



2단 다공성 매체버너에서 열교환기를 모사한 수관 유무에 따른 연소 특성 비교

이희도 · 김재현 · †이기만*

순천대학교 우주항공공학과, *순천대학교 기계우주항공공학부
(2019년 9월 9일 접수, 2019년 10월 23일 수정, 2019년 10월 24일 채택)

Comparison of Combustion Characteristics With and Without Water Tube Simulating Heat Exchanger in Two Sections Porous Media Burner

Hui-Do Lee · Jae-Hyeon Kim · †Kee-Man Lee*

Department of Aerospace Engineering, Suncheon National University, Korea

**School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, Korea*

(Received July 16, 2019; Revised October 22, 2019; Accepted October 23, 2019)

요 약

본 연구에서는 수관식 보일러의 열교환기를 모사하기 위하여 수관의 존재 유무에 따른 화염의 안정화와 연소 특성을 당량비와 유속에 따라 비교하였다. 버너는 화염이 존재하는 SiC foam과 역화 방지를 위한 세라믹 보드, 균일한 유동장을 형성하는 알루미늄아 볼로 구성되며, 반경 방향의 열 손실을 최소화하기 위하여 단열재로 밀폐되어 있다. 결과적으로 수관이 존재하는 경우 낮은 당량비 구간에서 역화 및 날림 현상의 경계가 넓어지는 것을 안정화 영역에서 확인할 수 있었다. 또한, 수관이 존재하는 경우 NO_x 배출량이 수관이 없는 경우보다 증가하는 것을 확인하였다. 이는 수관이 존재함으로써 열 손실을 억제하여 화염의 온도가 증가하는 것으로 판단하였으며, O₂ 배출량과 화염의 온도를 예측하여 입증하였다.

Abstract - In this study, the experimental studies were conducted to analyzing characteristics of combustion and flame stabilizing according to with and without water tube in boiler. The burner has consisted of SiC foam where has the location of submerged flame between a ceramic board acting as flash-back arrestor. Porous burner is also insulated to minimize heat loss in the radial direction. In the condition of fixed equivalence ratio, the flame mode was divided into three stability zones by the flow rate. The main factor for blow-off and flash-back depends on mixture flow rate. Consequently, the case of burner with water-tube has higher NO_x emissions than without case. This result explains that the presence of water-tube makes the heat loss resistant to ambient temperature with increasing of NO_x. This tendency was proved by predicting the relationship between O₂ emission and NO production rate, and by analysing temperature profiles.

Key words : porous burner, SiC foam, submerged flame, industrial boiler, water-tube, emission

†Corresponding author: kmlee@scnu.ac.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

가스 연료를 사용하는 연소기가 산업의 핵심으로 활용되고 있으며 저공해, 고효율 성능 달성을 위해 활발하게 연구가 진행되고 있다 [1-8]. 저공해 달성을 위한 연구에서는 최근 2차 미세먼지 문제와 맞물려 질소산화물의 생성을 최소화하는 기술이 더욱 활발하게 연구되고 있다. 또한, 고효율 달성을 위한 연구 분야에서는 저 발열량의 연료를 효과적으로 연소를 시킬 수 있으며, 연소 후 발생하는 이산화탄소 생성을 억제하는 기술이 연구되고 있다.

이러한 배경에서 고온의 연소 가스의 체류 시간 감소로 열적 NOx(thermal NOx) 배출을 억제하고 미연 가스를 예열하는 열 재순환(heat recirculation) 기술이 주목된 다공성(porous) 연소에 관한 연구가 다시 주목받고 있다. 특히 다공성 매체 내 화염이 잠겨 있는 침전형 화염(submerged flame)을 응용한 버너를 통해 고효율 및 저공해 성능이 입증되었다[9-14]. 다공성 매체버너의 큰 특징인 저 발열량으로 높은 효율의 연소가 가능한 열 재순환기술은 오래 전 Weinberg에 의하여 최초로 소개되었다[15]. 이후 Takeno와 Sato는 화염 내부구조에 다공체를 삽입함으로써 초과엔탈피(excess enthalpy) 화염을 형성하는 간단한 방법을 제안하였다[16]. 또한, 다공성 매체 연소는 초 희박 및 초 과농 연소조건에서도 안정적으로 화염을 유지하며, 열 재순환에 의해 다공매체가 가열되어 강력한 고체 복사에너지가 방출되므로 피가열물을 안정적으로 균일하게 가열하는데 매우 효과적이다. 이러한 장점으로 다공성 연소기술은 이전부터 종이 건조, 산업용 보일러, 유리 용해로 및 화학 처리와 같은 다양한 분야에서 적용되어 왔다[17-20].

Smucker와 Ellzey는 2단 다공성 매체버너에서 메탄과 프로판을 사용하여 실험 및 수치해석으로 침전형 다공체 내 연소 특성을 비교하였다[21]. Vogel과 Ellze는 다공성 매체의 위치에 따라 매체버너 유형을 주위로 열 손실이 없는 쉴드 타입(shielded type)과 매체버너 표면이 주위 대기 조건에 노출되는 엔드-마운틴 타입(end-mounted type)으로 정의하였으며, 유형에

따라서 화염의 안정화 특성을 비교하였다. 이 경우 침전형 매체버너 표면이 주위 대기조건에 노출되어있는 엔드-마운틴 타입인 경우 특정 당량비(equivalence ratio)와 유속 조건에서 매체 내 연소진동이 발생하게 되는데 이러한 현상을 열 손실에 의한 불안정성으로 보고하였다[22].

