

복사효과를 고려한 수소/공기/불활성입자 혼합물에서의 화염전파에 대한 연구

김덕연* · 손진욱* · 백승욱**
(1999년 2월 1일 접수)

A Study on Flame Propagation Through a Mixture of H₂/Air and Inert Particles with Radiation Effect

Deok Yeon Kim, Jin Wook Son and Seung Wook Baek

Key Words : Flame Propagation (화염전파), Premixed Gas (예혼합기체), Burning Velocity (연소속도), Deflagration (정상연소파), Two Phase Media (2 상 매질), Radiation (복사열)

Abstract

The characteristics of flame propagation in inert particle-laden H₂/Air premixed gas are numerically investigated on this study. The 2nd order TVD scheme is applied to numerical analysis of governing equations and multi-step chemical reaction model and detailed transport properties are used to solve chemical reaction terms. Radiation heat transfer is computed by applying the finite volume method to a radiative transfer equation. The burning velocities against the mole fractions of hydrogen agree well with results performed by different workers. The inert particles play significant roles in the flame propagation on account of momentum and heat transfer between gas and particles. Gas temperature, pressure and flame propagation speed are decreased as the loading ratio of particle is increased. Also the products behind flame zone contain lots of water vapor whose absorption coefficient is much larger than that of unburned gas. Thus, the radiation effect of gas and particles must be considered simultaneously for the flame propagation in a mixture of H₂/Air and inert particles. As a result, it is founded that because the water vapor emits much radiation and this emitted radiation is released at boundaries as radiant heat loss as well as reabsorbed by gas and particles, flame propagation speed and flame structure are altered with radiation effect.

기호설명

c : 비열	k_j : j -반응단계의 반응률상수
C_D : 입자의 항력계수	Nu : Nusselt 수
d_p : 입자의 지름	n_p : 입자의 수밀도
D_{im} : i -화학종의 확산계수	Pr : Prandtl 수
e_r : 전체 내부에너지	q : 열유속
E_j : j -반응단계의 활성화 에너지	Re : Reynolds 수
h_i : i -화학종의 비엔탈피	\vec{s}, \vec{s}' : 복사의 방향벡터
h : 대류 열전달계수	V_i : i -화학종의 확산속도
l : 복사강도	W_i : i -화학종의 분자량
	y_i : i -화학종의 질량분율

그리스문자

β : 소멸계수
ϵ : 방사율

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학과

** 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

- η : 입자의 질량비
- κ : 흡수계수
- σ_s : 산란계수
- λ : 열전도도
- Φ : 산란위상합수
- ω_i : i -화학종의 순생성률

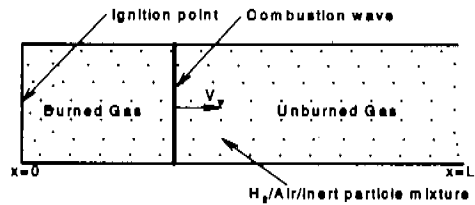


Fig. 1 Schematic for the flame propagation in H_2 /Air/Inert particles mixture.

삼첨자 및 하첨자

- b : 흑체
- g : 기체상
- p : 입자상
- m : 기체와 입자의 혼합물
- R : 복사열전달
- w : 벽면

1. 서론

수소/공기 예혼합기체가 외부 점화원에 의하여 점화가 일어나면 화염이 형성되어 전파되기 시작한다. 화염전파의 가장 중요한 요인은 화염대로부터 미연소 혼합물로의 열전달 및 확산현상이다. 수소/공기 예혼합기체에서의 화염전파 및 연소현상에 관한 연구는 원자력 발전소와 같은 건물 내부에서의 화재방지에 중요할 뿐만 아니라 수소연료는 미래의 대체 에너지로서 각광을 받고 있기 때문에 지금까지 많은 연구들이 수행되어 왔다. Katta 와 Roquemore⁽¹⁾는 비정상 축 대칭 모델링을 통하여 수소/공기 예혼합 분체 화염을 고찰하였고 Sohn 과 Chung⁽²⁾은 실린더형 연소실을 모델로 하여 수소/공기 예혼합기체의 정상화염전파 및 이상 연소현상을 수치적으로 계산하였다. 또한, Dowdy 등⁽³⁾은 구형용기에서 화염속도를 schlieren 방법으로 측정하고 이것을 수치적 모델링을 통하여 계산하였고, Wu 와 Law⁽⁴⁾는 노즐에 대하여 schlieren 방법으로 화염속도를 측정하였다. 그러나 실제로 연료와 공기의 혼합물 중에는 여러 가지 입자들이 부유하고 있는 경우가 많으며 입자들이 수소/공기 예혼합기체와 섞여 있을 때, 기체와 입자들간의 온도와 속도차이로 인하여 화염전파현상에 많은 영향을 미친다. 그리고 화염이 지나간 고온영역(약 2000K 정도)에서는 수증기(H_2O) 등 여러 가지 생성물에 의해서 많은 복사열을 방사하게 되며 이것은 경계면에서 복사열손실로 열을 방출할 뿐만 아니라, 기체와 입자에 의하여 흡수와 산란이 일어나므로 기체복사와 입자복사를 동시에 고려해야 한다. 그러므로 지금까지의 연구에서처럼 복사열전달을 무시하는 것은 적절하지 못하며 복사효과를 고려한 수소/공기/불활성입자의 2 상 혼합물에서의 화염전파현상에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 1 차원 2 상 매질에서 수치적 모델링을

