

모노리스 타입 마이크로 촉매 연소기의 담층 내부 물질전달 및 반응 관계에 관한 연구

이광구** · 鈴木雄二**

*경일대학교 기계자동차학부 · **동경대학 기계공학과

Investigation on the Relationship between Mass Transfer and Reaction within the Washcoat of Monolith Type Micro-scale Catalytic Combustor

Gwang Goo Lee** and Yuji Suzuki**

*Kyungil University, **The University of Tokyo

(Received 15 May 2015, Received in revised form 17 June 2015, Accepted 18 June 2015)

ABSTRACT

The relationship between mass transfer and reaction within the washcoat is investigated in a monolith type micro-scale Pt-catalytic combustor. Nondimensionalized balance equation of butane is applied in a simplified washcoat geometry having the shape of slab. Both Thiele modulus and effectiveness factor are considered to compare reaction rate and diffusion rate according to the operation temperature and the diameter of alumina nano-pores. The effect of reaction becomes stronger as the temperature increases, while the effect of diffusion becomes relatively dominant as the diameter of nano-pores increases. From the analysis of butane distribution within the washcoat, design criterion for the thickness of washcoat is discussed.

Key Words : Micro catalytic combustor, Washcoat, Thiele modulus, Effectiveness factor, Design criterion

기 호 설 명

Alphabets

A : pre-exponential factor
 A' : product of A and effectiveness factor (η)
 C_B : molecular concentration of butane
 D : diffusion coefficient
 d_p : diameter of nano pore
 E_a : activation energy
 k_s : specific reaction rate based on washcoat surface
 k_V : specific reaction rate based on washcoat volume
 L_c : characteristic length of washcoat

R_u : universal gas constant
 r_i, r_o : inner and outer radii of combustor
 T : temperature
 t : thickness of washcoat
 \dot{w}_B : reaction rate of butane

Greeks

ε : porosity
 Φ : Thiele modulus
 η : effectiveness factor of washcoat
 τ : tortuosity
 ξ : simplified coordinate of washcoat

† Corresponding Author, combggy@kiu.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Superscript	Subscripts
* : nondimensionalized variables	s : parameters evaluated at washcoat surface
	V : parameters evaluated at washcoat volume

1. 서론

모노리스 형태의 반응기는 촉매 연소분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 자동차 촉매와 같이 배기 가스 후처리를 위한 2차 연소시스템에 적용되는 경우뿐만 아니라 발전용 가스터빈의 연소실과 같이 1차 연소시스템에도 적용되고 있다. 특히 최근에는 촉매연소의 특징인 표면화학반응이 소염 문제가 없는 장점으로 인해 마이크로 촉매 연소기 제작에도 활용되고 있다[1-6].

지난 20여 년간 모바일 IT 제품의 보급이 확산되면서 초소형 에너지 공급 장치에 대한 필요성이 증가함에 따라, MEMS 기술로 제작된 마이크로 연소기가 포함된 발전 시스템의 연구가 활발하게 진행되어 왔다[7,8]. 이러한 초소형 연소기는 대부분 유로의 치수가 화염의 소염 길이보다 더 작기 때문에 연소 안정성을 위한 기술 적용이 필요하다. 모노리스 형태의 촉매 연소기 기술은 마이크로 연소 안정화의 대표적인 기술 중 하나이다.

모노리스 형태의 촉매 연소기에서 촉매물질은 연료와 공기가 흐르는 유로와 담체(substrate)의 접촉면에 형성된 다공질 담층(washcoat)에 코팅되어 있다. 촉매의 표면화학반응이 일어나기 위해서는 반응물질이 담층 내부로 확산되어야 한다. 따라서 다공층 내부에서의 물질 확산과 반응률의 관계는 촉매 연소기의 성능을 분석하고 설계하는데 매우 중요하다.

본 연구에서는 모노리스 형태로 제작된 마이크로 백금 촉매 연소기에서 담층 내부의 물질 확산과 화학반응의 상대적인 속도 크기를 해석하였다. 마이크로 촉매 연소기의 성능을 결정하는 담층 내부의 물리 변수의 효과를 파악하고, 초소형 촉매 연소기 설계에 필요한 담층 두께의 영향을 분석하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1. 마이크로 백금 촉매 연소기

알루미늄 튜브를 이용하여 마이크로 촉매 연소기를 제작하였다. 외경 1 mm, 내경 0.6 mm의 알루미늄 원통 내벽에 담층을 형성하기 위하여 4 wt% 옥살산((COOH)₂) 용액에서 양극산화(anodic oxidation) 처리 후, 350 °C에서 건조시켰다. 담층의 나노 다공에 백금을 코팅하기 위하여 Pt[(NO₂)(NH₃)₂] 용액 속에서 함침(impregnation)한 후 350 °C에서 소성(calci-

nation)하였다. Fig. 1은 담층의 형성과정을 설명하고 있다. 담층에 분포하는 세공의 지름은 20~50 nm 수준이며, 세공 사이의 평균 간격은 90 nm이다. 본 연구의 대상인 촉매 연소기와 담층의 제작과정 및 다공질 특성은 이전 연구에서 자세히 확인할 수 있다[3].

