서 화염대 위에 고정된 좌표계에서 연료와 공기와의 혼합물이 연소 속도 (burning velocity)  $U_o$ 로

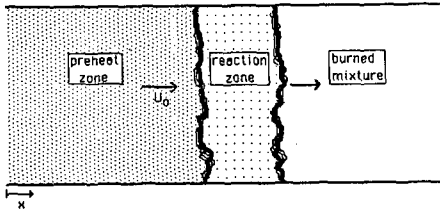


Fig. 1 Diagram of flame structure

$x=0$  인 지점으로 부터 유입되고 있다. 전체반응계는 단열상태이고 정상(steady), 1차원 층류(laminar) 상태의 화염으로 가정한다. 이때 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 고체와 기체의 속도는 같다.
- (2) 화염면으로 부터의 복사 열전달은 고체입자에만 영향을 미친다. 즉 기체는 복사열전달에 무관하다.
- (3) 구형의 고체입자는 모두 일정하게 분포되어 있고 고체입자 내부의 온도 분포는 균일하다.
- (4) Dufour 및 Soret 효과는 무시한다.
- (5) 석탄입자는 고정탄소 C와 휘발성물질  $C_5H_{10}$  으로 구성되어 있다.
- (6) 석탄입자의 이질반응은  $C+O_2 \rightarrow CO_2$  로 나타낸다.
- (7) 동질반응은  $C_5H_{10} + \frac{15}{2} O_2 \rightarrow 5CO_2 + 5H_2O$  로 나타낸다.

상기의 가정하에 다음과 같은 지배방정식을 세울 수 있다.

질량보존식

1. 혼합물의 질량 보존식

$$\frac{d}{dx} (\rho_n U) = 0, \quad M = \rho_n U$$

연소중의 고체 입자내에는 고정탄소 C와 아직 휘발되지 않고 고체 상태인 휘발성 물질이 상존하고 또 각각은 소멸되므로 아래의 식 2,3과 같다.

2. 고체 입자내 고정탄소의 질량보존식

$$M \frac{dz_{fc}}{dx} = \Gamma_c$$

3. 고체입자 내 휘발성 물질의 질량보존식

$$M \frac{dz_v}{dx} = \Gamma_v$$

산소는 반응을 진행하며 소멸되고 또 확산하므로

4. 산소의 질량보존식

$$\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n U Y_{O_2}] = -\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n Y_{O_2} V_{O_2}] + \Gamma_{O_2}$$

휘발성 기체는 확산, 생성, 소멸하므로

5. 휘발기체의 질량보존식

$$\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n U Y_v] = -\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n Y_v V_v] - \Gamma_v + \Gamma_{hc}$$

6. 수증기의 질량보존식

$$\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n U Y_{H_2O}] = -\frac{d}{dx} [(1-z) \rho_n Y_{H_2O} V_{H_2O}] + \Gamma_{H_2O}$$

에너지 보존식

혼합물의 온도를 변화시키는데 쓰이는 에너지는 열전도·복사 열전달에 의한 열량추가와 이질·동질 반응에 의한 발열 그리고 휘발성 물질을 기체로 만드는데 드는 잠열이므로

7. 고체 및 기체 혼합물의 에너지 보존식

$$M \frac{d}{dx} [ZC_{pc}(T_c - T_0) + (1-z)C_{pe}(T_g - T_0)] = \frac{d}{dx} \left( \lambda_g \frac{dT_g}{dx} \right) - \frac{dq_r}{dx} + h^0_{het} \Gamma_c + h^0_{hc} \Gamma_{hc} - h^0_g \Gamma_v$$

8. 고체입자의 에너지보존식

아래의 식 오른쪽 첫번째 항은 기체 고체간의 온도차에 의한 열전달이고  $F_{rc}$ 는 2상' 층류 유동에 관제한다.

$$M \frac{d}{dx} [ZC_{pc}(T_c - T_0)] = F_{rc}(T_g - T_c) - \frac{dq_r}{dx} - h^0_{coal} \Gamma_c + h^0_g \Gamma_v$$

고체입자의 에너지보존식 우변의  $\frac{dq_r}{dx}$ 는 복사에

의한 열전달을 나타내는데 고체를 회색물질(gray body)로 가정하고 미적분 방정식(integro-differential eq.)을 미분가정(differential approximation)에 의해 1계 미분 방정식 9, 10으로 표시한다.