통하여 불활성입자가 예혼합기체의 화염전파 특성에 어떤 영향을 주는지 계산하였고, 기체와 입자의 복사열전달효과가 화염전파속도와 연소속도 그리고 온도, 압력, 질량분율 등 화염구조 등에 미치는 효과를 계산하여 그 결과를 복사열전달 효과물 무시한 경우와 비교하고 분석하였다.

2. 이론해석

2.1 보존방정식과 경계조건

수소/공기/불활성입자 혼합물에서의 화염전파특성을 계산하기 위한 기하학적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 초기에 혼합물은 동온이고 정지된 상태로 공간적으로 균질하게 분포되어 있을 때, 왼쪽 경계면에서 예혼합기체를 점화 시키면 화염이 형성되어 관의 내부를 따라서 오른쪽 출구 쪽으로 전파하여 나간다.

보존방정식을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정들을 사용하였다.

- (1) 계는 일차원 비정상 상태이다.
- (2) 기체상은 이상기체이다.
- (3) 유동장은 층류이다.
- (4) Dufour효과와 Soret효과는 무시한다.
- (5) 입자들은 일정한 크기의 구형이고 내부 온도분포는 균일하다.
- (6) 입자들의 체적분율이 작아서 기체의 농도와 밀도는 같다.
- (7) 외력의 영향은 없다.
- (8) 기체와 입자의 복사물성치는 회체이다.

위의 가정들을 바탕으로 기체의 보존방정식과 화학종 보존방정식 그리고 입자의 보존방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(5,6)

기체의 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g) = 0 \tag{1a}$$

기체의 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g u_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g^2) = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + n_p \cdot F \tag{1b}$$

기체의 에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g e_t) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g e_t u_g) = -\frac{d}{dx}(p \cdot u_g) - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx} \cdot u_g) - n_p \cdot (Q - F \cdot u_p) - \nabla \cdot \vec{q}_s^R \quad (1c)$$

화학종 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g y_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g y_i u_g) = \dot{\omega}_i - \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g y_i V_i) \quad (1d)$$

$i=1, 2, \dots, N$

불활성입자의 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sigma_p) + \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_p u_p) = 0 \quad (2a)$$

불활성입자의 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sigma_p u_p) + \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_p u_p^2) = -n_p \cdot F \quad (2b)$$

불활성입자의 에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma_p \left[c_p T_p + \frac{u_p^2}{2} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_p u_p \left[c_p T_p + \frac{u_p^2}{2} \right] \right) = n_p (Q - F \cdot u_p) - \nabla \cdot \vec{q}_p^R \quad (2c)$$

이상기체의 상태방정식

$$p = \rho_g R_u T_g \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{W_i} \quad (3)$$

위의 방정식들에 나타난 각각의 변수들을 다음의 식들과 Table 1에 나타내었다.

열전달 항

$$q = -\lambda \frac{\partial T_g}{\partial x} + \rho_g \sum_{i=1}^{N-1} h_i y_i V_i \quad (4)$$

확산속도

$$y_i V_i = -D_{im} \frac{\partial y_i}{\partial x} \quad (5)$$

입자의 항력(F)

$$F = \frac{1}{8} \rho_g C_D \cdot |u_p - u_g| \cdot (u_p - u_g) \cdot \pi \cdot d_p^2$$

where $C_D = 24(1 + \text{Re}^{2/3}/6)/\text{Re}$, $\text{Re} < 1000$ (6)

$$\text{Re} = \frac{\rho_g |u_g - u_p| d_p}{\mu}$$

대류열전달량(Q)

$$Q = h \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot (T_g - T_p)$$

where $h = \frac{Nu \cdot \lambda_x}{d_p}$ (7)

$$Nu = 2 + 0.459 \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}^{0.55}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu_g \cdot c_p}{\lambda_x}$$

복사열전달 효과를 고려할 경우 식 (1c)와 식 (2c)에 나타나 있는 기체의 복사열유속발산항, $\nabla \cdot \vec{q}_s^R$

Table 1 Thermodynamic properties of gas-particle mixture.

