

산화제 공급 방법에 따른 메탄올-산소 촉매연소기 특성

지현진[†] · 이정훈 · 최은영 · 양성호

국방과학연구소

Characteristics of Methanol-O₂ Catalytic Burner according to Oxidant Supply Method

HYUNJIN JI[†], JUNGHUN LEE, EUNYEONG CHOI, SUNGHO YANG

Agency for Defense Development, Yuseong P. O. Box 35, Daejeon 34186, Korea

[†]Corresponding author :
grgnmachine@gmail.com

Received 13 December, 2019
Revised 11 February, 2020
Accepted 28 February, 2020

Abstract >> Recently, a fuel reforming plant for supplying high purity hydrogen has been studied to increase the operation time of underwater weapon systems. Since steam reforming is an endothermic reaction, it is necessary to continuously supply heat to the reactor. A fuel reforming plant needs a methanol-O₂ catalytic burner to obtain heat and supply heat to the reformer. In this study, two types of designs of a catalytic burner are presented and the results are analyzed through the experiments. The design of the catalytic burner is divided into that the O₂ supply direction is perpendicular to the methanol flow direction (Design 1) and the same as the methanol flow direction (Design 2). In case of Design 1, backfire and flame combustion occurred in the mixing space in front of the catalyst, and in the absence of the mixing space, combustion reaction occurred only in a part of the catalyst. For above reasons, Design 1 could not increase the exhaust gas temperature to 750 °C. In Design 2, no flashback and flame combustion were observed, the exhaust gas could be maintained up to 750 °C. However, the O₂ distributor was exposed to high temperatures, resulting in thermal damage.

Key words : Methanol(메탄올), Oxygen(산소), Catalytic burner(촉매연소기), Fuel reforming plant(연료 개질 플랜트), Flashback(역화)

1. 서론

최근 개발되고 있는 재래식 잠수함은 잠항시간을 증가시키기 위하여 납축전지 대신 리튬이온전지 및 공기불요추진(air independent propulsion, AIP) 기관

을 탑재하고 있다¹⁾. 디젤-전기식 추진 잠수함에서 사용할 수 있는 공기불요추진기관으로는 연료전지, 폐회로디젤 기관, 스텔링(stirling engine) 기관, module d'engine Sours-Marine Autonoume 등이 존재한다. 이 중 독일, 스페인 해군 등에서 채택하고 있는 연료

전지 시스템은 다른 AIP 기관과는 달리 상대적으로 에너지 변환 효율이 높고(50-60%), 운용 중 동적 요소가 없어 정속하다는 장점이 있다.

일반적으로 연료전지는 전해질 종류 및 작동온도에 따라 크게 5가지 종류로 구분할 수 있다. 수증무기체계에서는 기술성숙도가 높고, 부품수급이 원활한 고분자 전해질형 연료전지 타입을 주로 사용한다. 고분자 전해질형 연료전지 모듈을 효과적으로 운전하기 위해서는 고순도 수소를 저장/공급할 수 있는 시스템이 포함되어야 한다. 최근 선진국에서는 무인 잠수정 및 잠수함의 잠항시간을 극대화시키기 위하여 연료전지와 연료개질을 통합하여 운전하는 방안을 연구하고 있다. 연료개질 방식은 균수지원이 용이하고, 잠항시간이 증가하더라도 시스템 부피/무게 증가폭을 감소시킬 수 있으므로 수증무기체계의 적용이 기대되고 있다^{2,4)}.

수증환경용 연료개질 플랜트는 개질가스에 포함되어 있는 수소 함량을 증가시키기 위하여 수증기 개질 방식을 선택한다. 하지만 수증기 개질 방식은 흡열반응이므로 연소기에서 열을 생성하여 개질 반응기로 공급해야 한다. 지상에서 운전하는 연료개질 플랜트의 경우, 연소기의 산화제로 공기를 사용할 수 있지만 수증무기체계에서는 저장 용이성 때문에 공기 대신 순산소를 사용해야 한다⁵⁻⁸⁾. 공기를 산화제로 사용한 탄화수소계 촉매연소기에 대한 연구는 일부 제시된 바 있으나⁹⁻¹²⁾, 산소를 산화제로 사용한 촉매연소기에 작간접적으로 적용하기에는 한계가 있다. 특히 촉매연소기에서 산화제로 공기 대신 산소를 사용할 경우, 반응물 및 생성물의 열용량이 감소하여 연소촉매 자체의 열용축이 가속화되며, 산소의 높은 반응성 때문에 불균질 혼합에 의한 연소촉매의 국부적인 열적 손상이 발생하기 쉽다. 따라서 연소촉매의 운전 안전성 및 내구성 향상을 위하여 산소 공급 방식에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 수증무기체계용 연료개질 플랜트에 적용할 수 있는 메탄올-산소 촉매연소기의 개발을 위하여 4 kW급 축소형 모델을 제작하고, 이를 활용한 실험결과를 분석하였다. 실험장치를 이용한