9. 복사 열전달을 식

$$\frac{dq_r}{dx} - aG = 4a\sigma T_c^4$$

10. 평균 강도식

$$\frac{dG}{dx} = -3(K - \sigma_f)q_r$$

보조식

11. 기체상태의 질량비

$$Y_{CO_2} + Y_{O_2} + Y_{N_2} + Y_v + Y_{H_2O} = 1$$

12. 기체 상태방정식

$$\rho_g T_g = \frac{p_g(MW)_g}{R}$$

13. Fick's 관계식

$$Y_i V_i = -D_i \frac{dY_i}{dx} \quad \text{여기서 } D_i = (D_i)_0 \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{1.75}$$

14. 고체입자에 대한 질량분율

$$Z = Z_{fc} + Z_u$$

15. 고체입자의 밀도

$$\rho_c = \left(\frac{Z_v}{Z_o}\right) \rho_{co} + \left(1 - \frac{Z_v}{Z_o}\right) \rho_{co}$$

$$16. F_{sc} = \frac{3z\lambda_s \rho_m}{r_c^2 \rho_c} \quad \epsilon = \frac{\text{고체의 부피}}{\text{전체 부피}} = \frac{z \rho_m}{\rho_c}$$

화학반응 관계식

이질반응의 반응율은

$$17. \Gamma_c = \frac{3\rho_m z_{fc} \dot{R}_c}{r_c} \text{ 이고 여기서 표면 감소율 } \dot{R}_c \text{ 는}$$

$$\dot{R}_c = \frac{-1}{8K_D r_c + 2K_{CH}} \text{ 으로서 } K_D, K_{CH} \text{ 는 이 반응이}$$

확산과 화학반응 두 가지에 의해 조정됨을 뜻한다.

$$18. \Gamma_v = \frac{-Z_v M A_d \exp\left(-\frac{E_d}{RT_c}\right)}{U}$$

$$19. \Gamma_{hc} = -A_{hc} \frac{(1-z) M (\rho_s Y_v)^{1/2} Y_{O_2} \exp\left(-\frac{E_{hc}}{RT_s}\right)}{(MW)^{1/2}_v (MW)_{O_2}^v}$$

위의 18, 19는 휘발성 물질이 기체로 되는 반응율과 또 기체가 된 휘발성 물질이 산소와 반응하는 반응율을 각각 표현한다.

$$20. \Gamma_{O_2} = \frac{32}{12} \Gamma_c + \frac{240}{70} \Gamma_{hc}$$

$$21. \Gamma_{H_2O} = -\frac{90}{70} \Gamma_{hc}$$

본 화학반응식에 관한 모델은 Krazinski<sup>(11)</sup>의 것을 사용하였다.

## 2.2 경계조건

상기의 지배방정식의 해를 얻기 위하여 다음과 같은 경계조건을 취한다.

$$x=0(\text{cold boundary}) \quad x=\infty(\text{hot boundary})$$

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| 1. $z = z_0$               | 9. $z = z_f$ or $\frac{dz}{dx} = 0$                         |
| 2. $z_v = z_{v_0}$         | 10. $z_v = (z_v)_f$ or $\frac{dz_v}{dx} = 0$                |
| 3. $T_c = T_0$             | 11. $T_c = (T_c)_f$ or $\frac{dT_c}{dx} = 0$                |
| 4. $T_s = T_0$             | 12. $T_s = (T_s)_f$ or $\frac{dT_s}{dx} = 0$                |
| 5. $Y_{O_2} = (Y_{O_2})_0$ | 13. $Y_{O_2} = (Y_{O_2})_f$ or $\frac{dY_{O_2}}{dx} = 0$    |
| 6. $Y_v = 0$               | 14. $Y_v = (Y_v)_f$ or $\frac{dY_v}{dx} = 0$                |
| 7. $Y_{H_2O} = 0$          | 15. $Y_{H_2O} = (Y_{H_2O})_f$ or $\frac{dY_{H_2O}}{dx} = 0$ |
| 8. $q_r = 0$               | 16. $q_r = 0$   |
- 위의  $x=\infty$ 의 경계조건 중 11, 12와  $z = z_f, Y_{H_2O} =$

$(Y_{H_2O})_f$ 가 계산에 사용되었다.

