

## CWM 연료의 연소시 입자 가열속도와 입자 크기가 CWM 응집물 형성에 미치는 영향에 관한 전산모사 연구

김 수 호 · 김 영 환 · 황 갑 성\* · 홍 성 선

충북대학교 공과대학 화학공학과, \*충청대학 환경공학과  
(1997년 12월 15일 접수, 1998년 2월 27일 채택)

### Simulation Study on the Effects of Heating Rate and Particle Size Distribution for the Formation of the Agglomerate During CWM Combustion

Soo-Ho Kim, Young-Hwan Kim, Kap-Sung Hwang\*, and Song-Sun Hong

Dept. of Chem. Eng., Chungbuk Nat'l. Univ., Cheongju 360-763, Korea

\*Dept. of Environmental Eng., Chungcheong College, Chungbuk 363-890, Korea

(Received December 15, 1997, Accepted February 27, 1998)

**요 약 :** 이론적인 입자 응집모델이 CWM 응집물에서 인접한 석탄입자들 사이의 응집력을 예측하기 위해서 전개되었다. 유연탄은 약 400°C 또는 그 이상 가열될 때 석탄 입자들은 플라스틱성 거동으로의 전이 현상이 관찰될 수 있다. 석탄 입자들의 응집과정에서의 응집력은 입자들의 플라스틱성의 지속 기간에 비례하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 가열단계에서 CWM 연료의 응집물 형성에 미치는 영향을 입자 응집모델에 의하여 고찰하였다. 실험에 사용한 전산모사 프로그램은 RKG(Runge-Kutta-Gill) 방법을 이용하여 포트란으로 작성을 하였다. 입자 응집모델에 의한 CWM 연료의 입자 응집 과정에서의 응집력은 입자 가열속도에 반비례하며, 입자크기에 비례하는 것으로 나타났다.

**Abstract :** A theoretical model of particle agglomeration was developed to investigate the adhesive force between contiguous coal particles in CWM agglomerate. While heating bituminous coal to about 400°C or above, the transient occurrence of plastic behavior of coal particles can be observed. The adhesive force in the process of agglomeration of coal particles was found to be proportional to the duration of plasticity of the particles. In the research, how the heating rate and the particle size distribution of CWM fuel influenced the formation of the agglomerate in CWM fuel at the heat-up stage was investigated by the model of particle agglomeration. Simulation program used to this experiment was RKG method and was programmed by Fortran. It was represented that by the model of particle agglomeration, the adhesive force in the process of the particle agglomeration in CWM fuel was inversely proportional to the heating rate but proportional to particle size.

## 1. 서 론

최근 유연탄 활용기술의 하나로 관심을 끌어난 석탄-물 혼합연료(CWM : coal-water mixture)는 고체인 석탄을 액체상태로 변형하여 연소시킴으로써 석탄 사용상의 많은 문제점들을 해소시킬 수 있을 뿐 아니라 가스화(gasification)나 액화(liquefaction) 기술에 비하여 경제성이 월등히 높고 대규모의 새로운 시설투자가 필요없이 단기간에 기존의 오일 보일러 시스템을 개조하여 사용할 수 있는 효과적인 대체 에너지원으로 평가되고 있다[1, 2].

CWF(coal-water fuel) 또는 CWS(coal-water slurry)라고도 호칭되는 CWM 연료의 구성성분은 60~70 wt.% 정도의 미분탄과 물, 그리고 연료의 유동성을 증가시키고 안정성을 높이기 위한 소량의 첨가제로 구성되어 있다[2].

CWM 연료는 무게비로 30 wt.% 이상의 수분을 포함하고 있기 때문에 수분의 건조과정이 포함된 다음의 4단계 과정을 거쳐서 연소 과정이 진행된다고 볼 수 있다[3, 4].

- 1) 분무된 CWM 액적의 가열과정
- 2) 연료 중에 포함된 수분의 증발 과정
- 3) 휘발분의 방출 및 연소 과정

## 4) 고정탄소의 연소 및 회분의 생성 과정

이러한 CWM 연료의 연소 메카니즘에 대하여는 여러 형태의 측정방법을 통하여 많은 실험모델들이 제안되었으나 현재까지 정확한 현상 파악은 이루어지지 못했다.

Tokuda 등[5]은 CWM 액적의 크기에 따라 서로 다른 과정을 거치는 연소모델을 제시하였다. 이 모델에 의하면 액적은 크고 작은 여러개의 석탄 입자들로 구성되어 석탄의 입경보다 크고, 이 입자들은 석탄의 물성과 로내의 조건 등에 따라 연소과정이 틀리게 된다. 즉 로내의 온도가 낮아 액적이 느린 속도로 가열되고 석탄의 응집성이 강할 경우 입자들 간의 응집이 발생하여 커다란 한 개의 입자 상태로 연소되어 연소 시간이 길어진다. 반면에 순간적으로 강한 열을 받으면 입자 내부에 존재하는 수분 또는 휘발분의 팽창에 의해 개개의 석탄 입자 상태로 분산되어 연소가 촉진된다.

그 밖의 연구결과[6~8]의 공통점은 CWM 연료에서는 단일의 석탄 입자가 아닌 여러 개의 입자들이 뭉쳐서 형성된 분무 액적들이 앞에서 언급한 4단계의 연소 과정을 거쳐 최종적으로 회제를 발생시킨다는 것이다.

또한 분무 액적이 미세하면 미연탄소분 함량이 적고 크기가 작은 비산분진이 발생되므로 슬래그, 파울링, 대류부 튜브의 마모현

상이 감소하고 비산분진의 저항율이 상승하여 전기집진기의 효율이 높아지는 효과가 있다.

일반적으로 CWM 액적이 로내로 주입되면 CWM 액적내의 수분은 증발되기 시작한다. 이러한 현상으로 개개의 석탄 입자들은 고온에서 팽창되며 빠르게 가열된다. 400°C 또는 그 이상 가열되면 유연탄 입자들은 융합된다. 응집의 범위는 석탄 입자들과 석탄 종류의 시간-온도 관계에 의하여 강하게 영향을 받는 플라스틱성의 지속기간에 의존한다[9].

