

5 kW급 고온형 연료전지 촉매 연소기 유동 균일화 장치가 연소 특성에 미치는 영향

이상민*[†], 우현탁**, 안국영*

*한국기계연구원, **충남대학교 대학원

Effect of Flow Uniformity Device on the Catalytic Combustor for 5 kW High Temperature Fuel Cell System

SANGMIN LEE*[†], HYUNTAK WOO**, KOOKYOUNG AHN*

**Korea Institute of Machinery & Materials*

156 Gaungbukno, Yuseong-Gu, Deajeon, 305-343, Korea

***Grad. School of Mechanical Engineering, Chungnam Univ.*

99 Deahak-ro, Yuseong-Gu, Deajeon, 305-764, Korea

ABSTRACT

Effect of flow uniformity on the reaction characteristics of a catalytic combustor for high temperature fuel cell system has been experimentally investigated in the present study. One of the most important factor in designing catalytic combustion is to avoid hot spot in catalysts. In this regard, it is very important to secure flow uniformity of combustor inlet. A couple of perforated plates were applied at the front of catalyst region as flow uniformity device with minimal pressure drop. Results show that the velocity and temperature profile became more uniform when applying the flow uniformity device. CO and CH₄ emissions at the combustor exit were decreased and the average exit temperature was slightly increased with the flow uniformity device.

KEY WORDS : Catalytic combustor(촉매 연소기), Flow uniformity(유동균일화), Perforated plate(다공 판), BOP(주변장치), Fuel cell(연료전지)

1. 서 론

한정된 화석 연료의 매장량과 지구 온난화 문제 때문에 많은 국가에서 신에너지, 청정에너지에 많은 관심을 보이고 있다. 비교적 깨끗하고 안전한 것

으로 알려진 원자력 발전은 후쿠시마 원자력 발전소 사고로 인해 안정성이 큰 이슈로 떠오르고 있다. 이로 인한 안정성이 높으면서 청정에너지 기술인 연료전지 발전 시스템 기술이 주목을 받고 있다. 특히 고온형 연료 전지(high temperature fuel cell) 발전 분야는 높은 효율을 자랑 하고 환경 유해 물질 배출이 적을 뿐만 아니라 많은 부지 면적이 필요 하

[†]Corresponding author : victlee@kimm.re.kr

[접수일 : 2011.11.24 수정일 : 2011.12.6 게재확정일 : 2011.12.27]

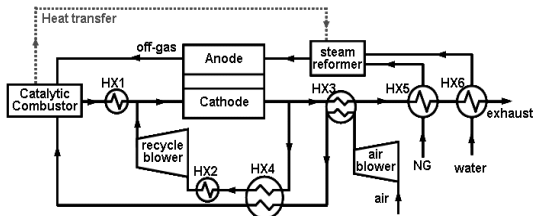


Fig. 1 Schematic diagram of MCFC system

지 않는 측면에서 강점이 있다¹⁾.

Fig. 1에서 보듯이 고온형 연료전지에서 촉매 연소기가 anode에서 배출되는 반응하지 않은 연료 성분($H_2/CH_4/CO$ 혼합기체)을 연소시키기 위한 촉매 연소기가 필요하다. 촉매연소기는 공기 블로워로 공급되는 공기를 이용하여 anode 출기가스(offgas)를 연소시켜 발생하는 열을 이용함으로써 시스템 효율을 증가시킬 수 있다²⁾. 이때 anode 출기가스에는 개질과정 및 연료전지 반응과정에서 발생하는 다량의 CO_2 와 H_2O 로 인하여 연료성분의 농도가 매우 낮아지므로 일반적인 연소방식으로는 완전연소가 어렵다. 이를 해결하기 위한 방안으로 추가로 연료를 공급하는 방법과 촉매연소기를 사용하는 방법이 적용되고 있다. 추가연료를 사용하는 경우 시스템 효율이 저하되기 때문에 희박조건에서도 반응성이 뛰어난 촉매연소기의 사용이 선호되고 있다³⁾.

