

<論 文>

입자온도 분포를 고려한 탄소입자와 산소에서의 이상폭발현상에 관한 연구

승 성 표* · 백 승 욱**

(1988년 3월 7일 접수)

On the Two Phase Detonation in Carbon Laden Oxygen : Taking into account of inner Particle Temperature Distribution

Seong Pyo Seung and Seung Wook Baek

Key Words : Two-Phase(2 상), Detonation(이상폭발), Solid Combustible Particle(고체연소미립자), Bow Shock(궁형 충격파), Induction Zone(유도부)

Abstract

In this study the structure of a two phase detonation has been numerically investigated through the assumption of a steady and one-dimensional flow in the suspension of carbon particles and pure oxygen. The bow shock formation in front of carbon particles has been taken into consideration when the relative velocity of gas flow with respect to the particle exceeds the local speed of sound. But its effect was found to be very limited to the induction zone only. Furthermore the interior particle temperature distribution has been considered in this work. It was found that the inner temperature gradient was very steep in the region of high relative velocity. On the while the temperature distribution inside the particle was almost uniform in the region of low relative velocity. Overall, the effect of the interior particle temperature distribution has been significant in the two phase detonation.

기 호 설 명

C_D : 탄소입자의 항력계수	K_g : 기체의 열 전도 계수
C_{ca} : 탄소의 비열	K_s : 표면 반응을 계수
C_{Pg} : 기체의 정압 비열	K_d : 확산 반응을 계수
D_c : 탄소입자의 직경	M : 분자량
D_d : 탄소의 확산계수	n : Number density
E_o : 활성화 에너지	P : 기체의 압력
F : 탄소입자에 작용하는 항력	P_{O_2} : 산소의 분압
h : 대류 열 전달 계수	Pr : Prandtl수
H_b : 연소 생성열	q : 탄소입자의 단위 면적당의 반응을
	Q : 단위 시간당 기체로부터 고체입자로 전달되는 열전달량
	r : 탄소입자의 반경
	R : 기체 상수

*천문우주과학연구소

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

R_o	: 일반기체 상수
Re	: Reynolds 수
t	: 탄소 입자가 기체에 노출된 시간
T_c	: 탄소입자 표면 온도
T_g	: 기체의 온도
T_m	: 탄소 입자의 열 경계층 내의 온도
U	: 기체의 속도
V	: 탄소입자의 속도
V_m	: 몰 부피
x	: 좌표축으로 부터의 거리
α	: 탄소의 열확산 계수
σ_c	: 탄소입자의 농도
ρ_c	: 탄소의 밀도
ρ_{O_2}	: 산소의 밀도
ρ_{CO_2}	: 이산화탄소의 밀도
ρ_g	: 혼합기체의 밀도
Γ_c	: 탄소입자의 이상 반응을
Γ_{O_2}	: 산소의 화학 반응을
Γ_{CO_2}	: 이산화탄소의 생성을
μ_g	: 기체의 점성 계수
η	: 부하율

참 자

C	: 탄소
CO_2	: 이산화탄소
O_2	: 산소
O	: 충격파가 지나가기전의 상태

1. 서 론

기체중에 부유되어있는 고체 연소 미립자에 의한 이상폭발현상(detonation)은 TNT나 화약과 같은 폭발성이 강한 물질과 고체 로켓 추진제인 double-base propellants나 composite propellants에 포함되어있는 알루미늄과 같은 금속가루등과 석탄광산등지에서의 석탄가루미립자에 의한 폭발과 일반 산업체등지에서의 공기중에 부유되어있는 고무가루, 금속가루, 먼지에 의한 폭발등에서 이 현상을 볼 수 있다. 이러한 고체연소미립자에의한 이상폭발현상은 기체의 이상폭발현상과 기본적인 폭발과정은 여러면에서 같으나 고체연소미립자와 기체는 서로 상이 다르기 때문에 상이 다른 방정식에 대한 해를 구하는데에 대한 어려움과 고체연소미립자의 화학반응으로 인한 이질성(heterogeneous)때

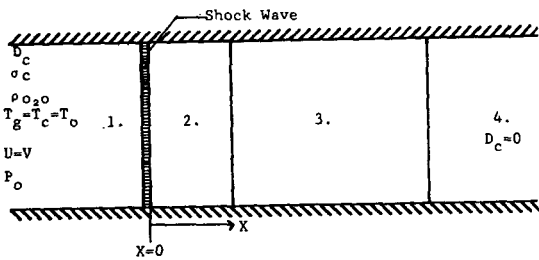
문에 복잡성을 내포하고 있다. 이러한 이상폭발현상이 중요한 연구 대상으로 대두되기 시작한 초기에는 과학적인 이유에서 연구가 시작된것이 아니라 적어도 사회의 안전적인 측면에서 시작되었으며 이러한 현상을 모델화하는 것은 기체중에 부유되어있는 고체연소미립자의 이질적인 성질과 복잡한 화학반응 그리고 초기 점화 과정을 알아야 하기 때문에 이론적으로 해석 하기가 매우 어려웠다.

