

수소 MILD 연소에서 화염거동과 배출 특성에 관한 실험적 연구

이기현 · 이기만[†]

국립순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터

An Experimental Study on Flame Behaviors and Emission Characteristics in H₂ MILD Combustion

GIHYEON LEE, KEEMAN LEE[†]

[†]School of Mechanical and Aerospace Engineering/Center for Aerospace Eng. Research, Suncheon National University

[†]Corresponding author :

kmlee@snu.ac.kr

Received 10 October, 2024

Revised 11 November, 2024

Accepted 21 November, 2024

Abstract >> To mitigate the drawbacks of hydrogen fuel, which is characterized by high-temperature combustion and higher thermal NO_x emissions, moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion which is characterized by low-temperature combustion, could be an alternative. The conditions for achieving MILD combustion mode were investigated, and it was found that lower oxygen concentration favored the MILD combustion zone. The flame behavior, flame length, and NO_x emission trends were examined with oxygen concentration and hydrogen content as key variables. As the combustion approached the MILD mode, the flame length increased, while NO_x emissions decreased. Additionally, NO_x emissions in the MILD mode were measured to have negative values.

Key words : MILD combustion(마일드 연소), Hot gas oxidant(고온 산화제 가스), Spatial combustion(공간 연소), Flame behavior(화염거동), NO_x emission(NO_x 배출 성능)

1. 서론

최근 지구 온난화 문제로 인한 해수면 및 지구 평균 온도 상승에 따라 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 기후 변화 문제를 해결하기 위하여 2016년에 제정된 파리협정을 통해 200여 개의 국가가 탄소 중립에 초점을 두고 있다¹⁾. 그러나 우리가 일반적으로 사용하는 에너지원인 석유, 석탄, LPG, LNG는 가격 대비 고효율을 보여주는 탄화수소 계열의 화석연료로

연료 구성에 탄소(C) 성분이 있어 연소 시 지구 온난화의 주범인 이산화탄소(CO₂)와 같은 온실가스 배출을 피하기 어려운 실정이다. 물론 저탄소 혹은 무탄소 배출 기술이 존재하지만²⁾ 아직까지는 기존에 우리가 사용하고 있던 탄화수소 계열의 연료에 비해 가격이나 효율적인 측면에서 좋은 성능을 보여주지 못하고 있다. 이런 연유로 연료 성분에 탄소 성분이 아예 없는 무탄소연료를 사용하는 것이 온실가스 배출 측면에서 유리하다.

무탄소연료로 조명받고 있는 대표적 연료로 암모니아와 수소가 있다. 암모니아(NH_3)는 화학식 구성에 탄소 성분이 없기 때문에 온실가스 배출 측면에서는 유리하나 연료 내 질소(N) 성분으로 인하여 연소 시 대표적 대기오염 물질인 질소산화물(NO_x)이 배출된다. 반면 수소(H_2)는 연료 성분에 탄소 성분과 질소 성분이 없는 관계로 온실가스 배출이나 질소산화물 배출 문제에서 가장 이상적인 연료이다^{3,4)}. 그러나 수소는 넓은 가연성 범위, 매우 높은 반응성, 높은 화염온도와 빠른 연소 속도 등으로 예혼합(pre-mixed) 연소에서 화염 역화(flashback)와 폭발 등의 위험성이 높은 단점을 갖고 있다. 이에 비해 수소를 연료로 사용한 확산(diffusion) 연소는 상대적으로 안전하나 높은 화염 온도와 국소적 고온 영역 때문에 열적 NO_x 를 억제하기가 매우 까다롭다⁵⁾. 따라서 무탄소연료인 수소로 저공해성 탄소중립형 연소 기술을 실현하기 위해서는 역화나 폭발 우려가 없는 확산형 연소 방식을 통해 열적 NO_x 를 효과적으로 억제할 수 있는 새로운 무탄소 연소 기법 개발이 필요하다.

Moderate or intense low oxygen dilution (MILD) 연소는 Joannon 등이 정의한 연소 기법으로⁶⁾ 고온의 혼합기 온도가 연료의 자연발화(self ignition) 온도보다 높고 연소 시 고온의 생성물 온도에 대한 최대 허용 온도가 연료의 자연발화 온도보다 낮게 운전되어 질소산화물(NO_x) 억제에 매우 효과적인 연소기법으로 알려져 있다. 이러한 MILD 연소 조건을 요약한 연소 모드를 Fig. 1에 도시하였다. 선행 연구에 따르면 고온의 낮은 산소(O_2) 농도를 산화제로 사용하여 Fig. 1에 표시된 MILD 연소 영역이 되면 연소 상태가 무화염(flameless)으로 공간 연소(spatial combustion) 형태를 띄게 되는데 이러한 현상이 MILD 연소에서 나타나는 대표적인 특징이 된다⁷⁻⁹⁾. 이런 배경에서 무탄소 연료인 수소 연소 시 MILD 연소 기법을 도입하게 되면 고온의 수소 화염 온도로 연소 배출 NO_x 에 어려움을 해결할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다. 그런데 이처럼 대표적 무탄소연료인 수소 화염에 대한 MILD 연소연구는 아직까지 부족한 실정이다.

한편 철강 분야는 건설, 자동차 생산 등 국내 제조업에서 중추적인 역할을 담당하고 있다. 철강 산업에서 사용되는 재료 생산을 위해서는 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 고온의 열이 필요하여 이러한 에너지의 효율을 극대화하기 위해 대부분 축열식 버너를 채택하고 있다. 일반적으로 축열식 버너는 제트 형태의 화염 구조를 가지며 이러한 제트 화염이 가열로 내부에 직접 접촉할 경우 로체(furnace body) 내부에 큰 손상을 입히게 된다. 특히 무탄소연료인 수소를 연료로 사용하는 경우 고온의 화염 온도로 인하여 위 문제점이 더욱 부각된다.

