

〈論 文〉

내부 온도분포를 고려한 Coal-Water Slurry의 점화현상에 관한 이론적 해석

최창은* · 백승욱** · 김종욱***

(1993년 3월 11일 접수)

Theoretical Analysis of Ignition of a Coal-Water Slurry Droplets with Interior Temperature Distribution

C.E. Choi, S.W. Baek and J.W. Kim

Key Words : Coal-Water Slurry, Homogeneous Combustion(동상연소), Pyrolysis(열분해), Interior Droplet Temperature Distribution(액적내부 온도분포), The Weight Fraction of Water in the CWS(액적내 물의 무게비)

Abstract

CWS(coal-water slurry) is used for application in power plants, boilers, industrial furnaces. A single coal-water slurry droplet ignition has been examined to reveal the basic nature of their evaporation, volatilization and heating processes. The interior droplet temperature distribution has been considered. The effect of coal thermal conductivity, droplet size, water fraction in the slurry, gas temperature and velocity and radiation on the ignition phenomena were also studied. Either increasing the velocity and gas temperature or decreasing the droplet size and water fraction in the slurry may reduce the time for evaporation and ignition delay time.

기 호 설 명

A_d : 빈도 인자수 (frequency factor)
 C : 비열
 D : 질량 확산 계수
 E_a : 활성화 에너지
 ΔH : 석탄의 열분해 (pyrolysis) 열
 h : 대류열전달 계수
 L : 물의 증발 잠열
 MW : 분자 무게
 Nu : Nusselt 수
 P : 압력
 Pr : Prandtl 수

Q : 휘발성 물질의 반응열
 q : 표면에서의 열전달율
 q_c : 대류열 유속
 q_r : 복사열 유속
 R : 액적 직경
 R, R_u : 기체상수와 일반기체상수
 r : 반경 방향 좌표
 Re : Reynolds 수
 T : 온도
 t : 시간
 v : 속도
 Y : 질량비
 φ : 석탄내 휘발성 물질의 무게비
 σ : Stefan-Boltzmann 계수
 ρ : 밀도

*한국과학기술원 항공우주공학과

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

***정회원, 국방과학연구원

λ	: 열전도 계수
μ	: 산소의 당량계수
ϵ	: 방사율(emissivity)
ω	: CWS내 물의 무게비

하첨자

ξ	: 액적표면
O	: 산소
N_2	: 질소
F	: 연료(휘발성 물질)
b	: 이중혼합물(CWS)
1	: 석탄영역
2	: 차르(char)영역
w	: 물
g	: 기체
0	: 초기조건
∞	: 대기조건

1. 서 론

지난 20여 년동안 석유의 불안정한 공급과 가격의 상승으로 대체에너지로서 석탄에 관심을 기울이기 시작하였다. 그러나 다성분(순수탄소, 휘발성물질, 습기, 재, 다른 화학적 성분등)조성인 석탄 그 자체로서는 분진으로 인해 다른 유류보다 다루기가 힘들고 저장하기도 힘들어 고안해낸 것이 물이나 기름을 섞어 만든 CWS(coal-water slurry)와 COS(coal-oilslurry)이다. COS에 비하여 경제적이고 보급이 보다 안정적인 CWS는 기름을 연료로 사용하는 많은 산업체에서 기름에 뒤지지 않는 화력과 경제적인 이유로 사용할 뿐 아니라, 분무연소가 사용되는 보일러, 산업용로, 엔진의 연소실, 추진기 관등에도 널리 쓰임으로써 이에 대한 연구가 활발이 진행되고 있다.

CWS 액적에 관한 연구로서, S.C. Yao⁽¹⁾는 단일 액적에 대하여 석탄의 종류, 액적의 크기, 탄소의 무게비, 대기의 온도와 대기의 속도에 따른 영향을 실험적으로 평가하여 액적의 크기가 작을수록, 무게비가 클수록 증발시간이 줄어들음을 밝혔고, T. Kolb⁽²⁾와 그의 동료들은 액적의 점화를 대류열과 복사열에 대한 비로서 그 영향을 이론적, 실험적으로 관찰하여 대류열이 더 지배적이나, 액적의 직경이 커질수록 복사열의 영향이 커질것을 예측하였

다. 또한 S.Y. Cho⁽³⁾와 그의 동료들은 액적의 연소와 파열현상을 증발단계, 다공성 석탄 형성, 파열의 세 단계로 나누어 부풀어오름과 줄어들현상을 이론적, 실험적으로 관찰하였다. Antaki^(4,5)는 CES액적의 증발면 바깥쪽 온도를 일정하게 놓고, 액적의 증발에 필요한 열에 대한 액적을 가열하는데 필요한 열의 비를 매개 변수로한 점근 전개(asymptotic expansions) 방법을 적용하여 충분히 큰 액적직경(시간에 따라 일정하다고 가정)에 대해 해석적(analytic)으로 풀어 그 결과를 계산(computation)과 비교하였다. 곧바로 작은 액적직경(시간에 따라 줄어든다고 가정)에 대하여 해석적 개념을 확장하였다. C.K. Law⁽⁶⁾는 실험을 바탕으로 하여 줄어들 또는 부풀어오름 현상을 d³모델이라는 이론적 증발모델을 세워 놓았다. 이론적 측면에서 비정상항의 도입은 액체액적에 대하여 S. C. Rha⁽⁷⁾와 그의 동료들이 수행하여 실험과 비교하였다.

