

## 서로 다른 물성치로 이루어진 다공 세라믹 연소기 속에서의 예혼합화염 연소에 대한 수치해석 연구

임 인 권\*

### Numerical Study of Premixed Combustion within a Porous Ceramic Burner of Different Ceramic Properties

Lim, In-Gweon\*

Key Words : Porous Ceramic Burner (다공세라믹 연소기), Premixed Combustion (예혼합연소),  
Numerical Simulation (수치모사), Flame Stability (화염안정성)

#### Abstract

Premixed combustion within porous ceramic media is numerically studied to understand burning characteristics and to find best configurations for burner implementations. Among many parameters, critical to burner performance, flame location and extinction coefficient are selected as major parameters for this study. The flame structure and burner performance with respect to these two parameters are observed. In the study, it is found that the location of flame is the most important in porous burner operation since it affects the rate of heat transfer and flame structure. Stability of the flame within the porous ceramic burner is discussed with respect to the flame location. It is found that to obtain high radiative output, the flame should be located downstream section of the burner. But the flame is to be unstable at most of downstream section except near the exit plane.

To overcome this problem, new porous ceramic burner, using different ceramic properties in one burner instead of single property ceramic, is made and tested. With a combination of ceramics of high extinction coefficient at upstream and another material of low extinction coefficient at downstream of the burner, the flame can be stabilized at wider region of the burner with higher radiative output compared to the original burner configuration.

#### 1. 서 론

주로 세라믹 물질의 폼(foam) 형태로 만들어진 다공물질 연소기에서의 연소 형태는 특이한 열제순환 현상에 의해서 다른 방법을 통한 연소시 볼 수 없는 초과엔탈피 연소현상이 쉽게 구현되며, 독특한 화염 구조가 나타난다<sup>(1-6)</sup>. 고온 연소 가스에 의하여 가열된 화염 후방의 세라믹은 전도 및 복사열전달을

통하여 화염 상류 및 하류의 세라믹을 가열시키고, 가열된 상류의 세라믹은 대류 열전달을 통하여 미연 혼합기를 가열시킨다. 세라믹의 선정 및 운전 조건 등이 적절한 경우 연소가 다공 세라믹의 외부에서 진행되는 경우에 비하여 단일화염온도보다 높은 최대 화염온도를 가질 수 있으며, 이에 따라 연소시키기 어려운 저 발열량의 연료 및 희박 혼합기의 연소가 가능하다. 또 화염은 세라믹 속에서 일차원 형상을 가지며 모든 혼합기가 화염면을 통과해야 함으로 미연 탄화수소(UHC)의 발생이 매우 적다는 장점 및

\*정회원, 명지대학교 기계공학과

화염 하류지역의 고온 연소가스는 상류로의 열전달과 하류 및 연소기 출구로의 열전달에 의하여 온도가 감소하므로 고온하의 체류시간에 민감한 질소산화물의 생성을 억제시킬 수 있다는 장점 등을 가지고 있다. 여러 연구자들의 연구를 통하여 다공 세라믹 연소기 속에 화염이 존재할 때 화염전파속도의 증대, 가연 한계의 확대, 청정 연소, 연소 제어의 용이함 및 운전의 편이성 등 여러 가지 장점들이 밝혀져 왔다.

최근 높은 열충격에도 견딜 수 있는 고온용 세라믹의 개발<sup>[7]</sup> 등으로 인해서 실용적인 연소기 개발의 가장 큰 애로 사항은 사라지고 있으나, 화염이 다공 세라믹 연소기 속에 존재하는 형태를 가지는 진정한 의미의 다공 세라믹 연소기의 개발은 아직 제한적이다. 다공 세라믹 연소기에 대한 기본 개념 정립 및 관련 연구들이 이미 오래 전부터 행해졌다는 사실에 비추어, 이러한 사실은 매우 특이하다고 할 수 있다.