이상폭발현상에 관해서는 Elperin등⁽¹⁾, Igra등⁽²⁾는 탄소입자와 순수 산소의 혼합물속으로 수직 충격파가 지나갈 때 충격파의 후방영역에서의 탄소입자와 산소의 속도, 밀도, 온도등을 수치적으로 측정하였으며, Baek등⁽³⁾은 석탄가루나 곡식가루등의 비금속 고체입자가 충격파에 의하여 생성된 고온의 기체속에 놓여 있을 때 일어나는 점화 현상을 활성화 에너지가 큰 경우의 점화점근법을 이용하여 해석하였고, Sichel등⁽⁴⁾은 석탄가루, 흑연가루, 다이아몬드가루, 곡식가루 및 RDX의 고체연소 미립자를 수평충격관을 사용하여 충격 파가 지나간 후 고체입자에 점화가 일어날 때까지의 점화지연시간및 이상폭발현상의 구조를 실험적으로 해석하였다. 또한 Beak⁽⁵⁾은 석탄가루, 곡식가루등의 고체미립자에 대하여 반사압축파에 의한 점화에 관하여 실험적으로 연구하였으며, Yun⁽⁶⁾, Baek등⁽⁷⁾은 화염전파속도가 아음속인 폭연(deflagration)에 대하여 석탄입자와 공기 혼합물에서의 화염전파에 관하여 수치적으로 연구하였다. 그리고 Lee등⁽⁸⁾은 고체연소미립자의 크기와 부하율에 따른 점화전의 유동장에 고체입자때문에 생기는 열 효과(thermal effect)를 계산하기 위하여 유동장 보존식과 Arrhenius형태의 화학 생성항을 갖는 비정상 열전달식을 이용하여 수치적으로 해를 구하였다.

석탄, 곡식가루나 탄소입자등의 고체입자는 금속성 고체입자와 달라 매우 높은 대류 열전달 상태에서 점화될 때 입자내부에 매우 높은 온도 구배가 발생하게 된다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 고체연소미립자로써 탄소입자와 산화제로써 순수 산소를 사용하였으며, 매우 높은 대류 열 전달 상태에서 탄소입자 표면의 대류 열저항과 고체 내부의 전도 열 저항에 의하여 발생하는 탄소입자 내부의 온도구배를 고려하여 탄소입자와 순수 산소의 혼합물에 있어서 이상폭발현상을 수치적으로 연구하였다.

2. 이 론

탄소입자와 순수 산소에 대한 2 상(two phase) 이상폭발현상(detonation)을 수치적으로 해석하기 위하여 Fig. 1과 Fig. 2에서 처럼 전체영역을 수직 충격파를 기준으로 4영역으로 나눌 수 있으며, 충격파 위에 좌표를 고정시킴으로서 정지상태의 탄소입자와 순수 산소의 혼합물이 충격파의 속도를 가지고 움직이는 것으로 보일 것이다. 따라서 충격파를 지난 직후의 영역에서는 즉 유도영역에서는 탄소입자와 순수 산소는 기체인 산소의 경우는 Rankine-Hugoniot관계식의 결과에 의하여 속도는 아음속으로 급격히 감소하고 온도, 밀도, 압력은 급격히 증가하게되나 탄소입자의 경우는 충격파의 두께, 탄소입자의 크기 및 탄소입자의 반응시간을 고려할 때 충격파를 지난 직후에는 충격파를 지나기 전의 상태를 그대로 가지고 있다고 가정할 수 있다. 따라서 두상이 속도와 온도에서는 커다란 차이가 발생하게 되며 대단히 큰 운동량 전달과 열전달이 발생하게 되고 Fig. 2에서와 같이 탄소입자



1. Pre-Shock equilibrium state zone
2. Pre-combustion zone(Induction zone)
3. Combustion zone
4. Post-Shock equilibrium state zone

Fig. 1 Schematic flow field

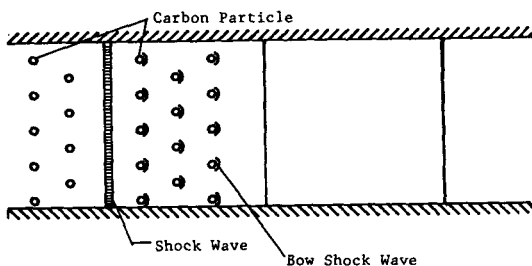


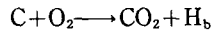
Fig. 2 Schematic of Gas/Carbon-Particle flow

와 기체의 상대적인 속도차가 Mach수 1를 넘게 되면 탄소입자 앞에 구형 충격파가 발생하게 된다. 이 구형 충격파는 Spary detonation의 구조를 실험적으로 연구한 Ragland등⁽⁹⁾에서 볼 수 있다.

2.1 지배방정식에 대한 가정

이상폭발현상을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 충격파 바로 뒤에서 $x=0$ 으로 설정하고, 전체 유동장은 정상, 1차원 상태로 가정한다. 그리고 화학반응을 수반하는 유동장에 대하여 다음과 같이 가정을 한다.

