

# 적외선 카메라를 이용한 수소 전소 마이크로믹스 연소기 설계 검증과 희박 연소 조건에 대한 실험 분석

김지완\* · 공예찬\* · 한지운\* · 박수현\*†

## Experimental Analysis under Lean Operating Conditions and Validation of the Design on a Hydrogen-Fueled Micromix Combustor Using an Infrared Camera

Jiwan Kim\*, Yechan Kong\*, Jiun Han\*, Suhyeon Park\*†

*Key Words* : Hydrogen gas turbines(수소 가스터빈), Micromix combustor(마이크로믹스 연소기), Hydrogen combustion(수소 연소), Lean blow-off(희박 날림), Infrared measurement(적외선 측정)

### ABSTRACT

Hydrogen gas turbines are a promising technology for future aircraft propulsion systems and carbon-free power generation, for their potential to eliminate carbon dioxide emissions. Micromix combustor concept is a design approach for gas turbine combustors that enhances flame stability and reduces nitrogen oxide emissions by promoting intense mixing between fuel and air, leading to rapid reaction quenching. In this study, a 30 kW micromix combustor that was independently designed and fabricated was used to validate the design and perform experimental analysis under lean operating conditions. Experiments were conducted under laboratory conditions at ambient temperature and atmospheric pressure. Since hydrogen flames are difficult to identify in the visible light images, their structure and shape were observed using an infrared (IR) camera based on infrared light emission. The experimental results confirmed that stable hydrogen combustion can be maintained using the micromix combustor even under very lean conditions at equivalence ratio of 0.34. A comparison with butane flames was conducted to observe differences in flame shape and combustion stability. The equivalence ratio limit at which lean blow-off occurs was experimentally measured, and various conditions under which the flame can be stably sustained were identified. These results experimentally validated the feasibility of the design and demonstrated that hydrogen flames can achieve stable combustion at much lower equivalence ratios compared to butane flames.

### 1. 서 론

수소는 탄소를 포함하지 않는 청정 연료이며, 이산화탄소 배출 없이 연소가 가능하다는 점에서 미래의 지속 가능한 에너지 체계에서 핵심적인 역할을 수행할 수 있다<sup>(1)</sup>. 태양광이나 풍력과 같은 재생에너지로 생산된 전력을 수소로 변환하여 저장함으로써 발전, 수송, 산업 분야 전반에 걸쳐 활용될 수 있으며, 재생에너지가 가진 단점인 간헐성으로 인한 전력 생산의 불안정성 또한 수소 에너지로 보완할 수 있다. 이리

한 수소 에너지의 장점을 활용하는 전략이 탄소 중립 실현을 위한 실질적인 수단으로 기대되고 있다<sup>(2)</sup>.

수소를 적용했을 때 가장 큰 이점을 기대할 수 있는 기술 중 하나는 가스터빈이다. 가스터빈은 단위 중량당 출력이 뛰어나므로 항공 추진 기관에 적합하며, 발전 분야를 포함한 다양한 산업에서 동력원으로 널리 활용된다. 특히 발전용 가스터빈은 출력 변화에 대한 응답이 빠르고, 운전 유연성이 우수하여 전력 공급원으로 큰 장점을 가지며, 기존의 LNG 발전소를 수소 연료 기반의 친환경 발전 시스템으로 전환하

\* 한국항공대학교 항공우주및기계공학부(Aerospace and Mechanical Engineering Department, Korea Aerospace University)

† 교신저자, E-mail : spark@kau.ac.kr

는 것은 환경 문제 해결에 매우 중요한 사안이다.

가스터빈에 수소를 적용하는 데 필요한 기술을 개발하는 것은 경제적, 환경적 측면에서 보았을 때 필수적이다<sup>(3)</sup>. 그러나 수소는 기존의 탄화수소 연료와 비교해 높은 발열량, 빠른 화염 전파 속도, 높은 화염 온도 등에서 물리적인 차이를 가지며, 수소가 연소할 때 연소 불안정(combustion instability)과 역화(flashback) 현상이 초래될 가능성이 있으므로 이러한 특성 차이가 가스터빈 기술에서 고려되어야 한다<sup>(4,5)</sup>. 또한, 수소가 연소할 때 이산화탄소가 전혀 배출되지 않음에도 불구하고 배출 가스에 포함된 대기 오염 물질이 완전히 해결된 것이 아니라 일부가 잔존하는데, 이것은 공기 중에 포함된 질소가 반응하여 질소산화물(NOx, nitrogen oxides)이 생성되는 문제가 여전히 존재하기 때문이다. 따라서 수소 연료의 특성을 고려한 새로운 연소기 설계와 연소 안정성 확보 방안이 필요하며, NOx 저감을 위한 구조적 대책이 병행되어야 한다. 이러한 요구를 충족하기 위해 고안된 연소기 개념 중 하나가 마이크로믹스(micromix) 연소기이다. 이 방식은 각각의 단일 연료 분사 구멍을 통해 다수의 짧고 작은 화염을 형성함으로써 공기와 연료의 혼합을 빠르고 강하게 함으로써 연소 반응물이 고온에서 체류하는 시간을 최소화하여 NOx 생성을 크게 줄일 수 있다<sup>(6,7)</sup>.

본 연구에서는 독자적으로 설계하고 제작한 30 kW 급 수소 전소 마이크로믹스 연소기를 바탕으로<sup>(8)</sup>, 실험실 환경에서 수소 화염의 희박 연소 특성을 분석하였다. 특히 가시광에서 관측이 어려운 수소 화염의 특성을 정확히 분석하기 위해 적외선 기반의 계측 기법을 활용하였으며, 당량비 변화에 따른 연소 안정성과 희박 날림(lean blow-off) 한계를 실험적으로 확인함으로써 수소 연소기의 설계 최적화를 위한 기초 자료를 제공한다.

## 2. 본 론

### 2.1 마이크로믹스 수소 연소기 설계

수소는 연소 과정에서 이산화탄소를 배출하지 않아 탄소 저감에 큰 효과를 주는 것이 사실이지만, 연소 과정에서 질소산화물(NOx)이 생성될 수 있으므로 이를 저감할 필요가 있다. 마이크로믹스 연소기는 수소 전소 조건에서 안정적인 연소를 달성하면서 동시에 NOx 배출을 저감하기 위한 목적으로 제안되었다. 마이크로믹스 연소기에서는 다수의 작은 연료 분사 구멍으로 수소를 분사하여 연료 분사 구멍 수만큼 인 다수의 미세 화염을 형성하여 연소 반응을 진행한다.

연소 반응에서 생성되는 온도가 높을수록, 그리고 연소 반응물이 고온에서 체류하는 시간이 길수록 질소산화물 발생량이 증가한다. 따라서, 질소산화물을 저감하기 위해서는 반응물이 고온에서 체류하는 시간을 줄이는 것이 효과적이다.

