

고온형 연료전지 열관리를 위한 배기가스 연소기 성능시험

이상민*, 이연화*, 안국영*, 유상석**†

*한국기계연구원 신재생청정시스템연구소, **충남대학교 기계공학과

Performance Analysis of Off-Gas/Syngas Combustor for Thermal Management of High Temperature Fuel Cell System

SANGMIN LEE*, YOUNHWA LEE*, KOOKYOUNG AHN*, SANGSEOK YU**†

*Korea Institute of Machinery & Materials, 104 Sinseong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Chung Nam Univ., 79 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT

Anode off-gas of high temperature fuel cell still contains combustible components such as hydrogen, carbon monoxide and hydrocarbon. In this study, a catalytic combustor has been applied to the high temperature fuel cell so that the combustion of anode-off gas can be boosted up. Since the performance of catalytic combustor directly depends on the combustion catalyst, this study is designed to perform the experimental investigation on the combustion characteristics of the three commercial catalysts with a different composition. Screening tests with three catalysts are preceded before the performance examination since it is necessary to determine the most suitable catalyst for design configuration of the catalytic combustor. The performance analysis shows that methane conversion rate strongly depends on gas hourly space velocity (GHSV) as well as inlet gas temperature. Additionally, the GHSV optimization results show that the optimum GHSV will be in the range between 18,000 hr⁻¹ and 36,000 hr⁻¹. It is also shown that the minimum inlet temperature of catalytic reaction of methane is from 100°C to 150°C.

KEY WORDS : Catalytic combustion(촉매연소), Syngas combustor(합성가스 연소기), High temperature stationary fuel cell(고온 발전용 연료전지), Selection of catalyst(촉매선정)

1. 서 론

미래 환경에 맞는 새로운 발전 방식은 에너지 고갈 및 오염이라는 양대 현안에 대한 획기적인 대안

이며, 이를 달성하기 위한 엄격한 요구사항이 적용되므로 다양한 대체 시스템들이 연구되고 있다. 연료전지는 화학 반응에 의해 열과 전기를 생성하는 전기화학 에너지 전환 장치이다. 연료전지 시스템에서는 수소와 공기를 시스템으로 공급하고, 전기화학 반응을 통해서 전기를 생성하기 때문에 기존

†Corresponding author : sangseok@cnu.ac.kr

[접수일 : 2010.3.2 수정일 : 2010.4.22 게재확정일 : 2010.6.25]

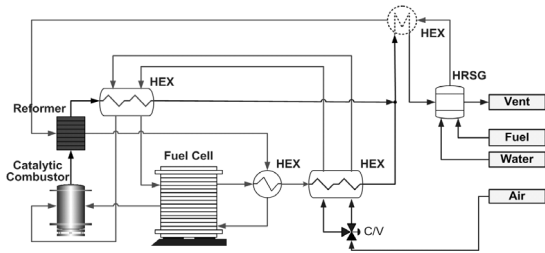


Fig. 1 Schematic diagram of high temperature stationary fuel cell power generation system.

의 발전 시스템에서 제기되던 오염 문제를 해결할 수 있는 유망한 기술이다. 특히, 650°C 이상의 고온에서 작동하는 정치형 고온 발전용 연료전지(high temperature stationary fuel cell)는 배출되는 고온의 잔류가스가 가지고 있는 에너지를 매우 효과적으로 사용할 수 있으므로 효율 또한 기존 복합발전에 상응한 것으로 알려져 있다¹⁾. Williams 등²⁾은 이러한 고온발전용 연료전지를 향후 분산형 발전을 주도할 대안이며, 에너지 활용도가 우수한 기술이라고 보고하였다. 이미 기술우위를 지닌 선진국 기업들은 이러한 정치형 고온발전용 연료전지 기술을 상용화하기 위한 연구 개발에 박차를 가하고 있다³⁾.

Fig. 1은 고온 발전용 연료전지 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 이 시스템은 연료전지 스택(stack) 뿐만 아니라 개질기, 연소기, 열교환기 등의 주변장치를 포함하고 있으므로 시스템을 개발하기 위하여 단위전지와 스택에 대한 기술 개발이 선행되어야 한다. 그러므로 시스템을 상용화 하기 위해서는 최적화된 보기 시스템(balance of plant, 이하 BOP)의 개발을 병행하여야 한다. 기존의 범용 BOP의 경우 고온형 연료전지 시스템의 운전영역에서 내구성을 확보하기 위한 기술적 어려움이 크다.

