

# 다공 세라믹 연소기 속에서의 예혼합연소에 대한 민감도 해석의 적용

임 인 권\*  
(1997년 4월 18일 접수)

## Application of Sensitivity Analyses in Premixed Combustion Within a Porous Ceramic Burner

Lim, In-Gweon

**Key Words:** Porous Ceramic Burner(다공세라믹 연소기), Premixed Combustion(예혼합연소), Sensitivity Analysis(민감도 해석)

### Abstract

A numerical study of premixed combustion within a porous ceramic burner (PCB) is performed to understand flame behavior with respect to various model parameters. Basic flame structure within the porous ceramic burner and species profiles such as NO and CO are examined. Sensitivity analysis of flame speed, gas and solid temperature, NO and CO emission from the burner with respect to reaction steps and various physical properties of the ceramic material is applied to find the most significant parameters in selection of porous materials for the porous ceramic burner. Effects of thermal conductivity, extinction coefficient and scattering albedo on the burner characteristics are studied through the sensitivity analysis. The results of sensitivity study reveal the order of importance in ceramic material properties to get suitable burner performance. Scattering albedo, which governs the ratio of absorbed energy by the ceramic material to total radiative energy transferred, is one of the most important parameters in the material properties since it affects the actual absorbed radiation rate and thus it largely affects the flame structure. Through the study, it is found that the sensitivity study can be used to estimate the flame behavior within the porous ceramic burner more effectively.

### 1. 서 론

연소에 기인한 공해물질에 대한 대중의 관심이 높아짐에 따라서 연소의 효율적인 제어 및 고효율 청정연소가 가능한 실용 연소기 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 연소기 개발의 한 분야로서 다공물질층을 이용한 연소기의 개발 연구가 진

행되고 있으며, 지금까지의 여러 연구들을 통하여 기존 연소기보다 많은 잇점들을 얻을 수 있다고 알려져 있다.

주로 세라믹 물질을 이용한 다공물질 연소기에서의 연소형태는 화염 위치에 따라 연소가 다공물질의 외부 또는 표면에서 일어나는 경우와 연소가 다공물질 속에서 일어나는 경우로 구분할 수 있다. 일반적인 분젠식 연소 방식의 변형이라고 할 수 있는, 외부 또는 표면에서의 연소 방식은 화염으로부터

\*회원, 명지대학교 기계공학과

터 확산 및 가스상 복사에 의해서 열이 세라믹으로 전달되어 혼합기를 가열하고 세라믹은 또한 외부로 복사 열전달을 한다. 이 경우 세라믹의 열전달율이 작기 때문에 혼합기로의 열전달에 제한이 있고 충분한 열전달을 이루기 위해서는 혼합기의 유속, 즉 연소율이 작아야 한다는 단점이 있다. 또 혼합기가 반응 지역을 통과하지 못해 미연 탄화수소의 발생도 화염이 다공물질 속에 존재할 때보다 크다는 단점도 있다. 그러나 이용 가능한 세라믹 재질에의 구애가 적고, 화염 안정성 및 연소 제어가 쉽다는 점 때문에 개발되어 사용되고 있는 대부분의 다공물질 연소기가 이 방식을 이용하고 있다.

이에 반하여 다공 세라믹 물질 속에 화염이 존재할 때는, 위 연소 방식에서 얻을 수 없는 열재순환기구(Heat recirculation mechanism)에 의해서 초과엔탈피 연소(Excess enthalpy combustion) 현상이 구현되어 독특한 화염구조가 나타난다.<sup>(1, 2)</sup> 화염 하류의 세라믹은 고온 연소 가스에 의하여 가열되고, 가열된 세라믹은 전도 및 복사열전달을 통하여 화염 상류 및 하류의 세라믹을 가열시킨다. 가열된 상류의 세라믹은 대류 열전달을 통하여 미연 혼합기를 가열시킨다.

여러 이론적,<sup>(3, 4)</sup> 수치 해석적<sup>(5-8)</sup> 및 실험적인 연구 방법들<sup>(9, 10)</sup>을 통하여 다공 세라믹 연소기 안에 화염이 존재할 때의 화염 구조 및 연소 특성이 밝혀져 오고 있다. 세라믹물질의 선정 및 연소기의 운전 조건이 적절한 경우 연소가 다공 세라믹의 외부에서 진행되는 경우에 비하여 단열화염온도(Adiabatic flame temperature) 보다 높은 최대 화염온도를 가질 수도 있으며, 이에 따라 연소시킴이 어려운 연료 및 희박 혼합기의 연소가 가능하다. 화염은 일차원 형태를 가지며, 모든 혼합기가 이 화염면을 통과해야 함으로 미연 탄화수소(UHC)의 발생이 다른 연소기에 비하여 매우 적다는 장점 및 화염 하류지역의 고온 가스는 상류로의 열전달과 하류 및 연소기 출구로의 열전달에 의하여 온도가 감소하므로 고온 하의 체류시간에 민감한 질소산화물의 생성을 억제시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이들 장점들을 현실화 할 수 있는 실용적인 다공 세라믹 연소기의 개발을 위해서는 운전 조건 및 세라믹의 물성치에 따라 화염의 변화 및 연소 형태를 정확히 예측하여야 하며, 이를 통해 최적 연소가 가능한 다공 세라믹 재질 및 연소 조건 등이 선정

되어야 한다. 최근 높은 열충격(Thermal shock)에도 견딜 수 있는 세라믹의 개발<sup>(11)</sup>로 인해 실용 연소기 개발의 가장 큰 애로 사항은 어느 정도 사라지고 있으나, 다공 세라믹을 사용한 연소기의 개발은 제한적이며 실용화되지 못하고 있다. 이는 다공 세라믹 연소기 속에서 일어나는 화학반응, 열전달 및 유동 등의 복잡한 현상들에 대한 이해가 매우 어렵기 때문이다.