이것을 실현하기 위해서 분사되는 연료와 공기를 빠르게 혼합하는 방안으로 사용되는 것이 제트 교차 흐름 혼합(jet-in-crossflow mixing)이다. 마이크로믹스 연소기에서는 이 원리로 반응물을 강하게 혼합하고, 연소 반응을 빠르게 종료함으로써 질소산화물 생성을 최소화한다<sup>(6,7)</sup>.

Fig. 1에 마이크로믹스 연료 분사기에서 형성된 유동의 구조가 나타나 있다. 연소기 내부에 내부 재순환 와류(inner recirculation vortex)와 외부 재순환 와류(outer recirculation vortex)가 형성된 것을 볼 수 있다. 내부 와류는 공기 게이트(air gate)를 통과하는 제트 흐름이 일으키는 공기 재순환으로 형성되고 외부 와류는 공기와 연료가 혼합된 이후 고온인 연소 가스가 재순환하며 형성된다. 두 와류 사이에 전단층이 형성되고, 이 전단층을 따라 화염이 고정된다<sup>(8)</sup>. 화염은 전단층(shear layer) 형성에 따라 그 구조와 특성이 달라지게 되며, 전단층 형태는 재순환 와류의 크기, 위치, 강도에 따라 결정된다.

KAU micromix hydrogen combustor는 수소 전소를 위한 30 kW 급 마이크로믹스 연소기이며, 구조는 Fig. 2-3에서 자세하게 나타나 있다. 1개의 열 당 6개의 단일 연료 분사 구멍으로 구성되어 있고 총 4개의 열이 존재하므로 24개의 작은 화염이 형성된다. 수소 분사 구멍은 지름 0.5 mm인 원형으로 공기 게이트와 서로 수직 방향으로 구성된다. 공기가 분사되는 공기 게이트는 단면이 3 × 3 mm이고, 두 모서리에 반지름 1.5 mm의 필렛(fillet)이 적용된 형태이다.

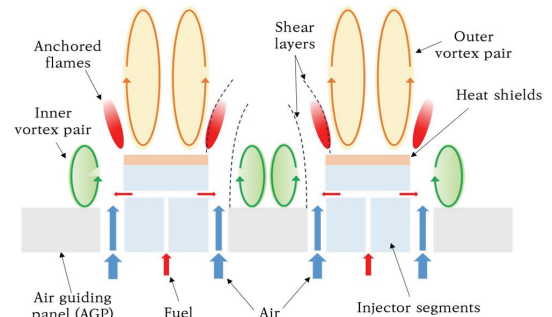


Fig. 1 Flow structure inside a micromix combustor

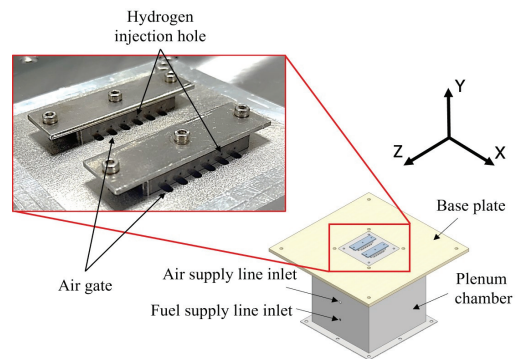


Fig. 2 KAU micromix hydrogen combustor structure

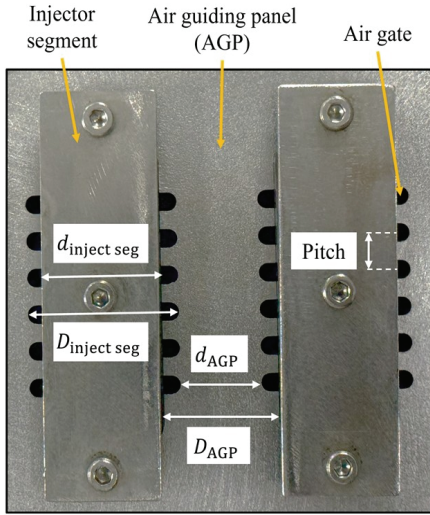


Fig. 3 Top view of micromix fuel injector

Table 1 Design variables of micromix fuel injector

Design variables	Values (mm)
$d_{inject\ seg}$	20.0
$D_{inject\ seg}$	26.0
$d_{AGP}$	14.0
$D_{AGP}$	20.0
$Pitch$	6.0

Fig. 3은 마이크로믹스 연료 분사기에 사용된 다양한 설계 변수들을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 설계 변수들의 실제 치수는 Table 1에서 확인할 수 있다.

수소는 저위 발열량(LHV, lower heating value)이 120 MJ/kg이다. 연소기에 공급되는 수소의 질량 유량이  $8.23 \times 10^{-6}$  kg/s일 경우, 총 단일 연료 분사 구멍이 24개이므로 식 (1)을 통해 약 23.7 kW의 열량을 생성할 것으로 예상할 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$Q_{total} = 24 \cdot Q_{singlehole} = 24 \cdot \dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2} \quad (1)$$

질소산화물 배출에 큰 영향을 끼치는 주요 설계 변수 중 하나는 운동량 흐름 비율(momentum flux ratio,  $J$ )이다. 운동량 흐름 비율은 수소와 공기 운동량 유입 비율로서 주 유동에 대하여 상대적으로 교차 유동이 만드는 영향을 나타낸다. 운동량 흐름 비율이 증가하면 제트 교차 흐름 혼합(jet-in-crossflow mixing) 특성은 향상되지만, 임계값 이상으로 증가하면 수소 연료 분사 깊이(hydrogen injection depth)가 커져서 연료가 내부 재순환 영역으로 침투하게 되면 반응물 체류 시간이 길어짐으로 인해 NO<sub>x</sub> 배출이 늘어날 수 있고, 동시에 화염 안정성에도 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 연료 분사 깊이가 전단층을 넘지 않도록 설계하는 것이

중요하다. 최대 분사 깊이는 식 (2,3)에 따라 분사 구멍 크기와 운동량 흐름 비율로 결정된다<sup>(9)</sup>.

$$y_{H_2} = 1.15d_{H_2}\sqrt{J} \quad (2)$$

$$J = \frac{\rho_{H_2} \times u_{H_2}^2}{\rho_{air} \times u_{air}^2} \quad (3)$$

여기서 공기 게이트를 통해 분사되는 공기의 속도를  $u_{air}$ , 연료 분사 구멍을 통해 분사되는 수소의 속도는  $u_{H_2}$ 이다.  $\rho_{air}$ 는 공기의 밀도,  $\rho_{H_2}$ 는 수소의 밀도를 나타낸다.

## 2.2 연소기 실험 장치와 계측 시스템 구성

### 2.2.1 마이크로믹스 수소 연소기 시스템 구성

설계 제작된 마이크로믹스 연소기의 연소 특성을 실험적으로 검증하기 위해 실험 시스템을 구축하였다. Fig. 4는 마이크로믹스 연소기와 적외선 카메라 등 주요 장비를 포함한 장치 개략도를 보여준다. 수소는 120 bar의 고압 용기에서 공급되며, 레귤레이터를 통해 적절한 압력으로 조절된 후 역화 방지기와 체크밸브, 볼밸브를 차례로 거쳐 24개의 연료 분사 구멍을 통해 분사된다. 공기는 컴프레서에서 5.0-7.0 bar로 압축된 후, 레귤레이터를 통해 연료와 동일한 압력으로 조절된 후 24개의 공기 게이트를 통해 상온, 상압 조건인 연소기 환경으로 분사된다.

