

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.4.309>

메탄, 에탄 및 프로판 가스 연료의 촉매연소에 관한 매개변수 연구

정민승*, 김종민*, 김만영*

A Parametric Study on the Catalytic Combustion of Gaseous Methane, Ethane and Propane Fuels

Min Seung Jung*, Chongmin Kim* and Man Young Kim*

ABSTRACT

Catalytic combustion is generally accepted as one of the environmentally preferred alternatives for heat and power from fossil fuels, as it has the advantage of stable combustion under very lean conditions with such low emissions as UHC, CO, and NO_x. In this work, therefore, comparative numerical studies on the catalytic combustion behaviors over Pd-based catalysts have been conducted with the gaseous CH₄, C₂H₆, and C₃H₈. In the following, after introducing the governing equations with 1D channel and Langmuir-Hinshelwood models, numerical investigations on the catalyst performance are conducted by changing such various parameters as inlet temperature, excess air ratio, and space velocity. The numerical results show that outlet temperature and conversion of C₃H₈ are highest among others because of its chemical structure and reactivity.

초 록

촉매연소는 희박조건에서 작동할 수 있을 뿐만 아니라 UHC, CO, 그리고 NO_x와 같은 공해물질의 배출을 억제할 수 있기 때문에 연소효율이 좋고 환경친화적인 연소방식이다. 따라서 본 연구에서는 백금계열의 촉매를 이용한 CH₄, C₂H₆, 그리고 C₃H₈ 연료의 촉매연소 특성에 관한 수치해석 연구를 수행하였다. 1차원 및 Langmuir-Hinshelwood 모델을 적용한 지배방정식을 설명한 후 촉매연소기의 설계변수, 즉, 입구온도, 과잉공기비, 그리고 공간속도가 촉매연소에 미치는 영향을 고찰하였다. 사용된 연료 중에서 C₃H₈의 화학적 구조 및 반응성 때문에 출구온도 및 전환율이 가장 높음을 확인할 수 있었다.

Key Words : Catalytic Combustion(촉매연소), CH₄(메탄), C₂H₆(에탄), C₃H₈(프로판), Inlet Temperature(입구온도), Excess Air Ratio(과잉공기비), Space Velocity(공간속도)

1. 서 론

촉매연소는 통상의 연소방식과는 달리 담체에 코팅된 촉매의 표면에서 연료와 산화제를 반응시킴으로써 매우 희박한 연소 조건에서도 안정적인 연소가 가능하기 때문에 연소효율 및 연료 호환

성이 좋은 에너지 절약형 연소 방식일 뿐만 아니라 저온에서 연소되기 때문에 공해물질의 배출이 적은 환경친화적인 연소방식으로 알려져 있다[1].

최근 환경오염에 대한 관심이 증가함에 따라 산업용 또는 항공기용 엔진으로 사용되고 있는 가스터빈 연소기로부터 배출되는 CO, UHC, NO_x, 및 SO₂와 같은 공해 물질의 제어에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, NO_x의 경우 산성비와 오존층의 파괴라는 심각한 현상을 일으키기 때문에 그 규제가 점점 엄격해지고 있으며, 이에 대한 많은 실험 및 이론적 해석이 이루어지고 있다. 주로 고

† 2011년 8월 24일 접수 ~ 2012년 3월 12일 심사완료

* 정희원, 전북대학교 항공우주공학과

교신저자, manykim@jbnu.ac.kr

전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지

온에서 생성되는 thermal NOx는 온도에 아주 민감하다고 알려져 있으며, 화염 온도를 감소시킴으로써 저감시킬 수 있다. 하지만 화염 온도 감소에 따른 화염 안정성과 압력 맥동, 그리고 낮은 연소 효율 등에 의한 문제점을 가지고 있다[2-4].

반면에 촉매 연소는 일반적인 연소와는 달리 화염면이 존재하지 않으며, 점화기(ignitor)나 파일럿 화염(pilot flame)과 같은 점화원이 필요 없다. 또한 화염 내부의 가혹 조건에 의한 영향도 받지 않을 뿐만 아니라, 통상의 연소에 비해 낮은 온도에서 반응이 일어나기 때문에 thermal NOx의 배출량을 본질적으로 감소시킬 수 있다. 따라서 촉매 연소는 청정한 연소 과정을 위한 기회를 제공하는 새로운 연소 방식이라고 할 수 있으며, 이러한 이유로 최근 낮은 공해 물질의 배출을 요하는 가스터빈 연소기에 촉매연소를 적용하기 위한 연구가 이루어지고 있다[5-7].