## 3. 계산 결과 및 검토

위의 상기한 문제는 수치적으로 경직(stiff)한 2점 상미분 방정식 문제(two point boundary value problem)이다. 본 연구에서는 경직한 문제를 경계조건을 만족할 때까지 슈팅(shooting) 방법을 이용하여 적분하는 LSODI<sup>(14)</sup>를 사용하였는데  $x=0$ 인 지점의 경계조건으로부터 연속속도를 가정하여  $x=\infty$ (hot boundary)까지 계산해 나간다. 가정된 속도가 구하고자 하는 해이라면  $x=\infty$ 의 조건을 만족하고 그렇지 않을 경우 속도를 다시 가정한 후 반복하여 계산한다.

### 3.1 당량비 1인 경우

Fig. 2는 50 $\mu\text{m}$ 의 석탄입자의 경우 휘발성 물질이 0%, 20%, 50%가 함유되어 있을 때 혼합물의 고체 및 기체의 온도변화를 나타낸다. 고체입자가 화염면으로

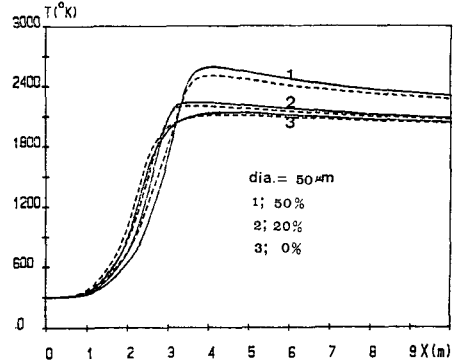


Fig. 2 Effect of volatile contents on particle and gas temperature: solid line(gas), dotted line (particle)

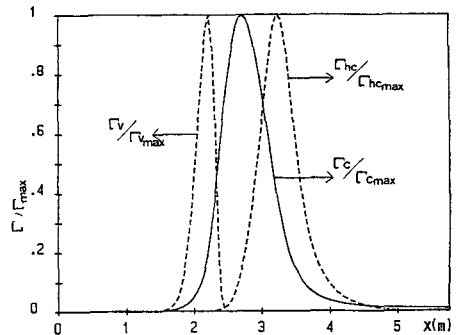


Fig. 3 Variation of  $\Gamma_v, \Gamma_c$  and  $\Gamma_{hc}$  for coal with 50% volatiles

부터의 복사열전달에 의해 가열됨으로써 기체보다 높은 온도를 유지하다 고체입자가 점화된 후로는 동질반응에 의해 생성된 열이 기체의 온도를 더 상승시키는 것을 볼 수 있다.

그후 2상간의 열전달에 의해 온도차가 감소하면서 이완지역에서 단열화염온도에 접근해 가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2는 또한 휘발성 물질 함유량이 증가할수록 온도상승이 지연되는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 3에서와 같이 석탄입자내에 있던 휘발성 물질을 휘발시키는 반응열  $\Gamma_v$ 가 다른 이질반응  $\Gamma_c$ 나 동질반응  $\Gamma_{hc}$ 보다 먼저 야기됨으로써 휘발작용에 잠열( $h^0_c$ )이 소모되기 때문이다. 또한 휘발성 물질의 함유도가 높을수록 최고 온도치가 올라가는데 이는 휘발성물질의 화학에너지가 탄소(fixed carbon)의 것보다 더 높기 때문이다.

Fig. 4는 Fig. 2의 경우의 석탄입자에 대해 혼합물의 속도 및 가스의 밀도 변화를 보여준다. 일반적으로 온도의 상승으로 인해 밀도는 감소하기 때문에 속도는 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2의 경우와 마찬가지로 휘발물질의 함유도가 높을수록 속도의 최대치도