이는 다공 세라믹 연소기 속에서 일어나는 화학반응, 열전달 및 유동 등의 현상들에 대한 이해가 어렵기 때문이다. 다공 세라믹 연소기의 경우 세라믹 재질 및 형상, 연소 조건, 입구 및 출구의 복사조건, 세라믹의 배열 및 화염 위치에 따라서 화염 구조가 달라지고, 특히 연소기 내 화염 위치는 연소 형태에 큰 영향을 미치나, 연소기 속 화염의 직접적인 계측이 불가능하기 때문이다. 다공 세라믹 물질 속에서 연소시 화염전파속도에 대한 정의 또한 모호하므로 실험적 연구를 통한 화염 구조 및 연소기 성능 예측에는 한계가 있다<sup>[8]</sup>.

실제 연소기의 개발 연구를 위해서는 여러 운전 조건 및 재질의 세라믹 물성치에 따라 화염 구조 변화 및 연소 상태를 예측하여야 하며, 이를 통해 최적 연소가 가능한 다공 세라믹 재질 및 연소 조건 등이 선정되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 상세화학반응 메커니즘을 포함한 화염전파모델을 이용한 수치해석 연구를 통하여 다공 세라믹 속에서 예혼합 연소가 진행될 때 화염 구조 및 연소기 특성을 알아 보았다. 특히 일체형 다공물질로 된 세라믹 연소기에서 화염 위치 및 세라믹 재료의 복사 물성치에 따른 화염구조, 연소 안정성 및 복사열전달 효율 등을 알아보고, 연소기 성능 개선을 위한 방법으로 서로 다른 물성치의 세라믹이 결합된 방식의 다공 세라믹

연소기에서 화염 위치 및 다공세라믹 물성치에 따른 변화를 알아보았다.

## 2. 다공 세라믹에서의 연소 모델

다공 세라믹 연소기 속에서 화염전파는 일차원 자유전파 예혼합 화염(One-dimensional freely propagating premixed flame)으로 모델되고, 가스과 고체 세라믹 사이의 대류열전달, 세라믹의 전도열전달, 세라믹 및 외부 경계에 대한 복사열전달 현상을 반영하기 위해서 PREMIX 프로그램을 수정하였다<sup>[9]</sup>. 이 프로그램에 관련된 사항, 지배방정식 및 계산에 사용된 가정들은 이미 알려져 있으므로 여기서는 생략한다.

고체 세라믹의 복사열전달 계산에는 흡수, 방사와 등방(Isotropically)으로 산란하는 물질에 대한 Two-flux 복사 모델을 사용하였고<sup>[10]</sup>, 이에 따른 총복사 열유속(Net radiative heat flux) 및 이의 미분항은 다음과 같다.

총복사 열유속 :

$$q^r(\tau) = 2\pi [I^+(0)E_3(\tau) - I^-(\tau)E_3(\tau_0 - \tau) + \int_0^\tau S(\tau')E_2(\tau - \tau')d\tau' - \int_\tau^{\tau_0} S(\tau')E_2(\tau' - \tau)d\tau'] \quad (1)$$

총복사열유속 미분 :

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

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 각각 의미한다. 소스항  $S(\tau)$  은 흡수, 방사와 등방(Isotropically)으로 산란하는 물질에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(\tau) = (1-\omega)I_b[T(\tau)] + \frac{1}{2}\omega[I^+(0)E_2(\tau) + I^-(\tau_0)E_2(\tau_0-\tau) + \int_0^{\tau_0} S(\tau')E_1(|\tau-\tau'|)d\tau'] \quad (3)$$

산란율( $\omega$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{k_{sca}}{k_{abs.} + k_{sca}} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \text{입구}(x=-L) \quad T_g &= T_o(298K) \\ Y_k &= Y_{ko} \\ I^+(x=-L) &= \frac{\sigma T_o^4}{\pi} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{출구}(x=+L) \quad I^-(x=+L) = \frac{\sigma T_{bc}^4}{\pi} \quad (6)$$

이며, 연소기의 입구 및 출구는 298 K의 흑체와 복사 열전달을 한다고 가정하였다.