촉매연소기 설계과정에서 촉매층을 지나는 유동의 균일성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 유동이 균일하지 않을 경우 촉매층을 지나는 연료의 반응성이 떨어지며 촉매층 체류시간이 달라 내부 온도의 불균일과 유동이 없는 부분에 대해서는 촉매층 냉각이 되지 않는다. 이로 인해 국부적으로 온도 정체 구간(hot spot zone)이 생기므로 촉매의 내부에 열에 의한 충격(thermal shock)을 받을 수 있으며, 이 열로 인해 촉매가 파손되는 현상을 일으킬 수 있다⁴⁾. 따라서 촉매연소기 설계에서 가장 중요한 설계 요소는 이러한 hot spot의 생성을 방지하기 위해 촉매 층을 지나는 유동속도의 균일화를 확보하는 것이 중요하며 이를 위하여 별도의 유동 균일화 장치를 설치하는 경우도 있다⁵⁾.

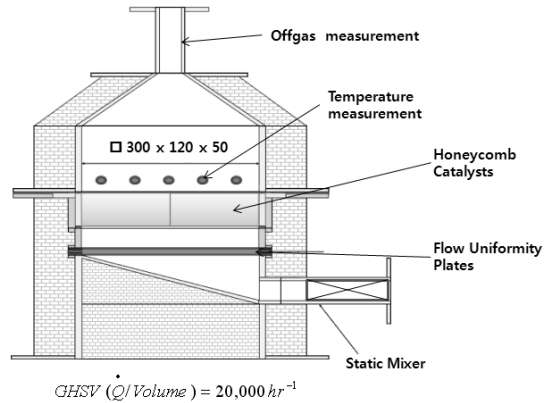


Fig. 2 Schematic diagram of 5kW catalytic combustor

본 연구는 고온형 연료전지 시스템에서 촉매 연소기의 안정적인 설계를 위해 설치된 유동균일화 장치가 촉매연소에 미치는 영향을 파악하고자 유동 균일화 장치 유무에 따른 연소 특성을 비교하는 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 촉매 연소기의 유동 균일화 실험

본 실험을 위하여 Fig. 2와 같은 5kW급 촉매 연소기를 사용 하였다. Pd계열의 귀금속 촉매를 사용 하였다. 연소기 설계점은 GHSV의 값은 $20,000 \text{ hr}^{-1}$ 으로 촉매의 크기는 높이 50mm, 가로 120mm 세로 300mm 이다. 연소촉매 전단에 유동균일화 장치를

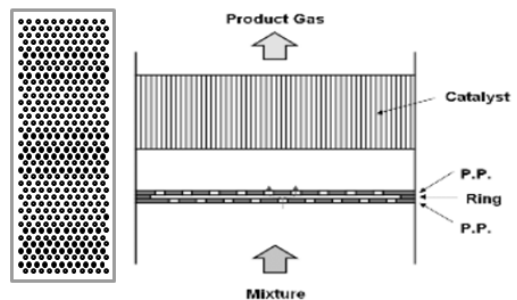


Fig. 3 Schematic diagram flow uniformity device using perforated plates

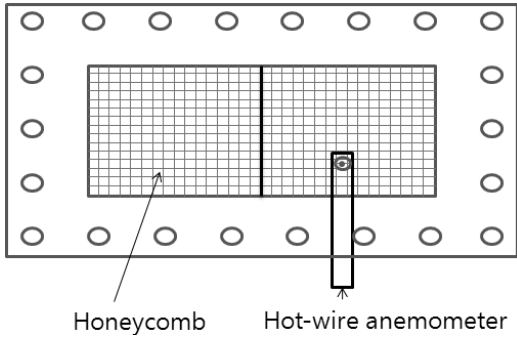


Fig. 4 Schematic diagram of flow measuring system

설치하여 입구 유속분포를 고르게 하였다.

Fig. 3은 유동 균일화 장치의 개략도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 기공율 10%의 다공판 2장을 구멍이 서로 교차되게 설치하였다⁶⁾. 유동은 Fig. 2에서와 같이 좌측 하단의 입구를 통해 유입되며, 촉매 전단에 3mm 두께의 다공 판 2장을 2mm 간격을 두고 교차되게 설치하였다. 유동균일화 장치의 사용 여부에 따라 유속을 가로 세로 10mm 간격으로 열선 유속계(공간분해능 1mm × 1mm)를 사용하여 Fig. 4와 같이 계측하였다.