고온 발전용 연료전지 시스템에서는 스택 연료극(anode)의 배기가스(off-gas) 성분에 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 탄화수소 등의 미반응 연료성분을 포함하고 있다. 시스템의 안전성을 확보하고, 시스템 효율을 향상시키기 위해서는 상기 미반응 연료의 재생이 필수적이다. 한편 연료극 배기가스 성분 중 미반

응 연료와 함께 CO₂, H₂O 등 불연(nonflammable) 성분이 많이 포함되어 있으므로 기존의 버너 타입 연소기를 연료전지 후단에 설치하여 완전 연소를 시키는 것은 기술적인 제한이 크다. 특히, 연료 전지의 전 운전구간에서 연소 안정성을 확보하는 것이 어렵고, 연소 배가스 중 대기 오염물질인 미연탄화수소(UHC), CO, 질소산화물(NO_x) 등을 발생시키는 문제점이 있다.

축매연소는 배가스 중 공해물질 배출이 거의 없고, 화염연소보다 낮은 온도에서 기존의 연소기가 가지고 있는 가연한계 이하 농도를 가진 연료를 효과적으로 연소시킬 수 있는 장점이 있다⁴⁾. 이러한 이유로 축매연소기는 이미 가스엔진 등의 배가스 공해물질 저감을 위해 연소기 후처리기로 적용되고 있다⁵⁻⁷⁾. 최근에는 고온 발전용 연료전지시스템의 연료극 배가스 연소와 관련하여 축매연소에 대한 연구 및 개발이 선진국의 연료전지 업체에 의해 진행되고 있다⁸⁾. 하지만, 각 개발사들이 기술노출을 꺼려하기 때문에 축매연소기의 기술적인 내용에 대해서는 아직 공개가 되고 있지 않다.

축매 연소기의 성능은 사용되는 연소 축매의 종류에 따라 크게 좌우될 수 있으며, 고온 발전용 연료전지 시스템의 축매연소기 최적화를 위하여 적절한 축매의 선정은 매우 중요하다. 축매 연소는 일반적인 연소와 달리 축매 표면으로의 반응물의 확산, 축매 표면에서의 흡착과 축매 반응, 그리고 생성물의 탈착 및 주 흐름으로의 확산과 같은 반응 및 물질 전달현상이 매우 복잡하게 연관되어 있다. 그러므로 연소축매의 종류 및 예열온도, 공간속도 등을 결정하는 것이 안정적인 연소기 설계에 있어 매우 중요하다^{3,9)}.

본 연구에서는 다양한 상용 축매의 연소 특성을 검토할 수 있는 축매연소 성능시험장치를 이용하여 축매 종류에 따른 연소기 성능 변화에 대한 실험적 연구를 수행하고자 하였다. 또한, 미반응 연료극 배가스 연소에 있어 예열온도, 공간속도 등의 인자가 연료 전환율(conversion rate)에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

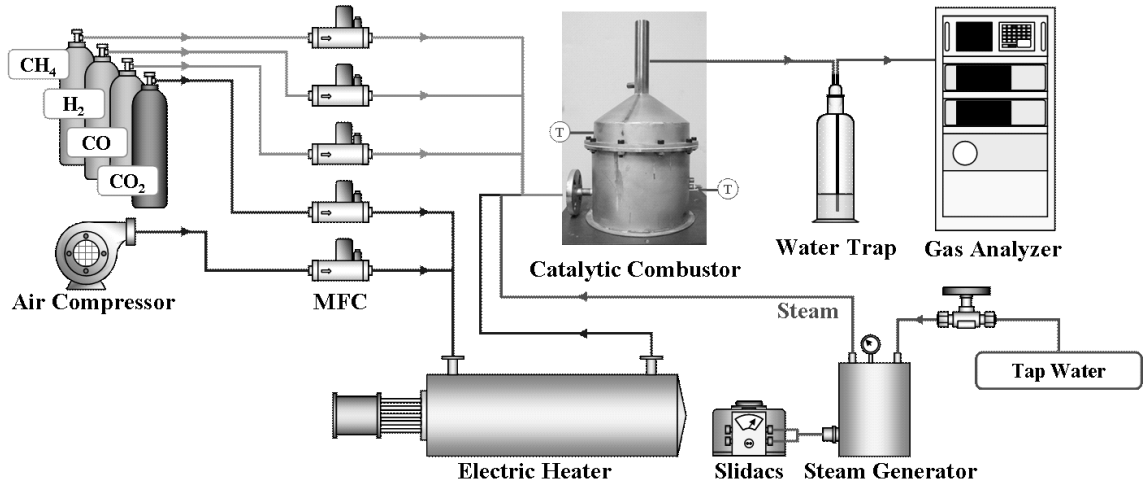


Fig. 2 Experimental apparatus of performance evaluation of catalytic combustor.