최종 제작된 모노리스 형태의 마이크로 촉매 연소기의 축 방향 단면 및 반경 방향 단면은 Fig. 2와 같다. 촉매가 코팅된 연소기의 길이는 50 mm이고, 알루미늄(γ -Al₂O₃) 담층의 두께는 35 μ m이다[3].

Fig. 3은 촉매 연소기의 성능 실험용 장치의 개략도이다[3,6,9]. 열용량이 큰 납탕 욕조에 연소기를 담그고 실험을 진행하여 연소기의 벽면 온도를 일정

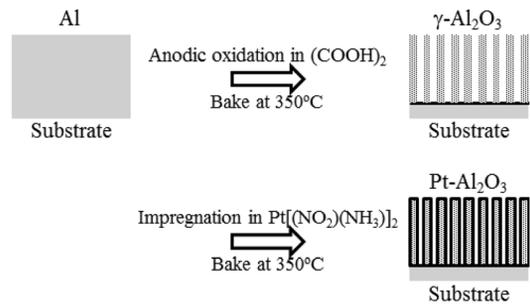


Fig. 1. Coating process of Pt catalyst layer on the alumina porous washcoat[3].

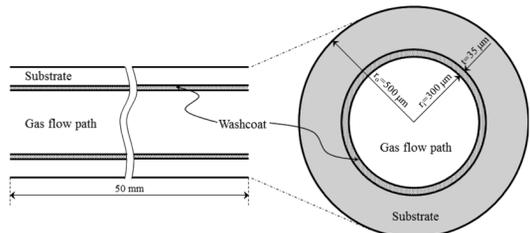


Fig. 2. Schematic diagram of monolith type micro Pt-catalytic combustor (not in scale).

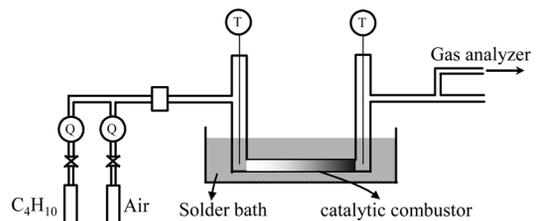


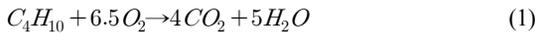
Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup[3,6,9].

하게 유지하였다. 노멀부탄을 연료로 사용하였고, 연료와 공기의 질량은 이론공연비 조건으로 제어되었다. 부탄의 유량($Q_{B, in}$) 범위는 2.5~15 sccm(cm^3/min at standard condition)이다. 연소기 내부에서 반응한 연료의 양은 배기가스 중의 산소 농도를 측정하여 계산하였다. 실험장치와 방법에 대해서는 이전 연구에서 확인할 수 있다[6,9].

2.2. 담층 내부의 반응 및 확산

2.2.1. 표면화학반응

본 연구에서 사용한 부탄처럼 탄소의 개수가 3 이상인 연료에 대해서는 표면화학반응의 상세 반응기구가 알려져 있지 않다. 따라서 일반적으로 분자량이 큰 연료는 촉매의 표면화학반응을 1차 비가역 반응으로 가정한다[10-12]. 본 연구에서도 부탄의 표면화학반응을 1차 비가역으로 가정하였다[6,9].



연료가 매우 희박한 조건에서, 백금 촉매의 표면 반응속도는 촉매 표면에 도달하는 연료의 농도에만 비례하는 것으로 보고되어 있다[12]. 또한 마이크로 촉매 연소기의 반응물에 대한 최근 연구에 따르면, 이론공연비 조건을 포함한 넓은 공연비 조건에서 부탄의 반응물은 산소 농도의 영향을 받지 않는다[2]. 이는 촉매 표면으로의 연료 흡착, 표면에서의 반응, 표면으로부터 반응물의 탈착 단계로 구성되는 전체 과정에서 촉매 표면에 연료가 흡착하는 속도가 가장 느리기 때문에, 전체 반응물이 연료의 흡착속도에 의해 결정되는 것이다. 이러한 기존 문헌의 결과를 토대로 본 연구에서는 표면화학 반응속도를 다음과 같이 부탄 농도에만 비례하는 Arrhenius 형태로 가정하였다.