연료와 공기 공급 유량은 부피 유량을 기준으로 MFC(질량 유량 제어기, mass flow controller)를 사용해 정밀하게 제어하였다. 본 연구에서 사용된 MFC는 Alicat MCR 20과 MCR 1000이다. 실험에서 식 (4)를 참고하여 당량비(equivalence ratio)를 약 0.25에서 1.0 범위로 설정하여 다양한 희박 연소 조건에서 측정을 진행하였다. 이 실험 조건은 수소 화염에서 희박 날림(lean blow-off) 현상이 발생하는 한계 당량비를 확인하는 목적으로 설정했다.

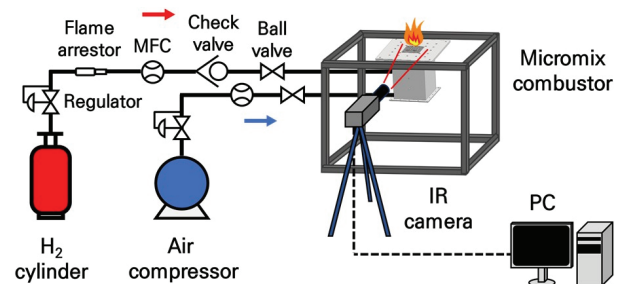


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for the KAU micromix hydrogen combustor

$$\phi = \frac{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{actual}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{stoichiometric}}} \quad (4)$$

식에서  $(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{actual}}$ 은 실험 조건에서 실제 연료-공기비이고,  $(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{stoichiometric}}$ 는 이론적으로 완전 연소에 필요한 화학양론 연료-공기비이다.

### 2.2.2 적외선 측정 시스템 구성

수소 화염은 연소 시 탄소를 포함하지 않기 때문에, 연소 과정에서 그을음(soot) 입자와 같은 복사원이 거의 형성되지 않는다. 탄화수소 연료 화염에서 일반적으로 관찰되었던 흑체 복사에서 발생하는 것과 같은 뚜렷한 가시광 영역 광학적 신호가 수소 화염에서는 생성되지 않는다. 따라서 육안으로는 관찰이나 형상 분석이 어렵다<sup>(11,12)</sup>. 반면, 수소 화염은 주로 적외선(IR) 영역에서 수증기(H<sub>2</sub>O)의 적외선 방출 특성을 통해 열에너지가 방사된다. 그러므로, 수소 화염을 시각화하고 그 특성을 정량적으로 분석하기 위해서는 적외선 기반 측정이 바람직하다<sup>(13)</sup>.

본 연구에서는 수소 화염의 형상과 적외선 방출 강도를 정량적으로 측정하기 위해 FLIR A655sc 적외선 카메라를 사용하였다. 이 장비는 비냉각식 마이크로볼로미터 검출기를 기반으로 작동하며, 측정 파장 범위는 긴파장 적외선(LWIR, long-wave infrared)에 해당하는 7.5 - 14.0 μm이다. 해상도는 640 × 480 pixel, 프레임 속도는 50 fps이다. Fig. 5에서는 마이크로믹스 연소기의 정면(XY 평면)과 측면(YZ 평면)을 기준으로 설치된 카메라의 위치와 측정 평면을 나타낸다. 이를 통해 각각의 평면에서 화염 구조 분석이 가능하도록 구성하였다.

적외선 이미지 데이터는 FLIR 전용 소프트웨어인 ResearchIR을 통해 실시간으로 획득하였다. 이후 화염 구조의 시각화를 위해 MATLAB에서 3 × 3 미디언(median, 중간값)

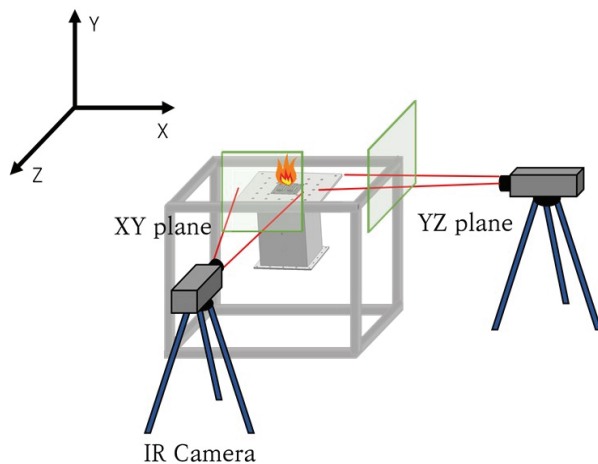


Fig. 5 IR measurement setup for the micromix combustor and IR camera views on XY, YZ planes

필터를 적용하여 각 프레임에 존재하는 무작위 잡음에 기인한 이상치(outliers)를 제거하였다. 미디언 필터는 주변 픽셀의 중간 값을 사용하여 이상치를 효과적으로 줄일 수 있으며 형태와 구조에 왜곡이 발생하지 않는 장점이 있으므로 화염 경계와 구조적 특징이 명확하도록 잡음이 최소화된 이미지를 획득하는데 사용되었다. 전처리 과정을 거친 후, 시간에 따라 연속적으로 변하는 불규칙한 적외선 방출 분포로부터 평균 적외선 방출 분포를 도출하였다. 동일한 실험 조건에서 획득한 총 50 프레임의 원시 데이터로부터 식 (5)를 사용하여 각 위치에 해당하는 값을 여러 프레임에서 찾고 산술 평균하여 평균 프레임 데이터를 구하였다.

$$\bar{\mathbf{F}}_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{F}_{i,j,k} \quad (5)$$

여기서  $\bar{\mathbf{F}}_{i,j}$ 는  $i, j$  위치 픽셀에서의 평균 적외선 강도이다.  $N$ 은 전체 프레임 개수이며,  $\mathbf{F}_{i,j,k}$ 는  $k$ 번째 프레임의  $i, j$  위치의 픽셀에서 측정된 적외선 강도 값,  $i$ 는 세로 방향 인덱스,  $j$ 는 가로 방향 인덱스를 나타낸다. Fig. 6은 개별 프레임을 산술 평균하여 평균 화염 이미지 형상을 얻는 과정을 시각적으로 나타낸 것이다.