연소 실험은 수소정제 후 잔여 개질가스를 연소시켜야 하는 정상운전의 조건보다는 메탄올만 연소시켜야 하는 시동운전의 조건을 중심으로 연구하였다. 메탄올-산소 촉매연소기는 크게 2가지 설계안을 제시하여 제작 및 실험을 하였으며, 연소촉매 후단의 배기가스 온도 및 연소촉매 상태를 중요 성능 인자로 설정하여 분석하였다. 또한 촉매연소기의 혼합공간에 대하여 ANSYS Fluent (version R19)를 활용한 기본적인 유동해석을 수행하여 실험결과 분석에 활용하였다.

2. 실험

2.1 실험장치의 구성

Fig. 1는 메탄올-산소 촉매연소기에 대한 실험장치 구성도이다. 메탄올(>99.9%, Sigma-Aldrich Co., St. Louis, USA) 및 탈이온수는 고정밀 메탄올 펌프(HI-12, FLOM Co., Tokyo, Japan)를 통해 촉매연소기로 공급하였다. 산화제용 산소(>99.9%) 및 소기용 질소(>99.9%)는 질량유량제어기(VIC-D220, MKP Co., Hwaseong, Korea)를 통해 촉매연소기로 공급하였다. 촉매연소기의 후단에는 열교환기를 설치하였으며, 촉매연소 후의 배기가스는 응축된 액체들을 제거한 후 외부로 배출하였다. 촉매연소기는 약 4 kWth 출력으로 설계하였으며, 개략적인 규격은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 촉매연소기와 열교환기의 내부 구조를 보여주고 있다. 촉매연소기는 연소촉매의 면적당 최

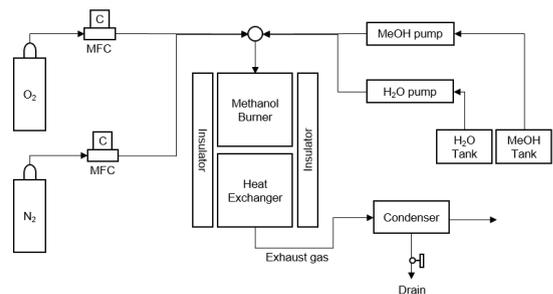


Fig. 1. Schematic layout of experimental set-up for the methanol-O₂ catalytic burner

대허용출력을 기준으로 최대 15 mL/min의 메탄올이 연소될 수 있도록 설계하였다. 연소촉매의 내구성을 확보하고 노즐 개발에 대한 기술적 리스크(risk)를 감소시키기 위하여 메탄올 연료는 기화시켜 공급하였다. 메탄올은 촉매연소기 상단에 위치한 증발기에 의해 기화된 후 연소촉매로 공급된다. 이때 증발기는 전기히터에 의해서 일정온도로 유지될 수 있도록 제어하였다. Pt 계열의 연소촉매(Purelyst PH-304MF, PureSphere Co., Nonsan, Korea)는 $\Phi 65 \times 5$ mm로 재단 후 공간속도에 맞도록 적층하여 삽입하였다.

일반적인 연소기는 점화 플러그(spark plug)나 글로우 플러그(glow plug)와 같은 이그나이터(igniter)를 사용하여 시동을 한다. 하지만 이러한 장치는 연소기 케이스를 관통하여 설치해야 하는 단점이 있다. 이러한 이유로 고압에서 운전해야 하는 수중환경용 촉매연소기에 이그나이터를 적용하는 것은 제한적이다. 본 연구에서는 촉매연소기의 초기 시동을 위하여

연소촉매가 위치하는 외곽 케이스에는 밴드히터(band type heater)를 설치하였다. 촉매연소기 후단에는 코일(coil) 타입의 열교환기(1/4 inch tube, length=3 m)를 배치하였다. 또한 열교환기 전단 및 후단에는 K-타입 열전대를 삽입하여 촉매연소기 후단 온도 및 열교환기 후단 온도를 측정하였다.