지금까지 연구된 연구의 대부분은 단일 재질 세라믹에 따른 화염 구조, 열전달 해석 등의 기초적인 연소 특성 파악에 그치고 있으며, 세라믹 재질의 변동 등에 따른 화염 구조 변화 및 화염 이동, 공해 배출물특성 등에 관한 연구는 아직까지 깊이 진행될 바 없다. 지금까지의 연구 결과를 이용한 실제 연소기의 개발은 어려운 편이며, 이는 다공 세라믹 연소기의 경우 세라믹 재질 및 형상, 연소 조건, 입구 및 출구의 복사조건, 세라믹의 배열 및 화염 위치에 따라서 화염 구조 및 연소 형태가 매우 달라지기 때문에, 서로 다른 조건 및 환경 하에서 연구된 결과들을 일반화시킬 수 없기 때문이다. 특히 연소기 내의 화염 위치는 연소 형태에 큰 영향을 미치나, 화염면의 직접적인 측정이 다른 연소 실험에 비하여 매우 어렵고 다공 세라믹 물질 속에서 연소시 화염전파속도에 대한 정의 또한 모호하므로,<sup>(12)</sup> 실험적 연구를 통한 연소기 성능 예측에는 한계가 있다. 실용적인 연소기의 개발을 위해서는 여러 재질의 세라믹 및 연소형태에 대하여 상당한 수의 조합을 이루는 실험적 연구가 필요하다.

본 연구는 많은 실험적 연구를 대체하기 위하여 다공 세라믹 속에서 예혼합연소가 진행될 때, 세라믹 물질에 따른 화염구조 및 연소 성능에 영향을 미치는 인자들을 효과적인 방법을 통하여 정성적으로 알아보는 것이 주 목표이다. 이를 위하여 지금까지의 여러 연구자들이 이용한 인자 해석(Parametric study) 연구 방법도 가능하지만, 모델에서 고려해야 할 인자가 많으므로 모든 인자들의 값을 변화시키면서 수치해석 연구를 한다는 것은 실용적이지 못하고 매우 힘들다. 본 연구에서는 기존의 다른 연구에서 이용되지 않은 민감도 해석(Sensitivity analysis) 연구 방법을 통하여 화염구조 및 연소 성능에 영향을 미치는 인자들을 알아보았다.

이를 위하여 일차원 화염전파모델<sup>(13)</sup> 및 상세화학반응 메커니즘(Detailed chemical reaction mechanism)을 이용하여 수치 해석하고, 화학반응

단계에 대한 민감도 해석 및 화염구조 및 연소기 성능에 영향을 끼치는 세라믹 물성치에 따른 민감도 해석을 행하였다. 세라믹 물성치 중에서 열전도율(Thermal conductivity), 소멸계수(Extinction coefficient) 및 산란율(Scattering albedo)의 변화에 따른 화염 구조의 민감도를 알아보았다. 이를 통하여 여러 세라믹의 물리적 인자들에 대하여 다공 세라믹 연소기의 성능에 영향을 미치는 주요한 인자들을 쉽게 알아낼 수 있었고, 주어진 조건의 다공 세라믹 연소기에서 세라믹의 물성치를 변화시킬 때 화염구조 및 연소 형태가 어떻게 변화하는가를 더욱 쉽게 예측할 수 있었다.

## 2. 다공세라믹 연소기 속의 예혼합화염의 연소 모델

본 연구에서 모델된 다공 세라믹 연소기의 기본적인 형태는 Fig. 1에 나타나 있다. 다공 세라믹 속에서 예혼합기 연소의 경우 연소기 속에서의 화염전파는 일차원 자유전파 예혼합화염(One-dimensional freely propagating premixed flame)으로 모델하고,<sup>(13)</sup> 가스와 고체 세라믹 사이의 대류열전달, 세라믹의 전도열전달, 세라믹 및 외부 경계에 대한 복사열전달 현상을 반영하기 위해서 화염 구조 연구에 자주 사용되는 PREMIX<sup>(13)</sup> 프로그램을 수정하였다. 프로그램에 관련된 사항 및 계산에 사용된 가정<sup>(6-7)</sup>들은 이미 널리 알려져 있으므로 여기서는 생략한다. 사용된 지배방정식들은 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{d}{dx}(\rho u A_g) = 0 \quad (1)$$

화학종 방정식 :

$$\rho u A_g \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho A_g V_k Y_k) - A_g \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (2)$$

가스상 에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} \rho u c_p A_g \frac{dT_g}{dx} - A_g \frac{d}{dx}(\lambda_g T_g) \\ + A_g \sum_{k=1}^K \rho V_k Y_k c_{pk} \frac{dT_g}{dx} + A_g \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k \\ + A_s H (T_g - T_s) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

고체상 에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(\lambda_{s,pure} A_{s,eff} \frac{dT_s}{dx}) + A_s H (T_g - T_s) \\ - \frac{d}{dx}(A_{air}) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

상태방정식 :

$$\rho = \frac{WP}{R_c T_g} \quad (5)$$

여기서  $x$ 는 화염에 고정된 공간 좌표,  $u$ 는 유체 혼합물의 속도,  $T$ 는 온도,  $Y_k$ ,  $W_k$ ,  $\dot{\omega}_k$ 는 각각  $k$ -화학종의 질량분율, 분자량, 단위 체적 당 물생성율이며,  $\rho$ 는 질량 밀도,  $W$ 는 화학물의 평균 분자량,  $c_p$ 는 혼합기체의 정압비열,  $c_{pk}$ 는  $k$ -화학종의 정압비열,  $K$ 는 화학종의 수,  $h_k$ 는  $k$ -화학종의 총엔탈피,  $V_k$ 는  $k$ -화학종의 이종(Binary) 확산 속도이다. 아래첨자 *all*, *g*와 *s*는 각각 가스상과 고체상의 합, 가스상 및 고체상을 의미한다.  $H$ 는 대류열전달 계수와 다공물질 단위 체적 당 셀 개수의 곱한 값을 나타낸다.  $\lambda_{s,pure}$  및  $A_{s,eff}$ 는 다공물

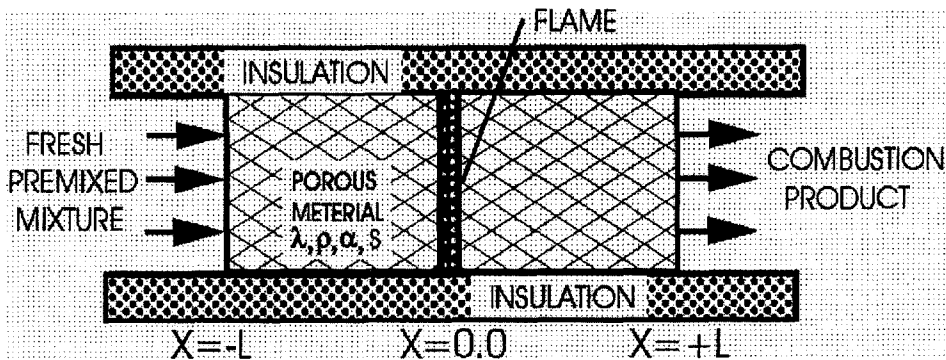


Fig. 1 Schematic diagram of porous ceramic burner (length :  $-L < x < +L$ , flame location : center of burner).