수소 화염 내부에서 온도 분포는 연속적으로 변화하며, 고체 표면에서처럼 일정한 방사율(emissivity)을 정의하기 어렵다. 따라서 적외선 카메라에서 제공하는 온도 보정 값(temperature-calibrated value)은 실제 화염 온도를 반영하는 것으로 보기 어렵고, 직접 온도 값을 측정하고자 한다면 복사율 추정에 따라 매우 큰 오차가 발생할 것이다<sup>(14)</sup>. 본 연구에서는 수소 화염의 적외선 방출 강도(intensity)를 측정하고, 다양한 실험 조건에 따른 화염 적외선 방출 강도의 상대적 변화를 정량적으로 비교, 분석하였다. 이 과정에서

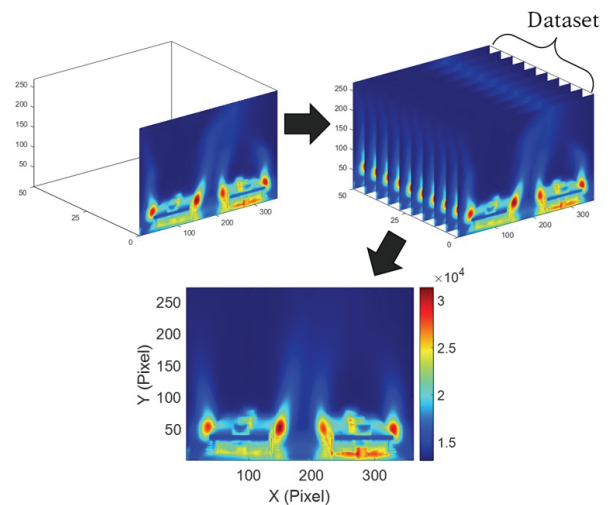


Fig. 6 Averaging process of individual IR image frames to obtain a mean frame

카메라 소프트웨어에서 제공하는 온도 보정 값을 사용하지 않고 적외선 카메라의 원신호인 카운트(counts) 값을 그대로 활용하였다. 카운트 값은 서로 다른 실험 조건에 대해서 상대적인 화염 적외선 방출 강도를 비교하는 데 유용하다. 카운트 값을 기준으로 한 데이터는 방사율 보정과 같은 별도의 보정 없이 가시화되었다<sup>(13,15)</sup>.

화염 내 적외선 방출 특성 분석을 위해 화염 중심부를 대상으로 관심 영역(ROI, region of interest)을 설정하였다. 해당 영역에서 상대적인 적외선 강도 값을 측정하고 수소의 부피 유량에 따른 적외선 강도 변화와 화염 구조의 특성을 비교하였다. 또한, 측정 평면에 따른 적외선 강도 분포의 차이와 화염 구조를 함께 분석하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 적외선 수소 화염 시각화와 화염 구조 분석

적외선 카메라를 사용한 수소 화염 측정 결과를 비교하고 같은 조건에서 일반 카메라로 획득한 이미지를 참고하여 비교하였다. Fig. 7은 수소(hydrogen, H<sub>2</sub>)와 부탄(butane, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 화염을 XY 평면에서 측정한 결과로, 가시광 기반의 일반 카메라와 적외선 카메라 각각으로 얻은 화염 데이터를 비교한 것이다. XY 평면에서 총 4개의 단일 연료 분사 구멍 열이 나란히 배열된 구조를 볼 수 있다. 수소와 부탄 화염의 비교는 각각의 연료에서 화염 특성이 명확히 관찰되는 조건에서 수행되었다. 수소 화염은 공기 유량 8.0 SLPM (standard liter per minute), 수소 유량 2.5 SLPM으로 설정하였으며, 이 때 당량비( $\phi$ )는 약 0.73으로 다소 희박 조건이다. 반면, 부탄은 공기 유량 6.0 SLPM, 부탄 유량 0.20 SLPM의 조건에서 연소되었으며, 이 때 당량비( $\phi$ )는 약 1.0

에 해당한다.

수소 화염은 가시광 이미지에서는 거의 관찰되지 않지만, 적외선 이미지에서는 강한 적외선 신호가 분사 구멍 열에서 뚜렷하게 보인다. 특히 연료 분사 구멍 열 4개에서 각각 독립적으로 형성된 수소 화염이 수직 방향으로 진행되는 구조를 보였다. 부탄 화염에서는 가시광 이미지에서 푸른색 불꽃이 뚜렷하게 관찰되며 이 푸른색 신호는 C-H 결합이 존재하는 연료가 연소할 때 방출되는 화학발광(chemiluminescence)이다. 적외선 이미지에서도 각 연료 분사 구멍에 대응하는 고온 영역이 명확하게 나타난다.

Fig. 8은 동일한 조건으로 YZ 평면에서 측정된 결과를 나타낸다. 이 평면에서는 총 6개의 단일 연료 분사 구멍이 수평으로 나란히 배열된 구조가 보인다. 수소 화염은 가시광 이미지에서는 화염이 관찰되지 않았고, 적외선 이미지에서는 6개의 단일 연료 분사 구멍에서 각각 분리된 적외선 방출 구조가 확인되었다. 부탄 화염은 가시광 이미지에서 각각의 연료 분사 구멍에서 독립적으로 화염이 형성되었으며, 병합하지 않고 유지되는 것을 확인하였다. 적외선 이미지에서는 가시광 관찰과 마찬가지로 독립된 6개의 적외선 방출이 관찰되었으며 연소 생성물이 상승한 후에 일부 병합되는 듯한 형태를 보였다. 가시광 이미지에서는 래디컬이 방출하는 화학발광이 관찰되는 위치가 화염에서 화학 반응과 열 생성이 일어나는 위치에 가깝다고 할 수 있으나, 이와는 다르게 적외선 이미지가 가장 강한 강도를 보이는 위치는 충분한 열이 발생한 상태이며 화학 반응이 일어나는 화염 선단(flame front)으로부터 유동이 더 진행된 위치이므로 연소 생성물로 구성된 플룸(plume)이 관찰된 것으로 볼 수 있다. 이러한 이유로 적외선 이미지에서 화염 길이가 더 긴 것처럼 보인다. 마찬가지로 적외선 이미지에서 병합되는 형태가 보이는 것도 또한 화염 병합보다는 플룸이 병합된 것으로 보는 것이 합리

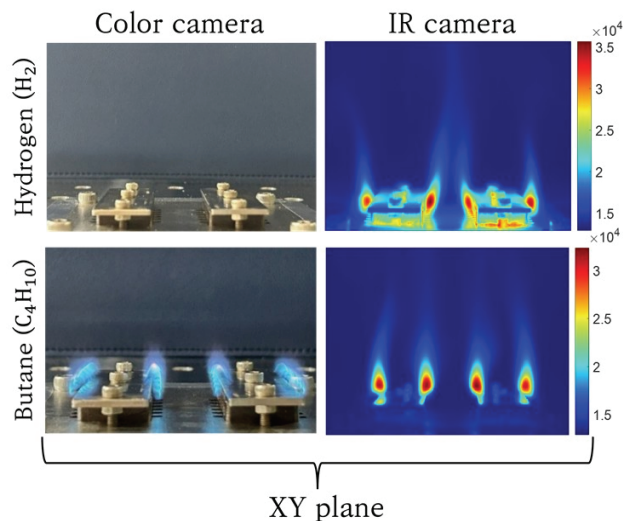


Fig. 7 Comparison of hydrogen and butane flames measured by a color camera and an infrared camera in the XY plane