2. 촉매연소기 실험장치 및 방법

2.1 연소기 성능 평가 장치

Fig. 2는 혼합부와 촉매 연소부로 구성된 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 연료극 배가스 및 연소용 공기의 유량은 유량제어가 가능한 질량유량계 (mass flow controller; brooks 5800 series)를 이용하여 공급하였다. 촉매연소기 입구온도를 조절하기 위하여 전기히터(electric heater)를 사용하였다. 역화(flashback) 방지를 위하여 전기히터에는 불연 성분인 공기와 CO₂를 공급하고 전기히터 후단에 가연 성분을 공급한 후 혼합하였다. 연료전지에서 연료극 배가스 중에 포함된 수증기를 모사하기 위해 수증기를 공급할 수 있는 증기발생용 전기보일러를 사용하였다. 수증기의 유량은 전압 조정기를 사용하여 전압변화에 따른 수증기의 배출량을 측정 한 뒤 이를 보정하였다. 이때 보일러 내에 수위조절장치를 설치하여 일정한 유량의 수증기 공급이 가능하도록 하였다.

촉매연소기 설계에 있어 연료와 공기의 균일한 혼합(mixing)과 촉매부 전단에서의 균일한 유속 분포의 확보가 매우 중요하다. 만약 혼합 및 유동균일화가 이루어지지 않으면 촉매 내부에서 국부적인 (localized) 고온 지역(hot spot)이 발생할 수 있다.

이는 촉매의 열적 소결이나 귀금속과 같은 촉매성분의 기화, 또는 지지체의 열적 충격에 의한 파손 등을 초래할 수 있다⁸⁾. 본 연구에서는 공기와 가스의 균일한 혼합을 위해 고정식 혼합기(static mixer)를 사용하였으며, 유동 균일화를 위하여 촉매 전단에 2단의 다공판(perforated plate)을 설치함으로써 촉매부에 유동이 균일하게 공급되도록 하였다⁸⁾. 공간속도에 따른 촉매 연소 특성을 파악하기 위하여 촉매 전단에 다양한 면적을 갖는 스페이서(spacer) 및 가스켓(gasket)을 설치하여 공간속도를 조절하였다.

연소촉매 전후단에 열전대(thermocouple; K-type)를 설치하여 연소기 입구 및 출구 가스의 온도를 측정하였다. 연료전환률 등 촉매 반응 특성을 확인하기 위하여 가스분석기를 이용하여 배가스의 농도를 측정하였다. 이때 촉매 출구 배가스는 수분을 제거한 후 가스분석기(gas analyzer; Horiba VA-3000)로 공급하였다. CH₄, CO, CO₂ 농도는 NDIR(non-dispersive infrared) 방식, O₂ 농도는 MPA(magneto-pneumatic)방식으로 측정하였다.

고온형 연료전지의 경우 다양한 종류의 연료의 이용이 가능하다. 본 연구에서는 실제 시스템에 주로 사용되는 도시가스를 모사하기 위하여 CH₄을 연료로 사용하였다. 연료전지의 연료극(anode)으로

Table 1 Flow conditions of anode off-gas and excess air

Component of Anode off-gas	Flow rate (slpm)	Ratio (%)
H ₂	5.71	22.4
CO	1.03	4.0
CH ₄	0.05	0.2
CO ₂	3.19	12.5
H ₂ O	15.52	60.9
Air ($\lambda=4$)	66.2	

공급되는 연료는 개질기(reformer)를 거친 후 공급된다. 따라서 연료극 출구 배가스 농도를 파악하기 위하여 연료전지 시스템용 개질기의 개질물과 주어진 운전조건에서 연료이용량을 함께 고려하여야 하며, 이로부터 연료극 출구 배가스 농도 및 유량을 계산할 수 있다. 본 실험에 사용된 연료 조성 및 유량을 Table 1에 나타내었다. 실험조건 통일 및 촉매 연소기 과열 방지를 위하여 과잉공기비는 400%로 선정하였다.