질을 구성하는 재료(bulk)의 열전도율 및 다공물질에서의 실제 열전도도가 되는 면적을 각각 나타낸다.

식 (4)에 나타나는 복사열전달 항의 계산에는 흡수, 방사 및 등방(Isotropically)으로 산란하는 물질에 대한 Two-flux 복사 모델을 사용하였고,<sup>(14)</sup> 이에 따른 총복사 열유속(Net radiative heat flux) 및 이의 비분항은 다음과 같다.

총복사 열유속 :

$$q^r(\tau) = 2\pi[I^+(0)E_3(\tau) - I^-(\tau)E_3(\tau_0 - \tau) + \int_0^\tau S(\tau')E_2(\tau - \tau')d\tau' - \int_\tau^{\tau_0} S(\tau')E_2(\tau' - \tau)d\tau'] \quad (6)$$

총복사열유속 미분 :

$$\frac{dq^r(\tau)}{d\tau} = 4\pi S(\tau) - 2\pi[I^+(0)E_2(\tau) + I^-(\tau_0)E_2(\tau_0 - \tau) + \int_0^{\tau_0} S(\tau')E_1(|\tau - \tau'|)d\tau'] \quad (7)$$

위 식에서  $\tau(k_{abs.} + k_{sca.}) \cdot x$ 이며,  $k_{abs}$ 는 흡수계수(absorption coefficient),  $k_{sca}$ 는 산란계수(scattering coefficient),  $E_1, E_2, E_3$ 는 1, 2, 3차의 Exponential 적분을 의미한다. 소스항  $S(\tau)$ 은 흡수, 방사 및 등방(Isotropically)으로 산란하는 물질에 대하여 다음과 같이 나타낸다.

$$S(\tau) = (1 - \omega)I_b[T(\tau)] + \frac{1}{2}\omega[I^+(0)E_2(\tau) + I^-(\tau_0)E_2(\tau_0 - \tau) + \int_0^{\tau_0} S(\tau')E_1(|\tau - \tau'|)d\tau'] \quad (8)$$

산란율( $\omega$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{k_{sca.}}{k_{abs.} + k_{sca.}} \quad (9)$$

길이  $-L < x < +L$ 의 세라믹 연소기에 대한 입구 및 출구의 경계조건은

$$\begin{aligned} \text{입구}(x = -L) \\ T_g = T_o(298K), \quad Y_k = Y_{k0}, \\ I^+(x = -L) = \frac{\sigma T_o^4}{\pi} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{출구}(x = +L) \\ I^-(x = +L) = \frac{\sigma T_{bc}^4}{\pi} \end{aligned}$$

이며, 연소기의 입구 및 출구는 298 K의 흑체 및  $T_{bc}$  K의 흑체와 복사 열전달을 한다고 가정하였다. 또한 출구에서 화학종에 대한 경계조건은 연소기 길이가 짧은 경우 출구에서도 반응이 계속 진행될 수 있기 때문에 출구에서도 화학반응이 계속 진행되는 경우도 포함하여 계산하였다.<sup>(6)</sup>

본 연구에서는 279개의 반응단계 및 49개의 화학종으로 구성된 GRI(Gas Research Institute) 상세 화학반응 메커니즘<sup>(15)</sup>을 사용하였다. 천연가스 화염 연구를 위해서 만들어진 이 메커니즘은  $C_1$  및  $C_2$ 의 반응 경로와  $NO_x$  관련 반응들을 포함하고 있으며, 화염 구조 및 반응물의 예측시 매우 정확하다고 알려져 있다. 각종 화학종 상태 및 전달 물성치들은 CHEMKIN-II<sup>(16)</sup> 및 Transport Package<sup>(17)</sup>를 이용하여 계산하였다.

본 연구의 경우 미연 혼합기의 유속으로 정의되는 화염전파속도는 화염이 일정한 곳에 고정되었다는 가정 하에서, 해를 구하는 과정 중에 고유치로서 구해지며 계산시 입력 조건으로 주어지지 않는다.<sup>(13)</sup> 경계치 문제 형태를 갖는 지배방정식들은 유한차분법에 의해서 비선형 방정식으로 변환된다. 구하고자 하는 해는 각 격자 점에서의 가스상 온도, 고체상 온도 및 화학종의 몰 또는 질량분율이 된다. 해의 벡터는 다음과 같다.

$$F(\phi) = 0 \quad (11)$$

여기서

$$\phi = (T_{g,1}, T_{s,1}, Y_{1,1}, \dots, Y_{K,1}, \dot{M}_1, \dots, T_{g,j}, T_{s,j}, Y_{1,j}, \dots, Y_{K,j}, \dot{M}_j, \dots, T_{g,J}, T_{s,J}, Y_{1,J}, Y_{1,J}, \dots, Y_{K,J}, \dot{M}_J)^T$$

수정된 뉴턴(Damped modified Newton) 알고리즘이 계산에 사용되었고 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} \Delta \phi = -\lambda^{(n)} F(\phi^{(n)}) \quad (12)$$

여기서  $\partial F / \partial \phi$ 는  $(K+2) \times (K+2)$ 개의 자코비안 행렬,  $\Delta \phi = \phi^{(n+1)} - \phi^{(n)}$ ,  $n$ 은 반복횟수, 그리고  $\lambda^{(n)}$ 은 감쇠인자이다. 뉴턴의 방법은 초기 값이 해로 수렴하기 쉬운 곳에서는 빠르게 수렴하나, 그렇지 않은 경우 수렴이 힘들므로 시간 적분을 통하여 먼저 계산하여 충분히 수렴시킨 후 뉴턴의 방법을 사용한다.