- (1) 같은 크기의 구형의 탄소입자에 작용하는 체적력은 탄소입자에 작용하는 항력에 비하여 작으므로 무시하고 탄소입자의 상호 작용도 무시한다.
- (2) 각 영역에서 기체의 각 성분간의 열전달과 점성의 영향은 무시한다.
- (3) 유동장내의 복사 열전달효과는 무시한다.
- (4) Dufour effect와 Soret effect는 무시한다.
- (5) 탄소입자와 산소사이의 연소모델은



이며 H_b 는 연소 생성열로 $3.937 \times 10^5 \text{KJ}/(\text{kg-mole})$ 이며, 이 생성열은 모두 기체에 전달된다.

- (6) 탄소입자에는 휘발성 가스가 포함되어 있지 않으며, 탄소입자의 물성치는 일정하다.
- (7) 탄소입자가 차지하는 부피는 기체 전체 부피에 비하여 대단히 적으므로 무시한다.

2.2 지배 방정식

위 가정으로 부터 다음과 같은 9개의 지배방정식을 세울 수 있다.

- (1) 탄소입자에 대한 질량보존식,

탄소입자는 고체입자이므로 확산을 무시하면

$$\frac{d}{dx}(\sigma_c \cdot V) = -\Gamma_c \tag{1}$$

여기서 x 는 Fig. 1에 나타나있는 것처럼 좌표축으로 부터의 거리를 나타내며, 탄소입자의 연소 반응율(Γ_c)과 탄소입자 단위 면적당의 반응율 q 는 Field⁽¹⁰⁾식으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_c = n \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot q \tag{1-1}$$

$$q = \frac{P_{O_2}}{1/K_s + 1/K_d} \tag{1-2}$$

여기서 탄소입자의 연소 반응율(Γ_c)는 탄소입자 주위 산소의 확산율과 탄소입자 표면에서의 화학반응율의 변화에 따라 크게 영향을 받으며, q 의 K_s

는 표면 반응율로써 산소의 농도에 무관하고 탄소 입자의 표면온도, 연료의 형태와 활성화 에너지에 의존하며

$$Ks = 0.86 \cdot \exp(-E_0/R_0 \cdot T_c) \quad (1-3)$$

이다. 여기서 탄소입자의 활성화 에너지(E_0)는 $1.4947 \times 10^8 \text{ J/kg-mole}$ 를 사용한다. 그리고 Kd 는 탄소입자 주위 산소의 확산 반응을 계수로

$$Kd = 24.3 \cdot Dd(D_c \cdot R \cdot T_m) \quad (1-4)$$

이다. 그리고 T_m 은 탄소입자의 열 경계층내에서의 온도도

$$T_m = \frac{T_g + T_c}{2} \quad (1-5)$$

이다. 산소의 확산 계수 Dd 는 Perry⁽¹¹⁾의 식

$$Dd = \frac{4.24 \times 10^{-7} \cdot T_g^{3/2} \cdot (1/M_{O_2} + 1/M_{CO_2})^{1/2}}{P \cdot (V_{mO_2}^{1/3} + V_{mCO_2}^{1/3})^2} \quad (1-6)$$

을 사용하고 있다,

(2) 산소에 대한 질량보존식

산소의 확산속도는 기체의 속도보다 대단히 느리므로 무시할 수 있으며, 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dx}(\rho_{O_2} \cdot U) = \Gamma_{O_2} \quad (2)$$

여기서 Γ_{O_2} 는 산소의 소모화학 반응율을 나타내며, 탄소입자의 연소반응율로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{O_2} = -\frac{M_{O_2}}{M_c} \Gamma_c \quad (2-1)$$

(3) 이산화탄소의 질량보존식

$$\frac{d}{dx}(\rho_{CO_2} \cdot U) = \Gamma_{CO_2} \quad (3)$$

$$\Gamma_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_c} \cdot \Gamma_c \quad (3-1)$$

(4) 탄소입자에 대한 운동량보존식

$$\frac{d}{dx}(\sigma_c \cdot V^2) = -n \cdot F - V \cdot \Gamma_c \quad (4)$$

산소입자에 작용하는 항력(F)은

$$F = \frac{1}{8} \cdot \rho_g \cdot C_D \cdot |V - U| \cdot (V - U) \cdot \pi \cdot D_c^2 \quad (4-1)$$

이공, 여기서 ρ_g 는 산소와 이산화탄소의 혼합기체에 대한 밀도를 나타내며, 항력 계수(C_D)는 Rudinger⁽¹²⁾에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$C_D = 0.48 + 28 \cdot Re^{-0.85} \quad (4-2)$$

여기서 Re 는 탄소입자와 기체의 상대속도에 의한 Reynolds수로 Rudinger⁽¹²⁾ 식으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$Re = \frac{\rho_g \cdot |V - U| \cdot D_c}{\mu_g} \quad (4-3)$$

(5) 기체에 대한 운동량 보존식

$$\frac{d}{dx}(\rho_{O_2} \cdot U^2 + \rho_{CO_2} \cdot U^2) + \frac{dp}{dx} = n \cdot F + V \cdot \Gamma_c \quad (5)$$