대기압하 당량비  $\phi=1.0$  인 메탄/공기 예혼합기 가 길이가 6 cm 인 연소기 속에서 연소되는 경우에 대하여 화염의 위치는 온도가 900 K 가 되는 점으로 하였다. 본 연구에서는 279개의 반응단계 및 49개의 화학종으로 구성된 GRI (Gas Research Institute) 상 세화학반응 메커니즘을 사용하였다<sup>[11]</sup>.  $C_1$  및  $C_2$  의 반응 경로와  $NO_x$  관련 반응들을 포함하고 있는 이 반응메커니즘은 천연가스 화염 연구를 위해서 만들어진 것으로 화염 구조 및 반응물의 예측이 매우 정확하다고 알려져 있다. 화학종의 상태 및 전달 물성치들은 CHEMKIN-II<sup>[12]</sup> 및 Transport Package<sup>[13]</sup> 를 이용하여 계산하였다.

모델 연소기의 세라믹 재질은 10 ppi (pore per inch)의 부분 안정된 지르코니아 (PSZ : partially stabilized zirconia) 로 관련되는 다공 세라믹 물성치들은 Table 1 에 나타나 있다.

Table 1 Properties of porous ceramic material

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Solid thermal conductivity ( $k_s$ ) | 2.2 W/m-K                  |
| Scattering albedo ( $\omega$ )       | 0.8                        |
| Extinction coefficient ( $\kappa$ )  | 150~350 1/m                |
| Porosity                             | 0.87                       |
| Effective conduction area            | 0.07/Area                  |
| Heat transfer coefficient            | $10^7$ W/m <sup>3</sup> -K |

위의 주어진 여러 물성치 중 다공 물질 세라믹 연소기에 대한 수치해석에서 가장 중요하다고 알려진 소멸계수에 대해서만 연구를 진행하였다. 복사열전달에서 복사에너지의 흡수와 산란에 의한 복사강도의 감소를 나타내는 소멸계수의 값을 한정시키지 않고 본 연구에서는 약 200 1/m 를 기준으로 하여 넓은 범위에 대하여 변화시켰다. 이는 최근까지의 복사 물성치 측정에 관한 연구 결과에 따른 것이다<sup>[14, 15]</sup>.

### 3. 결과

화염 위치에 따라서 화염 구조 및 연소 특성 등이 변화하지 않고 일정한 일차원 자유전파화염의 경우와 다르게, 다공 세라믹 연소기에서는 화염 위치에 따라 열전달 형태가 변화하여 화염구조 및 연소특성이 달라진다. Fig. 1 은 소멸계수 200 1/m 일 때의 단일 물성치를 갖는 일체형 세라믹 연소기의 상류, 중간 및 하류에 화염이 위치할 때, 연소기 내 온도 분포를 나타내고 있다. 위치에 따른 예열 정도에 따

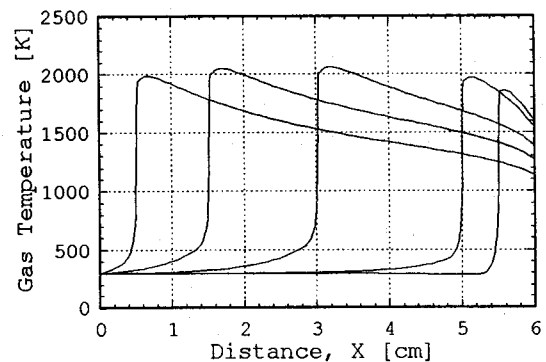


Figure 1 Gas temperature at various flame locations with extinction coefficient of 200 1/m.

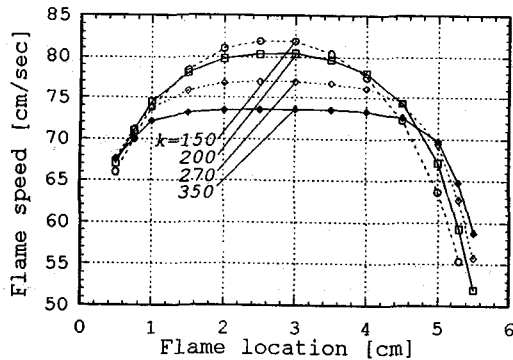


Figure 2 Flame speed at different flame positions w. r. t. various extinction coefficients