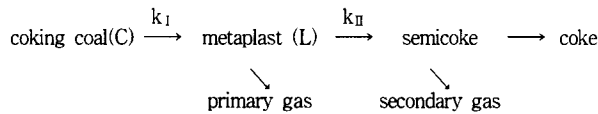
플라스틱성의 지속기간이 석탄입자들이 융합하고 합체하기에 충분히 길다면 강하게 융합된 CWM 응집물이 형성될 것이며, 반면에 이 지속기간이 짧다면 약하게 융합된 CWM 응집물이 형성되어 연소에 상당한 영향을 미치게 된다. 따라서 플라스틱성과 시간과의 관계(plasticity-time history)는 CWM 응집물의 연소에 대하여 중요한 것으로 알려져 있다[10].

본 연구에서는 로내에 주입된 CWM 연료의 액적 가열속도와 액적중의 석탄 입자크기가 가열단계에서 CWM 연료의 응집물 형성에 미치는 영향을 입자 응집모델에 의하여 고찰하였다.

## 2. 이론적 모델 - CWM 액적에서 석탄입자 응집모델

### 2.1. 유연탄의 플라스틱성

약 400°C 또는 그 이상 유연탄이 가열될 때 석탄 입자들의 플라스틱성 거동으로의 전이 현상이 관찰될 수 있다. 초기의 'bitumen : 아스팔트' 이론은 점성 슬러리를 제공하여 용융되는 가용성 성분(bitumen)의 결과로서 플라스틱성의 발전을 설명하지만, 후기의 'metaplast' 이론이 더 일반적으로 받아들여진다. metaplast 이론에 따르면 액체 metaplast는 다음의 열분해성 반응들에 의하여 생성되고 소모된다[6].

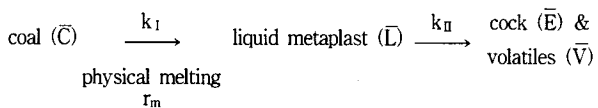


coke 형성을 단순한 형태로 묘사한 이반응들은 다음의 수학적 모델로 표현될 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (1)$$

$$\frac{dL}{dt} = k_1 C - k_2 L \quad (2)$$

이러한 수학적 모델의 가정은 반응들이 1차 반응이라는 것이다. Fong 등[10]은 물리적인 용융에 의하여 형성된 액체 metaplast를 고려하기 위하여 이 모델에 대한 수정을 하였다. Fong 등의 모델에 따르면 액체 metaplast의 일부는 임계온도 이상에서 물리적인 용융에 의하여 우선적으로 형성된다. 온도가 더 증가함에 따라 고온 가열에 의한 결합파괴는 부가적인 액체 metaplast를 생성한다. 결과적으로 액체 metaplast는 석탄으로부터 탈출한 휘발분을 형성하고 고체 coke 잔류물을 남긴다. 유연탄 입자들의 플라스틱성 기간동안 반응단계와 그에 따른 속도 표현은 다음과 같다.



$$\frac{d\bar{C}}{dt} = -k_1 \bar{C} - r_m \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = k_1 \bar{C} + r_m - k_2 \bar{L} \quad (4)$$

여기서  $\bar{C}$ 와  $\bar{L}$ 는 각각 반응하지 않은 석탄과 액체 metaplast의 질량분율이며,  $r_m$ 은 물리적 용융속도이며,  $k_1$ 과  $k_2$ 는 속도상수이다. (3)식과 (4)식의 초기조건은 다음과 같다.

$$\bar{C}(0) = \bar{C}_i \quad (5)$$

$$\bar{L}(0) = 0 \quad (6)$$

여기서  $\bar{C}_i$ 는 반응하지 않은 석탄의 초기 질량분율이며, (1-mass fraction of mineral matter  $\bar{f}_a$ )로 주어진다.

(3)식과 (5)식으로부터 반응하지 않은 석탄의 질량분율( $\bar{C}$ )은 반응속도 상수  $k_1$ 과 물리적 용융속도  $r_m$ 의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{C} = \exp\left[-\int_0^t k_1 dt\right] \left[\int_0^t (-r_m) \exp\left[\int_0^t k_1 dt\right] dt + \bar{C}_i\right] \quad (7)$$

(4), (6), (7)식으로부터 액체 metaplast의 질량분율( $\bar{L}$ )은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \bar{L} = & \exp\left[-\int_0^t k_2 dt\right] \left[\int_0^t \exp\left[\int_0^t k_2 dt\right] \left[r_m + \bar{C}_i k_1\right. \right. \\ & \left. \left. \exp\left[-\int_0^t k_1 dt\right] + k_1 \exp\left[-\int_0^t k_1 dt\right] \int_0^t (-r_m) \right. \right. \\ & \left. \left. \exp\left[\int_0^t k_1 dt\right] dt\right] dt \right] \quad (8) \end{aligned}$$

물리적 용융속도( $r_m$ )는 석탄입자의 가열속도에 의하여 주어지고, 용융점의 Gaussian분포에 의하여 증가되며, 30 K의 표준편차를 갖는 623 K의 평균 용융온도에서 결정된다[10].

$$r_m = \left[ \frac{L_s}{\sqrt{2\pi} \sigma_T} \exp\left[-\frac{(T_p - T_m)^2}{2\sigma_T^2}\right] \right] \left[ \frac{dT_p}{dt} \right] \quad (9)$$

여기서  $T_p$ 는 석탄입자의 온도,  $T_m$ 은 석탄입자의 평균 용융온도,  $\left[\frac{dT_p}{dt}\right]$ 는 석탄입자의 가열속도,  $\sigma_T$ 는 용융온도의 표준편차(623 K) 그리고  $L_s$ 는 석탄에 존재하는 초기 액체 metaplast의 질량분율이다. 속도상수  $k_1$ 과  $k_2$ 는 Pittsburgh seam 유연탄에 대한 실험적 데이터로부터 다음과 같이 얻어지며,  $L_s$ 는 0.25로 주어진다[10].

$$k_1 = 6.6 \times 10^7 \exp(-14,500/T_p) \left(\frac{1}{\text{sec}}\right) \quad (10)$$

$$k_2 = 1.9 \times 10^{10} \exp(-21,200/T_p) \left(\frac{1}{\text{sec}}\right)$$

이 모델에서 액체 metaplast에서 휘발분의 팽창에 의한 부풀음 현상은 중요하지 않은 것으로 가정되었으며, 그러므로 CWM 응집물의 반응은 일정하게 유지된다(즉, 부풀음 현상은 무시된다). 또한 휘발분은 액체 metaplast에서 형성되며, 미세 다공성의 coke 잔류물을 즉시 벗어나며 합체 과정에서 석탄 입자는 딱딱한 석탄, 액체 metaplast, mineral matter, 미세 기공을 갖는 coke 잔류물로 구성된다고 가정하였다. 이상의 가정들에 기초하여 각 성분들의 부피분율은 다음과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

반응하지 않은 석탄의 부피분율(C)은 다음과 같다.

$$C = \frac{\rho_0}{\rho_c} \bar{C} \quad (11)$$

여기서  $\bar{C}$ 는 (7)식에서 주어진 반응하지 않은 석탄의 질량분율을 나타내며  $\rho_c$ 는 반응하지 않은 석탄의 밀도,  $\rho_0$ 는 석탄 입자의 초기 겉보기 밀도를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_0 = \frac{\rho_c \rho_a}{\rho_a - \bar{f}_a(\rho_a - \rho_c)} \quad (12)$$

여기서  $\rho_a$ 는 mineral matter의 밀도이고  $\bar{f}_a$ 는 mineral matter의 질량분율이며,  $\bar{f}_a = 1 - \bar{C}$ 로 주어진다.