촉매 성능평가용 연소기는 연료전지 발전량 기준 1kW급 모델연소기를 이용하였다. 본 연구에 사용된 상용 촉매들의 종류 및 특성을 Table 2에 나타내었으며, 촉매 성분과 지지체 형상이 각기 다른 3개 촉매를 대상으로 비교실험을 수행하였다. 촉매연소에서 H₂, CO는 저온에서도 반응이 잘 되나 상대적으로 저온반응성이 나쁜 CH₄를 연소시키는 것이 가장 어려우므로 CH₄ 반응성이 가장 좋은 Pd(palladium) 성분이 포함된 촉매들을 선정하였다³⁾. 촉매 종류별 연소 특성 비교 및 선정을 위한 기준으로 CH₄ 전환율을 비교하는 것이 가장 효과적이다.

Table 2 Specification of sample catalysts

Catalyst	Support type	Elements
A	Ceramic honeycomb monolith	Pd,Ni,Ce/Al ₂ O ₃
B	Ceramic honeycomb monolith	Pt,Pd/Al ₂ O ₃
C	Ceramic Pellet	Pd/Al ₂ O ₃

2.2 연소촉매 성능시험 기법

본 연구에서는 서로 다른 세 가지 종류의 연소촉매들을 촉매 연소기에 직접 장착하였고, 연소기 정상 작동 조건 하에서 연소촉매의 성능을 비교하였다.

각각의 촉매 성능을 알아보기 위하여 수소공급량 변화와 예열온도 변화에 따른 CH₄ 전환율과 연소기 촉매 배가스 온도의 변화를 계측하였다. 연료극 배가스의 미반응 연료성분 중 연소가 가장 힘든 성분이 CH₄이기 때문에, 촉매의 선정기준도 촉매의 CH₄ 연소 가능성에 초점을 맞추었으며, CH₄ 전환율을 촉매 성능을 표현할 수 있는 변수로 정하였다.

촉매층 체류시간(residence time)에 따른 촉매 연소 특성을 파악하기 위하여 공간속도(space velocity, SV)가 많이 사용된다. 공간속도는 공급 기체의 체적유량을 촉매층의 체적으로 나눈 값으로 기체가 반응기에 체류할 수 있는 시간의 역수가 된다. 즉 공간속도가 크게 되면, 촉매층에 가스가 머무르는 시간이 짧아짐을 의미하며, 반대의 경우 촉매층에 머무르는 시간이 길어짐을 의미한다. 일반적으로 촉매연소에서는 시 단위를 기준으로 하는 GHSV (gas hourly space velocity)가 가장 널리 사용된다.

3. 촉매 반응인자에 따른 촉매연소특성

3.1 촉매 종류별 성능평가

본 연구에서는 연료전지 연료극 배가스 연소를 위하여 Table 2에 열거한 3가지 촉매를 선정하였고, 촉매종류, 공간속도, 촉매연소기 입구온도 등의 변화에 따른 촉매연소 특성의 변화를 계측하였다.

앞서 설명한 바와 같이 연료 성분 중 CH₄의 반응성이 가장 떨어지기 때문에 촉매 종류에 따른 연소 성능평가를 위하여 CH₄ 전환율(conversion rate)을 연소촉매 평가 지표로 선정하였다. 촉매 별 연소 성능을 보다 구체적으로 비교하기 위하여 연료극 배가스 조성 중 H₂를 제외한 연료 및 공기를 미리 공급한 이후 수소 공급량을 조금씩 증가시키면서 CH₄ 전환율을 측정하였다. CH₄의 촉매 반응 개시온도(lightoff temperature)는 일반적으로 300℃ 이상이

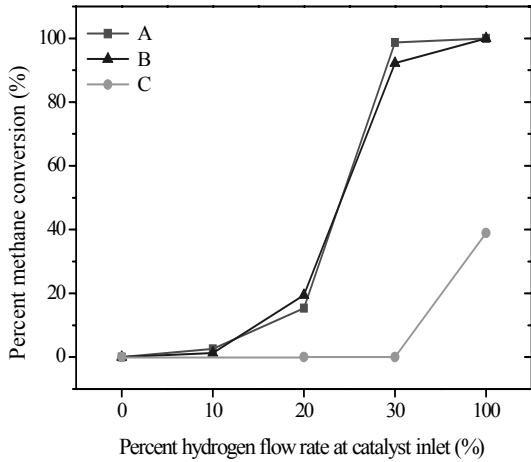


Fig. 3 CH₄ conversion rate of catalytic combustor over various catalysts with respect to H₂ supply rate at $T_i = 150^\circ\text{C}$, $GHSV = 18,000 \text{ hr}^{-1}$.