한편, 제품의 고효율화와 함께 갈수록 엄격해지고 있는 대기 환경오염 기준 만족에 부합하기 위한 일환으로 산업용 보일러 분야에서 침전형 다공성 매체 연소기술을 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 산업용 보일러 특징은 연소기 하류에 화염으로부터의 열전달을 통해 온수 및 난방 또는 스팀을 공급해주는 수관(water-tube) 형태의 열 흡수체(heat sink)인 열교환기가 반드시 존재하게 된다. 그런데 앞서 Smucker 등의[21] 연구에 의하면 이러한 침전형 매체버너 내 화염은 버너 표면의 노출 조건(heat sink 유무)에 따라 매체 내 연소 현상과 안정화 특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 침전형 다공성 매체버너를 산업용 보일러에 응용하기 위해서는 매체버너 후류에 열 흡수체가 고려된 연소 특성에 대해 면밀한 조사가 필요하나 아직까지 상세한 연구가 진행되지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서 2단 다공성 매체버너에서 수관식 보일러의 열교환기를 모사하기 위해 다공성 매체버너 후류에 열 흡수체인 수관을 설치하였으며, 이 경우 이전 연구자[22]의 엔드-마운틴 경우처럼 수관에 의하여 후류에서의 열적 노출조건이 상류인 매체 내 열적 분포와 화염 거동에 영향을 미쳐 연소 배기성능과 분위기 온도가 달라질 것이라고 판단하였다. 이를 위해 먼저 보일러 내 열교환기를 모사한 수관의 존재 유무에 따라 2단 다공성 매체 내 화염의 안정화 및 연소 특성을 비교 분석하기로 한다.

II. 실험 장치 및 조건

2.1. 실험 장치 및 방법

수관 유무의 따른 2단 다공성 매체버너의 개략도를 Fig. 1, 2에 나타내었다. 일반적으로 다공성 버너에 사용되는 다공성 재질은 Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC

및 $FeCrAl$ 등 4 가지 재료가 있으며, 이 중 SiC 재질이 가연한계가 넓으면서 NOx 배출량이 가장 적은 장점을 가지고 있다[23-24]. 대개, 다공성 재질의 기공(pore)은 수 mm이며, 이러한 다공 구조를 형성하기 위해 Foam, Honeycomb, Bead, Lamella 등 4 가지 형태가 사용되는데, 이 중 foam 형태의 다공체는 대류열(convection) 이동이 다른 다공체 구조보다 원활한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 화염이 존재하는 반응영역의 매체로 SiC foam을 침전형 다공체 버너로 사용하였으며, 사전 연구를 통해 화염 안정화 영역이 가장 넓은 10 ppi(pore per inch)의 기공률과 40 mm 두께를 갖는 SiC foam을 버너 재질로 선정하였다. 침전형 버너의 재질인 SiC foam 바로 밑에는 예혼합기로의 역화(flash-back)를 방지하기 위하여 25 % 기공률로 직경 1 mm 홀(hole)이 허니콤(honeycomb) 형태로 구성되어있는 내열성 세라믹 보드를 역화방지기(flame arrestor)로 사용하였다. 또한, 세라믹 보드 아래에는 직경 3 mm의 알루미늄아 볼을 채워 넣어 혼합기가 충분히 예혼합되게 하면서 균일한 유동장이 형성되도록 하였다. 연소기를 둘러싸고 있는 단열재는 다공성 매체버너로부터 반경 반향의 열 손실을 최소화하기 위해 사용되었으며, 매체 내에 잠겨 있는 화염의 거동을 관찰할 수

있도록 너비 10 mm 정도의 최소 폭으로 가시창(sight window)을 확보하여 다공체 내 화염의 직접 사진은 DSLR 카메라(Nikon D-3200)를 ISO 200 으로 촬영시간 1/3초로 고정 후 F number를 조절하여 촬영하였다.

연료는 LNG 연료의 주성분인 메탄(methane, 99.95 %)을 사용하였으며, 산화제는 공기 압축기에서 수분을 제거한 건조공기(dry air)를 사용하였다. 연료와 산화제의 유량은 건식 가스미터와 버블미터를 통해 교정하였으며, 자료취득과 유량제어는 DAQ 새시(Cdaq-9178), 전압 출력(NI 9263) 및 전압 입력(NI 9201) 모듈에 Lab view VI 기반의 소프트웨어를 사용하였다. 화염이 매체 내 잠겨 있는 관계로 화염의 거동을 정량적으로 파악하기 위하여 석영관 외부 벽면에 쉴드형 열전대(K-type)를 Fig. 1, 2에서 보는 바와 같이 SiC foam과 세라믹 보드 사이인 T3를 기준해서 상하 20 mm 간격으로 설치하였으며, 각각 T1, T2 그리고 T4, T5 지점에서 간접적으로 화염의 위치 변화를 관찰하고 화염의 온도를 예측하였다. 연소 배출성능은 배기가스분석기(Optima 7, MRU, Germany)의 샘플링 프로브를 SiC foam 출구로부터 100 mm 및 20 mm의 지점에 설치하여 NOx와 O_2 배출량을 측정하였다. 이 경우 20 mm 지점에서 연소 배출성능 해석과 관

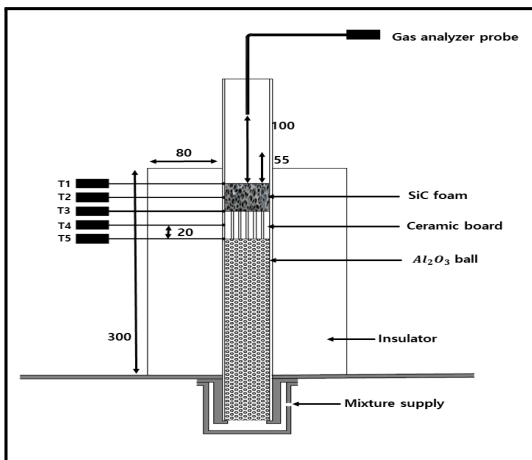


Fig. 1. Schematic experimental set-up of two sections porous burner without water-tube.