(7), (11), (12)식으로부터 반응하지 않은 석탄의 부피 분율(C)을 다음과 같이 표현된다.

$$C = \frac{\left[ \frac{\rho_a}{\rho_a - \bar{f}_a(\rho_a - \rho_c)} \right] \exp \left[ - \int_0^t k_1 dt \right]}{\left[ \int_0^t (-r_m) \exp \left[ \int_0^t k_1 dt \right] dt + \bar{C}_i \right]} \quad (13)$$

액체 metaplast의 부피 분율(L)은 다음과 같다.

$$L = \frac{\rho_0 \bar{L}}{\rho_1} \quad (14)$$

여기서  $\bar{L}$ 은 (8)식에서 주어진 액체 metaplast의 질량분율을 나타내며,  $\rho_1$ 은 액체 metaplast의 밀도이며  $\rho_0$ 는 (12)식에서 주어진 석탄 입자의 초기 겉보기 밀도이다. 식 (8), (12), (14)로부터 액체 metaplast의 부피 분율(L)은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \frac{\left[ \frac{\rho_a \rho_c}{\rho_1(\rho_a - \bar{f}_a(\rho_a - \rho_c))} \right] \exp \left[ - \int_0^t k_n dt \right]}{\left[ \int_0^t \exp \left[ \int_0^t k_n dt \right] \left[ r_m + \bar{C}_i k_1 \exp \left[ - \int_0^t k_1 dt \right] + k_1 \exp \left[ - \int_0^t k_1 dt \right] \int_0^t (-r_m) \exp \left[ \int_0^t k_1 dt \right] dt \right] \right]} \quad (15)$$

Mineral matter의 부피분율( $f_a$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_a = \frac{\rho_0 \bar{f}_a}{\rho_a} \quad (16)$$

(12)식을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_a = \frac{\rho_c}{\rho_a - \bar{f}_a(\rho_a - \rho_c)} \bar{f}_a \quad (17)$$

이상에서와 같이 부풀음 현상을 무시한다면 C, L,  $f_a$ 의 값으로부터 coke의 부피분율(E)은 다음과 같다.

$$E = 1 - (C + L + f_a) \quad (18)$$

### 2.2. 입자 응집과정에서의 접촉 면적

입자 응집과정 동안 CWM 응집물에서 석탄 입자들은 용융되고 합체되며, 인접한 석탄 입자들 사이의 접촉 면적은 석탄에서 액체 metaplast가 완전하게 소모될때까지 증가한다.

Kang 등[9]은 두 개의 구형 석탄 입자의 소결에 대한 접촉 면적의 성장속도는 다음과 같이 표현되며 이 성장 속도는 시간에 의존한다는 것을 증명하였다.

$$A = \frac{3}{2} \frac{r\gamma}{\mu} t \quad (19)$$

여기서 A는 t시간에서의 접촉면적, r은 합체 석탄입자의 반경,  $\gamma$ 는 합체 석탄입자의 표면장력,  $\mu$ 는 합체 석탄입자의 겉보기 점도 그리고 t는 시간을 나타낸다.

석탄 입자에 대한 이 접촉 면적의 성장 속도  $\left[ \frac{dA}{dt} \right]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{3}{2} \frac{r\gamma}{\mu} \quad (20)$$

고-액 슬러리에서 액체의 겉보기 점도( $\mu$ )는 고체를 포함하지 않은 액체의 점도( $\mu^*$ )와 액체에서 고체의 부피분율(1-L)에 의존한다고 가정하면 겉보기 점도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{\frac{9}{8} \mu^*}{[1-L]^{-\frac{1}{3}} - 1} \quad (21)$$

또한 액체 metaplast의 표면 장력은 CWM 연료에서 점도의 변화에 따라 거의 변화가 없는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 다음과 같이 상수로 가정된다.

$$\gamma = \gamma_c \quad (22)$$

식 (20), (21), (22)로부터 인접한 석탄 입자들간의 접촉 면적의 성장속도  $\left[ \frac{dA}{dt} \right]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{4r_c \gamma_c}{3\mu^*} [(1-L)^{-1/3} - 1] \quad (23)$$

여기서  $r_c$ 는 석탄 입자의 반경이다.

접촉 면적 A에 대한 식 (23)의 초기 조건은 다음과 같으며

$$A(0) = 0 \quad (24)$$

합체 과정에서 두 개의 인접한 석탄 입자들간의 접촉면적 A는 다음과 같다.

$$A = \frac{4r_c \gamma_c}{3\mu^*} \int_0^t [(1-L)^{-1/3} - 1] dt \quad (25)$$

### 2.3. 입자 응집과정에서의 응집력

입자 응집 과정동안 두 개의 합체 석탄입자들 사이의 응집력은 액체 metaplast에 기인하는 표면장력과 coke 상호 결합에 기인하는 응집력의 합으로 표현된다.