2.2 촉매연소기의 연소 특성 실험

혼합가스의 정밀한 온도 및 유량 제어를 위해 전기 히터를 이용한 평가 시스템을 Fig. 5와 같이 구성하였다. 이 평가 시스템은 혼합가스 공급장치, 온도조절용 전기히터, 전기보일러, 촉매연소기로 구성되어 있다. H₂, CO, CH₄, CO₂, 공기의 유량은 MFC(Brooks 5851S, 5853S)를 사용하여 조절하였고, H₂O는 스팀

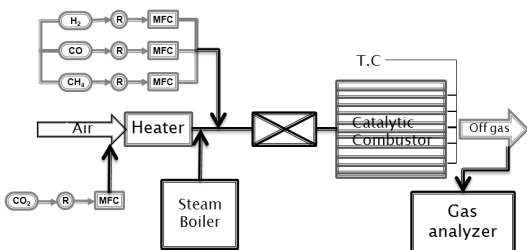


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Flow conditions of catalytic combustor

| Gas | Flow rate |
|------------------|------------|
| H ₂ | 19.99 slpm |
| CO | 3.27 slpm |
| CH ₄ | 0.58 slpm |
| CO ₂ | 16.1 slpm |
| H ₂ O | 59 g/min |
| AIR | 243 slpm |

상태로 공급해야 하므로 전기스팀보일러를 이용하였다. H₂O의 유량은 보일러 내부의 수위를 유지하면서 보일러용 전기히터(5kW)에 공급되는 전력을 제어하여 조절하였다. 촉매연소기 입구온도 조절용 전기히터(20kW)에는 안전을 고려하여 연료를 제외한 공기와 CO₂를 공급하여 온도를 조절하였다.

촉매연소기는 전단의 혼합을 촉진시키기 위하여 정류 혼합기(static mixer)를 설치하였고, 이를 통하여 촉매연소기에 완전히 혼합된 연료/공기 혼합가스가 공급되게 하였다. 촉매연소기 입출구의 온도는 K type 열전대를 이용 25mm 간격으로 5개 설치하여 촉매출구의 온도분포를 계측하였다. 가스분석기(HORIBA VA-3000)를 이용하여 연소기 출구에서의 CH₄, CO, CO₂(NDIR방식), O₂(MPA방식)의 농도를 실시간으로 계측하였다.

연료 조성은 5kW급 SOFC 시스템에서 스택 온도를 700°C, 연료 이용률 70%일때의 조성을 계산한 값이다. 이때 과잉공기량은 당량비 기준으로 400%를 공급하였다. 촉매 연소기에 들어가는 기체 유량의 조성은 Table 1과 같다. 연료의 공급 순서는 CH₄, CO, H₂ 순서로 공급하였으며, 연소기 안으로 들어가는 예열 온도를 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C로 하여 각각의 실험 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 촉매 연소기의 유동 균일화 장치

다공 판의 유무에 대해서 유동 특성을 비교하기 위하여 열선 풍속계를 이용 계측하여 Fig. 6과 같은

5 kW급 고온형 연료전지 촉매 연소기 유동 균일화 장치가 연소 특성에 미치는 영향

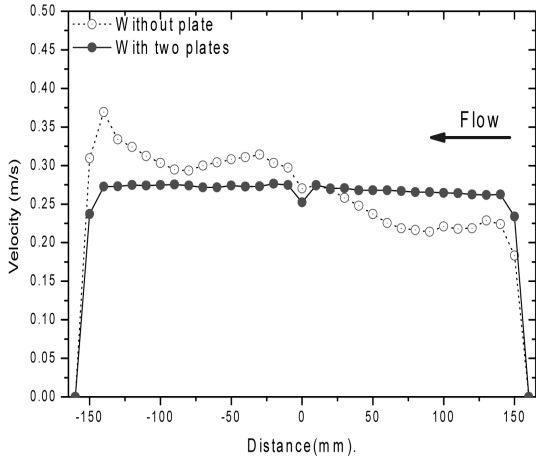


Fig. 6 Flow velocity profile along axial distance over 5kw catalytic combustor with and without flow uniformity device

결과 값을 확인할 수 있었다. 유동 균일화 장치가 없는 경우 공기가 유입되는 반대 방향에서 유동이 치우치는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 장치를 사용한 경우 균일한 유동 분포를 확인할 수 있었다. 실험 결과 유동 균일화 장치가 없는 경우 최대값 0.37m/s,