PROPERTY	DEFINITION
Gas concentration	$\sigma_g = \frac{m_g}{V_m}$
Particle concentration	$\sigma_p = \frac{m_p}{V_m}$
Loading ratio of the particle	$\eta = \frac{m_p}{m_g} = \frac{\sigma_p}{\sigma_g}$
Number density of the particle	$n_p = \frac{\sigma_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3 / 6}$

과 입자의 복사열유속발산항, $\nabla \cdot \vec{q}_p^R$ 을 에너지 방정식에 포함시켜야 하며, 복사열전달은 2.3 절에서 자세히 설명한다.

본 연구에서 불활성입자는 산화알루미늄(Al_2O_3)을 사용하였고 온도에 의해 물성치의 변화가 크지 않으므로 다음과 같은 일정한 값을 사용하였다.

$$\text{밀도}(\rho_p) = 3970 \text{kg/m}^3$$

$$\text{비열}(c_p) = 765 \text{J/kg} \cdot \text{K}$$

위의 보존방정식을 이용하여 문제를 해석하기 위하여 경계조건이 필요하다. 벽면은 단열이라고 가정하면 $x=0$ 에서의 고온 벽 및 $x=L$ 에 있는 출구에서 다음과 같은 경계조건을 얻을 수 있다.

at $x=0$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad \frac{\partial e_t}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial y_i}{\partial x} = 0 \quad (8a)$$

at $x=L$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial e_t}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial y_i}{\partial x} = 0 \quad (8b)$$

2.2 화학반응모델

화학종 보존방정식에 포함되어 있는 i -화학종의 순생성률, $\dot{\omega}_i$ 는 화학반응모델을 이용하여 구할 수 있다. N_R 개의 기본 반응단계로 이루어진 다단 반응모델 외 화학 반응기구는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\sum_{i=1}^N v'_{ji} M_i \xrightarrow{k_{f,j}} \sum_{i=1}^N v''_{ji} M_i, \quad j=1, 2, \dots, N_R \quad (9)$$

$$k_{f,j} = \alpha_j T^{\beta_j} e^{-E_j/R_g T} \quad (10)$$

$$K_j = \frac{k_{f,j}}{k_{b,j}} \quad (11)$$

여기서 $k_{f,j}$, $k_{b,j}$ 는 각각 j -반응단계의 정반응물 상수와 역반응물 상수이고, K_j 는 평형상수이다. 그리고 i -화학종의 순생성률, $\dot{\omega}_i$ 는 다음 식으로 표현

Table 2 Reaction mechanism used for the simulation of H₂/ Air Combustion. ($k_j = \alpha_j T^{\beta_j} e^{-E_j/R_u T}$)

<i>j</i>	Reactions	α_j (mole, cm ³ , s)	β_j	E_j (cal/mole)
1	H ₂ +O ₂ =2OH	1.70e13	0	47780
2	H ₂ +OH=H ₂ O+H	5.20e13	0	6500
3	H+O ₂ =OH+O	1.22e17	-0.907	16620
4	O+H ₂ =OH+H	1.80e10	1	8826
5	H+O ₂ +M=HO ₂ +M	2.00e15	0	-870
	H ₂ O /20/			
6	OH+HO ₂ =H ₂ O+O ₂	1.20e13	0	0
7	H+HO ₂ =2OH	6.00e13	0	0
8	O+HO ₂ =O ₂ +OH	1.00e13	0	0
9	2OH=O+H ₂ O	1.70e06	2.030	-1190
10	H ₂ +M=2H+M	2.23e12	0.5	92600
	H ₂ O /5/			
11	O ₂ +M=2O+M	1.85e11	0.5	95560
12	H+OH+M=H ₂ O+M	7.50e23	-2.6	0
	H ₂ O /20/			
13	H+HO ₂ =H ₂ +O ₂	1.30e13	0	0
14	O+N ₂ =NO+N	1.40e14	0	75800
15	N+O ₂ =NO+O	6.40e09	1	6280
16	OH+N=NO+H	4.00e13	0	0

된다.

$$\dot{\omega} = W_i \sum_{j=1}^{N_i} (v_{ji}^* - v_{ji}') (k_{f,j} \prod_{l=1}^N [M_l]^{v_{lj}^*} - k_{b,j} \prod_{l=1}^N [M_l]^{v_{lj}'}) \quad (12)$$

본 연구에서는 10 개의 화학종에 대한 16 단계 다단 반응모델을 사용하였고 화학반응 메커니즘과 반응물 상수를 계산하기 위한 계수들은 Table 2에 나타내었다. 그리고 CHEMKIN 부프로그램을 이용하여 수소/공기 예혼합기체의 비열, 열전도계수, 확산계수 등 여러 가지 물성치들과 화학반응 항을 구하였다.