따라서 본 연구는 무탄소인 수소를 연료로 사용하는 가열로 버너에서 고온의 수소 화염에 의한 로체 보호와 저공해성 연소 성능을 위하여 저온을 특징으로 하는 MILD 연소와 결합하였다. 또한 수소 함량에 따른 MILD 연소 상태를 검증하기 위하여 수소/메탄 혼소부터 수소 전소까지 단계적으로 연소를 진행하였다. MILD 연소 구역에서는 수소 함량과 고온 산화제의 산소 농도를 변수로 설정하여 MILD 연소 모드달 조건, NO_x 배출 경향, 화염거동 및 화염 길이의 경향을 실험적인 연구를 통해 조사하였다.

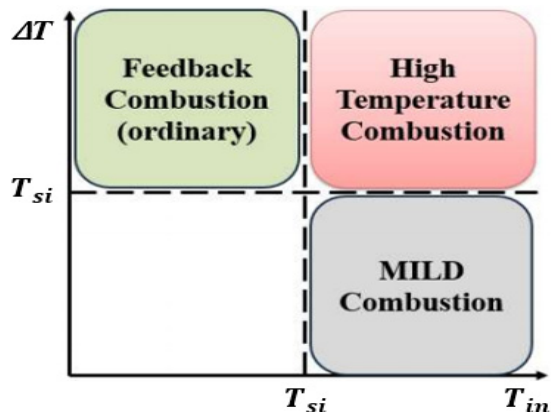


Fig. 1. T_{in} - ΔT locus of different combustion modes

2. 실험

2.1 실험 장치 구성

Fig. 2는 본 연구에서 수행된 실험 장치의 개략도를 도시한 것이다. 본 연구의 MILD 연소기는 수소 혼소 및 전소용 확산화염이 형성되는 노즐 출구 덤프면을 기준으로 크게 고온 산화제를 만드는 hot gas generation 영역과 MILD 연소가 일어나는 MILD 영역으로 구분된다.

Table 1은 Fig. 2의 덤프면을 기준으로 하단부에 해당되는 hot gas generation 영역의 버너(본 연구에서는 표면 연소 버너) 운전 조건이다. Hot gas burner의 연료는 상용 프로판(C_3H_8)이고 산화제로는 압축 공기를 사용하였으며 자연발화 이상의 고온 산화제 발생을 위한 연소 조건으로 당량비와 열용량을 각각 $\Phi=0.65$ 와 2 kW로 고정하였다. MILD 연소 조건에서 고온의 산화제 온도와 산소 농도를 추적하기 위해

덤프면 아래 K형 열전대 온도계(Thermocouple K-type TJ36; OMEGA, Norwalk, CT, USA)와 배가스 분석기(Optima7; MRU, Neckarsulm, Germany)로 산화제 온도와 산소 농도를 실시간으로 모니터링하였다. 본 연구에서 산화제의 온도는 950 K으로 고정하였고 산소 농도는 연소 모드에 따라 체적 기준으로 4-12%로 조절하였다. 이 경우 화염 길이에 영향을 미치는 고온 산화제에 의한 연소 상태를 최대한 일정하게 유지하기 위하여 당량비와 열용량을 고정하였고 연소기 축 방향에서 고순도 산소를 추가적으로 소량

Table 1. Burner conditions of hot gas generation zone

Description	Specifications
Fuel	C_3H_8
O_2 fraction (%)	4-12
Temperature (K)	950
Equivalence ratio (Φ)	0.65
Thermal power (kW)	2

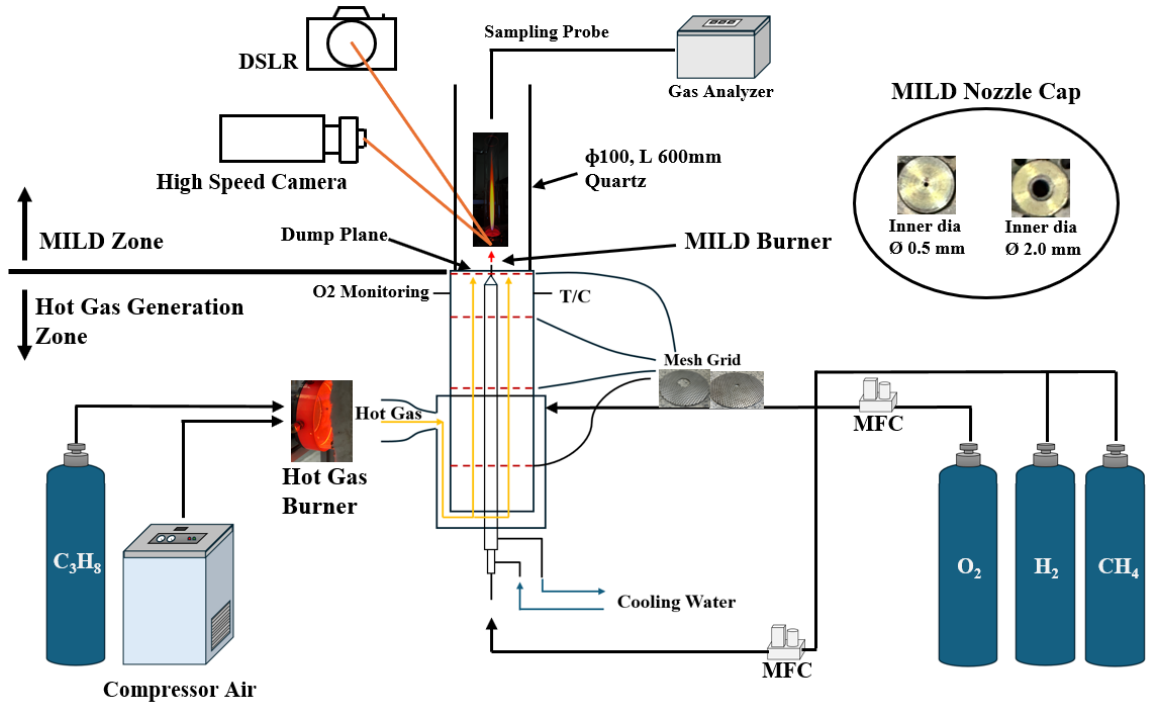


Fig. 2. Schematic diagram of hot gas generation zone (generating hot oxidant) and MILD zone (main study)

주입하는 방식으로 산화제의 산소 농도를 조절하였다. 또한 연소기 중간 플렌지 사이 총 4개의 재분배 격자(mesh grid)를 놓아 MILD 연소 구역에서 고온 산화제의 균일한 유동(uniform flow)을 유도하였다.