### 3. 민감도 해석

민감도 해석(Sensitivity Analysis)은 물리적인 관찰 및 모델의 검증시 유용하게 사용되는 방법으로서, 특히 모델에 관계되는 인자(Parameter)의 수가 많을 경우에 자주 사용된다. 화염 및 연소 연구에서는 메커니즘을 구성하는 화학반응단계들, 전달물성치 및 당량비 등이 화염 구조 및 구해진 해에 끼치는 영향을 알아보기 위해서 쓰이는 예가 종종 있다.<sup>(18)</sup>

본 연구에서의 민감도 해석은 사용된 화학반응단계와 다공 세라믹의 열전도율 및 복사 물성치들이 화염구조에 끼치는 영향을 알아보는데 사용된다. 여러 인자들의 값을 변화시키면서 각각 계산하는 연구 방법보다 쉽게 인자들의 변화에 따른 화염 구조 및 연소기의 특성 변화를 간단히 알아볼 수 있다. 주어진 모델 인자들을 사용하여 구해진 해에 대하여, 사용된 인자 중에서 하나가 변화시 전체적으로 해가 어떻게 변화하는 가를 미리 예측함으로써, 실제 연소기의 설계시 우선적으로 고려해야 할 중요 인자가 무엇인지를 알 수 있다. 식 (11)에서  $F(\phi)$ 은 많은 수의 종속변수 및 모델인자  $\alpha$ 에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(\phi(\alpha), \alpha) = 0 \quad (13)$$

위 식을 인자  $\alpha$ 에 대해서 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} + \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0 \quad (14)$$

여기서  $\partial F / \partial \phi$ 는 자코비안 행렬이고,  $\partial F / \partial \alpha$ 는 인자에 대한  $F$ 의 미분항이다. 민감도 계수로 정의되는  $\partial \phi / \partial \alpha$ 는 인자의 변화에 대한 해의 변화를 나타낸다. 민감도 계수는 어떤 절대적인 값을 의미하지 않고 인자 변화에 따른 해의 상대적인 변화 정도를 나타내는 척도이다. 해석의 편이를 위하여 가스 및 세라믹 고체의 민감도 계수는 각 위치에서의 온도로, 또 화학종에 대한 민감도는 전 영역에서의 최고 몰 농도(Peak mole fraction)로 나눈 값으로 무차원하여 나타내었다.

$$\text{온도의 민감도 계수} = \frac{\alpha_i}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial \alpha_i} \quad (15)$$

$$\text{화학종의 민감도 계수} = \frac{\alpha_i}{X_{n, \text{peak}}} \frac{\partial X_n}{\partial \alpha_i} \quad (16)$$

다공 세라믹 연소기에서의 화염전파에 대한 민감

도 해석은 화학반응단계, 다공 세라믹 물질의 열전도율, 소멸계수 및 산란율 등의 복사 물성치 등이 화염구조와 NOx 및 CO 배출에 끼치는 영향을 알아보는 것에 주 관점을 두고 진행하였다.

### 4. 결 과

#### 4.1 기본 계산

본 연구에서 모델된 연소기의 세라믹 재질은 10 ppi(pores per inch)의 부분 안정된 지르코니아(PSZ : partially stabilized zirconia)이다. 이 물질의 물성치들은 Table 1에 나타나 있다. 출구 복사 경계조건으로는 연소기 출구가 298 K의 흑체와 복사열전달을 하는 것으로 하였다. 1기압하의 당량비  $\phi=1.0$ 인 메탄/공기 예혼합기가 길이가 6 cm인 연소기의 중앙( $x=0.0$  cm) 부근에서 고정되어 연소되는 경우에 대하여 기본 계산을 수행하였다. 또 자유전파화염과 비교시 서로 다른 구조를 갖는 화염에 대한 직접적인 비교는 어렵기 때문에 온도가 900K가 되는 점이 같은 곳( $x=0.0$  cm)에 위치

Table 1 The properties of porous ceramic material.

Solid thermal conductivity	2.2 W/m-K
Scattering albedo	0.8
Extinction coefficient	270.0 1/m
Porosity	0.87
Effective area (for conduction)	0.07/unit area
Heat transfer coefficient	$10^7$ W/m <sup>3</sup> -K

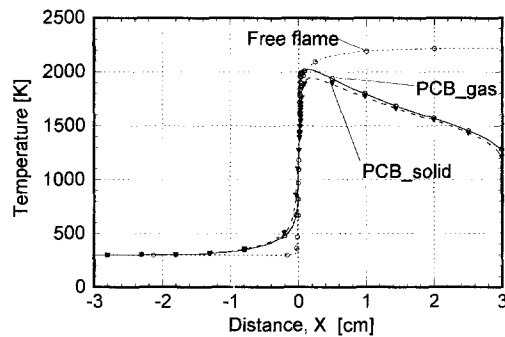


Fig. 2 Comparison of temperature profile for free flame and PCB burner (○ with dot line : free flame, ○ with solid line : gas of PCB burner, ▼ with dotted line : solid of PCB burner).

하게 하였다.

Fig. 2는 다공 세라믹 연소기의 가스 및 세라믹의 온도를 자유전파화염의 온도와 비교하여 나타내고 있다. GRI 메커니즘을 사용하여 계산한 자유전파화염의 전파속도는 39.1 cm/s, 다공 세라믹 연소기에서는 76.9 cm/s로 계산되었다. 이는 다공 세라믹 속에서 연소시 같은 면적의 연소기에 대하여서 약 2배 정도의 연소율을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 자유전파화염의 경우 온도가 900K인  $x=0.0$  cm 인 지점을 지나 일정거리 후에 최고화염 온도에 도달하지만, 다공 세라믹 연소기에서는 연소기 중간부에 온도의 최대점이 나타나고 화염 하류에서 온도는 전체적으로 감소한다. 온도 최대값(2024K)이 자유전파화염의 단열화염온도(2228K)보다 낮게 나타난다. 이는 연소기 출구 쪽에서 298 K의 흑체로 복사열손실이 존재함을 가정하였고, 비교적 큰 값의 산란율(scattering albedo)  $\omega=0.8$  를 사용하였기 때문이다. 산란율이 높은 경우 고온 화염 및 하류 지역에서의 복사열이 화염 전면의 세라믹에 흡수되지 못하고 산란되는 비율이 커짐을 의미하며, 이에 따라 화염전면으로의 전열량이 감소하고, 이에 따라 예혼합기의 예열온도에 민감한 최고화염온도가 낮아진다. 반면에 낮은 산란율 및 연소기 길이가 긴 경우, 화염 전면의 예열효과가 증가되고 출구에서의 복사열손실이 감소하여 최고 온도는 증가된다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 3은 연소기 속의 CO 및 NO 분포를 온도에 대하여 나타내었다. 다공 세라믹 연소기의 가장 큰 장점으로 부각되는 질소산화물 및 일산화탄소의 배출 특성은 Fig. 2의 화염구조에 기인한다. 활발한

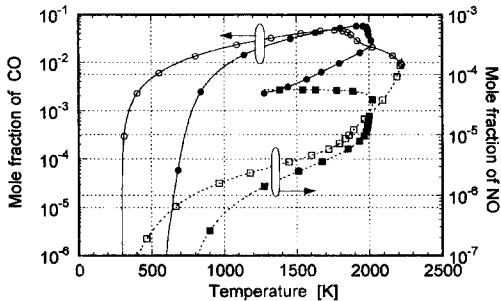


Fig. 3 Mole fraction of CO and NO with respect to temperature for free flame and PCB flame (○ with solid line : CO of free flame, ● with solid line : CO of PCB burner, □ with dotted line : NO of free flame, ■ with dotted line : NO of PCB burner).