(6) 탄소입자에 대한 에너지 보존식

탄소입자에 대한 에너지 보존식은 두 가지경우로 나누며, 첫째 탄소입자 내부 온도분포를 고려하지 않을 때, 즉 내부온도분포를 일정하다고 가정할 때

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left[\sigma_c \cdot V \cdot \left(C_{Ca} \cdot T_c + \frac{V^2}{2} \right) \right] \\ = n \cdot (Q - F \cdot V) - \Gamma_c \cdot \left(C_{Ca} \cdot T_c + \frac{V^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이며, Q 는 단위 시간당 기체로부터 고체입자로 전달되는 열 전달 양으로

$$Q = h \cdot \pi D_c^2 (T_g - T_c) \quad (6-1)$$

이다. 대류 열전달계수 h 와 이에 따른 Nusselt수, Reynolds수, Prandtl수는 Seung⁽¹³⁾와 Seung등⁽¹⁴⁾으로부터 구하여진다. 둘째로 탄소입자의 내부 온도 분포를 고려할 때 탄소입자의 에너지 보존식은

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) \quad (6-2)$$

이며, t 는 시간을 나타낸다. 즉, 시간 t 는 탄소입자가 수직 충격파를 지난 후 기체에 노출된 시간을 나타내며, r 은 탄소입자 내부 반경을 나타낸다.

경계조건은

$$K_c \cdot \frac{\partial T_c}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = h(T_g - T_c) \quad (6-3)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (6-4)$$

이고, 이때 정식화변수

$$\psi = \frac{r}{r_c} (T_c - T_0) \quad (6-5)$$

$$n = \frac{\alpha \cdot t}{r_c^2} \quad (6-6)$$

$$\xi = \frac{r}{r_c} \quad (6-7)$$

을 도입하여 에너지식과 경계조건을 정식화하면

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \quad (6-8)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \psi \cdot \left(\frac{h \cdot r_c}{K_c} - 1 \right) = \frac{h \cdot r_c}{K_c} \cdot (T_g - T_0) \quad (6-9)$$

이다. 이 정식화된 에너지식을 유한 차분화하고 tridiagonal 매트릭스를 이용하여 해를 구한다.

(7) 기체에 대한 에너지 보존식

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} \left[\rho_{O_2} \cdot U \left(CP_{O_2} \cdot T_g + \frac{U^2}{2} \right) \right. \\ & \left. + \rho_{CO_2} \cdot U \left(CP_{CO_2} \cdot T_g + \frac{U^2}{2} \right) \right] \\ & = -n \cdot (Q - F \cdot V) + \Gamma_c \cdot \left(C_{Ca} \cdot T_c + \frac{V^2}{2} + H_b \right) \end{aligned} \quad (7)$$

(8) 상태 방정식

$$P = (\rho_{O_2} \cdot R_{O_2} + \rho_{CO_2} \cdot R_{CO_2}) \cdot T_g \quad (8)$$

(9) 탄소입자의 직경 변화식

탄소입자에 대한 직경 변화식은 탄소입자의 시간에 대한 질량변화와 탄소입자의 연소반응율과의 관계인

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_c}{2} \right)^3 \cdot \rho_c \right] = - \frac{\Gamma_c}{n} \quad (9)$$

로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dD}{dx} \cdot C = - \frac{2 \cdot \Gamma_c}{n \cdot \rho_c \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot V} \quad (9-1)$$

3. 계산 방법 및 결과

3.1 수치 계산 방법

수치 계산에서 9개의 변수 σ_i , ρ_{O_2} , ρ_{CO_2} , V , U , T_g , T_c , P , D_c 에 대한 해는, 이 9개의 변수에 대한 도함수 $d\sigma_c/dx$, $d\rho_{O_2}/dx$, $d\rho_{CO_2}/dx$, dV/dx , dU/dx , dT_g/dx , dT_c/dx , dP/dx , dD_c/dx 를 수치 적분함으로써 구하였다. 9개의 지배 방정식은 화학 반응으로 해의 기울기가 대단히 큰 stiff ordinary differential equation이며 수치적으로 초기치문제(initial value problem)이다. 본 연구에서는 일반적인 상 미분 방정식으로부터 해의 기울기가 대단히 큰 상 미분 방정식의 해를 수치 적분으로 구하는 LSODI(Livermore solver for ordinary differential equation)라는 범용 프로그램을 부프로그램으로 이용하였다. 수치 계산에서 초기치는 Fig. 1에서처럼 탄소입자와 기체와의 두 상 간에 평형 상태를 유지하고 있는, 즉 수직 충격파가 지나가기 전의 영역인 충격파 전 평형 상태 영역에서의 유동장 조건을 마하수 $M_0=5$, 압력 $P_0=760$ torr, 온도 $T_0=300^\circ\text{K}$, 산소의 밀도 $\rho_{O_2}=1.3\text{kg/m}^3$ 탄소입자와 순수 산소의 질량비인 부하율(loading ratio) $\eta=0.05$, 탄소입자의 직경 $D_{c0}=100\mu\text{m}$ 로 하였을 때, 충격파를 지난 직후의 유동장으로부터 구하였다. 즉 수직 충격파 위에 좌표계를 설정함으로써 충격파 전의 평형 상태에 있는 탄소입자