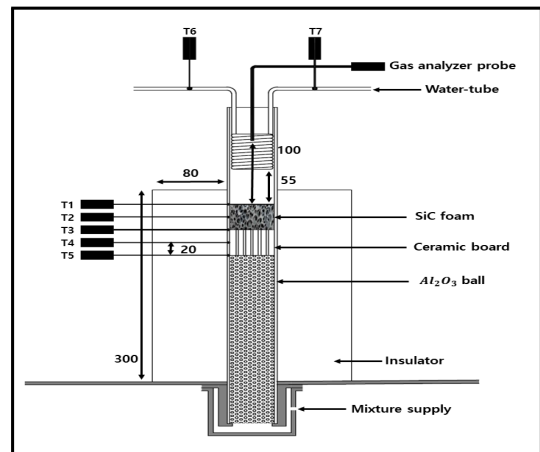


Fig. 2. Schematic experimental set-up of two sections porous burner with water-tube.

련한 연소반응영역의 검사 체적(control volume)을 수관이 시작되는 위치를 감안하여 수관의 영향이 배제된 SiC foam 버너 출구 위치로 20 mm 지점까지로 잡아서 이 지점에서 연소반응에 참여한 O₂ 농도와 이에 따른 연소 배기가스 온도를 파악하였다.

보일러의 열교환기를 모사한 수관은 SiC foam 출구로부터 55 mm 위에 설치하였는데, 직경 6 mm의 동관을 환형으로 감아서 수관 열교환기의 폭이 45 mm, 높이가 55 mm의 크기를 갖도록 제작하였다. 이때 수관표면에서 결로 현상을 방지하고자 별도로 냉각수 예열기를 사용하여 수관으로 공급하는 물의 유입 온도를 40 °C 정도로 일정하게 유지하였다. 유입 및 배출되는 물의 온도는 T 타입의 열전대(T6~7)를 사용하여 측정하였으며, 공급되는 물의 유량을 같이 측정하여 향후 다공체 버너의 주요 변수에 따른 침전형 버너시스템의 열효율 성능과 수관이 열 손실을 억제하는 역할을 하는 정확한 원인에 대해서는 추가적인 분석이 필요하며, 추후 보고할 예정이다.

2.2. 실험 조건

본 연구에서는 혼합기의 당량비와 유속을 주요 변수로 사용하였다. 이를 위해 당량비 0.025 간격으로 화염안정화 선도를 취득하였으며, 희박 연소조건에서의 연소특성을 관찰하기 위해 당량비 범위는 0.7 이하로 제한하였다. 유속조건은 5 cm/s의 간격으로 고정된 당량비에서 유량을 증가시켜 역화 및 화염 날림(blow-off) 현상이 발생하는 지점까지 관찰하였다. 본 연구에서 사용된 침전형 매체버너의 안정화 선도(stability map)는 당량비 0.8, 유속 15 cm/s의 초기조건에서 점화된 뒤 석영관 벽면의 온도가 초기 정상상태에 도달하는데 소요되는

약 20분 동안 당량비 0.7, 유속 40 cm/s의 예열 조건에서 예열된 후 각 실험

조건으로 변경하여 10분간 취득한 데이터를 평균하여 사용하였다. 다공체 내 잠겨 있는 화염의 연소 배출성능에 대한 특성은 수관의 유무에 따른 안정화 선도를 취득한 후 화염이 공통적으로 안정화 된 당량비와 유속 조건들을 선정하였으며, 이상과 같은 해당 조건들을 표 1에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 매체 내 화염거동

Kim 등은 N₂량의 변화에 따른 화염의 거동을 안전(stable), 역화, 날림, 및 소멸(extinction)로 정의하여 다양한 화염의 움직임을 실험적으로 관찰하였다[25]. 본 연구에서도 고정된 당량비 조건에서 혼합기 유속 변화에 따른 화염의 안정화 특성을 안정, 날림 및 역화 영역으로 정의하였으며, 이러한 영역 구분은 매체 내 화염의 위치를 파악할 수 있도록 석영관 외벽에 설치한 열전대 온도인 T1 ~ T5의 온도 변화와 10 mm의 좁은 가시화 창으로부터 관찰된 화염의 이미지를 통하여 정의된다.

Table 1. The experimental conditions

| Equivalence ratio | Mixture velocity (cm/s) |
|-------------------|-------------------------|
| 0.7 | 40, 50, 60, 70, 80, 90 |
| 0.65 | 40, 50, 60, 70 |
| 0.6 | 40, 50 |

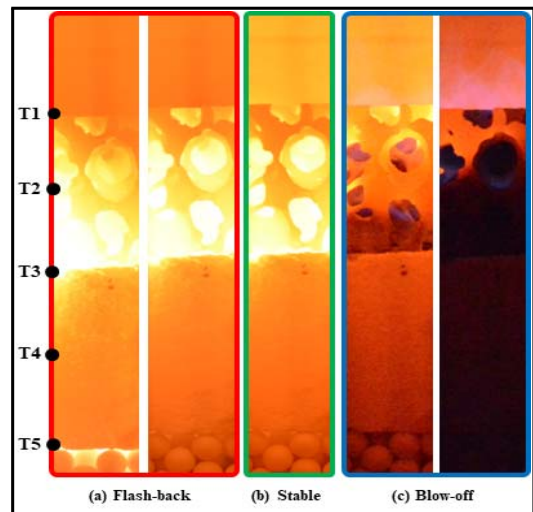


Fig. 3. Flame behavior with various flow velocities. (a) $\phi = 0.7$, $U = 35$ cm/s, (b) $\phi = 0.7$, $U = 50$ cm/s, (c) $\phi = 0.7$, $U = 145$ cm/s

Fig. 3에 2단 다공매체 내 잠겨 있는 화염 거동의 직접 이미지를 나타내었다. Fig. 3의 맨 좌측에 표시된 T1 ~ T5의 위치는 석영관 외벽에 설치된 열전대 위치로서 가시창을 통해 관찰된 매체 내 해당위치의 온도정보를 보여주고 있다. 먼저, 가시화창을 통해 위치로서 가시창을 통해 관찰된 매체 내 해당 위치의 온도정보를 보여주고 있다. 먼저, 가시화창을 통해 확인한 SiC foam 내 안정된 상태의 화염 이미지로는 Fig. 3(b)에 해당되는 이미지이며, 이러한 화염의 매체 내 온도분포 특성을 Fig. 4(b)에 나타내었다. 시간에 따른 열전대 온도 그래프 변화를 통해 화염이 SiC foam 내부에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 온도분포에서 T2 혹은 T3 위치가 가장 높은 온도로 나타나 화염의 위치가 이 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한, T1 ~ T3까지는 급격하게 온도가 증가한 후 일정하게 유지되지만, T4 ~ T5는 매체 내 열재순환에 의해 예혼합기가 예열되어 온도가 증가하고 있음을 볼 수 있다.