#### 2.3.1. 표면장력

Fig. 1은 CWM 응집물에서 두 개의 합체 석탄 입자를 보여준다 [9]. Neck region(목 부분)에서 액체 metaplast에 기인하는 표면장력은 neck region의 유효 원주( $l_{eff}$ )에 비례하며 유효 원주는 다음과 같다.

$$l_{eff} = 2\pi r^* L \quad (26)$$

여기서  $r^*$  = neck region의 반경이며 다음과 같이 주어진다.

$$r^* = \left[ \frac{A}{\pi} \right]^{1/2} \quad (27)$$

표면장력  $F_\gamma$ 는

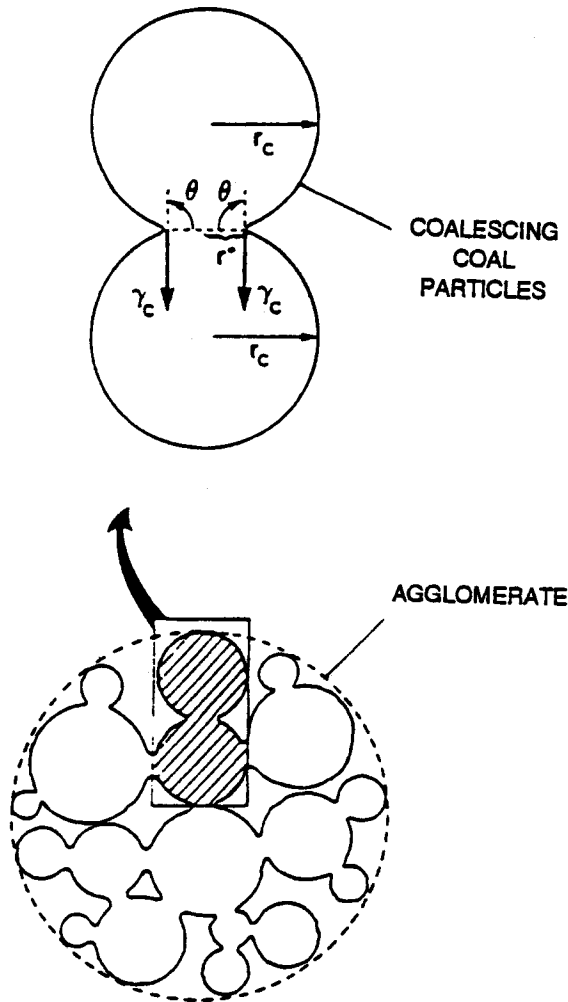


Fig. 1. Surface tension force at Neck Region of two coalescent coal particle in CWM agglomerate.

$$F_\gamma = \gamma_c \sin \theta \quad (28)$$

여기서  $\theta$ 는 접촉각이며 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이  $90^\circ$ 이다. 그러므로 액체 metaplast에 기인하는 표면 장력은 다음과 같다.

$$F_\gamma = 2\sqrt{\pi A} L \gamma_c \quad (29)$$

2.3.2. coke 상호 결합에 기인하는 응집력

Fig. 2는 3단계로 나누어지는 플라스틱성 지속기간에 따른 CWM 응집물에서의 두 개의 합체 석탄 입자들의 응집 과정을 보여준다[9]. 이 단계들의 분류는 액체 metaplast의 슬러리에서 고체들에 따라 분류되며, 1, 2, 3단계에서 고체들을 각각 1) coke와 ash, 2) coke, ash, 그리고 반응하지 않은 석탄, 3) 반응하지 않은 석탄과 ash이다.

Coke의 'mosaic' 구조의 특성은 탄화 과정동안 발전하는 것으로 알려져 있다[10]. Mosaic 구조 형성의 완결은 석탄의 재고화의 완결에 따라 결정된다. 또한 coke 잔류물(char)의 비율이 약 반으로 증가할 때, 구제는 다른 하나의 성장에 따른 간섭을 시작한다. 그러므로 coke 잔류물의 출발 부피 분율( $E_{th}$ )은  $(1-f_a)$ 의 50%(즉,  $E_{th} = (1-f_a)/2$ )로 정의되며 단계 2와 3사이의 경계이다.

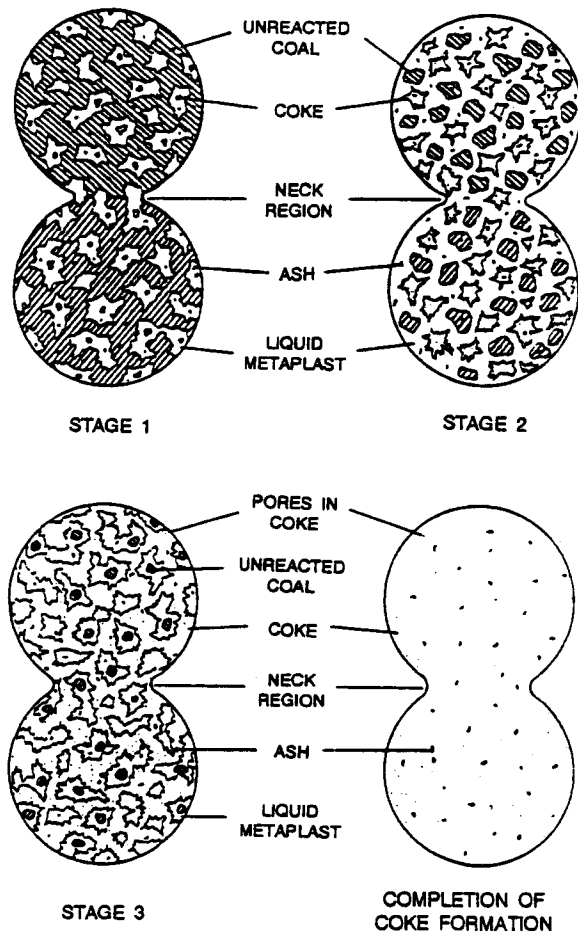


Fig. 2. Agglomeration process of coal particle in CWM agglomerate.

단계 1과 2에서 coke 잔류물의 부피분율( $E$ )이 coke 잔류물의 출발부피분율( $E_{th}$ ) 보다 작을 때 각각의 mosaic-type의 coke 잔류물은 독립적으로 성장하고 그러므로서 coke 상호 결합에 기인하는 응집력은 없다. 그러나 단계 3에서  $E$ 가  $E_{th}$  보다 클 때 coke 잔류물은 서로 연결되기 시작하고 coke 상호 결합에 기인하는 응집력은 영향을 받기 시작한다. Coke 결합 시작후에 형성된 coke 잔류물은 개개의 coke 결정 구조 사이의 연결을 강화시킨다. 그러므로 coke 상호결합에 기인하는 응집력( $F_{E_3}$ )은 coke 상호결합의 시작후에 형성된 coke 잔류물의 분율 ( $E-E_{th}$ )에 비례하는 것으로 가정된다. 그러므로 응집력  $F_{E_3}$ 는 단계 3에서 다음과 같이 표현되며

$$F_{E_3} = \sigma_E A \left[ \frac{E - E_{th}}{1 - f_a - E_{th}} \right] \quad (30)$$