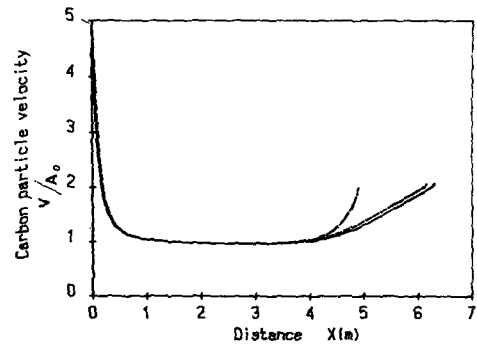


Fig. 3 Variation of the carbon particle velocity for $M_0=4$, $P_0=760$ torr, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{c0}=100\mu\text{m}$

— ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - - - ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

와 산소의 혼합물이 상기한 유동장 조건을 가지고 움직이는 것으로 보일 것이다. 따라서 충격파를 지난 직후 $x=0$ 에서 초기값은 기체인 산소의 경우는 Rankine-Hugoniot 관계식의 결과로부터 구하였으며, 탄소입자의 경우는 수직 충격파의 두께는 분자의 평균자유거리정도이므로 탄소입자의 크기 및 탄소입자의 상태변화에 따라 화학 반응 특성 시간을 고려할 때 수직 충격파를 통과하기 전의 1 영역의 상태를 그대로 갖고 있다고 가정할 수 있으므로, 탄소입자의 경우는 충격파 전의 영역의 유동장 조건을 그대로 초기값으로 사용하였다. 이 초기값을 이용하여 탄소입자가 완전히 연소될 때까지 ($D_c=0$) 수치적 적분으로 Fig. 3 또는 Fig. 11과 같이 9개의 방정식에 대한 해를 구하였다.

3.2 수치 계산 결과

본 연구에서는 Fig. 3과 Fig. 11에서처럼 세가지 경우에 대하여 연구 비교하였다. 첫째, 실선은 탄소입자 내부 온도 분포와 탄소입자의 기체에 대한 상대적인 속도의 마하수가 1를 넘게되면 탄소입자 앞에 발생하는 궁형 충격파의 영향을 고려하지 않는 경우이다. 둘째, 점선은 궁형 충격파의 영향만을 고려한 경우이고, 세째, 2점쇄선은 탄소입자의 내부 온도 분포와 궁형 충격파의 영향을 동시에 고려한 경우이다.

탄소입자의 내부 온도 분포와 궁형 충격파의 영

향을 고려하지 않은 경우, 충격파 바로 뒤 $x=0$ 에서 기체 상태인 산소는 Rankine-Hugoniot 관계식의 결과에 의하여 밀도, 온도, 압력은 급격히 증가하고 속도는 아음속으로 급격히 감소하나 고체상태인 탄소입자의 경우는 충격파 전의 상태를 그대로 가지고 있으므로 두 상 사이에 온도와 속도에서의 커다란 차이로 탄소입자와 기체사이에 대단히 큰 열 전달과 운동량 전달이 발생하게 된다. 초기에 Fig. 3과 Fig. 4에서 처럼 두 상사이의 속도의 커다란 차이로 탄소입자의 경우는 항력으로 속도는 급

격히 감소하게 됨으로 Fig. 5와 Fig. 6의 탄소입자의 농도와 산소의 밀도는 연속 법칙에 의하여 증가하게 되고 Fig. 7과 Fig. 8에서 처럼 기체로 부터 탄소입자로의 열 전달로 인하여 기체의 온도는 감소하게 되고 탄소 입자의 경우는 온도가 증가하게 되어 탄소입자 표면에 점화가 발생하게 되고 이어 탄소입자 표면의 점화로 연소 생성열이 발생하게 되고 연소생성열로 인해 기체의 온도와 탄소입자의 온도가 증가하게 된다. 그리고 탄소입자의 농도와 산소의 밀도는 탄소입자의 연소 화학 반응으로 감

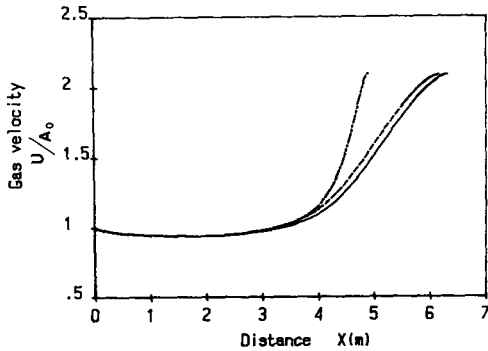


Fig. 4 Variation of the gas velocity for $M_0=5$, $P_0=760\text{torr}$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