화염날림에 해당되는 Fig. 3(b) → (c)는 고정된 당량비에서 유속을 증가시키면 발생하게 되는데, 이에 해당되는 온도 그래프를 Fig. 4(c)에 나타내었다. 이 경우 화염이 후류로 전파하기 때문에 T1의 온도는 계속 증가하나, T2 ~ T5의 온도는 증가하였다가 매체 내 화염의 위치가 후류로 밀리면서 이후 감소하는 것으로 나타났다.

역화화염에 해당되는 이미지는 Fig. 3(b) → (a)로 직접 사진에서 보는 바와 같이 화염이 SiC foam에서 바로 밑에 있는 세라믹보드로 전파되어 넘어가게 되면 화염역화로 정의하였다. 이는 매체 내 화염이 안정된 조건에서 혼합기 유속이 감소할 때 발생하게 되는데, 이에 해당되는 온도 그래프는 Fig. 4(a)에 나타내었다. 일정 시간 이후에는 화염이 SiC foam에서 세라믹 보드와 알루미늄 불 층으로 이동되면서 열전대의 온도가 전체적으로 감소하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 화염대(반응대)가 상류로 이동된 것과 함께 당량비가 고정된 상태에서 혼합기 유속의 감소로 인한 매체 내 열량의 감소로도 판단된다.

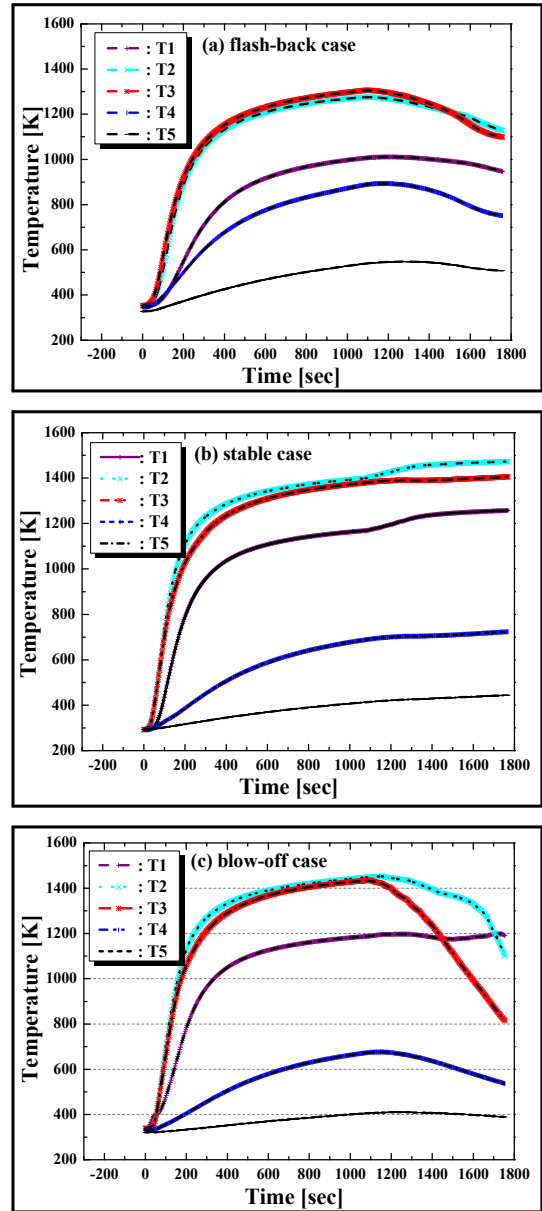


Fig. 4. Temperature profile with flame behavior.

3.2. 안정화 선도

수관 유무에 따른 다공체 내 화염의 안정화 선도를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 전체적으로 일반 메탄화염의 희박가연한계(lean flammable limits)인 당량비 0.46 보다 훨씬 낮은 당량비 까지 화염이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 다

공매체 내 열 재순환 효과로 인해 일반적인 제트(jet) 형태의 층류 연소속도보다 훨씬 높은 유속에서도 화염이 안정된 상태로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 수관의 유무에 따른 안정화 선도 경향은 서로 유사하게 나타나지만, 수관이 존재하는 경우에서 당량비 0.46 보다 낮은 조건에서 화염의 날림과 역화현상이 비교적 높은 유속에서 발생하면서 안정화 영역이 좀 더 넓어지는 것을 확인하였다.

일반적으로 수관의 존재는 열 흡수체의 역할을 수행하나, 안정화 선도를 통해 수관이 오

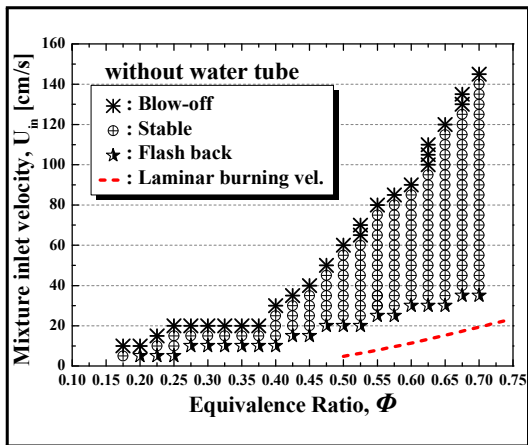


Fig. 5. Stability map of porous media burner of two sections for without water-tube.