$$\dot{w}_{B,s} = A' \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) C_{B,s} = k_s C_{B,s} \quad (2)$$

식 (2)에서 A' 은 빈도인자(pre-exponential factor) A 와 담층의 유효계수(effectiveness factor) η 의 곱이다. 이전 연구에서는 실험결과를 1차원 플러그류 모델에 적용하여 식 (2)의 반응상수를 구하고($A' = 1.2831 \times 10^7$ m/s, $E_a = 9.4131 \times 10^7$ J/kmol), 이를 CFD에 적용하여 연소 후 잔존하는 부탄의 질량 분율과 열 방출량의 실험결과를 신뢰성 높게 재현할 수 있음을 확인하였다[6].

2.2.2. 담층 내부 확산

연소기의 중심부로부터 벽면까지 유동에 의해 확

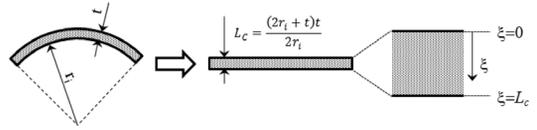


Fig. 4. Characteristic length of washcoat and its coordinate system.

산된 연료는 담층 내부로 다시 확산되어 촉매 표면에서 반응하게 된다. 담층 내부의 물질 확산과 반응의 관계에 대해서는 많은 선행 연구가 진행되어 왔다[11,13-18]. 본 연구에서는 담층 내부 현상을 설명하는 간단하지만 광범위하게 사용되고 있는 티엘 수(Thiele modulus) 방법론을 적용하였다[13,15].

담층을 여러 개의 작은 영역으로 나누어 개별 촉매 입자(particle)로 가정하고, 입자 내부의 물질 확산과 반응을 1차원 문제로 해석하여도 높은 정확도를 가지는 것으로 보고되었다[15]. 이때 개별 촉매 영역 사이의 물질 전달은 무시한다. 불규칙한 형상을 가지는 촉매의 작은 영역들은 특성길이(L_c , characteristic length) 개념을 도입하여 슬래브(slab) 모양으로 가정할 수 있다[13]. 특성길이는 촉매 입자의 부피를 유동과 접촉하고 있는 외부 면적으로 나눈 값이다. Fig. 2의 마이크로 촉매 연소기의 경우, 원주 방향으로 담층의 일정한 두께를 가정하고 특성길이를 도입하면 Fig. 4와 같이 담층을 슬래브로 고려할 수 있다.

Fig. 4와 같이 슬래브로 가정된 담층 내부의 확산 및 반응의 균형 방정식은 아래와 같다[15]. 이때 열용량이 큰 납땀 욕조에서 실험이 수행되었기 때문에 연소기 벽면의 온도는 일정하다고 가정하고, 온도장의 해석은 고려하지 않았다[6,9].

$$D_{eff} \frac{d^2 C_B}{d\xi^2} - \dot{w}_B = 0 \quad (3)$$

식 (3)의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dC_B}{d\xi} = 0 & \text{at } \xi = 0 \\ C_B = C_{B,s} & \text{at } \xi = L_c \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 1차원 공간좌표 ξ 와 부탄농도 C_B 를 아래와 같이 무차원 변수로 변환할 수 있다.

$$\begin{cases} \xi^* = \frac{\xi}{L_c} \\ C_B^* = \frac{C_B}{C_{B,s}} \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 정의된 무차원 변수로 식 (3)의 방정식과 식 (4)의 경계조건을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 C_B^*}{d\xi^{*2}} - \Phi^2 C_B^* = 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dC_B^*}{d\xi^*} = 0 & \text{at } \xi^* = 0 \\ C_B^* = 1 & \text{at } \xi^* = 1 \end{cases} \quad (7)$$

식 (6)의 Φ 는 티엘 수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi = L_c \sqrt{\frac{k_V}{D_{eff}}} \quad (8)$$

티엘 수는 촉매 담층 내부의 반응을 대 확산율의 비율을 의미한다. 식 (8)에서 k_V 는 식 (2)의 k_s 를 특성 길이(L_c)로 나눈 값($k_V = k_s/L_c$)이다. 평행한 나노 세공이 분포한 담층에서 식 (8)의 유효 확산계수는 아래와 같이 계산할 수 있다[15].

$$D_{eff} = \frac{\epsilon D}{\tau} \quad (9)$$

식 (9)에서 ϵ 는 공극률(porosity), τ 는 굴곡률(tortuosity)이다. 확산계수 D 는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_K} \quad (10)$$

식 (10)에서 D_i 는 기체상태의 확산계수, D_K 는 Knudsen 확산계수이다.