반응이 일어나는 고온 화염 영역이 자유전파화염에 비하여 감소함을 알 수 있다. 다공 세라믹 연소기의 경우 자유전파화염보다 화염면의 바로 전면 쪽에서 CO 감소 반응이 급격히 진행되고, 화염 지역을 지나서도 산화반응이 계속 진행된다. NO 생성 반응은 화염면에서 급격히 진행되고, 화염 하류에서는 NO의 생성 반응은 진행되지 않는다. NO 생성 반응이 자유전파화염에 비하여 더 이상 진행되지 않는 것은 화염 하류에서 온도가 감소하고 또한 NO의 생성에 관계하는 OH 및 H 화학종이 상대적으로 적게 존재하기 때문이다.

Fig. 4는 화염 전파에 가장 중요한 H 및 OH 화학종의 몰 분포를 온도에 대하여 나타내었다. 다공 세라믹의 경우 저온부의 같은 온도에 대하여 H 및 OH 화학종의 몰농도는 자유전파화염의 몰농도에 비하여 낮은 분포를 나타낸다. 이러한 몰 농도 분포의 차이는 다공 세라믹 속에서 연소시 혼합기의 유입속도가 훨씬 더 크기 때문에, 자유전파화염에 비하여 확산 영역이 상대적으로 줄어들기 때문이다. 그렇지만 온도가 약 2000K인 고온 화염면 근처에서 H 및 OH의 급격한 증가를 동반하는 화학 반응이 더 빠르게 진행되고, 화염전면에서의 화학종 구배(Species gradient)가 더 크기 때문에 H 및 OH 등의 래디칼(Radical) 확산이 더욱 촉진되어 자유전파화염 보다 빠른 연소가 유지된다. 높은 화염전파속도를 가지는 화염의 경우 반응이 빠르게 진행되어야 하고, 이를 위해서는 고온에서 H 및 OH의 농도가 높고, 이들 래디칼(Radical)의 확산이 잘 이루어져야 한다고 알려져 있다.<sup>(18)</sup> 이는 화학반응 단계들에 대한 민감도 해석을 통하여 자유

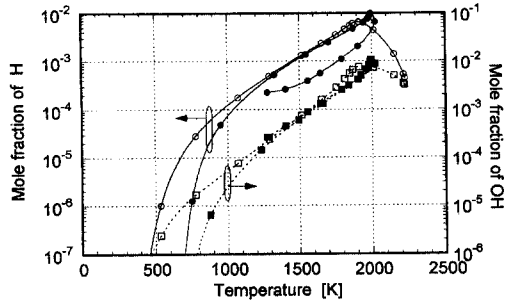


Fig. 4 Mole fraction of H and OH with respect to temperature for free flame and PCB flame (○ with solid line : H of free flame, ● with solid line : H of PCB burner, □ with dotted line : OH of free flame, ■ with dotted line : OH of PCB burner).

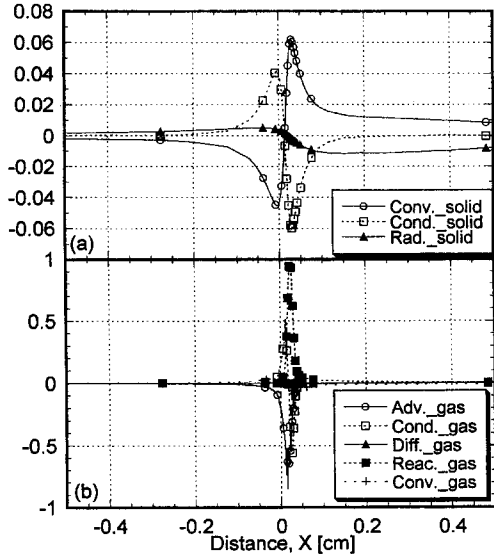


Fig. 5 Budget of (a) solid energy equation and (b) gas phase energy equation.

전과화염에서와 같이 다공세라믹 연소기에서의 화염 전파에서도 H 및 OH의 생성과 소멸에 관계된 반응들이 중요하다는 결과 및 본 논문의 뒷부분에 나타나는 화학반응에 대한 민감도 해석 결과와 일치한다.

Fig. 5(a) 및 (b)는 계산이 수렴한 후, 식 (3)과 (4)의 각 항을 최대발열량(Maximum heat release)으로 나눈 결과 값(Normalized value)을 나타내었다. 고체상 에너지 방정식에 대한 에너지비율(Budget)의 경우 가스상 에너지 방정식에 대한 에너지비율에 비하여 적은 양이며, 다공 세라믹을 화염대에 삽입할 경우 열전달 영역이 확대되는 것을 알 수 있다. 고체를 통한 열전도의 영향은 다른 열전달 기구에 비하여 화염 영역 근처에 국한되며, 복사 및 대류열전달은 화염을 포함한 비교적 넓은 영역에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

위와 같이 가스상 에너지비율에 비하여 작은 양(Quantity)의 고체상 에너지비율이 화염전파속도를 비롯한 전체적인 화염 구조에 미치는 영향을 고려할 경우, 화염 구조 및 연소형태를 원하는 형태로 변화시키기 위해서는 화염부근에서의 열전달 형태를 바꾸어 에너지비율을 변화시키는 것이 필요하다.

Table 2 Sensitivity rates of flame speed, exit gas temperature, CO and NO emission with respect to major reaction steps.