이상과 같은 문헌조사에서 알 수 있듯이 CWS 액적에 관한 연구는 실험을 바탕으로한 이론적 연구가 병행되어 지고 있으나, 아직 증발및 점화등의 연소현상에 관한 명확한 이해가 부족한 실정이다. 이에 본 연구의 주요한 목적은 위의 선임자들의 연구를 바탕으로 액적의 직경은 변하지 않는다고 가정하며 비정상항을 추가하고 액적내부의 온도 분포를 고려하여 주위온도, 공기의 유동속도, 물의 무게비, 액적의 크기, 석탄의 전도계수(conductivity)와 복사의 영향을 수치적인 방법으로 계산하여 점화 순간까지의 해석결과를 실험결과와 비교하여 CWS액적 뿐 아니라 액적으로서 기본적 성질이 같은 모든 액적의 응용 범위에서 정량적인 해석의 밑바탕이 되게하는 데 그 목적을 둔다.

2. 지배방정식

초기에 일정 온도로 유지되어 있는 CWS 액적이 고온공기속에서 지속적인 열을 받으면 액적내에 온도구배가 형성되며 액적표면이 증발온도에 이르렀을 때 증발을 시작하게 된다. 증발하는 동안 증발면 안쪽은 물과 석탄의 이중혼합물로 구성되어 있고, 바깥쪽은 다공질 석탄이 남게 되는데, 시간에 따라 증발면이 줄어들고 동시에 다공질 석탄의 두께는 증가한다. 계속적으로 액적은 열을 받아 증발이 모두 일어나고, 또는 증발이 일어나기전 표면이

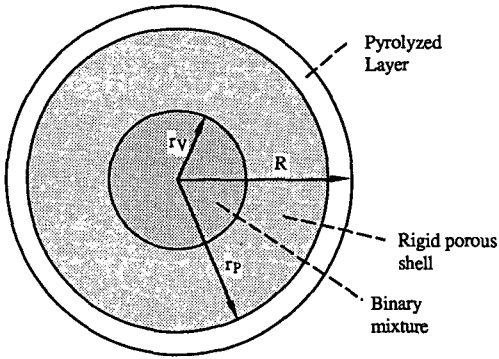


Fig. 1 Theoretical model

휘발온도에 이르면 다공질 석탄에 있는 휘발물질이 열분해(pyrolysis)되어 주위공기로 방출되어 산소와 반응하게 된다.

증발과 휘발이 공존하는 경우, 본 연구에서 제시하고 있는 이론모델은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 세 영역으로 구분할 수 있으며, 계산에 필요한 기본 가정은 “물과 석탄은 균일하게 섞여 있으며, 액적내부의 물성치는 일정하다. 물질전달(mass transfer)은 무시할 만큼 작다. 액적내부의 가열율(the rate of heating)은 전도(conduction)에 기인한다. 증발, 휘발온도는 일정하다. 구형대칭이므로 1차원 구형좌표를 사용한다. 주위 대기압은 일정하다. 기체장에 대한 Lewis수는 1이고 일정한 반경을 갖는다.”이다.

2.1 액적의 지배방정식 $0 \leq r \leq R$

● $0 \leq t < t_B$

$$\rho_b C_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_b}{\partial r} \right) \quad (1)$$

여기서 t_B 는 CWS표면이 증발온도 T_b 에 도달할 때의 시간이다.

● $t_B \leq t < t_P$

증발면 안쪽 $0 \leq r \leq r_v$ 은

$$\rho_b C_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_b}{\partial r} \right) \quad (2)$$

이며, 증발면 바깥쪽 $r_v \leq r \leq R$ 에서는

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (3)$$

이다. t_P 는 석탄의 표면에서 휘발성분이 빠져나오

기 시작하는 휘발온도 T_p 에 도달할 때의 시간이다.

● $t_P \leq t$

증발면 안쪽 $0 \leq r \leq r_v$ 에서는

$$\rho_b C_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_b}{\partial r} \right) \quad (4)$$

이고, 증발면과 휘발면 사이 $r_v \leq r \leq r_P$ 에서는

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (5)$$

이며, 휘발면 바깥쪽 $r_P \leq r \leq R$ 은

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \quad (6)$$

이다. T_b , T_1 와 T_2 는 각각 CWS, 석탄, 찰르(char)의 온도를 나타낸다.

● 증발 및 휘발면의 구조

대부분의 연구들은 액적내부의 비정상 과정(transient process)에 대하여는 무시하여 왔다.^(8,9) 그러나 실제로 고온공기 속의 액적은 내부에 온도구배가 생성되면서 증발면이나 휘발면은 처음엔 액적 표면으로부터 시작하여 다공질 탄소나 찰르(char)를 뒤로하고 점점 액적내부로 전파되는데, 이 때의 구조를 살펴보면 Fig. 2와 같다.