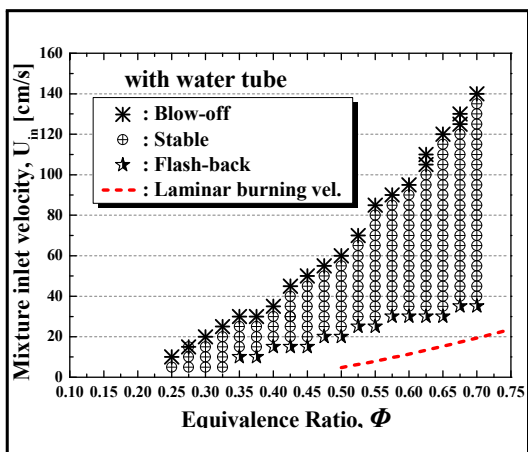


Fig. 6. Stability map of porous media burner of two sections for with water-tube.

히려 열 손실을 억제하는 역할을 하여 매체 내 반응대의 화염의 온도가 증가한 것으로 판단하였다. 이처럼 수관이 존재하는 경우 나타난 다공체 내에서 연소 활성화와 이에 따른 온도상승은 다음절에서 기술하고 있는 NOx와 O₂ 등의 연소 배기가스 성능과 매체 내 화염의 거동과 연계되는 T1 ~ T5의 온도 그래프를 통하여 입증된다.

3.3. 연소 특성

다공성 매체버너 후류에 보일러 열교환기 역할을 하는 수관의 유무에 따라 차이를 보이는 대표적 연소 배기가스 성능인 NOx 배출량을 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 수관이 존재하는 경우 NOx 배출량이 수관이 존재하지 않는 경우보다 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 설명하였듯이 수관이 열 손실을 억제하는 역할을 함으로써 매체 내 반응대에서 화염의 온도가 증가하여 열적

NOx 배출량이 증가한 것으로 판단하였다. 확인하기 위해 수관이 있는 경우에서 매체 내 화염의 온도분포 경향을 파악하는데, 2단 다공체 버너에서 화염의 전파가 연소 특성에 큰 변화를 주기 때문에 화염의 전파가 잘 이루어지는지를 확인하고자 T1 ~ T5의 온도분포 경향을 파악하여 Fig. 8에 나타내었다. 혼합기

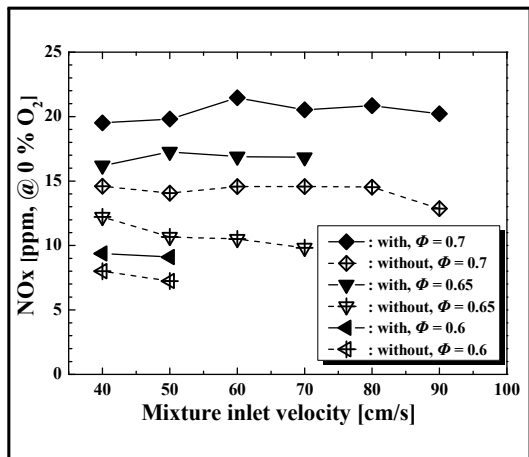


Fig. 7. NOx emission for with and without water-tube.

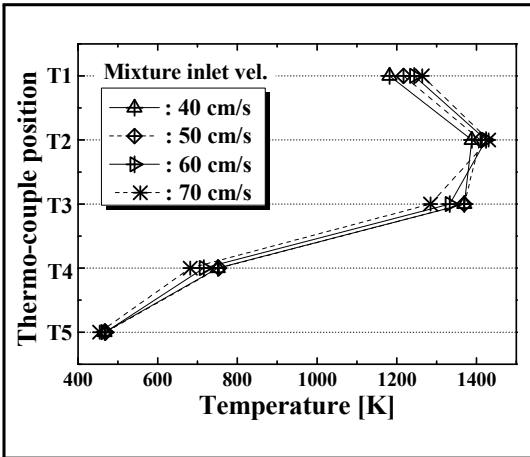


Fig. 8. Temperature profiles of T1-T5 with various inlet velocities.

유속의 증가함으로써 매체 내 잠긴 화염(submerged flames)이 후류로 이동되어 T1 ~ T2의 온도가 증가하였으며, 이에 따라 상류 영역인 T3 ~ T5의 온도는 감소하는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 전체적으로 버너 매체 내의 온도분포는 일정하여 화염의 이동 및 전파가 비교적 잘 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 8의 매체 내의 온도분포를 통해 매체 화염이 T2 ~ T3 사이에 위치하는 것으로 확인되었으며, 화염대에 해당되는 T2 ~ T3의 온도를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 혼합기 유속이 증가하면 화염이 후류로 전파되어 T2의 온도는 증가하나 T3의 온도는 화염이 후류로 이동되면서 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 수관의 유무에 관계없이 동일하게 나타났는데, 전반적으로 수관이 없는 경우 해당 석영관 벽면의 온도가 수관이 있는 경우보다 낮게 나타났다. 이러한 결과를 통해 수관은 석영관 내에서 열손실을 억제하는 역할을 수행하고 있다고 판단할 수 있다. 수관이 없는 경우에서도 매체 내 화염은 T2 ~ T3 사이에 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 수관이 있는 경우 매체 내 화염의 온도가 수관이 없는 경우보다 높다는 것을 입증할 수 있었다.

연소반응에서 생성되는 NO_x의 주성분인

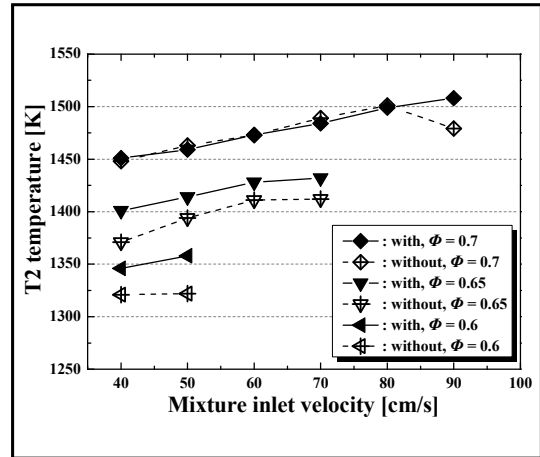


Fig. 9. T2 Temperature tendency for with and without water-tube.