최근, 이러한 촉매연소에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. Hwang *et al.*[8]은 통상 및 촉매 복합연소에 대한 수치해석을 수행하여 입구온도, 그리고 공간속도에 영향을 미치는 유동속도의 영향을 고찰하였고, Deutschmann *et al.*[9]은 H₂을 도입한 촉매연소 특성을 연구하였다. 이와 함께 Seo *et al.*[10]은 촉매연소기의 다양한 설계변수, 즉, 입구온도, 입구속도, 그리고 공연비의 변화가 촉매연소 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 하지만, 다양한 연료의 촉매연소 특성에 관한 해석 연구는 매우 제한적으로 수행되었을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 메탄, 에탄, 그리고 프로판의 촉매연소 특성을 파악하고, 희박연소를 촉진시키기 위한 촉매연소를 1차원 단일채널 모델을 적용한 수치해석 연구를 수행하였다. 사용된 기체 연료의 촉매반응은 Langmuir-Hinshelwood 반응 속도식[11]을 적용하였고 각 연료의 LOT(light of temperature) 곡선을 이용하여 반응상수를 구하였다. 기본 조건에 대한 촉매연소 특성을 고찰한 후 촉매연소기의 설계변수, 즉, 입구온도, 과잉공기비, 그리고 공간속도가 메탄, 에탄, 그리고 프로판의 촉매연소에 미치는 영향을 고찰하였다.

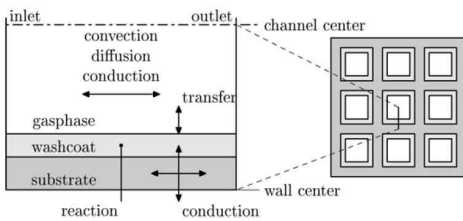


Fig. 1. Schematic of a single channel in a honeycomb-type catalytic combustor

II. 촉매연소의 이론적 해석

2.1 지배방정식

하니컴 타입 촉매연소기에 대해 반경 방향의 열전달은 축 방향의 값에 비해 작다는 가정 하에 전체 반응기는 하나의 채널로서 단순화시킬 수 있다. 이를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 고려되어야 할 것은 가스상의 대류, 확산, 전도 전달과 경계층을 통한 질량과 에너지의 전달, 담체 내부에서의 확산과 촉매 반응, 고체상의 전도이다. 또한 채널의 반경 방향에 대한 변화를 무시할 때 비정상, 1차원(축방향), 보존 방정식은 열 또는 유체 특성을 나타내기에는 충분하다고 할 수 있으며, 이때 단일 채널 내부의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 고려한다[12]. 먼저, 가스상에 대한 연속 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial z} \quad (1)$$

여기서 ρ_g 는 가스상의 밀도, t 는 시간, v_g 는 채널 내부의 가스 속도, 그리고 z 는 축방향의 공간 좌표를 나타낸다.

운동량 방정식은 정상상태 Darcy의 압력강하 방정식으로 나타낸다. 즉,

$$\frac{\partial p_g}{\partial z} = -A_D v_g \quad (2)$$

여기서, p_g 는 시스템의 압력이며, Darcy 상수 A_D 는 $A_D = \varphi v_g \rho_g \zeta / (2d_{hyd})$ 로 표현된다. 여기서, d_{hyd} 는 채널의 수력직경(hydraulic diameter), ζ 는 마찰계수이며, φ 는 fanning friction factor를 나타낸다. fanning friction factor는 채널의 단면적의 형태를 나타내기 위한 상수로서 본 연구에서는 사각형 형태의 하니컴 타입의 모노리스 채널을 사용하였기 때문에 0.89 값을 적용하였다. 그리고, 마찰계수 ζ 는 유동영역에 따라 레이놀즈 수의 함수로 표현할 수 있다[11].