에너지 방정식이 보존되기 위하여

$$\rho_b \omega L \frac{dr_v}{dt} = -\lambda_1 \frac{dT_1}{dr} + \lambda_b \frac{dT_b}{dr} \quad (7)$$

첫번째 항은 증발로 인한 열손실이며, 두번째와 세번째 항은 증발면에서 온도 구배로 인해 전달되는 열이다. 휘발율을 계산하는 데 있어서 일반적으로

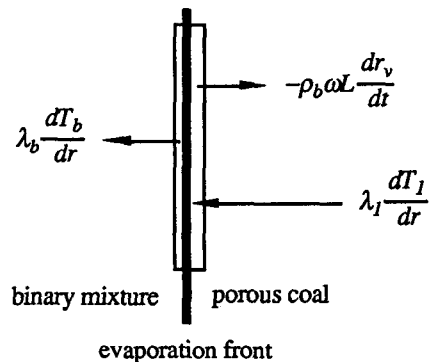


Fig. 2 Evaporation Mechanism

받아들여지고 있고, 쓰이고 있는 아레니우스 (Arrhenius) 형태의 방정식은 온도의 함수로 나타낸다. 하지만 지수함수 형태로 되어있어 어느 순간에 그 양이 급격히 증가하기 때문에 전 영역에 걸쳐 쓰지 못하는 단점이 있다. 따라서 위의 증발면에서의 개념을 적용하여 휘발면⁽¹⁰⁾에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_1 \phi \Delta H \frac{dr_p}{dt} = -\lambda_2 \frac{dT_2}{dr} + \lambda_1 \frac{dT_1}{dr} \quad (8)$$

2.2 기체장의 지배방정식 $R < r < \infty$

일반적으로 연료와 산소의 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 F , O 와 P 는 각각 연료, 산소, 생성물의 종(species)을 나타내며, μ 는 산소의 당량계수(stoichiometric coefficient)를 의미한다. 이와 관련된 연소현상을 해석하기 위한 기체장의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_g v) = 0, \quad (10)$$

$$\rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \rho_g C_g v \frac{\partial T}{\partial r} + (MW)_F Q \dot{\omega}, \quad (11)$$

$$\rho_g \frac{\partial Y_O}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{O \rho_g r^2} \frac{\partial Y_O}{\partial r} \right) - \rho_g v \frac{\partial Y_O}{\partial r} - \mu (MW)_F \dot{\omega}, \quad (12)$$

$$\rho_g \frac{\partial Y_F}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{F \rho_g r^2} \frac{\partial Y_F}{\partial r} \right) - \rho_g v \frac{\partial Y_F}{\partial r} - (MW)_F \dot{\omega}, \quad (13)$$

각각 질량, 에너지, 화학종 보존 방정식을 의미한다. Q 는 휘발기체의 반응열을 의미하고, v 는 휘발성분이 기체장으로 빠져 나가면서 야기되는 속도를 의미하며, 반응열은 다음과 같이 아레니우스(Arrhenius) 형태⁽¹¹⁾로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega} = \frac{A_d \rho_g^2 Y_O Y_F}{(MW)_O (MW)_F} \exp\left(-\frac{E_d}{RvT}\right) \quad (14)$$

위의 편미분 방정식들은 운동 방정식으로부터 유도된다. 그러나 유동속도가 작을 때, 야기되는 압력구배는 매우 작기 때문에 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$P = P_\infty \quad (15)$$

기체장의 밀도는 이상기체 상태방정식과 연관되어 있다고 할 수 있다.

$$\rho_g = \frac{p_\infty (MW)_g}{RvT} \quad (16)$$

여기서 기체의 분자무게(molecular weight)는 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$(MW)_g = \left[\frac{Y_O}{(MW)_O} + \frac{Y_{N_2}}{(MW)_{N_2}} + \frac{Y_F}{(MW)_F} \right]^{-1} \quad (17)$$

점화전 기체의 질량보존 방정식은 아래와 같다.

$$Y_O + Y_{N_2} + Y_F = 1 \quad (18)$$

그리고 주위 기체장의 물성들은, 실제 공기에 존재하는 종(species)들을 입력 정보로 하여 구하는, CHEMKIN Code^(15,16)를 이용하였다.

2.3 초기 및 경계조건

● 액적에 관하여서는

$$t < 0 \quad T_b = T_0, \quad r = R \quad (19)$$

$$0 \leq t < t_b \quad \left(\frac{\partial T_b}{\partial r} \right)_{r=R} = 0 \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial T_b}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{q}{\lambda_b} \quad (21)$$

$$t_b \leq t < t_p \quad \left(\frac{\partial T_b}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (22)$$

$$T_{b,rv} = T_{1,rv} = T_b = \text{constant} \quad (23)$$

$$\left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{q}{\lambda_1} \quad (24)$$

$$t_p \leq t \quad \left(\frac{\partial T_b}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (25)$$

$$T_{b,rv} = T_{1,rv} = T_b = \text{constant} \quad (26)$$

$$T_{1,rp} = T_{2,rp} = T_p = \text{constant} \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{q}{\lambda_2} \quad (28)$$