촉매연소기는 산소 공급 방식에 따라 크게 2가지 안으로 설계하였다. 제1설계안(Fig. 2[a])은 메탄올 유동방향 기준으로 산소를 측면에서 공급하는 방식이다. 균질한 산소 공급을 위하여 $\Phi 1$ mm 홀(hole) 20개를 촉매연소기 외곽케이스의 원주방향에 배치하도록 설계하였다. 제1설계안은 산소와 메탄올의 유동방향이 직각이기 때문에 혼합공간에서 난류를 발생시켜 반응물의 혼합을 촉진시키고 차압이 감소되는 장점이 있기 때문에 이전 연구에서도 적용된 바 있다^{13,14}. 제2설계안(Fig. 2[b])은 STS 316 L 재질의 산소분배기(O₂ distributor)를 통해 메탄올 유동방향과 동일한 방향으로 산소를 공급하는 방식이다. 이 경우 메탄올의 유동면적이 감소하여 차압이 증가될 수 있으나, 혼합공간을 축소시키고 연소에 참여하는 촉매 면적을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

Table 1. Specifications of methanol-O₂ catalytic burner

	Specifications
Fuel	Methanol (>99.9%)
Oxidant	O ₂ (>99.8%)
Max. heat power	~4 kWth
Dimensions (burner only)	$\Phi 76.2 \times 300$ mm
Max. operating temperature	750°C

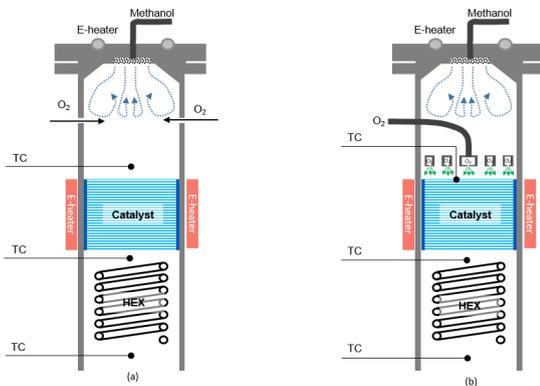


Fig. 2. Cross-section of the methanol-O₂ catalytic burner (a) Design 1, (b) Design 2

2.2 시동 및 제어 방법

촉매가 연소를 시작하기 위해서는 외부 열원에 의해 목표온도까지 가열이 필요하다. 이때 촉매 및 연료의 종류에 따라 연소를 시작할 수 있는 온도가 상이하다. 본 연구에서는 사전 실험을 통해 연소촉매가 100°C 이상으로 가열되면 메탄올-산소 조건에서 촉매연소가 가능하다는 것을 확인하였다. 따라서 촉매연소기 시동을 위하여 우선적으로 연소촉매 가열용 밴드히터 및 메탄올 증발기용 전기히터를 작동시켰다. 연소촉매가 목표온도에 도달하면 메탄올과 산소를 목표 유량의 1/3 수준으로 공급하였다. 반응물 공급 직후, 촉매연소기 후단온도가 급격히 증가하면 촉매연소가 시작되었다고 판단하고 밴드히터의 작동을 중지하였다. 이후 메탄올 및 산소의 공급량을 목표유량까지 점차 증가시켰고, 이와 동시에 연소촉매의 후

단 온도가 750°C가 되도록 산소 공급량을 미세 제어 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제1설계안