열적 NO는 연소용 공기 중에 있는 질소분자(N₂)가 고온에서 분해되어 생성되는데, 이러한 NO의 생성속도는 Zeldovich에 의해 다음과 같은 식 (1)로 표현된다. Zeldovich 매커니즘은 1800 K 이상의 고온에서 반응을 하지만 본 연구에서는 다공체 내부에 존재하는 화염의 온도를 직접적으로 측정하기에 많은 어려움이 있기 때문에 석영관 외부 벽면에 실드형 열전대를 설치하여 간접적으로 확인을 하였다. 직접 온도를 측정한다면 1800 K 이상의 온도가 될 것이라고 판단한다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f[N_2][O] \quad (1)$$

위의 NO 생성속도 식을 통해서 알 수 있듯이 NO의 발생량은 온도와 체류 시간 외 NO 생성반응에 참여하는 산소의 농도에 비례하여 발생하게 된다[26]. 이를 통해 연소반응에 참여하는 산소 원자농도를 정성적으로 파악할 수 있는 한 가지 방법으로는 연소 배기가스 중에 포함된 산소농도를 파악하면 알 수 있게 된다. 즉, 연소가 종료된 연소 배기가스 분석을 통해 배기가스 내 산소농도가 상대적으로 높으면 연소반응에서 NO 생성반응에 참여하는 산소농도가 적음을 알 수 있으며, 반대로 상대적으로 배기가스 내 산소농도가 적으면

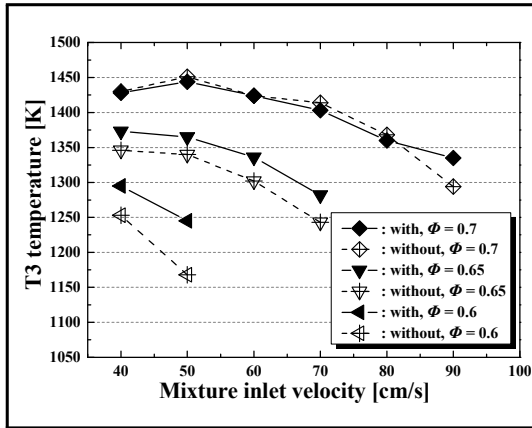


Fig. 10. T3 Temperature tendency for with and without water-tube.

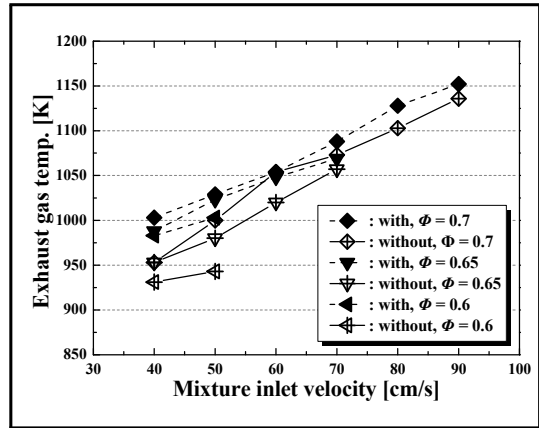


Fig. 11. Exhaust gas temperature at 100mm above porous burner surface.

연소반응에서 NO 생성반응에 참여하는 산소의 농도가 많음을 가림할 수 있게 된다.

따라서 앞 절의 Fig. 7을 통해서 수관이 있는 경우가 없는 경우보다 NOx 배출 농도가 높게 나타났는데, 이에 대한 분석으로 수관의 유무에 따른 연소 배기가스 내 잔존하는 산소 농도와 배기가스 온도가 수관이 없는 경우에도 동일하게 수관 영역의 중간 지점인 SiC foam 출구 100 mm 지점에서 측정하여 Fig. 11, 12에 표시하였다. 먼저 Fig. 11에서 보는 바와 같이 전반적으로 수관이 있는 경우가 없는 경우보다 연소 배기가스 온도가 높았으며, 열용량의 증가를 의미하는 혼합기 유속에는 수관의 유무와 무관하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이처럼 수관이 있는 경우 연소 배기가스 온도가 높은 것은 매체 내 연소반응이 상대적으로 활성화되어 다공체 내 잠겨 있는 화염의 온도가 높아진 것을 의미하며, 이로 인해 Fig. 7에 비교해서 상대적으로 높은 NOx 배출량을 보이게 되는 것으로 판단된다.

또한, 연소 배기가스 내 잔존하는 산소농도를 살펴보면 Fig. 12에서 보는 바와 같이 수관이 있는 경우가 수관이 없는 경우보다 낮게 나타나고 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 NO 생성기구인 식(1)에서 NO 생성반응에 참여하는 산소의 농도가 수관이 있는 경우에서 상대적으로 높다는 것을 의미하게 된다. 즉, 수

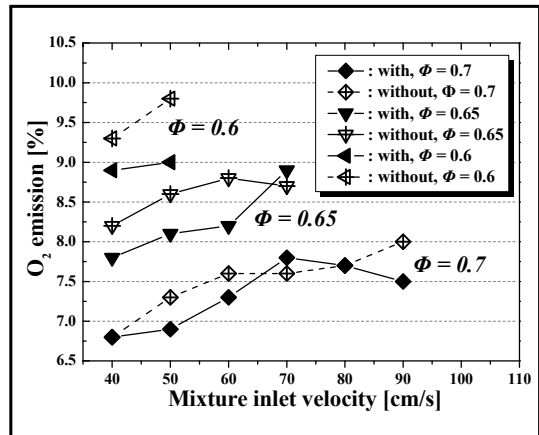


Fig. 12. Emissions of O2(ppm) at 100 mm above porous burner surface.