Table 2는 Fig. 2의 덤프면을 기준으로 상단부에 있는 MILD 버너의 운전 조건이다. 수소 혼소(co-firing)와 전소 연소 상태를 구현하기 위하여 수소(H_2)와 메탄(CH_4)을 수소의 체적 기준으로 10-100%로 혼합한 것을 연료로 사용하였다. 고온 산화제에 의한 MILD 연소 시 연료인 수소와 수소-메탄 혼합연료의 과열 방지를 위하여 Delft-jet-in-hot-coflow (DJHC) 노즐^{10,11)}처럼 수냉식 자켓을 사용하여 노즐 출구에서 550 mm 하단까지 냉각수로 냉각하였다. 이 경우 노즐에 노즐캡을 씌워 노즐 직경에 변화를 주었다. 이는 화염거동과 연소 배출 측정 시 화염의 길이로 인해 sampling probe의 과열 방지를 위함이다. 사용한 노즐캡의 직경은 화염거동 관찰에서는 2 mm, 연소 배출 성능 측정에서는 0.5 mm 직경을 사용하였다. 열용량은 화염거동에서는 0.5 kW, 연소 배출 성능 측정에서는 0.125 kW로 하였다. MILD zone과 gas generation zone 모두 버너의 열용량을 고정시킨 후 고위발열량(high heating value)과 밀도를 나누어 체적유량을 구하여 실험을 진행하였다.

모든 실험 데이터는 MILD 영역에서 취득하였으며 덤프면 상단부에 길이 600 mm 유리 석영관을 놓아 유리 석영관의 하단부와 상단부를 기준으로 화염의 이미지와 길이를 취득하였다. 화염의 직접 이미지는 DSLR 카메라(D3200; Nikon, Tokyo, Japan)로 촬영하였으며 화염의 OH^* 이미지는 고속카메라(NAC-MEMRECAM HX-7s; Nac Image Technology, Tokyo, Japan)와 광 증폭기(UVI Camera Intensifier; Invisible

Vision, Norwich, UK)를 동기하여 촬영하였다. 취득한 모든 화염 이미지는 100장 촬영 후 Matlab (MathWorks, Natick, MA, USA)을 통해 이진화한 후 평균하여 나타내었다. 배기가스 측정은 유리 석영관 상단에서 아래쪽 방면 300 mm 길이에 sampling probe를 위치시킨 후 non-dispersive infrared (NDIR) 방식의 연소 배가스 분석기(NOVA IR pro; MRU, Neckarsulm, Germany)를 통해 연소 배가스 내 O_2 , NO, NO_2 값을 취득하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염거동

3.1.1 MILD 모드 달성 전

본 연구에서 MILD 연소 조건의 달성 여부는 중요한 요인이다. Joannon이 정의한 Fig. 1의 연소 모드 표에 따르면 MILD 연소는 혼합기 혹은 산화제 입구 온도인 T_{in} 이 연료의 자연발화 온도인 T_{st} 보다 높아야 하고 화염의 온도(T_{flame})와 T_{in} 과의 온도 차인 ΔT 가 T_{st} 보다 낮아야 한다. 따라서 본 연구에서는 위 두 가지 조건을 만족하는 상태만을 MILD 연소 영역이라 부르고 화염의 온도인 T_{flame} 에 큰 영향을 주는 MILD 연소 조건에서 고온의 산화제 내 산소 농도에 따른 화염거동을 비교하였다.

Fig. 3에 메탄과 수소의 혼합연료 중 H_2 함량(수소 혼소율)과 산화제 중 산소 농도에 따른 OH^* 자발광 이미지(좌)와 직접 사진 이미지(우)에 의한 화염거동을 나타내었다. 화염의 자발광인 OH^* 라디칼 이미지에서 선명한 화염 이미지와 측정 센서의 손상을 고려하여 광 증폭기(intensifier)의 gain 값을 다르게 하여 측정하였다. 고온의 산화제 내 산소 농도 4%에서 gain 값은 80, 8%에서는 70, 12%에서 gain 값은 최대 gain 값 대비 60%로 조절하여 취득하였다. OH^* 이미지와 직접 사진 이미지를 비교하면 산소 농도 4%, 8%에서 직접 사진 이미지에서는 육안으로 화염을 발견하기 어렵지만 신호가 증폭된 OH^* 이미지에는 제트(jet) 형태의 화염이 존재하는 것을 볼 수 있다.

Table 2. Burner conditions of MILD zone

Description	Specifications
Fuel	H_2/CH_4
H_2 content (% vol)	10, 40, 70, 100
Thermal power (kW)	Flame behavior: 0.5 Emission: 0.125
Diameter of nozzle (mm)	Flame behavior: 2 Emission: 0.5

이전의 연구에 의하면 산화제가 낮은 농도의 산소 분위기가 되면 반응 영역(reaction zone)이 확장되어 무화염 연소 상태로 보여 마치 공간 연소 형태로 전환되는 것으로 알려져 있다^{12,13)}. 이처럼 본격적인 MILD 연소 모드에 들어서기 전후 육안으로 관측하기 힘든 화염의 길이는 광 증폭기를 이용한 OH* 자발광 이미지를 취득함으로써 화염의 길이를 측정할 수 있게 되었다.