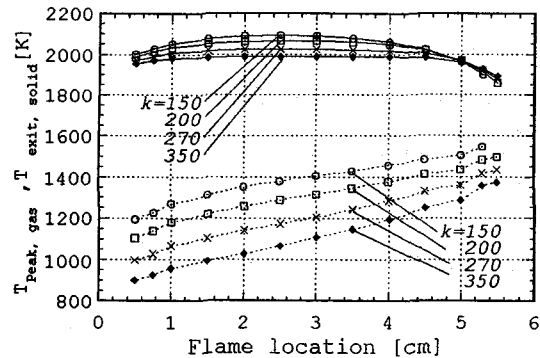


Figure 3 Peak gas and exit solid temperature at different flame locations w. r. t. extinction coefficient

라 화염 구조가 달라지며, 화염 최대온도 및 화염 후방의 온도 분포가 달라짐에 따라서 NOx 등의 분포가 달라진다.

### 3.1. 일체형 다공 세라믹 연소기에서의 화염 위치에 따른 연소기 특성

Fig. 2 는 다공 세라믹 연소기에서 화염 위치 및 소멸계수에 따른 화염전파속도를 나타낸 것이다. 연소율과 관련되는 화염전파속도는 연소기 중간에 화염이 위치할 경우 가장 큰 값을 가지며, 중앙 부분에서 멀어질수록 감소한다. 이것은 화염위치가 연소기 중앙 부분에서 멀어질수록 입구 및 출구를 통한 열손실이 증가하여 화염온도가 감소하기 때문이다. 그렇지만 연소기 전체 세라믹의 소멸계수가 커짐에 따라, 위치에 따른 화염전파속도의 변화는 줄어들고 연소기의 입구 및 출구 쪽에서만 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 화염이 입구 및 출구에서 어느 정도 떨어져 있고 소멸계수가 큰 경우, 입구 및 출구를 통한 복사 열손실이 감소되고 외부의 영향이 최소화되어 연소기의 상당한 영역에서 거의 일정한 전파속도를 갖는다.

Sathe 등<sup>[5]</sup>의 연구에서 알려진 바와 같이 다공 물질 연소기에서는 화염이 연소기의 상류부분과 연소기 하류 출구 쪽에 존재할 경우, 즉 화염위치에 대한 화염전파속도의 기울기가 양 ( $du/dx > 0$ )의 값을 가질 때에만, 안정된 연소가 가능하다. Fig. 2 에서 연소기 상류 부분 ( $x \leq 3 \text{ cm}$ )에서만 화염위치에 대한 화염전파속도의 기울기는 양(+ )의 값을 가지

며, 이 영역에서만 안정된 연소가 가능하다고 할 수 있다. 또 화염위치에 대한 화염전파속도의 기울기가 음(-)의 값을 가지는 영역에서의 연소 불안정성은 연소기의 소멸계수가 감소할수록 증가된다는 것을 알 수 있다. 높은 소멸계수를 가지는 세라믹 연소기의 경우 입구 및 출구에서 거리가 있는 경우 자유전파 화염과 같이 화염위치에 따른 전파속도의 변화 ( $du/dx \sim 0$ )가 적고 넓은 영역에 걸쳐 연소가 가능할 수도 있지만, 이 경우 연소율 및 연소율의 변화가 매우 제한된다.

Fig. 3 는 화염위치에 따른 최대화염온도 및 세라믹의 출구온도를 소멸계수에 대하여 나타내었다. 화염온도는 화염 상류로의 예열 효과에 의하여 지배되므로, 복사를 통한 예열 효과가 가장 크게 나타나는 작은 소멸계수의 세라믹 연소기에서 최대 온도가 가장 높게 나타난다. 출구에서 복사열전달에 상당한 영향을 끼치는 출구 세라믹의 온도는 고온 화염 지역으로부터의 복사에 가장 민감하며, 이를 지배하는 것은 다공 세라믹의 소멸계수이다. Fig. 4 는 서로 다른 소멸계수의 세라믹 연소기에서 같은 위치에 존재하는 화염들의 온도분포를 나타내고 있다. 소멸계수가 작은 경우 복사 열전달을 통하여 열의 분산 효과가 커짐에 따라 온도 분포의 변화는 적게 나타나고, 높은 소멸계수의 경우 복사 열전달의 영역이 제한됨으로 인하여 온도분포의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 이에 따라서 복사 효율을 지배하는 연소기 출구 쪽 세라믹의 온도 분포도 영향을 받는다.