휘발온도에 도달하기 전 증발이 모두 일어나면 $\left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right)_{r=0} = 0$, (27)와 (28)의 경계를 이용하여 (5), (6)식을 계산하면 된다. 위에서 q 는 CWS의 표면에서의 열 유속이며, 다음과 같이 대류열과 복사열의 합으로 나타낸다.

$$q = q_c + q_r \quad (29)$$

여기서

$$q_c = h(T_g - T_s) \quad (30)$$

$$q_r = \frac{\sigma(T_g^4 - T_s^4)}{1/\epsilon_s + 1/\epsilon_g - 1} \quad (31)$$

이다. T_g , T_s 는 기체와 액적표면의 온도를 의미하고, 방사계수(emissivity)는 Table 1에 나타나 있으며 모든 영역에 걸쳐 일정하다고 본다. 휘발성 기체는 열전달에 아무런 영향을 미치지 않는다고

Table 1 Physical Constants and Parameters

Parameters	Value
A_d 1/sec	5×10^5
C J/kg · K	
coal	1.470×10^3
water	4.2×10^3
ρ kg/m ³	
coal	1300.0
water	998.1
λ W/m · K	
coal	0.125
char	0.125
water	0.679
E_d J/(kg · mole)	7.4×10^7
ΔH J/kg	0.84×10^6
L J/kg	2.265×10^6
MW kg/(kg · mole)	
N_2	28.01
O_2	32.0
Fuel	70.13
P Pa	1.01325×10^5
Q J/kg	3.558×10^7
R_u J/(kg · mole) · K	8.314×10^3
σ W/m ² · K ⁴	5.6696×10^{-8}
ϵ droplet surface	0.8
gas	0.02
μ	7.5
T_b K	373.1
T_p K	850.0

대부분의 물성치는 Krazinski⁽⁸⁾의 논문을 참조하였으며 그외의 물성치는 다른 참고문헌을 이용하였다.

가정하며, 대류열전달 계수(h)는 구에 대한 Nusselt수의 정의⁽¹²⁾로부터 다음과 같이 알 수 있다.

$$Nu = \frac{2Rh}{\lambda_g} = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (32)$$

비록 휘발성 물질이 빠져나갔을 지라도 다공질탄소와 찌르 두 영역에서의 열전도 계수는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\lambda_1 = \lambda_2, \quad \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_1} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 C_2} \quad (33)$$

● 기체장에 관하여

$t > 0$, $r \rightarrow \infty$ 일 때

$$T = T_\infty, Y_F = 0, Y_O = Y_{O\infty}, \rho_g \nu = 0 \quad (34)$$

$t_p \leq t$, $r = R$ 일 때

$$R^2 \rho_g \nu_s = -\rho_1 \varphi \frac{dr_p}{dt} r_p^2 \quad (35)$$

여기서 V_s 는 표면에서 휘발성분이 나오는 속도이며, $\frac{dr_p}{dt}$ 는 휘발면이 줄어 드는 속도이다. 액적의 표면에서는 다음과 같다.

$$T_{s-0} = T_{s+0}, \quad (36)$$

$$\rho_g D_O \left(\frac{\partial Y_O}{\partial r} \right)_s = \rho_g \nu_s Y_{O_0}, \quad (37)$$

$$-\rho_g D_F \left(\frac{\partial Y_F}{\partial r} \right) = \rho_g \nu_s (1 - Y_F) \quad (38)$$

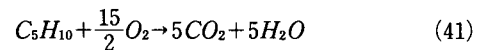
속도를 구하기 위해 기체의 물성치가 일정하다고 가정하면

$$\rho_g \nu r^2 = \text{constant} \quad (39)$$

이고, 기체장에 대한 Lewis수는

$$Le = \frac{\lambda}{\rho CD} = 1 \quad (40)$$

이며, 표면을 빠져나온 휘발성 기체는 에틸렌(ethylene)계 탄화수소로서 산소와의 완전연소 반응기구는 단일단계 반응으로서 다음과 같이 나타낸다.



70g의 휘발성 기체가 완전 반응하면 220g의 CO_2 와 90g의 H_2O 를 생성함을 의미한다.

3. 결과 및 토론

본 연구에서는 특별한 언급이 없는 한 Table 2

Table 2 The properties of binary Slurry

$\frac{1}{\rho_b} = \frac{\omega}{\rho_w} + \frac{1-\omega}{\rho_1}$
$C_b = \omega C_w + (1-\omega)C_1$
$\lambda_b = \omega\lambda_w + (1-\omega)\lambda_1 - 0.72\omega(1-\omega)(\lambda_1 - \lambda_w)$