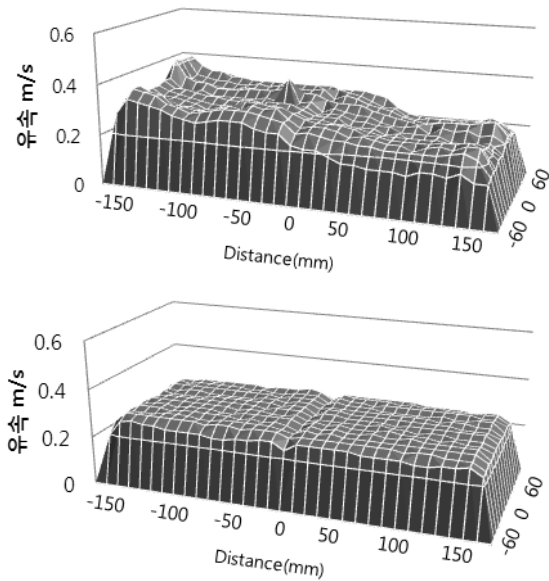


Fig. 7 Three dimensional flow velocity profile without (upper) and with (lower) flow uniformity device

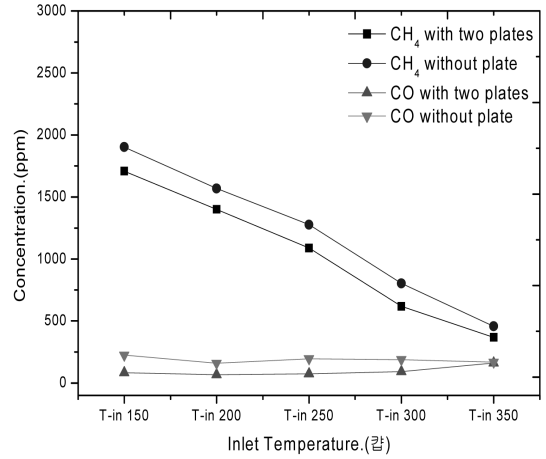


Fig. 8 CH₄, CO emission with and without flow uniformity device with respect to inlet temperature

최소값 0.18m/s로 측정되었고, 유동 균일화 장치가 있는 경우 최대값 0.28m/s, 최소값 0.23m/s로 측정되었다. Fig. 6의 정중앙부에서 유속이 주변값에 비하여 0.2m/s 가량 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실험에 사용한 하니컴형의 연소촉매 2장이 Fig. 2에서 보다시피 0mm지점에서 결합하기 때문에 발생하는 오차이다.

정확한 유동 분포를 확인하기 위하여 3차원으로 도식한 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 유동 균일화 장치의 효과를 확인할 수 있었다. 유동 균일화 장치를 사용하지 않은 경우는 매우 불균일한 유속 분포를 보이고 있다. 유동 균일화 장치의 효과를 비교하기 위해 촉매 출구 유속을 측정하여 표준편차로 비교한 결과 유동 균일화 장치를 제거하여 측정한 경우 0.049m/s, 사용하였을 때 0.0218m/s로 계산되었다. 이러한 경우 연료가 촉매부를 통과 할 때 체류되는 시간이 상대적으로 짧아지므로 유입된 연료가 미처 반응하지 못하고 배출될 가능성이 높아진다. 반대로 속도가 너무 낮은 영역에서는 연료의 촉매 체류 시간 증가 및 기체 유동에 의한 열전달이 원활하게 이루어지지 않아 촉매 내부에서 고온지역이 발생할 가능성이 높아지게 된다.