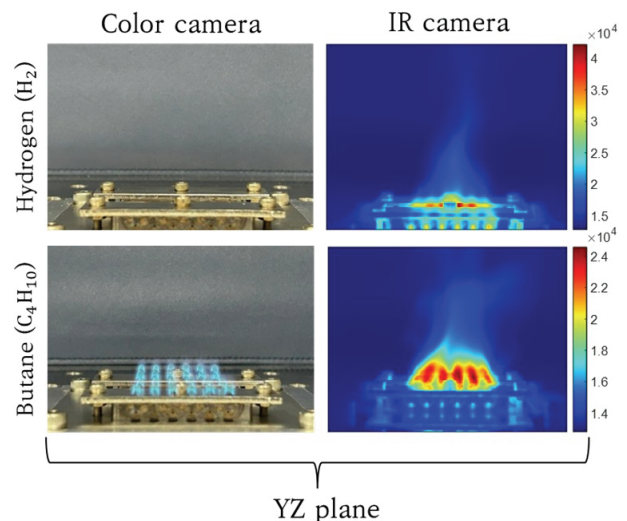


Fig. 8 Comparison of hydrogen and butane flames measured by a color camera and an infrared camera in the YZ plane

적이다. 적외선 결과를 비교했을 때 수소 화염 또는 플룸은 부탄에 비해서 길이가 현격하게 짧은 것을 볼 수 있는데, 수소는 부탄에 비해 화염 속도가 확연히 높기 때문에 비슷한 유속 조건에서 화염 길이가 매우 짧기 때문이다. 마찬가지로 화염 속도 차이로 인하여 Fig. 7-8에서와 같은 낮은 유속에서는 부탄 화염이 더 안정적으로 고정되었을 수 있으나, 유량이 더 높은 설계점에 가까운 조건에서라면 부탄 화염보다 수소 화염이 더 잘 유지될 것으로 추측할 수 있다.

이러한 관찰로부터 적외선 기반 계측이 수소 화염 구조의 시각화와 분석에 필수적임을 실험적으로 확인하였다. 수소 화염이 고온 영역을 형성하더라도 가시광 영역에서는 광학적 신호가 거의 발생하지 않아서 가시화가 어렵다는 점을 알 수 있었다. 연료 종류에 따른 화염을 비교할 필요가 있을 때 본 실험에서와 같이 적외선 강도와 적외선 분포 차이를 비교하는 방법이 효과적일 것이다.

### 3.2 수소 화염과 부탄 화염의 형태 특징 비교

마이크로믹스 연소기에서 형성되는 수소와 부탄 연료의 화염 특성을 동일한 유량을 기준으로 면밀히 비교 분석하였다. Fig. 9는 적외선 카메라를 이용하여 측정된 수소 화염과 부탄 화염 적외선 이미지를 나타낸다. 연료 공급 유량은 수소 2.5 SLPM, 부탄 0.27 SLPM으로 설정하였고, 공기 유량은 동일하게 8.0 SLPM으로 설정하였다. 이에 따라 수소 화염의 당량비는 0.73, 부탄 화염의 당량비( $\varphi$ )는 1.0으로 설정되었다.

부탄 화염의 적외선 이미지에서 각 연료 분사 구멍 옆에 대응하여 화염 위치와 가까운 곳에 적외선 방출이 최대인 지점이 나타나는 것과 동시에 수직 방향으로 길게 형성되는 적외선 방출 분포가 관찰되었다. 분사 구멍 옆 사이에서 화염들이 서로 병합되지 않고 독립적인 구조를 유지하는 것을 적외선 방출 분포로부터 관찰하였다.

수소 화염에서도 각 연료 분사 구멍 옆에 대응하는 적외선 방출 분포가 형성된 것을 확인하였다. 적외선 방출 분포 영역 중심부에서 최대 적외선 방출 분포가 나타나는 특징은 부탄 화염에서의 특징과 유사하지만, 화염 형상의 크기와 위치에서 다소 차이가 관찰되었다. 수소 화염의 길이는 약 13

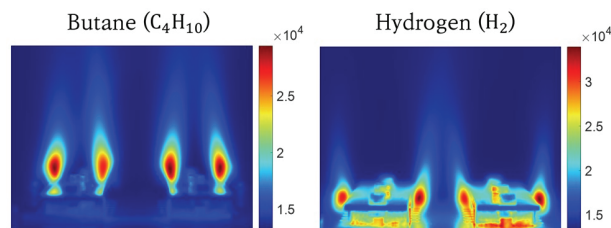


Fig. 9 Infrared images of butane and hydrogen flames in XY plane

mm이고, 부탄 화염의 길이는 약 17 mm로 측정되어 부탄 화염의 길이가 더 긴 것으로 나타났다. 또한, 수소 화염과 부탄 화염의 부상 높이는 각각 AGP로부터 3 mm, 7 mm로 나타났다. 이러한 결과는 두 연료의 물리적 특성에 차이로 인해 발생한다. 수소는 부탄과 밀도, 발열량, 화염 속도 등 여러 특성에서 차이가 나타난다. 수소의 발열량은 120 MJ/kg이고, 부탄의 발열량은 49.5 MJ/kg이며, 수소 화염 속도는 상온 상압에서 약 3 m/s로 메탄보다 약 8배, 부탄보다 약 10배 높다<sup>(16,17)</sup>. 화염 크기는 그밖에도 열 물질 확산 계수, 열 방출률, 난류 강도, 당량비 등 다양한 요인에 의해서도 영향을 받는다. 이와 같은 연료의 물리적 특성 차이로 인해 수소 화염의 적외선 방출 분포가 부탄 화염 대비 크기가 작고, 더 낮은 위치에서 형성된다. 서로 다른 두 연료로 생성된 화염 형상을 비교함으로써, 마이크로믹스 연소기에서 연료의 물리적, 화학적 특성에 따른 화염의 차이를 적외선 카메라를 사용하여 평가할 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 당량비 변화에 따른 수소 화염 형태

당량비 변화의 영향을 알기 위해 공기 유량을 일정하게 유지하고 수소 유량을 조절하여 당량비를 변화시켰다. 이에 따른 화염의 적외선 방출 분포와 구조적 특성을 분석하였다. 세 가지 경우에 대해서 공기 유량을 30 SLPM으로 고정하고, 당량비( $\varphi$ )를 (a) 0.4, (b) 0.5, (c) 0.6으로 설정했고, 그에 해당하는 수소 유량은 각각 5, 6.5, 8 SLPM 이었다. Fig. 10은 측정된 수소 화염의 적외선 방출량 분포도이다.