2.3 복사열전달 계산

기체의 에너지방정식 (1c)와 입자의 에너지방정식 (2c)에 포함되어있는 복사열전달 항을 계산하기 위하여 복사전달방정식을 계산해야 한다. 기체장과 입자장의 복사물성치가 회체라고 가정하였을 경우, 흡수, 방사 및 산란하는 기체-입자 2 상 매질에 대한 복사전달방정식은 다음과 같이 표현된다.^(8,9)

$$\frac{dI}{ds} = -\beta I + S \quad (13)$$

where

$$\beta = k_g + k_p + \sigma,$$

$$S = k_g I_{bg} + k_p I_{bp} + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} I(\bar{s}') \Phi(\bar{s}, \bar{s}') d\Omega'$$

위 식에서 기체분자의 산란은 무시하였고 매질의

온도와 복사강도에 대한 경계조건이 주어지면 매

질의 복사강도를 구할 수 있다. 확산적으로 반사 및 방사를 하는 불투명 벽면(opaque wall)을 떠나는 복사강도는 다음의 식처럼 벽면에서 방사 및 반사된 복사강도의 합으로 표현된다.

$$I(\bar{r}_w, \bar{s}) = \epsilon_w I_b(\bar{r}_w) + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{\bar{s}' \cdot \bar{n}_w < 0} I(\bar{r}_w, \bar{s}') |\bar{s}' \cdot \bar{n}_w| d\Omega' \quad (14)$$

기체의 에너지방정식 (1c)과 입자의 에너지방정식 (2c)에서 나타난 복사열유속발산항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \bar{q}^R = \int_{4\pi} (\bar{s} \cdot \nabla I) d\Omega = \int_{4\pi} \frac{dI}{ds} d\Omega \quad (15)$$

식 (13)을 식 (15)에 대입하여 적분을 수행하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \bar{q}^R = \kappa_g (4\pi I_{bg} - \int_{4\pi} I d\Omega) + \kappa_p (4\pi I_{bp} - \int_{4\pi} I d\Omega) = \nabla \cdot \bar{q}_g^R + \nabla \cdot \bar{q}_p^R \quad (16)$$

여기서 $\nabla \cdot \bar{q}_g^R$ 와 $\nabla \cdot \bar{q}_p^R$ 는 각각 기체와 입자의 복사열유속발산항을 나타낸다. 또한, 기체-입자 2 상 매질에서의 복사열전달항을 계산하기 위하여 기체의 복사물성치와 입자의 복사물성치가 필요하다. 기체의 흡수계수는 식 (17a)와 같이 수증기의 흡수계수에 수증기의 분압을 곱하여 계산하였고^(9,10), 입자들은 크기가 일정하고 난반사하는 구일 때의

복사열성치⁽⁹⁾를 나타내는 식 (17b)를 사용하였다. 입자의 수밀도는 입자의 질량비에 비례하므로 식 (17b)로부터 입자의 질량비가 증가할수록 입자의 흡수계수와 산란계수가 커진다.

$$\kappa_g = \kappa_{H_2O} \cdot P_{H_2O} \quad (17a)$$

$$\sigma_s = \pi d_p^2 n_p (1 - \epsilon_p) / 4 \quad (17b)$$

$$\kappa_p = \pi d_p^2 n_p \epsilon_p / 4$$

3. 수치해법

우선 화염면에서의 급격한 상태량의 변화와 화학반응을 계산하기 위하여 보존방정식을 경계조건과 함께 2nd order Upwind TVD(Total Variation Diminishing) scheme^(11,12)을 이용하여 푼다.

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - \frac{dt}{dx} (\tilde{F}_{i+1/2}^n - \tilde{F}_{i-1/2}^n) + dt \cdot S_i^n \quad (18a)$$

여기에서 Q_i^n 는 시간 n 과 격자점 i 에서 종속 변수들의 벡터이고 $\tilde{F}_{i+1/2}^n$ 수치적 유량(numerical flux)을 나타내는 벡터로 다음과 같다.

$$\tilde{F}_{i+1/2} = \frac{1}{2} (F_i + F_{i+1} + R_{i+1/2} \Phi_{i+1/2}) \quad (18b)$$

TVD scheme을 이용할 때 고유벡터행렬, R 과 특성속도는 격자점들 사이, $i+1/2$ 에서 구해야 한다. 보통 마하수가 낮은 이상기체의 유동에서는 대수 평균이나 Roe 평균을 적용하여 구하여도 별차이가 없으나 극초음속이나 불연속성이 심한 유동에서는 수치적 안정성면에서 후자의 방법이 더 우수하다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 화염면에서의 불연속성 때문에 Roe 평균^(13,14)을 사용하였다. 또한 화학반응이 있는 유동장에서 열역학적 물성치와 전달물성치 및 화학반응항 등은 CHEMKIN 부프로그램을 이용하여 계산하였다. 보존방정식을 TVD scheme으로 계산해서 얻어진 온도장을 바탕으로 유한체적법(FVM)^(6,8)을 이용하여 복사 전달방정식을 풀어서 기체와 입자의 복사열유속발산항을 구한다. 그리고 기체와 입자의 복사열유속발산항을 각각 기체와 입자의 에너지방정식에 대입하여 온도장을 계산한다.