- Rx 38  $H + O_2 = O + OH$
- Rx 52  $H + CH_3(+M) = CH_4(+M)$
- Rx 53  $H + CH_4 = CH_3 + H_2$
- Rx 55  $H + HCO = H_2 + CO$
- Rx 99  $OH + CO = H + CO_2$
- Rx 166  $HCO + H_2O = H + CO + H_2O$

Reaction Number	w. r. t. flame speed	w. r. t. exit gas temp.	w. r. t. NO emission	w. r. t. CO emission
38	0.2530 (0.4473)	0.0091 (-0.0054)	-249 (-0.341)	-0.357 (0.0074)
99	0.0606 (0.2245)	0.0036 (-0.0004)	-7.18 (1.115)	-0.014 (-0.001)
52	-0.0587 (-0.126)	-0.0038 (0.0015)	12.3 (0.103)	0.0129 (0.0022)
166	0.0584 (0.087)	0.0411 (-0.0012)	-5.21 (-0.078)	0.00216 (-0.0014)
55	-0.0383 (-0.0553)	-0.0226 (0.0007)	15.0 (0.049)	0.0191 (-0.0008)
53	-0.0253 (-0.0349)	0.00238 (0.0004)	60.0 (0.081)	0.0889 (0.0000)

#### 4.2 화학반응단계에 대한 민감도 해석

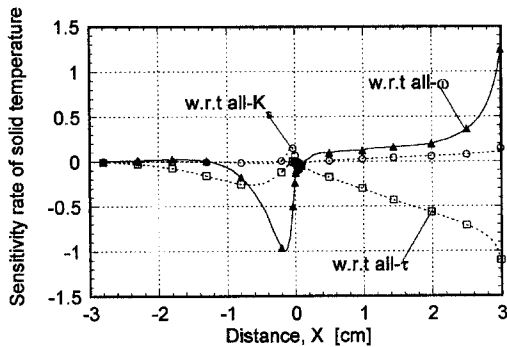
화염전파속도 및 계산 결과에 미치는 화학반응단계의 영향을 알아보기 위하여 민감도 해석을 행하였다. 앞의 기본 계산에서 얻은 결과를 바탕으로 반응 메카니즘을 구성하는 각 반응 단계들의 반응상수의 변화에 따른 화염전파속도, 출구 가스온도, NO 및 CO의 배출량의 민감도를 알아보았다. Table 2에는 반응에 따른 화염전파속도에 대한 민감도 계수를 절대값이 큰 순서대로 일부만을 나타내었다. 민감도 계수 값들은 각 반응 단계의 반응상수가 단위만큼 증가 (Unit increase) 할 때의 기본 계산에서 얻은 결과 값들의 변화를 나타낸다. 괄호 안에 나타낸 값들은 자유전파화염에 대한 민감도 계수의 값을 나타낸다.

앞에서 언급되었던 바와 같이 H, O 및 OH 라디칼의 생성 및 소멸에 관여하는 반응들에 화염전

**Table 3** Sensitivity rates of flame speed, exit gas temperature, CO and NO emission with respect to various porous ceramic parameters.

	w. r. t. flame speed	w. r. t. exit gas temperature	w. r. t. CO emission	w. r. t. NO emission
Pre- $K_{\text{solid}}$	0.032	0.048	1.981	50.38
Post- $K_{\text{solid}}$	0.110	0.107	2.522	59.51
All- $K_{\text{solid}}$	0.142	0.155	4.503	109.88
Pre- $\tau$	-0.028	-0.057	-1.415	-33.97
Post- $\tau$	-0.011	-1.043	-6.337	-103.41
All- $\tau$	-0.039	-1.121	-7.753	-137.38
Pre- $\omega$	-0.414	-0.669	-14.41	-340.06
Post- $\omega$	-0.467	1.942	-5.75	-216.63
All- $\omega$	-0.881	1.281	-20.15	-556.69

( $K_{\text{solid}}$  : solid thermal conductivity,  $\tau$  : extinction coefficient,  $\omega$  : scattering albedo)



**Fig. 6** Sensitivity rates of solid temperature with respect to change of solid thermal conductivity (○), extinction coefficient (□) and scattering albedo (▲).

파가 민감하다는 것을 알 수 있다. 또 모든 반응들에 대하여 다공 세라믹 연소기에서의 화염전파속도의 민감도는 자유전파화염의 경우보다 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 Miller와 Bowman의 반응메카니즘을 이용한 해석 결과와 일치하며, (8) 이는 일반적인 화염의 화염전파는 확산 및 반응현상에 의존하지만, 다공세라믹 연소기의 경우 세라믹 속에서의 열전달 현상이 매우 중요하게 화염전파에 영향을 미치기 때문에 화학반응에 따른 영향이 감소함

을 의미한다고 할 수 있다.

이에 비하여 NO 및 CO의 민감도는 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 세라믹 연소기에서 NO 및 CO의 생성과 소멸은 주로 화염부근에서 진행된다는 이전의 연구 결과를 고려할 때, (19) 화염 영역의 온도 및 화학종 분포 등의 화염구조를 좌우하는 위의 반응들에 대한 민감도가 커지는 것은 예측할 수 있는 결과이다.

### 4.3 세라믹 물성치에 따른 민감도 해석

화염전파속도 및 최대화염온도의 증대 등을 얻기 위해서는 화염 부근의 열전달 형태를 바꾸어 에너지비율을 변화시키는 것이 필요하다. 이의 변화를 통하여 원하는 결과를 얻을 수 있는가를 알아보기 위하여 다음과 같은 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석은  $x=0.0$  cm인 지점을 기준으로 다공 세라믹의 전면과 후면을 구별하고, 이들의 열전도율, 소멸계수 및 산란율을 각각 변화시켰다.

Table 3는 앞의 기본 계산에서 얻은 결과에 대하여, 민감도 해석을 행한 경우 화염전파속도, 출구 가스 온도, CO 및 NO 배출에 대한 민감도 계수를 나타낸 것이다. Fig.6은 전체 세라믹의 열전도율, 소멸계수 및 산란율의 변화에 대한 연소기 각 지점의 세라믹 온도의 민감도 계수 값을 나타내고 있다.

Table 3에 나타난 바와 같이 화염전파속도 및 출구 가스 온도는 여러 인자들 중에서 세라믹의 산란율에 따라 가장 민감하게 변동하고, 소멸계수, 열전도율의 순서로 변화의 정도가 감소한다. 산란율의 증가는 일정한 양의 복사에너지에 대하여 흡수되지 않고 산란되는 복사의 증가를 의미하므로, 화염 하류의 고온 세라믹에서 화염 상류로의 복사 중에서 실제로 세라믹에 흡수되는 양이 감소하기 때문에 복사를 통한 예열 효과가 감소한다. 이에 따라 화학반응율은 변화하며, 화염전파속도는 감소한다. 소멸계수의 증가는 복사 열전달 영역의 감소를 의미하기 때문에 예열부의 온도 감소를 초래한다. 세라믹 열전도율의 증가는 화염 상류로의 전열의 증가를 가져와 화염 전파속도를 증가시킨다.