여기서  $\sigma_E$ 는 coke 잔류물의 결합 응력(bond stress)을 의미하고 식(18)로부터  $E \rightarrow E_{max} = 1 - f_a$ 일 때  $F_{E_3} \rightarrow \sigma_E A$ 가 된다. 또한 단계 1과 2에서 응집력은 다음과 같이 가정된다.

$$F_{E_1} = F_{E_2} = 0 \quad (31)$$

2.3.3. 입자 응집 과정에서의 응집력

입자 응집 과정동안 CWM 응집물에서 두개의 합체 석탄 입자들

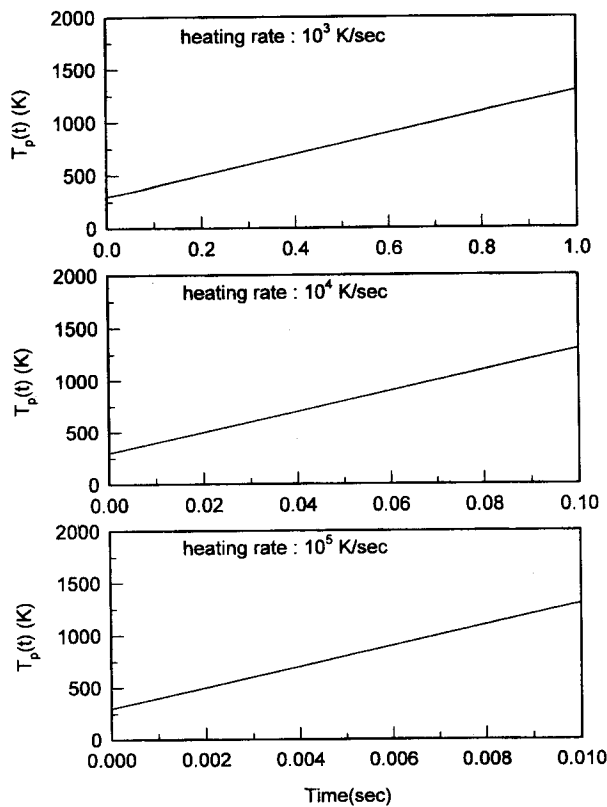


Fig. 3. Predictions of temperature of coal particle versus time for different particle heating rate (mean particle diameter : 28 μm).

사이의 응집력( $F_A$ )은 표면장력( $F_r$ )과 coke 상호결합에 기인하는 응집력( $F_E$ )의 합으로 표현된다. 그러므로 식(29), (30), (31)로부터 응집력은 다음과 같다.

$$F_A = F_r + F_E \quad (32)$$

따라서 본 연구에서는 4차 RKG(Runge-Kutta-Gill)[12, 13] 방법을 사용하여 Fortran으로 전산모사 프로그램을 작성하였으며, 서로 다른 입자 가열속도와 입자크기에 대한 입자 응집기간 동안의 응집력을 (3)~(32)식에서 설명된 입자 응집모델에 의하여 예측하였다.

전산모사에 사용한 상수들 값은 Douglas 석탄(공업분석 : 수분-2.38 wt.%, 휘발분-25.36 wt.%, 고정탄소-58.23 wt.%, 회분-14.03 wt.%)을 기준으로 하여 사용하였다. Douglas 석탄의 공업분석으로부터 mineral matter의 초기 질량분율은 0.14로 하였으며, 액체 metaplast의 표면장력은 0.01 dyne/cm, CWM 연료의 점도는 250 cp로 하였다. 또한 coke 잔류물의 결합 응력은  $3 \times 10^4$  mPa로 하였다[6].

### 3. 결과 및 고찰

입자 가열속도가 빠르면 석탄의 플라스틱성 지속기간이 석탄입자들이 완전하게 융합되고 합체할 수 없을 만큼 짧게 되어 약하게 융합된 CWM 응집물이 형성될 것이다. 또한 인접한 석탄 입자들 간의 응집력이 약하므로 CWM 응집물은 쉽게 부서질 것이며, 연소에 좋은 결과를 초래할 것이다. 그러나 입자의 가열속도가 느리면 석탄의 플라스틱성 지속기간이 석탄입자들이 융합하고 합체하

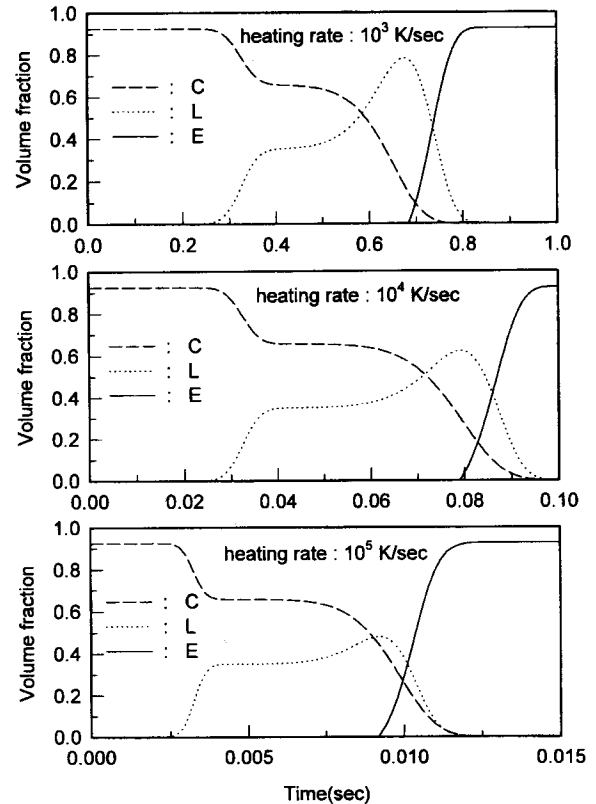


Fig. 4. Predictions of volume fraction of C, L, and E versus time for different particle heating rate (C-unreacted coal, L-liquid metaplast, E-coke, mean particle diameter : 28 μm).

기에 충분히 길어지게 되고 강하게 융합된 CWM 응집물이 형성될 것이며, 인접한 석탄 입자들간의 강한 응집력으로 인하여 CWM 응집물은 파괴되기 어려울 것이며, 연소에 나쁜 영향을 미치게 된다[7].