식 (7)의 경계조건을 만족시키는 식 (6)의 무차원 지배방정식의 해는 다음과 같다.

$$C_B^*(\xi^*) = \frac{\cosh(\Phi \xi^*)}{\cosh(\Phi)} \quad (11)$$

2.2.3. 담층 내부 반응속도와 확산속도의 비교

촉매의 담층이 얼마나 효과적으로 이용되는지 나타내는 무차원 변수로 담층의 유효계수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta \equiv (\dot{w}_{B,V})/(\dot{w}_{B,S}) \quad (12)$$

식 (12)에서 $\dot{w}_{B,V}$ 는 담층 전체 영역에서 부탄의 반응률을 의미하며, $\dot{w}_{B,S}$ 는 담층이 외부 유동과 접촉하고 있는 외부 표면에서 부탄의 반응률을 의미한다.

정상상태 조건을 가정하면, $\dot{w}_{B,V}$ 는 아래와 같이 담층 외부 표면에서 부탄의 플럭스로 정의할 수 있다.

$$\dot{w}_{B,V} = \frac{D_{eff}}{L_c} \frac{dC_B}{d\xi} (\xi = L_c) \quad (13)$$

식 (13)을 식 (12)에 적용하여 정리하면, 슬래브 형상의 촉매 담층에서 유효계수는 다음과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{\tanh \Phi}{\Phi} \quad (14)$$

유효계수가 1에 가까우면 담층의 전체 부피에서 비슷한 수준의 반응률을 유지하고 있고, 이는 연료가 담층의 내부로 빠르게 확산됨을 의미한다. 반면에 유효계수가 0에 가까우면 담층의 전체 부피를 모두 사용하지 못하고, 연료가 담층 내부로 확산되기 이전에 모두 연소되는 것을 뜻한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연소기 담층 내부의 무차원 변수

마이크로 촉매 연소기의 담층에 분포하고 있는 나노 세공의 개략도는 Fig. 5와 같다. 세공 크기의 측정결과에 따르면 평균 지름은 $d_p=30$ nm 수준이고, 주된 분포 범위는 20~50 nm이다[3]. 나노 세공 사이의 평균 거리는 90 nm 수준이다. 공극률을 계산하기 위하여 Fig. 5와 같이 일정한 지름의 세공이 규칙적으로 배열되어 있다고 가정하면, 공극률은 0.038($d_p=20$ nm 조건)~0.25($d_p=50$ nm 조건) 수준으로 예측된다. 평균 지름($d_p=30$ nm 조건)의 세공에 해당하는 공극

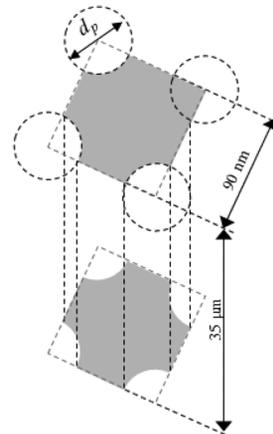


Fig. 5. Schematic diagram of porous alumina washcoat of micro-scale Pt-catalytic combustor (not in scale).

률은 약 0.087이다. 이는 다양한 알루미늄 촉매의 공극률을 측정된 기존 문헌에서 보고된 범위(0.07~0.68)와 잘 일치한다[14].

본 연구에서는 촉매 담층의 굴곡률에 대한 측정 결과가 없기 때문에 기존 문헌의 굴곡률에 대한 정보를 활용하여 가정하였다. 굴곡률 값은 세공의 세부 구조뿐만 아니라 연료 혼합기의 특성 및 이론의 종류에 따라 변화하지만, 가장 일반적인 값은 '4'로 알려져 있다[14]. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 담층의 가장 일반적인 굴곡률 값인 '4'를 적용하여 분석을 진행하였다.

Fig. 6은 세공의 지름 변화에 따른 티엘 수의 변화를 보여주고 있다. 온도가 증가하면서 반응속도가 빨라지기 때문에 티엘 수가 증가한다. 세공의 지름이 증가하면 유효 확산계수도 함께 증가하기 때문에 반응물이 확산율보다 상대적으로 감소한다. 결과적으로 담층 세공의 지름이 증가할수록 티엘 수가 감소하

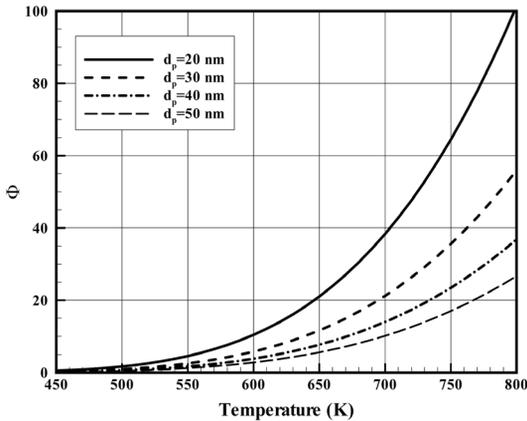


Fig. 6. Effect of the diameter of nano pores on the Thiele modulus with tortuosity $\tau=4$.