3.1.2 MILD 모드 달성

Fig. 4는 본 연구의 수소 전소 조건 중 산소 농도에 따른 (단열)화염 온도(T_{flame})를 chemkin code를 이용하여 구한 후 ΔT 를 계산하여 Fig. 1의 연소 모드에 해당되도록 나타낸 도식도이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 산소 농도가 낮아질수록 열적 NO_x 생성이 억제되는 저온 연소가 특징인 4/4분면에 해당되는 MILD 연소 모드로 접어드는 것을 볼 수 있는데 이는 산소

농도가 낮을수록 연소 반응률이 낮아져 공간 연소 형태를 이루면서 반응 영역이 확장됨에 따라 단열화염의 온도가 상대적으로 줄어들어 ΔT 가 낮아지기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 실제 화염의 온

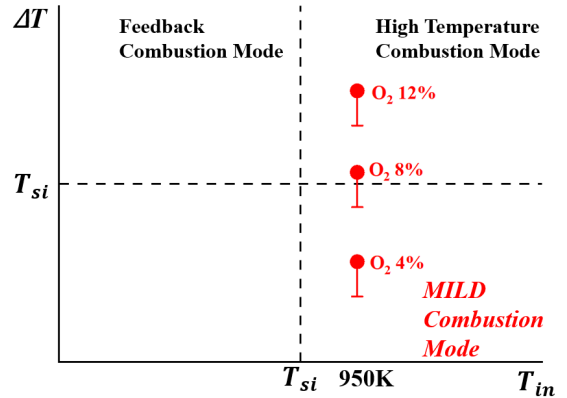


Fig. 4. Combustion mode change with different O₂ fraction at H₂ 100% in this work

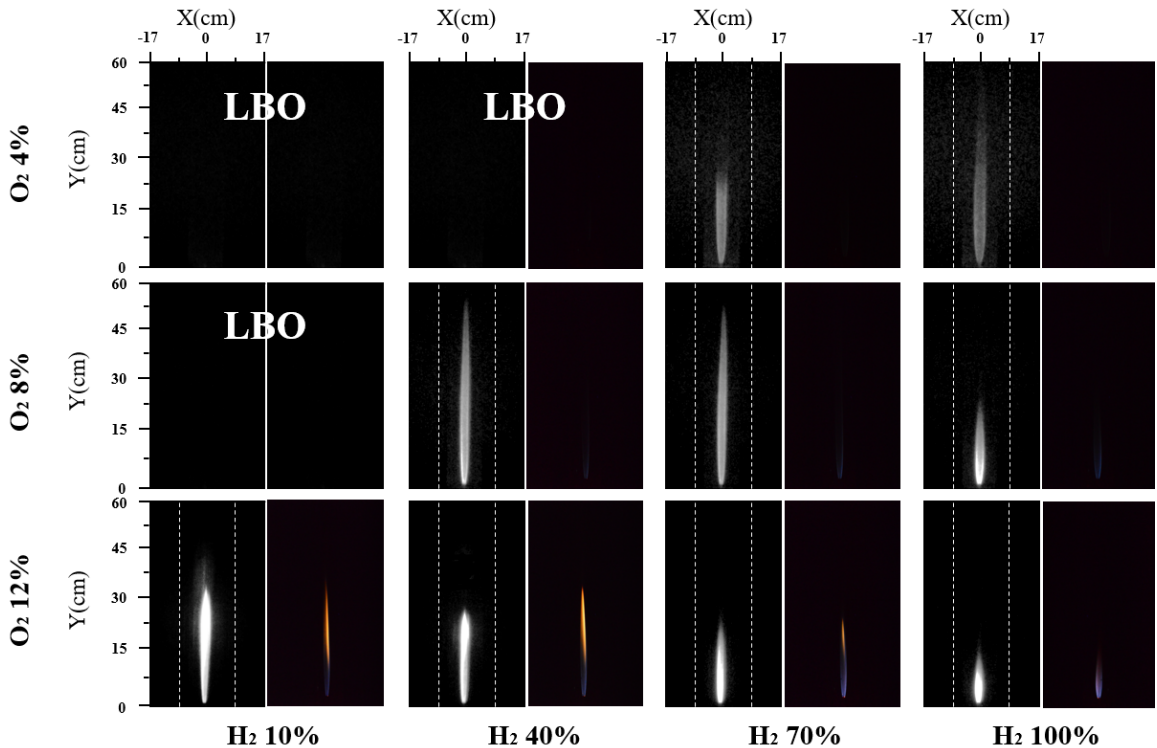


Fig. 3. Effect of H₂ content on flame behaviors of line-of-sight integral OH* chemiluminescence images (left) and direct images (right) at different O₂ fraction of hot gas oxidant

도는 계산된 단일화염 온도로 가정하였는데 산소 농도 4%인 조건은 MILD 연소에 도달하였고 12%인 경우는 Fig. 1의 1/4분면인 고온 연소 영역 내에 해당한다. 산소 농도 8% 경우에는 단일화염 온도임을 감안하면 MILD 연소와 고온 연소 영역 사이인 과도 상태의 거동을 보인다. 따라서 안정적으로 MILD 연소 구역에서 운전되기 위해서는 고온 산화제의 산소 농도를 낮게 유지하는 것이 MILD 연소 조건 달성에 유리함을 알 수 있다.