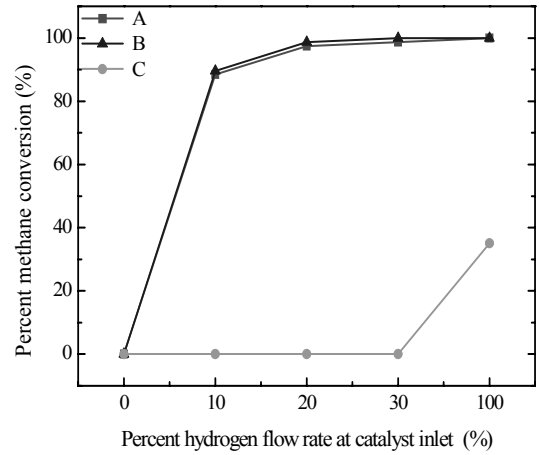


Fig. 4 CH₄ conversion rate of catalytic combustor over various catalysts with respect to H₂ supply rate at $T_i = 250^\circ\text{C}$, $GHSV = 18,000 \text{ hr}^{-1}$.

다. 그러나 저온 반응성이 좋은 H₂와 CO의 반응이 먼저 일어나고 이에 따라 촉매층 내부의 온도가 올라감으로써 CH₄가 상대적으로 저온에서 반응이 가능하다⁸⁾.

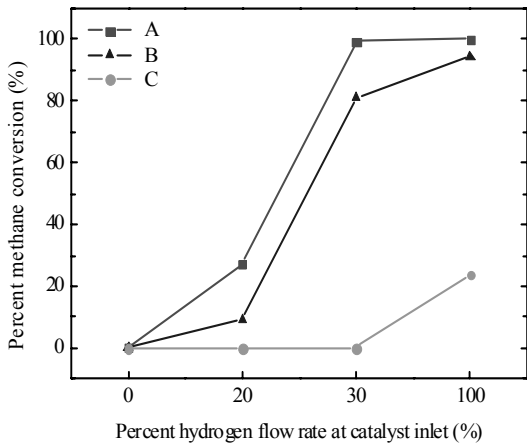
촉매연소기 입구온도가 150°C, GHSV는 18,000 hr⁻¹ 일 때 촉매 종류에 따른 촉매 성능 변화실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 세 가지 촉매 모두 H₂가 포함되지 않은 경우 반응이 일어나지 않음을 확인할 수 있으며, 연료 중 H₂ 비율이 증가하면서 CH₄ 전환율이 증가하는 것이 관측되었다. A, B 촉매의 경우 H₂ 농도가 20% 일 때부터 CH₄ 연소반응이 서서히 시작되어 30% 이상일 때 90% 이상의 전환율을 나타내었다. H₂ 100% 공급 조건에서 99% 이상의 CH₄가 전환됨을 확인할 수 있다. 반면, C 촉매의 경우 수소 농도 30%까지 반응이 일어나지 않다가 100% 공급 시 40% 가량의 전환율을 나타내었다. 촉매 성능 비교결과 위 조건에서는 A 촉매의 반응성이 가장 우수한 것으로 확인되었다.

촉매 입구온도를 250°C로 증가시켰을 때, 촉매별 CH₄ 전환율을 Fig. 4에 나타내었다. A, B 촉매의 경우 H₂가 10% 공급되었을 때부터 급격하게 반응률이 증가하여 20% 이상 조건에서 99% 이상의 CH₄