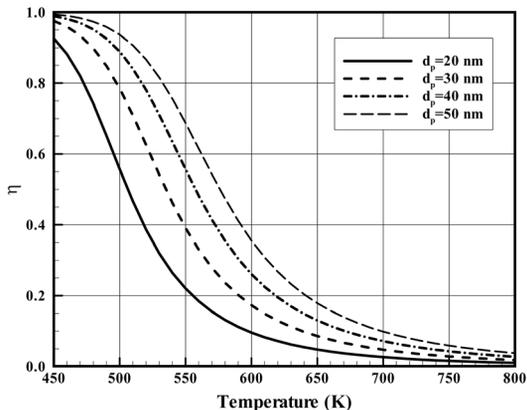


Fig. 7. Effect of the diameter of nano pores on the effectiveness factor with tortuosity $\tau=4$.

는 경향을 보인다.

Fig. 7은 세공의 지름 변화에 따른 유효계수의 변화를 보여주고 있다. 온도가 증가하면 담층 외부 표면에서의 반응속도가 빨라지므로 담층 내부로 깊숙이 확산되기 이전에 연료가 반응하게 된다. 따라서 담층 두께의 일부만 사용되고 유효 계수가 '0'에 접근하는 것을 확인할 수 있다. 세공의 지름이 증가하면 유효 확산계수가 증가하여 동일한 온도에서 더 큰 유효계수 값을 가진다. 이는 연료가 담층 내부로 더 깊게 확산되는 것을 의미한다.

Fig. 8은 티엘 수와 유효 계수 사이의 관계이다. 낮은 온도에서는 연료의 반응률이 낮아 티엘 수가 작고, 반응하지 못한 연료가 담층 내부 깊숙이 침투한다($\eta \rightarrow 1$). 온도가 증가하면서 Fig. 8과 같이 티엘 수는 증가하고 유효계수는 감소한다. Fig. 8의 곡선은 세공의 지름에 관계없이 모든 조건에서 식 (14)의 관계식을 따른다.

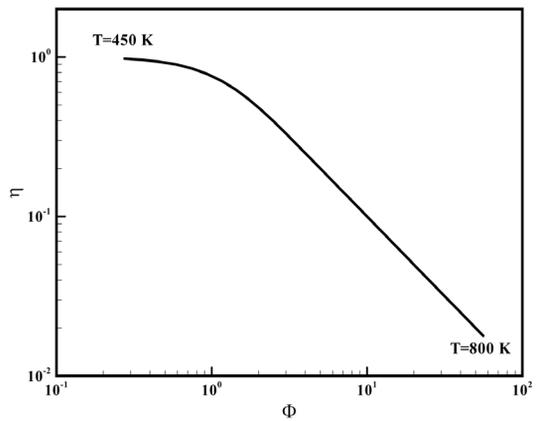


Fig. 8. Relationship between effectiveness factor and Thiele modulus with tortuosity $\tau=4$.

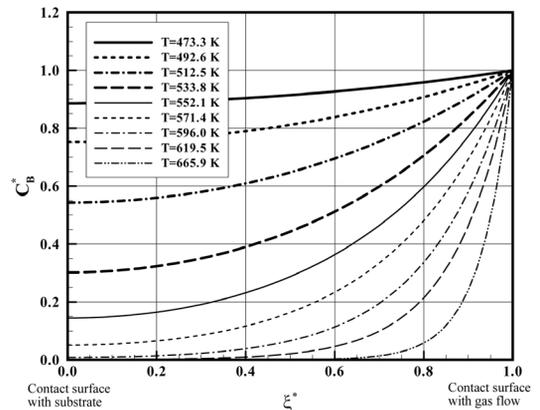
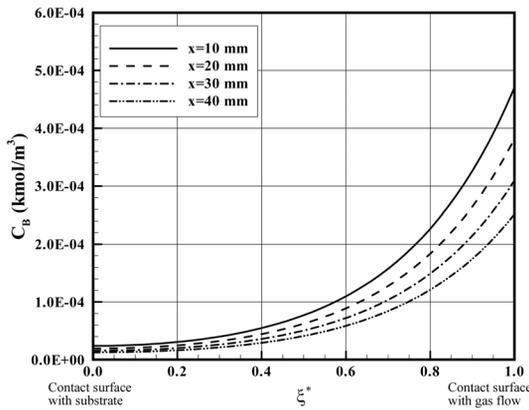


Fig. 9. Nondimensionalized concentration of butane within the washcoat ($d_p=30$ nm and tortuosity $\tau=4$).