Fig. 3은 제1설계안에 따라 제작된 촉매연소기의 운전결과를 보여주고 있다. 연소촉매는 밴드히터로 100°C 이상이 되도록 충분히 가열한 후, 메탄올-산소의 반응물을 동시에 연소촉매기에 공급하였다. 반응물 공급과 함께 연소촉매의 전단(catalyst inlet) 온도는 급격히 상승하였다가 하강하였다. 이것은 연소촉매가 시작되는 순간 혼합공간에 존재하였던 반응물이 역화하면서 혼합공간 내 반응물을 모두 소진하면서 발생한 현상이었다. 이후 산소 공급량을 잠시 중단하였다가 1 L/min부터 0.1 L/min씩 순차적으로 증가시켜 연소촉매가 유지되도록 제어하였다. 촉매 후단 온도는 촉매 전단부와 시간차를 두고 더 완만한 기울기로 상승하였다. 산소 공급량은 연소촉매 후단 온도를 750°C까지 상승시키기 위하여 계속 증가시켰으나, 55.2분 부근에서 약한 폭발을 동반한 역화(flashback)현상이 발생하였다. 이때의 산소 공급량은 2.2 L/min였으며, 정상상태에서 공급되는 메탄올 유량 기준으로 완전 연소에 필요한 산소의 약 16% 수

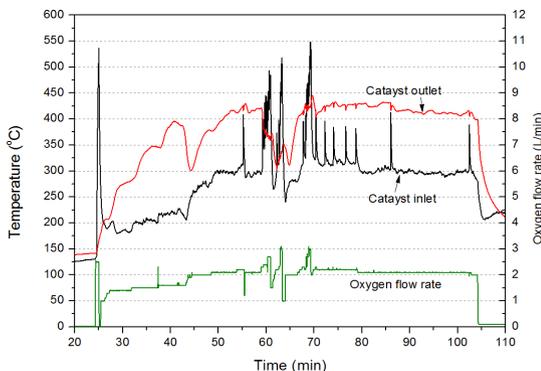


Fig. 3. Change in temperature and oxygen flow rate of catalytic burner (Design 1) after start-up when mixing space is existed in front of catalyst

준에 해당하였다. 또한 60-70분 영역에서 볼 수 있듯이, 산소 공급량을 더욱 증가시킬수록 혼합영역에서 발생하였던 역화현상은 불꽃연소로 발전하여 연소촉매 입구 온도가 크게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 제1설계안의 촉매연소기의 경우에는 혼합공간에서 발생하는 역화 및 불꽃연소현상으로 인하여 연소촉매의 후단온도를 750°C까지 상승시킬 수 없었다.

이러한 문제의 원인은 ANSYS Fluent (Multiphase-mixture 및 Viscous-Realizable k-e 모델 사용)를 활용한 유동해석을 통해 유추할 수 있었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 초기 시동 시 공급되는 산소는 메탄올의 유동방향을 변화시킬만한 충분한 운동량을 가지지 않았다. 그 결과 낮은 산소 유량에서는 메탄올과 혼합이 되지 않아 역화 및 불꽃연소현상이 발생하지 않았다. 이에 반해 산소 유량 증가에 따라 산소의 운동량도 증가하므로, 메탄올과 산소의 혼합이 촉진되어 혼합영역에서도 연소가 가능한 조건이 형성되었다. 특히 공기 기준 메탄올의 인화점(flash point) 11-12°C, 자발화 온도(autoignition temperature) 385-470°C, 폭발한계(explosive limit) 3-36%임을 감안한다면¹⁵⁾, 순수 산소를 사용할 경우에는 혼합영역에서 역화 및 불꽃연소가 발생할 확률이 증가하게 된다. 이에 반해 동일한 메탄올 연료에 대해 산화제로 공기를 사용할 경우, 질소로 인하여 혼합공간에서 자발화가 발생하지 않는 조건에서도 충분한 운동량을 확보할 수 있어서 메탄올과의 균질 혼합을 기대할 수 있다.