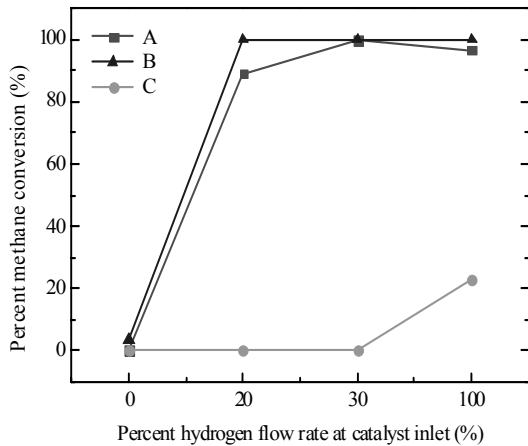
전환율을 기록하였다. 이렇듯 온도가 상승함에 따라 소량의 수소 첨가에도 CH₄ 전환율이 급격하게 증가하는 결과로부터 온도가 촉매반응에 결정적인 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 반면 C 촉매의 경우 온도 상승에도 불구하고 CH₄ 전환율에 큰 변화가 계측되지 않았다.

공간속도를 36,000hr⁻¹로 2배 증가시켰을 때, 즉 촉매층 체류시간(residence time)이 1/2로 줄었을 때의 촉매 성능 변화를 계측하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 입구온도가 150°C 인 경우 A 촉매의 성능 변화는 크지 않았으나, B, C 촉매의 경우 100% 수소 공급 조건에서 CH₄ 전환율이 떨어지는 것이 관측되었다. 촉매층의 부피는 촉매층의 체류시간에 반비례하므로 촉매 별로 적절한 공간속도를 선정하는 것이 촉매연소기의 설계에 있어 매우 중요함을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(b)에서 보듯이 입구온도가 250°C 인 경우 A 촉매의 반응성이 B 촉매의 반응성보다 떨어지는 결과를 나타내며, 수소 100% 조건에서도 97%의 전환율을 기록하였다. 즉, 고온조건에서는 오히려 B 촉매가 보다 안정된 반응성을 나타내는 것이 확인되었다. C 촉매의 경우 18,000hr⁻¹ 일 때와 마찬가지로 입구온도에 의한 영향은 거의 관찰되지 않았다.

촉매연소 반응 정도에 따라 촉매연소기 출구 온도



(a)



(b)

Fig. 5 CH₄ conversion rate of catalytic combustor over various catalysts with respect to H₂ supply rate at GHSV = 36,000 hr⁻¹ (a) T_i = 150°C, (b) T_i = 250°C.

가 변하게 된다. 250°C, 36,000hr⁻¹ 조건에서 수소 공급률에 따라 연소기 출구온도를 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. CH₄ 전환율의 차이가 크지 않은 A, B 촉매의 경우 비슷한 온도를 나타내지만, C 촉매의 경우 이와는 큰 차이를 보이고 있다. C 촉매에서 수소 공급량이 증가함에 따라 출구온도가 증가하는 것으로부터 수소 연소 반응이 잘 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 온도 증가에도 불구하고 출구

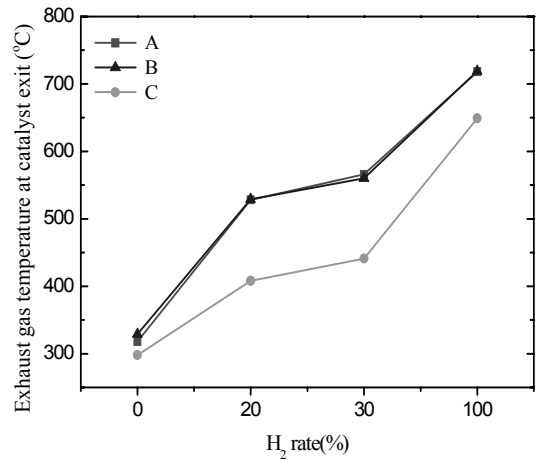
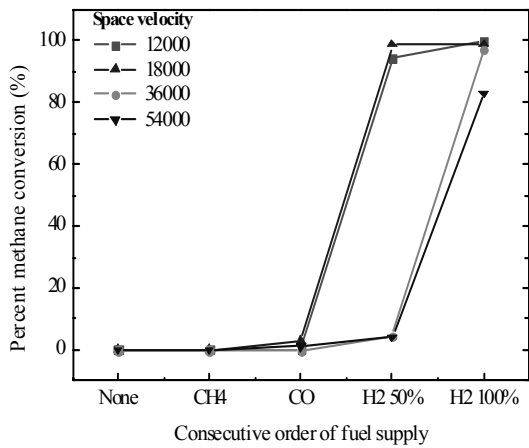


Fig. 6 Exhaust gas temperature at catalyst outlet with respect to H₂ supply rate at T_i = 250°C, GHSV = 36,000 hr⁻¹.