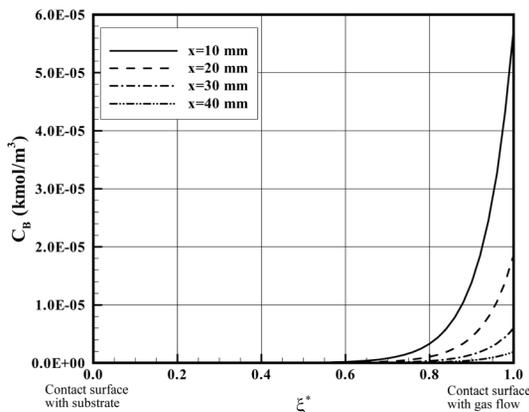
3.2. 담층 내부의 연료 분포

담층 내부의 부탄 농도는 식 (11)에 의해 계산할 수 있다. Fig. 9는 마이크로 촉매 연소기의 성능을 실험한 온도 조건에서[3,6], 세공의 지름이 30 nm일 때 담층 내부의 무차원화된 부탄 농도 분포를 보여주고 있다. 온도가 낮을 때는 화학반응률이 매우 낮아 부탄이 반응하지 못한 채, 담층의 내부로 확산되기만 한다. 반면에 온도가 높아지면서 화학반응률이 증가하면, 연료가 담층의 전체 깊이까지 확산되기 이전에 대부분 반응하여 소비된다. 이전 연구에서[6,9] 2.5~5.0 sccm 유량 범위의 부탄을 거의 완전 연소시킨 665.9 K 온도 조건에서는 기체의 유로와 맞닿아 있는 담층의 약 40% 미만의 두께만이 반응에 이용되고 있는 것을 확인할 수 있다.

마이크로 촉매 연소기의 축 방향 위치에 따른 담



(a) T=571.4 K



(b) T=665.9 K

Fig. 10. Butane concentration within the washcoat along the various axial positions. (The butane concentrations at $\xi^*=1$ are from CFD results[6]. Note that the exponent of y-axis in (a) is larger than that in (b). Tortuosity $\tau=4$).

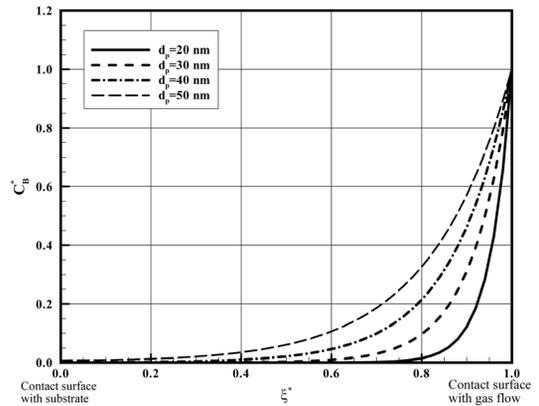


Fig. 11. Effect of the diameter of nano pores on butane concentration within the washcoat ($T=650$ K and tortuosity $\tau=4$).

층 내부의 부탄 농도 분포는 Fig. 10과 같다. 연소기 유로와 맞닿아 있는 담층 표면($\xi^*=1$)의 부탄 농도는 연소기의 성능실험 데이터를 정확하게 재현한 CFD 해석결과로부터 얻었다[6]. 부탄 유량 2.5 sccm의 약 60%가 연소된 온도인 571.4 K 조건에서는 표면화학 반응률이 충분히 높지 않기 때문에, Fig. 10 (a)와 같이 축 방향의 모든 위치에서 부탄이 담층의 전체 깊이까지 확산된다. 반면 2.5 sccm의 부탄을 거의 완전 (99.6%) 연소시킨 665.9 K 조건에서는 표면화학 반응률이 매우 높아서 유로와 맞닿아 있는 담층의 일부 부분만 사용되고 있다(Fig. 10(b)). 따라서 마이크로 촉매 연소기가 실제로 운전되는 650 K 이상의 온도에서 부탄을 연소시키기 위한 담층 두께의 설계조건을 면밀히 분석할 필요가 있다.