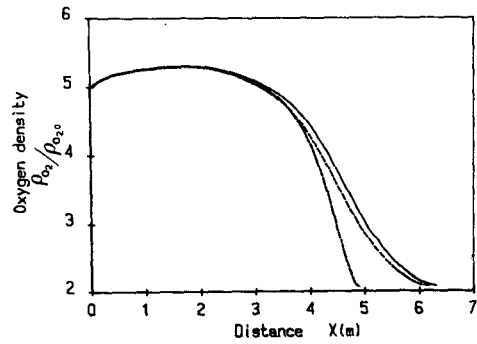


Fig. 6 Variation of the oxygen density for $M_0=5$, $P_0=760\text{torr}$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

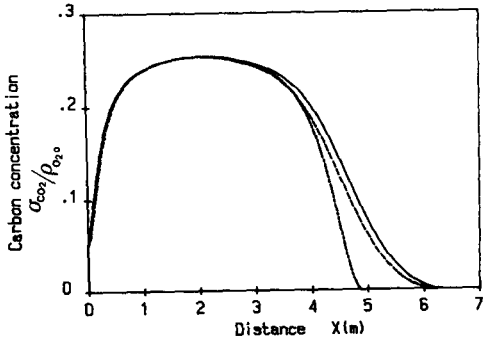


Fig. 5 Variation of the carbon concentration for $M_0=5$, $P_0=760\text{ torr}$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

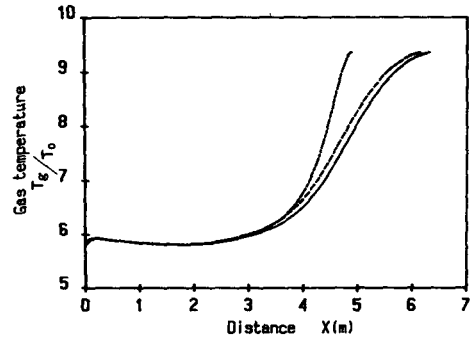


Fig. 7 Variation of the gas temperature for $M_0=5$, $P_0=760\text{torr}$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

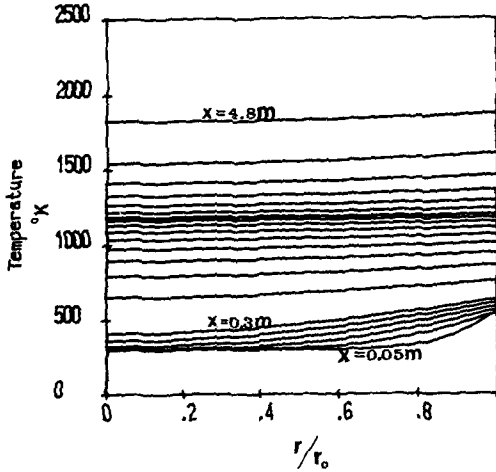


Fig. 8 Temperature variation along the radial direction inside particle for $M_o=5$, $P_o=760\text{torr}$, $T_o=300\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$

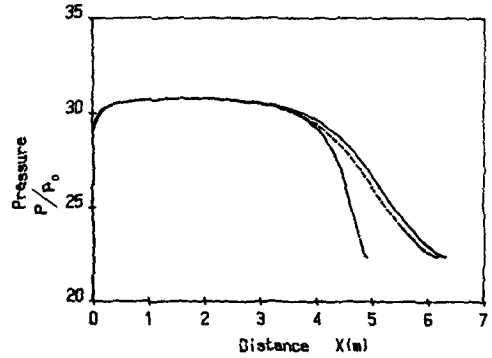


Fig. 10 Variation of the Pressure for $M_o=5$, $P_o=760\text{torr}$, $T_o=300\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

소(Fig. 5, Fig. 6)하게 되고 연소 반응의 생성물인 이산화탄소가 발생하게 된다(Fig. 9). 그리고 탄소 입자 표면의 점화로 인하여 발생하는 연소 생성열의 일부분이 열 에너지에서 운동에너지로 전환되고 탄소입자 크기의 감소와 연소 생성열로 인한 기체의 팽창으로 인하여 탄소입자의 속도와 기체의 속도는 다시 증가하게 된다(Fig. 3, Fig. 4). 기체의 압력은 Fig. 10에서와 같이 충격파를 지난 후 초기의 유도부 영역까지 운동량 법칙으로 부터 탄소입

자의 속도와 기체의 속도의 감소로 인하여 기체의 압력은 증가하게 되고 점화된 후에는 탄소입자와 기체의 속도가 다시 증가함으로 압력 P 는 감소하게 된다.

구형 충격파의 영향만을 고려한 경우, 전체 물리적인 현상은 실선의 경우와 같으나 탄소입자와 기체에 대한 상대적인 마하수가 1를 넘게 되면 Fig. 2에서 처럼 탄소입자 앞에 구형 충격파가 발생하게 되고 이 구형 충격파를 지나게 되면, 다시 탄소입자의 기체에 대한 상대적인 마하수가 감소하게 되나 온도는 증가하게 된다. 따라서 탄소입자의 온도는 증가하게 되나, 탄소입자와 기체의 부하율을 고려할 때 기체의 온도에는 크게 영향을 미치지 않는다. 그러므로 구형 충격파를 고려하지 않은 경우보다 탄소입자의 온도가 높게되고 탄소입자의 점화 온도까지 먼저 도달하게 된다. 그러나 구형 충격파를 고려할 수 있는 영역은 유도부 영역의 일부분에 국한되기 때문에 전체 이완 영역에는 크게 영향을 미치지 않는다. 이 경우 전체 이완 영역의 길이는 6.1m정도로 Fig. 3~Fig. 11의 실선의 경우에 비해 약 0.2m정도 줄어들었다.

