

다공판 내의 예혼합연소 특성 해석

신영준* · 이정원* · 김용모***

Simulations of premixed combustion in porous media

Youngjun Shin*, Jeongwon Lee*, Yongmo Kim***

ABSTRACT

This study has numerically investigated the combustion processes in the bilayer porous media. To account for the velocity transition and diffusion influenced by solid matrix, porosity effects are included in the governing equations. Heat transfer coefficient is calculated by Nusselt number to reflect the effect of gas velocity, pore diameter, and material properties. Numerical results indicate that the present approach is capable of the essential features of the premixed combustion in the porous burner, in terms of the precised flame structure, pollutant formation, and flame stabilization. It is also found that heat transferred from the downstream flame zone is conducted to the upstream flame region through the solid matrix and the preheated mixture. By increasing the inlet velocity, the solid temperature of upstream is cooling down.

Key Words : Porous burner, Premixed combustion, Numerical simulation

다공성 버너(Porous burner)는 다른 예혼합 버너에 비해 낮은 당량 비에서의 연소가 가능하며, burning rate가 높고 화염이 안정적이라는 장점이 있다. 또한, 버너의 소형화가 가능하고, 화염이 짧아 고온에 노출되는 시간을 줄일 수 있어 NO_x배출이 적으며, CO의 residence time을 증가시켜 CO의 발생을 줄일 수 있다는 장점으로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 두층으로 구성되어있는 porous burner에서의 화염 구조를 2차원으로 확장하여 살펴보았다. 저 마하수 반응유동장 해석에서 속도와 압력의 coupling은 PISO 알고리즘을 이용하여 처리하였고, 모든 지배방정식에 porosity를 고려하여, 기체와 고체가 차지하는 비율에 따라 변하는 대류와 확산의 영향을 추가하였다. 또한 복사열전달은 diffusion approximation[3]을 사용하여 모델링하였고, 기체유속과 porous media의 구조 및 물성에 따라 변하는 고체와 기체간의 열전달 효과를 고려하기 위하여, 열전달계수는 gas의 Nusselt 수와 고체상의 전도계수, 그리고 격자구멍의 지름을 이용한 식(6)을 통하여 계산하였다. Validation case로 Liu[1], Barra[2]의 논문과 비교하여 수치 및 물리 모델을 검증하였으며 inlet veloci-

ty에 따른 온도 특성과 stable range 밖의 영역에서의 화염 특성을 살펴보았다.

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_j u_i) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu\epsilon \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \\ = -\frac{\partial(\epsilon P)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu\epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g \epsilon h_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g \epsilon u_i h_g) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon \frac{k}{c_p} \frac{\partial h_g}{\partial x_i}) \\ = -\epsilon \sum_j \dot{\omega}_j h_j W_j + h_v(T_s - T_g) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial((1-\epsilon)\rho_s C_s T_s)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i}((1-\epsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i}) \\ = h_v(T_s - T_g) + \nabla q \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g \epsilon Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \epsilon u_j Y_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_{Y_i} \epsilon \frac{\partial Y_i}{\partial x_i}) \\ = \epsilon \dot{\omega}_i W_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$h_v = \frac{N_v k_c}{l_c^2} \quad (6)$$

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

† E-mail : ymkim@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2220-0428 Fax : (02)2297-0339

where,

ϵ -porosity k_c -conductivity
 h_c -heat transfer coef l_c -pore diameter
 Nu_c -Nusselt number q -radiation

Table 1 Bilayer solid property

	Upstream	Downstream
Pore Diameter	0.029 cm	0.152 cm
Porosity	0.835	0.87
Conductivity	0.2 W/mK	0.1 W/mK
Density	510 kg/m ³	
Specific heat	824 J/kgK	

기본 조건으로 지름 7cm관에 당량비 0.65의 methan air로 입구속도 0.6m/s로 주었다.