본 연구에서 고려하는 마이크로 촉매 연소기가 650 K에서 거의 완전 연소시킬 수 있는 부탄의 유량은 5 sccm이다[9]. Fig. 11은 해당 온도(650 K)에서 담층 내부의 부탄 농도 분포에 대한 세공 지름의 영향을 보여주고 있다. 온도가 동일한 조건에서 세공의 지름이 증가하면 부탄 분자의 확산 속도가 증가하므로, 부탄이 담층 내부로 더 깊이 침투하게 된다. 본 연구의 마이크로 촉매 연소기에서 담층 세공의 평균지름($d_p=30$ nm)에 대하여 실제 연료 연소에 활발하게 이용되는 담층의 두께는 약 40%인 것을 Fig. 11에서 알 수 있다.

3.3. 마이크로 촉매 연소기 설계 시 담층 두께 고려

Fig. 10(b)와 Fig. 11의 결과에 따르면, 제작된 마이크로 촉매 연소기의 담층 두께(35 μm)는 부탄을 연소시키는데 너무 두껍게 설계된 것을 파악할 수 있다.

Fig. 12는 담층 두께의 변화에 따라 촉매 연소기

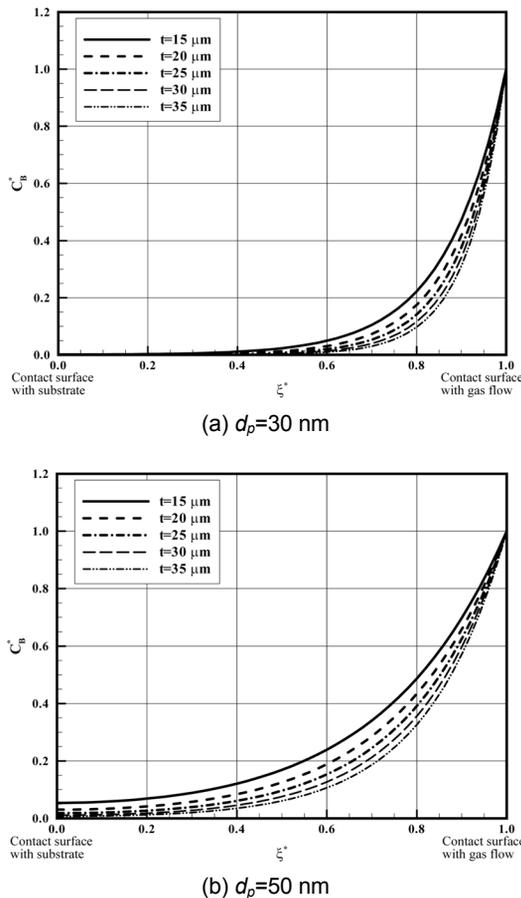


Fig. 12. Effect of the washcoat thickness on butane concentration within the washcoat ($T=650$ K and tortuosity $\tau=4$).

의 실제 운전온도(650 K) 조건에서 담층 내부의 부탄 농도를 예측한 결과이다. 본 연구에서 고려한 마이크로 촉매 연소기의 평균 세공 지름($d_p=30$ nm)에 대해서는 담층의 두께를 감소시켜도 연료를 담층 내부에서 완전히 연소시킬 수 있음을 Fig. 12의 (a)에서 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 12의 (b)와 같이 세공 지름이 큰 조건에서는 담층 내부로의 확산 속도가 증가되어 담층 두께의 끝까지 연료가 깊숙이 확산되지만, 얇은 담층 두께 조건에서는 연료를 완전하게 연소시킬 수 없다. Fig. 12의 (b)에 따르면 본 연구에서 고려한 마이크로 촉매 연소기의 담층 특성 조건에서 담층 내부로 확산된 부탄 연료를 95% 이상 연소시키기 위해서는 담층이 20 μm 이상의 두께로 설계되어야 한다.

4. 결론

부탄 연료를 사용하는 모노리스 타입의 마이크로 백금 촉매 연소기에서 담층 내부의 물질전달과 반

응의 관계에 대한 연구를 진행하였다. 특성길이를 적용하여 1차원으로 단순화된 담층 구조를 가정하고 무차원화된 부탄 연료의 균형 방정식을 도입하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 마이크로 백금 촉매 연소기의 담층 조건으로부터 추정된 공극률의 범위는 $\tau=0.038\sim 0.25$ 이고, 평균 세공 지름을 적용하면 $\tau=0.087$ 이었다. 이는 기존 문헌에서 보고된 알루미늄 담층의 공극률 범위와 잘 일치하였다.

2) 연소기의 운전 온도가 증가하면 촉매 표면에서의 반응속도가 증가하므로 부탄이 담층 내부로 확산되기 이전에 소비된다. 즉 반응속도의 영향이 상대적으로 커지므로 티엘 수는 증가하고, 담층의 일부만 사용되기 때문에 유효계수는 감소하였다.