3.2 화염 길이 변화

3.2.1 산소 농도에 따른 화염의 길이 변화

무탄소연료인 수소 전소 및 혼소용 버너에서 NO_x의 연소 성능을 위해 수소 MILD 화염을 통한 효율적인 로체(furnace body) 설계와 손상 방지를 위해 수소 MILD 버너의 제트 화염 길이 예측이 필수적이다. MILD 연소의 화염 길이 예측을 위하여 기존의 탄소 기반 화석연료의 확산형 화염에서 유용하게 사용되는 식 (1)의 Roper 상관식이 무탄소연료인 수소 혼소 및 전소 상태에서도 적용 가능한지를 파악하였다. 이를 위해 본 연구에서 광 증폭기로 취득한 OH* 자발광 이미지로 MILD 모드 전후에서 화염 길이를 비교하였다¹⁴⁻¹⁶⁾.

$$L_{f,expt} = 1330 \frac{\dot{Q}_f(T_\infty/T_F)}{\ln(1+1/S)} \quad (1)$$

여기서 \dot{Q}_f 는 연료의 체적 유량이고 T_∞ 와 T_F 는 각각 산화제 온도와 연료 온도이며 S 는 몰(mole)로 나타낸 이론 산화제-연료 혼합비이다.

Fig. 5는 수소 함량과 산화제의 산소 농도에 따른 화염의 길이 변화를 OH* 자발광 이미지로 취득한 실험값과 식 (1)의 Roper 식으로 계산된 값들을 비교한 그래프들이다. 고온의 산화제 내 산소 농도에 따라 화염의 형태가 육안으로 구분하기 힘든 점을 감안하여 정확한 화염대를 파악하고 그 길이를 측정하기 위해 광 증폭기를 이용한 OH* 이미지들로만 화

염의 길이를 비교하였다. Fig. 5에서 나타난 두드러진 특징으로는 측정된 화염 길이에서 산소 농도가 일정할 때 수소의 함량이 증가할수록 화염의 길이가 짧아짐을 볼 수 있다. 이는 수소의 높은 반응성 때문에 화염의 연소 속도가 빨라지기 때문으로 판단된다. 식 (1)에서 수소-메탄 혼합연료 중 수소의 함량이 증가하면 이론 산화제-연료 혼합비인 S 값이 감소하여 화염 길이의 계산값은 낮아지게 된다. 또한 일정한 수소 함량에서는 산화제의 산소 농도가 낮아질수록 화염의 길이가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이렇게 산소 농도가 낮아지게 되면 연소 반응물이 저하되어 화염 온도인 T_{flame} 이 낮아짐에 따라 Fig. 4에 표시한 ΔT 값이 자연발화 온도인 T_{si} 보다 낮아져서 MILD 연소 조건에 근접하는 것을 알 수 있다. 이처럼 MILD 연소 조건에 들어서면 2차원 제트 형태의 반응 영역이 3차원적으로 확장되면서 공간 연소 형태가 되어 육안으로는 화염의 길이를 파악하기 힘들게 되나 광 증폭기로 취득한 화염의 길이는 증가하였다. 반면에 고온의 산화제 내 산소 농도가 증가하게 되면 반응 영역이 2차원 제트 형태를 취하면서 상대적으로 축소되어 화염의 길이가 감소하는 것을 볼 수 있다.

그런데 Roper 식으로 계산된 화염의 길이와 본 연구에서 취득한 화염의 길이에서는 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 수소 함량이 증가할수록 취득한

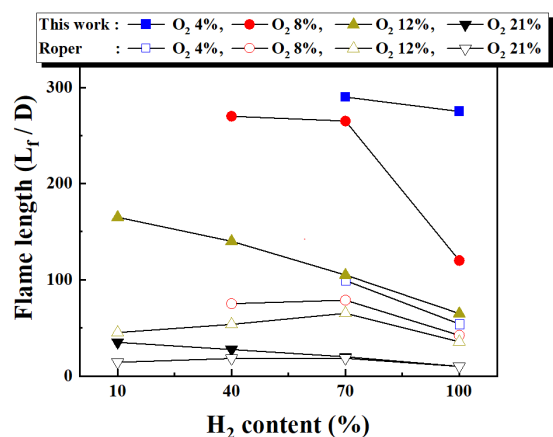


Fig. 5. Comparison of the Roper's correlation and actual flame length at different O₂ fraction with different H₂ content

화염의 길이는 계속 감소하는 반면 Roper의 식으로 계산된 화염의 길이는 증가하였다가 수소 전소에서 감소하는 경향을 보였다. 수소 전소 조건에서 산소 농도가 증가함에 따라 취득한 화염의 길이는 감소하였고 Roper 식으로 계산된 화염 길이 또한 감소하였다. 낮은 산소 농도일수록 실험으로 취득한 화염의 길이와 Roper 식으로 계산된 화염 길이의 오차율이 증가하였고 산소 농도가 증가할수록 오차율이 감소하였다. 산소 농도가 낮을수록 오차율이 증가하는 것은 Roper 식은 산소 농도 21%인 일반적인 공기 연소 조건인 경우로 산소 농도가 상대적으로 낮아질수록 형성되는 MILD 연소에서는 Roper 식을 적용하기가 어려움을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4의 1/4분면과 4/4분면에 해당되는 고온 산화제 연소 영역과 MILD 연소 영역으로 운전되는 연소기의 경우 산소 농도에 따른 화염 길이에 대한 새로운 상관식 연구가 필요함을 알 수 있다.

3.3 NO_x 배출

3.3.1 ΔNO_x 정의

본 연구의 연소기 구조상 연소기 출구에서 최종적으로 배가스 성분을 측정하면 고온의 산화제를 생성하기 위하여 hot gas generation 영역의 버너에서 배출되는 질소산화물(NO_x)과 MILD 영역인 고온의 산화제 분위기에서 독립적으로 배출되는 NO_x가 동시에 측정된다. 그러나 본 연구는 고온 산화제 분위기에서 MILD 영역 전후의 화염에서 배출 성능 연구가 목적이기에 두 영역인 hot gas generation 영역과 MILD 영역의 분리가 필요하다. 따라서 MILD 영역에서의 NO_x를 알기 위해 선행 연구를 참고하여 ΔNO_x를 도입하였다¹⁷⁾. MILD 영역에서의 NO_x 배출을 의미하는 ΔNO_x를 다음의 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\Delta NO_x = NO_{x,t} - NO_{x,g} \quad (2)$$

여기서 ΔNO_x는 MILD 영역에서의 NO_x 배출을 의미하고 NO_{x,t}는 MILD 영역과 hot gas generation

영역이 합쳐져서 배출되는 전체 NO_x이며 NO_{x,g}는 hot gas generation 영역만의 NO_x 값이다. 따라서 MILD 영역에서의 NO_x 배출은 두 영역 모두 연소 중일 때 배출되는 NO_{x,t}를 측정한 후 hot gas generation 영역만 연소했을 때 배출되는 NO_{x,g}를 뺀 값으로 ΔNO_x 값을 취하였다.