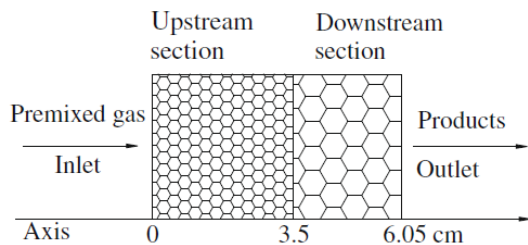


Fig. 1 Diagram of the physical model(H. Liu et al.[1])

상류는 inlet gas를 preheating역할을 하는 diff user layer(DL) 하류는 화염이 위치하는 flame support layer(FSL)이다. 전체적으로 관내 유동이 발달함에 따라 유속이 증가하게 되며 하류가 상대적으로 porosity가 커서 continuity와 momentum식을 만족하기 위해 유속이 감소하게 된다.

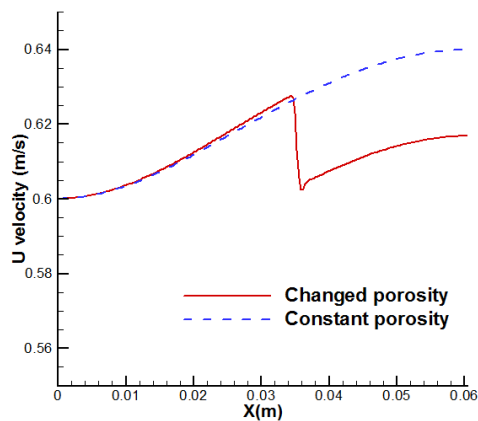


Fig. 2 Unburned mixture velocity profile in normal pipe and the bilayer porous media pipe

기존 논문과 비교해보면 이차원논문[1]에 비해 pick온도가 다르다는 것을 알 수 있다. 비교 논문에서 사용한 one-step, 본 논문의 GRI1.2 detailed mechanism의 차이에서 발생한 결과이다. 일차원 논문[2]과의 차이는 radiation과 boundary condition이 다르기 때문이다. 하지만 세 결과 모두 유사한 경향을 나타내며, 후류의 온도는 거의 동일하다고 할 수 있다.

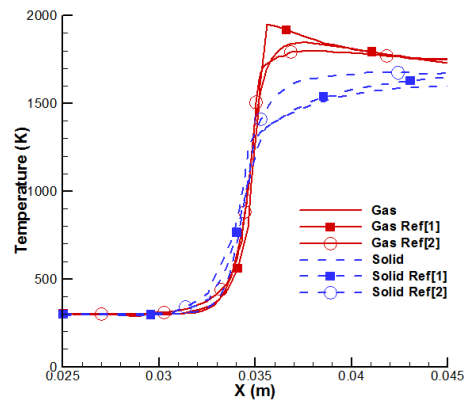


Fig. 3 Comparison of temperature profiles at an equivalence ratio of 0.65

고체와 기체간의 열전달 계수는 FSL보다 pore지름이 작은 작은 DL에서 높으며, 고체상에서 기체로 예열이 원활이 일어날 수 있도록 도와주며 급격한 flashback 현상을 억제해준다[4]. 고체와 기체간의 열전달그래프를 보면 화염이 위치하는 영역에서 고체로 열이 전달되며 상류에서는 고체에서 기체로 열을 전달하는 경향을 보여준다.