당량비가 증가함에 따라 화염의 적외선 방출 분포 영역이 넓어지고, 방출 강도도 함께 증가하는 것을 확인하였으며, 수소 화염의 길이에도 다소 변화가 관찰되었다. Fig. 10 (a)는 약 13 mm, (c)는 약 15 mm 정도로 당량비 증가에 따라 화염 길이가 다소 증가하였다. Fig. 9에서 당량비 0.73의 수소 화염 길이가 13 mm 인 것과 비교하여 Fig. 10에서 당량비 0.6의 수소 화염 길이가 15 mm로 더 긴 이유는 공기 질량 유량이 크게 증가하였기 때문이다. 이를 통해 에어 게이트에서 분사되는 공기 질량 유량이 화염 길이에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 반면, 공기 질량 유량이 변하지 않았기 때문에 수소 화염의 부상 높이의 변화는 관찰하기 어려웠고, Fig. 10 모두 AGP로부터 약 3 mm로 측정되었다. 또한, 플

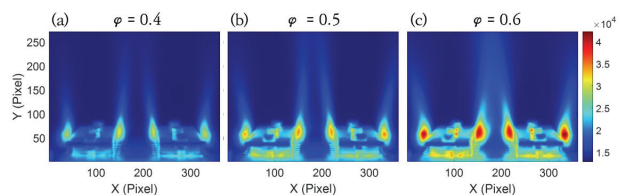


Fig. 10 Infrared images of hydrogen flames with varying equivalence ratios and a fixed air flow rate at 30 SLPM

름의 각도가 당량비 증가에 따라 기울어지며 그 방향은 외부 재순환 와류의 크기가 커지는 것에 해당하는 방향과 같은 경향을 보였다. 당량비가 증가하면 수소 유량이 증가하고, 이에 따라 증가한 열 생성량과 생성물의 엔탈피 증가, 부피 팽창 등이 재순환 와류의 크기와 함께 화염 구조에 영향을 준 것으로 해석된다. 이러한 결과는 당량비가 수소 화염의 구조와 적외선 강도에 직접적인 영향을 미치며, 특히 마이크로믹스 연소기에서 형성되는 재순환 와류 형태와 유동 구조에 큰 영향을 미치는 주요 변수임을 실험적으로 확인하였다.

### 3.4 수소와 공기 유량에 따른 수소 화염 형태

동일한 당량비 조건에서 수소와 공기의 부피 유량을 증가시키며 마이크로믹스 연소기에서의 수소 화염 구조와 적외선 방출 특성을 비교하였다. Fig. 11은 세 가지 경우에 대해 각 유량 조건에 대해 측정된 적외선 이미지를 나타낸 것이다. 세 조건 모두 당량비( $\varphi$ )는 0.48로 동일하게 유지되었고 수소와 공기의 유량은 각각 (a) 공기 20 SLPM, 수소 4.1 SLPM, (b) 공기 25 SLPM, 수소 5.1 SLPM, (c) 공기 30 SLPM, 수소 6.1 SLPM이다.

측정된 적외선 이미지를 통해 부피 유량 변화가 화염 구조에 미치는 영향을 분석하였다. 공기와 수소의 총 유량이 증가함에 따라 세 가지 경우 모두에서 적외선 방출 분포는 형태적으로 유사한 구조를 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나 약간의 차이가 있는데 전반적인 적외선 방출 강도가 증가하고, 적외선 방출 분포 영역이 넓어지며 화염 형상의 크기도 커지는 경향이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수소 화염의 길이에도 다소 변화가 관찰되었다. Fig. 11 (a)는 약 13 mm, (b)는 15 mm, (c)는 약 17 mm 정도로 동일한 당량비 조건이어도 공급되는 공기, 수소 질량 유량에 따라 화염 길이가 증가하였다. Fig. 10에서 공기 질량 유량 30 SLPM, 당량비 0.6의 수소 화염 길이가 15 mm이고, Fig. 11에서 공기 질량 유량 30 SLPM, 당량비 0.48일 때 수소 화염 길이가 17 mm인 것을 비교하였을 때 낮은 당량비 조건에서 화염 길이가 더 길게 나타났다. 동일한 공기 질량 유량 조건에서 당량비가 낮아지면 수소 질량 유량도 낮아지므로 에어 게이트에서 분사되는 제트 속도 감소의 미치는 영향이 감소하는 것이 그 이유이다. 따라서 동일한 공기 질량 유량일 경우 당량비가 낮을수록 화염의 길이가 다소 증가하는 것을 실험적으로 확인하였다. 동일한 당량비 조건에서 수소와 공기 유량이 증가할 경우, 연소에 참여하는 반응물의 총량이 증가하게 되므로 총 열 생성량이 증가하는 반면, 복사와 대류 열전달에 의해 화염 외부로 빠져나가는 열 손실은 크게 변화하지 않으므로, 유량이 증가할 때 화염 영역의 전체적인 온도가 증가하며 그와 함께 연소 반응 영역 크기가 확장되고 적외선 방출 강도 최대값도 함께 증가한다. 이러한 적외선 이미지 관찰을 통해

당량비 뿐만 아니라 전체적인 유량 또한 화염의 크기와 적외선 방출 강도에 영향을 미치는 중요한 인자임을 실험적으로 확인하였다.

### 3.5 조건에 따른 적외선 방출 강도 특성 분석

수소 화염의 적외선 방출 강도의 특성을 분석하기 위해, Fig. 10과 Fig. 11의 적외선 방출 분포 측정에 이어서 다양한 조건에서 적외선 방출 강도를 측정했다. 실험은 마이크로믹스 연소기에서 화염이 안정적으로 형성되고, 유지되는 조건을 바탕으로 설정하였다. 공기 유량은 20-30 SLPM, 수소 유량은 4-8 SLPM의 범위에서 MFC를 통해 당량비에 맞추어 공급하였다. 당량비 범위는 0.3-0.6인 희박 연소 조건으로 설정하였다. 적외선 강도 측정을 위해 Fig. 12에 나타난 것처럼 최대 적외선 방출 강도가 나타나는 영역에  $3 \times 3$  픽셀인 관심 영역(ROI)을 설정하고, 해당 영역 카운트 값을 기준으로 적외선 방출 강도를 추출하였다.