Fig.7은 화염 상류, 하류 및 전체 산란율의 변화에 따른 세라믹 온도의 민감도 계수를 나타내고 있다. 일정한 소멸계수에 대하여 산란율의 증가는 흡수계수의 감소 및 산란계수의 증가를 의미한다. 세라믹으로 실제 흡수되는 흡수 복사량의 감소로



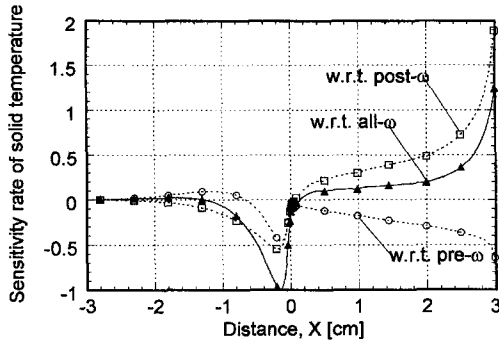


Fig. 7 Sensitivity rates of solid temperature with respect to change of scattering albedo (○ : pre-flame zone, □ : post-flame zone and ▲ : whole burner).

통하여 화염 전면에서의 온도가 감소된다. 하류 세라믹의 산란율 증가는 고온부에서 하류 세라믹으로의 복사 전열 중에서 흡수되어 출구로 방출되는 열량, 즉 연소기 출구를 통한 열손실을 감소시킴으로써 하류 온도를 증가시킨다.

모든 경우에 대하여 세라믹의 산란율을 증가시킬 경우 화염전면의 온도가 낮아진다. 이것은 현재 화염 위치에 대하여 하류쪽으로 이동하려는 화염날림(Blowoff) 경향을 가진다는 것을 암시하며 현재 위치에 화염을 고정시키기 위해서는 공급 유량의 감소, 즉 화염전파속도의 감소가 필요하다. 반대로 세라믹의 산란율을 감소시, 화염을 현재 위치에 고정시키기 위해서는 유량 증가가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 열전도율에 따른 세라믹 온도의 민감도 계수를 나타낸 것이다. 열전도율 변화에 따른 화염면의 온도 변화는 화염 상류보다 하류의 열전도율에 따라서 더 크게 변화한다. 화염 하류 세라믹의 열전도율만을 증가시킬 경우에도 하류로의 전열이 더욱 증가하고, 이를 통하여 상류로의 복사열전달이 증가하고 전파속도가 증가한다. 이것은 화염 전면으로의 열전달의 주요한 기구(Mechanism)가 복사열전달이라는 것을 의미한다.

모든 경우에 대하여 세라믹의 열전도율을 증가시킬 경우 화염은 현재 위치에 대하여 상류쪽으로 이동하려는 역화(Flashback)의 경향을 가지며, 화염을 현재 위치에 고정시키기 위해서는 공급유량의 증가가 필요하다. 이는 즉 화염전파속도의 증가를 가져온다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 소멸계수를 변화시켰을 때 나타나는 세

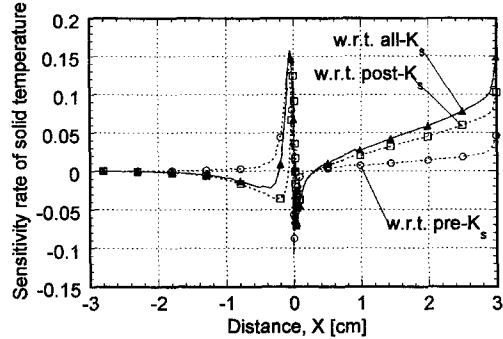


Fig. 8 Sensitivity rates of solid temperature with respect to change of solid thermal conductivity (○ : pre-flame zone, □ : post-flame zone and ▲ : whole burner).

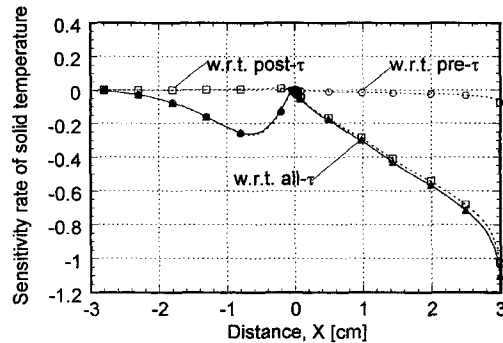


Fig. 9 Sensitivity rates of solid temperature with respect to change of extinction coefficient (○ : pre-flame zone, □ : post-flame zone and ▲ : whole burner).

라믹 온도의 민감도 계수를 나타낸 것이다. 일정한 산란율에 대한 소멸계수의 증가는 흡수계수 및 산란계수의 증가를 의미하며, 복사열전달의 영향을 받는 물리적 공간의 감소를 의미한다. 전체 세라믹의 소멸계수 증가의 경우, 화염 상류의 온도 감소는 상류 소멸계수 증가에 민감하고 이는 하류의 복사중에서 상류로 전달되는 복사량이 실제 감소하기 때문이다. Fig 5(a)와 같이 하류에서의 열전달 메카니즘이 주로 대류 및 복사 열전달에 의하는 하류에서의 급격한 온도 감소는 하류 소멸계수의 증가에 의하며, 이는 고온 영역에서의 복사가 감소되기 때문이다.

소멸계수에 대한 민감도 해석을 통하여 화염 상류의 소멸계수를 증가시킬 경우, 화염 전면의 온도가 감소하고 이에 따라 연소속도가 감소되고, 화염이 상류로 이동하기 어렵다는 것을 예측할 수 있

다.

Table 3에서 세라믹 열전도율, 소멸계수 및 산란율 값의 변화에 따른 CO 배출량의 민감도는 NO 배출량의 민감도에 비하여 상대적으로 적음을 알 수 있다. CO의 산화 반응은 Fig. 3 및 4에 나타난 바와 같이 화염의 부근 바로 전면에서 CO 및 OH가 최대값을 가지고 반응하며, 최고 온도 지역을 지나서도 반응이 계속된다. 체류시간에 민감하며, 주로  $CO+OH=CO_2+H$ 의 반응경로를 통하여 진행된다. CO 산화 반응은 연소기 전체에 걸쳐서 나타나는 전체 화염 구조에 의존하기보다는 고온 화염 형태에 더 크게 영향을 받는다고 할 수 있다.