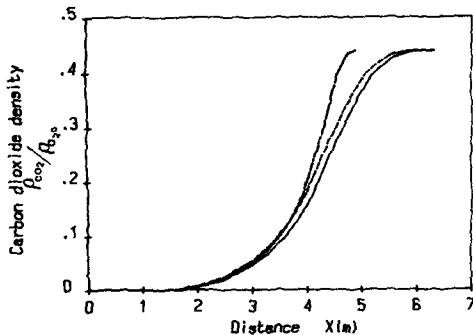


Fig. 9 Variation of the carbon dioxide density for $M_o=5$, $P_o=760\text{torr}$, $T_o=300\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 ; With bow shock
 - · - · ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

탄소입자의 내부 온도 분포와 구형 충격파의 영향을 고려한 경우도 전체 물리적인 현상은 실선의 경우와 같으며, Fig. 8은 거리에 따른 반경 방향으로의 탄소입자 내부온도 분포를 나타내는 것으로 초기 0.05m에서 부터 0.3m까지는 0.05m간격으로

그리고 0.3m에서 4.8m까지는 0.3m간격으로 탄소 입자의 내부 온도 분포를 나타내고 있다. 초기의 Fig. 3과 Fig. 4에서 처럼 탄소입자의 기체에 대한 상대속도가 큰 영역에서는 탄소입자 주위의 대단히 큰 상대적인 속도로 Reynolds수와 Nusselt수에 영향을 미치게 됨으로 탄소입자 내부 전도 열 저항과 탄소입자 주위의 기체에 대한 대류 열 저항의 비인 Biot수가 1보다 커지게 된다. 이것은 대류 열 저항이 작아지고 상대적으로 전도 열 저항이 커지므로 탄소입자 표면에서 내부로의 열 전달율이 기체에서 탄소입자 표면으로의 열 전달율보다 작다는 의미이다. 따라서 탄소입자의 표면과 내부의 온도가 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 상대속도가 작은 영역에서는 대류 열 전달 계수가 작아지게 됨으로 Biot수가 1보다 작아지게 되고, 상대적으로 탄소입자 내부로의 전도 열 저항이 작아지고 상대적으로 전도 열 저항이 커지므로 탄소입자 표면에서 내부로의 열 전달율이 기체에서 탄소입자 표면으로의 열 전달율보다 작다는 의미이다. 따라서 탄소입자의 표면과 내부의 온도가 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 상대속도가 작은 영역에서는 대류 열 전달 계수가 작아지게 됨으로 Biot수가 1보다 작아지게 되고, 상대적으로 탄소입자 내부로의 전도 열 저항이 작아지게 됨으로 탄소입자 표면에서 내부로의 열 전달율이 증가하게되고 탄소입자 내부의 온도 분포가 일정하게 된다. 그리고 $x=0.3m$ 이후의 영역에서 온도의 증가 폭이 감소하다 다시 증가하는 것은 탄소입자의 표면에 점화가 발생하여 탄소입자의 내부 온도가 전체적으로 증가하고 탄소입자의 연소반응으로 탄소입자의 크기가 줄어들기 때문에 탄소입자로서의 단위 면적당 열 전달량이 증가하기 때문이다. 따라서 탄소입자와 기체의 상대속도가 큰 영역에서는 대류 열 저항과 전도 열 저항의 비인 Biot수가 1를 넘게 되어 탄소입자 내부의 온도분포가 전체 이완영역에 크게 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 궁형 충격파와 탄소입자 내부의 온도 분포를 고려하지 않은 경우와 궁형 충격파만을 고려한 두 경우보다 탄소입자 표면의 온도가 큰 차이를 보임을 알 수 있다⁽¹³⁾. 이로 인하여 앞의 두 경우보다 탄소입자의 점화 온도까지 먼저 도달하게 되고, 따라서 탄소입자의 연소율을 나타내는 Fig. 11과 이산화탄소의 생성을 나타내는 Fig. 9에서 처럼 점선과 실선의 두 경우보다 점화가 먼저 일어나고, 전체 이완영역의 길이는 4.9m로 두 경우보다 약

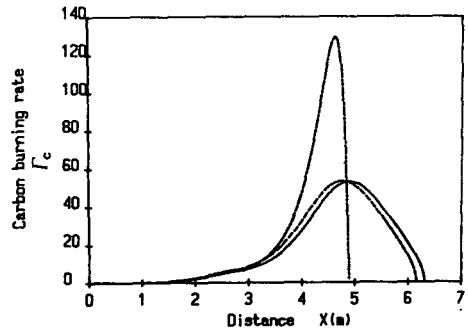


Fig. 11 Variation of the carbon burning rate for $M_0=5$, $P_0=760\text{torr}$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $\eta=0.05$, $D_{co}=100\mu\text{m}$
 — ; Without bow shock and temperature distribution in carbon particle
 - - - ; With bow shock
 ····· ; With bow shock and temperature distribution in carbon particle

1.2m정도 짧아졌다.