복사전달방정식의 유한차분형을 구하기 위하여 식 (13)을 검사체적, Δx 와 검사각도, $\Delta \Omega^m$ 에 대하여 적분을 한다.⁽⁶⁾

$$\int_{\Delta \Omega^m} \int_{\Delta x} \left(\frac{dI}{ds} \right) dx d\Omega = \int_{\Delta \Omega^m} \int_{\Delta x} (-\beta I + S) dx d\Omega \quad (19)$$

그리고 격자점의 복사강도로부터 검사면에 있는 복사강도를 표현하기 위하여 계단차분법(step scheme)을 사용하면 다음과 같은 복사전달방정식의 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$a_p^m I_p^m = a_E^m I_E^m + a_W^m I_W^m + b_p^m \quad (20)$$

여기서

Table 3 Conditions for the computation of flame propagation in H₂/Air/Inert particles mixture.

Conditions	Quantity
Tube length	5cm
Mole fraction of H ₂	0.41
Initial gas and particle temperature	296 K
Initial pressure	1 atm
Initial gas and particle velocity	0 m/s
Diameter of the particle	100 μm
Loading ratio of the particle	0, 0.5, 1
Emissivity of particles	0.95
Emissivity of the boundaries	1

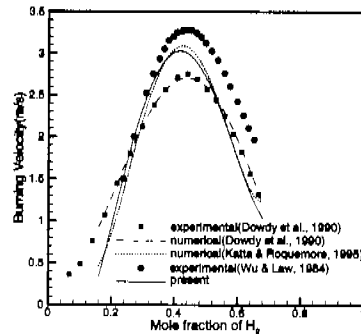


Fig. 2 Verification of the present program : Comparison of the burning velocity with other results.

$$a_p^m = a_E^m + a_W^m + \beta \Delta x \Delta \Omega^m$$

$$a_E^m = \max[-D_{cx}^m, 0]$$

$$a_W^m = \max[D_{cx}^m, 0]$$

$$b_p^m = (k_g I_{bg} + k_p I_{bp} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I^m \Phi^{m \rightarrow m} d\Omega^m) \Delta x \Delta \Omega^m$$

$$D_{cx}^m = \int_{\Delta \Omega^m} \cos \theta d\Omega$$

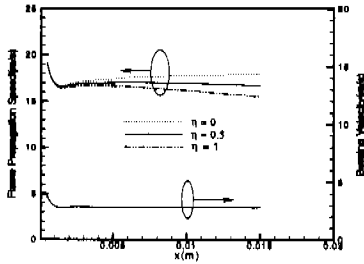
전체적인 계산조건에 대해서는 Table 3에 나타내었다.

4. 계산결과 및 고찰

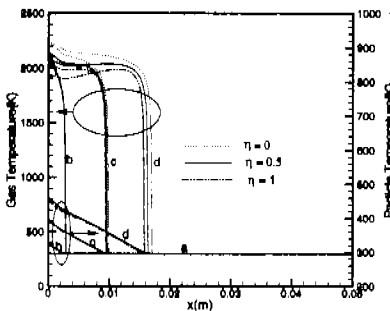
4.1 프로그램의 검증

연소속도는 예혼합 화염의 모델을 검증하기 위해서 자주 사용되기 때문에 본 연구에서도 수소의 물분율(mole fraction)에 대한 연소속도를 다른 논문들의 결과와 비교하였다. Fig. 2에서 연구결과마다 연소속도가 약간씩 차이가 있는 것을 볼 수 있는

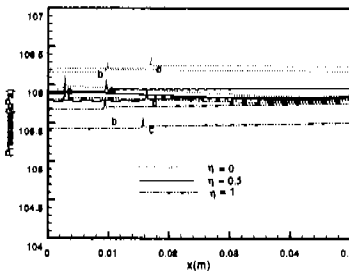
데 이것은 각각 다른 연소모델을 사용했기 때문이다. 본 연구와 같은 16단계 화학반응모델을 사용



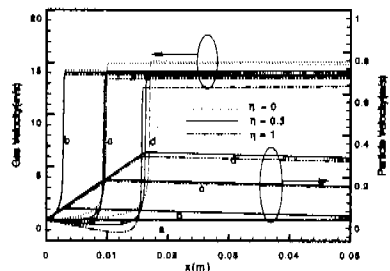
(a) Flame propagation speed and burning velocity



(b) Gas and particle temperature (time : a=0s, b=0.2ms, c=0.6ms, d=1ms)



(c) Pressure (time : a=0.2ms, b=0.6ms, c=1ms)



(d) Gas and particle velocity (time : a=0s, b=0.2ms, c=0.6ms, d=1ms)

Fig. 3 Effect of inert particle on the flame propagation according to the loading ratio.