제1설계안의 촉매연소기의 경우, 메탄올과 산소가

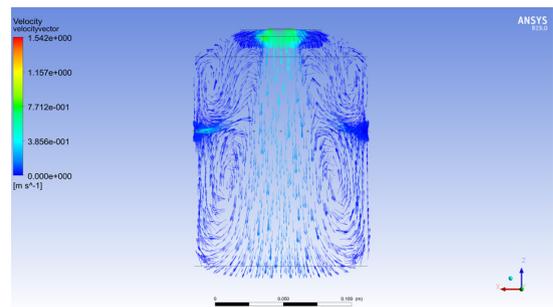


Fig. 4. Velocity profiles in the mixing compartment

균질혼합에 근접할수록 역화 및 불꽃연소의 발생 확률이 증가하기 때문에 혼합공간을 제거할 필요가 있었다. 따라서 기존의 산소가 공급되는 홀(hole)로부터 일정거리 이격하여 설치하였던 연소촉매를 산소가 공급되는 홀에 근접하여 설치하여 재실험 하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 이전 실험과 동일하게 연소촉매는 밴드히터로 100°C 이상이 되도록 충분히 가열한 후, 메탄올-산소의 반응물을 동시에 연소촉매기에 공급하였다. 연소공간을 제거한 결과, 반응물 공급과 동시에 발생하였던 역화현상은 나타나지 않았다. 또한 촉매온도를 상승시키기 위하여 메탄올 및 산소의 공급량을 변화시켰음에도 불구하고 전체 구간에서 역화 및 불꽃연소의 현상은 더 이상 나타나지 않았다. 하지만 시동 후 25분이 경과하면서 연소촉매의 후단온도는 400°C 이상까지 상승하였다가 감소하면서 열교환기 후단온도와 역전되는 현상이 나타났다. 이러한 현상의 원인은 Fig. 4의 유동해석 결과를 바탕으로 유추해볼 수 있었다. 역화 및 불꽃연소현상의 발생을 억제하기 위하여 혼합공간을 제거하였으므로, 측면에서 공급되는 산소는 곧바로 연소촉매의 가장자리로 공급된다. 산소는 다공성매질의 연소촉매를 이동하면서 촉매의 원주에서 중심방향으로 확산되고, 반대로 메탄올은 중심부에서 원주방향으로 확산된다. 따라서 촉매 전면적 중 원주 영역의 일부에서만 촉매연소 반응이 일어나며, 메탄올과 산

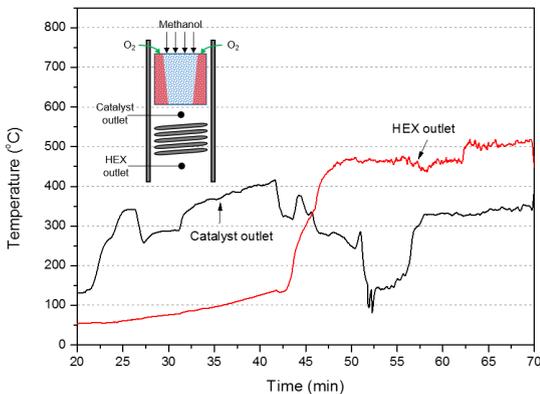


Fig. 5. Temperature profile in the catalytic burner without mixing compartment (Design 1)

소의 공급량 변화에 따라 연소촉매 후단의 중심에 설치된 열전대는 미반응한 메탄올의 온도를 측정할 수 있기 때문이었다. 이에 반해 열교환기 후단에서는 고온의 배기가스와 미반응 된 메탄올이 열교환기에 의해 혼합되므로, 열교환기 후단의 중심부에 설치된 열전대는 연소촉매 후단보다 높은 온도를 측정할 수 있었다.

이러한 현상은 실험 후 연소촉매의 상태를 통해서도 확인할 수 있었다. Fig. 6은 실험 후의 탈착한 연소촉매(유동방향 기준 최상위 촉매)를 보여주고 있다. 연소촉매의 중심부는 초기의 상태를 그대로 유지하고 있는데 반해, 촉매의 가장자리는 검은색의 슈트(soot)가 생성된 것을 볼 수 있었다. 이것은 낮은 산소 농도 구간에서 메탄올의 불완전 연소에 의해 발생한 것으로, 슈트 형태를 통해 산소의 유동 경로 및 연소 영역을 유추할 수 있었다. 상기와 같은 형태로 촉매연소기를 장시간 운전할 경우, 연소의 불균형으로 인한 촉매 내구성의 문제가 발생할 수 있다.

3.2 제2설계안

Fig. 7은 제2설계안에 따라 제작된 촉매연소기의 실험결과를 보여주고 있다. 혼합공간이 존재하지 않는 제1설계안과 마찬가지로 반응물의 공급과 함께 촉매연소를 시작하였지만 역화현상은 발생하지 않았다. 연소촉매 후단온도는 산소 공급량의 변화에 따라 즉각적인 반응을 보였다. 산소 공급량의 증가와 함께 연소촉매의 후단온도는 지속적으로 상승하였으며, 80분 후에는 목표온도인 750°C에 도달할 수 있었다. 750°C



Fig. 6. Combustion catalyst after end of experiment

까지 상승하는 과정에서도 역화 및 불꽃연소는 발생하지 않았다. 열교환기 후단 온도는 시간차이를 두고 연소축매 후단 온도와 유사하게 상승하였으나, 제2유체인 탈이온수가 열교환기의 흡열부(cold side)에 공급되면서 배기가스 온도는 100°C 부근까지 감소하였다가 다시 상승하였다. 90분 이후부터는 산소 공급량이 4.0 L/min로 유지하였으며, 이때 연소축매 후단온도는 750±5°C의 범위 내에서 변동하였다.