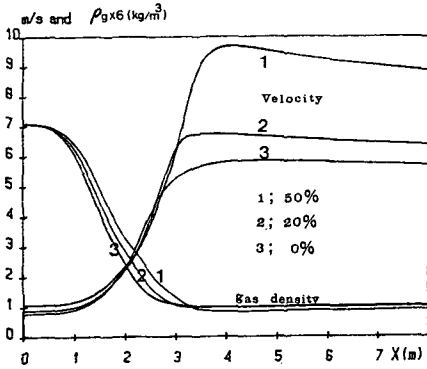


Fig. 4 Effects of volatile contents on velocity and gas density

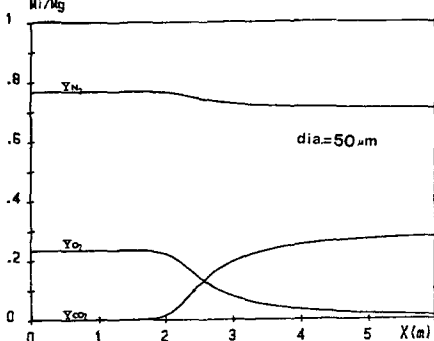


Fig. 5 Variation of  $N_2$ ,  $O_2$  and  $CO_2$  mass fractions for coal with no volatiles

더 상승하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5, 6은 고체입자내에 휘발성 물질이 0%, 50% 함유되어 있을 때 기체상태 물질들의 질량분율(mass fraction)을 나타낸다.  $Y_{O_2}$ 는 화염대 근처로부터 감소하고  $Y_{CO_2}$ 는 화학반응에 의해 증가하며 전체적인 질소의 질량은 일정하나 화학반응에 의한 기체의 질량이 증가함에 따라  $Y_{N_2}$ 가 감소하는 것을 보여준다. 생성된  $Y_v$ 는 산소와의 반응으로 소멸되며  $Y_{H_2O}$ 가 증가하는 것이 잘 나타나 있다.

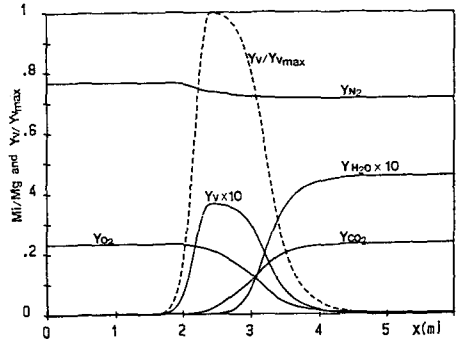


Fig. 6 Variation of various gases for coal with 50% volatiles

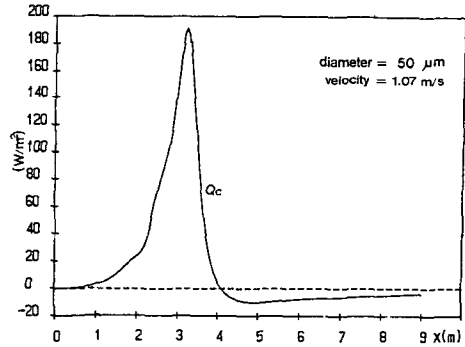


Fig. 7 Variation of conductive heat flux for coal with 50% volatiles

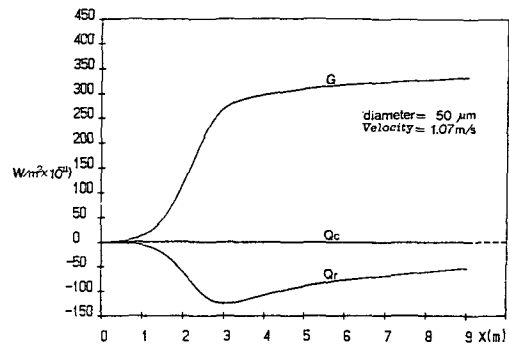


Fig. 8 Variation of conductive( $Q_c$ ) and radiative heat flux ( $Q_r$ ) for coal with 50% volatiles

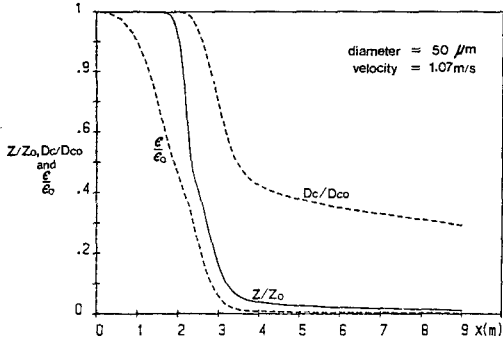


Fig. 9 Variation of volume fraction, particle mass fraction and particle diameter for coal with 50% volatiles