Fig. 5 은 다공 세라믹 연소기의 실용화 과정시 중

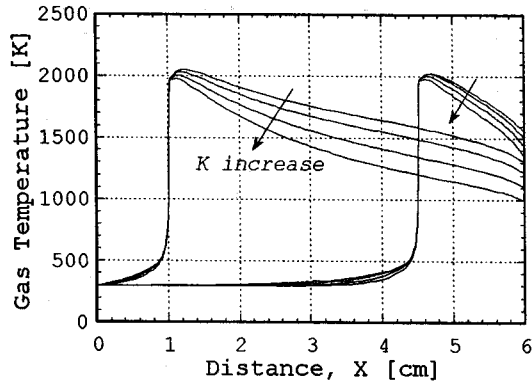


Figure 4 Gas temperature at different flame locations and different extinction coefficient

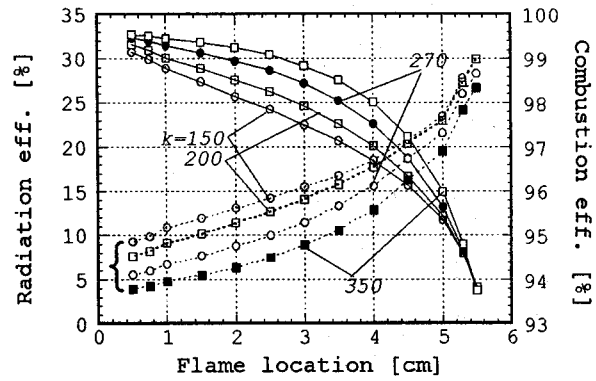


Figure 5 Combustion and radiation efficiency at various flame locations

요한 복사열전달 효율 및 연소효율을 화염 위치에 대하여 나타내었다. 연소 효율은 화염 위치가 연소기의 입구 쪽에 가까울수록 증가하고 멀어질수록 감소함을 알 수 있고, 같은 위치에 존재하는 경우 연소기의 소멸계수가 작은 경우 더 낮아짐을 알 수 있다. 이는 화염이 연소기의 출구 쪽에 가까울수록 연소

체류시간이 감소함에 기인한다. 또 같은 위치에서 소멸계수에 대하여 연소효율이 달라지는 것은 화염온도가 높더라도 화염전파속도가 증가하여 체류시간이 감소하기 때문이다.

연소엔탈피 중에서 복사열전달을 통하여 배출되는 양으로 정의되는 출구 복사효율은 다른 연구자에 의해서 연구된 결과와 비슷하게 화염 위치에 따라 약 10% 에서 30% 정도의 값을 가지며<sup>(13)</sup>, 화염위치가 출구 쪽에 가까울수록 그리고 소멸계수가 작아 복사열전달을 통한 열분산의 효과가 커질수록 크게 나타난다.

Fig. 6 은 화염 위치에 따른 NOx 및 CO 배출량을 ppm 및 배출계수를 통하여 나타내었다. 연소 체류시간에 민감한 CO의 생성 및 배출은 연소 효율과 같은 형태로 변화한다는 것을 알 수 있고, 화염 위치가 연소기 출구 쪽에 가까워질수록 반응에 필요한 시간의 감소로 인하여 그 배출량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 다공 세라믹 연소기에서 질소산화물 배출은 화염 하류에서의 온도 감소로 인하여 체류시간에 거의 무관하게, 화염온도에 지배된다. 소멸계수에 따라 전파속도는 변화하지만 최대화염온도가 거의 일치하는 경우인, 출구 쪽 ( $x = 5.0 \text{ cm}$  부근)에 화염이 위치할 때 체류시간에 관계없이 거의 일정한 NOx의 배출을 나타내고 있음을 알 수 있다. 여러 위치 중 최대화염온도를 나타내는 연소기 중앙부근에서 최대 값을 가짐을 알 수 있고, 멀어질수록 생성 및 배출되는 양이 감소한다.