3.3.2 ΔNO_x 배출 특성

본 연구에서는 O₂ 농도 15%로 환산한 건공기 기반의 ppmvd 값과 함께 배출지수인 emission index (EI) 값을 함께 비교하였다. 배출지수 EI는 연소에 사용한 연료 질량에 대해 특정 화학종을 질량비로 나타내는 무차원수로 연료의 질량 대비 생성되는 오염물질의 양을 표현하는 데 있어 굉장히 유용하다. 선행 연구를 참고하여 식 (3)에 EINO_x와 식 (4)에 ΔEINO_x를 정의하였다¹⁸⁾.

$$EINO_x (g/kg) = \frac{X_{NO} + X_{NO_2}}{X_{fuel}} \times \frac{M_{NO_2}}{M_{fuel}} \times 1000 \quad (3)$$

$$\Delta EINO_x (g/kg) = \frac{X_{\Delta NO} + X_{\Delta NO_2}}{X_{fuel}} \times \frac{M_{NO_2}}{M_{fuel}} \times 1000 \quad (4)$$

여기서 X_i는 화학종 i의 몰분율이고 M_i는 화학종 i의 물질량이다.

Fig. 6에 본 연구에서 측정한 MILD 영역에서의 ΔNO_x의 배출 수준을 수소 함량 10, 40, 70, 100%에

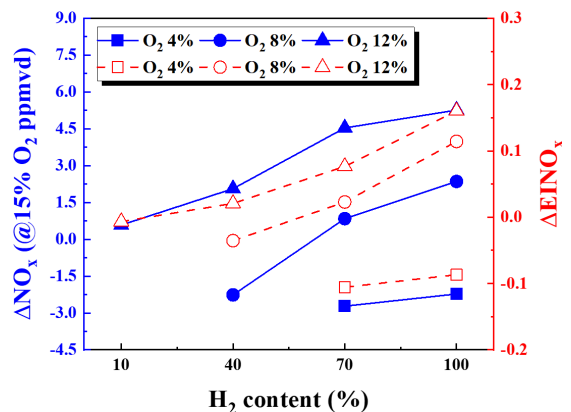


Fig. 6. ΔNO_x and ΔEINO_x trends with H₂ content and O₂ fraction

따라 나타내었다. MILD 영역에서만 배출 성능을 ppmvd 값으로 표시한 ΔNO_x 값을 실선으로, 질량 기반의 배출지수인 $\Delta EINO_x$ 값을 점선으로 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 ΔNO_x 는 동일한 산소 농도에서 수소 함량이 증가할수록 모든 구간에서 배출량이 증가하였다. 수소의 함량이 증가할수록 고온의 수소화염 영향으로 NO_x 배출량이 증가하였으며 일정한 수소 함량에서는 산소 농도가 감소할수록 배출량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 산소 농도가 감소할수록 연소 반응물이 감소하면서 공간 연소 형태로 반응 영역이 확장되고 온도가 균일해져 상대적으로 저온 연소 형태로 전환되기 때문으로 판단된다. $\Delta EINO_x$ 또한 ΔNO_x 와 유사한 배출 경향을 보이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 수소 전소(100% H₂) 조건 중 산소 농도 4, 6, 8, 10, 12%에서 배출 성능을 보여주고 있다. 이 경우에도 ΔNO_x 는 실선으로, $\Delta EINO_x$ 는 점선으로 나타내었다. 산소 농도가 감소할수록 ΔNO_x 배출은 감소하였고 $\Delta EINO_x$ 또한 이와 유사하게 감소하였다. 이는 산화제 내 산소 농도에 큰 영향을 받는 MILD 영역에서 낮은 산소 농도의 화염 온도가 높은 산소 농도의 화염 온도보다 상대적으로 낮고 온도 분포도 일반적인 제트화염보다 균일해져서 반응대가 전체적으로 온도가 낮아지는 공간 연소로 재편되기 때문이다. 이처럼 공간 연소에 가까워지면 반응대에서 국소

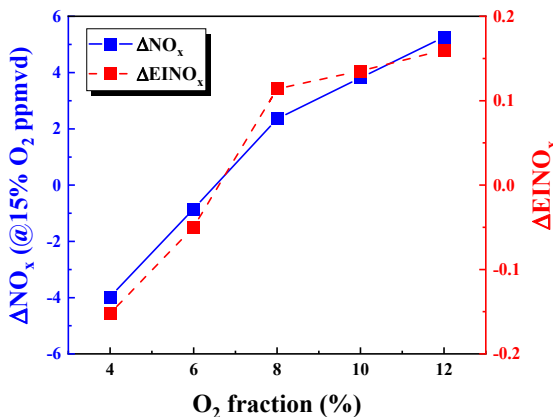


Fig. 7. ΔNO_x and $\Delta EINO_x$ trends at H₂ content 100% with O₂ fraction

부분이 고온으로 발생하는 hot spot 현상이 사라져 일반적인 고온의 제트화염보다 NO_x 를 저감하는 데 있어 효과적임을 확인할 수 있다.