#### 3.1. 입자 가열속도의 영향

Fig. 3~8은 입자 가열속도의 영향을 보여주기 위해서  $10^3$  K/sec,  $10^4$  K/sec 그리고  $10^5$  K/sec의 대표적인 입자 가열속도[13]와 시간의 함수로서 입자의 온도, 반응하지 않은 석탄의 부피분율 C, 액체 metaplast 부피분율 L, 그리고 coke 잔류물(char)의 부피분율 E, 표준화된 접촉면적 A, 그리고 표면장력  $F_r$ , coke 상호결합에 기인한 응집력  $F_E$ , 그리고 표면장력과 coke 상호결합에 기인한 응집력의 합으로 나타나는 입자의 응집력  $F_A$ 의 예측값을 보여준다.

Fig. 3은 시간의 함수로 나타낸 석탄입자의 온도를 보여주고 있다. Fig. 4에는 시간의 함수로서 반응하지 않은 석탄의 부피분율 C, 액체 metaplast 부피분율 L, 그리고 coke 잔류물(char)의 부피분율 E의 값을 나타내었다. 그림에서 보여주는 것과 같이 서로 다른 입자 가열속도에 대한 C, L, E 곡선들의 일반적인 경향은 비록 시간 범위는 전체적으로 다를 지라도 매우 유사하다. 그림에서 액체 metaplast는 입자 가열속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 1차 생성은 임계온도 이상에서 석탄입자의 물리적인 응용에 의하여 우선적으로 생성된 것이며, 2차 생성은 더 온도가 증가함에 따라 고온 가열에 의한 석탄입자의 결합파괴로 부가적인 액체 metaplast의 생성결과로 해석된다. 그리고 coke 잔류물(char)의 부피분율 E는 반응하지 않은 석탄(C)과 액체 metaplast(L)가

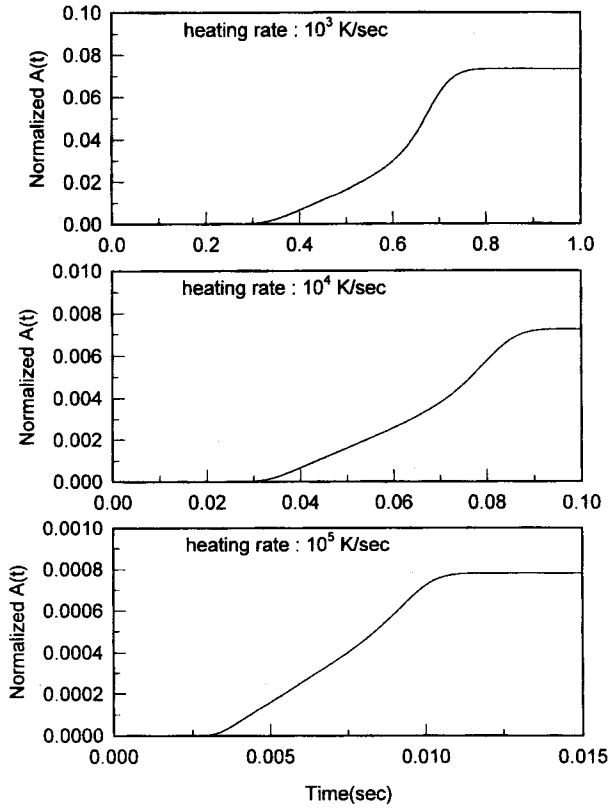


Fig. 5. Predictions of normalized A versus time for different particle heating rate (mean particle diameter : 28  $\mu\text{m}$ ).

완전히 소모될 때까지 증가하며, 이러한 현상은 가열속도가 증가할 수록 빠른 시간내에 이루어지는 것으로 예측되었다. 또한 Fig. 5의 접촉면적을  $\pi r_c^2$  ( $r_c$  = 석탄입자의 반경)으로 나눈 값인 표준화된 접촉면적 A는 석탄에서 액체 metaplast가 완전히 소모될 때까지 증가하며, 입자가열 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내는데 이는 주로 입자 응집에 필요한 석탄 플라스틱성(plasticity)의 지속기간이 감소하기 때문이다. Fig. 6~8에서  $F_\gamma$ ,  $F_E$  그리고  $F_A$ 의 값으로 나타낸 응집력은 Fig. 5의 접촉면적에 비례하며, 입자가열속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 결과적으로 보다 높은 입자 가열속도(보다 높은 로내 온도와 보다 작은 입자 직경에 의하여 야기된)는 석탄입자들이 가열단계동안 응집물을 형성하는 경향을 감소시킨다. 이것은 서로 다른 입자들의 결합력을 감소시키고 탈휘발과 최연소 기간 동안 연소성을 증가시키는 원인이 된다.

3.2. 입자 크기의 영향

Fig. 9~11은 CWM 연료 제조에 사용된 석탄입자 크기의 영향을 보여주기 위해서  $10^4$  K/sec 입자 가열속도에서 입자 크기와 시간의 함수로서 표면장력  $F_\gamma$ (Fig. 9), coke 상호결합에 기인한 응집력  $F_E$ (Fig. 10) 그리고 표면장력과 coke 상호결합에 의한 응집력의 합으로 나타나는 입자의 응집력  $F_A$ (Fig. 11)의 예측값을 보여준다.

그림에서 보듯이 표면장력( $F_\gamma$ ), coke 상호결합에 기인한 응집력( $F_E$ ), 그리고  $F_A$ 의 값으로 나타난 응집력 모두 입자크기에 비례하여 입자 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 가열속도가 같을 경우 입자 크기가 증가한다면 석탄입자들이 가열 단계동안 응집물을 형성이 증가되는 경향을 보이고 있다. 이것은 CWM 액적내의 서로다른 입자들의 결합력을 증가시키게 되어

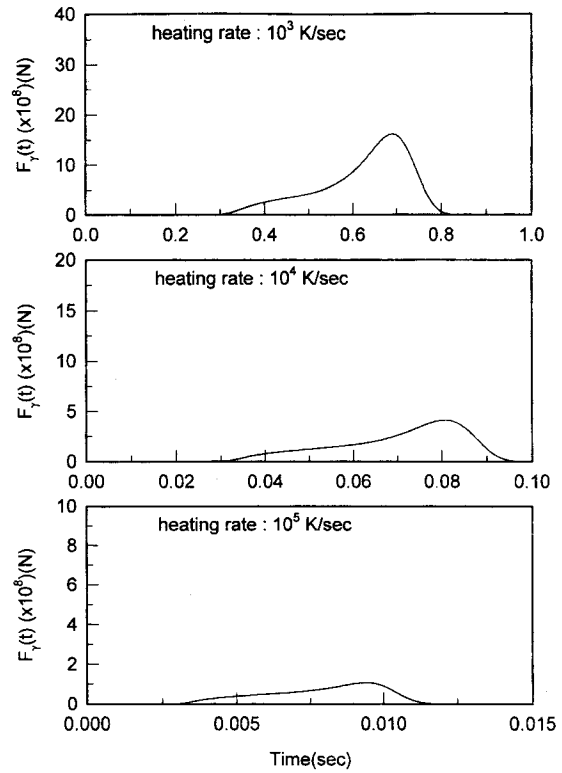


Fig. 6. Predictions of surface tension force due to liquid metaplast versus time for different particle heating rate (mean particle diameter : 28  $\mu\text{m}$ ).