일체형 단일 재질로 된 다공 세라믹 연소기에서

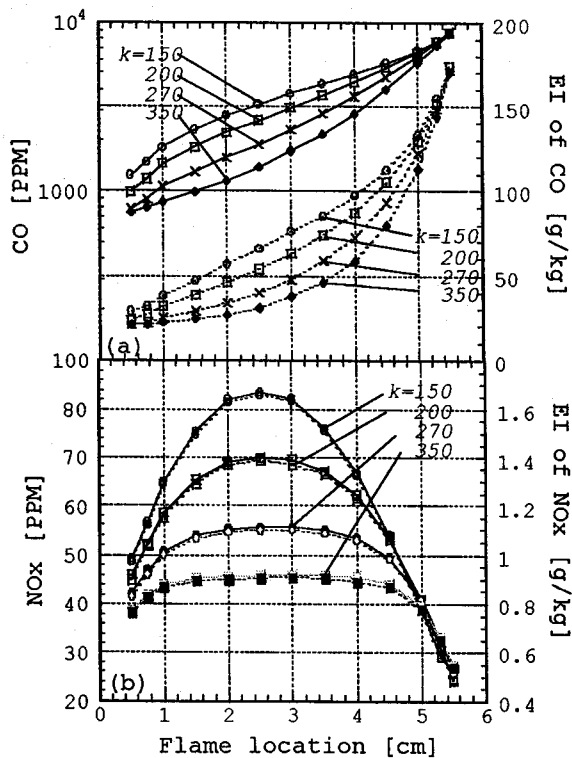


Figure 6 Emission of CO and NOx at various flame locations (dotted line : Emission index)

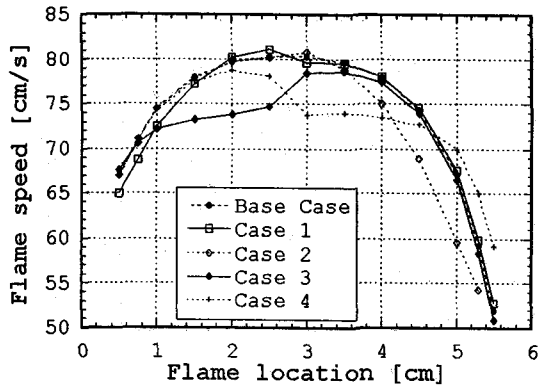


Figure 7 Flame speed at various locations for different ceramic combinations

화염 위치 및 소멸계수의 변화에 따른 전파속도, 안정 연소 영역, 복사 효율 등의 특성을 알아보았다. 다공 세라믹 연소기에서 안정연소, 연소속도의 증대 및 복사효율의 증대를 위한 화염 위치는 서로 상충되는 것을 알 수 있다. 즉 안정된 연소, 연소속도의 최대화, 연소효율의 최대를 위해서는 화염이 연소기 중앙 또는 상류 쪽에 위치하여야 하고, 복사 효율 증대를 위해서는 화염이 연소기의 출구 쪽에 위치하여야 한다. 화염이 연소기 중앙 및 상류 쪽에 위치할 경우 복사 효율은 화염이 연소기 출구 쪽에 위치하는 경우에 대하여 약 1/2 에서 1/3 정도로 감소되는 것을 알 수 있다. 이 경우 안정된 화염이 존재한다는 가정 하에 복사효율이 얻어진 것으로서, 실제 안정된 연소 상태가 지속될 수 없는 상태인 연소기 하류 쪽에서의 복사는 무의미하다고 할 수 있다. 그렇지만 본래 다공 세라믹 연소기에서 세라믹 물질의 높은 방사율을 이용한 복사 열전달 및 출구에서의 높은 복사효율을 얻고자 하는 것이 주요한 목표임을 생각할 때, 출구에서 높은 복사효율 및 연소기 내 화염 안정화가 동시에 가능한 연소기의 개발은 매우 의의가 있다고 할 수 있다.