관이 있는 경우 연소반응에 참여하는 산소농도가 많아서 NO 생성량이 높게 나타났고 연소 배기가스 내 잔존 산소량도 적게 배출된다는 것이다. 따라서 수관이 있는 경우 다공체 내 연소반응에 참여하는 산소농도가 높아져 상대적으로 연소반응이 활성화되어 Fig. 9, 10에서 보는 바와 같이 화염대 온도도 높아지게 되고 연소 배기가스 온도도 증가하였으며, 이로 인해 NO 생성반응도 활발하여 전체적으로 NOx 배출량이 증가하는 것으로 판단되었다.

한편, Fig. 11, 12의 현상이 단순히 수관이

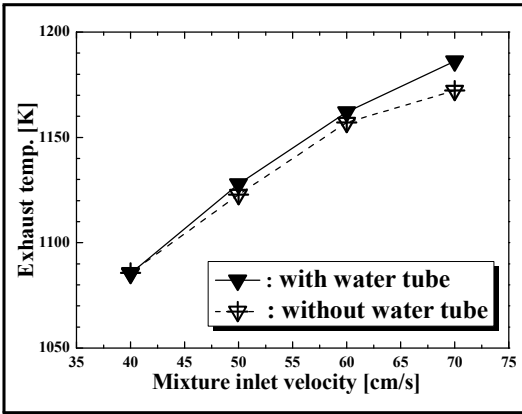


Fig. 13. Exhaust gas temperature profiles at 20 mm and $\Phi=0.65$ for with and without water-tube.

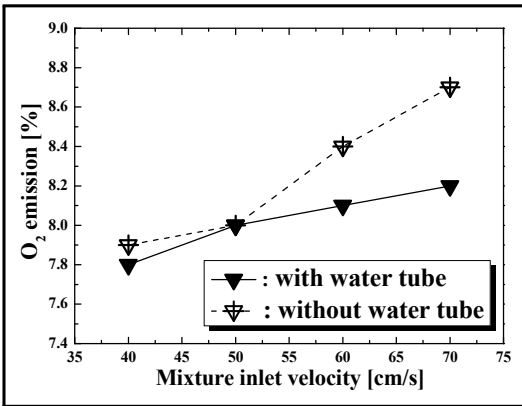


Fig. 14. Emissions of O_2 (ppm) profiles at 20 mm and $\Phi=0.65$ for with and without water-tube.

존재하는 검사 체적 내에서 발생하는 현상인지를 확인하기 위하여 수관 영역이 배제된 SiC foam 버너출구로 20 mm인 지점에서 배기가스 온도 및 O_2 배출량을 측정하여 Fig. 13, 14에 나타내었다. 배기가스 온도는 연소 반응대와 근접하기 때문에 수관의 존재 유무에 따라 큰 차이는 나타나지 않았지만, 세밀하게 관찰해보면 이전 결과와 경향이 동일하게 수관이 있는 경우에서 배기가스 온도가 조금 더 높은 것을 알 수 있다. 배기가스 내 잔존하는 산소량에서는 수관이 있는 경우에서 적게

나타났는데 이는 앞서 지적한 바와 같이 연소 반응에 참여하는 산소량이 많아짐에 따라 나타난 현상으로, 이를 통해 측정 위치에 무관하게 수관 유무에 따른 현상들이 일관되게 보임으로써 수관이 존재하는 검사 체적 내에서만 발생하는 현상이 아님을 확인할 수 있었다.

지금까지 기술한 분석 결과들은 다공성 매체 내 반응대에서의 질량보존법칙에도 부합되는 결과를 보여야 한다. 다공성 매체 내 질량보존법칙을 식 (2)에 나타내었는데, 여기서 w 는 수관이 있는 상태이며 w_0 는 수관이 없는 상태를 의미한다. 동일한 유량 조

$$\dot{m} = \rho_w A_w V_w = \rho_{w_0} A_{w_0} V_{w_0} \quad (2)$$

$$\rho = P / RT \quad (3)$$

건이면 수관의 유무에 관계없이 질량 유량은 동일하게 된다. 하지만, Fig. 9, 10에서 반응대 구간인 T2 ~ T3 온도 그래프를 통해 수관이 있는 경우에서 화염의 온도가 높은 것으로 확인이 되었다. 따라서 식 (3)의 이상기체 방정식에 의하여 수관이 있는 경우에서 기체 밀도가 수관이 없는 상태보다 상대적으로 낮아지게 되며, 수관 유무의 관계없이 반응대에서의 면적은 동일($A_w = A_{w_0}$)하기 때문에 식 (2)의 질량 보존법칙에 의하여 수관이 있는 상태에서 반응대 유속이 수관이 없는 경우보다 높게 된다. 이는 수관이 있는 상태에서 연소속도가 빨라지는 것을 의미하며, Fig. 5, 6의 안정화 선도에서 수관이 있는 경우가 높은 유속으로 증가하는 것을 통하여 확인되었다. 이처럼 연소속도의 증가는 연소 반응률(reaction rate)의 증가를 의미하게 되는데 앞서 기술한 바와 같이 연소 배기가스 내 잔존하는 산소농도를 통해 가늠할 수 있으며 Fig. 15의 O_2 배출량을 통해 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 화염이 매체 내 잠겨 있는 2단 다공성 매체버너에서 보일러 열교환기를 모사한 수관의 유무에 따른 매체 내 화염 거

동, 안정화 선도 및 연소 배출성능을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화염안정화 선도는 수관 유무에 관계없이 안정화 영역의 경향은 유사하지만, 수관이 있는 경우에서 화염 날림 및 역화 현상이 높은 유속에서 발생하였으며, 상대적으로 안정화 영역이 넓어졌다.