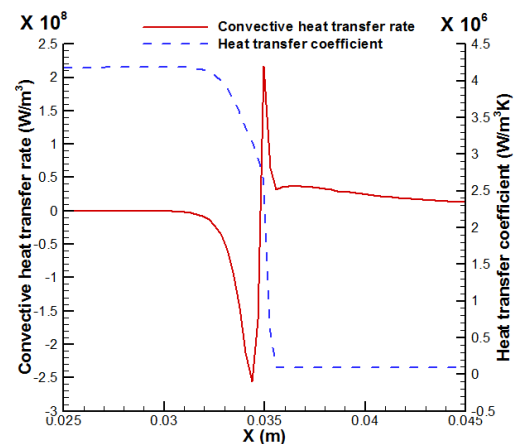


Fig. 4 Volumetric heat transfer rate and heat transfer coefficient

온도는 연소시작위치 0.035m에서부터 1860K 까지 급격하게 올라가며, 연소이전 DL영역에서도 후류로부터 porous matrix를 통해 전도되는 열에 의해 300에서 700K까지 preheating이 된다. 관 벽면에서는 no slip조건에 의해 유속이 감소하게 되어 chemical reaction이 원활하게 일어나지 않아 온도가 관의 중앙에 비해 낮아진다. 후류에서는 고체를 통한 복사효과로 온도가 감소한다.

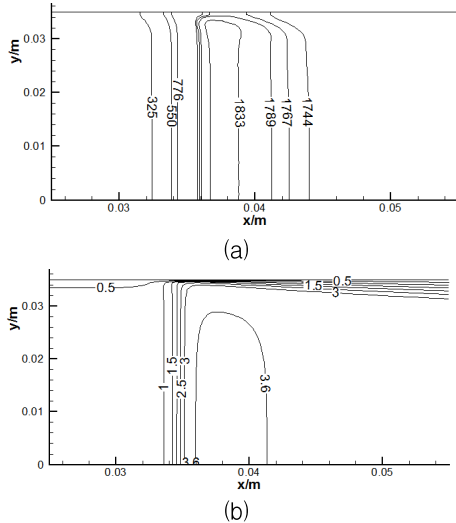


Fig. 5 (a)Contours of the gas temperature(K); (b)Contours of the axial velocity component(m/s)

그림 6은 참고문헌[2]의 stable range 내의 영역인 0.48, 0.74m/s의 속도에 따른 온도를 보여 준다. 저속의 경우 느린 유속에 의해 열전달 계수가 낮아 후류의 고체 온도가 낮지만, 고체의 전도로 인해 상류의 기체가 충분한 시간동안에 예열된다. 반면에 고속의 경우 높은 열전달 계수로 인해 후류의 고체 온도는 높지만, 상류까지 전도가 일어나기 전에 cold air로 인한 냉각으로 고체 온도가 낮아지며 예열이 원활하게 되지 않는다는 것을 알 수 있다. 안정 범위 밖인 0.25, 0.90m/s영역에서는 각각 화염이 앞으로 이동하거나 blow out이 일어난다.

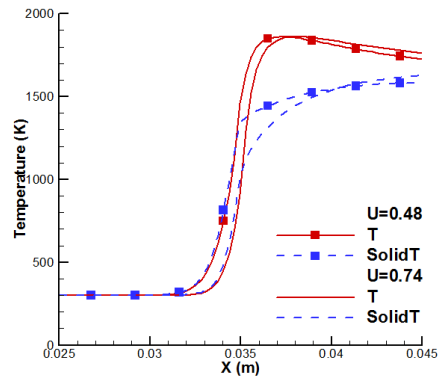


Fig. 6 Temperature profiles for inlet velocities of 0.48 and 0.74m/s at an equivalence ratio of 0.65

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP20102020100210)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

- [1] H. Liu, "Parametric Investigations of Premixed Methane-Air Combustion in Two-Section Porous Media by Numerical Simulation", Fuel, Vol. 89, Issue. 7, 2010, pp. 1736-1742.
- [2] A J. Barra, "Numerical Study of the Effects of Material Properties on Flame Stabilization in a Porous Burner", Combustion and Flame, Vol. 134, Issue. 4, 2003, pp. 369-379.
- [3] R. Siegel, "Thermal Radiation Heat Transfer 4th Ed", 2002.
- [4] R. Mital, "An experimental and a theoretical investigation of combustion and heat transfer characteristics of reticulated ceramics burners", PhD thesis, Purdue University, 1996.