

<論 文>

복사열전달을 동반하는 다공성 매질내의 예혼합 화염

김 정 수* · 백 승 욱**

(1988년 12월 12일 접수)

The Premixed Flame in a Radiatively Active Porous Medium

Jeong Soo Kim and Seung Wook Baek

Key Words : Porous Medium(다공성 매질), Energy Feedback(에너지 귀환), Absorption, Emission and Scattering(흡수, 방사 및 산란), Optical Thickness(광학 두께), Gray Medium(회매질)

Abstract

The present study considers the thermal structure variation in a porous medium caused by changing the most important radiative property of porous medium, absorption coefficient, as well as altering the physical dimension of porous medium and the equivalence ratio of premixed gas mixture. The radiation model was introduced as an unsteady differential form using the two-flux gray radiation model. The role of the conductive heat transfer through both gas phase and porous medium was found to be almost insignificant compared with that of the radiative heat transfer. The reaction zone shifted upstream and the flame thickness decreased as either the geometrical length of porous medium increased or the absorption coefficient decreased.

기 호 실 명

| | |
|---|--|
| A : 반응율에서의 예지수인자 | m : 질량연소율(= ρu) |
| A_p : 등가고체입자의 표면적 | M : 기체혼합물의 평균분자량 |
| c : 연소혼합기체의 비열(1.179*10 ³ J/kg°C) | n_p : 등가입자군의 수밀도 |
| c_p : 다공매질의 비열(0.816*10 ³ J/kg°C) | P : 압력 |
| C_s : 광속 | q^+, q^- : 유동방향과 그 역방향을 향하는 복사열유속 |
| D : 혼합기체의 확산계수(0.159*10 ⁴ m ² /s) | $q_{cs}, q_{c\alpha}$: 입자 및 기체의 전도열유속 |
| E : 활성화에너지(1.3*10 ⁵ J/mole) | q_r : 정미복사열유속(= $q^+ - q^-$) |
| H : 생성물 단위질량당의 반응열 | RR : 반응율 |
| h_p : 등가입자표면에서의 대류열전달계수 | \bar{R} : 만유기체상수(8.314 J/mole K) |
| i^+, i^- : 유동방향과 그 역방향을 향하는 복사강도 | s : 산란계수 |
| i_b : 흑체복사강도 | T_0 : 미연혼합기체의 온도 |
| L : 다공매체의 길이 | T_g : 혼합기체의 온도 |
| | T_p : 다공매질의 온도 |
| | t : 시간 |
| | u : 기체속도 |
| | W : 질량생성율 |

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

- x : 공간좌표
- y : 생성물의 질량분율
- α : 흡수계수
- λ : 기체의 열전도율 (0.0782 W/m°C)
- λ_p : 다공매질의 열전도율 (0.18 W/m°C)
- ρ : 기체밀도 (1.177 kg/m³ at 300 K)
- ρ_p : 다공매질의 밀도 (200 kg/m³)
- σ : Stefan-Boltzmann 상수 (5.56*10⁻⁸ W/m² K⁴)
- ϕ : 당량비

1. 서 론

예혼합 연소기체의 잔류에너지를 회수하는, 에너지 유효이용이라는 의도에서 시작된 다공성매질이 게재하는 연소현상에 관한 연구는 유동기체의 감지엔탈피(sensible enthalpy)를 반응대 쪽으로 향하는 열복사로, 그 에너지모우드를 효과적으로 변환시킬 수 있다는 일련의 이론에 근거한다. 즉, 다공매체를 장착하여, 이를 통해 대류와 열전도현상이 지배하는 연소혼합물(combustible mixture)인 기체가 유동할 때 복사열교환과정은 반응대(reaction zone)를 거스르는 강력한 에너지 귀환현상을 유발하고, 이로 말미암아 연료의 연소가능성의 증대를 가져와 연료희박화염(fuel lean flame)을 안정화시킨다는 사실이다.