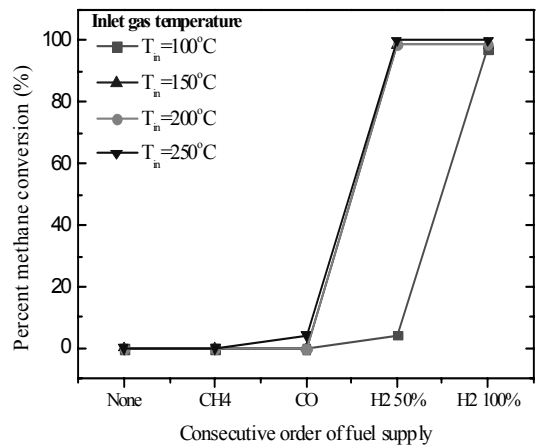
온도의 차이가 나타나는 것은 CH₄ 전환율이 떨어지기 때문이다. 이로부터 CH₄ 전환율 뿐만 아니라 촉매연소기 출구온도도 촉매 성능평가 지표로 사용될 수 있음을 확인하였다. B촉매가 고온에서 성능이 우수한 이유는 일반적으로 Pd 촉매는 800°C 이상의 고온에서 안정성이 떨어지는데, Pt를 추가함으로써 고온에서의 안정성을 유지하였기 때문으로 보인다⁹⁾. 일반적으로 고온 연료전지 시스템에서 촉매연소기 입구온도는 250°C 이상이므로 고온에서 보다 안정적인 B 촉매의 사용이 보다 바람직하다.

3.2 반응인자에 따른 촉매연소 특성

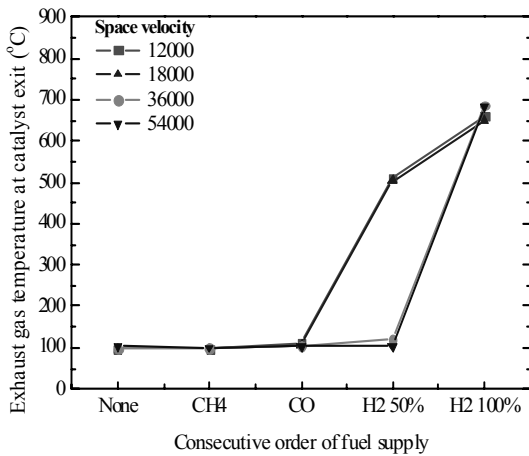
촉매연소 반응에 미치는 촉매 입구온도 및 공간속도의 영향을 보다 상세하게 파악하기 위하여, B 촉매를 대상으로 각각 4가지 조건의 입구온도 및 공간속도 조건에서 연소촉매 성능평가를 수행하였다. Fig. 7은 GHSV가 12,000에서 54,000hr⁻¹ 까지 변화할 때 CH₄ 전환율 및 출구 온도의 변화를 보여준다. 이때 공간속도에 따른 연소특성 변화를 보다 크게 나타내기 위하여 입구온도를 상대적으로 저온인 100°C로 하였고, 가연성분이 포함되지 않은 경우와 이후 CH₄, CO, H₂를 순차적으로 공급하였을 때를 실험조건으로 선택하였다. Fig. 7에서 보듯이



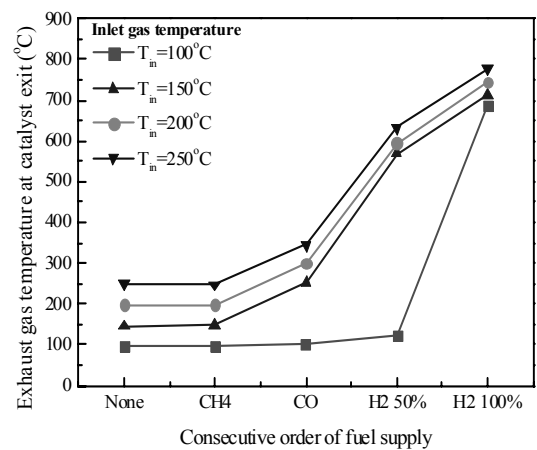
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 7 Performance of combustion catalysts over various space velocity at $T_i = 100^\circ\text{C}$ (a) CH_4 conversion rate and (b) exhaust gas temperature at catalyst outlet.