산란율의 증가는 모든 경우 화염전파속도의 감소를 초래하므로 체류시간이 증가한다. 상류 산란율의 증가에 따른 CO 배출의 민감도는 하류의 산란율 증가에 의한 CO 배출 감소의 민감도에 비하여 더 크다. 이것은 하류 산란율의 증가시 화염 전면의 온도가 더욱 감소되어 화염전면에서 활발한 CO의 산화반응이 더 활발히 진행되기 못하기 때문이다. 하류 산란율의 증가시 하류에서 온도가 증가하여도 하류에서의 CO 산화반응은 화염면 영역에 비하여 활발하지 못하기 때문에 큰 영향을 끼치지 못한다. 이에 반하여 세라믹 열전도율의 증가는 체류시간의 감소를 초래하고, 이에 따라 CO의 배출은 증가한다.

다공 세라믹 연소기에서 NO 생성 및 배출은 특이한 화염구조로 인하여 화염의 최대온도 이후의 좁은 영역에서 생성되는 양이 대부분을 차지한다.<sup>(8)</sup> 따라서 NO 배출의 민감도는 화염의 최대온도 및 화염 바로 하류의 온도 분포 형태에 매우 민감하게 변화한다. 따라서 화염의 최대 온도에 크게 영향을 주는 상류로의 열전달 양의 변화 및 화염 하류의 온도 분포에 영향을 끼치는 인자에 따라 그 생성량이 달라진다. 시험된 모든 인자들에 중에서 산란율 변화에 가장 크게 영향을 받는다. 상류의 산란율 증가는 화염 상류 온도 및 화염온도를 낮추며 하류의 온도 감소를 초래하여, 체류시간의 증가에도 불구하고 NO 배출의 감소를 나타낸다. 이에 비하여 하류 산란율 증가는 화염전면으로의 복사열전달량을 감소시켜 화염전면의 온도가 낮아지므로 NO의 생성이 억제되지만, 하류에서는 온도 증가를 초래함으로써 민감도 계수의 절댓값이 작아짐을 알 수 있다.

## 5. 결 론

일차원 자유전파 예혼합화염 모델 및 상세화학반응 메커니즘을 이용한 수치해석을 통하여 다공 세라믹 연소기 속에서 예혼합기의 연소에 대한 수치해석을 행하였다.

여러 세라믹 물성치들을 인자로 하여 계산을 수행하여 기본적인 화염 구조를 먼저 알아보고, 사용한 화학반응에 대한 민감도 해석을 하였다. 세라믹의 열전도율, 소멸계수 및 산란율에 대한 민감도 해석을 통하여 화염 구조, NO 및 CO의 배출에 영향을 끼치는 중요한 인자들을 정성적으로 알아보았다. 이를 통하여 세라믹 물성의 변화에 따른 화염의 구조 및 화염 거동을 예측할 수 있었다. 여러 세라믹 물성 중에서 다공 세라믹 연소기 속에서의 화염 구조 및 연소기 성능에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 화염 상류 및 하류로의 복사열전달에 큰 영향을 끼치는 산란율이며, 소멸계수, 열전도율의 차례로 중요성이 줄어든다.

민감도 해석을 통하여 고온 화염대에서의 화염 구조가 NO 및 CO의 발생에 큰 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 NO 및 CO 생성 및 소멸 반응이 화염대에서 주로 진행되는 것에 기인한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비(과제번호: 961-1006-051-2) 지원을 받은 연구 결과의 일부입니다.

## 참고문헌

- (1) Churchill, S. W., 1989, "Thermally Stabilized Combustion," *Chem. Eng. Tech.* Vol. 12, pp. 249~254.
- (2) Hardesty, D. R. and Weinberg, F. J., 1974, "Burners Producing Large Excess Enthalpy," *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 8, pp. 201~214.
- (3) Andersen, F., 1992, "Heat Transport Model for Fibre Burners," *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 18, pp. 1~12.
- (4) McIntosh, A. C. and Prothero, A., 1991, "A

- Model of Large Heat Transfer Surface Combustion With Radiant Heat Emission," *Combustion & Flame* Vol. 83, pp. 111~126.
- (5) Hsu, P. -F., J. R. Howell, and R. D. Matthews, 1991, "Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media," *Proceedings ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.* Vol. 4, pp. 225~231.
- (6) Baek, S. W., 1989, "The Premixed Flame in a Radiatively Active Porous Medium," *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 64, pp. 277~287.
- (7) Sathe, S. B., Peck, R. E., and Tong, T. W., 1990, "Flame Stabilization and Multimode Heat Transfer in Inert Porous Media : A Numerical Study," *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 70, pp. 93~109.
- (8) Lim, I. G., 1992, "A Numerical Study of Combustion within a Porous Inert Medium Burner," Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering Dept., The Univ. of Texas at Austin.
- (9) Sathe, S. B., Kulkarni, M. R, Peck, R. E., and Tong, T. W., 1989, "An Experimental Analysis of Combustion and Heat Transfer in Porous Radiant Burner," *1989 Fall Meeting of the Western States Sections of the Combustion Institute.*
- (10) Evans, W. D., 1991, "Experimental Stability Limits of Methane Combustion inside a Porous Ceramics Matrix," M. S. Thesis, Mechanical Engineering Dept., Univ. of Texas, Austin.
- (11) High-Tech Ceramics Product Literature (1992), High-Tech Ceramics Co., Alfred, NY.
- (12) Lim, In-G. and Chung, S. H, 1996, "Experimental Investigation of Premixed Combustion within a Porous Medium Burner : Transient Behavior and Control of Flame," *3rd Asian-Pacific Int'l Symp. on Combustion and Energy Utilization*, Hong-Kong.
- (13) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1985, "A FORTRAN Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flames," Sandia National Lab., SAND85-8240.
- (14) Özisik, M. N, 1973, "Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection," Wiley.
- (15) <http://www.gri.org>.
- (16) Kee, R. J., J. A. Miller, and T. H. Jefferson, 1980, "CHEMKIN: A General Purpose Problem-Independent, Transportable, FORTRAN, Chemical Kinetic Program Packages," Sandia National Lab., SAND80-8003.
- (17) Kee, R. J., G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin, and J. A. Miller, 1986, "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multi-component Transport Properties," Sandia National Lab., SAND86-8246.
- (18) Coffee, T. P. and J. M. Heimerl, 1983, "Sensitivity Analysis for Premixed, Laminar, Steady State Flames," *Combustion & Flame*, Vol. 50, pp. 323~340.
- (19) 임인권, 1995, "다공 세라믹 연소기의 NOx 및 CO 배출 특성," *대한기계학회논문집*, 제19권 제2호, pp. 559~567.