이에 대한 구체적인 연구로서 Echigo⁽¹⁾는 적당한 광학두께의 내부열생성이 없는 다공매질은 유동기체의 감지엔탈피를 열복사로 변환시키는 데 효과적임을 보였으며, Wang과 Tien⁽²⁾ 등은 고체매트릭스(solid matrix)에 의한 산란의 영향 등을 고려함으로써 상기한 에너지변환의 효율성을 확장 해석했다. 또, 일정 내부열생성이 있는 다공체의 열적 구조도 Echigo⁽³⁾ 등에 의해 실험에 의해서 뿐만 아니라 이론적으로 연구되어 매질에서 고온의 균일공간과 고복사에너지밀도가 생성됨이 규명되었다. 다공체가 장착되지 않은 복사제어화염의 구조는 Krazinski⁽⁴⁾ 및 미립자와 기체혼합기에 있어서의 층류화염전파에 관한 복사의 영향을 기술한 Yuen과 Zhu⁽⁵⁾ 등에 의해 연구 되었다.

이상의 연구들로부터 복사열전달은 반응대를 거스르는 에너지 귀환에 의해 초과 엔탈피 연소(excess enthalpy burning)를 유발하며, 더우기 기체-고체 2상계(two phase system)에 있어서 연소

속도를 증가시키는 데 기여하는 에너지전달 메커니즘이 관찰, 조사되었다. 최근에 Yoshizawa⁽⁶⁾ 등은 다공매질 내에서 형성되는 메탄과 공기의 예혼합 화염을 해석했다. 그러나 그들의 연구에서 기체의 밀도는 변하지 않는다고 가정 되었으며, 당량비가 1이 아닌 혼합기체에 있어서 적용하기가 부적당한, 적분형태의 질량반응을 관계식이 사용되었다. 더우기, 초기조건 및 경계조건과 함께 지배방정식의 해를 구하기 위해, 필연적인 과정이 아님에도 불구하고, 그들은 화염대 위치와 두께를 초기에 가정 하였다. 그러나, 화염대의 위치와 두께의 형상은 초기에 가정하기보다는 계산과정에 의해 당연히 최종 결과치로 출력되어야 한다⁽⁷⁾. 이상과 같은 사실을 고려하건대, 비록 모델로 선택한 기체가 다르더라도 Yoshizawa⁽⁶⁾ 등의 결과는 Echigo⁽³⁾ 등의 그것에 비해 화염대 위치가 유동유체의 유입점에서 과도하게 후류쪽에 위치한다고 사료된다.

이상의 고찰에 근거하여 본 연구는 복사강도를 반구에 대하여 적분하여 비정상 미분방정식의 형태로 얻어지는 2-유속 회매질복사모델을 사용하여 복사전달방정식을 구성하고, 전술한 Yoshizawa⁽⁶⁾ 등의 가정을 배제하면서, 다공매질의 물리적 길이, 흡수계수 및 혼합기체의 당량비(equivalence ratio) 등을 변화시킴으로써 매질 내의 열적 구조를 분석하여 그들의 연구를 확장, 해석한다.

2. 지배방정식 및 수치해법

메탄과 공기로 구성되는 혼합기체의 연소현상을 수반하고, 1차원 정상유동으로 가정되는 매질두께 L 의 물리적 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 또, 이 다공매질은 복사흡수계수가 α 인 균일하게 분포되어 있는 등가고체입자군(equivalent solid parti-