한편, 화학종 보존 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \varepsilon_g \frac{\partial \rho_g w_{k,g}}{\partial t} = \varepsilon_g \frac{\partial \rho_g w_{k,g} v_g}{\partial z} + \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_g D_{eff} \frac{\partial w_{k,g}}{\partial z} \right) \\ + MG_{k,g} \sum_i v_{i,k} \dot{r}_i(c_k^T, T_s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $w_{k,g}$ 는 화학종 k 의 질량 분율, ε_g 는 촉매의 개면적(open frontal area), c_k^T 는 표면몰농도

(molar surface concentration), D_{eff} 는 유효확산 계수(effective diffusion coefficient)를 나타내며, $\dot{r}_i(c_k^L, T_s)$ 는 촉매 표면반응의 몰반응(molar reaction)을 나타낸다. 가스상에 대한 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_g \sum_k w_{k,g} h_k \right) &= \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_g \sum_k w_{k,g} h_k v_g \right) + \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) \\ &+ \sum_k \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_g D_{eff} \frac{\partial w_{k,g}}{\partial z} h_g \right) + a_{trans} k_h (T_s - T_g) \end{aligned} \quad (4)$$

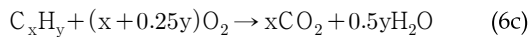
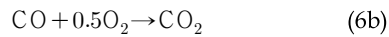
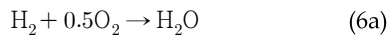
여기서, T_g 는 가스 온도, h_k 는 성분 k 의 전체엔탈피, λ_g 는 가스상의 열전도계수, a_{trans} 는 촉매의 표면적(geometric surface area), Δh_i 는 촉매 표면반응의 반응열, 그리고 k_h 는 가스 상과 고체 벽 사이의 열전달계수를 나타낸다. 우변 3항은 화학종의 확산 때문에 발생하는 엔탈피 전달, 그리고 4항은 고체와 표면사이의 열전달을 나타낸다. 한편, 고체상의 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial}{\partial t} (c_{p,s} T_s) &= (1 - \varepsilon_g) \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \\ &- a_{trans} k_h (T_s - T_g) - \sum_i \Delta h_i \dot{r}_i(c_k^L, T_s) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 T_s 는 촉매 벽면의 온도, λ_s 는 고체상의 열전도계수를 나타낸다. 일반적으로 촉매 반응의 온도 범위를 고려하기에는 범위가 작기 때문에 열복사는 연소기 출구의 전환율에 영향을 주지 않는다.

2.2 촉매 반응 모델링

본 연구에서는 촉매 연소의 연소특성을 분석하기 위해 아래와 같이 3개의 주요 화학종에 대한 반응을 고려한 1-step global reaction에 대해 해석을 수행하였다. 이때, 기체상으로 일어나는 반응은 없으며, 모든 반응은 모두 촉매표면에서 일어난다[13].



본 연구의 해석에 사용된 반응 모델은 팔라듐(palladium, Pd) 촉매 표면 위에서 일어나는 산화반응은 반응에 참여하는 화학종 모두 촉매표면에 흡착된 후 반응이 일어난다고 보는 Langmuir-

Table 1. Pre-exponential factor and activation temperature adopted in this work

k_1^0	1.10×10^6	$T_{A,1}$	6.45×10^3
k_2^0	6.55×10	$T_{A,2}$	-9.61×10^2
k_3^0	2.08×10^3	$T_{A,3}$	-3.61×10^2
k_4^0	3.98×10^0	$T_{A,4}$	-1.16×10^4
$k_{CH_4}^0$	5.49×10^5	T_{A,CH_4}	6.6×10^3
$k_{C_2H_6}^0$	5.145×10^5	T_{A,C_2H_6}	6.455×10^3
$k_{C_3H_8}^0$	1.219×10^6	T_{A,C_3H_8}	6.465×10^3

Table 2. Mole fraction of gas mixture

Species	Mole fraction	Species	Mole fraction
H ₂	0.044833	O ₂	0.147081
CO	0.007042	N ₂	0.795606
Fuel	0.005438		

Hinshelwood 메커니즘을 이용한 모델링을 수행하였다. 특히, 촉매와 반응물의 상이 서로 다른 비균질 반응(heterogeneous reaction)에 의한 촉매반응 시스템이기 때문에 물리적, 화학적으로 다양한 인자들에 의해 시스템의 성능이 결정된다. 각각의 반응은 촉매표면에서 흡착상들 간에 일어나기 때문에 각 화학종이 촉매의 활성 영역을 차지하기 위한 경쟁이 반응율에 고려가 되며 Langmuir-Hinshelwood 표현식으로 각각의 반응에 대한 반응율은 다음과 같다[11].