### 3.2. 서로 다른 물성치를 가지는 다공 세라믹 연소

기에서의 화염 위치에 따른 연소기 특성

연소기의 출구 가까운 곳에 화염이 위치하여 높은 복사효율 및 화염 안정화가 동시에 가능한 연소 형태가 가능한지를 알아보기 위하여 개념적인 연소기 형태에 대하여 화염 위치에 따른 다음 계산을 수행

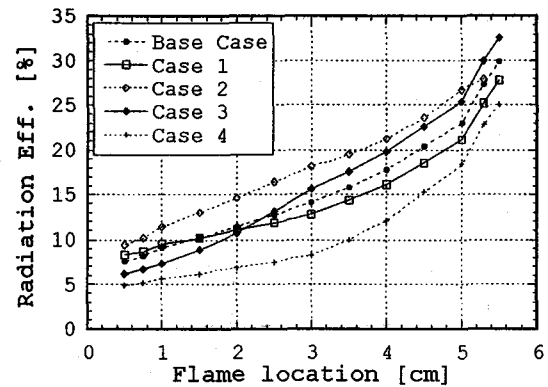


Figure 8 Radiation efficiency at various locations for different ceramic combinations

하였다. 앞에서 이용한 연소기의 기본 형태에 대하여  $x = 0.0 \text{ cm}$  을 기준으로 상류 및 하류를 서로 다른 소멸계수를 가지는 세라믹으로 교체하였다. 시험된 연소기의 조합 형태는 다음의 네 가지 경우이며, 이들의 소멸계수의 조합은 표 2 와 같다. 다른 세라믹의 접합부분인 경계  $x = 0.0 \text{ cm}$  에서의 접촉저항에 의한 열전도의 변화를 고려하기 위해서 세라믹 전도 열전달계수의 값을 기본 값의 1/10 으로 변경하였고, 복사물성치의 변화는 복사열전달 계산과정에서 고려되기 때문에 다른 조건을 적용시키지 않았다.

Fig. 7 은 표 2 에 나타낸 경우에 대한 화염위치에 따른 화염전파속도를 나타내 것이다. 기본 경우에 대하여 상류 세라믹의 소멸계수를 변화시킬 때, 화염 전파속도는 전체적으로 낮아진다는 것을 알 수 있다. 화염이 중앙부근에 위치한 경우를 제외하고, 소멸계수의 값이 작아질 때, 즉 복사열전달의 영역이 커질 때는 화염에서 연소기 입구로의 열손실이 증가하여 전파속도가 감소하고, 소멸계수의 값이 커질 때는 화염 전면으로의 복사 열전달의 영향이 줄어들고 예열

Table 2 Cases tested

|           | Upstream<br>Extinction Coeff.<br>(1/m) | Downstream<br>Extinction Coeff.<br>(1/m) |
|-----------|--|--|
| Base case | 200                                    | 200                                      |
| Case 1    | 120                                    | 200                                      |
| Case 2    | 200                                    | 120                                      |
| Case 3    | 350                                    | 200                                      |
| Case 4    | 200                                    | 350                                      |

효과가 감소되어 전파속도가 낮아진다. 하류 소멸계수 값에 따라서 화염전파속도는 감소 또는 증가한다. 화염이 출구에 가깝게 존재시 하류 소멸계수 증가는 열손실의 감소를 통하여 전파속도를 증가시키지만, 화염이 출구에서 먼 경우 또는 소멸계수의 감소는 화염전파속도를 감소시킨다. 화염이 안정하게 존재할 수 없는 하류 부근에서의 연소상태를 제외하면, 시험된 모든 경우에 대하여 화염전파속도가 감소되는 경향을 가진다고 할 수 있다. 그렇지만 3 의 경우 화염 전파속도의 감소를 나타내지만 화염 위치에 대한 화염전파속도의 기울기가 양이 되는 영역, 즉 안정연소 영역이 확장되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 은 표 2 에 나타낸 경우에 대한 화염위치에 따른 복사효율을 나타내 것이다. 기본 경우에 대하여 연소기 하류의 소멸계수가 감소된 경우(case 2) 또는 상류의 소멸계수가 증가된 경우 (case 3) 복사 효율이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 연소기 입구 쪽으로의 복사 열전달의 감소 및 하류로의 복사 열전달 증가의 경우에 해당된다.