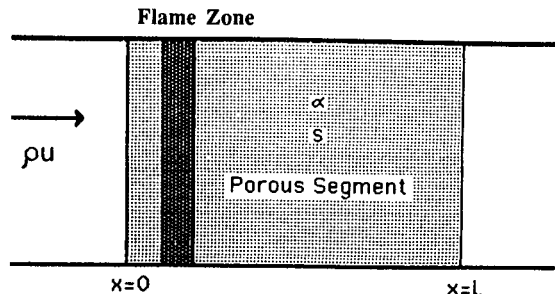


Fig. 1 Schematic of premixed flame in a porous medium

cles)으로 대체할 수 있다고 근사화한다. 복사에는 투명(transparent)하다고 가정되는 미연혼합기체(unburned mixture gas)는 온도 $T_0=300K$ 로, 역시 동일한 온도의 다공매질입구 $x=0$ 에서 유입된다. 이러한 유입조건은 혼합기체가 다공매질의 입구에 도착하기 전에 발생할 수 있는 다공매질에 의한 예열효과는 고려하지 않음을 뜻한다. 그러므로 이와 같은 물리모델은 혼합기체가 온도 T_0 의 매질입구로 분사되는 상태를 모사한다고 할 수 있다. 이제 매질의 존재로 유발되는 압력변화는 무시하여, 고려 중인 계산영역의 압력은 일정하다고 가정하고, 정상상태의 해를 구하기 위해 기술되는 지배방정식은 다음과 같이 전개된다.

혼합기체에 대한 연속방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

이다. 여기서 ρ 와 u 는 혼합기체의 밀도와 유동속도를 각각 나타내며, 또 생성물에 관한 화학종 보존방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial y}{\partial t} + \rho u \frac{\partial y}{\partial x} = \rho D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + W \quad (2)$$

y 는 생성물의 질량분율을 뜻하며 D 는 기체의 확산계수로서 일정한 값으로 가정한다. 생성물의 질량생성물 W 는 다음과 같은 1차 Arrhenius식으로부터 계산한다.

$$W = A\rho(1-y) \exp(-E/\bar{R}T_g) \quad (3)$$

A 와 E 는 각각 예지수인자와 활성화에너지이고 \bar{R} 는 만유기체상수(universal gas constant)이다.

기체혼합물과 등가입자군에 대한 에너지보존식은

$$\rho c \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T_g}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + H \cdot W - h_p n_p A_p (T_g - T_p) \quad (4)$$

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x} + h_p n_p A_p (T_g - T_p) \quad (5)$$

이다. 여기서 T_g 와 T_p 는 각각, 기체와 입자의 온도이고 λ , λ_p 는 열전도계수이며, c , c_p 는 각각의 비열이다. 또한, H 는 생성물 단위질량당의 반응열이며, h_p , A_p 그리고 n_p 는 각각 열전달계수, 등가입자의 표면적, 입자의 수밀도이다. 유동방향과 그 역방향의 복사열유속 q^+ 와 q^- 의 벡터 합

$$q_r = q^+ - q^- \quad (6)$$

으로 표시되는 q_r 는 정미복사열유속(net radiative heat flux)이며, 여기서 q^+ , q^- 의 복사전달식은 2-유속 회매질 복사모델을 사용하여 유도할 수 있

다. 2-유속 모델에 있어서 복사강도는 각각의 반구상에서 일정하므로 다음과 같이 기술되는 양쪽방향의 복사강도 (i^+ , i^-) 전달식

$$\frac{\partial i^+}{C_s \partial t} + \frac{\partial i^+}{2 \partial x} = -(\alpha + s) i^+ + s i^- + \alpha i_b \quad (7)$$

$$\frac{\partial i^-}{C_s \partial t} + \frac{\partial i^-}{2 \partial x} = -(\alpha + s) i^- + s i^+ + \alpha i_b \quad (8)$$

을 각 반구입체각(hemispherical solid angle)에 대하여 적분하면

$$\frac{\partial q^+}{C_s \partial t} + \frac{\partial q^+}{2 \partial x} = -(\alpha + s) q^+ + s q^- + \alpha \sigma T_p^4 \quad (9)$$

$$\frac{\partial q^-}{C_s \partial t} + \frac{\partial q^-}{2 \partial x} = -(\alpha + s) q^- + s q^+ + \alpha \sigma T_p^4 \quad (10)$$

와 같은 복사열유속에 관한 식이 구성된다. 여기서 C_s 는 광속이고 i_b 는 흑체복사강도이다.

유동기체의 밀도변화를 고려하기 위해 도입할 상태방정식은 다음과 같다.

$$P = \rho \bar{R} T_g / M \quad (11)$$

상기식에서 압력은 일정하므로 만일 기체 평균분자량 M 의 변화를 무시할 수 있다면 기체의 밀도는 혼합기체온도 T_g 에 역비례할 것이다.