한편 Fig. 6과 Fig. 7에서 산소 농도가 낮은 구간의 경우 MILD 영역에서의 ΔNO_x 와 $\Delta EINO_x$ 값들이 음의 값으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 식 (2)에 의하면 이러한 현상은 gas generation 영역의 $NO_{x,g}$ 가 MILD 영역을 거친 전체 $NO_{x,t}$ 보다 더 많이 계측됨을 의미한다. 이는 hot gas generation 영역에서 발생한 NO_x 가 MILD 연소 영역을 거쳐 줄어들었음을 보여준다. 선행 연구에 따르면 MILD 영역에서 연소되는 연료는 gas generation 영역에서 발생한 NO를 N₂로 환원시

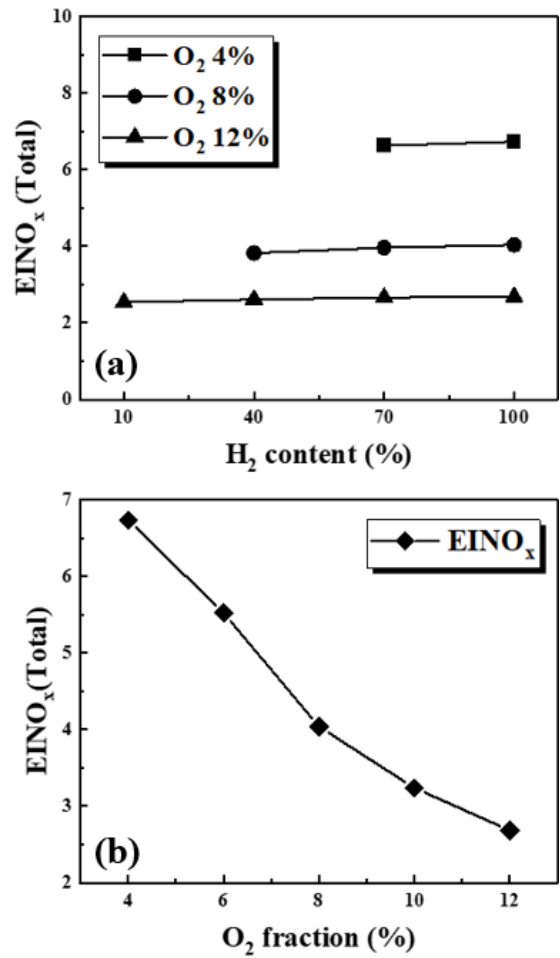


Fig. 8. Total emission trends (a) effect of H₂ content and O₂ fraction on EINO_x (b) effect of O₂ fraction on EINO_x at H₂ 100% only

키는 역할을 한다. 반응이 일어나기 전에 gas generation 영역에서 생성된 고온의 저농도 산소 분위기로 먼저 희석되고 이러한 효과는 화염 온도를 낮추고 thermal NO_x 형성을 억제한다고 보고하고 있어 MILD 영역에서 음의 값인 ΔNO_x 결과에 기여하는 것으로 판단된다¹⁹⁾.

3.3.3 전체 NO_x 배출

Fig. 8은 hot gas generation 영역의 $\text{NO}_{x,g}$ 와 MILD 영역의 ΔNO_x 를 합친 전체 NO_x 를 EINO_x 로 나타내었다. Fig. 8(a)는 4, 8, 12% 세 가지 산소 농도에서 연료인 수소 함량에 따른 EINO_x 수준을 나타내었고 Fig. 8(b)는 수소 100% 연소인 전소 조건에서 산소 농도에 따른 EINO_x 를 나타내었다. Fig. 8(a)에서 산소 농도에 따른 전체 NO_x 배출량인 EINO_x 값의 경향은 Fig. 6과 반대 경향을 보여주고 있다. 이는 본 연구의 조건에서 $\text{NO}_{x,g}$ 가 ΔNO_x 보다 더 지배적이라는 것을 의미하고 MILD 영역에서의 배출량은 상대적으로 미미하다는 것을 말해주고 있다. 이처럼 본 연구와 비슷한 방식인 gas generation 영역에서 발생한 고온의 연소가스를 MILD 영역에서 산화제로 사용하는 선행 연구에서도 MILD 영역은 NO_x 배출량에 거의 기여하지 않는다고 보고하였다²⁰⁾. 위와 같은 이유로 수소 전소 조건인 Fig. 8(b)에서도 Fig. 7과 반대로 산소 농도가 증가할수록 EINO_x 값이 감소하는 경향을 관찰할 수 있다.

그럼에도 불구하고 Fig. 8(a)에서 자세히 보면 동일한 산소 농도에서 수소 함량이 증가하면 매우 낮은 기울기로 EINO_x 가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 gas generation 영역에서의 $\text{NO}_{x,g}$ 에 비해 MILD 영역에서의 ΔNO_x 가 매우 적은 수준으로 NO_x 배출에 기여한다고 할 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 6의 ΔEINO_x 값 범위와 Fig. 8의 전체 EINO_x 값 범위를 나타내는 y축 값들의 크기(scale)를 비교할 때 EINO_x 에 비해 ΔEINO_x 의 배출 수준이 상대적으로 매우 낮은 것으로 확인이 된다.

4. 결론

본 연구에서는 수소-메탄의 혼소 및 수소 전소의 확산 화염을 통해 MILD 연소 시 화염거동과 배출 특성을 실험적 연구를 통해 조사하였다. 연료 내 수소 함량을 10%부터 100%인 전소 조건과 자연발화 온도 이상의 고온 산화제 분위기에서 산소 농도 4, 8, 12%일 때 MILD 연소 구역에서 MILD 연소 달성 여부, 화염거동, 화염 길이 및 배출 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MILD 연소 모드 달성을 확인하기 위해 산소 농도별로 단일 화염 온도를 수치해석으로 구하여 비교하였다. 고온 및 낮은 산소 농도를 산화제로 사용하는 연소 조건에서는 반응 영역의 확장과 온도가 균일한 공간 연소로 유도되었으며 이는 MILD 연소 모드 달성에 유리한 조건이 되었다. 본 연구에서는 산화제의 산소 농도 4%에서 MILD 연소 모드에 도달하였고 8%에서는 과도 상태였다. 산소 농도가 낮을수록 무화염(flameless) 연소에 가까워져 직접 화염 사진으로는 보이지 않았으나 신호를 증폭시킨 OH^* 자발광 이미지 취득을 통해 제트 형태의 화염을 관찰할 수 있었다.