3) 담층 세공의 지름이 증가하면 유효 확산계수가 증가하여(티엘 수는 감소), 동일한 온도 조건에서 담층 내부로 더 깊게 확산되는 것을 유효계수의 증가로 확인하였다.

4) 촉매 연소기의 운전온도와 담층 세공 지름의 변화에 대한 담층 내부의 연료 분포 해석에 따르면, 본 연구에서 고려한 연소기의 담층 세공 평균지름($d_p=30$ nm) 조건에서 부탄의 연소에 활발하게 이용되는 담층 부분은 전체 두께(35 μm)의 약 40%인 것으로 분석되었다.

5) 마이크로 촉매 연소기의 설계에 적용하기 위하여 담층 두께의 영향을 분석한 결과, 본 연구의 촉매 연소기 운전온도(650 K) 조건에서 담층 내부로 확산된 부탄 연료를 95% 이상 연소시키기 위해서는 담층 두께가 20 μm 이상으로 설계되어야 한다.

후기

본 연구는 경일대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Vican, B. F. Gajdeczko, F. L. Dryer, D. L. Milius, I. A. Aksay, R. A. Yetter, Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002) 909-916.
- [2] X. Wang, J. Zhu, H. Bau, R. J. Gorte, Fabrication of micro-reactors using tape-casting methods, *Catal. Letters*, 77 (2001) 173-177.
- [3] Y. Suzuki, J. Saito, N. Kasagi, Development of micro catalytic combustor with Pt/Al₂O₃ thin films, *JSME Int. J. B*, 47 (2004) 522-527.

- [4] G. A. Boyarko, C. J. Sung, S. J. Schneider, Catalyzed combustion of hydrogen oxygen in platinum tubes for micro-propulsion applications, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 2481-2488.
- [5] T. Okamasa, G. G. Lee, Y. Suzuki, N. Kasagi, S. Matsuda, Micro Catalytic Combustor Using High-Precision Ceramic Tape Casting, *J. Micromech. and Microeng.*, 16(9) (2006) S198-S205.
- [6] G. G. Lee, Y. Suzuki, A Study on the modeling of Pt-catalyzed reaction and the characteristics of mass transfer in a micro-scale combustor, *Trans. Korea Soc. Mech. Eng. B*, 32(11) (2008) 870-877.
- [7] Y. Ju, K. Maruta, Microscale combustion: Technology development and fundamental research, *Prog. Energy Combust. Sci.* 37 (2011) 669-715.
- [8] D. C. Walther, J. Ahn, Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales, *Prog. Energy Combust. Sci.* 37 (2011) 583-610.
- [9] G. G. Lee, Y. Suzuki, Design criterion for the size of micro-scale Pt-catalytic combustor in respect of heat release rate, *J. Korean Soc. Combust.*, 19(4) (2014) 49-55.
- [10] R. E. Hayes, B. Lui, R. Moxom, M. Votsmeier, The effect of washcoat geometry on mass transfer in monolith reactors, *Chem. Eng. Sci.*, 59 (2004) 3169-3181.
- [11] R. E. Hayes, B. Lui, M. Votsmeier, Calculating effectiveness factors in non-uniform washcoat shapes, *Chem. Eng. Sci.*, 60 (2005) 2037-2050.
- [12] R. Prasad, L. A. Kennedy, E. Ruckenstein, Catalytic combustion, *Catal. Rev. Sci. Eng.*, 26 (1984) 1-58.
- [13] R. Aris, On shape factors for irregular particles-I, *Chem. Eng. Sci.*, 6 (1957) 262-268.
- [14] R. K. Sharma, D. L. Cresswell, E. J. Newson, Effective diffusion coefficients and tortuosity factors for commercial catalysts, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30(7) (1991) 1428-1433.
- [15] D. Papadias, L. Edsberg, P. Björnbom, Simplified method for effectiveness factor calculations in irregular geometries of washcoats, *Chem. Eng. Sci.*, 55 (2000) 1447-1459.
- [16] R. E. Hayes, S. T. Kolaczowski, P. K. C. Li, S. Awdry, Evaluating the effective diffusivity of methane in the washcoat of a honeycomb monolith, *Appl. Catal. B*, 25 (2000) 93-104.
- [17] M. Bhattacharya, M. P. Harold, V. Balakotaiah, Mass-transfer coefficients in washcoated monoliths, *AIChE J.*, 50 (2004) 2939-2955.
- [18] S. Y. Joshi, M. P. Harold, V. Balakotaiah, Overall mass transfer coefficients and controlling regimes in catalytic monoliths, *Chem. Eng. Sci.*, 65 (2010) 1729-1747.