식 (1)~(6)과 (9)~(11)의 계산에 사용될 경계조건은

$$x=0 \text{에서 } y=0, T_g = T_p = T_0, q^+ = 0$$

$$x=L \text{에서 } y=1, q^- = 0$$

이며, 여기서 $q^+(x=0)$ 와 $q^-(x=L)$ 은 다공매질의 양쪽 경계에서 외부 복사열원에 노출되어 있지 않을 때의 경계조건을 나타내며, 매질 양단에서의 복사열손실이라는 물리적 의미를 갖는 이 두 조건은 반복계산과정에서 구해야 할 값들이다.

이제 이상의 식들은 전에너지 보존관계식

$$H1 = H2 + H3 - H4 - H5$$

H1 : 전체 연소계의 열 발생물

H2 : 다공매질 양경계에서의 복사열손실

H3 : $x=L$ 에서 기체에 의해서 유출되는 감지 엔탈피

H4 : $x=0$ 에서 기체에 의해서 유입되는 감지 엔탈피

H5 : 기체와 다공매질간의 에너지 교환량

을 만족시킬 때까지 수치적으로 반복하여 계산한다. 지배방정식 및 보조방정식의 적분에는 비정상 1차원 편미분방정식의 해를 구할 수 있는 collocation software인 PDECOL⁽⁶⁾을 사용하여 time-marching기법에 의해 정상상태의 해를 구한다.

3. 결과 및 검토

계산은 먼저, 산란의 효과를 무시할 수 있다고 가정($s=0$)했을 때, 다공매질길이 $L=0.05m$, 흡수 계수 $\alpha=50m^{-1}$, 생성물 단위질량당 연소열 $H=2.77 \cdot 10^6 J/kg$ 그리고 질량연소율 $m=\rho u=0.05 kg/m^2s$ 인 조건하에서 당량비 $\phi=1$ 인 메탄과 공기의 혼합물에 대하여 수행되었으며 수치계산에 사용된 나머지 열화학적인 값들은 기호설명란(nomenclature)에 제시되어 있다. 수치계산을 시작하기 전에 에너지보존식 (4)~(5)를 무차원화할 때 나타나는 $h \rho n_p A_p L^2 / \lambda$ 의 값은 $5 \cdot 10^4$ 을 취했으며 이 인자는 혼합기체와 다공매질간의 대류열전달의 정도를 나타낸다.

혼합기체 (T_g)와 다공매질 (T_p)의 온도분포, 그리고 국소최대치로 나뉘어진 반응률(RR) 및 생성물의 질량분율(y)의 분포 등의 전형적인 열적 구조를, 비교를 쉽게 하기 위하여 Fig. 2에 함께 나타내었다. 연소가 일어남에 따라 기체와 매질의 온도는 1200K의 최대값까지 급히 증가한 후 다시 천천히 감소하기 시작한다. 혼합기체와 다공매질의 온도차이는 매우 작음을 알 수 있으며, 앞에서 언급한 바와 같이 다공매질로의 유입시 혼합기체의 예열효과를 고려하지 않았음에 주목해야 한다. 만일 그렇지 않다면 기체와 매질의 온도는 현저한 차이를 나타낼 수도 있을 것이다. 반응률분포에서 알 수 있듯이, 연소는 약 5mm 이내에서 완전히 끝나며 반응대는 매질의 입구에서 3mm 정도에 위치한다.