Fig. 7 과 8 은 각각 전도와 복사에 의한 열전달율의 변화를 나타낸다. 열전도는 기체의 온도구배에 의존하는데 온도과잉상승(overshooting) 때문에 열전도의 방향이 바뀐다. Fig. 7에서 양의 값은  $-x$  방향으로의 열전달을 의미한다. 두 그림으로부터 이상 유동에서는 복사열전달이 전도에 의한 열전달을 압도하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 석탄입자의 부피분(volume fraction)  $\epsilon$ , 질량분(mass fraction)  $Z$ , 그리고 석탄입자의 직경  $D_c$ 의 변화를 각각의 초기치에 대해 나타내주고 있다. 석탄입자가 차지하고 있는 부피의 총 혼합물에 대한 초기 부피분  $\epsilon_0$ 는 대략  $10^{-4}$  정도로 기체가 차지하고 있는 부피에 비해 거의 무시할 만하다.

### 3.2 당량비가 1이 아닌 경우

지금까지는 당량비가 1인 경우에 한하여 알아 보았다. 여기서는 당량비가 1이 아닌 경우에 즉 석탄가루가 남거나(fuel rich) 공기가 남는(fuel lean) 경우에서의 결과를 휘발성 물질이 없을 때의 석탄가루에 관해 알아 보고자 한다. 앞으로 당량비(equivalence ratio)는  $\phi$ 로 나타내기로 하면 방정식은  $\phi C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 \rightarrow aCO_2 + bC + cO_2 + \frac{79}{21} N_2$  이 될 것이다.

Fig. 10에  $\phi=0.8, 0.9, 0.95, 1, 2, 3$ 에 대한 연소속도(burning velocity)가 세계의 다른 입자크기 30, 50, 100 $\mu m$ 에 대해 나타나 있다. 최대연소 속도는 입자 크기에 관계없이  $\phi=1$ 에서 발생한다.  $\phi$ 가 1보다 커질수록 연소속도는 완만하게 감소하나  $\phi$ 가 1보다 감소할 경우 급격히 감소한다. 이러한 경향은 실험적으로도 목격되었다<sup>(15)</sup>. Fig. 11은 고체입자와 공기의 온도 변화를 각각의  $\phi$ 에 대해 보여준다. 최대 단열화염온

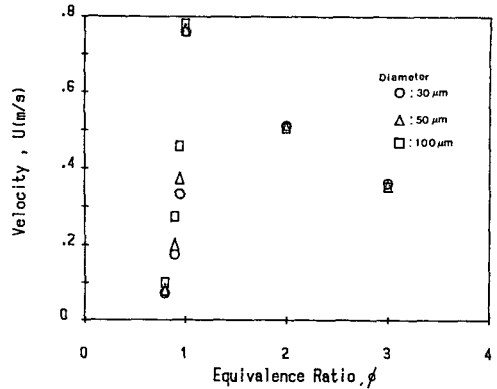


Fig. 10 Calculated burning velocity versus equivalence ratio

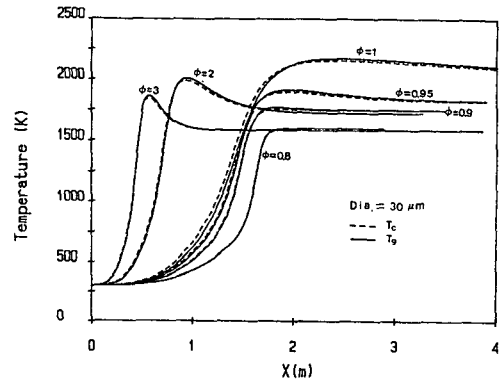


Fig. 11 Particle ( $T_c$ ) and gas ( $T_g$ ) temperature variations for various equivalence ratios ( $D_{c0}=30\mu m$ )