Fig. 13 (a)는 공기 유량은 30 SLPM으로 고정하고, 수소 유량을 증가하며 당량비 증가에 따른 수소 화염의 적외선 방출 강도를 그래프로 나타낸 것이다. 당량비가 증가함에 따라 적외선 방출 강도도 증가하는 경향이 나타났으며, 희박 조건에서도 안정적인 화염 구조가 유지됨을 확인하였다. 이러한 현상은 단위 시간당 공급되는 수소 유량이 증가함에 따라 식 (1)에 의해 전체 발열량이 증가하고, 그 결과 연소 영역 내 고온 영역이 넓어지며, 적외선 방출 강도가 증가한 것으로 해석할

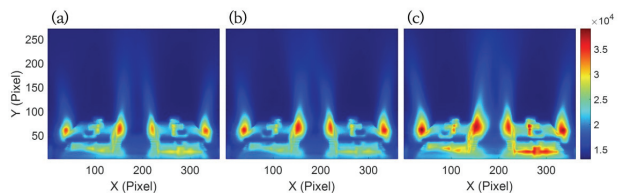


Fig. 11 Infrared images of hydrogen flames with varying air and hydrogen flow rates and a constant equivalence ratios ( $\varphi = 0.48$ )

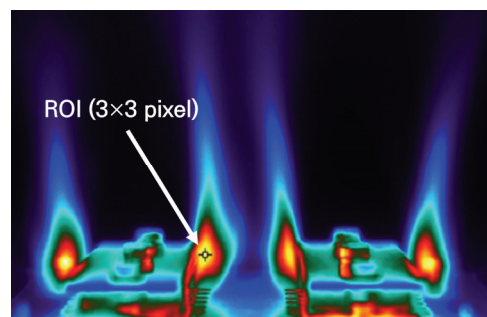


Fig. 12 Infrared image of a hydrogen flame, showing the region of interest (ROI,  $3 \times 3$  pixels)

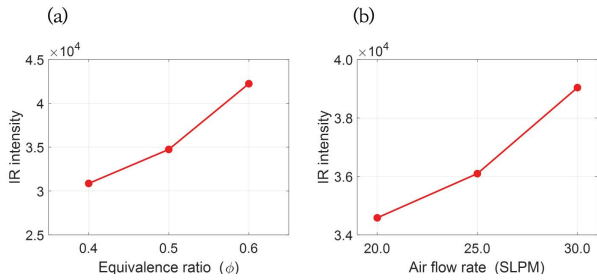


Fig. 13 (a) infrared intensity with increasing equivalence ratio and a fixed air flow rate, (b) infrared intensity with increasing total flow rate and a fixed equivalence ratio

수 있다. 이 같은 경향은 수소 유량이 증가함에 따라 적외선 방출 강도 증가가 관찰된다는 기존 연구 결과와 일치한다<sup>(18)</sup>.

Fig. 13 (b)는 당량비를 0.48로 고정하고, 공기와 수소의 부피 유량을 함께 증가하며 전체적인 유량 증가에 따른 수소 화염의 적외선 방출 강도를 측정하는 것을 나타낸다. 수소와 공기에 공급 유량이 증가함에 따라 적외선 방출 강도도 증가하였다. 따라서 당량비 뿐만 아니라 공급되는 수소와 공기 유량에 증가에 따라서 적외선 방출 강도가 증가하는 것을 확인하였다.

### 3.6 수소와 부탄 화염의 희박 날림 한계 분석

마이크로믹스 연소기에서 형성되는 수소 화염과 부탄 화염에 대해 희박 연소 조건 범위를 평가하고, 희박 날림(lean blow-off)이 발생하는 당량비 한계를 공기 유량에 따라 정량적으로 분석하였다. 실험 중 희박 날림은 주어진 공기 질량 유량 조건에서 마이크로믹스 연소기 화염이 더 이상 지속되지 않고 소멸되는 지점을 의미한다. 구체적으로 각 공기 질량 유량에서 당량비를 단계 별로 감소시키며 적외선 카메라로 화염의 적외선 강도를 관측하였다. 이를 통해 화염의 적외선 강도가 짧은 시간 동안 20% 이상 감소하였을 때 희박 날림이 발생한 것으로 판단하였다. Fig. 14는 수소 화염, Fig. 15는 부탄 화염에 대해 공기 질량 유량에 따른 희박 날림 영역과 안정적 연소 영역을 구분하여 나타냈다.

수소 화염은 공기 유량이 매우 적은  $0.4 \times 10^{-3}$  kg/s 이하인 조건에서는 당량비( $\phi$ ) 약 0.04에서 희박 날림이 발생하였다. 공기 유량이 일정 수준 이상에서는 희박 날림 한계가 그보다 높았으며, 공기 유량  $0.4 \times 10^{-3}$  kg/s 이상인 조건에서는 당량비 0.34 수준까지 안정적인 연소가 가능했다. 실험으로 확인한 최대 공기 유량인  $1.4 \times 10^{-3}$  kg/s까지도 최저 당량비는 0.3~0.4 수준으로 유지되었다.

부탄 화염은 수소에 비해 전반적으로 높은 당량비에서 희박 날림이 발생하는 경향을 보였다. Fig. 15에 나타난 바와 같이, 일부 조건에서는 안정적인 화염이 유지되는 최소 당량비가 1.0 이상인 경우도 관찰되었다. 두 연료를 비교했을 때,

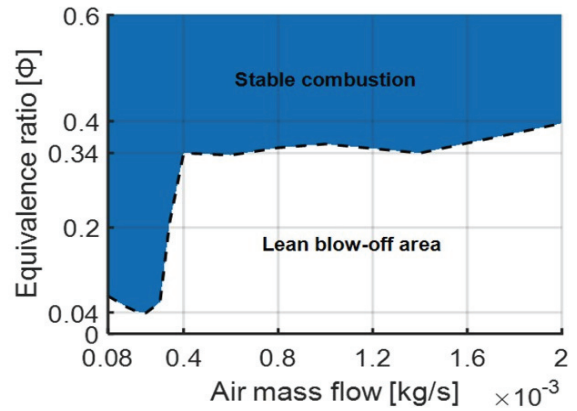


Fig. 14 Operating map showing stable combustion and lean blow-off regions as a function of air mass flow rate and equivalence ratio for hydrogen combustion

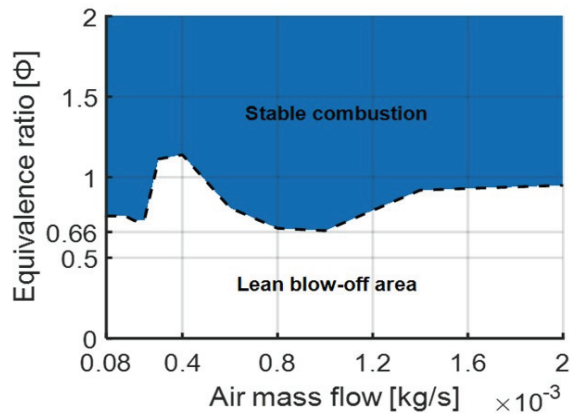


Fig. 15 Operating map showing stable combustion and lean blow-off regions as a function of air mass flow rate and equivalence ratio for butane combustion

수소 화염이 부탄 화염에 비해 희박 연소가 가능한 영역이 상대적으로 넓고, 본 연구에서 사용된 자체 설계 제작된 마이크로믹스 연소기는 매우 낮은 당량비 조건에서 안정적인 수소 화염을 유지할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

결론적으로, 수소 화염은 매우 희박한 조건에서도 안정적으로 유지될 수 있지만, 부탄 화염은 상대적으로 높은 당량비 조건에서 안정적인 연소가 가능하다. 따라서 자체 설계 제작한 마이크로믹스 연소기에서 수소 연료를 사용한 희박 연소 운용 가능성을 확인하였고 다양한 조건에서 높은 연소 안정성을 확보한 것을 실험적으로 확인하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 자체 설계 제작한 30 kW 수소 전소용 마이크로믹스 연소기에서 형성되는 화염을 대상으로 적외선 카메라 측정을 적용하여 희박 연소 조건에서 수소 화염 특성을 실험적으로 분석하였다. 실험은 상온, 상압의 실험실 환경에서

수행되었으며, 연료 종류, 유량 조건, 당량비 변화에 따른 화염 구조와 적외선 방출 강도의 변화를 도시하고 분석하였다.