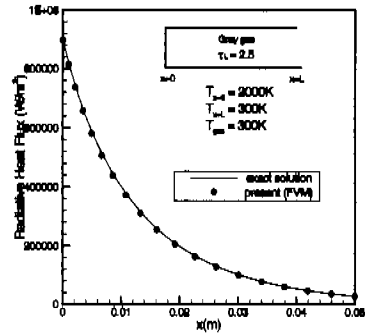


Fig. 4 Verification of FVM program : subroutine solving RTE.

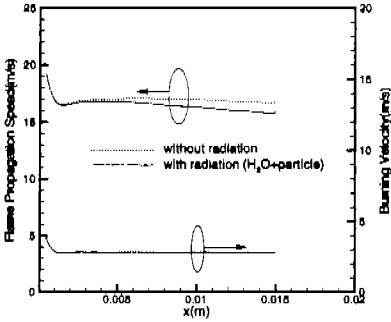
한 Katta 와 Roquemore⁽¹⁾가 계산한 값이 본 연구결과와 매우 비슷하므로 본 프로그램을 검증할 수 있다.

Fig. 2 에서 연소속도는 연료와 공기의 혼합비가 이튼혼합비(mole fraction of H₂ = 0.296)에서 최대가 되지않고 약간의 연료과잉(fuel-rich)부분에서 최대가 된다. 이것은 연료가 고온의 화염면을 지나면서 열해리(dissociation)가 일어나므로 생성물의 평균비열은 혼합비가 약간 연료과잉(fuel-rich)일때 최소값이 되기 때문이다.

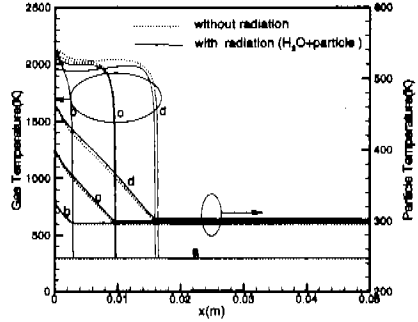
4.2 불활성입자가 화염전파에 미치는 영향

Fig. 3(a) ~ Fig. 3(d)는 수소의 물분율이 0.41이고 입자의 질량비(loading ratio)가 0, 0.5, 1로 증가할 때 화염전파특성을 계산한 결과이다. 여기서 화염이 앞으로 전파되어 나갈 때 온도구배가 가장 높은 지점을 화염면의 위치로 정하였다.

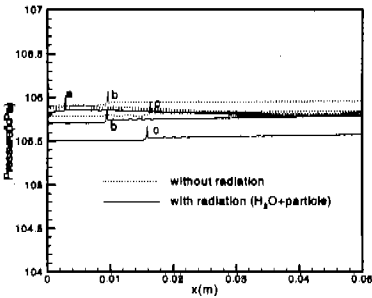
Fig. 3(b)에서 입자가 없을 때(η=0)에는 화염면 뒷부분의 고온의 기체는 계속해서 반응열을 받고 열손실이 없기 때문에 온도가 증가하지만 입자의 질량비가 증가하면 화염면 뒷부분에서 고온의 기체는 온도가 낮은 입자로 열을 빼앗기기 때문에 기체의 온도는 점점 감소하며 입자는 고온의 기체로부터 열을 전달받아서 화염면 뒤로 떨어질수록 온도가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 3(c)에서 화염이 정상연소파(deflagration)로 진행되면 점화가 일어나자마자 압력파가 화염면과 분리되어 순간적으로 전파하므로 공간내의 압력은 균등해지고 이후에도 압력의 공간적인 변화는 작고 화염면 뒷부분의 압력이 앞부분의 압력보다 약간 작아진다. 입자가 없을 때에는 시간에 따라 화염면 뒤의 기체의 온도가 상승하므로 압력이 증가하지만 입자의 질량비가 증가할수록 화염면 뒤의 기체의 온도는 감소하므로 압력도 시간에 따라 감소하는 것을 Fig. 3(c)에서 볼 수 있다. 또한, Fig. 3(d)에서 입자의 질량비가 증가할수록 화염면 뒤에서는 기체와 입자의 속도차에 의한 운동량전달과 온도차에 의한 열전달로 인하여 기체가 수축되기 때문에 기체의 속도는 감소하고 입자는 기체로부터 운동량과 열을 전