와 Table 3의 정보를 기본으로 하여 계산하였으며 본 식에 사용된 편미분 방정식을 푸는 데 있어, 확실한 안정성을 제공하는 내재적 방법(implicit-method)을 이용하였으며 시간적으로는 전방 차분법(forward difference approximation), 공간적으로는 중앙 차분법(central difference approximation)를 사용하였다. 증발 및 휘발면의 경계에서는 증발면이 반드시 격자에 오지 않으므로 비균일 격자(unequaled grid)를 사용하여 각 면에서의 오차를 제거하였다. 특히 기존의 연구자들과는 달리 액적 내부의 온도분포를 고려하였으므로 액적의 연소기구를 보다 명백히 규정할 수 있다. 따라서 시간에 따른 액적 내부 온도 분포와 기체장의 온도분포를 보는 것은 의미있는 일이라 하겠다. Fig. 3(a)는 가열과정중의 온도분포를 나타낸 것으로, 액적이 가열되면서 온도구배가 형성되고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 액적의 표면온도가 증발온도에 도달되어 증발이 시작되면서 증발면이 이동하여 가는 것을 나타내는 것으로, 시간이 증가함에 따라 증발면 안쪽의 온도구배는, 증발면 바깥쪽으로 부터의 열전달에 의하여 줄어들면서 증발온도에 접근하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 증발면 안쪽에서의 열전달은 줄어들게 되어 바깥쪽으로 몰려있게 된다. 기체장의 온도분포는, 가열과정 및 증발초기에는 액적

표면의 온도가 기체장의 온도에 비하여 낮기 때문에 다소 감소하다가 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 액적표면의 온도가 어느정도 증가하게 되면 액적으로의 열전달이 줄어 기체장의 온도는 다시 상승하게 된다. Fig. 3(d)는 휘발면이 생성되어 증발면과 같이 공존(주위 조건에 따라 증발원료 후 휘발면이 생성될 수 있음)하는 것을 볼 수 있다. 액적표면으로부터 방출된 휘발성 기체는 산소와의 반응으로 기체장의 온도가 급격히 상승한 것을 보인 것이다. 이 때 기체장의 온도가 초기 조건의 대기 온도보다 높아지면 즉, 기체장의 온도분포곡선에 변곡점이 생성되는 순간을 본 논문에서는 점화라 정의하였다.

지금까지 연구된 증발모델을 알아보면 공간적으로는 모두 일정하나 시간적으로는 변하는 모델(rapid internal mixing mechanism),^(8,9) 증발면 안쪽만 온도 구배가 존재하고 바깥쪽의 온도는 일정하다는 증발모델,⁽⁴⁾ d^3 모델⁽⁶⁾이 있고, 내부의 온도분포를 고려하는 최근의 방법^(10,14) 등이 있다. 본 연구에서는 내부 온도 분포를 고려하여 계산하였으며 Antaki 방법⁽⁴⁾과 비교하였다. 그 결과는 Fig. 4(a)에 나타나 있다. Antaki 방법은 위에서도 언급한 바와 같이 증발면 바깥쪽의 온도가 일정하므로 기체장에서 들어오는 모든 열이 증발하는데 소모된다. 그 결과 증발면 바깥쪽까지 가열시키는 본 연구의 결과보다는 증발 시간이 훨씬 짧아지게 되므로 외부에서 들어오는 열은 더 이상 증발하는데 소모되지 않고 액적을 가온(heat up)시켜 점화시간을 단축시키지만 실제와는 차이가 있는 증발모델이다.

대류열에 의한 영향, 즉 속도에 의한 영향은 Fig. 5에서 보듯이 현저히 드러나지만 복사열에 의한 영향은 크지 않다. 이는 T. Kolb⁽²⁾의 결과와 동

Table 3 Reference data

Gas temperature	: 1500 K
CWS temperature	: 300 K
CWS radius	: 500 μm
The weight fraction of water in the CWS	: 0.4
The weight fraction of volatile matter in the coal	: 0.3
Air velocity	: 0.1 m/s
No radiation, With temperature distribution in droplet	