$$\dot{r}_{H_2} = k_1 y_{H_2} y_{O_2} / D \quad (7a)$$

$$\dot{r}_{CO} = k_1 y_{CO} y_{O_2} / D \quad (7b)$$

$$\dot{r}_{C_xH_y} = k_{C_xH_y} y_{C_xH_y} y_{O_2} / D \quad (7c)$$

$$D = T_s (1 + k_2 y_{CO} + k_3 y_{C_xH_y})^2 (1 + k_4 y_{CO}^2 y_{C_xH_y}^2) \quad (7d)$$

$$k_i = k_i^0 \exp(-T_{A,i} / T_s) \quad (7e)$$

여기서, k_i 와 D 는 각각 반응율 및 억제상수(inhibition term)를 나타낸다. 최적화 과정을 통하여 결정되는 반응계수인 선지수인자(pre-exponential factor)와 활성화온도(activation temperature)를 Table 1에 정리하였다. 한편, 촉매연소기 내의 수치해석은 상용코드인 AVL Boost S/W[11]를 이용하였다.

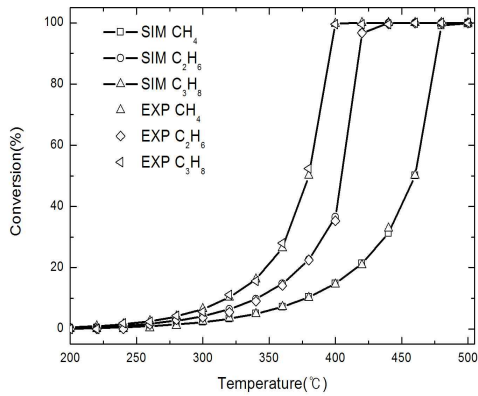


Fig. 2. Light-off characteristics of CH₄, C₂H₆, and C₃H₈ fuels

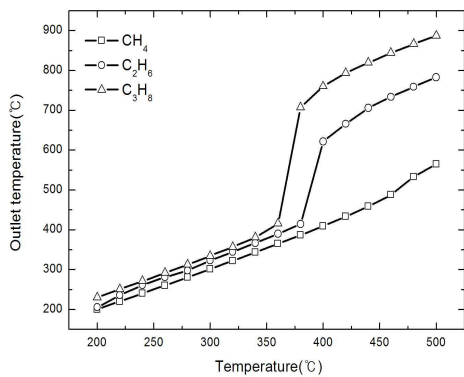


Fig. 3. Comparison of the exit temperature

2.3 경계조건

연소기의 벽면은 단열 조건으로 가정하였으며, 출구는 대기압 조건을 적용하였다. 본 연구의 촉매 연소에 사용되는 연료는 CH₄, C₂H₆, 그리고 C₃H₈을 사용하였다. Table 2는 연소기 입구 혼합 가스의 조성을 나타내고 있다.

III. 결과 및 고찰

3.1 반응계수 최적화

촉매의 반응계수를 결정하기 위하여 CH₄, C₂H₆ 및 C₃H₈의 LOT(light of temperature) 촉매 연소 실험결과를 제시한 Demoulin *et al.*[14]의 데이터를 사용하였다. 사용된 촉매와 담체는 각각 팔라듐(Pd)과 γ-Al₂O₃이며 공간속도 조건은 20000hr⁻¹이다.

Figure 2는 CH₄, C₂H₆ 및 C₃H₈의 LOT에 대한 실험[14] 및 해석결과를 도시한 것으로서, 세 연

료 모두 250°C 이하에서는 거의 반응이 일어나지 않지만 온도가 증가함에 따라 반응율이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. CH₄의 경우 460°C, C₂H₆의 경우 410°C 그리고 C₃H₈의 경우 380°C에서 전환율 50%를 보이고 있음을 알 수 있다. 한편, 온도를 지속적으로 증가시키에 따라 CH₄, C₂H₆ 그리고 C₃H₈은 각각 480°C, 430°C, 그리고 400°C에서 전환율이 100%에 도달함을 알 수 있다. Fig. 3은 각 연료에 따른 출구온도를 나타낸 것이다. 모든 연료가 350°C까지는 일정하게 증가하고 있지만, CH₄ 대비 C₂H₆은 380°C, 그리고 C₃H₈은 360°C에서 급격히 증가하여 각각 800°C와 900°C까지 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이는 각 연료의 발열량에 기인한다.