수소 화염은 가시광 영역에서 거의 관찰되지 않는 특성을 가지지만, 본 연구에서 7-14  $\mu\text{m}$  를 수신하는 적외선 카메라를 사용하여 측정했을 때 수증기와 고온 연소 생성물로부터 방출된 적외선 신호를 감지하여 화염 또는 플룸의 형태를 가시적으로 확인할 수 있었다. 따라서 7-14  $\mu\text{m}$  에 해당하는 긴파장 적외선(LWIR) 측정이 수소 화염의 형상과 구조를 효과적으로 시각화하고 분석하는 데 적합함을 확인하였다.

적외선 기반 측정을 사용하여 수소와 부탄 화염을 비교 분석하고, 연료의 물리적 특성에 따른 화염 또는 플룸의 형상, 화염 길이, 적외선 방출 강도의 차이를 분석하였다. 수소 화염은 부탄에 비해 화염 길이가 짧고 화염 크기가 작게 형성되며, 이러한 특성이 적외선 이미징에서도 명확하게 나타났다. 다양한 수소 유량과 당량비 조건에서 실험을 수행한 결과, 연료 유량 증가에 따라 발열량과 고온 영역이 증가하고, 이에 따라 적외선 방출 강도 또한 증가하는 경향이 관찰되었다. 화염 형태는 당량비 변화의 영향을 크게 받지만, 동일한 당량비 조건에서도 유량 변화에 따라 화염 크기와 방출 신호 크기가 다소 달라지는 현상은 연소기 성능 해석에서 유량이 중요한 변수임을 강조한다.

마이크로믹스 연소기에서 수소와 부탄 화염의 희박 날림 한계를 측정하였다. 비교를 통해 수소 화염은 부탄 화염 한계보다 매우 낮은 당량비 0.34에서도 안정적인 연소가 가능한 것을 확인하였다. 당량비가 낮은 희박 연소 조건에서는 화염의 온도가 낮고, 이러한 영역에서 가스터빈을 운전할 수 있는 특성은 질소산화물 배출을 저감하기 위해 활용할 수 있는 수소 연료의 장점이다. 이 결과로 미루어 질소 산화물 배출이 매우 낮은 수소 가스터빈 운전이 가능함을 확인할 수 있다. 궁극적으로 마이크로믹스 연소기를 사용한 수소 전소 가스터빈이 상용화되면 항공기, 수소 발전소 등 다양한 분야에서 친환경 동력을 제공할 수 있다.

본 연구는 수소 화염 시각화, 적외선 방출 특성 분석, 희박 연소 조건 범위 평가를 통해 마이크로믹스 연소기의 설계 검증과 희박 수소 연소 실현 가능성을 실험적으로 입증한 기초 연구로서 의의를 가진다. 향후 연구에서는 연소기 부품의 표면 온도 측정과 배출가스 분석을 통해 성능을 정량적으로 평가함으로써, 초 저 NO<sub>x</sub> 수소 가스터빈 연소기 개발을 위한 최적 설계 인자를 도출할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2022-NR070875). 또한, 이 논문은 한국항공대학교 2023 재단 기금 연구과제 연구비를 제공받아 수행되었음.

## References

- (1) I. Dincer, and C. Acar, 2015, "Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 34, pp. 11094~11111.
- (2) T. Egeland-Eriksen, A. Hajizadeh, and S. Sartori, 2021, "Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: achievements and perspectives," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 63, pp. 31963~31983.
- (3) D. Kim, 2019, "Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology," *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 24, No. 4, pp. 1~10.
- (4) T. Lieuwen, V. McDonell, D. Santavicca, and T. Sattelmayer, 2008, "Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors," *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, No. 6, pp. 1169~1192.
- (5) T. Lieuwen, V. McDonell, E. Petersen, and D. Santavicca, 2008, "Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, No. 1, pp. 1167~1190.
- (6) A. Haj Ayed, K. Kusterer, H. H.-W. Funke, J. Keinz, C. Striegan, and D. Bohn, 2015, "Experimental and numerical investigations of the dry-low-NO<sub>x</sub> hydrogen micromix combustion chamber of an industrial gas turbine," *Propulsion and Power Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 123~131.
- (7) L. Beltrán, J. Sandoval, J. Llain, M. Carmona, C. Audivet, and V. Pugliese, 2024, "Hydrogen combustion in micromix burners: present stages, opportunities, and challenges," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 96, pp. 622~638.
- (8) S. Ock, M. Kim, and S. Park, 2023, "Development of a 30 kW hydrogen-fueled micromix combustor for research," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 72~81.
- (9) A. H. Lefebvre and D. R. Ballal, 2010, "Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions," CRC Press.
- (10) M. Kim, S. Ock, and S. Park, 2024, "Numerical analysis study on the factors affecting NO<sub>x</sub> emission reduction in hydrogen-fueled micromix combustors," in *Proceedings of the KSME 2024 Spring Conference*, pp. 339.
- (11) Det-Tronics, 2019, "Hydrogen and fire safety," White Paper, No. 74-1019.1.1, pp. 1~5.

- (12) SR. W. Schefer, W. D. Kulatilaka, B. D. Patterson, and T. B. Settersten, 2009, "Visible emission of hydrogen flames," *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 6, pp. 1234-1241.
- (13) E. K. Plyler and C. J. Humphreys, 1948, "Infrared emission spectra of flames," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 40, No. 6, pp. 449-456.
- (14) V. Weiser, E. Roth, S. Kelzenberg, W. Eckl, N. Eisenreich, and G. Langer, 2005, "Measuring and modelling unsteady radiation of hydrogen combustion," *Proceedings of the European Combustion Meeting 2005*, The Combustion Institute, pp. 1-6.
- (15) C. Bernardy, A. K. Habib, M. Kluge, B. Schalaus, H. Kant, M. Schulze, A. Orchini, 2025, "Large-scale investigations of the thermal radiation of hydrogen jet flames," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 94, pp. 105491.
- (16) T. Gautam, 1984, "Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air," *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, No. 1, pp. 17-29.
- (17) Naeem Khan, K.R.V. Manikantachari, Rahul Dutta Roy, V. Raghavan, 2013, "Experimental study of characteristics of LPG-hydrogen jet diffusion flames," *Asian Journal of Scientific Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 227-235.
- (18) B. R. Chowdhury, E.S. Hecht, 2019, "Flame characteristics of cryogenic hydrogen releases from high-aspect ratio nozzles," *11th U.S. National Combustion Meeting*, Western States Section of the Combustion Institute, pp. 1-8.