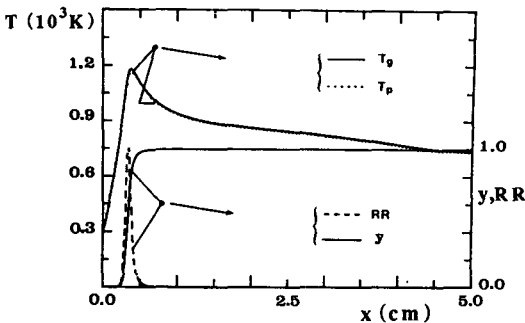


Fig. 2 Variations of the gas (T_g) and porous medium (T_p) temperatures with normalized reaction rate (RR) and mass fraction of product species (y) for $m=0.05kg/m^2 \cdot s$, $L=0.05m$, $\alpha=50m^{-1}$ and $\phi=1.0$

Fig. 3은 다공매질과 혼합기체의 전도열유속 (q_{cp} , q_{cg})과 함께 유동방향과 그 역방향의 복사열 유속, 그리고 정미복사열유속 (q_r)을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 기체, 그리고 다공매질내에서의 열전도는 복사열유속과 비교해서 무시할 만하며 Fig. 2의 화염대의 위치를 고려하면, 화염대의 정미복사열유속 q_r 은 유동의 유입방향을 향하고 있음을 관찰할 수 있다. 다시 말해서 정미복사열유속은 반응대근처에서 유동의 역방향을 향하는 최대값을 가지며 강력한 에너지귀환의 원인이기도 하다. 또, 다공질양단에서 보이는 정미복사열유속은 다공매질계의 복사열손실을 의미하며 다공매질의 입구쪽의 온도가 높으므로 그 열손실 역시 입구쪽이 출구쪽보다 더 크다.

다른 매개변수를 고정시킨 채 다공매질의 물리적인 길이를 0.05m에서 0.1m로 증가시켰을 때 $L=0.1m$ 에서의 혼합기체와 다공매질의 온도구배는 $L=0.05m$ 에서의 구배보다 더 작아짐을 Fig. 4로부터 알 수 있다. 더우기 혼합기체유입위치의 복사열 손실 역시 $L=0.1m$ 일 때 더욱 작아지며 이러한 현상은 혼합기체와 다공매질의 온도증가에 기여하여 화염의 두께를 감소시키는 동시에 화염대위치를 기체의 유입방향으로 어느 정도 앞당기는 결과를 낳는다. 앞에서 언급한 바와 같이, 매개변수

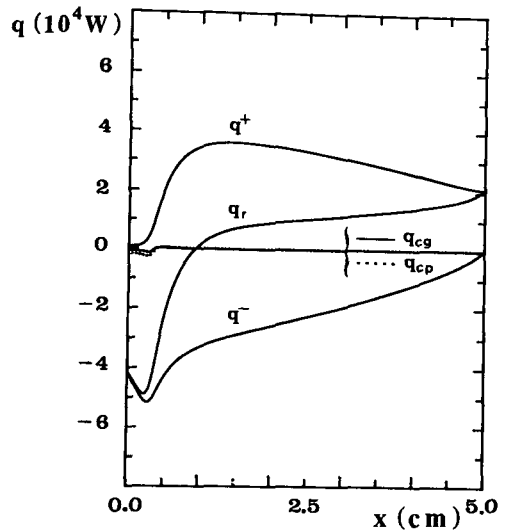


Fig. 3 Variations of the net (q_r) forward (q_r^+) and backward (q_r^-) radiative heat fluxes with conductive heat transfer through porous medium (q_{cp}) and gas mixture (q_{cg}) for $m=0.05kg/m^2 \cdot s$, $L=0.05m$, $\alpha=50m^{-1}$ and $\phi=1.0$

$h_p n_p A_p L^2 / \lambda$ 를 고정시켰을 때 기체와 다공매질간의 온도차가 매우 작으므로 그림에서는 혼합기체의 온도분포 T_g 만을 나타낸다. 그런데 이 물리길이의 변화는 무차원단위를 갖는, 다공매질의 광학두께와 직접적인 관련이 있다. 즉, 길이 L 이 0.05m에서 0.1m로 변함에 따라 다공매질의 물리길이 L 과 흡수계수 $\alpha = 50m^{-1}$ 의 곱으로 정의되는 광학두께는 2.5에서 5.0으로 그 값이 변하게 되는 것이다.