3.2 공간속도의 영향

Figure 4는 공간속도의 변화에 따른 가스연료의 전환율과 출구온도를 보여주고 있다. 여기에서의 입구조건은 165°C이고 과잉공기비 4이다. 그림에서 보는 바와 같이 공간속도가 증가 할수록 모든 가스연료의 전환율과 출구온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이

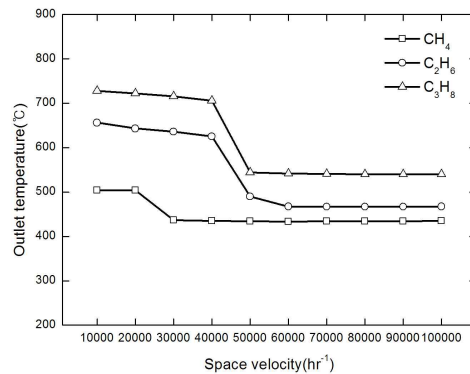
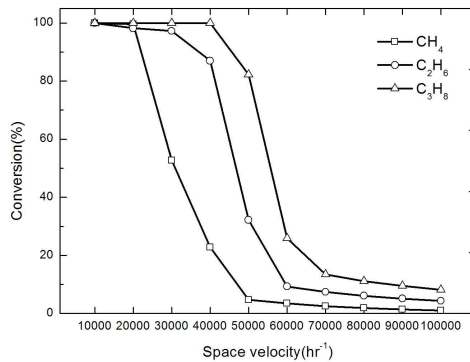


Fig. 4. Effect of space velocity on CH₄, C₂H₆ and C₃H₈ conversions

유는 촉매연소는 반응물이 공기의 유량을 따라 채널 내부로 흘러 들어가면서 촉매의 표면과 반응을 하게 된다. 이때 반응물이 생성물로 전환되어 배출 되는 시간을 체류시간이라고 하는데 촉매 표면에 체류하는 시간이 짧아지면서 연료가 완벽히 반응하지 못하여 전환율이 감소하는 경향을 볼 수 있다. CH₄의 경우에는 공간속도가 20,000hr⁻¹와 30000hr⁻¹사이의 영역에서 급격히 감소하며, C₂H₆는 40,000hr⁻¹와 50,000hr⁻¹ 그리고 C₃H₈은 50,000hr⁻¹와 60,000hr⁻¹의 공간속도 영역에서 전환율이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.3 입구온도의 영향

Figure 5는 공간속도가 20000hr⁻¹이고 입구온도가 각각 220°C와 165°C일 때 과잉공기량의 변화에 따른 전환율을 나타낸 것이다. 여기에서 과잉공기비는 당량비의 역수로서 과잉공기비가 클수록 희박조건이 된다. 먼저, 입구온도가 220°C일 때 과잉공기비가 2일 경우 모든 연료에 대해 100%의 전환율을 보이고 있다. 그리고 CH₄의 경우 4, C₂H₆의 경우 6 이후부터 급격한 전환율 감소를 보이고 있다. 한편, 입구온도를 165°C로 낮춘