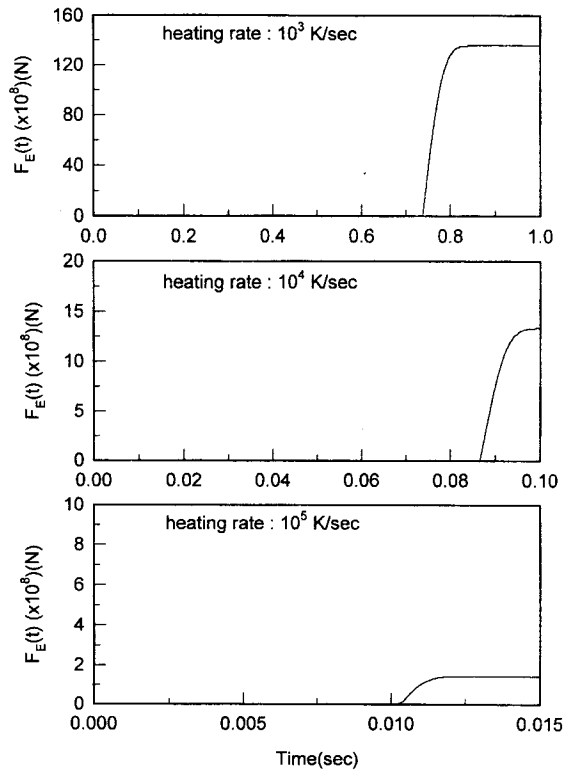


Fig. 7. Predictions of adhesive force due to coke interconnection versus time for different particle heating rate (mean particle diameter : 28  $\mu\text{m}$ ).

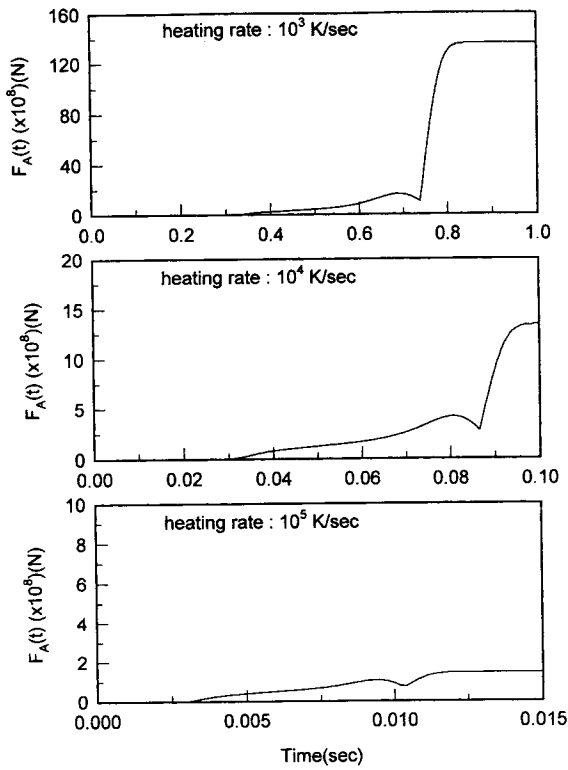


Fig. 8. Predictions of adhesive force between two coalescing coal particles versus time for different particle heating rate (mean particle diameter : 28  $\mu\text{m}$ ).

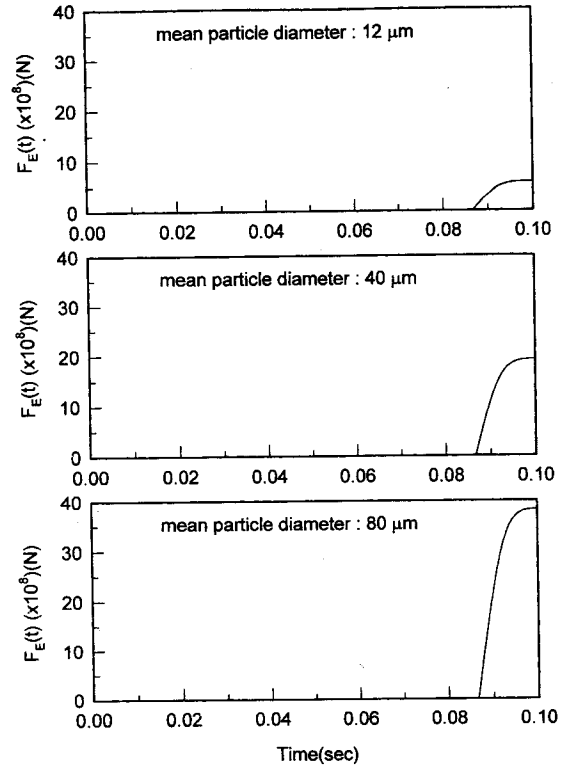


Fig. 10. Predictions of adhesive force due to coke interconnection versus time for different mean particle diameter (heating rate :  $10^4$  K/sec).

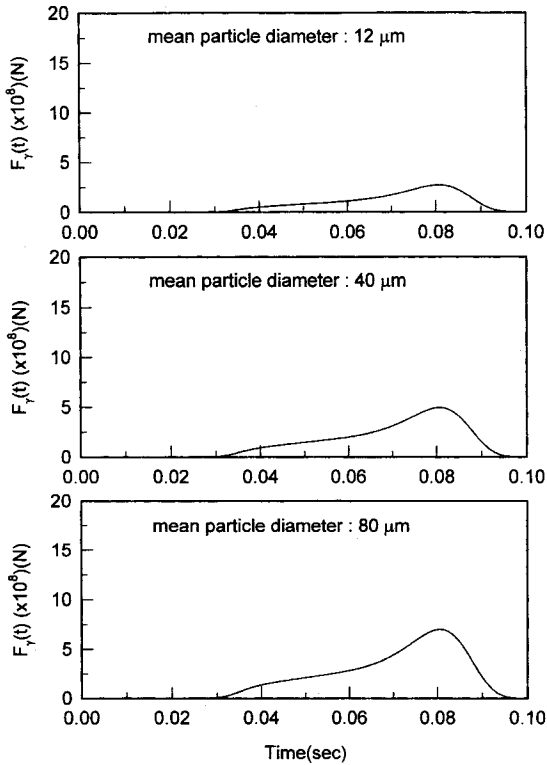


Fig. 9. Predictions of surface tension force due to liquid meta-plast versus time for different mean particle diameter (heating rate :  $10^4$  K/sec).