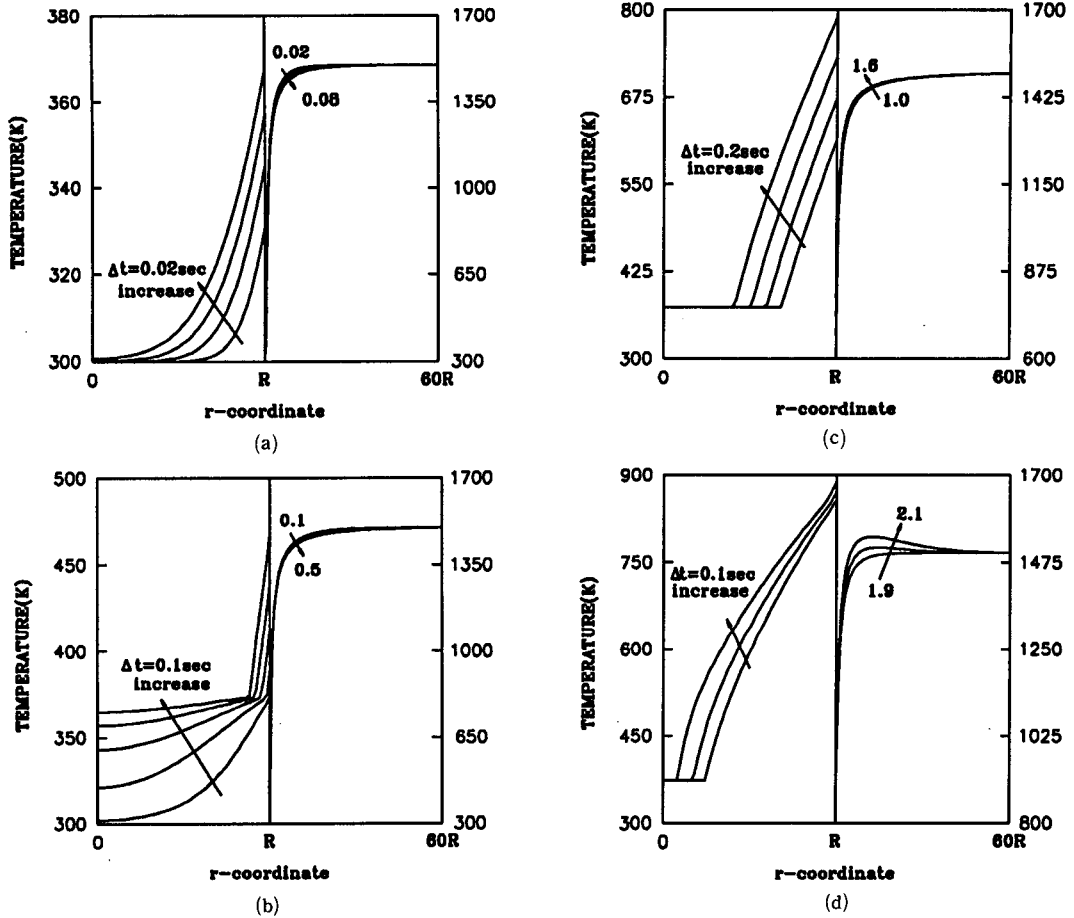


Fig. 3 (a) Temperature distribution of the interior of droplet and gas field with time during heating
 (b) Evaporation process
 (c) Continuation of evaporation
 (d) Continue to ignition

일한데 Fig. 4(b)에 나타나 있으며 그 이유는 고온 공기의 방사계수가 작기 때문인 것으로 나타났다.

액적의 연구에 있어 액적크기의 변화는 주요한 인자로 꼽을 수 있다. Fig. 6에서도 보듯 직경이 클수록 모든 지연시간이 길어지는데, 그 이유는 직경이 클수록 상대적인 액적내부로의 열전달량이 줄어 물의 증발과 표면의 가온(heat-up)이 지속되기 때문이다. 이는 분무 연소기등의 액적연소에 있어 액적의 초기 직경은 증발및 점화의 연소시간에 영향을 미침을 알 수 있다.

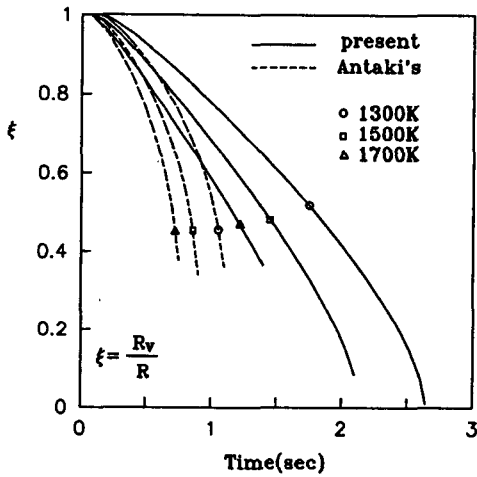
물의 무게비(ω)가 작아짐은 석탄의 상대적인 무게비가 커짐을 의미한다. 그러므로 증발지연시간은 줄어들고 열적인 효율은 더욱 높아지지만 물이 적

어지면 유동장애가 생겨 석탄슬러리 연료로서 사용이 곤란해 진다. 또한 물이 많아지면 유동성이 좋아지고 분사하기에 편해지지만 물을 증발시키는데 열을 많이 빼앗기므로 연소기나 분사기의 조건에 따라 적당한 ω 값을 취한다. 물의 무게비에 대한 계산결과는 Fig. 7에서 볼 수 있다.

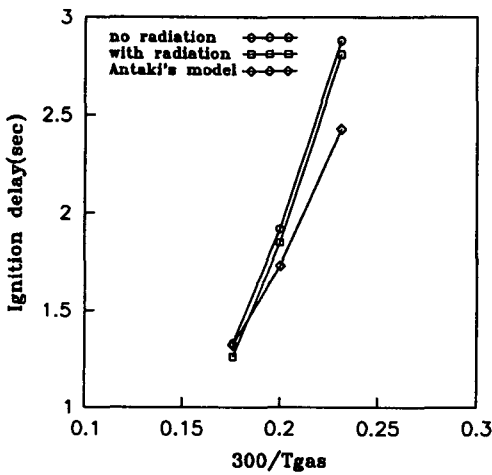
석탄의 전도계수가 작을수록 내부로의 열전달이 되지 않고 표면의 온도가 높아 증발은 늦어지나 점화가 빨리 일어나게 되는 현상을 보게된다. 반대로 전도계수가 크게되면 내부로의 열전달이 잘 되어 전도성이 작은 경우보다 표면의 온도가 낮아짐으로 점화지연시간은 길어지나 증발지연시간은 짧아진다. 이의 계산 결과를 Fig. 8에 나타나 있다.