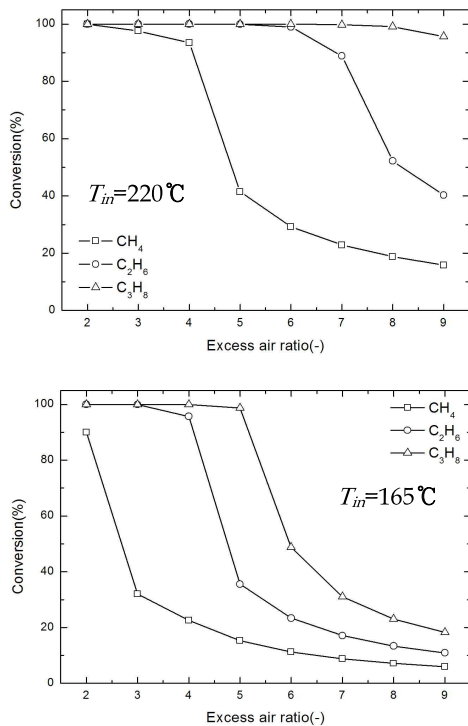


Fig. 5. Effect of inlet temperature and excess air ratio on fuel conversion

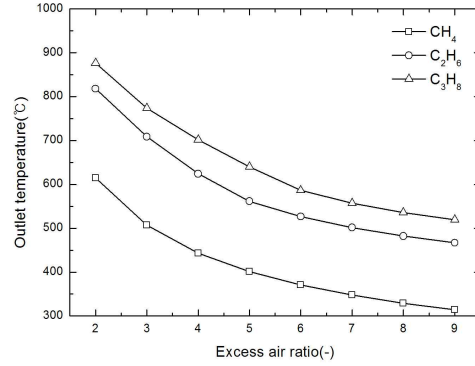


Fig. 6. Exit temperature distribution for case of inlet temperature of 165°C

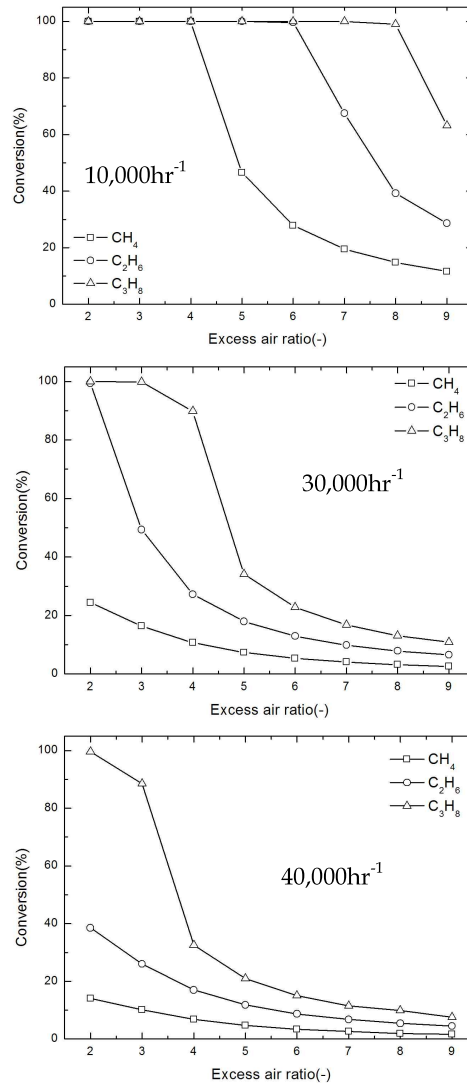


Fig. 7. Effect of space velocity on CH₄, C₂H₆ and C₃H₈ conversions

경우, 공기량이 많을 때는 높은 전환율을 가지고 있으나 입구온도가 220°C에 비교해 더 급격한 변화를 보이고 있다. 특히 메탄의 경우에는 과잉공기비가 2일 경우 전환율이 100%를 보이지 않는다. 이 결과로 촉매연소 반응은 모든 연료가 동일하게 입구온도 조건의 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6은 입구온도가 165°C인 경우의 연소기 출구의 온도를 나타낸 것으로서 공기과잉비가 증가할수록 전환율 감소와 함께 출구온도도 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.4 과잉공기비의 영향

Figure 7은 입구온도가 165°C로 동일하게 주어지고 공간속도의 변화에 따른 과잉공기비의 전환율을 비교한 그래프이다. 본 연구에서는 일반 연소보다 촉매연소가 공기비가 낮은 조건에서도 연소가 잘 이루어지는 연소방식을 연구하고자 한다. 여기서, 과잉 공기비는 당량비의 역수로 과잉공기비가 2일 경우 당량비는 0.5이며 8일 경우 0.125에 해당한다. 이 절에서는 과잉공기비와 반응물이 촉매표면에 흡착하여 반응에 영향에 대한 결과를 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 공간속도가 증가 할수록 반응물이 촉매 층에서 체류 시간이 감소하게 되고, 이로 인해 연료가 다 반응하지 못하고 배출된 것이다. 체류 시간이 가장 긴 10,000hr⁻¹의 경우를 살펴보면 메탄의 경우 과잉공기비가 4에서 에탄의 경우 6에서 그리고 프로판의 경우 8에서 급격한 전환율 감소를 보이고 있다. 공간속도가 30,000hr⁻¹일 경우에는 메탄과 에탄 가스연료는 과잉공기비가 작고 공간속도가 높을수록 비효율적인 연소조건을 보이고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 친환경적이며 희박한 조건에서도 연소가 가능한 촉매연소기의 촉매연소 특성을 분석하였다. 특히, 서로다른 기체 연료, 즉, CH₄, C₂H₆, 그리고 C₃H₈의 전환율과 출구온도와 같은 촉매연소 특성을 비교하였다. 본 연구에 도입된 촉매연소기의 반응계수는 문헌에서 제공된 LOT 곡선을 이용하여 구하였다. 촉매연소의 유동 및 반응식을 설명하고 여러 가지 설계인자, 즉, 입구온도, 과잉공기비, 그리고 공간속도가 촉매연소 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 우선, 유입가스의 입구온도를 증가시킬수록 연료의 반응성이