2. 침전형 다공체 내 화염의 거동을 가름할 수 있도록 매체 외벽에 설치한 열전대로 다공성 연소의 주요 변수에 따른 매체 내 열적 거동(온도 분포도)과 화염의 거동을 파악하고 이해하였다.

3. 매체 내 온도 분포도와 화염 거동의 가시화를 통해 반응대의 화염이 T2 ~ T3 사이에 존재하는 것을 확인하였으며, 수관이 있는 경우에서 나타난 높은 NOx 배출량이 T2와 T3의 온도 그래프를 통해 반응대의 화염 온도가 높아진 결과로 판단하였다.

4. 연소 배기가스 중 잔존하는 산소농도와 배기가스 온도 경향을 통해 수관이 있는 경우가 상대적으로 연소반응이 활발해지는 것과 그 결과로 화염의 온도가 증가하는 것을 입증하였다.

5. 열적 NOx 생성기구로 잘 알려진 Zeldovich의 NO 생성 속도식을 통해 NO 반응에 지배적으로 참여하는 산소농도를 예측하였고, 매체 내 검사 체적을 정의하여 질량 보존식을 통해 수관 유무에 따른 NOx 배출량 차이에 대한 현상을 분석하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 과제입니다(과제번호 : 2015-2010-103050).

REFERENCES

[1] Y. Kotani, T. Takeno, "An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame", *Symposium (International) on Combustion*,

19, 1503-1509, (1982)
 [2] M. Abdul. Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z. Abu Bakar, A.A. Mohamad, R.M.N. Muhad, M.K. Abdullah, "Combustion in porous media and its applications-A comprehensive survey", *Symposium (International) on Combustion*, 90, 2287-2312, (2008)
 [3] A.A. Mohamad, "Combustion in Porous Media: Fundamentals and Applications", *Transport Phenomena in Porous Media III*, (2005)
 [4] S.B. Sathe, R.E. Peck, T.W. Tong, "Flame Stabilization and Multimode Heat Transfer in Inert Porous Media: a Numerical Study", *Combustion Science and technology*, 70, 93-109, (1990)
 [5] D. K. Min, H. D. Shin, "Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, 341-356, (1991)
 [6] J.R. Howell, M.J. Hall and J.L. Ellzey, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media", *Progress in Energy and Combustion Science*, 22, 121-145, (1996)
 [7] M. Abdul Mejeebu, M.Z. Abdullah, A.A. Mohamad, "Development of energy efficient porous medium burners on surface and submerged combustion modes", *Energy*, 36, 5132-5139, (2011)
 [8] K.A. Al-attab, John Chung Ho, Z.A. Zainal, "Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 62, 1-8, (2015)
 [9] Mujeebu MA, Abdullah MZ, Abu Bakar MZ, Mohamad AA, Abdullah MK, "Applications of porous media combustion technology - A review", *Appl Energy*, 86, 1365-1375, (2009)
 [10] M. Abdul Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z. Abu Bakar, A.A. Mohamad, M.K. Abdullah, "A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media",

- Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 216-230, (2009)
- [11] Y.C. Park, J. Kim, “Submerged combustion vaporizer optimization using Entropy Minimization Method”, *Applied Thermal Engineering*, 103, 1071-1076, (2016)
- [12] Y. Wang, H. Zeng, Y. Shi, T. Cao, N. Cai, X. Ye, et al, “Power and heat cogeneration by micro-tubular flame fuel cell on a porous media burner”, *Energy*, 109, 117-123, (2016)
- [13] K.B. Sutar, Rivi. M.R, S. Kohli, “Design of a partially aerated naturally aspirated burner for producer gas”, *Energy*, 116, 773-785, (2016)
- [14] Huaming Dai, Baiquan Lin, Cheng Zhai, Yidu Hong, Qingzhao Li, “Subadiabtic combustion of premixed gas in ceramic foam burner”, *Int. Journal of Heat ad mass transfer*, 91, 318-329, (2015)
- [15] F. J. Weinberg, “Combustion temperature : The future?”, *Nature*, (1971)
- [16] T. Takeno, K. Sato, “An Excess Enthalpy Flame Theory”, *Combustion Science and Technology*, 20, 73-84, (1979)
- [17] C. Zheng, L. Cheng. A. Saveliev, Z. Luo, K. Cen, “Gas and solid phase temperature measurements of porous media combustion”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 3301-3308, (2011)
- [18] S. Wood, A. T. Harris, “Porous burners for lean-burn applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 667-684, (2008)
- [19] Jia F, Liu, Wen H. Hsieh, “Experimental investigation of combustion in porous heating burners”, *Combustion and Flame*, 138, 295-203, (2004)
- [20] William M. Barcellos, Luis Carlos E. Q. Souza, Alexei V. Saveliev, Lawrence A. Kennedy, “Ultra-low emission steam boiler constituted of reciprocal flow porous burner”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 570-580, (2011)
- [21] M.T. Smucker, J. L. Ellzey, “Computational and experimental study of a two-section porous burner”, *Combustion Science and Technology*, 176, 1171-1189, (2004)
- [22] B. J. Vogel, J. L. Ellze, “Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner”, *Combustion Science and Technology*, 177, 1323-1338, (2005)
- [23] H. B. Gao, Z. G. Qu, X. B. Feng, W. Q. Tao, “Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials”, *Fuel*, 115, 154-161, (2014)
- [24] Huaibin Gao, Zhiguo Qu, Xiangbo Feng, Wenquan Tao, “Combustion of methane/air mixtures in a two-layer porous burner: A comparison of alumina foams, beads, and honeycombs”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, 215-220, (2014)
- [25] S. G. Kim, D. K. Lee, “An experimental study of N_2 dilution effects on $CH_4 - O_2$ flame stabilization characteristics in a two-section porous medium”, *Applied Thermal Engineering*, (2016)
- [26] R.K. Hanson, S. Salimian, *Survey of rate constants in the N/H/O system*, Combustion Chemistry, New York, (2018)