90분 이후부터 연소축매의 후단온도는 정상상태에 진입하여 안정화 되었지만 110-115분 사이에 산소 공급량이 크게 변동하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 산소용 질량유량제어기의 압출구 압력차이가 질량유량제어기의 작동 가능 압력 범위 이하로 낮아졌기 때문에 발생한 현상이었다. 즉, 실험 초기에는 질량유량제어기의 입구압력이 3 barg 수준으로 설정하였지만 고온의 연소축매에 인접한 산소분배기가 열적손상을 받아 차압이 증가하였고, 이로 인해 질량유량제어기의 출구압력이 증가하였다. 115분 이후부터는 인위적으로 질량유량제어기의 입구압력을 5 barg 수준으로 상승시켜주었기 때문에 질량유량제어기가 정상작동 할 수 있었다. 상기의 결과와 같이 제2설계안은 축매연소기의 역화 및 불꽃연소 없이 연소축매를 목표온도인 750°C에서 안정적으로 운전할 수 있었으나, 산소분배기가 고온에 노출되어 열적 손상을 받는다는 문제가 있었다. 따라서 제2설계안을 바탕으로 고온의 연소축매와 산소분배기 간의 열전달을

최소화할 수 있는 구조로 변경하거나 산소분배기의 재료를 변경하여 내열성을 확보할 필요가 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 수증무기체계에 적용할 수 있는 메탄을 수증기 개질 플랜트용 메탄올-산소 축매연소기에 대한 2가지 설계안을 제시하고 운전 결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 산화제인 산소가 연소기 측면에서 중심방향(메탄을 유동방향 기준으로 수직방향)으로 공급되고 연소축매 상단에 혼합공간이 존재할 경우, 반응물(메탄올+산소)의 공급 시작과 함께 혼합공간에서 역화가 발생하였다. 낮은 산소 유량에서는 산소의 운동량이 적어 메탄올과 혼합이 되지 않아 오히려 역화 및 불꽃연소현상이 발생하지 않았다. 이에 반해 산소 유량 증가에 따라 산소의 운동량도 증가하므로, 메탄올과 산소의 혼합이 촉진되어 혼합영역에서도 역화 및 불꽃연소가 발생할 확률이 증가하였다. 상기의 이유로 축매연소기의 후단온도를 750°C까지 상승시킬 수 없었다.

2) 산화제인 산소가 연소기 측면에서 중심방향(메탄을 유동방향 기준으로 수직방향)으로 공급되고 연소축매 상단에 혼합공간이 존재하지 않을 경우(연소축매를 산소 공급홀 바로 아래에 설치), 반응물 공급 시작 및 산소 공급량 증가 조건에서도 역화 및 불꽃연소현상은 발생하지 않았다. 다만 산소의 낮은 운동량으로 인해 메탄올과 산소가 주로 축매의 원주 영역에서 연소반응을 일으켰다. 상기의 이유로 축매연소기의 후단온도를 750°C까지 상승시킬 수 없었다.

3) 산화제인 산소가 메탄올의 유동과 동일 방향으로 공급하고 연소축매 상단에 혼합공간이 존재하지 않을 경우(연소축매를 산소분배기 바로 아래에 설치), 반응물 공급 시작 조건 및 산소 공급량 증가 조건에서도 역화 및 불꽃연소현상은 발생하지 않았다. 연소축매의 후단온도는 산소 공급량의 변화에 따라 즉각적인 반응을 보여주었다. 축매연소기는 산소 공급량의 제어를 통해 후단온도를 750°C까지 도달시킬