Fig. 4에서 보듯이 대기가스 온도가 높을수록 액적이 받는 열량이 많아지므로 모든 지연시간이 짧아지나 실제 적용문제에 있어서는 재료의 성질을 고려해야 함으로 계속 높일 수 만은 없다. 역으로 액적의 온도를 높이는 것도 지연시간을 줄이는 방법이지만 비용이 많이 든다.

Fig. 9는 질량비(mass fraction), 기체장의 온도와 반응물의 상관관계를 보기 위하여 1300K의 주위온도에서 그린 그림이다. Fig. 10은 각각 다른 실험조건에서 계산과의 점화지연시간을 비교한 것



(a)



(b)

Fig. 4 (a)Comparison of Antaki and present evaporation model
(b)The effect of radiation with temperature for ignition delay time

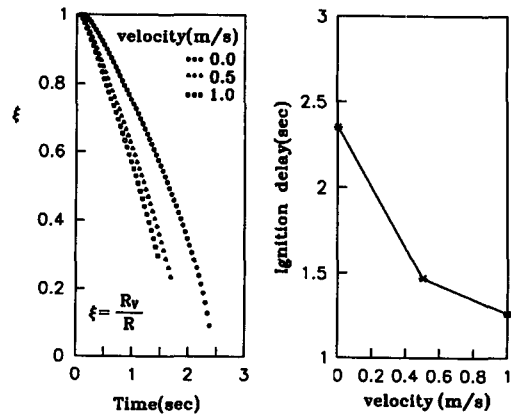


Fig. 5 The effect of velocity for evaporation and ignition delay time

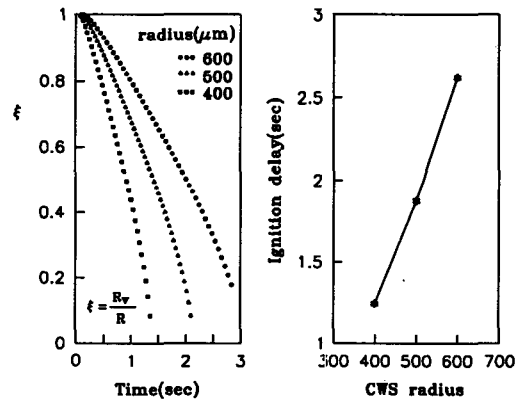


Fig. 6 The effect of CWS radius for evaporation and ignition delay time

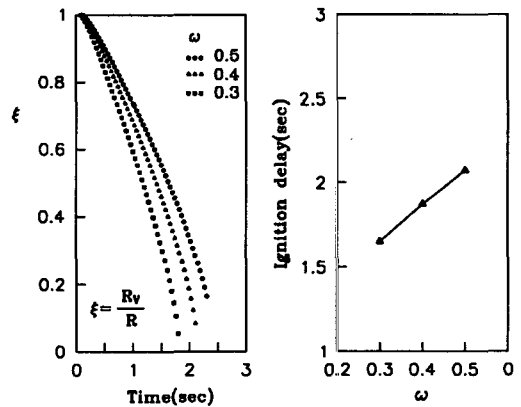


Fig. 7 The effect of the weight fraction of water for evaporation and ignition delay time

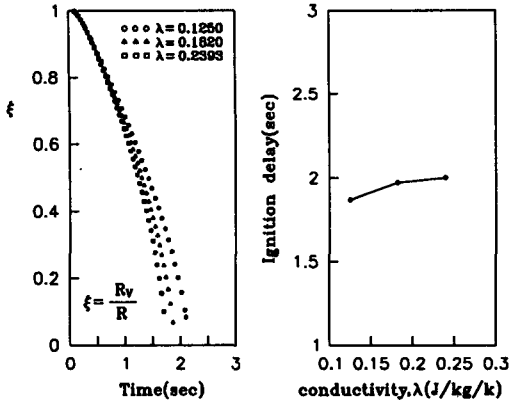


Fig. 8 The effect of conductivity of coal for evaporation and ignition delay time

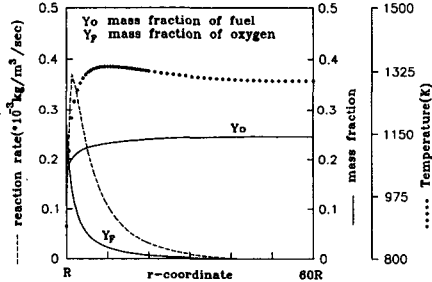


Fig. 9 Variation in temperature, mass fraction and reaction rate (at 3.2 sec, gas temperature: 1300K)

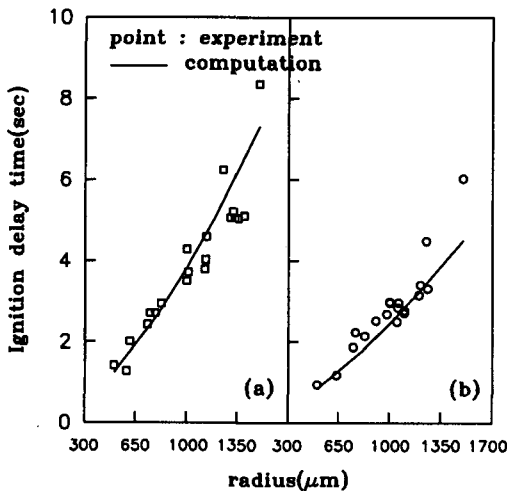


Fig. 10 Comparison of ignition delay time experiment and computation[(a)gas temp. 1593K, CWS temp. 293K, velocity:0.58m/s, ω :0.4, ϕ :0.337, with radiation (b)gas temp. 1711K, CWS temp. 293K, velocity:1.12m/s, ω :0.4, ϕ :0.337, with radiation]