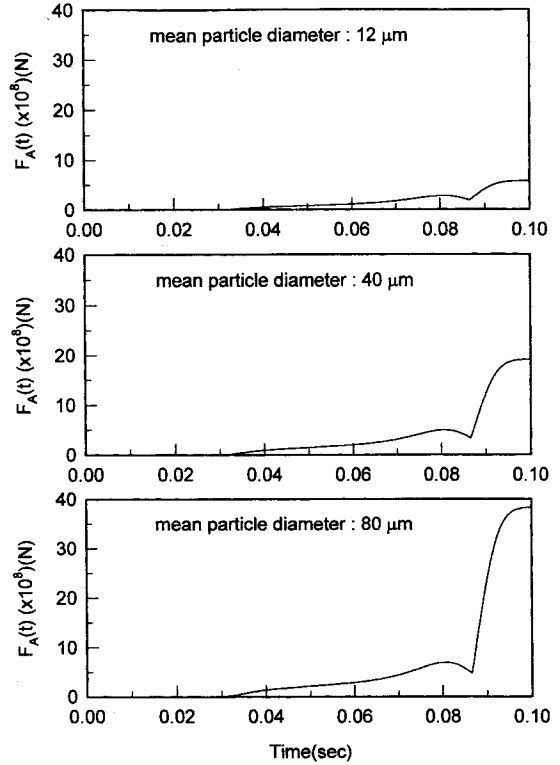


Fig. 11. Predictions of adhesive force between two coalescing coal particles versus time for different mean particle diameter (heating rate :  $10^4$  K/sec).

CWM 응집물의 크기를 증가시키게 되며 연소에 나쁜 영향을 미치게 될 것이다.

#### 4. 결 론

RKG 방법을 사용하여 서로 다른 입자 가열속도와 입자크기에 대한 입자응집 기간 동안의 응집력을 입자 응집모델에 의해 예측한 결과 CWM 연료의 입자 응집과정에서의 응집력은 입자 가열속도에 반비례하며, 입자크기에 비례하는 것으로 나타났다. 따라서 CWM 연료의 가열속도가 클 수록, CWM 연료에 사용된 석탄 입자 크기가 작을 수록 CWM 연료의 연소성은 우수할 것으로 예측되었다.

#### 사 용 기 호

A	contact area
$\left[ \frac{dA}{dt} \right]$	growth rate of contact area
$\bar{C}$	mass fraction of unreacted coal
$\bar{C}_i$	initial mass fraction of unreacted coal (= $1 - \bar{f}_a$ )
C	volume fraction of unreacted coal
$\bar{E}$	mass fraction of coke-residue (char)
E	volume fraction of coke-residue (char)
$E_{th}$	threshold volume fraction of coke-residue (char)
	$\left[ = \frac{1 - f_a}{2} \right]$
$F_A$	adhesive force between two coalescent coal particles
$F_E$	adhesive force due to coke interconnection
$F_{E1}$	adhesive force due to coke interconnection in stage 1
$F_{E2}$	adhesive force due to coke interconnection in stage 2
$F_{E3}$	adhesive force due to coke interconnection in stage 3
$F_T$	surface tension force due to liquid metaplast
$\bar{f}_a$	mass fraction of ash (mineral matter)
$f_a$	volume fraction of ash (mineral matter)
$k_I$	rate constant in eq. (1)
$k_{II}$	rate constant in eq. (2)
$k_1, k_2$	arrehnius type reaction rate
$\bar{L}$	mass fraction of liquid metaplast
L	volume fraction of liquid metaplast
$L_s$	mass fraction of solid metaplast initially existing in coal
$l_{eff}$	effective circumference
$r_c$	radius of coal particle
$r_m$	rate of physical melting
$r^*$	radius of contact area in neck region
$T_m$	mean melting temperature of coal particle
$T_p$	temperature of CWM droplet/agglomerate
t	time

Normalized A normalized contact area, given by  $\frac{A}{\pi r_c^2}$

#### 그리스 문자

$\gamma$	surface tension
$\gamma_c$	surface tension of liquid metaplast
$\theta$	contact angle
$\mu$	viscosity
$\mu^*$	viscosity of liquid metaplast
$\rho_a$	density of ash (mineral matter)
$\rho_c$	density of unreacted coal
$\rho_l$	density of liquid metaplast
$\sigma_E$	bond stress of coke-residue (char)
$\sigma_T$	standard deviation of melting temperature of coal

#### 참 고 문 헌

1. C. J. Lawn, "Principles of Combustion Engineering for Boilers : Chapter 4," Academic press, New York(1987).
2. S. H. Kim, K. S. Hwang and S. S. Hong, *J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry*, 8, 640, Korea(1997).
3. D. J. Holve, T. H. Fletcher and K. Gomi., *Combust. Sci. and Tech.*, 52, 269(1987).
4. K. Tokuda, S. Kaneko, M. Moda and T. Maruta, Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 24-27, 221(1989).
5. N. Iki, N. Nagai and T. Hirai, *日本機械學會論文集*, 59, 373 (1993).
6. S. W. Kang, "Combustion and Atomization Studies of Coal-Water Fuel in a Laminar Flow Reactor and in a Pilot-Scale Furnace," Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass., 314(1988).
7. G. E. Liu, and C. K. Law, *Fuel*, 65, 171(1986).
8. J. H. Shao, and Z. X. Huang, Proc. of the 7th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Tampa, Fla., 164 (1985).
9. S. W. Kang, A. F. Sarofim and J. M. Beer, *Combustion and Flame*, 86, 258(1991).
10. W. S. Fong, W. A. Peters, and J. B. Howard, *Fuel*, 65, 251 (1986).
11. B. Carnahan, H. A. Luther and J. O. Wilkes, "Applied Numerical Methods," John Wiley & Sons, Inc., New York (1969).
12. J. B. Riggs, "An Introduction to Numerical Methods for Chemical Engineers," Texas Tech. University Press. Texas (1988).
13. K. Annamalai, *J. of Engineering for Power*, 101, (1979).