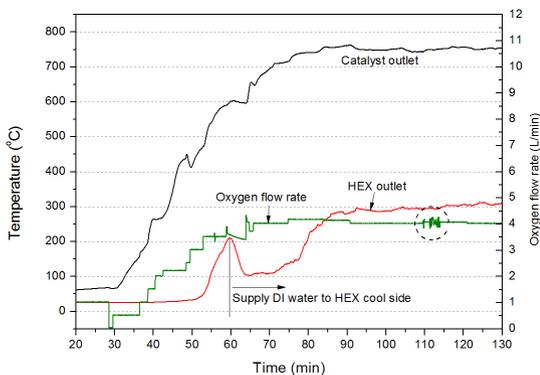


Fig. 7. Temperature profiles and oxygen flow rate of catalytic burner after start-up (Design 2)

수 있었다. 하지만 연소촉매의 고온에 의해 산소분배기가 열적 손상을 받아 산소 공급 라인에 차압이 발생하였다. 따라서 이를 해결하기 위하여 고온의 연소촉매와 산소분배기 간의 열전달을 최소화할 수 있는 구조를 적용하거나 산소분배기의 재료를 변경하여 내열성을 확보할 필요가 있다.

이러한 결과는 향후 메탄올 수증기 개질기에 연동되는 메탄올-산소용 다단연소기 설계에 활용할 계획이다.

후 기

본 연구는 방위사업청 핵심기술 연구개발 예산으로 수행되었다.

References

1. A. Psoma and G. Sattler, "Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production", *J. Power Sources*, Vol. 106, No. 1-2, 2002, pp. 381-383, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01044-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01044-8).
2. S. Krummrich and J. Llabrés, "Methanol reformer – the next milestone for fuel cell powered submarines", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 15, 2015, pp. 5482-5486, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.179>.
3. "HDW, SENER develop methanol reformer for fuel cell submarines", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2012, No. 12, 2012, pp. 2, doi: [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(12\)70342-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70342-5).
4. "UTC power to develop fuel cell for Spanish sub", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2008, No. 1, 2008, pp. 4, doi: [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(08\)70009-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(08)70009-9).
5. H. J. Ji, J. H. Lee, E. Y. Choi, and I. S. Seo, "Hydrogen production from steam reforming using an indirect heating method", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 7, 2018, pp. 3655-3663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.137>.
6. U. R. Cheon, K. S. Ahn, and H. K. Shin, "Study on the characteristics of methanol steam reformer using latent heat of steam", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 19-24, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.19>.
7. H. J. Ji, E. Y. Choi, and J. H. Lee, "Optimal operation condition of pressurized methanol fuel processor for underwater environment", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 5, 2016, pp. 485-493, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.5.485>.
8. H. J. Ji, K. D. Baik, S. H. Yang, and S. K. Jung, "Start-up strategy of multi-stage burner for methanol fuel reforming plant", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 201-208, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.201>.
9. T. Ghang, Y. Kim, S. Lee, and K. Ahn, "An experimental study on the performances of a coupled reactor with catalytic combustion and steam reforming for SOFC and MCFC", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 4, 2014, pp. 364-377, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.4.364>.
10. T. G. Ghang, H. J. Sung, S. M. Lee, K. Y. Ahn, and Y. M. Kim, "Performance comparison of integrated reactor with steam reforming and catalytic combustion using anode off-gas for high temperature fuel cells", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 800-809, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2011.22.6.800>.
11. S. M. Lee, Y. H. Lee, K. Y. Ahn, and S. S. Yu, "Performance analysis of off-gas/syngas combustor for thermal management of high temperature fuel cell systems", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 193-200. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201030853092575.page>.
12. S. M. Lee, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, D. J. Hong, and M. Y. Kim, "A study on the design of MCFC off-gas catalytic combustor", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 18, No. 4, 2007, pp. 406-412. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200710736976340.page>.
13. H. J. Ji, J. M. Bae, S. B. Cho, and I. Y. Kang, "Start-up strategy and operational tests of gasoline fuel processor for auxiliary power unit", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 11, 2015, pp. 4101-4110, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.157>.
14. H. J. Ji and S. B. Cho, "Steam-to-carbon ratio control strategy for start-up and operation of a fuel processor", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 15, 2017, pp. 9696-9706, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.153>.
15. Methanol Institute, "Methanol safe handling manual, 4th edition", 2017, pp. 253. Retrieved from <http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2017/03/Safe-Handling-Manual.pdf>.