앞의 Fig. 7 과 8 에서 기본 경우에 대하여 연소기의 상류에는 높은 소멸계수를 가지는 세라믹 물질을, 하류에는 낮은 소멸계수의 세라믹 물질을 위치시킬 경우 기존 연소기보다 넓은 안정 연소 영역 및 복사 효율을 증대시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

상세화학반응 메커니즘을 포함한 화염전파모델을 이용한 수치해석 연구를 통하여 다공 세라믹 속에서 예혼합연소가 진행될 때 화염 구조 및 연소기 특성을 알아보았다. 특히 일체형 다공물질로 된 세라믹 연소기에서 화염 위치 및 세라믹 재료의 복사 물성치에 따른 화염구조, 연소 안정성 및 복사열전달 효율 등을 알아보고, 연소기 성능 개선을 위한 방법으로 서로 다른 물성치의 세라믹이 결합된 방식의 다공 세라믹 연소기에서 화염 위치 및 다공세라믹 물성치에 따른 변화를 알아보았다. 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 화염의 위치가 다공 세라믹 연소기의 성능에 큰 영향을 미치고, 화염의 안정하게 연소될 수 있는

영역에서의 연소기 출구 복사열전달 효율은 상당히 감소된다.

- (2) 복사열전달 효율의 증대를 위해서는 화염의 위치가 출구 쪽에 가까워야하며, 이 때 생기는 화염 안정화의 문제는 다른 복사 물성치를 갖는 세라믹들의 조합을 통해서 어느 정도 해결할 수 있다. 본 연구에서 시험된 것과 같은 연소기 상류에는 높은 소멸계수의 세라믹과 하류에는 낮은 소멸계수의 세라믹을 사용한 연소기 조합 등을 통하여 복사효율의 증진 및 화염 안정화 영역의 확장을 동시에 얻을 수 있다.
- (3) 복사효율의 증진 및 화염 안정화 영역 확장을 위한 완전한 세라믹 물성치의 조합을 얻기 위해서는 여러 종류 이상의 다공 세라믹의 조합을 통해서도 얻을 수 있으리라 사려된다.

#### 참고문헌

- (1) Hardesty, D. R. and Weinberg, F. J., 1974, "Burners Producing Large Excess Enthalpy," *Combustion Sci. & Tech.* 8: 201-214.
- (2) Andersen, F., 1992, "Heat Transport Model for Fibre Burners," *Progress in Energy and Combustion Science* 18: 1-12.
- (3) Hsu, P.-F., J. R. Howell, and R. D. Matthews, 1991, "Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media," *Proceedings ASME / JSME Thermal Eng. Joint Conf.* 4: 225-231.
- (4) Baek, S. W., 1989, "The Premixed Flame in a Radiatively Active Porous Medium," *Combustion Sci. & Tech.* 64: 277-287.
- (5) 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.* 70: 93-109.
- (6) 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.

- (7) High-Tech Ceramics product literature (1992), High-Tech Ceramics Co., Alfred, NY.
- (8) 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.
- (9) Kee, R. J., J. F. Grcar, M. D. Smooke, and J. A. Miller, 1985, "A FORTRAN Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flames," Sandia National Lab., SAND85-8240.
- (10) Özisik, M. N, 1973, "Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection," Wiley.
- (11) <http://www.gri.org>.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Mital, R, J.P.. Gore, and R. Viskanta, 1996, "Measurement of Radiative Properties of Cellular Ceramics at High Temperatures," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, V. 10 No. 1, pp. 33-38.
- (15) Hsu, P.F. and J.R. Howell, 1992, "Measurement of Thermal Conductivity and Optical Properties of Porous Partially Stabilized Zirconia," Experimental Heat Transfer, V. 5 pp. 293-313.

## 후기

본 연구는 명지대학교 교내 학술연구비의 지원에 의해 수행된 연구의 일부입니다.