당량비 ϕ 의 값을 0.8에서 1.0으로 변화시켰을 때의 혼합기체온도 T_g , 규준화된(normalized) 반응률 RR , 정미(q_r), 정방향(q^+), 그리고 역방향

(q^-) 복사열유속의 분포형상을 Fig. 5에 보인다. 당량비가 0.8일 경우 1.0일 경우보다 체적열방출률(volumetric heat release rate)이 작을 것이므로 상대적으로 낮은 기체온도분포를 나타내게 되며, 따라서 혼합기체유입단에서의 복사에 의한 열손실도 작아진다. 이때 감소된 온도는 반응대를 후류방향으로 이동시키고 당량비가 줄어들에 따라 반응대의 두께는 점점 증가하게 된다.

다른 매개변수를 고정시킨 채로, 단지 다공매질의 흡수계수 α 만을 $50m^{-1}$ 에서 $10m^{-1}$ 로 감소시켰을 때 정방향(q^+), 후방향(q^-) 각각의 복사열유속은 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 상당히 감소한다. 또한, 혼합기체유입방향을 향하는 정미복사열유속($q_r = q^+ - q^- < 0$)은 반응대 근처에서 특히 감소하는데, 이것은 복사열전달의 가장 중요한 성질인 흡수계수가 감소함에 따라 반응대를 거슬러 역방향으로 향하는 에너지 귀환량이 감소함을 의미하며 상류의 다공매질시작단으로 유실되는 복사열유속이 감소함에 따라, 혼합기체 최대온도의 증가 및 반응대위치를 상류방향으로 이동시키는 결과를 낳는 것이다. 더우기 흡수계수가 감소함에 따라 증가된 혼합기체의 온도로 인해 화염대 두께는 감소함을 알 수 있다.

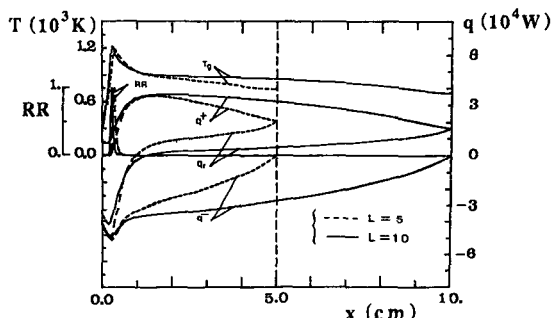


Fig. 4 Comparison of mixture temperature (T_g), normalized reaction rate (RR), net (q_r), forward (q^+) and backward (q^-) radiative heat fluxes for $L=0.05$ and $0.1m$ with $m=0.05kg/m^2 \cdot s$, $\alpha=50m^{-1}$ and $\phi=1.0$

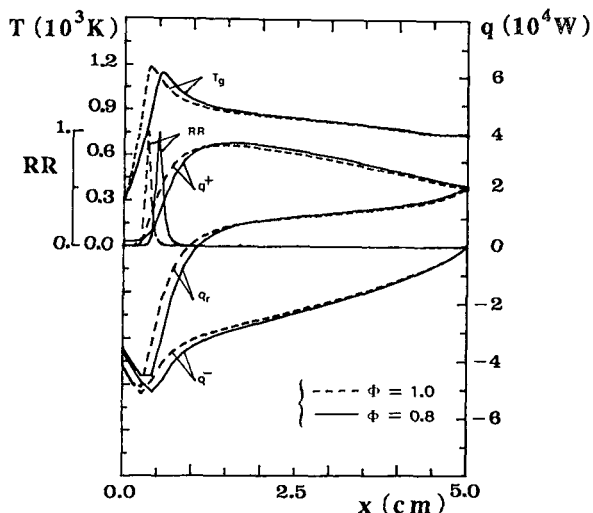


Fig. 5 Comparison of mixture temperature (T_g), normalized reaction rate (RR), net (q_r), forward (q^+) and backward (q^-) radiative heat fluxes for $\phi=0.8$ and 1.0 with $m=0.05kg/m^2 \cdot s$, $L=0.05m$ and $\alpha=50m^{-1}$