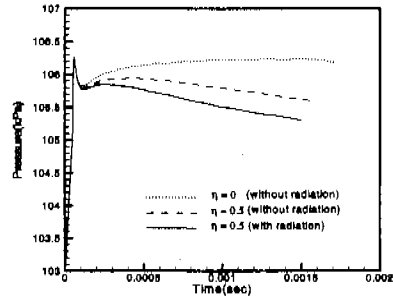
(a) Flame propagation speed and burning velocity



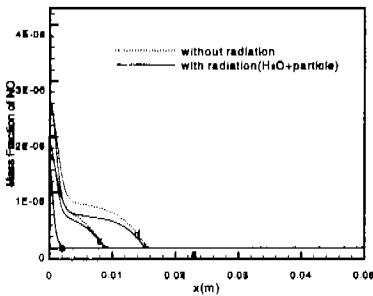
(b) Gas and particle temperature (time : a=0s, b=0.2ms, c=0.6ms, d=1ms)



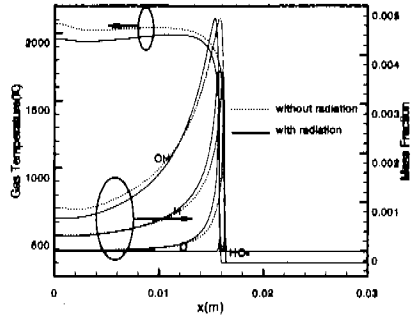
(c) Pressure vs. x (time : a=0.2ms, b=0.6ms, c=1m)



(d) Pressure vs. time at x=0



(e) Mass fraction of NO (time : a=0s, b=0.2ms, c=0.6ms, d=1ms)



(f) Mass fraction of H, O, OH, HO₂ at time=1ms

Fig. 5 Effect of radiative heat transfer on the flame propagation.

달 받아서 서서히 가속한다. 그리고 화염면 앞부분에서는 입자들의 항력으로 인하여 입자들이 많을수록 기체의 속도가 감소한다. Fig. 3(a)는 입자의 질량비에 따른 화염전파속도와 연소속도를 나타낸다. 화염전파속도는 화염면이 진행되어 나가는 속도이고, 연소속도는 미연가스가 화염면에 수직방향으로 들어오는 속도를 나타낸다. 입자의 질량비가 커지면 화염면 뒤에서의 온도와 압력이 작아지기 때문에 화염전파속도는 감소하지만 화염면은 미연가스를 밀면서 전파하므로 미연가스의 속도도 작아진다. 그러므로 미연가스에 대한 화염면의 상대속도를 나타내는 연소속도는 거의 변하지 않는다.

4.3 복사열전달효과가 화염전파에 미치는 영향
 Fig. 4는 왼쪽벽면의 온도가 2000K이고 판의 내부에 온도가 300K인 기체가 차있을 때 유한체적법(FVM)을 이용하여 각 지점에서의 복사열유속을 계산하고 이것을 엄밀해와 비교한 결과이다. 유한체적법을 이용한 결과가 엄밀해와 잘 일치하므로 유한체적법을 이용하여 복사열전달량을 계산하는 프로그램을 검증할 수 있다.

Figure 5(a) - Figure 5(f)는 수소의 물분율이 0.41이고 입자의 질량비가 0.5 일 때, 복사열전달효과를 무시한 경우와 수증기(H₂O)와 입자의 복사열전달효과를 동시에 고려한 경우의 화염전파특성을 계산하고 두 가지 경우를 비교한 그림이다.

수소/공기 예혼합기체는 연소반응에 의해서 수증기를 생성한다. 화염면 뒤에서 생성되는 수증기는 다른 기체들에 비해서 흡수계수가 매우 크며 화염면 뒤에서는 반응열에 의하여 온도가 매우 높기 때문에 많은 복사열을 방사한다. 여기서 방사된 복사열의 일부는 경계면에서 복사열손실로 방출하게 되고, 일부는 기체와 입자에 의하여 재흡수된다. 그러므로 복사효과를 고려한 경우 화염면 뒷부분의 고온의 기체는 복사열손실로 온도가 감소하고 입자는 복사열을 흡수하여 온도가 증가하는 것을 Fig. 5(b)에서 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 5(c)에서 복사효과를 고려할 경우 화염면 뒤의 고온의 기체는 복사열손실로 인하여 온도가 더욱 작아지므로 압력도 복사효과가 없을 경우보다 떨어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(d)에서는 각각의 경우에 대하여 $x=0$ 에서 시간에 대한 압력의 변화를 나타내었다. 마찬가지로 입자가 없는 경우보다 있는 경우에 입자로의 열전달로 온도가 감소하고, 복사효과가 있는 경우에 복사열손실 때문에 온도가 더욱 작아지므로 압력도 점점 감소함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(a)에서는 복사효과를 고려한 경우 온도와 압력의 감소로 인하여 화염전파속도가 작아지고, Fig. 3(a)에서 설명한 것처럼 미연가스의 속도도 감소하므로 연소속도가 거의 일정한 것을 관찰할 수 있다. 수소연료의 연소에 의해서 배출되는 환경오염 물질인 일산화질소(NO)의 분포를 Fig. 5(e)에 나타내었다. 왼쪽 경계면 부근에서 NO의 질량분율이 가장 크게 나타나고 복사효과를 고려하면 온도가 작아지므로 NO의 생성량도 작아진다. 또한, Fig. 5(f)에서 중간 생성물인 H, O, OH, HO₂의 질량분율을 나타내었다. 중간 생성물은 화염면에서 화학반응에 의해 생성되므로 그들의 질량분율은 화염 부근에서 가장 크게 나타난다.