인데 실험조건 (a)에서는 거의 일치함을 보이지만 조건(b)와는 실험치보다 약간 낮게 나왔다. 이유는 실제 실험상에서 기체 온도가 높아질수록 주위 대기로 빼앗기는 열이 더욱 더 많아지기 때문이다.

내부온도 분포를 CWS에 적용함으로써 얻을수 있는 새로운점은 첫번째로 증발과정중에 점화 현상을 포착할 수 있고, 두번째로는 실험에서 얻어진 증발시간의 재수정이 필요하다. 설명을 덧붙이자면 실험에서 열전대에 매달린 액적은 중력으로 인하여 약간 밑으로 처진다. 이때 측정된 온도는 액적의 중심부가 아니므로 증발이 완료되었다고 말할 수 없다는 것이다.

4. 결 론

고온 공기속에 있는 CWS액적의 증발 및 점화 현상을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 복사열의 영향보다 대류열의 영향이 지배적이다.
- (2) 액적이 클수록 증발및 점화지연시간이 길어진다.
- (3) 물의 무게비가 클수록 유동성은 좋아지나 지연시간이 길어지므로 연료로서의 효과를 보기는 어렵다.
- (4) 전도성(conductivity)이 클수록 증발시간은 줄어드나 점화지연시간은 길어진다.
- (5) 대기가스의 온도가 높을수록 지연시간이 짧아진다.
- (6) 본 연구의 증발모델이 기존의 모델보다 실제에 가까우며 실험과도 일치함을 보인다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초 연구비 지원에 의한 결과이며, 관계자 여러분께 깊은 감사 드립니다. (과제번호 ADD-90-5-5)

참고문헌

- (1) Yao, S. C. and Liu, L., 1983, "Behavior of Suspended Coal-Water Slurry Droplets in a Combustion Environment," Combustion and Flame, Vol. 51, pp. 335~345.
- (2) Kolb, T., Farmayan, W. F., Walsh, P. M., and

- Beer, J. M., 1988, "The Contribution of Radiation to the Ignition of a Confined Turbulent Coal-Water Slurry Diffusion Flame," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 58, pp. 77~95.
- (3) Cho, S. Y., Takahashi, F. and Dryer, F. L., 1989, "Some Theoretical Considerations on the Combustion and Disruption of Free Slurry Droplets," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 67, PP. 37~57.
- (4) Antaki, P., 1986, "Transient Processes in a Rigid Slurry Droplet During Liquid Vaporization and Combustion," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 46, pp. 113~135.
- (5) Antaki, P., and Williams, F. A., 1986, "Transient Processes in a Non-Rigid Slurry Droplet During Liquid vaporization and Combustion," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 49, PP. 289~296.
- (6) Lee, A. and Law, C., 1989, "Gasification and Shell Characteristics in Slurry Droplet Burning," AIAA/ASME/SAE/ASEE 25th Joint Propulsion Conference, July 10~12, pp. 1~17.
- (7) Rah, S. C., Sarofim, A. F. and Beer, J. M., 1986, "Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets Part II: Ignition Studies," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 49, pp. 169~184.
- (8) 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.
- (9) Law, C. K., 1976, "Unsteady Droplet Combustion with Droplet Heating," *Combustion and Flame*, Vol. 26, pp. 17~22.
- (10) Phuoc, T. X. and Mathur, M. P., 1991, "Transient Heating of coal Particles Undergoing Pyrolysis," *Combustion and Flame*, Vol. 85, pp. 380~388.
- (11) Williams, F. A., 1985, "Combustion Theory," The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (12) Kanury, A. M., 1975, "Introduction to Combustion Phenomena," Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- (13) Baek, S. W., 1990, "Ignition of Particle Suspensions in Slab Geometry," *Combustion and Flame*, Vol. 81, pp. 366~377.
- (14) Baek, S. W., 1992, "Influence of Nonuniform Particle Temperature on the Radiatively Active Particle Ignition," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 6, No. 2, pp. 382~384.
- (15) R. J. Kee, J. A. Miller, T. H. Jefferson CHEM-KIN: A General-Purpose, Problem-Independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package, March 1989. Sandia National Laboratories
- (16) D. A. Bittker and V. J. Scullin, "General Chemical Kinetics Computer Program for Static or Flow Reactors, With Application to Combustion and Shock-Tube Kinetics," NASA TN D-6586, January 1972.
- (17) Rohsenow, W. M., "Handbook of Heat Transfer Fundamentals," McGraw-Hill, New York.
- (18) Kuo, K. K., 1986, "Principles of Combustion," John Wiley & Sons, Inc.