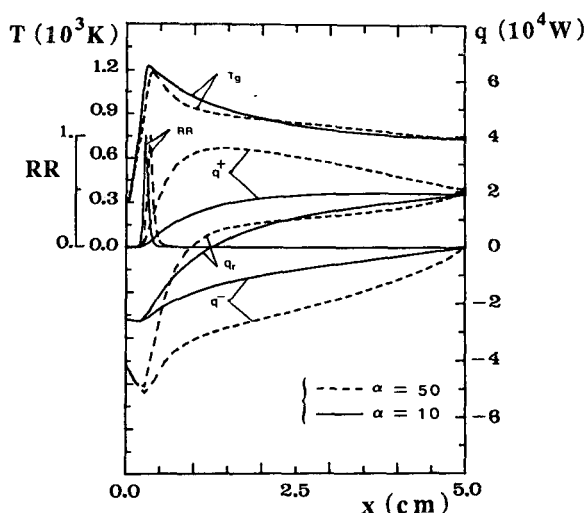


Fig. 6 Comparison of mixture temperature (T_g), normalized reaction rate (RR), net (q_r), forward (q^+) and backward (q^-) radiative heat fluxes for $\alpha=10$ and $50m^{-1}$ with $m=0.05kg/m^2 \cdot s$, $L=0.05m$ and $\phi=1.0$

4. 결 론

다공매질은 열에너지를 복사에너지로 변환하여 상류방향으로 귀환 시킴으로써 연료회박 예혼합 화염을 안정화시키는데 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 세 가지의 중요한 매개변수인 다공매질의 길이, 흡수계수, 그리고 혼합기체의 당량비 등을 변화시킴으로써, 복사에 관여하는 다공매질이 장착된 연소로에서 예혼합 화염의 열적구조가 어떻게 변화하는가를 고찰하였으며, 복사모델은 파장의 변화에 무관한 흡수계수를 갖는 회매질의 복사전달방정식을 적분하여 유도되는 비정상미분형을 사용하였다.

기체와 다공매질에서의 각각의 전도열유속은 복사열유속에 비해 무시할만하며 이 복사열유속의 결과로 반응대를 거슬러 상류방향으로 향하는 강력한 에너지귀환이 존재한다.

다공매질의 길이 혹은 전광학두께(total optical thickness)가 증가함에 따라 유동유입경계에서의 열손실은 감소하며 이로 인해 화염대위치는 상류측으로 약간 이동하고 그 반응대 두께는 감소한다.

당량비가 1.0으로부터 감소함에 따라, 온도의 감소로 말미암아 반응단은 하류로 이동하며 동시에 반응대두께는 증가한다.

다공매질의 흡수계수가 감소함에 따라 반응대를 거슬러 상류방향을 향하는 에너지 귀환량은 줄어들고 상류경계에서의 복사열손실이 작아지게 된다. 따라서, 최대온도는 증가하게 되고 반응단은 상류방향으로 이동하며 화염두께는 감소하게 된다.

참 고 문 헌

(1) Echigo, R., 1982, "Effective Energy Conversion

Method between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces", Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 6, pp. 361~366.

(2) Wang, K. Y. and Tien, C. L., 1984, "Thermal Insulation in Flow Systems: Combined Radiation and Convection Through a Porous Segment", Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 106, No. 2, pp. 453~459.

(3) Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hamamura, K., and Tomimura, T., 1986, "Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation", Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 2, pp. 827~832.

(4) 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 Combustion Science, Vol. 5, pp. 31~71.

(5) Yuen, W. W. and Zhu, S. H., 1986, "The Effect of Thermal Radiation on the Propagation of Laminar Flames", Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 2, pp. 833~841.

(6) Yoshizawa, Y., Sasaki, K., and Echigo, R., 1987, "Analytical Study of the Structure of Radiation Controlled Flame", National Heat Transfer Conference, The American Society of Mechanical Engineers, 87-HT-57.

(7) 김정수, 백승욱, 1988, "다공성매질에서의 예혼합 화염에 관한 연구", 대한기체학회 1988, 춘계학술대회 초록집, pp. 754~757.

(8) Madsen, N. K. and Sincovec, R. F., 1979, ACM Trans. Math. Software, Vol. 5, pp. 326~351.