Fig. 8 Performance of combustion catalysts over various inlet gas temperature at $GHSV = 36000 \text{ hr}^{-1}$ (a) CH_4 conversion rate and (b) exhaust gas temperature at catalyst outlet.

CO가 공급될 때까지 CH_4 전환 및 출구온도 변화가 거의 일어나지 않는 것으로 보아 CO 산화반응의 영향은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 공간속도가 $18,000\text{hr}^{-1}$ 일 때 까지는 수소 공급률이 50% 조건에서 CH_4 전환율이 90% 이상 크게 증가하나, $36,000\text{hr}^{-1}$ 이상에서는 10% 이하의 값을 갖게 된다. 한편, GHSV (gas hourly space velocity)가 $36,000\text{hr}^{-1}$ 이상일 경우에도 100% 수소 공급 조건에서는 CH_4 전환율이

크게 증가한다.

입구온도를 100에서 250°C 까지 증가시키면서 촉매성능평가를 수행하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. CH_4 전환율 및 출구온도의 변화로 보아 150°C 이상에서는 촉매성능의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)에서 보듯이 150°C 이상에서는 CO가 추가됨으로써 연소기 출구 온도가 증가하는 것이 관찰되는데, 이는 CO가 반응함을 나타낸다.

입구온도가 250°C인 경우 CO를 첨가하였을 때 CH₄ 전환율이 5% 가량 발생하는데, 수소의 공급이 없어도 CO의 반응에 의한 온도 상승효과가 CH₄ 연소 반응을 촉진시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 작동 조건 하에서 촉매의 안정성 및 성능을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 촉매 별 실험결과로부터 선정된 촉매를 이용하여 입구온도, 공간속도 등과 같은 인자에 따른 촉매연소 특성을 상세하게 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 공간속도와 입구온도의 변화에 따른 촉매 별 성능을 평가한 결과, C촉매는 입구온도에 관계없이 A, B촉매에 비하여 상당히 낮은 활성을 나타내었다. 온도 변화 실험을 통하여 B촉매가 연료전지 연료극 배가스용 연소기에 가장 적합한 것을 확인하였다.
- 2) 공간속도가 감소함에 따라 촉매 층 내에서 연소 성분의 체류시간 증가로 인하여 CH₄ 전환율이 개선되고 출구온도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 공간속도 18,000hr⁻¹과 36,000hr⁻¹ 사이에서 현저한 성능 차이를 보였다.
- 3) 미반응 혼합가스의 입구온도가 100~150°C 사이에서 반응 활성도가 크게 변하며, 반응 활성을 조절하는데 H₂ 공급 유량이 중요한 역할을 함을 파악하였다.

후 기

“이 논문 또는 저서는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2007-611-D00004).

참 고 문 헌

- 1) Williams, M. C., Strakey, J. P., Singhal, S. C., “U.S. distributed generation fuel cell program”, *Journal of Power Sources*, Vol. 131, 2004, pp. 79-85.
- 2) Bischoff, M., “Large stationary fuel cell systems: status and dynamic requirements”, *Journal of Power Sources*, Vol. 154, 2006, pp. 461-466.
- 3) R. E. Hayes, S. T. Kolaczowski, “Introduction to Catalytic Combustion”, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- 4) Cocchi, S., Nutini, G., Spencer, M. J., Nickolas, S. G., “Catalytic combustion system for a 10MW class power generation gas turbine”, *Catalysis Today*, Vol. 117, 2006, pp. 419-426.
- 5) Betta, R. A. D., Rostrup-Nielsen, T., “Application of catalytic combustion to a 1.5 MW industrial gas turbine”, *Catalysis Today*, Vol. 47, 1999, pp. 369-375.
- 6) Carroni, R., Schmidt, V., Griffin, T., “Catalytic combustion for power generation”, *Catalysis Today*, Vol. 75, 2002, pp. 287-295.
- 7) Hong, D., Kim, C., Kim, M. Y., Lee, S. M., 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, 2007, pp. 1791-1798.
- 8) 이상민, 이영덕, 안국영, 홍동진, 김만영, “MCFC Off-gas 촉매연소기 설계에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제18권 제4호, 2007, pp. 406-412.
- 9) 강성규, “촉매연소의 신기술 동향”, 제27회 KOSCO Symposium 논문집, 2003, pp. 299-308.