4. 결 론

이상의 탄소입자와 순수 산소의 혼합물에 의한 2상 이상폭발현상(two-phase detonation)에 대한 수치 계산 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 궁형 충격파의 영향은 유도부 영역에 집중되었고 전체적으로 탄소입자와 기체에 대한 동적, 열적 상태량의 변화는 궁형 충격파를 무시하였을 때와 유사하였다. 따라서 탄소입자와 기체에 대한 2상 이상폭발현상에서 궁형 충격파의 전체 이완영역에 대한 영향은 작음을 알 수 있었다.
- (2) 탄소입자의 내부온도분포와 궁형 충격파를 고려한 경우 이완영역의 길이는 내부 온도분포와 궁형 충격파를 고려하지않은 경우와 궁형 충격파만을 고려한 경우에 비해 약 1/5정도 줄어들었다.
- (3) 탄소입자와 기체의 상대속도가 큰 영역에서는 탄소입자 주위의 상대적인 속도때문에 탄소입자 표면과 내부의 온도차가 현저함을 알 수 있었다.
- (4) 탄소입자와 기체의 상대속도가 작은 영역에서는 탄소입자 내부의 온도가 거의 일정함을 알 수 있었다.
- (5) 탄소입자와 기체에 대한 상대속도가 큰 영역에서의 탄소입자 표면의 높은 온도 구배는 기체에서

탄소입자 표면으로의 대류에 의한 열 전달률이 탄소입자 표면에서 내부로의 전도에 의한 열 전달률보다 더 크기때문이며, 상대속도가 작은 영역에서는 전도에 의한 열 전달률이 대류에 의한 열 전달률보다 더 크기때문에 탄소입자 내부의 온도 분포가 일정하게 됨을 알 수 있다. 그리고 비금속성의 고체연소미립자에 의한 이상폭발현상에서 고체연소미립자 내부의 온도분포가 유동장에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 시스템공학센터와 한국 IBM사와의 협력사업인 SEC컴퓨터 시스템을 사용하여 수행되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Elperin, I. Igra, O., Ben-Dor, G., 1986, "Analysis of Normal Shock Waves in a Carbon-Particle Laden Oxygen Gas", ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 108, pp. 354~359.
- (2) Igra, O., Ben-Dor, G., Elperin, I., 1986, "Parameters Affecting the Postshock Wave Relaxation Zone in an Oxygen Carbon Particle Suspension", ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 108, pp. 360~365.
- (3) 백 승욱, 1986, "접합 점근법을 이용한 고체입자의 점화에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제4호, pp. 471~476.
- (4) Sichel, M., Baek, S.W., Kauffman, C.W., Maker, B. and Nicholls, J.A., 1985, "The Shock Wave Ignition of Dusts", AIAA Journal, Vol. 23, pp. 1374~1380.
- (5) 백 승욱, 1987, "고체미립자의 반사압축파에 의한 점화에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제11권, 제1호, pp. 118~123.
- (6) Yun, G.W., 1987, "A Study on Flame Propagation through a Mixture of Coal Particles and Air", KAIST, M.S. Thesis.
- (7) Baek, S.W., Yun, G.W., 1987, "On Laminar Flame Propagation in Lean and Rich of Carbon and Air", Joint Technical Meeting of the Western and Japanese Sections of the Combustion Institute, Honolulu, Hawaii, Nov. 22-25.
- (8) Lee, F.P. Kauffman, C.W., Sichel, M., Nicholls, J.A., 1986, "Detonability of RDX Dust in Air/Oxygen Mixtures", AIAA Journal, Vol. 24, pp. 1811~1816.
- (9) Ragland, K.W., Dabora, E.K., Nicholls, J.A., 1968, "Observed Structure of Spray Detonations", The Physics of Fluids, Vol. 11, pp. 2377~2388.
- (10) Field, M.A., Gill, D.W., Morgan, B.B., and Hawksley, P.G.W., 1976, "Combustion of Pulverized Coal", BCURA.
- (11) Perry, J.H., 1963, "Chemical Engineering Handbook", McGraw-Hill, New York.
- (12) Rudinger, G., 1964, "Some Properties of Shock Relaxation in Gas Flows Carrying Small Particles", Physics of Fluids, Vol. 7, pp. 658~663.
- (13) 승성표, 백승욱, 1987, "입자온도 분포를 고려한 탄소입자와 산소에서의 이상폭발현상에 관한 연구", 대한기계학회, 1987년도 추계학술대회초록집, pp. 288~293.
- (14) Seung, S.P. 1988, The Structure of Two-Phase Detonation in Carbon-Particle Laden Gases", KAIST, M.S. Thesis.