5. 결론

불활성입자가 부유하고 있는 수소/공기 예혼합기체에서의 화염전파특성을 수치적으로 모델링하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 입자의 질량비가 증가할수록 화염면 뒷부분에서는 고온의 연소가스에서 저온의 입자로 열전달이 일어나기 때문에 기체의 온도는 감소하고 입자들은 열전달을 받아서 서서히 온도가 증가한다. 또한, 화염면 앞부분에서는 입자의 항력으로 인하여 미연가스의 속도가 감소하며 화염면 뒷부분에서는 기체와 입자의 운동량전달과 열전달로 인하여 기체의 속도는 감소하고 입자는 서서히 가속한다. 그러므로 입자의 질량비가 클수록 화염전파속도는 작아지지만 연소속도는 거의 변화가 없다.

(2) 화염면 뒤에서 생성되는 고온의 수증기는 많은 복사열을 방사하게 되고 이것은 경계면에서

복사열손실로 방출되거나 기체와 입자에 의해서 재흡수된다. 그러므로 복사효과를 고려한 경우 화염면 뒷부분의 온도는 감소하고 입자의 온도는 증가하므로 복사효과를 무시한 경우에 비하여 온도, 압력 그리고 화염전파속도는 작아지며, 환경오염 물질인 NO의 생성량도 줄어든다.

참고문헌

- (1) Katta, V. R. and Roquemore, W. M., 1995, "Numerical Studies on the Structure of Two-Dimensional H₂/Air Premixed Jet Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 21-40.
- (2) 손채훈, 정석호, 1995, "수소 예혼합기의 정상 및 이상연소에 관한 수치해석," 대한기계학회 논문집, 제 19 권, 제 8 호, pp. 1989-1998.
- (3) Dowdy, D. R., Smith, D. B. and Taylor, S. C., 1990, "The Use of Expanding Spherical Flames to Determining Burning Velocity and Stretched Effects in Hydrogen/Air Mixtures," *23rd Symposium (International) on Combustion*, pp. 325-332.
- (4) Wu, C. K. and Law, C. K., 1984, "on the Determination of Laminar Flame Speeds from Stretched Flames," *20th Symposium (International) on Combustion*, pp. 1941-1949.
- (5) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons, New York, pp. 163-205.
- (6) 박재현, 배승욱, 권세진, 1998, "복사효과를 고려한 기체-입자 직접접촉식 열교환기 해석," 대한기계학회논문집, 제 22 권, 제 4 호, pp. 542-550.
- (7) Kee, R. J., Miller, J. A. and Jefferson, T. H., 1989, "CHEMKIN: A General-Purpose, Problem independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package", *Sandia National Laboratories Report*.
- (8) Chai, J. C., Lee, H. S. and Patankar, S. V., 1994, "Finite Volume Method for Radiation Heat Transfer," *AIAA Journal Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 8, no. 3, pp. 419-425.
- (9) Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 295-431.
- (10) Tien, C. L., 1968, "Thermal Radiation Properties of Gases," in *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, Academic Press, New York, pp. 223-324.
- (11) Yee, H. C., 1989, "A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods," *NASA Ames Research Center, California*, pp. 12-82.
- (12) Hirsch, C., 1988, *Numerical Computation of Internal and External Flows*, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, pp. 517-570.
- (13) Shuen, J. S., Liou, M. S. and Leer, B. V., 1990, "Inviscid Flux-Splitting Algorithms for Real Gases with Non-Equilibrium Chemistry," *Journal of Computational Physics*, Vol. 90, pp. 371-395.
- (14) Roe, P. L., 1986, "Characteristic-based schemes for the Euler Equations," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 18, pp. 337-365.