2) 산소 농도가 낮아질수록 화염의 반응 영역이 확장되어 OH^* 이미지로 취득한 화염의 길이는 증가하였으며 수소 함량이 증가할수록 수소의 높은 반응성으로 인해 화염의 길이는 감소하였다. 그러나 산소 농도가 21%인 일반 공기 산화제를 적용하는 Roper 식으로 계산된 화염 길이와 고온 및 낮은 산소 농도의 산화제인 MILD 연소 모드에서 측정된 화염 길이는 높은 오차를 보여 MILD 연소로 운전되는 화염 길이 예측에 대한 연구가 필요함을 알았다.

3) MILD 연소 구역에서만 NO_x 를 ΔNO_x 로 정의하였고 배출지수인 EI 값들과 함께 비교하였다. 이 경우에도 산소 농도가 낮을수록 연소 반응률이 낮아지면서 반응 영역이 확장되고 온도가 균일해져 ΔNO_x 배출이 감소하였으며 ΔNO_x 와 ΔEINO_x 의 경향은 매우 유사하게 나타났다.

4) MILD 연소 구역만의 ΔNO_x 는 전체 NO_x 에 비

해 현저하게 낮게 측정되었는데 이는 hot gas generation 영역에서의 NO_x 가 지배적이었음을 의미하며 MILD 연소 상태에서의 화염은 NO_x 생성에 거의 기여하지 않는다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2022-00155547). 본 연구는 2024년도 한국산업기술평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구 과제이며 이에 감사드립니다(20018175, 산업용 수소 관류보일러 연소기 및 시스템 매칭기술 개발).

References

1. UN Climate Change Conference (UNFCCC), "The Paris Agreement", UNFCCC, 2015. Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
2. S. Pacala and R. Socolow, "Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies", *Science*, Vol. 305, No. 5686, 2004, pp. 968-972, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1100103>.
3. F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: an overview", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 7, 2020, pp. 3847-3869, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
4. J. Kim and K. Lee, "Numerical study on the NH_3/CH_4 symmetric premixed counterflow flames part II: investigation of flame structure and reaction path", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 748-757, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.748>.
5. A. Parente, C. Galletti, and L. Tognotti, "Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 24, 2008, pp. 7553-7564, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.058>.
6. A. Cavaliere and M. de Joannon, "Mild combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, No. 4, 2004, pp. 329-366, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.003>.
7. J. A. Wünnig and J. G. Wünnig, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, No. 1, 1997, pp. 81-94, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00006-3).
8. G. G. Szegö, B. B. Dally, and G. J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 2, 2009, pp. 429-438, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.08.009>.
9. A. Rebola, M. Costa, and P. J. Coelho, "Experimental evaluation of the performance of a flameless combustor", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, 2013, pp. 805-815, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.027>.
10. E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, "Ignition kernel formation and lift-off behaviour of jet-in-hot-coflow flames", *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 6, 2010, pp. 1167-1178, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.01.002>.
11. E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, "Role of entrainment in the stabilisation of jet-in-hot-coflow flames", *Combustion and Flame*, Vol. 158, No. 8, 2011, pp. 1553-1563, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.12.018>.
12. E. E. Fordoei, K. Mazaheri, and A. Mohammadpour, "Effects of hydrogen addition to methane on the thermal and ignition delay characteristics of fuel-air, oxygen-enriched and oxy-fuel MILD combustion", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 68, 2021, pp. 34002-34017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.065>.
13. T. Zhang, Y. Zhou, and B. Zhou, "The effects of the initial NO volume fractions on the NO_x generation and reduction routes under natural gas MILD combustion conditions", *Fuel*, Vol. 328, 2022, pp. 125175, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125175>.
14. F. G. Roper, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: part I. Theoretical model", *Combustion and Flame*, Vol. 29, 1977, pp. 219-226, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90112-2).
15. F. G. Roper, C. Smith, and A. C. Cunningham, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: part II. Experimental verification", *Combustion and Flame*, Vol. 29, 1977, pp. 227-234, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90113-4).
16. F. G. Roper, "Laminar diffusion flame sizes for curved slot burners giving fan-shaped flames", *Combustion and Flame*, Vol. 31, 1978, pp. 251-258, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(78\)90137-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(78)90137-2).
17. X. Zheng, Y. Xiong, Y. Liu, F. Lei, and Y. Xiao, "Emission characteristics and visualization of an axial-fuel-staged MILD combustor", *Combustion Science and Technology*, Vol. 193, No. 15, 2021, pp. 2588-2609, doi: <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1751619>.
18. M. D. Rumminger, "Numerical and experimental investigation of heat transfer and pollutant formation in porous direct-fired radiant burners [Doctoral dissertation]", Berkeley (CA): University of California, Berkeley, 1996.

19. M. Huang, R. Li, J. Xu, S. Cheng, H. Deng, Z. Rong, Y. Li, and Y. Zhang, "Effect of equivalence ratio and staging ratio on the methane MILD combustion in dual-stage combustor", *Fuel*, Vol. 307, 2022, pp. 121903, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121903>.
20. M. Huang, Z. Zhang, W. Shao, Y. Xiong, Y. Liu, F. Lei, and Y. Xiao, "Comparative study of syngas mild combustion characteristics in swirl diffusion and coflow diffusion staged combustor", In: *ASME Turbo Expo 2013: turbine technical conference and exposition*; 2013 Jun 3-7; San Antonio (TX), USA. New York (NY): ASME; c2013, pp. V01BT04A028, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2013-95349>.