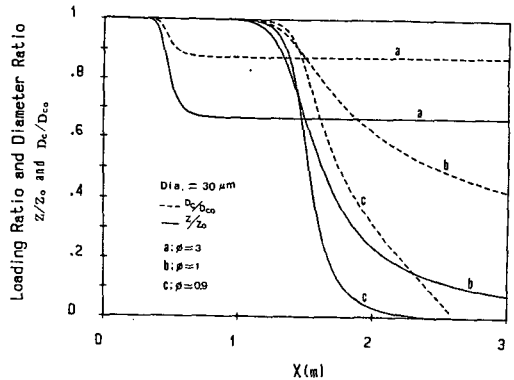


Fig. 12 Variation in particle mass fraction ratio and diameter ratio ( $D_{c0}=30\mu m$ , and  $Z_0=0.0729, 0.0804, 0.2077$  for  $\phi=0.9, 1, 3$  respectively)

도는  $\phi=1$ 에서 나타나고 이를 중심으로  $\phi$ 가 증가하거나 감소할 때 단열화염온도는 감소한다. 예열지역의 길이는  $\phi>1$  경우 감소하고  $\phi<1$  경우 증가하며 온도과

임상승 현상은  $\phi > 1$  경우 명백하게 잘 나타나는데 이는 화학반응이 일어나는 거리가 현저한 열전달이 일어나는 특성 길이보다 작기 때문이다. 이미 앞에서 언급되었듯이 복사에 의한 열전달이 전도에 의한 열전달을 압도하였다. Fig. 12는  $\phi = 0.9, 1, 3$ 인 경우에 석탄입자의 질량분과 직경의 변화를 나타낸다.  $\phi = 3$ 인 경우 공기의 소모로 말미암아 일정량의 미연소 입자가 남아 있고  $\phi = 0.9$ 인 경우 연료의 소비로 말미암아 질량분과 입자의 직경이 각각 0으로 떨어진다.

Fig. 13은 일정한  $\phi$ 의 값에 대해 교체입자의 크기를 변경했을 때의 연소속도에 대한 영향이다.  $\phi \leq 1$ 의 경우 연소속도는 입자의 크기가 증가할 수록 증가하였는데 이는 일정한  $\phi$ 의 값에서 입자의 크기가 증가할 수록 광학 두께(optical thickness)가 감소하여 Fig. 14에서와 같이 화염면으로부터의 복사열이 먼곳까지 영향을 미치므로써 예열지역의 교체입자가 일찍부터 온도가 증가할 수 있기 때문이다.  $\phi = 1$ 에서 krazinski<sup>(11)</sup>와 약간 다른 경향을 보이는 것은  $Z_0, T_{f0}$  등의 데이터

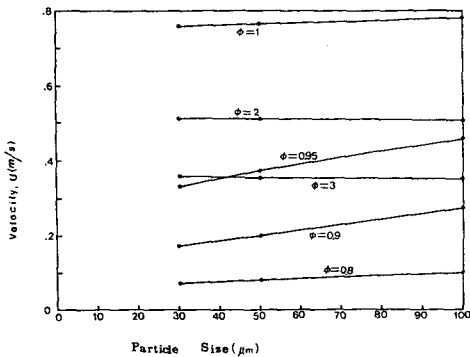


Fig. 13 Calculated burning velocity versus particle size

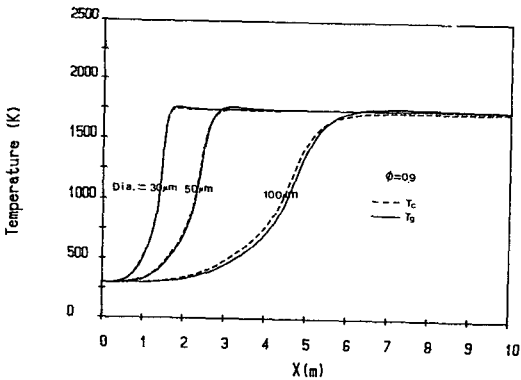


Fig. 14 Particle ( $T_p$ ) and gas ( $T_g$ ) temperature variations for 30, 50, and 100  $\mu\text{m}$  particle at  $\phi = 0.9$ .