커지며 전환율과 출구온도가 증가하였다. 한편, 과잉공기비가 증가함에 따라 전환율과 출구온도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 비교적 낮은 영역의 과잉공기비를 가지는 조건에서도 높은 전환율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 매우 희박한 조건에서는 전환율이 낮게 나타나는 것으로 보아 미반응 가스가 배출될 가능성을 가지고 있다. 최종적으로, 공간속도가 증가할수록 촉매의 표면에서 반응에 필요한 체류시간이 짧아지기 때문에 전환율 및 출구온도는 감소함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업(2011-0030065) 및 국토해양부의 「하늘 프로젝트」의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Hayes, R. E. and Kolaczowski, S. T., "Introduction to Catalytic Combustion," Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- 2) Cocchi, S., Nutini, G., Spencer, M. J. and Nickolas, S. G., "Catalytic Combustion System for a 10MW Class Power Generation Gas Turbine," *Catalysis Today*, Vol. 117, pp. 419-426, 2006.
- 3) Schlegel, A., Benz, P., Griffin, T., Weisenstein, W. and Bockhorn, H., "Catalytic Stabilization of Lean Premixed Combustion : Method for Improving NO_x Emissions," *Combustion and Flame*, Vol 105, pp. 332-340, 1996.
- 4) Hong, D., Kim, C., Kim, M. Y., Lee, S. M. and Ahn, K. Y., "A Numerical Study on the Flow Characteristics in the Mixing Region of the Catalytic Combustor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 11, pp. 1791-1798, 2007.
- 5) Dalla Betta, R. A., Schlatter, J. C., Yee, D. K. and Loffler, D. G., "Catalytic Combustion Technology to Achieve Ultra Low NO_x Emissions: Catalyst Design and Performance Characteristics," *Catalysis Today*, Vol. 26, pp. 329-335, 1995.

- 6) Dalla Betta, R. A. and Rostrup-Nielsen, T., "Application of Catalytic Combustion to a 1.5 MW Industrial Gas Turbine," *Catalysis Today*, Vol. 47, pp. 369-375, 1999.
- 7) Smith, L. L., Karim, H., Castaldi, M. J., Etemad, S. and Pfeifferle, W. C., "Rich-Catalytic Lean-Burn Combustion for Fuel-Flexible Operation with Ultra Low Emissions," *Catalysis Today*, Vol. 117, pp. 438-446, 2006.
- 8) Hwang, C. H., Lee, C. E. and Lee, K. O., "Numerical Investigation on Combustion Characteristics of Methane in a Hybrid Catalytic Combustor," *Fuel*, Vol. 83, pp. 987-996, 2004.
- 9) Deutschmann, O., Maier, L. I., Riedel, U., Stroemman, A. H. and Dibble, R. W., "Hydrogen Assisted Catalytic Combustion of Methane on Platinum," *Catalysis Today*, Vol. 59, pp. 141-150, 2000.
- 10) Seo, Y. S., Cho, S. J., Kang, S. K. and Shin, H. D., "Numerical Studies of Catalytic Combustion in a Catalytically Stabilized Combustor," *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, pp. 1049-1064, 2000.
- 11) AVL BOOST, Aftertreatment, 2006.
- 12) Turns, S. R., "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications," McGraw-Hill, 1996.
- 13) Wang, T. J., Baek, S. W. and Lee, J. H., "Kinetic Parameter Estimation of a Diesel Oxidation Catalyst under Actual Vehicle Operating Conditions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp. 2528-2537, 2008.
- 14) Demoulin, O., Clef, B. L., Navez, M. and Ruiz, P., "Combustion of Methane, Ethane and Propane and of Mixtures of Methane with Ethane or Propane on Pd/ γ -Al₂O₃ Catalysts," *Applied Catalysis*, Vol. 344, pp. 1-9, 2008.