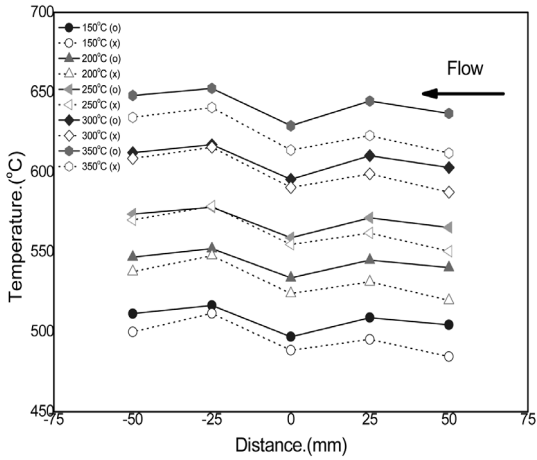


Fig. 9 Temperature profile with respect to axial distance over catalytic combustor with (filled) and without (void) flow uniformity device at various inlet temperature conditions

3.2 촉매 연소기의 성능시험

유동균일화 장치가 실제 연소 반응에 미치는 영향을 알아보기 위해 직접 연료를 공급하여 실험하였다. 각각의 입구 온도별 배출 가스를 비교한 결과 Fig. 8 같이 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 모든 입구 온도 조건에서 유동균일화 장치가 있을 때 CH₄, CO의 배출 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 촉매연소기의 미반응 배출가스의 측면에서도 유동 균일화 장치가 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 유동 균일화 장치 유무의 효과를 비교한 결과 온도별 CH₄의 반응율은 유동 균일화 장치를 사용했을 때 CH₄는 평균 27%, CO는 평균 15% 가량 미반응 배출 가스가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

유동 균일화 장치에 따른 촉매 출구 온도 분포 특성을 알아보기 위하여 촉매 출구에 25mm 간격으로 온도 분포를 확인하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보시다시피 유동 균일화 장치를 제거했을 때 온도 분포는 유동 유입 반대 방향에서 한쪽이 높은 온도 분포를 보이나 유동균일화 장치를 사용했을 때 비교적 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 정중앙부에서 온도값이 작게 나타나는 것은 앞서 언급한 바와 같이 2장의 연소촉매가 가운데 지

점에서 결합하기 때문으로 예측된다. 출구 온도의 편차를 계산한 결과 유동균일화 장치를 사용하지 않았을 경우 촉매 출구 평균 온도의 표준 편차는 10.3°C이고, 유동 균일화 장치 사용했을 때 평균 온도의 표준편차는 7.1°C로 나타났다. 유동균일화 장치를 제거한 경우 보다 사용한 경우 더욱 고른 출구 온도 분포를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 각각의 실험 별 측정부의 평균온도는 유동균일화 장치를 사용 했을 때가 사용하지 않은 경우 보다 약 1.7°C 가량 높은 것으로 나타났다. 이는 촉매층의 유동균일화를 달성함으로써 미반응 배출가스가 저감되고, 그 결과 촉매연소기 출구 온도가 상승하였기 때문으로 예측된다.

4. 결 론

고온형 연료전지 촉매연소기의 유동균일화 장치 효과에 대한 성능시험 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 유동균일화 장치를 사용하여 촉매 내부로 유입되는 유속 분포를 균일하게 향상시킬 수 있었다.
- 2) 연소 특성에서 미반응 배출 가스를 온도 입구 온도 별로 확인한 결과, CH₄는 27%, CO는 15% 감소하는 것을 확인하였다.
- 3) 유동균일화 장치를 설치한 결과 출구 온도 분포가 보다 균일해지고, 미반응가스의 감소로 인하여 출구온도가 상승함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 대경광역경제권 선도산업의 지원하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 박성연, 이충곤, 임희천, 안교상, 서혜경, “용융탄산염형 연료전지의 스택구조와 온도특성”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 15, No. 1, 2004, pp. 54-61.

- 2) 이영덕, 이상민, 안국영, 임희천, “250kW급 MCFC 연료전지-가스터빈 하이브리드 시스템”, 유체기계저널, Vol. 9, No. 10, 2006, pp. 72-75S.
- 3) H. Ghezal-Ayagh, J. Walzak, D. Patel, J. Daly, H. Maru, R. Sanderson, W. Livingood, “State of Direct Fuel Cell/Turbine Systems Development”, Journal of Power Sources, Vol. 152, 2005, pp. 219-225.
- 4) R. E. Hayes, S. T. Kolaczowski, “Introduction to Catalytic Combustion”, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- 5) 강성규, “촉매연소의 신기술 동향”, 제27회 KOSCO Symposium 논문집, 2003, pp. 299-308.
- 6) 이상민, 이영덕, 안국영, 홍동진, 김만영, “MCFC Off-gas 촉매연소기 설계에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 18, No. 4, 2007, pp. 406-412.