를 화학 방정식에 충실히 하여 계산한 값으로 사용하여 그 값들이 조금씩 작기 때문이다.  $\phi > 1$ 인 경우에는 Fig. 13에서 초기입자의 크기에 관계없이 연소속도는 거의 일정하였는데 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 입자의 크기가 증가하면 복사열은 화염면으로부터 멀리까지 영향을 미치므로써 연소속도에 증가를 꾀할 수 있으나 전체 화학반응량은 복사열효과와는 반대로 감소함으로써 궁극적으로 연소속도에는 큰 영향을 주지 않는다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 이상유동에서의 화염전파원리를 이해하고자 수학적 모델을 세워 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이상유동에서의 화염전파에서 복사에 의한 열전달은 열전도에 비해 매우 크다.
- (2) 당량비 1에서의 최대연소속도를 중심으로 당량비가 증가 또는 감소할수록 연소속도는 줄어든다.
- (3) 당량비가 1보다 큰 경우 온도과잉상승 현상이 현저하고 예열지역의 거리는 줄어든다. 이러한 온도과잉상승은 화학반응에 관계된 특성길이가 현저한 열전달이 일어나는 특성길이에 비해 작기 때문이다.
- (4) 당량비가 1 또는 작은 경우 초기 교체입자의 크기 증가에 따라 연소속도는 완만히 증가하였으나 당량비가 1보다 큰 경우 연소속도는 교체입자의 주어진 크기 변화에 거의 무관하였다.

### 후 기

본 연구는 1986년도 한국과학재단의 연구비에 의해 연구되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Hattori, H., 1956, "Flame Propagation in Pulverized Coal-Air Mixtures", Sixth Symposium(International) on Combustion, Reinhold, New York, pp. 590~595.
- (2) Marshall, W.F., Palmer, H.B., and Seery, D.F., 1964, "Particle Size Effects and Flame Propagation Rate Control in Laminar Coal Dust Flames", J. Inst. Fuel, Vol. 37, pp. 342~349.
- (3) Strehlow, R.A., Savage, L.D., and Sorenson,

- S.C., 1974, "Coal Dust Combustion and Suppression", 10th AIAA/SAE Propulsion Conference, Sandiego, CA.
- (4) Horton, M.D., Goodson, F.P. and Smoot, L.D., 1977, "Characteristics of Flat, Laminar Coal Dust Flames", *Combust. Flame*, Vol. 28, pp. 187~195.
- (5) Ghosh, B., Basu, D., and Roy, N.K., 1956, "Influence of Physical Factors in Igniting Pulverized Coal", Sixth Symposium(International) on Combustion, Reinhold, New York, pp. 595~602.
- (6) Csaba, J., 1964, "Flame Propagation in a Fully Dispersed Coal Dust Suspension", Ph.D. Thesis of Sheffield.
- (7) Palmer, K.N. and Tonkin, P.S., 1971, "Coal Dust Explosions in a Large-Scale Vertical Tube Apparatus", *Combust. Flame*, Vol. 17, pp. 159~170.
- (8) Bhaduri, D. and Bandyopadhyay, S., 1971, "Combustion in Coal Dust Flames", *Combust. Flame*, Vol. 17, pp. 15~24.
- (9) Ozerova, G.E. and Stepanov, A.M., 1973, "Effect of Radiation on Flame Propagation Through a Gas Suspension of Solid Fuel Particles", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 9, pp. 543~549.
- (10) Smoot, L.D., Hortan, M.D., and Williams, G. A., 1976, "Propagation of Laminar Pulverized Coal-Air Flames", Sixteenth Symposium(International) on Combustion", Pittsburgh, pp. 375~378.
- (11) Krazinski, J.L., Buckius, R.O., and Krier, H., 1979, "Coal Dust Flames: A Review and Development of a Model for Flame Propagation", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 5, pp. 31~71.
- (12) Slezak, S.E. Buckius, R.O., and Krier H., 1985, "A Model of Flame Propagation in Rich Mixtures of Coal Dust in Air", *Combust. Flame*, Vol. 59, pp. 251~265.
- (13) Deshaies, B. and Joulin, G., 1986, "Radiative Transfer as a Propagation Mechanism for rich Flames of Reactive Suspension", *SIAA J. Math.*, Vol. 46, pp. 561~581.
- (14) Hindmarsh, A.C., 1985, "Brief Description of a Systematized Collection of ODE Solvers", *Lawlers*", Lawrence Livermore Laboratory.
- (15) Slezak, S.E., Fitch, D.J., Krier, J., and Buckius, R.O., 1983, "Coal Dust Flame Propagation in a Laboratory Flammability Tube", *Combust. Flame*, Vol. 54, pp. 103~119.